

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**EFFECTO DE DISTINTAS ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN  
NITROGENADA SOBRE EL RENDIMIENTO Y CALIDAD  
PANADERA DE TRIGO**

por

**Leonardo Ismael BLANCO ROMANO  
Héctor Andrés VILLAR PECULIO**

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

**MONTEVIDEO  
URUGUAY  
2010**

Tesis aprobada por:

Director: \_\_\_\_\_  
Ing. Agr. Oswaldo Ernst

\_\_\_\_\_  
Ing. Agr. Esteban Hoffman

\_\_\_\_\_  
Ing. Agr. Sebastián Mazzilli

Fecha: 17 de diciembre de 2010

Autores: \_\_\_\_\_  
Héctor Andrés Villar Peculio

\_\_\_\_\_  
Leonardo Ismael Blanco Romano

## AGRDECIMIENTOS

A mis hermanos, a mi madre, a mis amigos y a la AEA.  
Andrés Villar.

A todos mis amigos, al grupo de compañeros de la EEMAC 2008, a toda mi familia por el apoyo, a mi novia, y particularmente a mi madre por el constante esfuerzo y el incesante apoyo brindado en todo momento.  
Leonardo Blanco.

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PAGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES.....	VI
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA</u> .....	4
2.1. <u>ROL DEL NITRÓGENO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL RENDIMIENTO Y PROTEÍNA EN GRANO</u> .....	4
2.1.1. <u>Relación entre el nitrógeno y los componentes del rendimiento</u> .....	4
2.1.2. <u>Absorción y acumulación de nitrógeno</u> .....	7
2.1.3. <u>Retraslocación de nitrógeno</u> .....	10
2.1.4. <u>Eficiencia de uso del N</u> .....	10
2.1.5. <u>Factores que afectan la utilización del nitrógeno</u>	11
2.1.6. <u>Pérdidas de nitrógeno y materia seca</u> .....	14
2.1.7. <u>Proteína en grano</u> .....	15
2.2. <u>FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y PROTEÍNA</u> .....	19
2.2.1. <u>Modelo de ajuste de N en base a indicadores de respuesta</u> .....	19
2.2.2. <u>Efecto del agregado de nitrógeno tardío sobre el rendimiento y la proteína</u> .....	22
2.2.3. <u>Efecto del azufre sobre el rendimiento</u> .....	25
2.3. <u>CALIDAD DE TRIGO PARA PAN</u> .....	26
2.3.1. <u>Definición de calidad</u> .....	26
2.3.1.1. <u>Proteína en grano</u> .....	27
2.3.1.2. <u>Gluten húmedo (GH)</u> .....	27
2.3.1.3. <u>Fuerza de la masa (W)</u> .....	27
2.3.1.4. <u>Relación Tenacidad-Extensibilidad (P/L)</u> .....	28
2.3.1.5. <u>Otros parámetros de interés</u> .....	28
2.3.2. <u>Variables de manejo que modifican la calidad panadera</u> .....	29
2.3.2.1. <u>Efecto de la fertilización nitrogenada en la calidad panadera</u> .....	30
2.3.2.2. <u>Influencia del azufre en la calidad panadera</u> .....	32

2.3.3. <u>Otros factores a considerar sobre la calidad del grano de trigo</u> .....	33
3. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	35
3.1. <u>UBICACIÓN</u> .....	35
3.1.1. <u>Características de las chacras y detalles de la siembra</u> .....	35
3.2. <u>TRATAMIENTOS</u> .....	36
3.3. <u>DISEÑO EXPERIMENTAL</u> .....	37
3.4. <u>DETERMINACIONES</u> .....	37
3.4.1. <u>Suelo</u> .....	37
3.4.2. <u>Planta</u> .....	37
3.4.3. <u>Determinación de rendimiento y sus componentes</u> .....	37
3.4.4. <u>Calidad del grano y harina</u> .....	38
3.4.5. <u>Cuantificación de la cantidad y respuesta del nitrógeno utilizado</u> .....	39
3.5. <u>ANÁLISIS ESTADÍSTICO</u> .....	40
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	40
4.1. <u>DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO 2008</u> .....	40
4.1.1. <u>Precipitaciones</u> .....	40
4.1.2. <u>Temperatura</u> .....	41
4.2. <u>EFFECTO DE LAS ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN</u>	
4.2.1. <u>Rendimiento en grano</u> .....	41
4.2.2. <u>Relaciones entre los componentes del rendimiento</u> .....	41
4.2.3. <u>Posibles determinantes de la expresión de la respuesta en rendimiento al agregado de N a Z 30</u> .....	48
4.2.4. <u>Calidad del grano</u> .....	52
4.2.4.1. <u>Contenido de proteína</u> .....	52
4.2.4.2. <u>Gluten húmedo</u> .....	58
4.2.5. <u>Calidad de las harinas</u> .....	60
4.2.5.1. <u>Fuerza de la masa (W)</u> .....	60
4.2.5.2. <u>Relación tenacidad-extensibilidad</u> .....	62
4.2.5.3. <u>Estabilidad y absorción farinográfica</u> .....	64
5. <u>CONCLUSIONES</u> .....	67
6. <u>RESUMEN</u> .....	70
7. <u>SUMMARY</u> .....	72
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u> .....	74

## LISTA DE CUADROS E ILISTRACIONES

Cuadro No.	Página
1. Sitios donde se realizaron los ensayos.....	35
2. Descripción del manejo del cultivo hasta la instalación del experimento....	35
3. Dosis de nitrógeno y niveles críticos de NO <sub>3</sub> en suelo (a 20cm de profundidad) a la siembra y Z 22 según sitio.....	36
4. Manejo sanitario según sitio.....	36
5. Porcentaje de nitrógeno en planta, fecha de aplicación y dosis de nitrógeno aplicada según tratamiento y sitio a Z30.....	37
6. Nitrógeno en planta, rendimiento estimado, y unidades de nitrógeno agregadas para todos los tratamientos y sitios a Z30.....	43
7. Eficiencia de uso de nitrógeno según sitio y tratamiento para los ambientes con respuesta.....	45
8. Número de espigas por metro cuadrado según tratamiento y sitio.....	47
9. Variable de manejo según sitio.....	49
10. Indicadores de respuesta, unidades de nitrógeno agregadas (UN) y rendimiento logrado según sitio.....	51
11. Porcentaje de proteína promedio según tratamiento para los sitios sin respuestas en rendimiento.....	52
12. Eficiencia de uso del nitrógeno y contenido de proteína en grano en función del tratamiento y el sitio en ambientes con respuesta en rendimiento.....	56
13. Gluten húmedo y contenido de proteína en grano en función del tratamiento y el sitio en ambientes con respuesta en rendimiento.....	59
14. Fuerza de la masa y contenido de proteína en grano en función del tratamiento y el sitio en ambientes con respuesta en rendimiento.....	61
15. Absorción farinografica según tratamiento y sitio .....	65
16. Estabilidad farinográfica según tratamiento y sitio.....	66

Figura No.

1. Precipitaciones mensuales para el año 2008 y serie histórica (1961-1990) en Paysandú y Young.....	40
2. Temperatura media mensual para el año 2008 y serie histórica (1961-1990) en Paysandú.....	41
3. Rendimiento promedio según sitio.....	42
4. Rendimiento en grano según sitio y tratamiento para los ambientes con respuesta.....	44
5. Rendimiento en grano según sitio y tratamiento para los ambientes sin respuesta.....	44
6. Eficiencia al agregado de N a Z30 en rendimiento según rendimiento por sitio y tratamiento.....	46
7. Rendimiento en grano en función del número de espigas por metro cuadrado.....	48
8. Rendimiento promedio por sitio según fecha de siembra.....	50
9. Rendimiento (a) y porcentaje de proteína en grano (b) en relación al balance entre el nitrógeno agregado y requerido en situaciones con y sin N a Z 30.....	54
10. Porcentaje de proteína (a) y nitrógeno exportado (b) en función del rendimiento en grano.....	55
11. Porcentaje de proteína en función del balance del nitrógeno absorbido y el requerido por el cultivo.....	56
12. Contenido de nitrógeno en grano en función del porcentaje de gluten húmedo según sitio.....	59
13. Fuerza de la masa en función del contenido de proteína según sitio.....	60
14. Relación P/L en función del porcentaje de proteína según sitio.....	63
15. Distribución de la población de los resultados de la relación tenacidad-extensibilidad según tratamiento.....	64
16. Absorción farinográfica en función del porcentaje de proteína según sitio.....	66

## **1. INTRODUCCIÓN**

En nuestro país, el cultivo de trigo ha tenido un crecimiento sostenido en la superficie sembrada desde comienzos de esta década. En la zafra 2009, la superficie sembrada con cultivos de invierno fue estimada en 729 mil hectáreas, de las cuales 553 mil corresponden a trigo. Esto supera en casi 80 mil hectáreas la siembra de la zafra anterior. Para ubicar un antecedente de similar magnitud debemos retrotraernos al año 1966, oportunidad en que se sembraron 547 mil hectáreas (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010).

El fuerte crecimiento en superficie y en productividad del cultivo ha provocado un cambio sustancial en el mercado. En las últimas zafras las toneladas totales de trigo producido en nuestro país superan ampliamente lo requerido en el mercado interno. Por lo tanto, mientras en años anteriores el principal destino era el uso doméstico, en las últimas zafras el país se ha convertido en un sostenido exportador de este cereal (URUGUAY. MGAP. DIEA, 2010). Tanto en Uruguay (Vázquez, 2009), como en Brasil, país que importa la mayor parte de los trigos que producimos, el destino final de la harina es la industria panadera, por lo que el concepto de calidad manejado en este trabajo apunta a satisfacer los requerimientos de ese sector de la cadena del cereal. Las exigencias (desde la perspectiva de la calidad panadera) del mercado interno son similares a las requeridas para la exportación, por lo que los planteos para la producción según el destino no son antagónicos. De todas maneras el consumidor ha ido aumentando progresivamente sus exigencias y el tipo de demandas (USDA, 2009), lo que sumado al fuerte crecimiento de la automatización del proceso de panificación, han determinado que la importancia de la calidad haya tenido un franco crecimiento en el mercado del trigo, y se estima que seguirá en ese sentido. Es así que Brasil está estudiando una nueva normativa que aumentaría los requisitos de calidad. Por otra parte, existe una presión continua al aumento de la productividad por unidad de superficie dada por el contexto económico actual del mercado de este producto, en el cual la relación costo/beneficio es el principal factor influyente. En dicho contexto, el ajuste de las medidas de manejo que influyen sobre estas variables, se torna de vital importancia.

El trigo que se produce en Uruguay en su gran mayoría presenta problemas de calidad asociados al bajo nivel de nitrógeno en grano. Esto determina a su vez, mala aptitud panadera, consecuencia de la alta tenacidad y la baja fuerza de la masa de la harina producida (bajo porcentaje de proteína en grano) (Ernst et al. 1999, Ernst et al. 2006a). Cuando en un ambiente los niveles de nitrógeno ofrecidos por el suelo son bajos, se limita la cantidad de grano potencialmente obtenible, y determina que los máximos rendimientos y niveles de proteína en grano alcanzados, sean los que permite el nitrógeno que brinda el suelo y/o el fertilizante agregado. En ese contexto, en un cultivo como el trigo donde además del rendimiento en grano, es deseable aumentar el nivel de proteína en el mismo, el problema puede estar asociado en parte a la dosis nitrógeno y/o al momento en el ciclo del cultivo que se decide agregarlo (fertilizaciones

muy tempranas en el ciclo, dosis que no llegan a cubrir los requerimientos del nutriente por el cultivo, etc.).

El manejo del nitrógeno en el cultivo de trigo, así como en los demás cultivos de invierno sembrados en el país, es una de las prácticas más importantes e influyentes en la determinación del éxito desde el punto de vista del rendimiento y calidad del grano. La dinámica de este nutriente en el suelo, sumado a la influencia que tienen sobre ella, algunos factores ambientales como por ejemplo las lluvias y la temperatura, hace que su disponibilidad para los cultivos no sea siempre acorde a sus requerimientos, y más aún si se desea obtener altos rendimientos. Unido a esto, el rol de este nutriente sobre las variables que definen el resultado económico, hace que sea indispensable su correcta utilización, basando el agregado en criterios que optimicen su uso, de modo de obtener la mayor cantidad y la mejor calidad del producto, con el menor consumo de fertilizante. Esto se verá reflejado en la ecuación económica del cultivo, y en el impacto ambiental que genera el nitrógeno que no absorbe el mismo.

La trascendencia que tiene el nitrógeno en las variables que determinan el resultado económico, junto a los factores que hacen que las variaciones en la capacidad de aporte de nitrógeno entre chacras y años sean muy importantes (características climáticas del Uruguay, las variaciones de su contenido entre suelos, la historia de chacra y el cultivo antecesor), hicieron que varios investigadores nacionales (Oudri 1976, Capurro et al. 1982, Baethgen 1992, Hoffman et al. 1999, Perdomo et al., citados por Hoffman et al. 1999, entre otros) hayan puesto especial atención a su dinámica en el suelo, y como se relaciona esta con los componentes del rendimiento y calidad del grano de los cultivos de invierno. Al respecto, Baethgen (1992) generó un modelo para cebada cervecera que permite ajustar la dosis de N según el estado nutricional de la planta en el estadio Zadoks 30 (Z 30). Este requiere determinar el contenido de N total de la parte aérea de la planta y estimar el potencial de rendimiento. El modelo fue validado por Hoffman y Ernst (1996) ( $n=100$   $r^2=0.99$ ) en cebada y posteriormente en el cultivo trigo, demostrándose que el porcentaje de nitrógeno en planta es indicador de respuesta a nitrógeno en Z 30 (Hoffman et al., 1999); y que se logran las mismas eficiencias de uso en trigo, con las cuales fue generado en el cultivo de cebada evitando el aumento en el contenido de proteína en grano (15 kg de grano/kg de N). Hoffman y Ernst<sup>1</sup> muestran que a nivel de producción esta propuesta ha sido muy poco adoptada, y por lo tanto el ajuste del nitrógeno se constituye en una condicionante para lograr compatibilizar rendimiento, calidad del grano y calidad de las harinas producidas. La hipótesis generada a partir del manejo de la fertilización nitrogenada en trigo, es que la cantidad de nitrógeno agregada por fertilización es muy poco variable, el rendimiento en grano queda sujeto al aporte del nutriente desde el suelo, y la concentración de proteína en el

---

<sup>1</sup> Hoffman, E.; Ernst, O. 2007. Diagnóstico del manejo de la fertilización en cultivos de secano en Uruguay. In: Seminario Internacional de Nutrición Vegetal Criterios para la Fertilización de Cultivos y Pasturas (1º, 2007, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. 1 disco compacto (sin publicar)

grano de trigo es la máxima que se puede obtener con el nitrógeno disponible y el rendimiento obtenido.

El modelo de fertilización propuesto por Baethgen (1992) establece un máximo en el porcentaje de proteína en grano potencialmente obtenible. Las cantidades de nitrógeno a aplicar en función del nivel de nitrógeno en planta fueron diseñadas con tal objetivo para cebada cervecera, de manera que cada aumento en rendimiento en respuesta al agregado de N, diluye el contenido de este nutriente en el grano evitando que se eleve. En base a esto, en el presente trabajo se plantea utilizar una dosis superior (30% más) a la recomendada utilizando este modelo, lo cual se asociaría con eficiencias de uso de nitrógeno menores a 15 kg de grano/kg de N agregado, procurando aumentar el contenido de proteína en grano. A pesar que las eficiencias de uso del nitrógeno que se pretende obtener son más bajas que la descrita anteriormente, mantienen la relación costo-beneficio de la aplicación de nitrógeno en valores que hacen económicamente viable la práctica de fertilización.

Además de la influencia del nitrógeno sobre algunas de las variables que definen la calidad panadera de la harina de trigo; las aplicaciones con azufre aparecen (Moss et al. 1981, Bailey 1987) como una estrategia capaz de mejorar la calidad panadera del grano. El azufre como el nitrógeno es un componente esencial de las proteínas participando en la configuración tridimensional y unión de las subunidades (los enlaces sulfhidrilo de la cisteína son esenciales para la formación de gluten). Por lo tanto, el agregado de este nutriente puede tener efecto sobre el contenido de los puentes de disulfuro que integran las proteínas formadoras de gluten. Teniendo eso presente, y dado que en Uruguay es común obtener harinas con valores de relación tenacidad/extensibilidad (P/L) de 2 o aún mayores, (Ernst et al., 2006a); en este trabajo se propone introducir azufre mediante el agregado de sulfato de amonio a Z 30. La proporción de nitrógeno y azufre que contiene dicha fuente permite fertilizar en función de las necesidades de nitrógeno del cultivo, e incluir cantidades de azufre que posibilitan evaluar su efecto en la relación tenacidad-extensibilidad de las masas de harinas logradas.

## **2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. ROL DEL NITRÓGENO EN LA CONSTRUCCIÓN DEL RENDIMIENTO Y PROTEÍNA EN GRANO**

#### **2.1.1. Relación entre el nitrógeno y los componentes del rendimiento**

Cuando el agua, u otro factor no está limitando el crecimiento, la producción de biomasa del cultivo y el rendimiento final están estrechamente relacionadas a la disponibilidad de nitrógeno (García, 2004). Este nutriente tiene la capacidad de afectar numerosos procesos fisiológicos dadas las importantes funciones que cumple en la planta, principalmente porque es un componente esencial en la síntesis y estructura proteica. La disponibilidad de nitrógeno va a afectar a distintos componentes del rendimiento y/o al contenido de nitrógeno en grano dependiendo del momento del ciclo del cultivo que se analice.

El número de espiguillas/espigas, se define cuando se forma la espiguilla terminal (inmediatamente antes del estado de Z 30). La definición del número de flores se prolonga durante el tiempo que demore el alargamiento del tallo (García, 1994). En la determinación de un manejo óptimo del N cabe preguntarse que es lo que se está estimulando al aumentar la disponibilidad del N en los diferentes estados de desarrollo del cultivo. Y por otro lado, cuáles son los posibles inconvenientes de aumentar esa disponibilidad de N en cada una de las etapas del cultivo.

Las diferencias en precipitación y temperatura que se dan entre años para un mismo sitio en nuestro país, determinan variaciones importantes en cuanto a la disponibilidad de N. Dichas oscilaciones afectan tanto el proceso de macollaje, como el de formación de espiguillas fértiles, y la cantidad de materia seca producida, y por lo tanto la eficiencia de uso del nitrógeno agregado (García, 1994). En las condiciones climáticas medias del Uruguay, y en el caso de un cereal de invierno (sea trigo o cebada), una alta disponibilidad de nitrógeno a la siembra estimula la implantación del cultivo y el comienzo del macollaje. La disponibilidad del nitrógeno al inicio del macollaje estimula fundamentalmente el número de macollos obtenidos. Finalmente el nitrógeno a fines de macollaje (inmediatamente antes del comienzo del encañado) afecta generalmente el número de macollos que producen espigas (Baethgen, 1992).

Por su parte, Kholi y Martino (1998) mencionan que cuando las condiciones del año son muy favorables para el macollaje, el agregado de N resulta en un incremento sustancial de macollos, con alto porcentaje de sobrevivencia, a medida que el número de

espigas originadas se aproxima a  $800/m^2$ , las espigas cosechables son en promedio más chicas. La producción de espigas por planta está determinada por el macollaje y la sobrevivencia de los macollos, y depende fundamentalmente de la variedad, la luz, la humedad, la temperatura y el nivel nutricional del suelo. Un adecuado suministro de nitrógeno es esencial para incrementar la proporción de macollos que llegan a producir espigas. El nitrógeno a su vez puede incrementar el número de espiguillas por espiga, el número de granos por espiguilla, y el tamaño del grano, aunque su efecto sobre este último componente es menos consistente, pues es muy dependiente de las condiciones ambientales durante el llenado de grano. Si bien el N puede incrementar cada uno de los componentes individualmente, fenómenos compensatorios hacen que a menudo los componentes se correlacionen entre sí en forma negativa, tendiendo a provocar el incremento de uno ellos y la caída de otro.

Otros autores comentan que el agregado de N en alta proporción a la siembra provoca excesivo crecimiento y vuelco, determinando pérdidas de rendimiento (Pérez y Díaz, citados por Hoffman et al., 1999). García (1994), menciona que las diferencias en la disponibilidad de N en etapas tempranas del cultivo afectan más el número de macollos producidos que la población de espigas, ya que este componente del rendimiento se verá afectado por la oferta de N en las etapas posteriores del cultivo y por otros factores ambientales, los que determinan que una proporción importante de macollos no sobrevivan. Este autor también manifiesta que el agregado de mayores cantidades de N a Z 22 que las necesarias, favorece la formación de espiguillas, pero la consecuencia de esta práctica es la de un excesivo macollaje, que no resulta favorable para la formación de las flores. Como resultado se logra un mayor número de espiguillas estériles y se reduce la eficiencia del N utilizado. Esto puede deberse a que las aplicaciones tempranas (siembra y/o inicio de macollaje) son realizadas con demasiada anticipación al momento de mayores requerimientos de nitrógeno por el cultivo. Por esa razón puede esperarse que el uso de altas dosis de fertilizante aplicadas temprano en climas húmedos o sub-húmedos (como el de Uruguay), resulte en bajas eficiencias en la utilización del nitrógeno (Baethgen, 1992). Sin embargo, las aplicaciones de N realizadas al final del macollaje encuentran al cultivo en un estado de desarrollo inmediatamente previo al momento de mayor tasa de producción de materia seca y de absorción de nitrógeno. De todas maneras, es necesario un nivel suficiente de disponibilidad de N en el momento de la siembra, para permitir una buena implantación, así como en el comienzo del macollaje, para asegurar adecuada población de macollos.

En relación a lo descrito en el párrafo anterior, García (2006) comenta que para que se pueda expresar el rendimiento potencial de un cultivo de trigo es necesario asegurar la implantación y que el crecimiento inicial sea rápido. En contraposición a esto último, Hoffman et al. (1992), demuestran que para garantizar un alto número de macollos fértiles y mayor potencial de rendimiento es necesario que el crecimiento en las primeras etapas del cultivo sea lento. Esto estaría explicado por una relación de

competencia entre los macollos, los cuales en la medida que lleguen al período de mayor competencia (encañado) con menores diferencias en edad y peso, mayor va a ser la proporción que logre sobrevivir y concretar rendimiento. Hoffman et al. (1994), muestran también que tasas de crecimiento del cultivo promedio de 214 kg MS/ha/día en el período pre-antesis se obtuvieron en las situaciones fertilizadas con N y estuvieron asociadas a mayor número de espigas y granos por m<sup>2</sup>, en relación a aquellas situaciones donde no se fertilizó y el crecimiento diario fue de 166 kg MS/ha. Para estas últimas, la fertilidad de los tallos fue sustancialmente menor. Estos resultados fueron obtenidos en cebada pero ese comportamiento opera de la misma manera en trigo. En conclusión, si a las variables de manejo que promuevan un crecimiento sincronizado de los tallos, se las acompaña con el aumento en la disponibilidad de N en el momento de mayor crecimiento y absorción (desde comienzo del encañado hasta floración) es posible aumentar el número de granos por m<sup>2</sup> sustancialmente, y por tanto el potencial de rendimiento.

Sarandón y Gianibelli (1990), encontraron que agregados de nitrógeno a fin de macollaje, produjeron un aumento de materia seca del 30% y un aumento del rendimiento del 48%, determinando un incremento del índice de cosecha del 10,7% con respecto al testigo. Al igual que lo encontrado para agregado a siembra, el aumento de rendimiento es producto de mayor número de granos/m<sup>2</sup>, determinado por el incremento del número de espigas/m<sup>2</sup> y granos/espiga. Los mismos autores encuentran que la aplicación en este estadio no modificó el número de espiguillas/espiga, lo que se debe a que el ápice ya estaba en espiguilla terminal. Este componente del rendimiento sólo puede ser alterado si la aplicación se realiza cerca del estado de doble arruga (Langer y Liew, citados por Sarandón y Gianibelli, 1990). Aunque el N aplicado tarde en general tiene poco efecto sobre el macollaje y el número de espiguillas por espiga, puede incrementar la tasa de desarrollo de las flores y con ello la formación de granos por espiga, pues permite que se llegue a la polinización con un número mayor de flores completamente desarrolladas (García, 1994). Kirby y Appleyard, citados por García (1994), también manifiestan que la formación de grano es estimulada con las aplicaciones de N a fin de macollaje, probablemente al beneficiar tanto el desarrollo de las flores como su sobrevivencia.

Con respecto a la concentración de proteína en el grano, es abundante la información que muestra que cuanto más tarde y mayor cantidad de nitrógeno absorbida por un cultivo de cebada y trigo, más alto es el contenido de nitrógeno en el grano (Baethgen 1992, Perdomo et al., citados por Hoffman et al. 1999). Al no corregir las deficiencias de N en Z 30 la eficiencia de uso del nitrógeno para producir grano aumenta, pero si el cultivo tiene una demanda mucho mayor por clima o por bajo aporte del suelo es muy probable que la proteína en grano sea un problema, pues la mayor parte de ésta proviene de lo que se acumuló en pre-floración (Castro et al., 2006). El mismo autor menciona que el adecuado manejo del N tiene un efecto consistente en el aumento de la proteína en grano. El fraccionamiento del nitrógeno tiene efecto sobre el

rendimiento, pero es mayor el efecto que se obtiene por dicha práctica sobre el contenido de proteína en el grano.

Sarandón y Gianibelli (1990), no encontraron respuesta en rendimiento o modificaciones en sus componentes para agregados de nitrógeno a antesis y/o post-antesis. Esto puede explicarse con lo reportado por Hoffman y Ernst, citados por Hoffman et al. (1999), los cuáles determinaron que cuando la absorción de nitrógeno hasta espigazón supera los 130 a 140 kg/ha, no se modifica el rendimiento de cebada cervecera y se incrementa el contenido de proteína del grano. Cada aumento porcentual del contenido de proteína en grano se logró con 40 kg/ha más de N absorbidos a espigazón. La información presentada (Sarandón y Gianibelli 1990, Baethgen 1992, Hoffman et al. 1999, Hoffman et al. 2001, Castro et al. 2006) es consistente en marcar que existe la posibilidad de aumentar la cantidad de nitrógeno absorbido previo a antesis-espigazón mediante el agregado nitrógeno a Z 30, y por tanto aumentar el contenido de proteína mediante el manejo del nitrógeno en ese estadio. Cómo manejar al nitrógeno eficientemente para que eso se concrete, es una de las interrogantes que este trabajo pretende dilucidar.

En definitiva la base del manejo de nitrógeno, radica en que el potencial de rendimiento ( $\text{granos/m}^2$ ) se construye en las primeras etapas del ciclo del cultivo, y se concreta durante el período de encañado, al igual que la concentración de N en grano que se concreta tarde en el ciclo. El ajuste de nitrógeno a siembra y Z 22 permiten por lo tanto, construirlo y a Z 30, concretarlo (Hoffman et al., 1999).

### **2.1.2. Absorción y acumulación de nitrógeno**

La acumulación de nitrógeno en planta sigue aproximadamente el mismo patrón de acumulación que la materia seca (Kemanian y Viega, 1999). La máxima tasa de acumulación de nitrógeno en planta y materia seca ocurre aproximadamente durante el periodo de treinta días pre antesis y la máxima acumulación ocurre aproximadamente a antesis (Daigger et al. 1976, Palta y Fillery 1993, Oscarson et al. 1995). Palta y Fillery (1993), encuentran la máxima tasa de absorción entre el día 47 y 82 post-siembra, esto es mitad de macollaje y elongación de tallos respectivamente. Estos autores encontraron una muy baja absorción de N en el período siembra-Z 30 (0,82 kg/ha/día), mientras que la mayor tasa de absorción se dio entre los estadios Z 30 y Z 33 (2,86 kg/ha/día durante 15 días). Posteriormente observaron una absorción de 2,47 kg/ha/día entre el período Z 33 y Z 47 durante 19 días para finalmente entrar en un período de pérdidas hasta cosecha (-0,89 kg/ha/día). Los autores también expresan que una alta proporción del nitrógeno retraslocado al grano proviene de lo acumulado hasta antesis. Pero no todo lo acumulado hasta ese momento se deposita en el grano, ya que una parte importante se pierde en forma de amoníaco. Los fenómenos de pérdida serán discutidos en 2.1.6.

El nitrógeno absorbido desde la emergencia hasta fin de macollaje constituye un tercio o menos del total asimilado a lo largo del ciclo. Al inicio del crecimiento de la caña y hasta antesis, el patrón de absorción de nitrógeno es del tipo exponencial, declinando o cesando según la variedad y/o las condiciones ambientales luego de la floración (Carpenter et al., citados por García 1994, Fischer, citado por Kohli y Martino 1998). Este comportamiento está vinculado al crecimiento y muerte del sistema radicular. El crecimiento de las raíces cesa en general durante la antesis, y su muerte comienza durante la formación del grano, pero una buena disponibilidad de agua y nutrientes, puede prolongar el desarrollo y funcionalidad de las raíces y la capacidad de absorción de nitrógeno por el cultivo (Evans et al., citados por García, 1994). Uno de los factores más limitantes para la absorción de N en post-antesis es la escasez de agua en el suelo (Kohli y Martino, 1998). Esta información acentúa la importancia del agregado de N antes de que el cultivo pierda la capacidad de absorberlo, lo cual estaría asociado a agregados previo a floración, inmediatamente antes que se dé la mayor tasa de absorción, acumulándolo en las partes vegetativas del cultivo para luego retraslocarlo al grano.

Varios trabajos a nivel internacional mencionan que durante el llenado de grano existen altas probabilidades de ocurrencia de estrés hídrico. Esto estaría limitando la absorción post-antesis por lo cual la absorción pre-antesis se vuelve muy importante (Gregory et al., Smith y Whitfield, Spiertz y De Voz, Smith et al., Palta y Fillery, citados por Mazzilli, 2004). Dadas las condiciones de Uruguay, este fenómeno tiene una alta probabilidad de ocurrencia, sobre todo en cultivos con una importante acumulación de materia seca, lo cual provocaría grandes pérdidas de agua por evapotranspiración (Garín et al., 1991). Muchos suelos de la región tienen problemas de infiltración que impiden un buen aprovechamiento del agua de lluvia, u horizontes compactos que limitan el desarrollo radicular profundo; por consiguiente la ocurrencia de estrés hídrico en etapas tardías del cultivo, es más frecuente que la previsible si se consideran las precipitaciones promedio (Kohli y Martino, 1998). La absorción de N durante este período estaría determinada por varios factores como lo son las condiciones ambientales (Spiertz, 1977), el tipo de suelo (Craswell y Strong, 1976) y control genético (Halloran 1981, Van Sanford y MacKown 1987). Cha y Durán (2001), muestran resultados similares a los de Palta y Fillery (1993), ellos encuentran que el período más importante en cuanto a la absorción de nitrógeno es el que va de Z 30 – Z 47 (90 kg N/ha). Dentro de éste, lo absorbido entre Z 33 y Z 47 (47 kg N/ha) explica la mayor parte de dicha acumulación. A partir de lo expresado por los autores citados, el agregado de N a Z 30 sería un excelente momento para garantizar una alta absorción de este nutriente, para que luego sea traslocado al grano (evitando la dilución), e independizarse de las condiciones ambientales que limiten durante el llenado de grano el proceso de absorción de nitrógeno.

En relación a lo anterior, Kanwarpal y Waines (1989), encontraron que los coeficientes de regresión observados mostraron que la absorción de nitrógeno post-

antes, estuvo asociada negativamente con el N pre-antes, y positivamente con el nivel de nitrógeno en grano. Cox et al. (1985), Harper et al. (1987), reportan un total de asimilación post-antes entre 10 y 22% del total de nitrógeno. Esto parecería estar de acuerdo con lo reportado por Oscarson et al. (1995), Loffler et al., Van Sanford y MacKown, citados por Mazzilli (2004), los cuáles encuentran que entre un 65 y 92 % del nitrógeno total del cultivo es absorbido pre-antes. De todas maneras una amplia dispersión de resultados es observada entre los diferentes autores. Además se ha reportado que agregados de nitrógeno a antes incrementan la absorción, pero parece no afectar la concentración de proteína en grano (Heitholt et al., citados por Bulman y Smith, 1994). Esta información va de la mano con la presentada en el párrafo anterior, en el sentido que Z 30 aparece como un momento muy apropiado para aplicar el nitrógeno en el cultivo para mejorar el rendimiento y la calidad del grano.

En trigo la cantidad de nitrógeno acumulado a antes está negativamente asociado con la absorción de nitrógeno en post-antes (Kanwarpal y Waines, 1989). Estos autores afirman que cultivos de elevado potencial presentan una absorción de aproximadamente el 90 % del nitrógeno pre-antes. A su vez comentan que cuando existen disminuciones en rendimiento pueden darse por absorción post-antes. Por este motivo, rendimiento en grano y absorción post-antes están negativamente relacionados (Kanwarpal y Waines 1989, Bullman y Smith 1994). Rendimientos elevados están asociados a mayor nitrógeno a antes por mayor cosecha de nitrógeno pre-antes, lo que también determina mayor nitrógeno en grano (Hoffman et al. 1999, Cha y Durán 2001). Cuando existen factores que limitan el crecimiento del cultivo antes de antes, puede existir aumento de la biomasa durante el llenado, por lo tanto aumenta la absorción de nitrógeno post-antes y aumenta la proteína. Sólo en estos casos existe relación positiva entre absorción de nitrógeno post-antes y proteína cruda en grano (Austin et al., citados por Mazzilli, 2004).

Como resumen de lo expresado, existe la capacidad de absorber nitrógeno en post-antes por el cultivo, el principal determinante de que esto suceda parece ser la biomasa acumulada a antes lo que determina indirectamente la cantidad de nitrógeno que va a estar disponible para el período reproductivo. Cuando el rendimiento es elevado, es baja la probabilidad de que la absorción tardía de nitrógeno aumente la proteína en grano ya que es alta la probabilidad de que el nitrógeno sea suficiente o incluso sobre. Por esto, y porque es probable la ocurrencia de déficit hídrico en etapas finales del cultivo, lo mejor es que se absorba todo el nitrógeno antes de antes y luego solo haya traslocación, de manera de independizarse de las condiciones ambientales post-antes. Esta hipótesis habilita a estudiar sólo estrategias diferenciales en Z 30 y no incluir aplicaciones más tardías.

### **2.1.3. Retraslocación de nitrógeno**

Al momento del inicio de la etapa de llenado del grano (Z 70) el N acumulado en la planta es re-movilizado para ser acumulado en el grano. La proporción de nitrógeno acumulado en los órganos vegetativos que se trasloca al grano ronda los valores de 50 a 60%, llegando en ocasiones al 80% en trigos de alto potencial. Las síntesis de proteínas del grano de trigo en mayor parte utiliza el nitrógeno acumulado hasta la floración. Este proceso puede verse afectado por el genotipo como así también por el ambiente. Es así que la disponibilidad de agua modificará la proporción de N movilizado al grano, además de si hay en ese momento absorción de N y otros nutrientes, existencia de enfermedades, etc. (García 2006, García 2008).

La mayor parte del nitrógeno traslocado al inicio del llenado de grano proviene de las hojas. La senescencia de las hojas autolimita una mayor traslocación. El nitrógeno de los tallos proviene en mayor proporción del nitrógeno absorbido en etapas tempranas por el cultivo; este se trasloca en mayor cantidad al grano y más adelante en la etapa de llenado, en relación al traslocado desde las hojas (Harper et al., 1987). Esto último está asociado a lo reportado por Bulman y Smith (1994), Oscarson et al. (1995), los cuales mencionan que el nitrógeno cosechado a antesis está positivamente correlacionado con la retraslocación al grano.

Se puede concluir que es importante la cantidad de nitrógeno que el cultivo acumule hasta antesis. La forma de lograr una alta acumulación de nitrógeno es a través de la acumulación de materia seca. El nitrógeno acumulado en tallos y hojas a antesis parece ser el que tiene mayor relación con el retraslocado hacia el grano. Esto determina que si gran parte del nitrógeno agregado a Z 30 se absorbe y asimila en esos órganos, es factible esperar diferencias en la cantidad de nitrógeno cosechado en grano según la cantidad de N que se aplique en ese estadio.

### **2.1.4. Eficiencia de uso del N**

La eficiencia de uso total del nitrógeno (kg grano/kg N que suple el suelo + fertilización) depende de la eficiencia de utilización (kg grano / kg N parte aérea) y de la eficiencia de absorción. La eficiencia de utilización, depende del índice de cosecha del nitrógeno y de la relación kg de grano/kg de N en grano (Kanwarpal y Waines, 1989). Estos autores, demostraron que incrementos de nitrógeno en el suelo llevan a una disminución del índice de cosecha del nitrógeno y por lo tanto a un decrecimiento en la contribución de la eficiencia de utilización a la eficiencia de uso total de nitrógeno (kg grano/kg N aportado suelo + fertilizante). La variación en la eficiencia de uso, para todos los niveles de nitrógeno en el suelo, está influenciada en mayor medida por la eficiencia de absorción (kg N parte aérea/kg N aportado suelo + fertilizante), que por la eficiencia de utilización.

Una mayor eficiencia de utilización del nitrógeno está asociada a una menor absorción de nitrógeno post-antesis. Por lo tanto la absorción luego de antesis no sería deseable si queremos mejorar la eficiencia de uso de este nutriente. La absorción post-antesis es un indicador de baja eficiencia en el uso del nitrógeno previo a antesis y está relacionado con rendimientos en grano bajos y concentraciones elevadas de nitrógeno en grano (Van Sanford y MacKown, 1987).

Estudiando la respuesta a la dosis y momento de aplicación del nitrógeno, en rendimiento en grano del cultivo de trigo bajo riego; Fischer, citado por Cha y Duran (2001), encontró que la absorción de nitrógeno continuó a lo largo del llenado del grano en casi todos los tratamientos, pero especialmente en aquellos en los que las aplicaciones de fertilizantes fueron tardías. Sin embargo la eficiencia de la utilización del nitrógeno (rendimiento en grano/absorción de nitrógeno), disminuyó con el agregado de grandes dosis y con aplicaciones posteriores Z 30. La disminución en la eficiencia de uso del nitrógeno estuvo muy asociada a una mayor concentración de nitrógeno en grano y en menor grado con descensos en el índice de cosecha. Esto daría la pauta de que teniendo un cultivo con una suficiente cantidad de nitrógeno a antesis no sería necesario depender de la absorción post-antesis para lograr altos rendimientos de nitrógeno en grano, y que es posible aumentar esta concentración disminuyendo la eficiencia de uso del nitrógeno mediante el agregado en exceso de este nutriente.

Por su parte, Alley et al., citados por Bathgen (1992) demostraron que Z 30 es el último estado de crecimiento del cultivo en el cual se puede esperar una alta respuesta al N en producción de grano. Por la información vertida hasta aquí parecería entonces que (una vez asegurado un nivel de disponibilidad de N suficiente para una buena implantación, y adecuado macollaje) el estado Z 30 sería un momento potencialmente óptimo para desarrollar estrategias de fertilización nitrogenada que permitan asegurar altas eficiencias de uso del fertilizante y a la vez aumentar la cantidad de nitrógeno depositada en grano.

#### **2.1.5. Factores que afectan la utilización del nitrógeno**

Los factores ambientales influyen marcadamente la concentración de proteína en grano y superan ampliamente a la variación explicada por las diferencias genéticas entre cultivares (Rao et al., 1993). El autor encuentra para los años y cultivares en estudio que el efecto del ambiente explica entre un 68 y 90% la variación en concentración de nitrógeno en grano.

Alkier et al., citados por Mazzilli (2004), sugieren que las condiciones climáticas como la temperatura del aire, aporte de agua e intensidad de luz afectan el contenido de proteína principalmente a través de su efecto en el rendimiento en grano. Por su parte Terman, citado por García (1994) encuentra que la relación inversa entre rendimiento y

concentración de proteína en grano, a un determinado nivel de aporte de nitrógeno es afectada por el contenido de humedad.

Altas temperaturas y alta evapotranspiración aceleran el proceso del llenado de grano, aumentando la tasa de llenado, y al mismo tiempo reducen su duración. La deposición de nitrógeno en grano, precede a la deposición de carbohidratos solubles. Esto lleva que al acortarse el período de llenado, se afecte en mayor medida la acumulación de éstos últimos, por lo que el nitrógeno no es diluido (Rao et al. 1993, Cha y Durán 2001) y por lo tanto se incrementará el porcentaje de proteína cruda en grano. En la misma línea Vitkare et al., citados por Rao et al. (1993) reportan que un aumento de 1°C en la temperatura durante periodo post-antesis, provoca una reducción de 2,19 días en el período de llenado de grano, no obstante la mayor tasa de acumulación de nitrógeno compensa la reducción del período de acumulación de nitrógeno. Esto último no sucede para los carbohidratos (Jenner et al., citados por Rao et al., 1993), por lo cual se produce una disminución de rendimiento e incremento en el nivel de proteína en grano.

En cuanto a la absorción de nitrógeno, existen factores ambientales que pueden determinar la detención o no de la absorción de nitrógeno hasta el final del ciclo, la cual puede deberse a condiciones de temperatura ambiente y humedad del suelo (Harper et al. 1987, Oscarson et al. 1995). Específicamente la limitación de absorción por deficiencia de humedad fue corroborada por muchos autores (McMullan et al., Clarke et al., citados por Bulman y Smith, 1994).

A nivel de cultivares existen diferencias en el índice de cosecha de nitrógeno, % de proteína en grano y otros aspectos de eficiencia de uso de nitrógeno como lo son la variación en nitrógeno total en planta entre antesis y madurez (Van Sanford y MacKown, 1987).

Los mismos autores mencionan como posible fuente de variación en la absorción post-antesis una interacción genotipo x ambiente. A pesar de esto considera a la cantidad de nitrógeno absorbido pre-antesis como la principal fuente de variación genotípica que determina diferencias en nitrógeno en grano. Un genotipo deseable sería uno más eficiente desde el punto de vista de uso del nitrógeno, para esto debería presentar alta acumulación de nitrógeno pre-antesis y luego traslocarlo con la menor cantidad de pérdidas posibles (Van Sanford y MacKown, 1987).

Por otra parte existen varios reportes que indicarían que las diferencias en proteína en grano estarían gobernadas genotípicamente por pocos loci. Este pequeño número de genes posiblemente actúen como genes de efecto mayor. Un modelo con 2 loci, cada uno aditivo pero con diferente efecto se ajusta bien a lo observado (Cox et al., 1986).

A pesar de la correlación negativa entre rendimiento y proteína existirían líneas que combinan alta proteína acompañado de altos rendimientos (Johnson et al., Hermelin et al., citados por Mazzilli, 2004). Para lograr esto se deberían buscar líneas con mayor asociación entre la tasa llenado de grano y la acumulación nitrógeno en grano.

Es conocido que la fuente de nitrógeno utilizada puede afectar las pérdidas de amonio luego de la aplicación de fertilizantes (Zubillaga et al., 2002). La volatilización del amoníaco desde la superficie del suelo es un proceso complejo que afecta principalmente a los fertilizantes nitrogenados aplicados al voleo y que no son incorporados (Hargrove, citado por Fontanetto et al., 2001).

La urea es el único fertilizante comparado con otras fuentes de nitrógeno solubles, capaz de presentar un excepcional grado de diferentes respuestas a variaciones ambientales al momento de su aplicación. Esto podría resultar en una ineficiencia o irregular respuesta del cultivo (Volk, citado por Bologna y Rincón, 1997). La eficiencia de la urea que está sujeta a la caída de lluvia suficiente como para arrastrar a la misma dentro del suelo antes que se hidrolice, es mucho mayor a la eficiencia de la urea que se hidroliza sobre la superficie del suelo dando lugar a pérdidas gaseosas y a una muy baja movilidad del  $\text{NH}_4^+$  resultante (Volk, citado por Bologna y Rincón, 1997).

Volk, citado por Bologna y Rincón (1997), encuentra que el uso de urea y UAN no incorporada sobre suelo no laboreado en maíz resultó en un muy bajo rendimiento y absorción de nitrógeno comparada con el nitrato de amonio y sulfato de amonio durante la estación de crecimiento del cultivo. Posiblemente esto se deba a la aparente pérdida por volatilización de  $\text{NH}_3$  que para las fuentes que contienen urea se encuentra en un rango que va desde 0 a 35%. Estos autores encuentran una respuesta al nitrógeno agregado como nitrato de amonio de casi 500 kg/ha por encima de la respuesta de la urea. Esto puede deberse a las condiciones climáticas del año (extremadamente seco), ya que el nitrato de amonio presenta una mayor independencia del contenido de humedad presente en el suelo para definir una mayor disponibilidad de nitrógeno al cultivo.

De la información recabada puede concluirse que las condiciones climáticas afectan el uso del nitrógeno a través de las condiciones de crecimiento pre-antesis lo que va a estar dando como resultado, la cantidad de nitrógeno absorbida y la materia seca acumulada y en segundo lugar a través de las condiciones de crecimiento durante el llenado de grano lo que va a estar modificando directamente el rendimiento e indirectamente la proteína en grano a través de proceso de dilución. Las diferencias en el uso de nitrógeno entre cultivares estarían asociadas a la capacidad de absorber este nutriente, principalmente en preantesis y su posterior eficiencia de traslocación. Varios trabajos de investigación indican que no es posible mejorar el contenido de nitrógeno en grano, mediante el aumento en el índice de cosecha (Van Stanford y Mackown, 1987). Existen otros que detectan diferencias en el índice de cosecha entre cultivares, pero la asociación con el contenido de proteínas en grano es muy baja. Por otro lado, se han

encontraron diferencias en las pérdidas entre fuentes de fertilizantes que se dan desde el suelo, aunque estas diferencias no siempre determinan respuestas en rendimiento y/o proteína.

#### **2.1.6. Pérdidas de nitrógeno y materia seca**

El nitrógeno que se agrega al suelo como fertilizante sufre pérdidas por reacciones naturales que se dan en el propio suelo que determinan que no todo llegue a la planta, este nutriente puede volatilizarse como gas de diferentes formas, NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>, NO, y varias aminas (Daigger et al. 1976, Harper et al. 1987). A su vez, desde de la planta también ocurren pérdidas, fundamentalmente en forma de NH<sub>3</sub> (Hooker et al. 1980, Parton et al., citados por Harper et al. 1987).

Hutchinson et al., citados por Hooker et al. (1980), menciona que en etapas tempranas del cultivo es probable que existan pérdidas, por no tener el cultivo en ese momento la capacidad suficiente de transformar todo el nitrógeno que es capaz de absorber a aminas, y por lo tanto se acumula como NH<sub>3</sub>. La hipótesis propuesta para explicar estas pérdidas sería que, los carbohidratos en planta en esos estadios son insuficientes para generar aminas a partir del nitrógeno absorbido (Allinson et al., citados por Hooker et al., 1980).

Son muchos los estudios que demuestran que luego de la antesis es cuando se dan las mayores pérdidas de nitrógeno en las plantas de trigo (Daigger et al. 1976, Hooker et al. 1980, Harper et al. 1987). Del total del nitrógeno absorbido pre-antesis un 45% del fertilizante se pierde en las etapas posteriores. Las pérdidas se logran disminuir cuando el cultivo crece sin restricciones hídricas (Schorring et al., citados por Mazzilli, 2004). Las pérdidas de nitrógeno reportadas post-antesis van desde 7,4 kg N/ha (Harper et al. 1987, Schorring et al., citados por Mazzilli 2004), y llegan hasta los 78 kg N/ha (Daigger et al. 1976, Cha y Durán 2001), el cual estaría potencialmente disponible para ser depositado en grano. Cuanto más elevadas son las cantidades de N agregado, mayores son las pérdidas (Daigger et al., 1976).

Los factores ambientales, como el aumento de la temperatura durante la el periodo de senescencia provocan un aumento de las pérdidas por amoníaco (Farquhar et al., citados por Harper et al., 1987). Hooker et al. (1980), sostienen que ante condiciones de alta evapotranspiración las pérdidas de N son incrementadas.

Schorring et al., citados por Mazzilli (2004), al comparar parcelas irrigadas contra parcelas con déficit hídrico, constataron mayores pérdidas en las últimas, determinando que en éstas la causa fue la limitada capacidad de fosa de los granos durante la etapa de llenado, momento en que ocurre el proceso de retranslocación. En las parcelas no irrigadas también se dio mayor removilización hacia las espigas desde las hojas como respuesta al estrés hídrico. En el mismo sentido Kemanian y Viega (1999),

sostienen que cultivos sin deficiencias retardarán el proceso de senescencia y por tanto, la oferta de nitrógeno para ser traslocado sería elevada sobre el final del período de llenado. En este sentido ha sido reportada la importancia de lograr una mayor duración del área foliar, ya que la absorción y asimilación del N es dependiente de la actividad y continuidad del AF (Bulman y Smith 1994, Palta et al., Neales et al., citados por Mazzilli 2004). Si existen concentraciones elevadas de NO<sub>3</sub> en suelo, solo podrán ser absorbidas y retraslocadas al grano si se mantiene el AF activa hacia el final del llenado de grano (Van Sanford y Mackown, 1987).

En resumen, en un año con altas temperaturas y deficiencias hídricas es esperable que el nitrógeno retraslocado al grano sea menor que en situaciones hídricas y térmicas favorables, y que las pérdidas aumenten conforme se incremente la cantidad de N agregado. Esto va a dar como resultado menor eficiencia de uso del fertilizante. Si no fuese por las importantes pérdidas de N reportadas en los párrafos anteriores, con el N acumulado a antesis se podría elevar en forma muy importante el contenido de N del grano, hecho por el cual cada vez se debería tener más en cuenta medidas de manejo tendientes a mantener el área foliar activa por más tiempo. De todas maneras, las pérdidas son mayores en la medida que la actividad de fosa es baja en relación a la cantidad de nitrógeno removilizado. Por esto, es muy importante definir y concretar altas cantidades de granos de manera de capitalizar la mayor parte del nitrógeno absorbido antes de antesis. Para lograr ello, la fertilización nitrogenada en momentos claves (macollaje temprano y tardío) favorece la acumulación de materia seca a antesis y la cantidad de flores fértiles que llegan a formar granos. Por lo visto las pérdidas de nitrógeno son inminentes, pero la magnitud de ellas son controlables.

### **2.1.7. Proteína en grano**

La concentración de proteína en el grano de trigo ha cobrado relevancia a nivel productivo desde el establecimiento del decreto que rige la comercialización de trigo. Éste fija para Uruguay un nivel base de proteína en grano (11,5% - humedad base 13,5%) a partir del cual se bonifica o penaliza el precio de contrato (Ernst et al., 1999), por lo cual se torna importante compatibilizar rendimiento con proteína. El incremento en nitrógeno del grano, es frecuentemente requerido debido a su asociación con el mejoramiento del valor nutritivo de los cereales, el incremento en el vigor de la plántula en cultivos destinados a la producción de semilla y el beneficio que implica la mayor proteína sobre la calidad para panificación (Bergh et al., citados por Mazzilli, 2004).

Existe una amplia gama de trabajos a nivel internacional y nacional que estudiaron la influencia de distintos factores sobre la cantidad de proteína depositada en el grano. Schlehuber y Tucker, citados por Fiona et al. (1976), sugieren que los principales factores determinantes de la proteína en grano son el clima, suelo y variedad.

Por su parte Alkier et al. (1972), encuentra que agregados de nitrógeno aumentan el contenido de proteína en grano a partir de que el rendimiento se mantiene constante. Dentro de esta misma línea Goos et al., citados por Bergh et al. (2003), demuestran que niveles de proteína menores a 11.5% se relacionan con rendimientos debajo de los máximos por lo cual rendimiento y calidad no son características que se opongan. Iguales resultados fueron obtenidos a nivel nacional por Ernst et al., citados por Mazzilli (2004).

En muchas ocasiones altas concentraciones de proteína en grano están asociadas a baja acumulación de carbohidratos y por lo tanto bajos rendimientos (Johnson et al., Hermelin et al., citados por Mazzilli, 2004). En la misma línea Oscarson et al. (1995), encuentran que las diferencias de rendimiento en campo explicaron la mayor parte de las diferencias en N en grano por dilución. El efecto de dilución que en parte es el que define la correlación negativa entre concentración de proteína y rendimiento, puede estar determinado por los mayores costos energéticos para la síntesis de proteína en relación a la de carbohidratos, lo que puede ser responsable de lo que es medido como dilución (Sinclair y de Wit, Bhatia y Rabson, citados por Mazzilli, 2004). Por su parte Cox et al. (1986), afirma que los estudios realizados no han sido capaces de decir si la mayor que en este cereal además de rendimiento se necesita obtener alto nivel de proteína en grano.

En contraposición a lo mencionado en los párrafos anteriores, Kemanian y Viega (1999) sostienen que la concentración de nitrógeno en grano depende principalmente de la cantidad de nitrógeno más que de la cantidad de carbohidratos. Estos autores sugieren independencia de los procesos que conducen a la acumulación de nitrógeno de aquellos de los cuáles depende la acumulación de compuestos no nitrogenados, mayormente carbohidratos. En definitiva destacan la importancia del nitrógeno en grano en imponer la concentración de nitrógeno, independientemente de las variaciones del peso de grano.

La cantidad de nitrógeno en grano estaría determinada por la cantidad de nitrógeno absorbido pre-antesis, la removilización de éste durante el llenado de grano y en menor medida la absorción post-antesis (Van Sanford y MacKown 1987, Bulman y Smith 1994). Michael et al., citados por Cox et al. (1986), encontraron lo mismo para cebada, afirmando que el nitrógeno en grano es derivado de la absorción radicular y de la redistribución del existente en planta y la interacción entre estas dos fuentes. Cha y Durán (2001), encuentran que la variable que permitiría explicar la evolución de la proteína en grano sería la cantidad de nitrógeno absorbido a Z 47. Ajustando un modelo Lineal-Lineal, definen un nivel de absorción de N a Z 47 de 88 kg/ha, a partir del cual los incrementos de proteína por kg de nitrógeno absorbido a Z 47 son muy bajos. Por debajo de este nivel serían necesarios absorber 14 kg N/ha para aumentar un 1% la proteína mientras que por encima de este serían necesarios 123 kg N/ha. Estas observaciones dejan en claro la necesidad de ajustar la dosis de N para aumentar la eficiencia de uso del fertilizante pensando en incrementar también la proteína, y

remarcan una vez más que para ello el nitrógeno debe estar disponible para el cultivo antes de antesis.

Kemanian y Viega (1999) afirman que independientemente de la variedad considerada, situaciones que conllevan una entrega tardía del nitrógeno por parte del suelo, exponen al cultivo a incrementos en el nitrógeno en grano. En un ensayo presentado por estos autores, las condiciones hídricas pre-antesis limitaron el crecimiento y la utilización del nitrógeno; las precipitaciones al inicio del llenado de grano permitieron una rápida mineralización y absorción del nutriente con las consecuencias ya expresadas. Para estos autores junto con el rendimiento de los cultivos, el cual posiblemente se vio afectado por las condiciones ambientales pre-antesis, también disminuyó la producción de materia seca. Esto llevó que al mejorar las condiciones post-antesis, se produjo una mayor acumulación de materia seca y por lo tanto de nitrógeno lo que provocó que gran parte de ese nitrógeno fuera al grano y aumentara la concentración de proteína ya que el rendimiento ya estaba afectado. Lo opuesto ocurrió cuando las condiciones hídricas pre-antesis fueron favorables.

Guohua et al., citados por Mazzilli (2004), mencionan que la propia síntesis de proteína es un proceso limitante que controla la acumulación de nitrógeno. El nitrato es la forma primaria de nitrógeno en planta y la enzima nitrato reductasa inicia el proceso de reducción y por lo tanto es la limitante del proceso. Su actividad debería ser un índice de la cantidad de nitrógeno reducido para síntesis proteica (Beervers et al., Lavoy y Hageman, citados por Mazzilli, 2004). En el mismo sentido Viega et al. (1992), consideran que la utilización del nitrógeno absorbido va a estar dada inicialmente por la cantidad del mismo que es reducido a amonio vía Nitrato reductasa y su posterior asimilación a través del complejo enzimático GS/GOGAT, ya que la sola absorción de nitrato no implica su posterior utilización, ya que puede encontrarse en distintos órganos, importantes acumulaciones de este ión, sobre todo a nivel de hojas, sin un rol fisiológico definido. Esto es así ya que el proceso de asimilación o formación de compuestos nitrogenados simples (aminoácidos y amidas), depende principalmente de la actividad de la nitrato reductasa. Este complejo enzimático, limitante en la fase de reducción es regulado por la presencia de sustrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y la disponibilidad de poder reductor ( $\text{NADPH}^+$  o  $\text{NADH}^+$ ) y ATP proveniente de los procesos de fotosíntesis o respiración de fotoasimilados (Viega et al., 1992). Es así, que estos autores comentan que en general se encuentra una alta asociación entre los niveles de actividad de la enzima y las tasas fotosintéticas o el transporte de fotoasimilados hacia los órganos dónde se está realizando el proceso. Así mismo los factores que influyen sobre la tasa fotosintética, también determinan los niveles de reducción, fundamentalmente luz, agua, edad de la hoja y estado nutricional.

Lavoy y Hageman (1970), encontraron que un cultivar con mayor proteína, presentaba mayor nivel de nitrato reductasa, mayor actividad de la misma y esto es acompañado de mayor nivel de proteína soluble en agua. De todas maneras la mayor

concentración de proteína fue asociada con un menor rendimiento. El mismo autor reporta fluctuaciones ambientales de la actividad de la enzima y esta declina con la maduración de la planta mientras que el nivel de proteína soluble se mantiene constante lo que podría ser explicado por la removilización. Lo mismo fue encontrado para la actividad de la enzima proteasa (Lavoy y Hageman, 1970). Estos reportes indican que la enzima nitrato reductasa se activa con la fertilización nitrogenada, pero esta tiene baja vida media (Schrader et al., citados por Mazzilli, 2004). Si esto fuera así un incremento en el nivel de nitrógeno reducido, dependiendo de la eficiencia del sistema de transporte, debería incrementar la deposición de proteína; pero esto se da sólo para algunos genotipos específicos (Lavoy y Hageman, 1970).

Existen antecedentes que relacionan el tamaño de espiga con la concentración de nitrógeno en grano en trigo (Abate et al., 1997) pero estableciendo que ésta no es resultado de una relación causa-efecto entre las variables sino consecuencia de la disponibilidad de nitrógeno. Los resultados de Kemanian y Viega (1999), son independientes del nivel de nitrógeno y por tanto sugieren otro tipo de relación entre las variables. Sería posible que en las variedades donde esta relación fuera significativa, los tallos de mayor tamaño y por tanto de espigas más grandes absorban proporcionalmente mayor cantidad de nitrógeno que los tallos que soportan espigas más chicas. Guohua et al., citados por Mazzilli (2004), trabajando con trigo en China sugiere que espigas grandes y muchos granos por espiga podría ser la vía para incrementar el potencial de rendimiento y la proteína en grano. De todas maneras en este ensayo la variedad de espiga más grande, acumuló menor materia seca a antesis por lo tanto menor nitrógeno, lo cual determinó mayor absorción tardía. En este mismo sentido Guohua et al., citados por Mazzilli (2004) sugieren que la fuerza de fosa afecta la fotosíntesis y contenido de carbohidratos en hojas de trigo. Por fuerza de fosa se entiende el tamaño y la actividad de la misma. Los mismos autores sugieren que los cultivares en general no logran acumular toda la proteína en grano que podrían. Esto se observa cuando se realiza un raleo de espigas y el porcentaje de proteína aumenta de forma importante. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Bulman y Smith (1994), los cuales trabajando en cebada encuentran que aumentos en la concentración de nitrógeno en grano estuvieron asociados a una disminución en el número de granos.

Otro factor que explicaría las diferencias en proteína en grano en trigo son las diferencias genotípicas asociadas a los procesos anteriormente mencionados (Austin et al. 1977, Van Sanford y MacKown 1987, Seth et al., citados por Mazzilli 2004). Al respecto Fiona et al. (1976), sugieren que la proteína en grano presenta baja heredabilidad y es más afectada por las condiciones ambientales. A pesar de esto existirían líneas que tienen mayor porcentaje en proteína en grano que el esperado para un nivel de rendimiento dado (Fiona et al., Hoffman et al., citados por Mazzilli, 2004).

La absorción y asimilación del N es dependiente de la actividad y continuidad de AF (Bulman y Smith 1994, Neales et al., Palta et al., citados por Mazzilli 2004). Si existen concentraciones elevadas de NO<sub>3</sub> en suelo, sólo podrán ser absorbidas y traslocadas al grano si se mantiene el AF activa hacia el final del llenado de grano (Van Stanford y Mackown, 1987). García (2004), menciona la relación entre estas variables pero con un enfoque distinto, es decir una adecuada disponibilidad de N tiene por lo general el efecto de retardar la muerte del follaje, prolongar la síntesis proteica y la funcionalidad de las raíces.

Kramer, citado por García (2004), comenta que como la fuente mayor de nitrógeno son las partes vegetativas, ya que hasta 80 o 90% del N del grano puede estar presente en el cultivo a floración, una excelente vía para aumentar la cantidad de nitrógeno capaz de llegar al grano sería aumentar la biomasa a través del agregado de N. Este tema será abordado con más profundidad en 2.2.

En conclusión, son muchos los factores conocidos con capacidad de modificar la concentración de proteínas en el grano de trigo. Parte de esa información presenta aparentes contradicciones, pero en definitiva todos coinciden que el aumento en la disponibilidad de nitrógeno se refleja en mayor concentración de nitrógeno en grano. Aparecen importantes diferencias en los resultados cuando se relaciona el nivel de proteína logrado con el rendimiento en grano. En este sentido, parecería importante asegurar altas disponibilidades de nitrógeno previo a la antesis, lo cual habilitaría el estudio del efecto sobre el rendimiento y la calidad del grano de estrategias de fertilización nitrogenada a Z30. Los factores de manejo que deben tenerse en cuenta para incrementar la concentración de nitrógeno en grano manteniendo y/o mejorando el rendimiento, además del manejo del nitrógeno, son la elección de chacra, la densidad de siembra y la sanidad, siempre considerando la interacción con el cultivar.

## **2.2. FERTILIZACIÓN NITROGENADA Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO Y PROTEÍNA**

### **2.2.1. Modelo de ajuste de N en base a indicadores de respuesta**

La premisa para comenzar este capítulo es que el impacto positivo del nitrógeno sobre el rendimiento y la proteína en grano es consistente en todos los trabajos que la estudian. Las diferencias en los resultados radican en el nivel de la respuesta cuando se considera el momento y la cantidad de nitrógeno agregado entre años y sitios según la variable. Además, existe la dificultad adicional en trigo de mejorar el rendimiento y la calidad a la misma vez. Hay un número importante de publicaciones a nivel nacional que tratan el tema, pero no son tantas las que relacionan la respuesta con indicadores objetivos de relativamente fácil manejo e instrumentación en las chacras a nivel comercial. En este contexto, y partiendo de la hipótesis que el manejo de este nutriente

realizado a nivel comercial tiene gran parte de responsabilidad en el bajo nivel de calidad de los granos y harinas producidas y rendimiento alcanzado, en este trabajo se proponen estrategias de fertilización nitrogenada (comparadas a la utilizada por los productores) que pretenden solucionar ese problema y a la vez ser de fácil instrumentación práctica. Aquí las soluciones a dicho problema contemplan la rentabilidad de la práctica, teniendo en cuenta las variables que el mercado valora, para lo cual es indispensable mantener altas eficiencias de uso del fertilizante.

La dinámica del nitrógeno en el suelo, sumado a la influencia que tienen sobre ella, algunos factores ambientales como por ejemplo el régimen pluviométrico, la temperatura, las variaciones de su contenido entre suelos, la historia de chacra y el cultivo antecesor, hace que su disponibilidad para los cultivos no sea siempre acorde a sus requerimientos, y más aún si se desea obtener altos rendimientos. Sumado a eso, la gran trascendencia que tiene este nutriente en las variables que determinan el resultado económico, ha hecho que varios investigadores a nivel nacional (Oudri et al. 1976, Capurro et al. 1982, Baethgen 1992, Hoffman et al. 1999, Perdomo et al. 1999) hayan puesto especial atención a su dinámica en el suelo, y como se relaciona esta con los componentes del rendimiento y calidad del grano en cultivos de invierno. Es así, que Baethgen (1992) generó un modelo para cebada cervecera que permite ajustar la dosis de N según el estado nutricional de la planta en el estadio Z 30. Éste requiere determinar el contenido de N total de la parte aérea de la planta y estimar el potencial de rendimiento. El modelo fue validado por Hoffman y Ernst en 1996 ( $n=100$   $r^2=0.99$ ) en cebada y posteriormente en el cultivo trigo, demostrándose que el porcentaje de nitrógeno en planta es indicador de respuesta a Z 30 (Hoffman et al., 1999); y que se logran las mismas eficiencias de uso en trigo, con las cuales fue generado en el cultivo de cebada evitando el aumento en el contenido de proteína en grano (15 kg de grano/kg de N).

Posteriormente, a fines de la década de los '90 fue validada a nivel de campo una propuesta tecnológica de ajuste del nitrógeno que incluye dos momentos más (a la siembra y Z 22, además de Z 30) para corregir las deficiencias. Este modelo fue creado para cebada por parte de Facultad de Agronomía (Perdomo et al., 1999), y luego fue validada en trigo (Hoffman et al., 1999). Aquí se trata de darle objetividad al criterio de aplicación del fertilizante nitrogenado, determinando cuando y cuanto agregar, basado en indicadores de respuesta en los momentos indicados del ciclo del cultivo. En este sentido, estos trabajos han reportado momentos claves para medir la disponibilidad de nitrógeno, y poder así evitar deficiencias o excesos que afecten el rendimiento y la calidad industrial. Dichos momentos son siembra, Z 22 y Z 30, definidos en base a estadios fisiológicos del cultivo. En los dos primeros se predice la capacidad de aporte del suelo en base al contenido de nitrógeno como nitratos en los primeros 20cm del perfil. Este indicador objetivo usado como criterio para realizar correcciones vía fertilizante, mejora su capacidad predictiva si se consideran adicionalmente otras características de la chacra que tienen marcado efecto en la dinámica de este nutriente en el suelo, como lo son la capacidad de inmovilización de N, y la facilidad de

descomposición de los restos de cultivo que existen a la siembra. El modelo de recomendación definido por Hoffman et al. (1999) toma en cuenta dichos aspectos, y los incorpora como criterio de clasificación subdividiendo a las chacras en dos grupos, uno de alta y otro de baja respuesta esperada al agregado de nitrógeno. Estos grupos consideran variables de manejo como cultivo antecesor, historia de la chacra y manejo del barbecho. Hasta principio de macollaje sigue existiendo gran variabilidad en los valores de nitratos entre chacras, lo que permite que todavía se pueda utilizar este índice para evaluar la disponibilidad del nutriente. La formulación del modelo es válida si la dosis de N agregado a la siembra es ajustada también a Z 22 y se realiza una nueva determinación y ajuste en Z 30. Con el ajuste del N en los dos primeros momentos (siembra y Z 22) se garantiza que la disponibilidad del nutriente no condicione el rendimiento alcanzable, el cual se concreta con el agregado a Z 30.

Hoffman et al. (1999), encuentran que tanto a la siembra como en Z 22 en trigo, el agregado de N utilizando los niveles críticos generados para cebada cervecera determinó una eficiencia de respuesta mayor o igual a 20 kg de grano/kg de N y hasta los 50 kg/ha del nutriente. En Z 30, a pesar del agregado de una dosis fija (50 kg/ha), existió un buen ajuste entre la magnitud de la respuesta y la dosis que recomienda este modelo con relación al testigo sin agregado en este estadio. En los sitios en los cuales no se esperaba respuesta, el agregar N determinó una disminución importante del rendimiento o una respuesta muy baja. En chacras con respuesta al agregado, ésta varió de 8 a 20 kg grano/kg de N agregado. Dichos autores concluyen que utilizando el modelo, se agregó más N en las situaciones de mayor potencial a concretar y no se observó relación a nivel del testigo tecnológico (tratamiento del productor). La interpretación de esto es que en cultivos de alto potencial productivo definido hasta Z 30 las necesidades de N son mayores, y es posible determinarlo con el estado nutricional del cultivo (%N en planta). Dichos autores afirman que el manejo del N en Z 30, en función del modelo propuesto por Baethgen (1992), permite manejar el rendimiento y la calidad en el mismo sentido, cuestión que es sumamente relevante en trigo.

En síntesis, ha sido comprobado por medio de validaciones en trigo a nivel nacional que el modelo propuesto por Baethgen (1992), no sólo permite mejorar esas variables sino que con su aplicación se realiza un manejo más racional de la dosis, evitando excesos importantes que redunden en pérdidas económicas y contaminación ambiental. En definitiva, esas características, sumado a que es sencillo de implementar, hacen que sea una estrategia propicia para contrastar con el manejo del N que se realiza a nivel comercial, y por tanto con los resultados que se desprenden de su aplicación. Dado que en Z 30, a diferencia de los otros dos momentos, se logra modificar, además del rendimiento el contenido de nitrógeno en grano, es aquí donde se debe hacer hincapié en el agregado de N con el objetivo de combinar altos rendimientos y buena calidad del grano y harina producida.

### **2.2.2. Efecto del agregado de nitrógeno tardío sobre el rendimiento y la proteína**

Es abundante la información en la que se muestra que cuanto más tarde y mayor es la cantidad de N absorbida por un cultivo de cebada o trigo, más alto es el contenido de N en el grano (Baethgen 1992, García 1999, Hoffman et al. 1999). En Cebada es conocido que los mismos factores que llevan a un incremento en los potenciales de producción, determinan altos niveles de N en grano (Hughes y Charbonier, citados por Hoffman et al., 1999). Cha y Durán (2001) muestran que el agregado de N a Z 30, no solo incrementó el rendimiento, sino que además el nivel de proteína en el grano fue superior, en relación al testigo sin aplicación; dejando bien claro el efecto positivo del agregado de N en trigo sobre ambas variables.

Como ya fue mencionado en capítulos anteriores, el agregado de nitrógeno en Z 30, solamente permite conservar el potencial de producción definido hasta ese momento, por lo que no se debe esperar que el nitrógeno corrija pérdidas de potencial generadas por deficiencias en etapas anteriores (Hoffman et al., citados por Hoffman et al., 1999). Este es el último momento desde el punto de vista del potencial de producción (granos/m<sup>2</sup>) a partir del cual se puede esperar respuesta al agregado de nitrógeno. Esto lleva a que el potencial definido condiciona la respuesta, y la adición de nitrógeno por encima de lo requerido no determina incrementos de rendimiento pudiendo elevar el contenido de nitrógeno en grano (Hoffman y Ernst, citados por Hoffman et al., 2001). Esto implicaría, que si se detectan deficiencias en Z 30, y se corrige con una dosis mayor a la recomendada por el modelo de Baethgen (1992), el nivel de nitrógeno en grano aumentaría y las eficiencias de uso descenderían, lo cual puede ser beneficioso en trigo en la medida que estas últimas no desciendan demasiado.

Cha y Durán (2001), validaron dicho modelo en trigo y encontraron que este presentó un 85% de aciertos en términos de respuesta o no respuesta. En su trabajo encontraron que un 35% de los sitios la dosis óptima fue cero. En el 65% de los sitios restantes se agregaron 37 kg N/ha, mientras que la dosis óptima observada fue de 50 kg N/ha. Esto provocó una disminución del porcentaje de proteína en grano de 0.64%. Hay que considerar que el modelo originalmente fue desarrollado para cebada por lo tanto tiende a mantener baja la concentración de la proteína. Las dosis que se manejan para cebada cervecera consideran el efecto negativo que tienen las aplicaciones tardías de N sobre el % de proteína del grano en este cultivo. Para el caso de trigo, la corrección en este estadio no solo debe aportar a la concreción del rendimiento final, sino que sería una posible vía de manejo del nivel proteico del producto, aumentando la dosis en relación a lo que recomienda el modelo, teniendo en cuenta la limitante que posee el modelo por el objetivo con el cual fue generado para cebada cervecera.

Estos mismos autores reportan, que cuando se compara el porcentaje de proteína en el grano de trigo dentro de un mismo sitio en respuesta a diferentes dosis de N agregado, los aumentos en la eficiencia de uso del nitrógeno (kg de grano/kg de N

agregado) llevan a disminuciones en los porcentajes de proteína en grano. En este artículo concluyen que el agregado de N a Z 30, no incrementó el nivel de proteína en grano sino que evitó que disminuya, especialmente cuanto mayor fue la necesidad de éste nutriente. Similares resultados son mencionados por Hoffman y Ernst (1996) en cebada cervecera. Es posible sugerir que el agregado de N en este estadio, al igual que para el rendimiento, “permite concretar y no aumentar los niveles de proteína en grano”. Estos autores destacan que a pesar de las escasas precipitaciones registradas en la primavera de 1999, existió igualmente respuesta al agregado de N para concretar altos potenciales de rendimiento. La respuesta al agregado de N encontrada por ellos estuvo entre 11 y 16 kg grano/kg N, mientras que la respuesta tanto en rendimiento como en proteína se mantuvo constante a partir del agregado de 65 kg N/ha. Por su parte Hoffman et al. (1999) para el agregado de nitrógeno en Z 30, encontraron respuestas entre 8 a 20 kg grano/kg de nitrógeno agregado.

El agregado de mayores cantidades de nitrógeno en situaciones de no respuesta en este estadio (considerando el % de N en planta y la estimación del rendimiento), no modificó el tenor proteico del grano de trigo (Hoffman et al. 1999, Cha y Durán 2001); sino que aumentó el nitrógeno absorbido presentando fuertes pérdidas de N a cosecha, finalizando con el mismo valor que el testigo (Cha y Durán, 2001). Vale la pena aclarar que esto no significa que aumentando la dosis de N en relación a lo que recomienda el modelo, no aumente la proteína en grano, ya que esta estrategia propone agregar en exceso también en situaciones donde se diagnostica deficiencia.

Según García (2005a, 2010), que una proporción importante del nitrógeno (1/2-2/3) agregado se difiera a fin de macollaje-inicio de encañado a demostrado ser una buena estrategia para mantener adecuado el nivel de proteína en grano. También establece que la limitante de esta estrategia es por un lado, la dificultad de establecer el rendimiento obtenible (los mapas de rendimiento pueden contribuir a predecirlo) y por otro, en chacras con limitada fertilidad, las dosis del nutriente requeridas pueden ser muy altas, y siempre existe el riesgo de una baja recuperación del nutriente lo que implicaría pérdida de productividad y contaminación ambiental. De todas maneras, deja en claro la importancia que el fraccionamiento de gran parte del total de N aplicado a Z 30 tiene sobre el nivel de nitrógeno en grano.

Para reducir los riesgos de obtener grano con una concentración baja de proteína es esencial entonces que el cultivo disponga de N suficiente para satisfacer sus requerimientos. Si se aplica una cantidad subóptima de N en un suelo con medio o bajo poder de suministro, se puede promover una producción importante de granos (aumento en número de espigas probablemente no proporcional al incremento en biomasa), pero en etapas tardías del cultivo, el N removilizable al grano y/o el disponible para una nueva asimilación, puede ser insuficiente para que la concentración de proteína se mantenga en un nivel adecuado (García, 2005a). El mismo autor expresa que el problema surge también en años buenos para el desarrollo del cultivo, cuando se

promueve una producción elevada de granos por unidad de superficie, prolongado el período de llenado del grano, pero el N acumulado en el follaje y el proveniente del suelo en etapas tardías es insuficiente para cubrir la demanda de esos granos formados. En siembra directa es frecuente que esto ocurra, en esta situación parecen estar involucrados además fenómenos de inmovilización de N. El fraccionamiento del N hacia fin del macollaje aumenta la disponibilidad del nutriente en esos momentos críticos, no solo porque cubre pérdidas de N anteriores, sino que también aumenta la cantidad de macollos fértiles y su materia seca individual.

Por otro lado, Cha y Durán (2001), encuentran que agregados de nitrógeno a Z 47 no determinan aumentos significativos del rendimiento. El agregado en Z 30 no explica la variación observada en Z 47 y en un 52% de los sitios evaluados disminuyen el rendimiento por agregado de nitrógeno en este estadio. Hoffman et al. (1999), utilizando el modelo de Baethgen (1992), en trigo encuentra que cuando el estado nutricional estuvo por encima de 4% de nitrógeno en planta en Z 30, no existió respuesta al agregado de nitrógeno en Z 47. En situaciones de menor contenido de nitrógeno en planta a Z 30, el agregado de N en Z 47, no modificó en forma importante los niveles de proteína en grano si existió corrección en Z 30. Esto indicaría que el incremento de proteína en grano por el uso de nitrógeno en Z 47, solo se daría si existen deficiencias severas no corregidas anteriormente. Cha y Durán (2001), confirman estos resultados, no encontrando respuesta en el porcentaje de proteína por el agregado de nitrógeno a Z 47. Condiciones climáticas adversas como lluvias excesivas en primavera, podrían crear condiciones de respuesta, para la cual aún se carece de indicadores objetivos que permitan predecirla (Hoffman et al., 1999). Por su parte Bergh et al., citados por Mazzilli (2004), menciona que la fertilización nitrogenada para el mejoramiento de la proteína, como cualquier otra práctica de fertilización, requeriría de un método de diagnóstico, que todavía no se conoce.

En síntesis es posible aumentar sustancialmente el rendimiento con el agregado de N a Z 30, Hoffman et al. (1999), reportan aumentos de hasta 1000 kg/ha. Cuando la dosis es agregada en base a lo que recomienda el modelo de Baethgen (1992) no se incrementa el nivel de proteína en grano, sino que evita que esta disminuya, especialmente cuanto mayor es la necesidad de este nutriente, por lo que en determinadas situaciones el agregado de nitrógeno permite concretar y no aumentar los niveles de proteína en grano (Hoffman et al. 1999, Cha y Durán 2001). Estas situaciones que parecen expresarse en ambientes de alto potencial de rendimiento, ponen en tela de juicio el nivel de respuesta en proteína potencialmente alcanzable con la dosis recomendada por el modelo de Baethgen (1992) en esos casos. Con ese marco de referencia, el agregado de dosis superiores a las determinadas por el modelo permitiría incrementar el contenido de proteína en grano, ya que se estaría trabajando con eficiencias de uso un poco menores y por tanto nitrógeno en exceso.

### **2.2.3. Efecto del azufre sobre el rendimiento**

El azufre (S) es un constituyente de aminoácidos precursores de proteínas y otros compuestos esenciales con funciones específicas en las plantas. Es un nutriente requerido en cantidad relativamente grande por los cultivos. Un trigo de 5000 kg/ha con 12 % de proteína en el grano extrae en promedio 11 kg de S/ha. Pero mientras que fertilizar con nitrógeno (N) y fósforo (P) es una práctica corriente en el cultivo de trigo, la aplicación de S ha dependido tradicionalmente de la cantidad del nutriente que contenga el fertilizante usado para suministrar los anteriores (García, s.f.).

Cuando el superfosfato simple (11-13 % de S) era la fuente de P más utilizada proveía considerable cantidad de S para los cultivos. En la actualidad, el uso de fuentes de P más concentradas o de formulaciones binarias con concentraciones muy bajas de S no constituye un aporte significativo. Este hecho sumado al mayor requerimiento de S de cultivos de alto potencial de rendimiento manejados con la tecnología actualmente disponible aumenta la probabilidad de encontrar situaciones en las que el S pueda limitar el crecimiento del cultivo e interactuar con la respuesta a otros nutrientes (García s.f., García 2010).

La deficiencia de S en cultivos ha sido reportada en muchas partes del mundo desde hace décadas (Messick et al., Tisdale et al., citados por García, s.f.). Recientemente en Argentina, varios trabajos mencionan efecto significativo del S sobre el rendimiento de trigo en un número considerable de casos (Melgar et al., Ventimiglia, et al., citados por García, s.f.). La disponibilidad del azufre para las plantas depende de dos factores, que el suelo sea capaz de aportar lo suficiente, y de que la planta sea capaz de absorberlo, ya que el aporte desde la atmosfera es insignificante. El S es absorbido y llega a las raíces por medio del flujo masal como ion sulfato, lo que lo hace dependiente del agua. El sulfato en la solución del suelo y el adsorbido al suelo son los que potencialmente la planta puede utilizar. La liberación desde los restos frescos puede ayudar a incrementar dicha disponibilidad. Otro factor que influye es el de la exploración radicular, pudiendo así, la planta llegar al sulfato retenido en la profundidad del suelo. El proceso es favorecido por la temperatura y la presencia de plantas y ambos incrementan con el desarrollo del cultivo (García, s.f.).

Si no existen otras limitantes para el desarrollo y crecimiento del cultivo y se fertiliza con N, éste absorbe más nitrógeno del suelo y a su vez más S, pero tal vez no en la misma proporción, sea por baja disponibilidad o por restricciones físicas del suelo (García, s.f.). En un trabajo realizado por García (s.f.), en el cual estudió la respuesta al agregado de S en Z 30-31, se encontró respuesta positiva y significativa en algunos casos, mientras que en otros solo se observó una tendencia positiva. La respuesta en % de incremento del rendimiento estuvo en el rango del 4 al 10% (García, s.f.). En experimentos conducidos sobre Argiudoles de la región pampeana norte, Melgar et al.,

citados por García (s.f.) determinaron incrementos similares (6 a 8 %). Este autor indica que una aplicación de S de 12,5 a 25 kg/ha sería suficiente para asegurar una buena disponibilidad para el cultivo cuando diversos factores hagan pensar en deficiencia del nutriente. Esta es una cantidad razonable de S si se considera que la extracción aproximada del nutriente por un cultivo de 5 ton/ha es 11 kg/ha, como se mencionó anteriormente, y si se asume una eficiencia de la fertilización similar a la del N (50 %).

En resumen, el azufre aplicado con el fin de aumentar la calidad de la masa puede tener un efecto adicional sobre el rendimiento, aumentándolo en aquellas situaciones donde su disponibilidad en el suelo sea insuficiente. De todas maneras el aumento esperado en situaciones con respuesta no sería muy importante.

### **2.3. CALIDAD DE TRIGO PARA PAN**

#### **2.3.1. Definición de calidad**

Para poder definir con precisión la calidad de un trigo no es suficiente contar con uno o dos valores. Tanto que a veces se realizan reportes con 15 o más parámetros. Por consiguiente, cuando se comparan los resultados de calidad de dos trigos es muy difícil poder decir cual es mejor, ya que si bien uno puede tener una propiedad mejor, otro puede tener mejor otra (Vázquez, 2009). Dado que en Uruguay el principal destino del trigo es el procesamiento en la industria para consumo humano mediante panificación (Vázquez, 2005) y que un producto tiene calidad solamente cuando éste es capaz de satisfacer al cliente, siendo los clientes de la cadena agroindustrial del trigo, los molinos y las panificadoras (Verges y Vázquez 2004, Vázquez 2009); el concepto de calidad, hace referencia a las características de los granos para satisfacer las necesidades de la industria panificadora. Por consiguiente, nuestros trigos deben ser de buena calidad física y favorecer una alta extracción de harinas con propiedades acordes a dicho fin. Desde este punto de vista, se requieren materiales con proteína de buena fuerza panadera (aunque no excesivamente fuertes), equilibradas y que el porcentaje de proteínas sea lo mayor posible. El desarrollo de trigos con estas características tiene como ventaja extra el hecho de que los principales mercados extranjeros tienen los mismos requisitos que el uruguayo, por lo que la exportación de esos lotes es viable (Vázquez, 2004a).

La cantidad de proteína es uno de los factores que definen la calidad industrial del grano, el otro factor es la calidad de esa proteína (García, 2005b). Mejorar la calidad panadera implica mejorar la proteína del grano y mantener una relación adecuada de gliadinas y gluteninas, que juntas forman la mayoría de la proteína insoluble del grano, el glúten (Vázquez, 2005), pues de esa relación depende la reología de la masa. La reología de las masas se describe en términos de resistencia (elasticidad) y extensibilidad (plasticidad). Una masa firme tiene relativa resistencia a la extensión y es elástica por lo que cuando se deja de extender tiende a recuperar su forma original. Una masa débil se extiende fácilmente y no es elástica. Una masa tenaz puede tener cierta resistencia a la

extensión inicial pero pronto tiende a romperse. La extensibilidad de la masa depende principalmente del tipo y cantidad de gliadinas presentes, mientras que la resistencia depende de las gluteninas de alto peso molecular. Por consiguiente una harina de masa débil puede transformarse en una fuerte si se incrementa la proporción de esa última fracción del glúten. La producción de pan requiere de masas fuertes para que durante la fermentación los gases producidos queden atrapados dentro de la misma, la masa se eleve y la miga alcance una buena porosidad. En cambio para la producción de galletitas por ejemplo, es importante que la masa se pueda extender fina y pareja y retenga su forma luego de cortada. En este caso lo que se requiere es una masa extensible y sin propiedades elásticas (García, 2004). Es importante tener en cuenta estos aspectos ya que lo que se propone en este trabajo es mejorar las propiedades de la harina para la fabricación de pan, que en definitiva es el destino final de la mayoría de los trigos producidos en nuestro país.

Los parámetros más utilizados para medir las propiedades que definen la calidad del grano y las masas derivadas se mencionan a continuación.

#### **2.3.1.1. Proteína en grano**

Las proteínas son compuestos nitrogenados que en contacto con agua, formarán el gluten. Por ello, el contenido de proteína es una forma indirecta de estimar el contenido de gluten del grano, aunque no da indicación alguna sobre la calidad o comportamiento de ese gluten durante la panificación. En Uruguay, el límite de comercialización sobre el cual se bonifica o descuenta es 11,5% con base 13% de humedad.

#### **2.3.1.2. Gluten húmedo (GH)**

El gluten es una sustancia gomosa de color blancoamarillento que se obtiene lavando la masa mediante una corriente de agua, quedando sólo las proteínas insolubles (gliadinas y gluteninas) para formar el gluten. La característica principal del gluten es la de dar coherencia y aglutinar a las células de almidón. En la panificación el gluten es el que retiene a los gases que se desprenden durante la fermentación que produce la levadura. El valor aceptado para la panificación es 28%.

#### **2.3.1.3. Fuerza de la masa (W)**

La fuerza de la masa representa el área bajo la curva graficada en el alveograma. En función de esta se clasifican en trigos de gluten débil ( $W < 200 J \cdot 10^{-4}$ ), trigos de gluten intermedio ( $W 200 < W < 270 J \cdot 10^{-4}$ ) y trigos de gluten fuerte ( $W > 280 J \cdot 10^{-4}$ ). El W junto con el P/L, definen el producto apropiado a elaborar. Cabe acotar que esta tipificación tiene un uso muy restringido, pero de todas maneras es un buen indicio de qué es lo que la industria pretende, ya que se llegó a estos valores por el consenso de

diversos actores del sistema triguero nacional (Vázquez, 2009). En general se puede lograr un buen pan con un W de 200 Jx10<sup>-4</sup>, pero valores mayores son deseables. Un W mayor que 300 Jx10<sup>-4</sup> va a asegurar una masa de fuerza adecuada, aún para productos exigentes. En otros países, los requisitos mínimos de W para pan francés bajan hasta 150 Jx10<sup>-4</sup> (Calvel, citado por Vázquez, 2009). La mayoría de los trigos uruguayos tienen un valor de W que va desde 200 a 300 Jx10<sup>-4</sup> (Ernst et al. 2006a, Castro et al. 2007).

#### **2.3.1.4. Relación Tenacidad-Extensibilidad (P/L)**

La Tenacidad (P) o resistencia al estiramiento representa la altura máxima de la curva graficada en el alveograma. La Extensibilidad (L) representa la longitud de la curva graficada en el alveograma. La relación entre estos dos mide el equilibrio de la masa. La masa debe ser fuerte, pero a su vez, se requieren propiedades extensionales adecuadas. La extensibilidad es importante para que la expansión de la masa permita obtener un pan de alto volumen, pero siempre en un equilibrio con la fuerza del gluten (Faergestad et al., citados por Vázquez, 2009). Este es un tipo de propiedades que aparentemente se ha menospreciado, pero se ha demostrado que es clave en nuestro país (Vázquez y Watts 2004b, Vázquez, citado por Vázquez 2009).

La importancia que la bibliografía internacional le da a la fuerza de la masa, ha hecho que en algunos casos en que una harina no produce buen pan, se solicite mayor fuerza, sin prestar atención al resto de las propiedades. Es común escuchar en estos casos frases como “el W es bajo”, pero muchas veces sucede que el problema no es fuerza sino que falta de equilibrio entre elasticidad y extensibilidad. En este caso, lo importante es tener un valor de P/L equilibrado (Vázquez, 2009). Se definen masas equilibradas a aquellas con relación cercana a 1. Por encima de 1,5 se consideran masas muy tenaces. En Uruguay es común obtener harinas con valores de 2 o aún mucho mayores, o sea, muchos trigos son tenaces (Ernst et al., 2006a). Valores por encima de 1,5 y sobretodo de 2,5 se dan en masas que son muy elásticas, las cuales se resisten a ser estiradas y por lo tanto el pan resultante es de bajo volumen, Valores menores a 0,5 se dan en masas con muy poca elasticidad que no podrán mantener la forma. Entonces los valores deseados son entre 0,5 y 1,5, cuanto más cercanos a uno mejor (Vázquez, 2009).

#### **2.3.1.5. Otros parámetros de interés**

La fuerza de la masa va a estar relacionada con las propiedades de mezclado pero, además, las propiedades de mezclado son válidas per se, sobretodo la absorción y la estabilidad. El valor de la primera es de relevancia económica para el panadero, ya que cuanto mayor sea la absorción de agua, mayor cantidad de pan se puede elaborar con la misma cantidad de harina. Un valor de absorción por debajo de 55% (55 litros de agua para 100 kg de harina) se considera muy bajo, es deseable mayor a 60%. La estabilidad al mezclado históricamente no ha tenido mayor relevancia, pero el aumento de la mecanización ha aumentado su importancia. Si bien el mixógrafo se utiliza mucho

a nivel académico, los valores relevantes comercialmente son los datos farinográficos. La estabilidad debe ser alta: no menos de 8 minutos, preferiblemente mayor a 12 minutos (Vázquez, 2009).

Independientemente de las propiedades reológicas y de las proteínas, existen otros requisitos que no pueden dejarse de lado, pero que son independientes de los primeros. Uno de los primeros requisitos que debe cumplir una partida de granos de trigo para que se considere apta para su uso industrial, es tener buenas propiedades físicas. De ser así, el trigo podrá conservarse mejor durante el tiempo que sea necesario, la partida será de mayor homogeneidad y predictibilidad, y fundamentalmente, tendrá mejores propiedades molineras (Vázquez, 2010). El parámetro más utilizado es el peso hectolitrito (PH). También se agregan materias extrañas, granos quebrados, y granos chuzos.

El grano de trigo también debe ser de textura dura, como lo son todos los cultivados en Uruguay en el presente. El valor de Falling Number es crítico. Las variedades que se cultivan en Uruguay son adecuadas para evitar un valor bajo en las condiciones normales, pero existen años en los que existen condiciones climáticas que causan pregerminado, y por consiguiente bajos valores de Falling Number. No existe consenso sobre el valor mínimo recomendable, con una oscilación que está entre 180 y 250 segundos. Otro componente relevante es el color de la harina producida. Es un parámetro sobre el que no se ha publicado información en Uruguay, pero dado que su importancia está en aumento no puede dejar de mencionarse (Vázquez, 2009).

### **2.3.2. Variables de manejo que modifican la calidad panadera**

La premisa considerada para encarar este capítulo es la escasa información a nivel nacional sobre el tema en cuestión. Los materiales disponibles son concluyentes en el hecho que el rendimiento y calidad de trigo logrado en una situación productiva, depende de la combinación de variables de manejo utilizadas (tecnología) y el ambiente ofrecido al cultivo. La información presentada por Ernst et al. (1999, 2001, 2006) es muy consistente al respecto, mostrando variables de manejo a nivel de chacra con capacidad de modificar el rendimiento y la calidad del trigo producido en Uruguay. Es así que la variedad aparece como una variable con efecto marcado sobre los parámetros de calidad, pero la magnitud y dirección del efecto sería variable. La ubicación de las variedades en diferentes grupos de calidad (con combinaciones disímiles en propiedades de la masa y calidad de grano) quedaría definida por la tecnología de producción, lo que demuestra la necesidad de ajustar el manejo a las características del cultivar. La ubicación relativa de los cultivares comunes en los años de trabajo no se modificó, lo que demuestra que el efecto año establece el nivel donde ocurre la respuesta de los cultivares al manejo.

En las publicaciones nombradas en el párrafo anterior fueron identificados un conjunto de variables de manejo con capacidad de modificar la calidad del grano y la harina producida. Además de la variedad, la fecha de siembra, respuesta esperada al N, la aplicación de fungicida, tipo de laboreo, cultivo antecesor y el ajuste de la fertilización en inicio de macollaje, encañado y espigazón tuvieron un efecto significativo sobre el rendimiento y la calidad del trigo. Dentro de ellas, el efecto de las medidas correctivas (aplicación de fungicida y principalmente la fertilización) quedó condicionado por “el ambiente de producción” establecido por las demás. De todas maneras, en menor o mayor medida el efecto de la fertilización a Z 30 elevó consistentemente los valores de calidad del grano y harina producida, aumentando la proteína, gluten húmedo, fuerza de la masa y en varios casos bajando la relación P/L.

### **2.3.2.1. Efecto de la fertilización nitrogenada en la calidad panadera**

La fertilización nitrogenada tardía diferenciaría grupos de mayor proteína en grano, gluten húmedo y valor de W al mejorar la disponibilidad de nitrógeno. Ernst et al. (2001) muestran que las situaciones con alta relación P/L fueron chacras con alta respuesta esperada a la fertilización con N, o aquellas sin fertilizar a Z 30. En este trabajo, para las chacras relevadas el porcentaje de situaciones con fertilización nitrogenada a Z 30 varió entre años (29% en el año 2000, contra 40% para la zafra anterior) y solo en el 54 % de los casos se realizó tomando el estado nutricional del cultivo como indicador de respuesta esperada, mientras que en el año 1999 se lo hizo en un 60% de los casos. Estos resultados no pretenden caracterizar el comportamiento de los productores a nivel nacional en esos años, pero si permiten evaluar el efecto de contrastes de manejo de la fertilización nitrogenada en ese momento del ciclo. El agregado de nitrógeno en este estadio se comportó de la misma manera para esos años de evaluación, incrementando el rendimiento en grano en un 13% con respecto a aquellas situaciones donde no se aplicó y mantuvo el nivel de proteína en grano (10,8 contra 11%) y gluten húmedo (29,7 contra 30,4) en el valor medio de la población. Estos resultados coinciden una vez más con la información generada para trigo, en donde la corrección de la disponibilidad de nitrógeno en Z 30 incrementa el rendimiento en grano sin que esto signifique reducir la concentración de nitrógeno en el grano como efecto de la dilución en mayor rendimiento. Estos hechos fortalecen la idea de evaluar el efecto de la fertilización con nitrógeno en este momento sobre el rendimiento y las variables de calidad nombradas, agregando cantidades de nitrógeno que excedan los requerimientos del cultivo para construir rendimiento y así aumentar la concentración de proteína en grano.

A partir de esos resultados se supone que, en esas situaciones el nitrógeno fue una severa limitante para el rendimiento y nitrógeno en grano, lo que se traduce en harinas con propiedades no deseables (muy débil y tenaz). Para los cultivares estudiados los menores valores de W y PL, se asocian a bajos niveles de proteína y estuvieron en los grupos formados por aquellos “ambientes de menor aporte de nitrógeno”. El rango

de variación de la calidad del trigo entonces estaría definido por las diferencias en el aporte de nitrógeno de cada “ambiente de producción”, y determina la relación entre proteína en grano y rendimiento cosechado. En función de esto, las variables de manejo para incrementar el nivel de proteína no quedan limitadas por el rendimiento, sino por el suministro de nitrógeno, que a su vez está condicionado, entre otras cosas por la fertilización nitrogenada. Como hipótesis de trabajo la relación entre rendimiento y proteína en grano, fuerza de la masa y relación P/L estarían definidas por un desajuste entre el rendimiento potencial determinado por el ambiente y la oferta de nitrógeno del suelo más la estrategia de uso de fertilizante nitrogenada utilizada actualmente. Es así que en este ensayo se pretende contrastar el efecto de la fertilización nitrogenada realizada a nivel comercial, contra tres estrategias diferentes que pretenden levantar las limitantes impuestas por la anterior, bajo la hipótesis que la mala calidad promedio de los granos producidos en nuestro país es producto, entre otras, del manejo del nitrógeno realizado a nivel de chacra en Z 30 (Ernst et al., 2001).

Aunque la selección de la variedad es uno de las variables de manejo de mayor impacto sobre la calidad del grano de trigo, existen cultivares con adecuadas cadenas polipeptídicas que poseen bajo valor de W. La relación P/L tiene menor control genético que el W, aunque de todos modos existen diferencias entre las variedades. Por ejemplo, INIA Tijereta e INIA Tero son cultivares con predisposición a la tenacidad (Verges 2005, Ernst et al. 2006). El mayor efecto ambiental radica en que cuanto mayor es el contenido de proteínas, mayor es la extensibilidad (L) y por lo tanto menor es P/L (Vázquez y Watts 2004b, Faergestad et al., Uthayakumaran et al., citados por Vázquez 2009). Las variedades presentes en el mercado uruguayo manifiestan diferencias sustanciales en cuanto a calidad, pero su efecto no es suficiente para garantizar masas con calidad para la panificación.

Mucho se ha dicho sobre la supuesta relación negativa entre rendimiento agronómico (toneladas por hectárea) y calidad. Es difícil poder ser concluyente al respecto, pero lo cierto es que es posible obtener un alto rendimiento y alta calidad simultáneamente. Se dice que si una variedad es de alto rendimiento, no es de buena calidad. Lo que sucede es que por probabilidad es más difícil obtener una variedad que combine los alelos deseados de múltiples genes para conseguir alto rendimiento, con los alelos deseados para tener buena calidad. La genética establece un rango de calidades; el ambiente establece en que punto de ese rango está el trigo. La calidad de proteínas está evidentemente definida genéticamente, pero el control genético de la cantidad total de proteínas es muy complejo, y aún no está del todo claro cómo funciona. Esto es porque es controlado por muchos genes, y por lo tanto existe un fuerte impacto ambiental sobre el mismo (Shewry, citado por Vázquez, 2009). De todas formas, se pueden obtener cultivares con la combinación de ambas características (Verges et al., citados por Vázquez, 2009). En conclusión, dentro de los factores que definen la calidad en trigo, la genética es condición necesaria, pero no suficiente, para poder lograr una buena calidad del grano y harina producida.

Cuando los nutrientes son limitantes y las condiciones climáticas son favorables, el rendimiento va a aumentar debido a mayor biosíntesis de almidón en el grano. Si el nitrógeno es limitante, la cantidad de proteínas no va a aumentar en la misma proporción. Este fenómeno es generalmente conocido como “dilución de proteínas” y puede solucionarse con una fertilización adecuada (García 2004, García 2006).

La calidad de la harina se estima y se regula (normas de comercialización) a través de la concentración de proteína en el grano de trigo. Esto es porque, como ya se mencionó el incremento en la concentración de proteína se relaciona positivamente con el contenido de glúten y la fuerza de la masa. En promedio niveles crecientes de proteína en grano se asocian a aumentos en el nivel de gluten húmedo y fuerza de la masa y reducción de la relación P/L. Las harinas más tenaces se asocian a bajos tenores de proteína, pero esta relación ocurriría en niveles diferentes según los cultivares (Ernst et al. 2006a, Vázquez 2009). Los resultados publicados por Cadenazzi et al. (2007) muestran la posibilidad de producir trigos con calidad diferente y por lo tanto si se segrega y se conservan las diferencias, la posibilidad de producir harina con diferentes propiedades reológicas en nuestro país. Aquí, con los materiales disponibles dice que es posible producir desde harinas con buen valor de W y relación P/L hasta harinas consideradas no panificables en forma directa.

En conclusión, la información disponible muestra que muchas son las variables de manejo con las cuales cuentan los productores para mejorar la calidad del trigo. La fertilización a Z 30 aparece como una de las alternativas con mayor consistencia en la influencia sobre el contenido de nitrógeno en grano, glúten, fuerza de la masa y la relación P/L. Con esta práctica y las variedades disponibles en el mercado es posible mejorar la calidad a niveles elevados de rendimiento.

### **2.3.2.2. Influencia del azufre en la calidad panadera**

La disponibilidad de azufre es un componente determinante en la calidad de las proteínas, ya que el contenido de puentes disulfuro varía entre las distintas proteínas formadoras de gluten (García s.f., Mac Ritchie y Gupta 1993, Wooding et al. 2000). En el trigo, deficiencias de S pueden dar lugar no sólo en disminuciones de la producción, sino también una baja en la calidad del grano para panificación. En la década de 1980 investigadores australianos demostraron que la deficiencia de azufre en el trigo tuvo un efecto profundo en la composición de las proteínas del gluten en el grano, con aumentos de la síntesis de proteínas pobres en azufre, a expensas de las proteínas ricas en azufre (Fullington et al. 1987, Shewry y Tatham 1997, Tea et al. 2004, Lerner et al. 2006, Mason et al. 2007, Thomason et al. 2007).

Un cultivo deficiente en S produce menos granos y de menor tamaño. A su vez en trigo, puede haber un efecto negativo sobre la calidad de la harina para panificación.

La síntesis de proteínas deficientes en S reduce la formación de enlaces S-S fundamentales para la polimerización de proteínas del gluten de las que depende la resistencia y la elasticidad de la masa (Wall 1971, Moss et al. 1981).

Existe evidencia que aplicaciones de nitrógeno en gran cantidad en etapas avanzadas del ciclo en trigo, deterioró la calidad de las proteínas del glúten debido a un desbalance de N y S (Timms et al. 1981, Al-Eid 2006). Shahsavani y Gholami (2008), muestran que fue detectado un desequilibrio entre nitrógeno y azufre en el grano de trigo cuando la relación N:S fue mayor a 16. En este estudio cocientes iguales o más altos se reflejaron en mala calidad del grano para panificación. Un poco mayor fue la relación N:S crítica (17) reportada por Byers et al. (1987). Shahsavani y Gholami (2008), detectaron efecto de la aplicación de azufre sobre el volumen del pan y la relación N:S en grano, y esta fue similar para todas las variedades y sitios estudiados; provocando aumentos significativos en el primero y descensos en el segundo.

Ni la concentración de N en el grano, ni el gluten, parámetros usados como indicadores de calidad del grano en la industria molinera, fueron beneficiados por la fertilización con S. Sin embargo en algunos casos tendió a mejorar la relación P/L (alveograma de Chopin) (García, s.f.). Esto habilitaría ensayar aplicaciones de azufre con el fin de mejorar la calidad del trigo, disminuyendo la proporción de granos productores de masas tenaces, partiendo de la base que la mayoría de las harinas producidas en nuestro país manifiestan problemas en este sentido.

### **2.3.3. Otros factores a considerar sobre la calidad del grano de trigo**

Hay que tener en cuenta que todo tipo de estrés a la planta puede llegar a afectar la calidad. Como regla general, cualquier extremo climático puede causar detrimento en su calidad. Por ejemplo, temperaturas en el entorno a 35°C pueden alterar la cantidad relativa de distintas proteínas del gluten (Wardlaw et al., citados por Vázquez, 2009). Se han reportado genotipos con resistencia genética a estrés térmico (Castro et al., 2007).

Tal como sucede con efectos climáticos, el estrés que causan las enfermedades foliares afecta la calidad. El principal efecto es sobre la calidad física, causando una disminución del tamaño del grano, con el consiguiente efecto en la calidad molinera. Es probable que esta disminución de tamaño afecte más la síntesis de almidón que de proteínas, y por consiguiente la concentración de proteínas sea mayor. Pero este aumento de proteína, que puede mejorar la calidad panadera, es a costa de un detrimento de la calidad molinera y, por lo tanto, en realidad la calidad global del trigo será menor. La fusariosis de la espiga o “golpe blanco” es la enfermedad que mayores problemas de calidad causa, fundamentalmente porque afecta directamente al grano (Vázquez, 2009).

La influencia de estos factores puede llegar a causar un detrimento sustancial en el valor de los granos desde el punto de vista de la calidad, al punto de hacer perder el

producto de todo un lote. Por lo que siempre debe ser considerada su ocurrencia y consecuentemente se deben implementar medidas de manejo que permitan reducir o mitigar su efecto. Estas escapan al objetivo de este trabajo, pero su importancia hace que valga la pena mencionarlas.

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. UBICACIÓN

Los experimentos se realizaron en siete chacras (sitios) ubicadas en los departamentos de Paysandú y Río Negro. Todas ellas están comprendidas dentro de un radio de aproximadamente 50Km con centro en la Estación experimental Mario A. Cassinoni.

#### 3.1.1. Características de las chacras y detalles de la siembra

Los sitios donde fueron realizados los ensayos son propiedad de las empresas que se detallan en el Cuadro 1.

**Cuadro 1:** Sitios donde se realizaron los ensayos (zafra 2008-2009).

<b>Predio/Propietario</b>	<b>Chacra</b>	<b>Empresa</b>	<b>Referencia (sitio)</b>
Los Nogales		Adecoagro	1
Pia Guazu	Entrada	Unicampo	2
Pia Guazu	Medio	Unicampo	3
Mario Blanc	Camino	CALPA	4
Mario Blanc	Adentro	CALPA	5
Julio Pereira		CADYL	6
Est. Sembradora		CADYL	7

Los tratamientos se aplicaron en chacras ya sembradas, por lo que la variedad, densidad y fecha de siembra, antecesor y manejo sanitario del cultivo, fueron realizadas por cada productor. En los Cuadros 2, 3 y 4 resumen el manejo de cada sitio hasta la instalación del experimento.

**Cuadro 2:** Descripción del manejo del cultivo hasta la instalación del experimento

<b>Chacra</b>	<b>Sitio 1</b>	<b>Sitio 2</b>	<b>Sitio 3</b>	<b>Sitio 4</b>	<b>Sitio 5</b>	<b>Sitio 6</b>	<b>Sitio 7</b>
<b>Cultivar</b>	Carpintero	Churrinche	Churrinche	Don Albert	Don Albert	Don Albert	Carpintero
<b>F. Siembra</b>	10-jun	06-jun	04-jun	18-jun	17-jun	06-jul	15-jun
<b>Laboreo</b>	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	S.D.	Convencional
<b>Antecesor</b>	Trigo-soja	Trigo-Soja	Trigo-Soja	Soja	Soja	Giraso 1	Avena
<b>Plantas.m<sup>-1</sup></b>	64	53	46	41	47	29	53

La fertilización en siembra y Z 22 (Zadoks 22) fue realizada para la totalidad de los sitios basada en lo recomendado por el modelo de Facultad de Agronomía (Hoffman et al., 1999). En todos los casos fue realizado el análisis de suelo previo, esto junto a las unidades de nitrógeno (UN) agregadas en cada momento, se detallan en el Cuadro 3.

**Cuadro 3:** Dosis de nitrógeno y niveles críticos de NO<sub>3</sub> en suelo (a 20cm de profundidad) a la siembra y Z 22 según sitio.

Momento	Variable	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7
<b>Siembra</b>	N-NO <sub>3</sub> (ppm)	13	9	15	9	9	9	20
	UN (Kg/ha)	21,6	18	18	25	25	18	12
<b>Zadoks 22</b>	N-NO <sub>3</sub> (ppm)		8	12	4	4	7	7
	UN (Kg/ha)	41,25	36,8	23	46	46	46	46

Se realizaron aplicaciones de fungicidas en cinco de los siete sitios. Estas se detallan en el Cuadro 4.

**Cuadro 4:** Manejo sanitario según sitio.

	Aplicación	Momento	Producto
<b>Sitio 1</b>	Fungicida	Z 49	Nativo
<b>Sitio 2</b>	Fungicida	Z 21 y Z 37	Triad +Tebuzol
<b>Sitio 3</b>	Fungicida	Z 21 y Z 38	Triad +Tebuzol
<b>Sitio 4</b>	Fungicida	Z 37	Triad +Tebuzol
<b>Sitio 5</b>	Fungicida	Z 37	Triad +Tebuzol

### 3.2. TRATAMIENTOS

Se evaluaron 5 recomendaciones de fertilización nitrogenada al estadio Z 3.0

- 1- Sin N a Z 30 (Testigo)
- 2- Según recomendación del productor (Productor)
- 3- Según el modelo de fertilización propuesto por Baethgen (1992) (Fagro)
- 4- Idem anterior más un 30 % (Fagro 1.3)
- 5- Según el modelo de fertilización de Baethgen (1992) pero utilizando sulfato de amonio como fuente de N (Fagro S)

Los detalles de la aplicación se presentan en el Cuadro 5.

**Cuadro 5:** Porcentaje de nitrógeno en planta, fecha de aplicación y dosis de nitrógeno aplicada según tratamiento y sitio a Z30.

Momento	Trat.	Variable	Chacra						
			Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6	Sitio 7
Zadoks 30	%N en planta		3	2,5	2,4	4	3,3	2,6	3,2%
	Fecha de aplicación		04-sep	21-ago	21-ago	01-sep	02-sep	12-sep	10-sep
	Prod.	UN (Kg/ha)	50,6	46	46	29,9	18,4	0	0
	Fagro		50,6	46	46	0	34,5	50,6	41,4
	Fagro 1.3		64,4	60	60	23	46	64,4	55,2
Fagro S	50,4		42	42	0	35,7	50,4	42	

### 3.3. DISEÑO EXPERIMENTAL

Los tratamientos se ubicaron en un diseño de bloques completos al azar con dos repeticiones en todos los sitios. La unidad experimental fue de 3000 m<sup>2</sup> (200 x 15mts).

### 3.4. DETERMINACIONES

#### 3.4.1. Suelo

Se tomaron muestras de suelo por parcela en dos momentos del ciclo del cultivo (previo a cada aplicación), ellos son siembra y Zadoks 22 (inicio de macollaje). Dichas muestras se realizaron a 20cm de profundidad por parte de cada productor, y luego enviadas a laboratorio para su análisis químico.

#### 3.4.2. Planta

Se realizó un muestro de planta en el estadio de Zadock 30 para determinar el porcentaje de nitrógeno en la misma mediante el método Kjeldah.

#### 3.4.3. Determinación de rendimiento y sus componentes

Al momento de la cosecha se determinó el número de espigas por unidad de superficie. Para ello se contaron las espigas en 10 m de dos surcos consecutivos en dos sitios por parcela al azar.

El rendimiento se determinó con cosechadora comercial, cosechando los 200 m de largo del centro de cada parcela por el ancho de la cosechadora. El peso se realizó utilizando una balanza portátil transportable. De cada parcela se extrajo una muestra de 5 kg de grano, los cuales fueron analizados en laboratorio de la Estación Experimental de INIA “La Estanzuela” y en el Laboratorio Tecnológico del Uruguay (LATU) determinándose la humedad y los parámetros de calidad de grano y harina.

#### **3.4.4. Calidad del grano y harina**

Calidad de grano:

- Peso Hectolitrito (Kg. por hectolitrico)
- Contenido de proteína (%), con 13,5 % de humedad.
- Gluten húmedo (g/100g).
- Gluten seco (g/100g).

Calidad de harina:

- Fuerza de la masa ( $J \times 10^{-4}$ ).
- Relación tenacidad/extensibilidad
- Absorción farinográfica (%).
- Estabilidad farinográfica (minutos).

Otros:

- Falling Number (segundos)

La determinación de proteína en trigo se ha realizado tradicionalmente por el método clásico de Kjeldahl (Vázquez, 2009). Para la determinación del valor de de gluten húmedo se forma una masa con trigo integral o harina y una cantidad de agua preestablecida. La masa es lavada por una corriente de agua, quedando así una masa elástica formada por las proteínas que conforman el gluten y el agua retenida por éste, obteniéndose así el “gluten húmedo” (Vázquez, 2009).

Para obtener los parámetros de calidad de la harina se realizaron análisis reologicos por medio del método del ALVEOGRAMA de CHOPIN, de este procedimiento se obtiene el valor de fuerza de la masa (W), la tenacidad (P) y el valor de extensibilidad (L), obteniéndose la relación P/L (Vázquez, 2009); de todos estos valores, los utilizados para describir las propiedades reológicas de la masa son W y la relación P/L.

Otro análisis reológico que se realizó fue el FARINOGRAMA. Por este método se obtiene el valor de “absorción farinografica” o simplemente “absorción”. El otro

parámetro obtenido a partir del farinografo es la estabilidad de la masa. (Vázquez, 2009).

#### **3.4.5. Cuantificación de la cantidad y respuesta del nitrógeno utilizado**

El cálculo de nitrógeno extraído, requerido y absorbido fue realizado en base a las siguientes formulas:

- 1- Nitrógeno exportado por hectárea: Kg. de grano por hectárea \* (contenido proteína /5.7)
- 2- Nitrógeno requerido por hectárea: 30 Kg. de nitrógeno por tonelada de grano de trigo con 12% de proteína
- 3- Nitrógeno absorbido: Nitrógeno exportado/0.7

La respuesta al agregado de nitrógeno se estimó para rendimiento, porcentaje de proteína, fuerza de la masa (W) y la relación tenacidad/extensibilidad como la diferencia en relación al testigo. La estimación fue realizada en términos absolutos y por unidad de nitrógeno agregado.

#### **3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

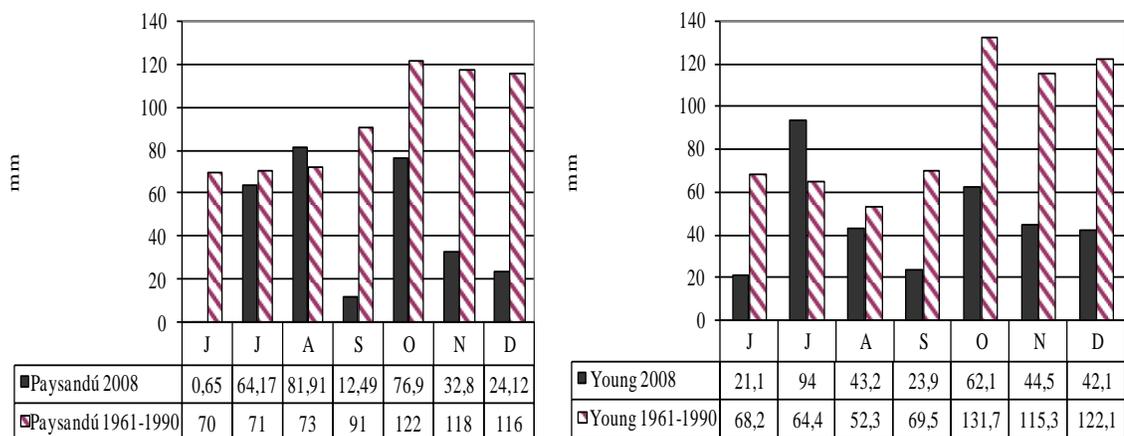
Para evaluar el efecto de los tratamientos se realizaron análisis de varianza y la comparación de tratamientos se realizó utilizando la MDS, con un nivel de significancia de 0.05 o 0.1, dependiendo de la variable analizada. En todos los casos fue utilizado el paquete estadístico INFOSTAT.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. DESCRIPCIÓN CLIMÁTICA DEL AÑO 2008

#### 4.1.1. Precipitaciones

En la Figura 1 se presentan las precipitaciones ocurridas en dos localidades, donde se refleja la variabilidad espacial de las lluvias dentro de la zona en la que se instalaron los ensayos.

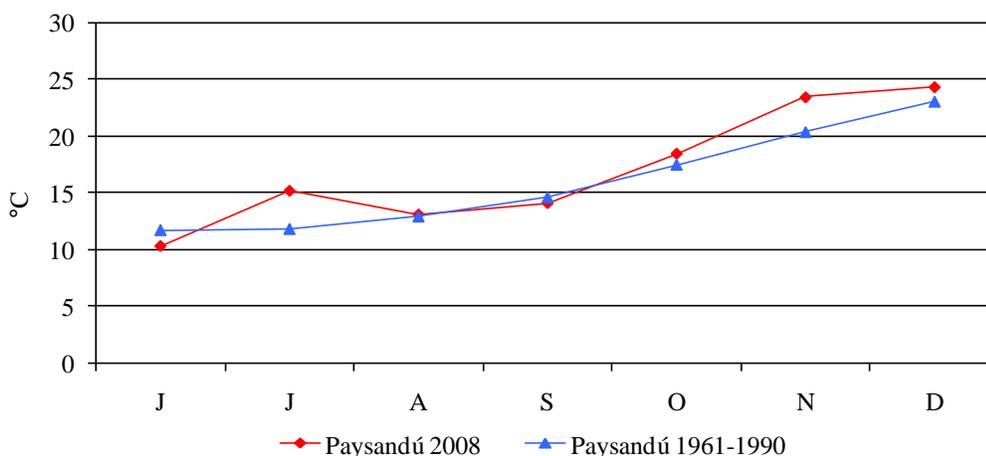


**Figura 1:** Precipitaciones mensuales para el año 2008 y serie histórica (1961-1990) en Paysandú y Young.

Existieron pequeñas variaciones entre las precipitaciones de las localidades, pero tuvieron un comportamiento general similar. A no ser por lo sucedido en el mes de julio, las precipitaciones en los primeros estadios de crecimiento fueron relativamente buenas. A partir del inicio encañado la situación se revirtió y se registra una disminución de las precipitaciones hasta fines de encañado – comienzo de floración, que se extiende hasta cosecha. Se destaca la diferencia entre las precipitaciones ocurridas en el año en que se establecieron los experimentos, y la serie histórica en los meses de septiembre, octubre y noviembre. Esto significó un problema en estadios avanzados del cultivo, inclusive floración, donde en la mayoría de los casos no se pudo concretar rendimiento por déficit hídrico. La magnitud de este problema varió en los sitios estudiados, de acuerdo a la capacidad de almacenaje de agua del suelo de cada sitio.

### 4.1.2. Temperatura

La temperatura medio del mes de junio fue menor a la histórica, favoreciendo un crecimiento lento del cultivo, pero existió un “veranillo” durante julio. Durante agosto y septiembre el régimen térmico del año se comportó similar al promedio histórico, y durante el llenado de grano las temperaturas fueron sustancialmente superiores (Figura 2).



**Figura 2:** Temperatura media mensual para el año 2008 y serie histórica (1961-1990) en Paysandú

En síntesis, las condiciones climáticas del año 2008 tendieron a estimular un rápido crecimiento en los primeros estadios del cultivo, y a reducir el período de llenado de grano por una primavera seca y cálida. Por lo tanto, a nivel general, no fueron favorables para la definición ni la concreción de altos rendimientos.

## 4.2. EFECTO DE LAS ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN

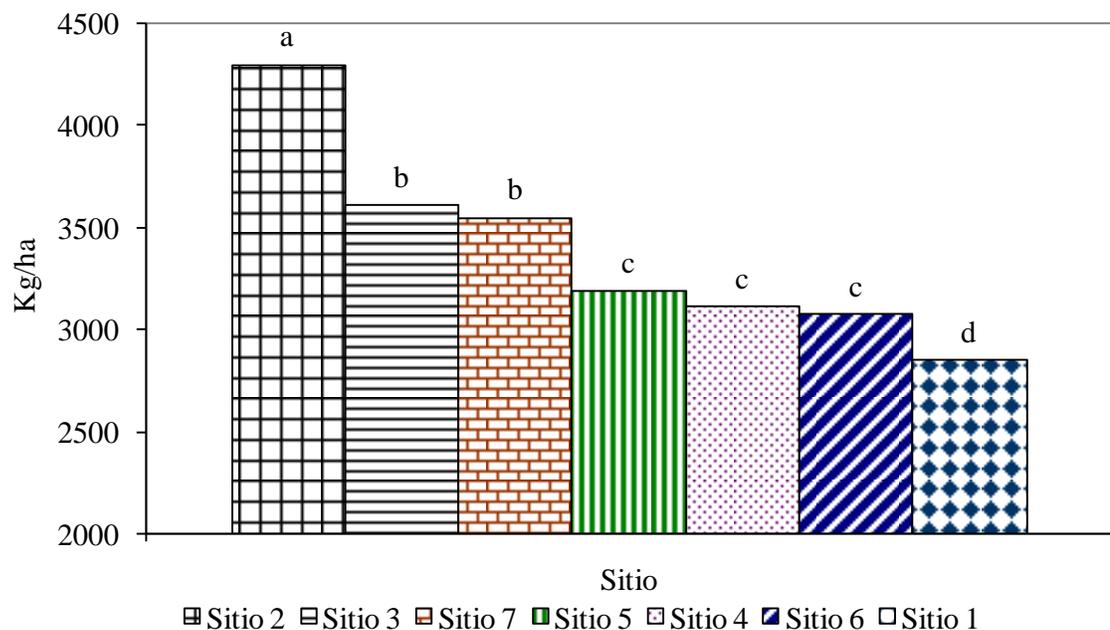
### 4.2.1. Rendimiento en grano

Los sitios donde se establecieron los experimentos mostraron diferencias significativas en cuanto al promedio de rendimiento en grano logado; dejando de manifiesto la gran variabilidad (aproximadamente 1500 kg/ha de diferencia entre el promedio del mejor y peor sitio), en el potencial de producción de cada uno (Figura 3). El promedio de rendimiento total es de 3440Kg./ha, lo cual demuestra un potencial de rendimiento global relativamente bajo para los casos evaluados.

La respuesta en rendimiento al agregado de nitrógeno mediante las diferentes estrategias de fertilización alcanzó casi 1000 kg/ha de superioridad con respecto al testigo en algunos casos, y respuesta nula o negativa en otros. En el promedio de los

ambientes bajo estudio, los tratamientos de fertilización incrementaron significativamente el rendimiento en grano, pero la interacción sitio por tratamiento fue estadísticamente significativa ( $p < 0.1$ ). En base a ésta es posible caracterizar dos tipos de ambientes para el estudio: uno de respuestas positivas y altas, y otro de respuestas bajas o nulas al agregado de nitrógeno (Figuras 4 y 5 respectivamente).

Los ambientes con respuestas al N están constituidos por los tres sitios con mayor rendimiento promedio, y los sin respuestas los integran los restantes sitios. Los ambientes considerados con respuesta son rotulados como tal, cuando en alguno de los tratamientos con nitrógeno agregado incrementó significativamente el rendimiento, aunque haya sido solo en uno de los tratamientos del sitio. Por el contrario, el grupo de ambientes sin respuesta está integrado por los sitios donde no se observó respuesta a ninguno de los tratamientos evaluados.



**Figura 3:** Rendimiento promedio según sitio

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre si entre columnas ( $p < 0.05$ ).

El efecto de los tratamientos dependió del sitio donde fueron aplicados. Como ya se mencionó existieron sitios sin respuestas al agregado de nitrógeno; sin embargo, en dos de ellos (sitio 1 y 6), cuando se agregó N en base al estado nutricional del cultivo y potencial de rendimiento, utilizando sulfato de amonio como fuente de N, las respuestas fueron significativamente superiores comprado con los tratamientos en que se utilizó urea como fuente de N. Esa superioridad, muy probablemente se dio como consecuencia

de la respuesta al agregado de azufre. El efecto de la fuente, lo cual pudo determinar mayor liberación de N-NO<sub>3</sub> en los casos que se fertilizó con sulfato de amonio, podría ser una posible explicación pero menos probable.

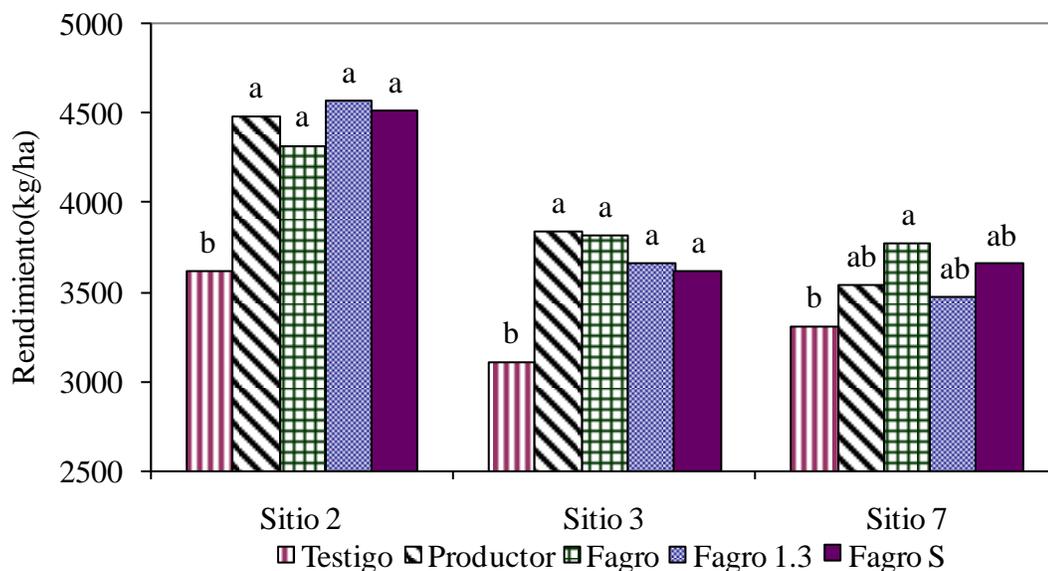
En el Cuadro 1 se observa que a Z30 el estado nutricional de los cultivos fue “deficiente”, lo que sumado a las expectativas de rendimiento, ameritó que en seis de las siete situaciones fertilizadas según el modelo se debió agregar entre 34 y 50 kg/ha de nitrógeno. Aquí también se puede ver que en los sitios donde la fertilización con N no tuvo efecto sobre el rendimiento, sólo en dos casos la recomendación fue no fertilizar. Por lo tanto, en estos ambientes (con las excepciones nombradas anteriormente) todas las estrategias de fertilización recomendaron agregar N en situaciones donde los cultivos no hicieron uso de él para concretar rendimiento.

Los productores en tres casos fertilizaron igual a lo recomendado por el tratamiento Fagro, en dos situaciones decidieron no fertilizar y en las restantes decidieron agregar alrededor de 20 unidades de N/ha en un caso, y 30 en el otro. Por lo tanto, cuando no aplicaron la dosis que recomienda el modelo de Facultad de Agronomía, la tendencia fue a no refertilizar a Z 30, o al agregado de 40Kg. de urea en el sitio 5 y 65kg. de esa fuente en el sitio 4.

**Cuadro 6:** Nitrógeno en planta, rendimiento estimado, y unidades de nitrógeno agregadas para todos los tratamientos y sitios a Z30.

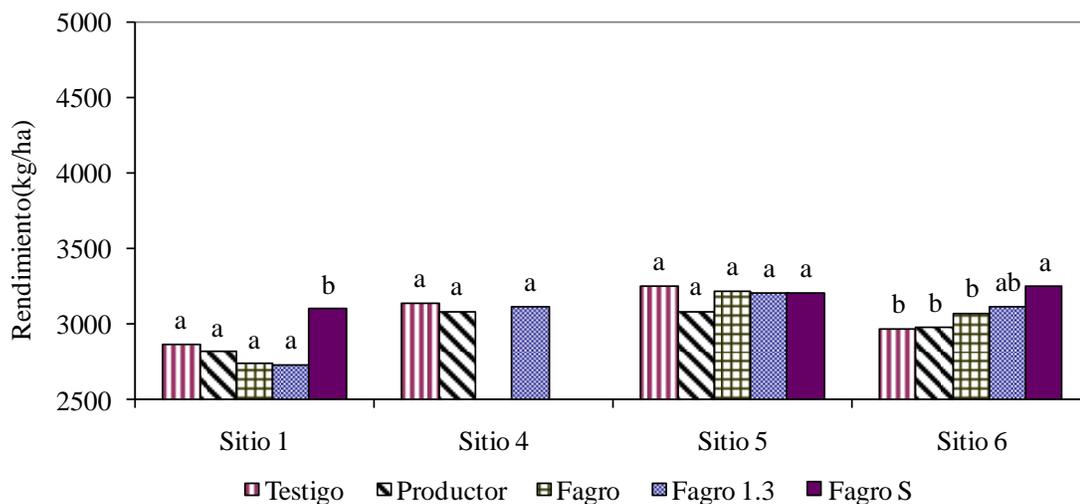
Variable		Con respuesta			Sin respuesta			
Tratamiento		Sitio 2	Sitio 3	Sitio 7	Sitio 1	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6
Productor	UN (Kg/ha)	46	46	0	50,6	29,9	18,4	0
Fagro		46	46	41,4	50,6	0	34,5	50,6
Fagro1.3		60	60	55,2	64,4	23	46	64,4
FagroS		42	42	42	50,4	0	35,7	50,4
% de N en planta		2,5	2,4	3,2	3,0	4,0	3,3	2,6
Franja de rend. estimado (tt/ha)		2,5-3,5	2,5-3,5	>3,5	>3,5	>3,5	>3,5	2,5-3,5

En los tres sitios restantes las respuestas se adecuaron a lo esperado considerando la cantidad de nitrógeno aplicado. Dentro de estos sitios, sólo en uno de ellos (sitio 7) las respuestas difirieron significativamente entre tratamientos, en ese caso el rendimiento en grano fue significativamente superior cuando la cantidad de nitrógeno a agregar en Z30 fue definida por el estado nutricional del cultivo y la estimación del rendimiento esperado en cada situación. No hubo efecto en incrementar la cantidad de nitrógeno en un 30%, ni agregar azufre con dosis equivalentes de N (sulfato de amonio).



**Figura 4:** Rendimiento en grano según sitio y tratamiento para los ambientes con respuesta

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre si entre columnas dentro de cada sitio ( $p < 0.1$ )



**Figura 5:** Rendimiento en grano según sitio y tratamiento para los ambientes sin respuesta

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre si entre columnas dentro de cada sitio ( $p < 0.1$ )

Para el sitio 2 y 3 los resultados indican que fue indiferente utilizar cualquiera de las estrategias analizadas para obtener ese nivel de respuesta. Sin embargo, como las estrategias difieren en la cantidad de N aplicado, en el Cuadro 2 se presenta la eficiencia de uso para cada tratamiento expresada en kg. de grano por kg. de N, para los tres ambientes con respuestas.

**Cuadro 7:** Eficiencia de uso de nitrógeno según sitio y tratamiento para los ambientes con respuesta

Tratamiento	Kg. de grano/Kg. de N		
	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 7
Productor	15,8 a	15,9 a	0,0
Fagro	15,7 a	15,4 a	11,2 a
Fagro 1.3	18,3 a	9,3 b	2,9 a
Fagro S	21,8 a	12,1 ab	8,3 a
Promedio	17,9 A	13,1 B	5,6 C

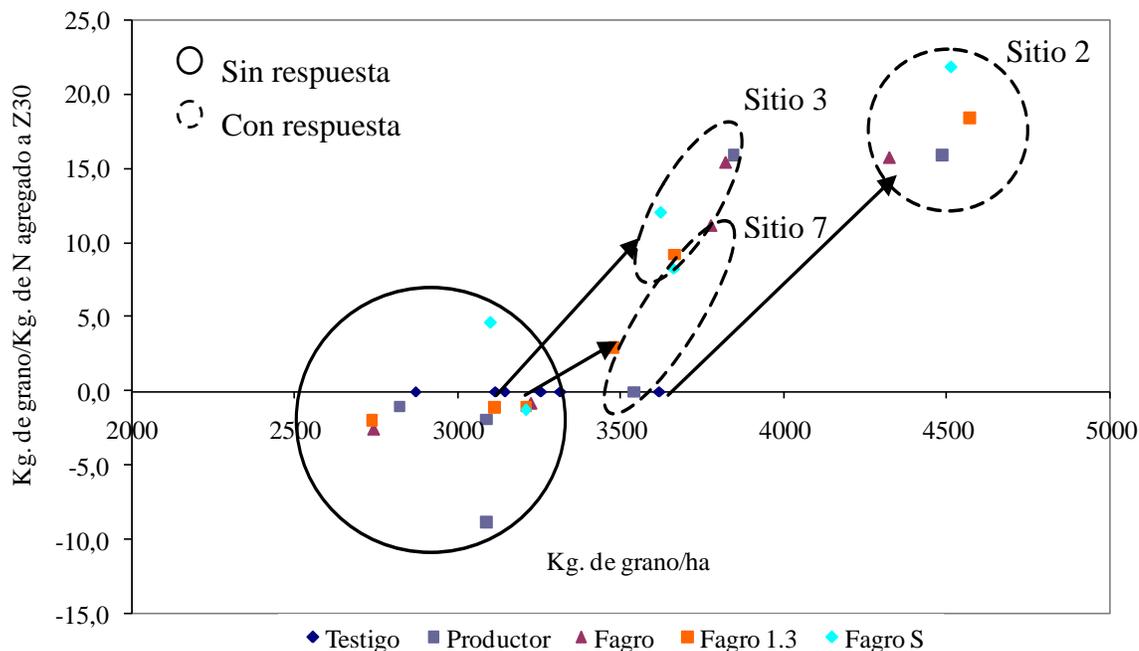
**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre si entre filas, mayúscula entre columnas ( $p < 0.1$ ).

Eran esperables los resultados que se registraron en el sitio 2 y 3 de la aplicación del tratamiento Productor y Fagro, ya que las respuestas a esos tratamientos resultaron de agregar la misma cantidad de nitrógeno (Cuadro 1). En el sitio 7, el tratamiento Productor no aplicó N; pero el resultado de las eficiencias de uso de nitrógeno de los demás tratamientos en este sitio, demuestra que era necesario el agregado del nutriente para concretar rendimiento. La gran variación registrada en este sitio hizo que las eficiencias de uso no difirieran significativamente, pero si fue observada una tendencia a ser más bajas en el tratamiento Fagro1.3 en relación al tratamiento Fagro.

Los resultados de la aplicación del tratamiento Fagro en los sitios 2 y 3, son acordes a los esperados cuando se fertiliza en base al modelo utilizado (Modelo de Baethgen, 1992). En el sitio 3, cuando se aplicó el tratamiento Fagro 1.3 la eficiencia en el uso del nitrógeno fue significativamente más baja que el tratamiento Fagro, lo cual se ajusta al objetivo planteado en el trabajo, bajo la hipótesis de que esto redundaría en mayor contenido de proteína en grano (estos resultados serán presentados más adelante). Por otro lado, en el sitio 2 las eficiencias de uso de nitrógeno registradas cuando se aplicó el tratamiento Fagro 1.3 no difirieron significativamente de aquellas obtenidas de la aplicación del tratamiento Fagro; sin embargo, el rendimiento en términos absolutos no fue significativamente diferente entre ambos tratamientos.

En la Figura 6 se resume el comportamiento de la eficiencia de uso de nitrógeno cuando se relaciona con el rendimiento y se la discrimina por tratamiento. Se pueden identificar dos zonas que se corresponden con los niveles de respuesta nombrados anteriormente. El círculo de línea entera encierra a las eficiencias obtenidas en los

ambientes sin respuesta, y los círculos de línea punteada contienen las eficiencias registradas en los tres sitios correspondientes al grupo de respuestas elevadas. Las flechas indican cual fue el testigo para cada uno de los sitios de este último grupo.



**Figura 6:** Eficiencia al agregado de N a Z30 en rendimiento según rendimiento por sitio y tratamiento

En los ambientes con respuesta, la variación del rendimiento con relación al testigo sin fertilizar con N fue elevada. Dentro de ellos, se registró el testigo de mayor rendimiento, pero también hubo testigos al mismo nivel de rendimiento de los sitios del grupo sin respuesta. En el sitio donde se registraron las respuestas más elevadas, el rendimiento del testigo fue el mayor, dejando de manifiesto que ese ambiente de producción fue el “mejor” para el crecimiento del cultivo. En aquellos sitios donde no hubo respuesta o fue baja, los rendimientos de los testigos también fueron bajos (en relación a los resultados del ensayo). No se cuenta con información sobre el potencial de rendimiento de los sitios, pero debido a que los rendimientos promedios en los sitios sin respuesta fueron los más bajos del experimento (Figura 3), y el porcentaje de nitrógeno en planta de los cultivos a Z30 (a excepción del sitio 4) manifestó deficiencias en el aporte del nutriente (Cuadro 1), es de suponer que la falta de respuesta no se debe a que los cultivos se encontraban cerca del potencial de rendimiento o en una situación de alta disponibilidad del nutriente, sino que hubo uno, o un conjunto de factores que impidieron la expresión de la respuesta al agregado de nitrógeno.

Los resultados obtenidos en los sitios sin respuesta marcan que independientemente de la estrategia de fertilización utilizada, no siempre es posible lograr elevar la cantidad de grano mediante el agregado nitrógeno a Z30; aún cuando se trate de cultivos cuyo estado nutricional y estimación de rendimiento en ese estadio indiquen que es necesario el agregado. Esta situación determinó que utilizando el modelo de Facultad de Agronomía se tendiera a sobrefertilizar. En estos sitios, este problema radicaría en una sobreestimación del rendimiento a Z30 debido a limitantes para la expresión de ese rendimiento potencial que se manifestaron en estadios posteriores.

#### **4.2.2. Relaciones entre los componentes del rendimiento**

En el Cuadro 3 se presenta el componente del rendimiento número de espigas por metro cuadrado. Dentro de los ambientes con respuesta hubo diferencias significativas en cuanto al número de espigas que llegaron a cosecha. El bajo valor registrado en el sitio 7 considerando la variedad utilizada (Carpintero), refleja problemas en las etapas de generación y/o concreción del rendimiento que limitó la respuesta al agregado de nitrógeno, e impidió respuestas al mismo nivel de los dos sitios restantes del mismo grupo. En el sitio 2 y 3 el nitrógeno agregado evitó el descenso en el número de tallos, por lo que en el sitio 7, en el cual no existen diferencias significativas entre los tratamientos sin agregado (Testigo y Productor) y el resto de los tratamientos con agregado, el nitrógeno incrementó la fertilidad de las flores.

**Cuadro 8:** Número de espigas por metro cuadrado según tratamiento y sitio.

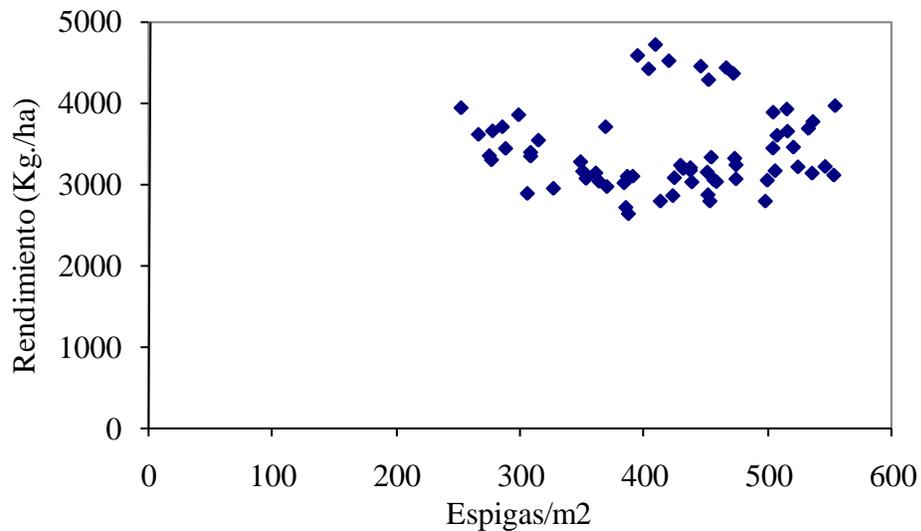
Grupo	Sitio	Tratamiento					Prom.
		Testigo	Productor	Fagro	Fagro 1.3	Fagro S	
Con respuesta	Sitio 2	341 B	432 A	462 A	406 A	430 A	414 b
	Sitio 3	442 C	526 AB	542 A	511 B	511 B	507 a
	Sitio 7	292 A	282 A	292 A	270 A	280 A	283 d
Sin respuesta	Sitio 1	391 A	452 A	441 A	405 A	402 A	418 b
	Sitio 4	489 A	447 A		486 A		474 a
	Sitio 5	464 AB	437 B	494 AB	513 AB	535 A	489 a
	Sitio 6	355 A	348 A	362 A	368 A	389 A	364 c
	Prom.	395 A	418 A	432 A	423 A	424 A	

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre si entre filas, mayúsculas entre columnas ( $p < 0.1$ ).

En los sitios 4 y 5 (sin respuesta) donde fue sembrada la variedad Don Alberto, el número de espigas fue adecuado para construir altos rendimientos con ese cultivar. En los sitios 2 y 3 (alta respuesta) donde se utilizó Churrinche, el componente de

rendimiento espigas/m<sup>2</sup> estuvo también cerca del óptimo para la variedad, por lo tanto es posible concluir que la cantidad de espigas por metro cuadrado, y por lo tanto la fertilidad de los tallos no fue un impedimento relevante para la expresión de la respuesta al agregado de nitrógeno y la obtención de altos rendimientos. Esto indicaría que la diferencia entre estos dos grupos de sitios estuvo explicada por diferencias en la fertilidad de la flores, y también, aunque posiblemente con menor peso relativo, a diferencias en el peso de los granos.

Para los resultados del ensayo, no se encontró relación entre en el número de espigas con el rendimiento en grano (Figura 7). En base a esto, los factores determinantes de las bajas respuestas al agregado de nitrógeno, se dieron dentro del período crítico, cuando todavía no se había concretado el número de flores fértiles, o posiblemente post-antesis, condicionando el llenado de grano.



**Figura 7:** Rendimiento en grano en función del número de espigas por metro cuadrado

#### **4.2.3. Posibles determinantes de la expresión de la respuesta en rendimiento al agregado N a Z30**

Existen algunas características en el manejo de los cultivos y del ambiente en donde se desarrollaron que pudieron jugar un rol preponderante en determinar la ubicación de los sitios en uno u otro nivel de respuesta en rendimiento (Cuadro 9).

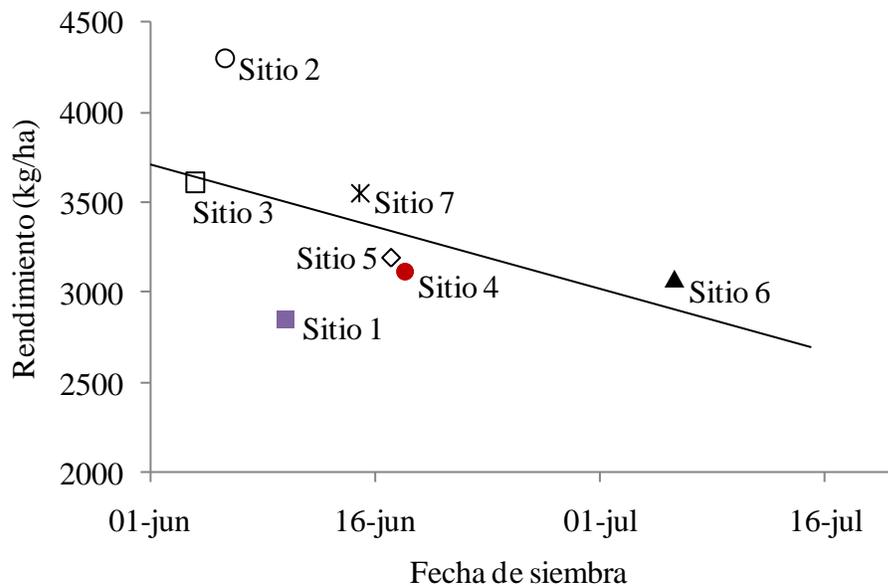
**Cuadro 9:** Variable de manejo según sitio

Grupo de respuesta	Sitio	Fecha de siembra	Fecha a Z30*	Fecha de fertilización a Z30	Plantas. m <sup>-1</sup> (óptimo)**	Cultivos antecesores	Laboreo
Con respuesta	Sitio 2	06-jun	21-ago	21-ago	53 (25-30)	Trigo-Soja	SD
	Sitio 3	04-jun	19-ago	21-ago	46 (25-30)	Trigo-Soja	SD
	Sitio 7	15-jun	27-ago	10-sep	53 (25-30)	Avena	Arado
Sin respuesta	Sitio 4	18-jun	29-ago	01-sep	41 (30-35)	Soja	SD
	Sitio 5	17-jun	28-ago	02-sep	47 (30-35)	Soja	SD
	Sitio 6	06-jul	16-sep	12-sep	29 (30-35)	Prad-girasol (gramilla)	SD
	Sitio 1	10-jun	24-ago	10-sep	64 (25-30)	Trigo-soja	SD

(\*) Estimada por acumulación térmica

(\*\*) Nivel poblacional óptimo para la variedad (pl.m<sup>-1</sup>)

La fecha de siembra en interacción con el clima del año, fueron los principales factores que marcaron las diferencias entre sitios en términos de respuesta en rendimiento al agregado de nitrógeno. Esto implicó que en los sitios donde se sembró más allá de la segunda quincena de junio, el período crítico y las siguientes etapas de desarrollo de los cultivos se ubicaran en un momento donde las precipitaciones estuvieron muy por debajo del promedio histórico, y las temperaturas muy por encima (Figura 1). Esto acentúa aún más los problemas que surgen como consecuencia del corrimiento del ciclo hacia el verano en relación a años con valores de precipitaciones y temperatura promedio (Figura 8).



**Figura 8:** Rendimiento promedio por sitio según fecha de siembra

En el sitio 1 se identificaron deficiencias de azufres (Figura 5), la densidad de siembra muy por encima del óptimo para la variedad, y un desfase importante entre la fecha a la cual el cultivo llegó a Z30 y la fecha de fertilización en ese estadio (Cuadro 4). Estos factores posiblemente determinaron el bajo rendimiento y respuesta al N obtenida para la fecha de siembra en ese sitio. La densidad de siembra tampoco fue la óptima para las variedades con las cuales se trabajó en los demás sitios. Solo en uno de los ellos, perteneciente al grupo sin respuesta en rendimiento, el nivel poblacional de plantas estuvo situado dentro del rango recomendado (sitio 6). En tanto el uso de la tierra en las estaciones que antecedieron al invierno donde fue instalado el ensayo, en los casos sin respuesta, no contribuyeron a la acumulación de agua en esos suelos. Este factor podría aumentar los problemas en interacción con las variables de manejo nombradas anteriormente. No se dispone de la información sobre la capacidad de acumulación de agua de los suelos de los ensayos, lo cual es muy importante para poder ponderar el efecto de este factor.

Dentro de los ambientes con respuesta, en el sitio 7 la densidad de siembra, la fecha en la cual sembró al cultivo, y la cantidad de días que existieron entre que el cultivo comenzó a encañar y se corrigió el nitrógeno en este estadio, probablemente se constituyeron en las principales limitantes de la expresión del rendimiento para ese caso. El impacto de estos factores pudo estar amortiguado por la acumulación de agua en el perfil durante el verano y parte de la primavera anterior, dado que el trigo fue sembrado sobre un rastrojo de un cultivo avena sembrado el invierno anterior. El laboreo del suelo en ese lugar probablemente influyó positivamente sobre el rendimiento, evitando también la caída del mismo y por tanto que se ubicara en el grupo de baja respuesta.

La hipótesis generada a partir de estos resultados es que el nivel de acierto del modelo propuesto estuvo condicionado por la situación climatológica de la primavera del 2008, y por las limitantes impuestas por el ambiente de producción de cada sitio experimental. En el Cuadro 10 se muestra que las respuestas significativas al agregado de N (según la dosis que recomienda el modelo) fueron obtenidas en los sitios donde el rendimiento logrado fue mayor o igual al rendimiento estimado a Z30. En aquellos sitios sin respuestas, se esperaban rendimientos superiores a los efectivamente cosechados, manifestando que los cultivos a Z30 prometían concretar un rendimiento que finalmente quedó condicionado por limitantes impuestas en etapas posteriores. En el sitio 6, evidentemente luego del encañado aumentó la liberación de nitrógeno del suelo, ya que el rendimiento logrado estuvo dentro de la franja estimada, pero no hubo respuesta al agregado N, determinando que el aporte del fertilizante fuera innecesario para concretar rendimiento. Este fenómeno pudo haber sido definido por la pradera que antecede al girasol del verano anterior a la siembra del trigo, ya que cuando se incluyen pasturas en la rotación es esperable una mejora en el balance de N en el sistema y por lo tanto mayor liberación de este nutriente del suelo.

**Cuadro 10:** Indicadores de respuesta, unidades de nitrógeno agregadas (UN) y rendimiento logrado según sitio

Variable	Con respuesta			Sin respuesta			
	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 7	Sitio 1	Sitio 4	Sitio 5	Sitio 6
%N en planta	2,5	2,4	3,2%	3,0	4,0	3,3	2,6
Franja de rend. estimado (tt/ha)	2,5-3,5	2,5-3,5	>3,5	>3,5	>3,5	>3,5	2,5-3,5
UN agregadas según modelo	46	46	41,4	50,6	0	34,5	50,6
Rendimiento Fagro (kg/ha)*	4324 a	3822 a	3776 a	2740 a	3143 a	3225 a	3077 a
Rendimiento Testigo (kg/ha)**	3618 b	3113 b	3314 b	2869 a	3143 a	3253 a	2971 a

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre columnas ( $p < 0.1$ )

(\*) Rendimiento del cultivo fertilizado según el modelo

(\*\*) Rendimiento del cultivo sin fertilizar a Z30

En conclusión, las causas que determinaron que existieran situaciones donde no se registran respuestas, están relacionadas a limitantes hídricas y térmicas impuestas en el período de concreción del rendimiento, junto con medidas de manejo que expusieron a los cultivos por más tiempo, y en situaciones de mayor competencia entre plantas en dicho contexto ambiental. La reflexión que surge de estos resultados es que en los sitios donde no hubo respuesta, el nitrógeno no fue el factor que limitó el rendimiento, y por lo

tanto el acierto o la efectividad global en términos de respuesta en rendimiento al agregado de N de las estrategias evaluadas, sería mayor si se identificaran los efectos de los restantes factores limitantes del rendimiento.

#### 4.2.4. Calidad del grano

##### 4.2.4.1. Contenido de proteína

Respecto a la concentración de proteína en grano existieron diferencias significativas entre los ambientes, los tratamientos, y se constató interacción entre ambos ( $p < 0.1$ ). Se observaron importantes diferencias en la concentración de proteína en grano que oscilaron en un rango de 9.0 a 14.2% para todos los sitios. La variabilidad del potencial productivo entre los ambientes ofrecidos explica la amplitud de esos valores; dentro de los componentes que explican esa variabilidad pueden considerarse los cultivares utilizados.

Considerando la interacción existente, se muestran los resultados con las diferencias para cada situación tratada dentro de los sitios correspondientes. El efecto positivo de la definición de la dosis de nitrógeno sobre la calidad del grano, debe ponderarse por el hecho que existieron situaciones en las que el agregado de nitrógeno no aumentó el rendimiento en grano. La concentración de proteína en el grano para esos ambientes se muestra en el Cuadro 6.

**Cuadro 11:** Porcentaje de proteína promedio según tratamiento para los sitios sin respuestas en rendimiento

Rendimiento	Sitio	Tratamientos				
		Testigo	Productor	Fagro	Fagro 1.3	Fagro S
Sin respuesta	1	12,8 A	12,6 A	12,5 A	12,5 A	11,9 B
	4	9,0 B	10,2 A		9,80 A	
	5	10,7 A	11,0 A	11,9 A	11,5 A	11,1 A
	6	10,6 B	10,6 B	12,1 A	11,9 A	12,3 A

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra no difieren entre columnas ( $p < 0.1$ )

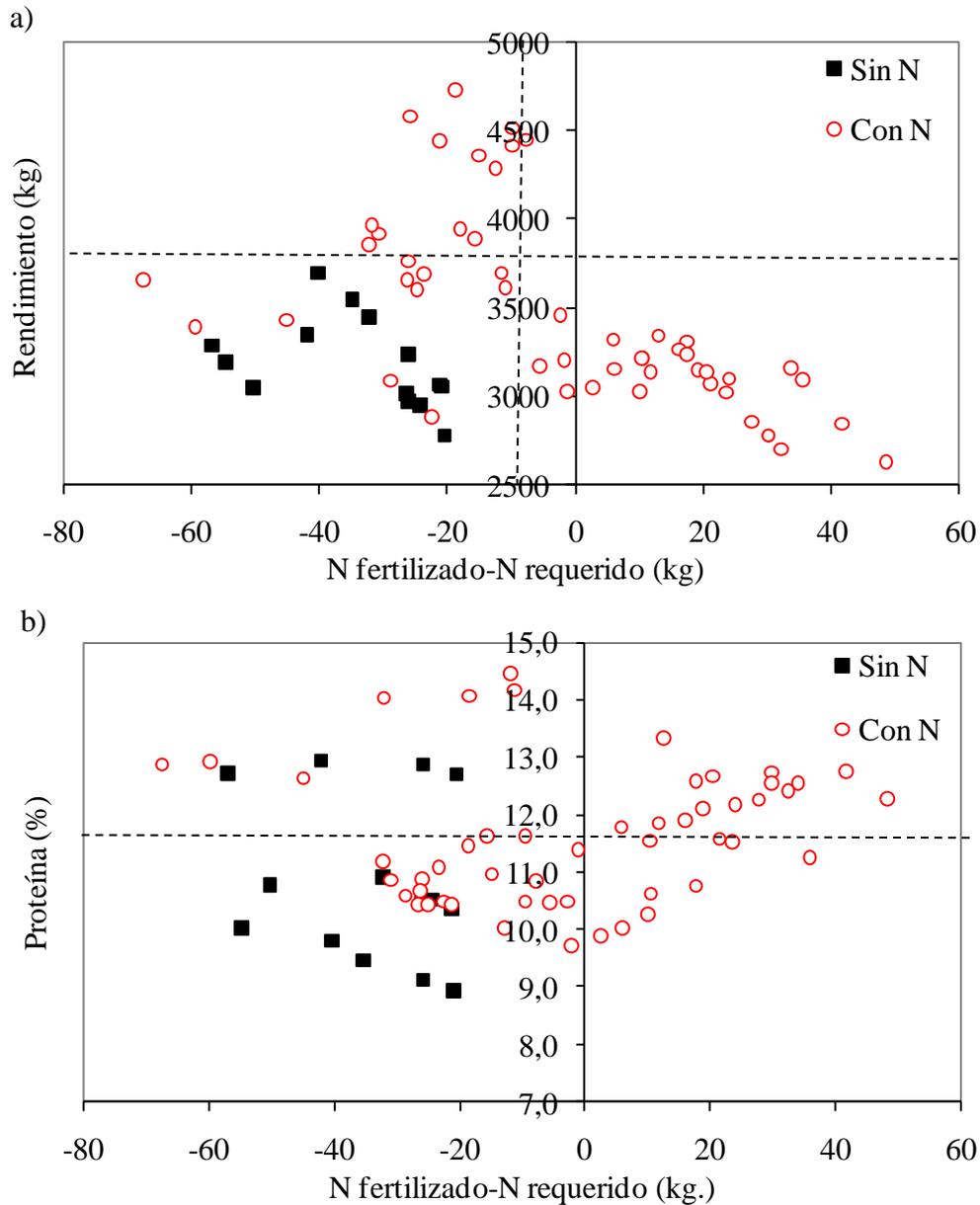
Existieron tres tipos de efectos del agregado de N sobre el porcentaje de proteína. Uno de ellos, es el efecto que se puede apreciar en el sitio 5. Aquí, el contenido de proteína se mantuvo incambiado en relación al testigo, lo cual denota la existencia de problemas en el proceso de absorción del nutriente y/o ineficiencias en la translocación del nitrógeno al grano. Otro tipo de respuesta fue el incremento en el porcentaje de proteína en grano por el agregado de N sin importar la dosis utilizada (sitios 4 y 6), donde ninguno de los tratamientos que agregaron nitrógeno se diferenció entre sí, lo cual estaría implicando absorción excesiva para el rendimiento obtenido. En el sitio 4, en el cual el modelo recomendó no fertilizar, el agregado de N aumentó el contenido de

proteína en grano, pero la respuesta en términos absolutos fue baja. Sin embargo en el sitio 6, donde el productor no agregó N a Z30, el agregado en exceso resultó en un incremento sustancial en el contenido de proteínas, al punto de ubicar el valor de esta variable sobre el nivel mínimo aceptado por la industria. Esto estaría indicando dos cosas, el sitio 4 sería un ambiente que marca un punto de partida del nivel de nitrógeno en grano muy bajo y por lo tanto estaría definiendo un valor máximo alcanzable menor o la necesidad de agregar una dosis mayor, esperando una respuesta más elevada para alcanzar 11,5% de proteína. El segundo punto sería que en el sitio 6, la decisión de no agregar N a Z30 por parte del productor, fue acertada desde el punto de vista del rendimiento pero implicó que el porcentaje de proteína se mantuviera en el mismo nivel que el testigo; aquí el resto de las estrategias utilizaron dosis que oscilaron entre 50 y 65Kg. de N/ha, quedando la duda de la respuesta en proteína al agregado que se lograría con dosis menores a las utilizadas allí. También existió respuesta negativa al agregado de nitrógeno (sitio 1) cuando fue aplicado N y S. En ese sitio el tratamiento Fagro S determinó respuesta en rendimiento significativa con relación al testigo, por lo cual el descenso en la concentración de proteína probablemente fue producto de la dilución del N en grano.

En conclusión, en los sitios donde el nitrógeno no provocó incremento de rendimiento, aumentó el porcentaje de proteína probablemente como resultado del exceso nitrógeno para el rendimiento logrado. Sin embargo, existieron casos donde se agregó N y este no fue absorbido en el período pre y post-antesis y/o translocado al grano. En el caso que se haya absorbido, pone de manifiesto una gran fuente de pérdidas en el proceso que va desde que el nitrógeno entra en contacto con el suelo hasta que es depositado en el grano. Las pérdidas de nitrógeno pueden originarse a diferentes niveles, ya sea por volatilización cuando el fertilizante entra en contacto con el suelo o desde la planta en forma de amoníaco (Harper et al., 1987); también puede perderse por lavado en caso de que existan precipitaciones luego de aplicado el fertilizante.

La eficiencia en el uso del nitrógeno y el rendimiento en términos absolutos se ven reflejados en el balance de nitrógeno correspondiente a lo que se agrega vía fertilizante, y lo que se sustrae en el grano cosechado del sistema (Figura 9). Los balances positivos se lograron en aquellas situaciones donde fue agregado N y la respuesta en rendimiento fue baja, nula o negativa. Existieron casos donde aunque el rendimiento fue bajo, el balance N fertilizado-N requerido fue negativo, pero nunca se dio la combinación de altos rendimientos con valores positivos de dicho balance. La mayoría de los puntos correspondientes al tratamiento Testigo (sin N) se ubican en el cuadrante inferior izquierdo con balance negativo, rendimientos bajos y concentración de proteína menor a 11.5% (Figura 9a y 9b). Algunos puntos muestran que el aporte del suelo post Z30 y lo agregado de N antes de este estadio fue suficiente para obtener porcentajes de proteína en grano mayores a 11.5 (Figura 8b); de todas maneras el rendimiento en esas situaciones fue bajo. También se observa aquí una leve tendencia a

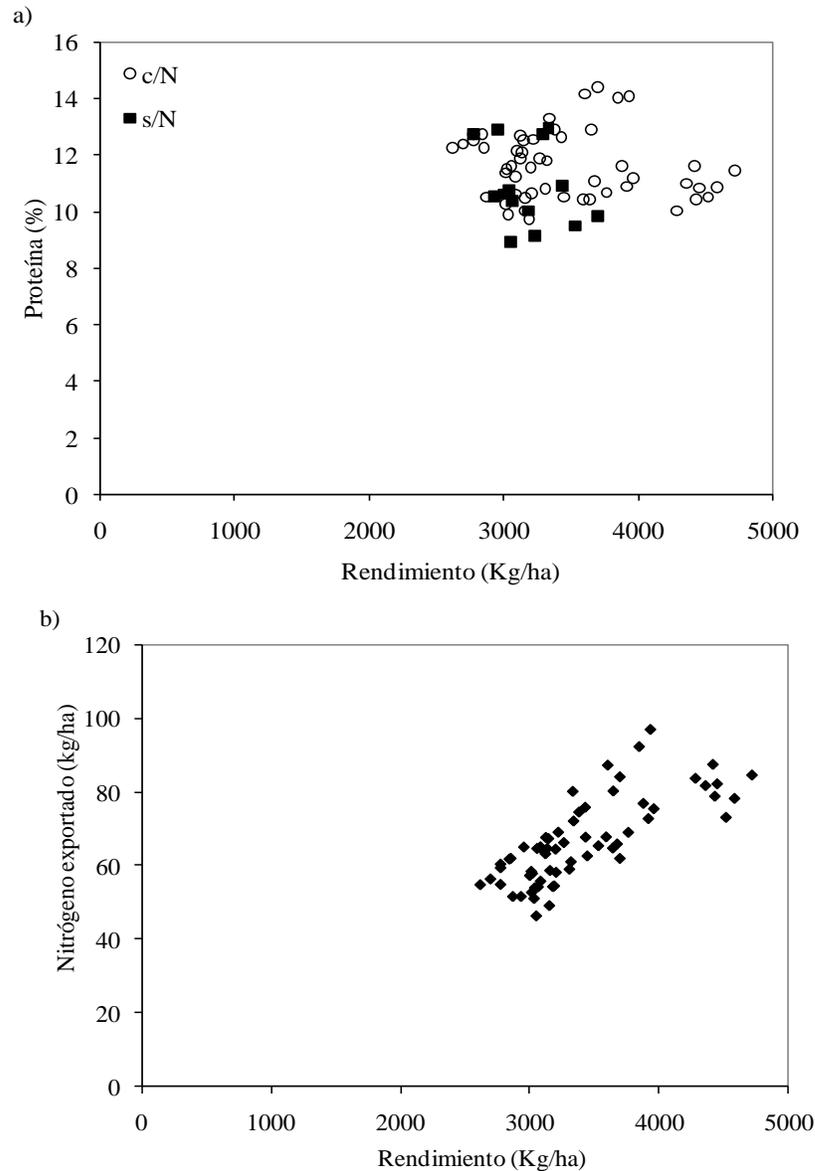
aumentar el porcentaje de proteína en la medida que el balance adquiere valores más altos, pero el nivel donde se establece está relación estaría definido por el sitio.



**Figura 9:** Rendimiento (a) y porcentaje de proteína en grano (b) en relación al balance entre el nitrógeno agregado y requerido en situaciones con y sin N a Z30

Las situaciones donde se aplicó nitrógeno fueron las que presentaron las mayores concentraciones de proteína en grano y rendimiento (Figura 9a). No existió relación entre rendimiento y concentración de proteína en grano, pero si fue significativa la

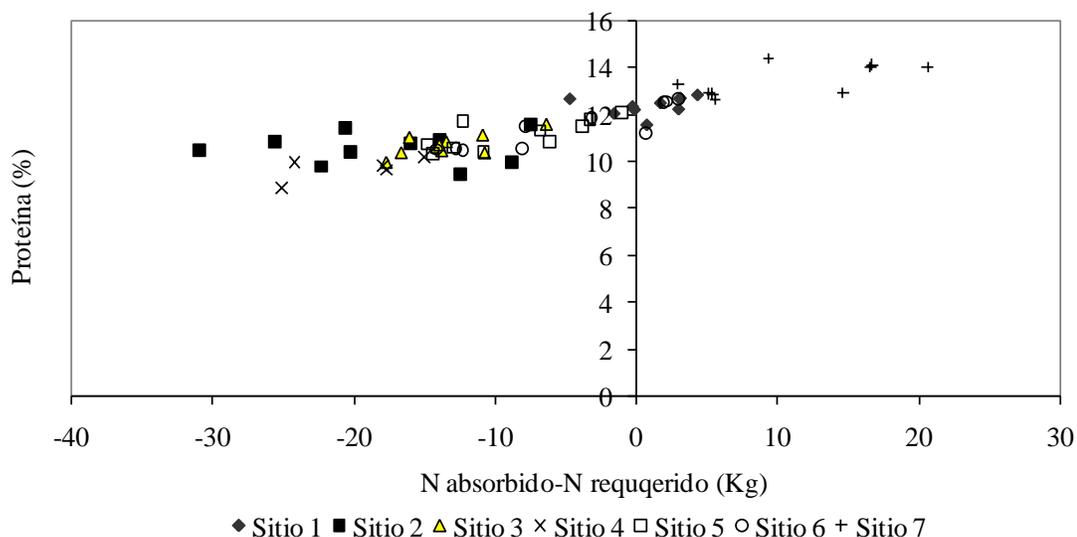
relación entre rendimiento y la cantidad de nitrógeno cosechado por hectárea ( $R^2=0.58$ ) (Figura 10b). Esto indicaría que la concentración de proteína fue la máxima posible para el rendimiento logrado con el aporte de nitrógeno al cultivo en cada sitio (suelo más fertilizante). La relación establecida determina que a un mismo nivel de rendimiento existan diferencias significativas en la cantidad de N que se exporta en grano, y por tanto mayor concentración de proteína lo que tal vez fue generado por distinto aporte de nitrógeno a Z30.



**Figura 10:** Porcentaje de proteína (a) y nitrógeno exportado (b) en función del rendimiento en grano

**Nota:** c/N: fertilizado a Z30, s/N: sin fertilizar a Z30

La relación entre lo absorbido por el cultivo y la concentración de proteína, muestra que cuando esta es menor a 11,5% es el resultado de déficit de nitrógeno con relación a la demanda del cultivo necesaria para mantener la calidad a altos rendimientos (Figura 11). Los balances positivos, correspondientes a proteína mayor a 12%, implicarían absorción excesiva para el rendimiento obtenido.



**Figura 11:** Porcentaje de proteína en función del balance del nitrógeno absorbido y el requerido por el cultivo

En el Cuadro 12 se muestra la eficiencia de uso del nitrógeno y porcentaje de proteína en grano para los sitios con respuestas al N en rendimiento.

**Cuadro 12:** Eficiencia de uso del nitrógeno y contenido de proteína en grano en función del tratamiento y el sitio en ambientes con respuesta en rendimiento

Tratamiento	Sitio 2		Sitio 3		Sitio 7	
	Kg. grano/Kg. de N a Z30	Proteína (%)	Kg. grano /Kg. de N a Z30	Proteína (%)	Kg. grano/Kg. de N a Z30	Proteína (%)
Testigo	0	9,7 c	0	11,1 a	0	12,8 b
Productor	15,8 a	10,7 b	15,9 a	11,0 a	0	12,8 b
Fagó	15,7 a	10,5 b	15,4 a	10,4 a	11,2 a	14,2 a
Fagó 1.3	18,3 a	11,5 a	9,3 b	10,8 a	2,9 a	13,8 ab
Fagó S	21,8 a	10,6 b	12,1 ab	10,4 a	8,3 a	13,5 ab

Valores seguidos por la misma letra no difieren entre filas ( $p < 0.1$ )

El problema planteado en este trabajo radica en que el trigo producido en Uruguay tiene bajo contenido de proteína en grano. La hipótesis de que esto es producto del manejo del nitrógeno que se realiza a nivel de chacra cuando los rendimientos son elevados, en el análisis de cómo se fertiliza a Z30 no puede demostrarse sólo con los resultados obtenidos en estos tres sitios. De todos modos, el tratamiento Productor no fue capaz de aumentar el porcentaje de proteína en grano en relación al testigo en dos de ellos, y cuando logró hacerlo no alcanzó el mínimo establecido por la industria (11.5%).

En el sitio 7 el tratamiento Fagro fue el único que se diferenció significativamente del testigo en proteína en grano. Aquí, el tratamiento Fagro 1.3 no presentó ventajas con respecto a los demás, ya que no se observaron diferencias en términos de respuesta en rendimiento, ni proteína. En este sitio es digno de destaque el elevado contenido de proteína registrado en todos los casos, incluyendo al testigo; esto puede ser consecuencia de un exceso de nitrógeno para el rendimiento obtenido como respuesta al laboreo del suelo y/o al efecto de la variedad utilizada en ese lugar.

En el sitio 3 cuando fue aplicado el tratamiento Fagro 1.3 se produjo un descenso significativo de la eficiencia de uso de nitrógeno; sin embargo no sucedió el incremento esperable del contenido de nitrógeno en grano, el cual permaneció al mismo nivel que el obtenido cuando se aplicó tratamiento Fagro. En este sitio ningún tratamiento logró elevar el contenido de nitrógeno en grano. Aquí evidentemente el aumento en rendimiento obtenido por la aplicación de nitrógeno provocó una dilución tal de ese nutriente en el grano que lo mantuvo al mismo nivel del testigo. Cuando el nitrógeno agregado excedió la cantidad necesaria para obtener eficiencias de uso de 15 kg de grano por unidad de N, tampoco se verificaron aumentos en el contenido proteína.

En el sitio 2 aplicar una dosis 30 por ciento mayor a la recomendada en el tratamiento Fagro, no solo mantuvo la eficiencia de uso al mismo nivel que la obtenida cuando fue aplicado este último (Fagro), sino que aumentó el contenido total de nitrógeno en grano. Dicho aumento determinó que el porcentaje de proteína pase de estar a un nivel por el cual la industria penaliza, a otro en el cual bonifica por concepto de calidad. En este lugar para aumentar en una unidad porcentual el contenido de proteína se necesitaron 28 kg. de N/ha. Esto, sumado al bajo contenido de nitrógeno en el grano registrado en el testigo, ponen de manifiesto que el nitrógeno aportado por el suelo no fue suficiente para cumplir con las necesidades del cultivo para el nivel de rendimiento logrado.

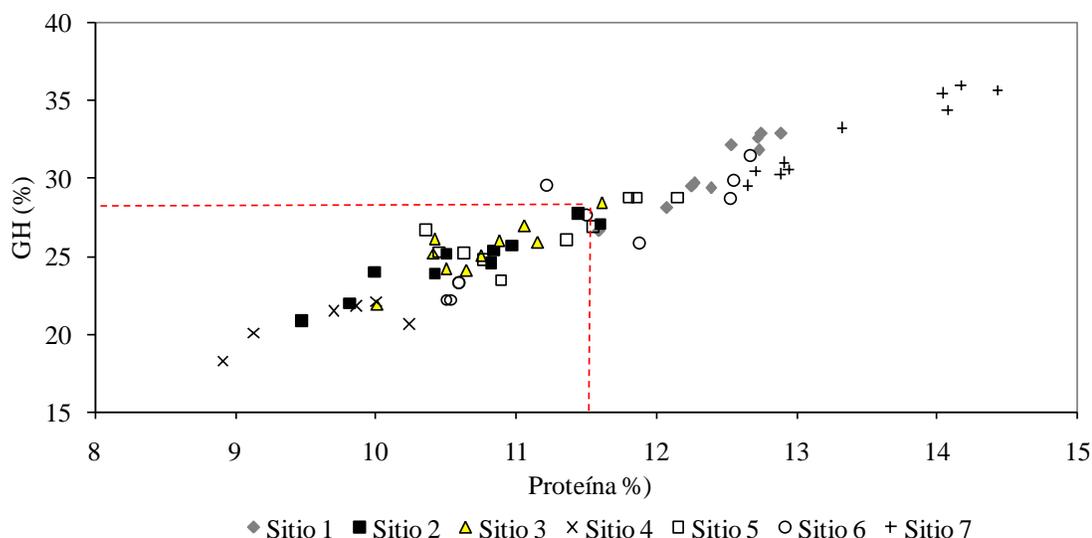
La hipótesis generada a partir del manejo de la fertilización nitrogenada, es que la cantidad de nitrógeno agregada por fertilización es muy poco variable, el rendimiento en grano queda sujeto al aporte del nutriente desde el suelo, y la concentración de proteína en el grano de trigo es la máxima que se puede obtener con el nitrógeno disponible y el rendimiento obtenido. Características del ensayo como número y

distribución de los sitios, criterio selección de los mismos, y el efecto particular del año sobre el rendimiento; hacen que no sea posible realizar conclusiones sobre la forma en la cual se fertiliza al trigo a nivel de chacra con estos resultados. Sin embargo, en el tratamiento que representa el manejo del nitrógeno realizado a nivel comercial (Productor), en las situaciones donde la respuesta en rendimiento fue alta no se constataron ventajas en relación al resto de los tratamientos desde el punto de vista de la cantidad de nitrógeno en grano y de la eficiencia de uso del nitrógeno. Vale la pena volver a señalar que en dos de los tres sitios con respuesta, en el tratamiento Productor se agregó la misma cantidad de N que en el tratamiento Fagro.

Los resultados también indican que utilizar una dosis superior (30% mayor) a la recomendada por el modelo, no redundó en incrementos en el contenido de proteínas en el grano cuando las eficiencias de uso disminuyeron en relación a las obtenidas en el tratamiento Fagro. Sólo en uno de los casos, el agregado en exceso significó aumentos en el contenido de proteína, manteniendo las eficiencias de uso al mismo nivel que las logradas en el tratamiento Fagro (15kg de grano/kg de N).

#### **4.2.4.2. Gluten húmedo**

La correlación entre gluten húmedo y porcentaje de proteína fue muy importante ( $R^2=0.92$ ). La regresión ajustada contiene los valores de todos los sitios, y consecuentemente las diferentes variedades que se utilizaron en ellos, lo cual acentúa aún más la asociación entre estas dos variables (Figura 12). Por esto, el análisis del impacto de cada estrategia, y la relación de este parámetro con el rendimiento se proyecta en el mismo sentido que para proteína en grano (Cuadro 8). Vale la pena destacar que para todos los cultivares y sitios estudiados el GH esperado para proteína menor a 11,5% es menor a 28%. Resultados similares exponen Ernst et al. (2006a).



**Figura 12:** Contenido de nitrógeno en grano en función del porcentaje de gluten húmedo según sitio

En el sitio 2 fertilizar en exceso significó aumentar 6% el contenido de gluten en el grano. El nivel donde se dio ese aumento permitió pasar de un valor de gluten muy bajo a otro muy cerca del mínimo exigido por la industria (28%). En el sitio 3, al igual que para proteína, las estrategias de fertilización no modificaron el porcentaje de gluten en grano. El contenido de gluten obtenido en el sitio 7, al igual que el porcentaje de proteína, se estableció a un nivel muy alto; siendo mayor en la medida que aumentó este último.

**Cuadro 13:** Gluten húmedo y contenido de proteína en grano en función del tratamiento y el sitio en ambientes con respuesta en rendimiento

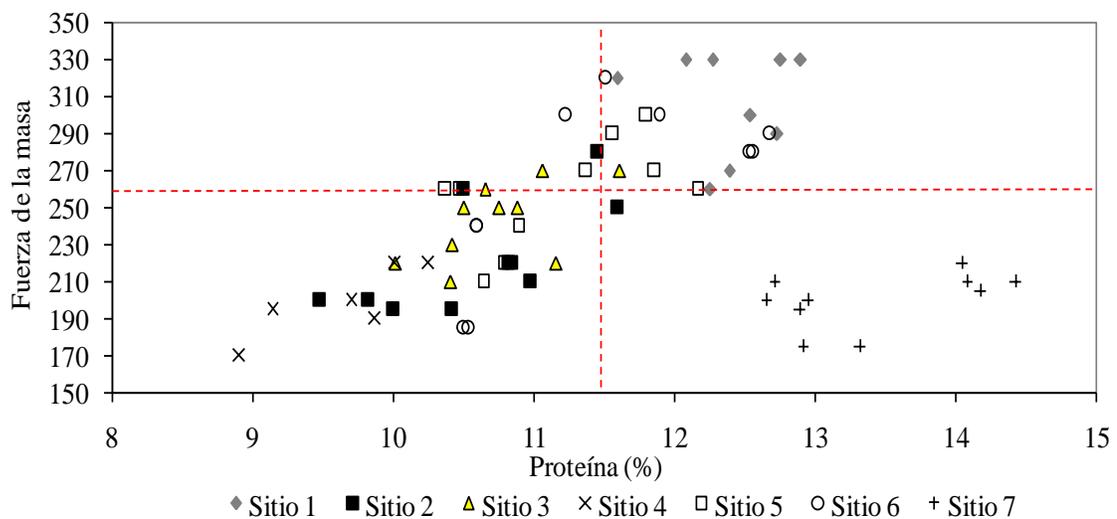
Tratamiento	Sitio 2		Sitio 3		Sitio 7	
	GH (%)	Proteína (%)	GH (%)	Proteína (%)	GH (%)	Proteína (%)
Testigo	21,5 c	9,7 c	23,5 a	11,1 a	31,0 c	12,8 b
Productor	25,0 b	10,7 b	25,0 a	11,0 a	30,0 c	12,8 b
Fagro	25,0 b	10,5 b	26,5 a	10,4 a	35,5 a	14,2 a
Fagro 1.3	27,5 a	11,5 a	26,0 a	10,8 a	34,5 ab	13,8 ab
Fagro S	24,5 b	10,6 b	25,5 a	10,4 a	32,5 bc	13,5 ab

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra no difieren entre filas ( $p < 0.1$ ).

## 4.2.5. Calidad de las harinas

### 4.2.5.1. Fuerza de la masa (W)

La proteína en grano en estas situaciones también demostró estar asociada con la fuerza de la masa (W) (Figura 13). La relación está integrada por grupos de observaciones correspondientes a cada sitio; esto implica que, si bien los tratamientos modificaron ambos parámetros de calidad, el cultivar más el resto de las variables de manejo y ambientales definieron el nivel en el que se generó la variación.



**Figura 13:** Fuerza de la masa en función del contenido de proteína según sitio.

Las diferencias más importantes surgen del análisis entre sitios; exceptuando el comportamiento en el sitio 7, existió una relación lineal positiva entre los dos parámetros ( $R^2=0.67$ ). Esto concuerda con lo encontrado por Ernst et al. (2006a), donde el incremento en la concentración de proteína se relacionó positivamente con el contenido de gluten y la fuerza de la masa. En este sentido, Vázquez (2009) menciona que cuando el contenido proteico es bajo, la calidad de las proteínas no se puede expresar plenamente, lo que impacta sobre la fuerza panadera. Valores de proteína por encima de 11,5%, se relacionaron con harinas de buena fuerza panadera.

A pesar que en los sitios 7 y 1 se sembró la misma variedad (Carpintero), el hecho de estar en uno u otro, implicó ubicarse por encima o por debajo de un W de  $260 J \cdot 10^{-4}$ , valor que aparece en la bibliografía, como límite mínimo para ser considerado como un trigo que produce masas con fuerza aceptable para la panificación (Vázquez, 2009). Vale la pena destacar que en este sitio, el contenido de proteína y gluten en grano fue elevado (en promedio 13.4% de proteína y 32.7% de gluten), en tanto el valor de

Falling Number fue muy bajo (145 segundos). Por lo tanto en ese sitio la baja aptitud panadera de las harinas producidas estarían definidas por el alto contenido de alfa-amilasa que afecta negativamente el proceso de panificado de las masas. Dentro de varios sitios, como por ejemplo 2, 3, 5 y 6, para un valor fijo de porcentaje de proteína hubo diferencias en W que también implicaron estar por encima o por debajo de dicho valor. Lo cual demostró que a pesar de su relación con el contenido de proteína, y por ende el efecto positivo que genera la fertilización nitrogenada sobre este parámetro, existen otros factores que establecen cual será la fuerza de la masa producida para un nivel de proteína en grano logrado.

Al igual que para proteína, en el análisis del impacto de la fertilización nitrogenada en Z30 sobre fuerza de la masa, debe considerarse que en más del 50% de los casos no se registraron respuestas en rendimiento. Por ello, y teniendo en cuenta que la problemática en la calidad de la harina planteada, surge cuando la cantidad de nitrógeno disponible para el cultivo topea la cantidad de proteína a rendimientos elevados; se presenta en el Cuadro 9 la información correspondiente a los sitios con respuesta.

**Cuadro 14:** Fuerza de la masa y contenido de proteína en grano en función del tratamiento y el sitio en ambientes con respuesta en rendimiento.

Tratamiento	Sitio 2		Sitio 3		Sitio 7	
	W (J x 10-4)	Proteína (%)	W (J x 10-4)	Proteína (%)	W (J x 10-4)	Proteína (%)
Testigo	200 c	9,7 c	235 a	10,4 a	205 a	12,9 b
Productor	240 ab	10,7 b	255 a	10,8 a	198 a	12,8 b
Fagro	203 c	10,5 b	245 a	11,1 a	215 a	14,3 a
Fagro 1.3	265 a	11,6 a	260 a	11,1 a	190 a	13,8 ab
Fagro S	208 bc	10,7 b	220 a	10,4 a	193 a	13,5 ab
Promedio	223 B	10,6 B	243 A	10,8 B	200 C	13,4 A

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre si entre filas, mayúsculas entre columnas (p<0.1).

Los resultados en el sitio 2 dejan de manifiesto la posibilidad de mejorar la calidad del grano aumentando la dosis de nitrógeno en relación a lo que recomienda el modelo, ya que en ese sitio llevar a cabo esa estrategia aumentó la proteína en grano, el contenido de gluten y consecuentemente la fuerza de la masa manteniendo las eficiencias de uso al mismo nivel. El aumento provocó que dichos parámetros se ubiquen a un nivel considerado aceptable por la industria para la fabricación de pan. Por otro lado, no queda claro el porque de las diferencias en el valor de W entre el tratamiento Productor y Fagro en dicho lugar, debido a que los resultados en ambos son producto del agregado de la misma cantidad de nitrógeno. Vale la pena destacar que el

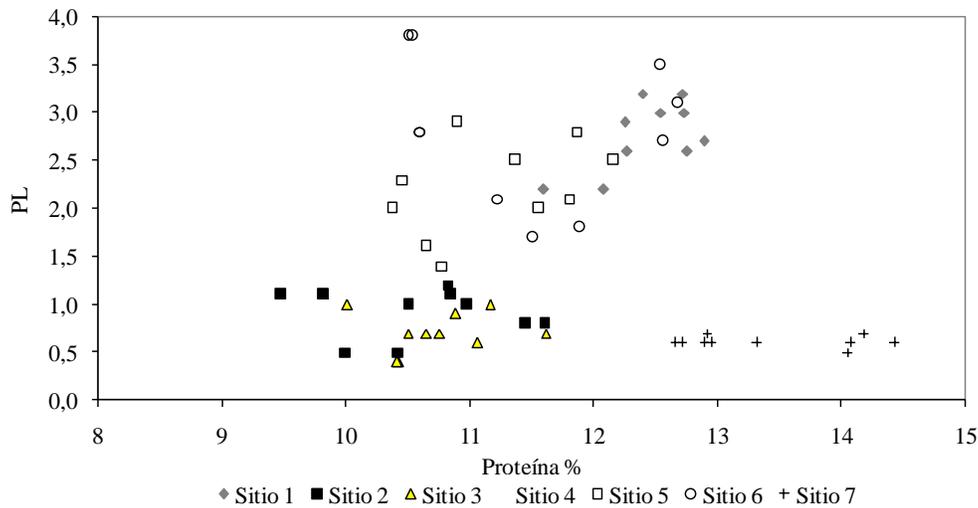
impacto positivo de agregar más nitrógeno sobre la calidad del grano y la harina se remite sólo a ese caso, ya que en el resto de los sitios no se obtuvieron los mismos resultados. En los dos sitios restantes la fuerza de la masa es igual para todos los tratamientos y el testigo, a pesar que en unos de ellos hubo diferencias significativas en contenido de proteína (sitio 7).

En resumen, la fuerza de la masa estuvo relacionada en parte a las variaciones en el contenido de proteína en grano, pero el nivel donde se estableció la correlación dependió del ambiente definido por el cultivar más un conjunto de variables ambientales y de manejo. En uno de los sitios de alta respuesta en rendimiento aumentar la dosis en relación a lo que recomienda el modelo significó que un trigo con porcentaje de proteína y gluten por debajo de 11,5% y 28% respectivamente, y productor de masas débiles, se transformara en uno generador de masas con fuerza suficiente para la fabricación de pan ( $>250 \text{ J} \times 10^{-4}$ ), y con contenido de proteína y gluten a un nivel superior al exigido por la industria. En el resto de los sitios las estrategias fertilización analizadas no tuvieron efecto sobre la fuerza de la masa.

Las conclusiones sobre las comparaciones entre el efecto de modos diferentes de fertilización nitrogenada sobre los parámetros de calidad tratados hasta el momento, están limitadas por los pocos sitios que experimentaron respuestas en rendimiento al agregado del nutriente, y a su vez en dos de ellos (sitio 2 y 3) en el tratamiento Productor y Fagro se agregó la misma dosis. De todos modos, los resultados obtenidos cuando no se agregó nitrógeno a Z30 y cuando se trató con la dosis recomendada por los productores, en ningún caso fueron mejores a los obtenidos de la aplicación del tratamiento Fagro o Fagro 1.3, según el sitio que se trate.

#### **4.2.5.2. Relación tenacidad-extensibilidad**

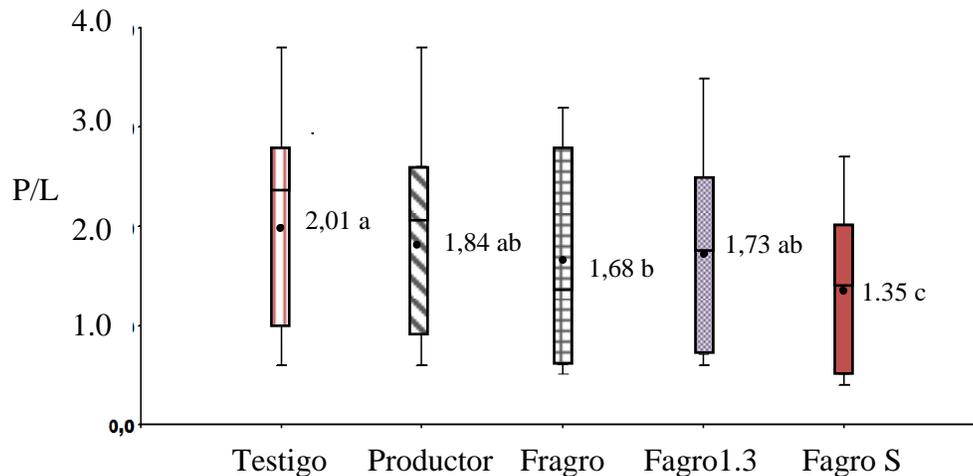
Al igual que para los demás parámetros de calidad estudiados, la relación PL mostró una gran variabilidad entre sitios. Para esta variable no se constató relación con el contenido de proteína (Figura 14). En relación a esto Vázquez y Watts (2004), muestran que la relación P/L tiene menor control genético que el W, aunque de todos modos existen diferencias entre las variedades. En los casos tratados en este ensayo, las harinas más tenaces no se asocian a bajos tenores de proteína, lo cual contrasta con los resultados publicados por Ernst et al. (2006b). Vale la pena destacar el bajo valor de este parámetro para el porcentaje de proteína obtenido en el sitio 7, lo cual puede estar muy asociado al bajo valor de Falling Number medido en ese lugar. El promedio de la relación P/L de las harinas producidas en ese sitio, está por debajo del rango de valores que establece la industria para las harinas con aptitud panadera.



**Figura 14:** Relación P/L en función del porcentaje de proteína según sitio

El sulfato de amonio contiene 21% de nitrógeno y entre 23 y 26% de azufre en su formulación. La relación entre el contenido de nitrógeno y azufre que posee la fuente supera ampliamente a la que contiene el grano de trigo (aproximadamente 10 unidades de N por unidad de S), e implica que de acuerdo a las dosis de nitrógeno recomendadas en cada sitio se hayan agregado cantidades muy importantes de azufre (entre 36 y 53kg por hectárea). El producto de esto es un desbalance en suelo a favor del azufre que naturalmente se encuentra bajo formas orgánicas manteniendo proporciones constantes con el nitrógeno, permitiendo mayor absorción de azufre por el cultivo.

A diferencia de las variables analizadas hasta al momento, para la relación tenacidad-extensibilidad los tratamientos no interaccionaron con el sitio. En la Figura 15 se presenta la distribución de la población de los resultados para la relación P/L. Cada línea horizontal de las que forman el rectángulo representa un 25% de los datos y las líneas verticales muestran la dispersión indicando el mínimo y el máximo. Es así que la línea horizontal inferior del rectángulo indica el valor hasta el que se encuentra el 25% de las observaciones, la línea del medio el valor hasta el que se encuentra el 50 % de las observaciones, y la línea superior el valor hasta el que se encuentra el 75%. Los puntos negros son los valores promedio de cada tratamiento.



**Figura 15:** Distribución de la población de los resultados de la relación tenacidad-extensibilidad según tratamiento.

**Nota:** Los valores en el lado derecho de las barras corresponden a la media de la población de resultados para cada tratamiento. Valores seguidos por la misma letra no difieren entre sí ( $p < 0.05$ ).

Los valores observados en los casos tratados con Frago S oscilaron en un rango y nivel inferior en relación a los resultados en los demás tratamientos. Donde fue aplicado el tratamiento Frago S consistentemente se observó un descenso en el valor de dicha relación contribuyendo a equilibrarla, ya que en algunos casos no tratados los valores registrados fueron excesivamente altos. Precisamente, en los casos donde no se aplicó nitrógeno a Z30 y en los manejados según el criterio de los productores, se registraron los máximos y mínimos más altos. En menor medida, el tratamiento Frago provocó un descenso significativo de la relación PL en relación al testigo, pero no ubicó al promedio de los resultados dentro del rango de valores en cual se consideran harinas equilibradas y tampoco fue significativamente diferente al tratamiento Productor y Frago 1.3.

#### 4.2.5.3. Estabilidad y absorción farinográfica

Para la estabilidad y la absorción farinográfica se presentan los resultados de cuatro de los siete sitios experimentales. Estos dos parámetros se correlacionaron negativamente ( $r = -0.55$ ); es decir aquellas harinas que absorbieron más agua, presentaron menor tiempo de resistencia al amasado antes de que la masa comenzara a perder consistencia. Al igual que para fuerza de la masa y relación tenacidad-extensibilidad, la absorción farinográfica tuvo un alto grado de asociación con el contenido de proteína. Esta asociación es esperable ya que el agua en la etapa de amasado es absorbida por el almidón, por pentosanos y por las proteínas que se encuentran en la harina (Vázquez, 2009). La relación entre ellas para el conjunto de los resultados es significativa pero no demasiado estrecha ( $R^2 = 0.34$ ). Sin embargo cuando

se analiza esta relación por sitio, en algunos casos aumenta considerablemente (Figura 17). Las pendientes de las líneas de regresión de la relación entre proteína y absorción farinográfica fueron similares entre sitios, pero se establecieron a diferentes niveles. No existió relación para los resultados de este trabajo entre contenido de proteína en grano y estabilidad farinográfica.

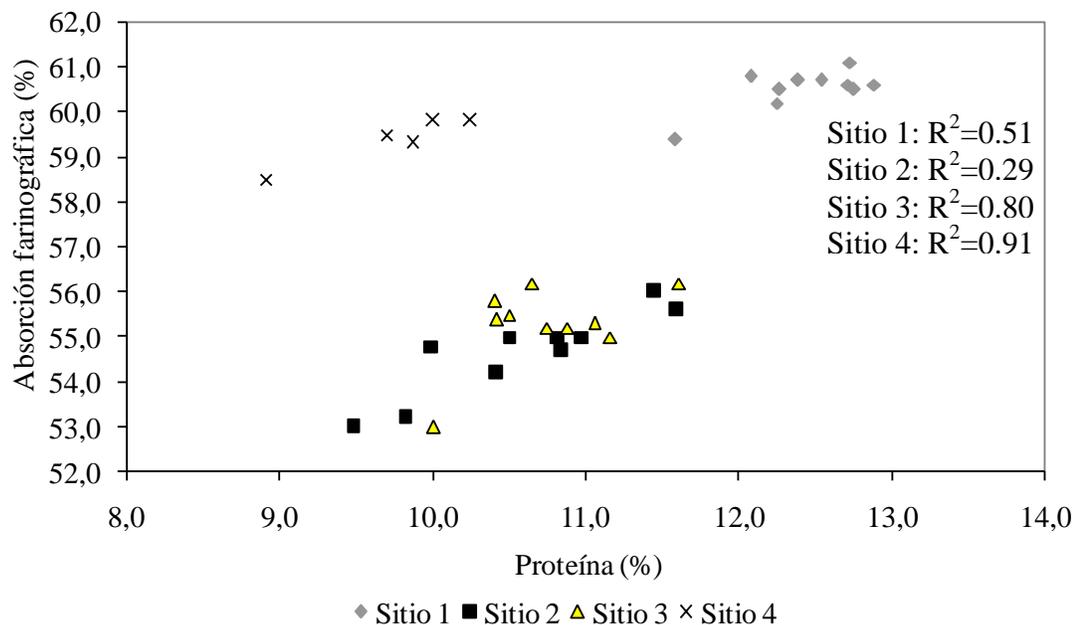
Estos resultados indicarían que es posible mejorar por lo menos una de las dos propiedades de mezclado estudiadas, y aumentar el rendimiento de la harina con variables de manejo que modifiquen el porcentaje de proteína en grano. El impacto de la fertilización nitrogenada sobre la absorción farinográfica fue significativo, pero de muy baja magnitud. Los valores más altos de absorción fueron registrados cuando se aplicó el tratamiento Productor y Fagro 1.3 pero la diferencia con el testigo fue sólo de un punto porcentual (Cuadro 11). Además, vale la pena señalar que en el sitio 1, 2 y 3 el tratamiento Productor y Fagro se agregó la misma dosis de N, y que en el sitio 4 en el tratamiento Fagro no se aplicó N ya que el nivel de N en planta a Z30 (4,0%) indicó que no existiría respuesta en rendimiento (lo cual se confirmó luego de cosechado), mientras que en el tratamiento Productor y Fagro 1.3 se agregó una dosis N de 29.9 y 23Kg, respectivamente. Por lo tanto, las diferencias entre los tratamientos serían de muy baja magnitud y estarían condicionadas por las situaciones mencionadas en los sitios analizados.

Sólo en uno de los cuatro sitios se alcanzó el valor mínimo que asegura obtener buen rendimiento de las harinas (60%). El ambiente estableció el nivel donde se fijó la variación y determinó que también se registrarán porcentajes de absorción por debajo de 55 %, considerados muy bajos por la industria panadera (Vázquez, 2009).

**Cuadro 15:** Absorción farinografica según tratamiento y sitio

Tratamiento	Absorción (%)				
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	Promedio
Testigo	60,5	53,1	54,1	58,5	56,6 c
Productor	60,5	55,0	55,7	59,0	57,6 a
Fagro	60,7	54,9	55,2		56,9 b
Fagro 1.3	60,7	55,8	55,9	59,4	57,9 a
Fagro S	60,1	54,5	55,6		56,7 bc
Promedio	60,5 A	54,1 D	54,9 C	59,2 B	

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre si entre filas, mayúscula entre columnas ( $p < 0.05$ )



**Figura 16:** Absorción farinográfica en función del porcentaje de proteína según sitio.

La estabilidad farinográfica mostró diferencias estadísticamente significativas entre ambientes. Los tratamientos no tuvieron efecto sobre esta variable. De todas maneras, en todas las situaciones los valores estuvieron muy por encima del límite recomendado (12 min.) (Cuadro 16).

**Cuadro 16:** Estabilidad farinográfica según tratamiento y sitio

Tratamiento	Estabilidad (minutos)				Promedio
	Sitio 1	Sitio 2	Sitio 3	Sitio 4	
Testigo	32,3	52,8	42,0	27,0	38,5 a
Productor	34,8	46,0	66,3	28,8	43,9 a
Fagro	30,3	39,8	42,5		37,5 a
Fagro 1.3	27,5	40,3	41,0	28,8	34,4 a
Fagro S	42,3	43,3	37,8		41,1 a
Promedio	33,3 B	41,1 A	40,4 A	28,8 B	

**Nota:** Valores seguidos por la misma letra minúscula no difieren entre si entre filas, mayúscula entre columnas ( $p < 0.05$ )

## **5. CONCLUSIONES**

- En las situaciones donde las condiciones climatológicas del año no causaron un descenso importante del rendimiento y de la respuesta al agregado de N, el promedio de las eficiencias de uso obtenidas cuando se aplicó el modelo fue de 14.8 kg de grano/kg de N, oscilando en un rango de 11.2 y 15.8 kg de grano/kg de N. Esto demuestra que el porcentaje de N en planta y la estimación del rendimiento a Z30, son indicadores de respuesta, y que agregando las dosis recomendadas en base a ellos se logran eficiencias de uso de 15 kg de grano/kg de N. Cuando se lograron estas eficiencias de uso, en un caso se mantuvo el porcentaje de proteína al mismo nivel que el testigo y en los restantes aumentó en comparación a este último.
- Cuando las eficiencias de uso de nitrógeno fueron menores a las obtenidas en el tratamiento Fagro, no se lograron incrementos significativos en la calidad del grano y la harina producida
- Siendo la relación P/L de la harina obtenida en Uruguay una de las limitantes de importancia de la calidad de este producto; incorporar azufre junto con el agregado nitrógeno a Z30, mejoró el resultado medio obtenido en este sentido, disminuyendo significativamente dicha relación en comparación al resto de las estrategias
- En las situaciones donde no hubo respuesta en rendimiento, los cultivos igualmente presentaron deficiencias de nitrógeno. En el contexto climático de la primavera del año 2008 (seca y calida), algunas decisiones de manejo del cultivo por parte de cada productor, definieron el nivel de respuesta al agregado de nitrógeno a Z30. En este sentido, con la información de base disponible fueron identificados en los sitios sin respuesta, atraso en la fecha de siembra, densidad de siembra por encima del óptimo para la variedad utilizada y deficiencias de azufre. El efecto relativo de cada una dependió del sitio experimental. Por lo tanto, los factores limitantes de la expresión de la respuesta no se relacionaron con deficiencias de N, sino a las consecuencias del régimen térmico e hídrico en interacción con variables de manejo en cada sitio, los cuales disminuyeron el grado de acierto global o la efectividad de las estrategias de ajuste del nitrógeno (considerando los resultados en todos los sitios) realizado en base a lo que recomienda el modelo de Baethgen (1992). Es así que en cuatro sitios los resultados fueron los esperados cuando se ajusta la dosis de N en base a lo que recomienda el modelo (sitios 2, 3, 4 y 7), y en los restantes sitios las limitantes nombradas anteriormente condicionaron la precisión de la estimación

- La existencia de sitios sin respuesta al agregado de N hizo que el problema que trata de resolver el tratamiento Fagro1.3 no pueda ser evaluado en todos los ambientes bajo estudio
- En dos de las tres situaciones donde el rendimiento fue mayor a 3500 kg/ha el tratamiento Productor no fue capaz de aumentar el porcentaje de proteína en grano en relación al testigo, a su vez en una de ellas tampoco aumentó el rendimiento, siendo que en ese sitio las demás estrategias lograron buenas respuestas. Cuando logró incrementar el contenido de proteína no alcanzó el mínimo establecido por la industria (11.5%); mostrando que el ajuste del nitrógeno realizado a nivel comercial tiende a topear la cantidad de rendimiento y proteína obtenida
- Las conclusiones acerca de las comparaciones entre el efecto de modos diferentes de fertilización nitrogenada sobre los parámetros de calidad del trigo para la panificación tratados en el trabajo, están limitadas por los pocos sitios que tuvieron respuestas en rendimiento al agregado del nutriente, y a su vez que en dos de ellos (sitio 2 y 3) en el tratamiento Productor y Fagro se agregó la misma dosis de nitrógeno. De todos modos, cuando no se agregó nitrógeno a Z30 y cuando se trató con la dosis recomendada por los productores, en ningún caso fueron mejores a los obtenidos de la aplicación del tratamiento Fagro o Fagro 1.3 (según el sitio que se trate)
- Sin embargo en un caso, el agregado de nitrógeno en exceso fue la única estrategia que significó que el contenido de proteína, el gluten húmedo y la fuerza de la masa pasen de un nivel donde la industria penaliza por concepto de calidad a otro que bonifica. Esta situación se dio manteniendo las eficiencias de uso al mismo nivel que las logradas en el tratamiento Fagro (15 kg de grano/kg de N). Estos resultados indicarían que no es posible rechazar la hipótesis en la cual se establece que agregar nitrógeno en exceso en relación a lo que recomienda el modelo, mejora las propiedades reológicas de las masas producidas. En tanto se puede concluir que este tratamiento no cumplió su objetivo para todas las situaciones que manifestaron deficiencias de nitrógeno, y cuando aumentó el contenido de proteína no descendió la eficiencia de uso del nutriente. En este sentido, los resultados en el sitio 2 dejan abierto el camino para que futuras líneas de investigación profundicen en el efecto de esta estrategia en busca solucionar el mismo problema
- La asociación constatada entre el contenido de proteína y la absorción farinográfica indicarían que es posible modificar las propiedades de mezclado de las masas a través de un ajuste correcto del N a Z30, teniendo en cuenta que esto redundaría en mayor contenido de nitrógeno en grano

- Para los 4 sitios donde fueron realizadas las determinaciones, las estrategias de fertilización analizadas no produjeron un efecto relevante sobre las propiedades de mezclado de las harinas medidas por farinógrafo. Hubo un efecto significativo sobre la absorción farinográfica pero fue muy bajo

## **6. RESUMEN**

El rendimiento y la calidad panadera del grano de trigo están condicionados por el aporte de nitrógeno del suelo. Existe respuesta en rendimiento al agregado de N en etapas iniciales del cultivo (por ejemplo a la siembra y Z22), pero el efecto del agregado a Z30 puede ser mayor e inclusive aumentar el contenido de nitrógeno en grano. Fue generado en nuestro país un modelo de ajuste de nitrógeno para cebada cervecera, y luego validado en trigo, que predice correctamente el nitrógeno requerido y la respuesta al agregado a Z30. Con la aplicación de la dosis que recomienda dicho modelo se logran concretar altos rendimientos y mantener el nivel el nitrógeno en grano. A nivel de producción este modelo se aplica muy poco, y por lo tanto los problemas de calidad de los granos de trigo producidos en nuestro país pueden estar asociados a un ajuste incorrecto del nitrógeno agregado. En este trabajo se propone manejar diferente a este modelo de ajuste, ya que en trigo (a diferencia de cebada) se desea lograr niveles de proteína en grano lo más alto posible. Es así que aumentando la dosis que recomienda dicho modelo, sería posible incrementar el contenido de proteína en grano. El agregado de azufre también puede mejorar la calidad del grano y las harinas producidas, más precisamente la relación tenacidad-extensibilidad. Durante el año 2008 se realizó un ensayo en siete sitios experimentales (chacras) ubicadas en la zona de influencia de la EEMAC. En el experimento se evaluó el efecto de cinco estrategias de fertilización a Z30 sobre el rendimiento, contenido de proteína y gluten, relación tenacidad/extensibilidad, fuerza de la masa, absorción y estabilidad farinográfica.

Los resultados indican que las altas temperaturas y el déficit hídrico registrados en la zona de influencia de los ensayos en la primavera 2008, en interacción con factores de manejo (principalmente fecha de siembra), establecieron el nivel de la respuesta en cada sitio y marcaron el grado de acierto de la cantidad recomendada por el modelo. Existiendo 4 sitios sin respuesta para todos los tratamientos, y tres con un efecto significativo de la aplicación de N sobre el rendimiento. Las eficiencias en el uso de nitrógeno estuvieron dentro del rango esperado, con un promedio de 15 kg. de grano/kg de N en los ambientes de mayor rendimiento promedio. En dos de los tres casos donde el rendimiento fue mayor a 3500 kg./ha se observó que la proteína en grano estuvo limitada por el aporte de nitrógeno. Es así que sólo fue significativamente superior (en relación a no agregar) cuando se aplicó el tratamiento Fagro o Fagro1.3. En estas situaciones el tratamiento Productor no fue capaz de aumentar el porcentaje de proteína en grano en relación al testigo, y cuando logró hacerlo no alcanzó el mínimo establecido por la industria (11.5%). Utilizar una dosis superior (30% mayor) a la recomendada por el modelo, no redundó en incrementos significativos en la calidad del grano ni de la harina producida con relación al resto de las estrategias; esto sucedió cuando las eficiencias de uso de nitrógeno fueron menores a la obtenidas en el tratamiento Fagro. Sin embargo en un caso (sitio), el agregado de nitrógeno en exceso fue la única estrategia que significó que el contenido de proteína, el gluten húmedo y la fuerza de la masa pasen de un nivel donde la industria penaliza por concepto de calidad a otro que bonifica. Esta situación se dio manteniendo las eficiencias de uso al mismo nivel que las logradas en el tratamiento

Fagro (15 kg de grano/kg de N). En los casos donde además de nitrógeno, fue incorporado azufre los valores de la relación tenacidad-extensibilidad fueron significativamente menores en comparación a no aplicar y al manejo del nitrógeno que se realiza a nivel comercial. Las estrategias de fertilización analizadas no produjeron cambios de relevancia sobre las propiedades de mezclado de las harinas medidas por farinógrafo.

Palabras clave: Trigo, Fertilización, Nitrógeno, Azufre, Rendimiento, Calidad panadera, Harina, Proteína, Gluten, Fuerza de la masa, Relación tenacidad-extensibilidad, Absorción farinográfica, Estabilidad farinográfica.

## **7. SUMMARY**

The yield and baking quality of wheat grain are conditioned by the contribution of soil nitrogen. There is yield response in early stages of crop (Eg planting and Z 22), but the effect of adding N to Z 30 may be higher and even increase the nitrogen content in grain. Was generated in our country a nitrogen adjustment model for barley, and then validated in wheat, correctly predicting the nitrogen required and the response to added to Z 30. With the implementation of the recommended doses this model is able to maintain the level of nitrogen in grain. In the commercial production, this model applies very little, and therefore the problems of grain quality of wheat produced in our country may be associated with an incorrect setting of nitrogen added. This paper proposes to handle different this model adjustment, because in this culture (as opposed to barley) you want to achieve grain protein levels as high as possible. Thus, increasing the dose recommended by the model, it would be possible to increase grain protein content. The addition of sulfur can also improve the quality of grains and flours, more precisely the relationship tenacity/extensibility. In 2008 a trial was conducted in seven experimental sites (farms) located in the zone of EEMAC's influence. The experiment evaluated the effect of five fertilization strategies to Z 30 on yield, protein and gluten content, relationship tenacity/extensibility, dough strength, absorption and stability farinaceous. The results indicate that high temperatures and water deficit recorded in the zone of influence of the test in spring 2008, in interaction with management factors (mainly planting date), set the level of response at each site and marked the degree of correctness of amount recommended by the model. There are four sites with no response to all treatments, and three with a significant effect of N application on yield. Efficiencies in the use of nitrogen were within the expected range, with an average of 15 kg grain/kg N in the highest average yield environments. In two of the three cases where the yield was higher at 3500 kg/ha was observed that the grain protein was limited by soil nitrogen supply. Thus was only significantly higher (relative to not adding) when the administered treatment was fagro or fagro 1.3. In these situations the treatment Productor was unable to increase the percentage of grain protein in relation to control, and when he do not reach the minimum established by the industry (11.5%). Using a higher dose (30% higher) than that recommended by the model, did not result in significant increases in the quality of grain or flour produced in relation to other strategies; this happened when the nitrogen use efficiency were lower than those obtained in the treatment Fagro. However, in one case (site 2), the addition of excess nitrogen was the only strategy that meant that the protein content, wet gluten and dough strength to move from a level where is penalized for the industry by the concept of quality to another that bonuses. This situation was to maintain the efficiencies of using the same level as those achieved in the treatment Fagro (15 kg grain/kg N). In cases where in addition to nitrogen, sulfur was incorporated the values of tenacity/extensibility ratio were significantly lower compared to non-application and the management of nitrogen is carried out commercially. Fertilization strategies tested did not produce relevant changes on mixing properties of flours farinograph measures.

Keywords: Wheat, Fertilization, Nitrogen, Sulfur, Yield, Baking quality, Flour, Protein, Gluten, Dough strength, Tenacity-extensibility ratio, Farinaceous absorption, Farinaceous stability.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

1. ABATE, P.; LAZARO, L.; FERNANDO, H. 1997. ¿Es posible incrementar el número de granos por unidad de superficie?. In: Kohli, M.; Martino, D. eds. Explorando altos rendimientos de trigo. La Estanzuela, CIMMYT. pp. 71-90.
2. AL-EID, S.M. 2006. Effect of nitrogen and manure fertilizer on grain quality, baking and rheological properties of wheat Brown in Sandy soil. J. Sci. Food Agric. 86: 205-211.
3. ALKIER, A.; RACZ, G.; SOPER, R. 1972. Effects of foliar and soil-applied nitrogen and soil nitrate-nitrogen level on the protein content of neepawa wheat. Can. J. Soil Sci. 52: 301-309.
4. AUSTIN, R.; FORD, M.; EDRICH, J.; BLACKWELL, R. 1977. The nitrogen economy of Winter wheat. J. Agric. Sci. 88: 159-167.
5. BAETHGEN, W. 1992. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Montevideo, INIA 59 p. (Serie Técnica no. 24).
6. BAILEY, L. 1987. Sulphur in plant nutrition. In: Berg, E. eds. Western Canada sulphur handbook. Calgary, AB, Western Canada Fertilizer Association. pp. 14-17.
7. BERGH, R.; ZAMORA, M.; SEGHEZZO, M.; MOLFESE, E. 2003. Fertilización nitrogenada foliar en trigo en el centro-sur de la Provincia de Buenos Aires. Inf. Agron. (Inpofos). 19: 15-19.
8. BOLOGNA, J.; RINCÓN, F. 1997. Efecto de la fuente nitrogenada, dosis y momento de aplicación en cebada sembrada sin laboreo con y sin rastrojo de sorgo en superficie. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 72 p.
9. BULMAN, P.; SMITH, D. 1994. Post-heading nitrogen uptake, traslocation, and partitioning in spring barley. Crop Sci. 34: 977-984.
10. BYERS, M.; MACGRATH, S.P.; WEBSTER, R. 1987. A survey of the sulphur content of wheat grown in Britain. J. Sci. Food Agric. 38: 151-160.
11. CADENAZZI, M.; GONZÁLEZ, M.; ERNST, O.; SUBURU, G.; VÁZQUEZ, D.; GODIÑO, M. 2007. Impact of different environments and

management practices used by uruguayan farmers on wheat quality variability. In: Conferencia Internacional de ICC en Latinoamérica (1<sup>a</sup>, 2007, Rosario, Argentina). Cereales y productos de cereales; calidad e inocuidad. Nuevos desafíos de la demanda mundial. Rosario, s.e. s.p.

12. CAPURRO, E.; BAETHGEN, W.; TRUJILLO, A.; BOZZANO, A. 1982. Rendimientos y respuesta NPK de Cebada Cervecera. CIAAB. Miscelánea no. 43. 21 p.
13. CASTRO, M.; CERETTA, S.; VÁZQUEZ, D. 2006. Análisis de la relación rendimiento de grano-calidad en trigo y factores abióticos que lo afectan. In: Jornada Cultivos de Invierno (2006, Colonia) Memorias. Montevideo, INIA. pp. 30-37 (Actividades de Difusión no. 444).
14. \_\_\_\_\_.; DÍAZ DE AKERMAN, M; GERMAN, S; VÁZQUEZ, D. 2007. Resultados experimentales de evaluación para el registro nacional de cultivares de trigo, periodo 2004-2005-2006. In: Resultados experimentales de evaluación nacional de cultivares de trigos, cebadas y colzas de los últimos tres años. 2004-2005-2006. Montevideo, INIA. pp. 2-27.
15. COX, M.; QUALSET, C.; RAINS, D. 1986. Genetic variation for nitrogen and translocation in wheat. III. Nitrogen translocation in relation to grain yield and protein. *Crop Sci.* 26: 737-740.
16. CRASWELL, E.; STRONG, W. 1976. Isotopic studies of the nitrogen balance in a cracking clay 3. Nitrogen recovery in plant and soil in relation to the depth of fertilizer addition and rainfall. *Aust. J. of Soil Res.* 14: 75-83.
17. CHA, G; DURAN, J.M. 2001. Respuesta al agregado de Nitrógeno tardío (Z 3.0 y Z 4.7) en rendimiento y calidad de trigo (*Triticum aestivum*). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 89 p.
18. DAIGGER, L.; SANDER, D.; PETERSON, G. 1976. Nitrogen content of winter wheat during growth and maturation. *Agron. J.* 68: 815-818.
19. ERNST, O; BENTANCUR, O; NIN, M; DELUCHI, I; HOFFMAN, E; SUBURU, G. 1999. Relevamiento de trigo. Resultados en rendimiento y calidad. In: Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1<sup>a</sup>, 1999, Mercedes, Uruguay). Memorias. Mercedes, Mesa Nacional de Trigo. pp. 3-19.



29. \_\_\_\_\_. 2004. Manejo de la fertilización con nitrógeno en trigo y su interacción con otras prácticas agronómicas. Montevideo, INIA. 58 p. (Serie Técnica no. 144).
30. \_\_\_\_\_. 2005a. Calidad del grano de trigo; Fertilización con N y otros Nutrientes. In: Jornada Técnica Cultivos de Invierno (2005, Colonia). Memorias. Montevideo, INIA. pp. 26-28 (Actividades de Difusión no. 404).
31. \_\_\_\_\_. 2005b. Efecto de diferentes estrategias de fertilización sobre el rendimiento y la calidad del trigo en sistemas con siembra directa. In: Jornada Técnica Cultivos de Invierno (2005, Colonia) Memorias. Montevideo, INIA. pp. 38-43 (Actividades de Difusión no. 404).
32. \_\_\_\_\_. 2006. El efecto de la nutrición mineral sobre el rendimiento y la calidad del grano de trigo. In: Jornada Cultivos de Invierno (2006, Colonia) Memorias. Montevideo, INIA. pp. 8-21 (Actividades de Difusión no. 444).
33. \_\_\_\_\_. 2008. Criterios para la fertilización nitrogenada en cultivos de invierno. Revista INIA. no. 15: 20-24.
34. \_\_\_\_\_. 2010. Mejores Prácticas de Manejo (MPM) de nutrientes para la fertilización de trigo en sistemas intensivos. Revista INIA. no. 22: 21-24.
35. GARÍN, E.; GUIGOU, M.; KLASSEN, E. 1991. Efecto del exceso hídrico en trigo bajo laboreo convencional, laboreo vertical y siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. s.p.
36. HALLORAN, G. 1981. Cultivar differences in nitrogen translocation in wheat. Aust. J. of Agr. Res. 32(4): 535-544.
37. HARPER, L.; SHARPE, R.; LANGDALE, G.; GIDDENS, J. 1987. Nitrogen cyclin in a wheat crop; soil, plant, and aerial nitrogen transport. Agron. J. 79: 965-973.
38. HOFFMAN, E.; ERNST, O.; BRASSETTI, D.; SIRI, G.; ESPASANDIN, A. 1992. Modificación por manejo de la curva de crecimiento, su influencia sobre rendimiento, componentes y calidad industrial de cebada cervecera In: Reunión Nacional de Investigadores de Cebada Cervecera (3<sup>a</sup>, 1992, Minas, Uruguay). Trabajos presentados. Minas, Mesa Nacional de Investigadores de Cebada Cervecera. pp. 124-133.

39. \_\_\_\_\_.; SIRI, G.; ERNST, O. 1994. Posibilidades de predecir el comportamiento de los nuevos cultivares en función de su caracterización de su crecimiento inicial en condiciones de invernáculo. In: Reunión Nacional de Investigadores de Cebada Cervecera (5<sup>a</sup>., 1994, Colonia, Uruguay). Trabajos presentados. Colonia, Mesa Nacional de Investigadores de Cebada Cervecera. pp. 116-122.
40. \_\_\_\_\_.; ERNST, O. 1996. Refertilización en cebada cervecera. *Cangüé*. no. 6: 15-21.
41. \_\_\_\_\_.; \_\_\_\_\_.; PERDOMO, C. 1999. Ajuste de la fertilización nitrogenada en trigo en función de indicadores objetivos y su efecto en rendimiento y calidad de grano. In: Jornada sobre Rendimiento y Calidad de Trigo (1<sup>a</sup>., 1999, Mercedes, Uruguay). Memorias. Mercedes, Mesa Nacional de Trigo. pp. 10-27.
42. HOOKER, M.; SANDER, D.; PETERSON, G.; DAIGGER, L. 1980. Gaseous N losses from winter wheat. *Agron. J.* 72: 789-792.
43. KANWARPAL, S.; WAINES, J. 1989. Analysis of nitrogen accumulation and use in bread and durum wheat. *Crop Sci.* 29: 1232-1239.
44. KEMANIAN, A.; VIEGA, L. 1999. Concreción del peso y concentración de nitrógeno del grano de cebada cervecera. In: Reunión Mesa Nacional de Cebada Cervecera (9<sup>a</sup>., 1999, Colonia, Uruguay). Informe a la mesa nacional de cebada cervecera. Colonia, La Estanzuela. s.p.
45. KHOLI, M.; MARTINO, D. 1997. Conclusiones. In: Kholi, M.; Martino, D. eds. *Explorando altos rendimientos en trigo*. La Estanzuela, CIMMYT. pp. 333-335.
46. LAVOY, I.; HAGEMAN, R. 1970. Relationship of nitrate reductase activity to grain protein production in wheat. *Crop Sci.* 10: 280-285.
47. LERNER, S.; SEGHEZZO, M.; MALFESE, E.; PONZIO, N.; COGLITTI, M. 2006. N- and S-fertilizer effects on grain composition, industrial quality and end-use in durum wheat. *J. Cereal Sci.* 44: 2-11.
48. MAC RITCHIE, F.; GUPTA, R. 1993. Functionality-composition relationships of wheat flour as a result of variation in sulfur availability. *Aust. J. Agric. Res.* 44: 1767-1774.

49. MASON, H.; NAVABI, H.; FRICK, B.; O`DONOVAN, J.; NIZIOL, D. 2007. Dose growing canadian western hard red spring wheat under organic management alter its breadmaking quality. *Renewble Agric. Food Syst.* 22: 157-167.
50. MAZZILLI, S. 2004. Efecto de la dosis de nitrógeno y fuentes alternativas a la urea sobre la absorción, crecimiento y rendimiento en grano de trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 68 p.
51. MOSS, S.; C.W. MACRITCHIE, F.; RANDALL, J.1981. Sulfur and nitrogen fertilizer effects on wheat II. Influence on grain quality. *Aust. J. Agric. Res.* 32: 213-226.
52. OSCARSON, P.; LUNDBORG, T.; LARSSON, M.; LARSSON, C. 1995. Genotypic differences in nitrate uptake and nitrogen utilization for spring wheat grown hydroponically. *Crop Sci.* 35: 1056-1062
53. OUDRI, N.; CASTRO, J.; DOTI, R.; SECONDI DE CARBONELL, A. 1976. Guía para la fertilización de cultivos. Montevideo, MAP.DSP/CIAAB. 46 p.
54. PALTA, J.; FILLERY, I. 1993. Nitrogen accumulation and remobilization in wheat of N<sup>15</sup> – urea applied to a duplex soil at seeding. *Aust. J. of Exp. Agric.* 33: 233-238.
55. PERDOMO, C.; HOFFMAN, E.; PONS, C.; PASTORINI, M. 1999. Fertilización en cebada cervecera. (en línea). Montevideo, Facultad de Agronomía. s.p. Consultado 09 dic. 2001. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/talleres/cebada/fert>
56. RAO, A.; SMITH, J.; JANDHYALA, V.; PAPENDICK, R.; PARR, J. 1993. Cultivar and climatic effects on the protein content of soft white winter wheat. *Agron. J.* 85: 1023-1028.
57. SARANDÓN, J.; GIANIBELLI, M. 1990. Effect of a foliar urea sprying and nitrogen application at sowing upon dry matter and nitrogen distribution in wheat (*Triticum aestivum L.*). *Agron.* 10: 183-189.
58. SHAHSAVANI, S.; GHOLAMI, A. 2008. Effect of sulphur fertilization on breadmaking quality of three winter wheat varieties. *Pakistan J.of Bio. Sci.* 11 (17): 2134-2138.

59. SHEWRY, P.; TATHAM, A. 1997. Disulphide bonds in wheat gluten protein. *J. Cereal Sci.* 25: 135-146.
60. SPIERTZ, J. 1977. The influence of temperature and light intensity on grain growth in relation to the carbohydrate and nitrogen economy of the wheat plant. *Netherl. J. Agric. Sci.* 25: 182-197.
61. TEA, I.; GENTER, T.; NAULET, N.; BOYER, V.; LUMMERZHEIM, M. 2004. Effect of foliar sulfur and nitrogen fertilization on wheat storage protein composition and dough mixing properties. *Cereal Chem.* 81: 759-766.
62. THOMASON, W.; PHILLIPS, S.; PRIDGEN, T.; KENNER, J.; GRIFFEY, C. 2007. Managing nitrogen and sulfur fertilization for improved bread wheat quality in humid environments. *Cereal Chem.* 84: 450-462.
63. TIMMS, M.; BOTTOMLEY R.; ELLIS, J.; SCHOFIELD J. 1981. The baking quality and protein characteristics of a winter wheat grown at different levels of nitrogen fertilization. *J. Sci. Food Agric.* 23: 648-698.
64. UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA). 2009. Grain; worldmarket and trade, july 2009. (en línea). Washington, D.C. s.p. Consultado 14 abr. 2010. Disponible en <http://ffas.usda.gov/grain/circular/2009/07-09/grainfull07-09.pdf>
65. URUGUAY. MINISTERIO DE GANADERIA, AGRICULTURA Y PESCA. DIRECCIÓN DE INVESTIGACIONES ECONOMICAS AGROPECUARIAS. 2010. Encuesta agrícola primavera 2009. Montevideo. 32 p. (Serie Encuestas no. 284).
66. VAN SANFORD, D.; MACKOWN, C. 1987. Cultivar differences in nitrogen remobilization during grain fill in soft red winter wheat. *Crop Sci.* 27: 295-300.
67. VÁZQUEZ, D. 2004a. Calidad de cultivares de trigo del INIA. *In*: Jornada de Cultivos de Invierno (2004, Colonia) Memorias. Montevideo, INIA. pp. 41-47 (Actividades de Difusión no. 357).
68. \_\_\_\_\_; WATTS, B. 2004b. Gluten extensibility; a key factor in Uruguayan wheat quality. *In*: Lafiandra, D.; Masci, S.; D'Ovidio, R. eds. The gluten proteins. Cambridge, UK, The Royal Society of Chemists. s.p.

69. \_\_\_\_\_. 2005. Componentes de la calidad industrial del trigo. In: Jornada Técnica Cultivos de Invierno (2005, Colonia) Memorias. Montevideo, INIA. pp. 22-25 (Actividades de Difusión no. 404).
70. \_\_\_\_\_.; CASTRO, M. 2006. Calidad de los cultivares de trigos sembrados en Uruguay. In: Jornada de Rendimiento y Calidad de Trigo (8ª., 2006, Mercedes, Uruguay). Memorias. Mercedes, Mesa Nacional de Trigo. s.p.
71. \_\_\_\_\_. 2009. Aptitud industrial de trigo. Montevideo, INIA 46 p. (Serie Técnica no. 177).
72. \_\_\_\_\_. 2010. Presente y futuro de la calidad del trigo uruguayo. In: Jornada Cultivos de Invierno (2010, Colonia) Memorias. Montevideo, INIA. pp. 1-6 (Actividades de Difusión no. 603).
73. VERGES, P.; VÁZQUEZ, D. 2004. Calidad industrial del trigo; un tema que, como el pan, se puso sobre la mesa. (en línea). Montevideo, El País Agropecuario. 10 (113): 25-28. Consultado 11 ago. 2009. Disponible en <http://www.inia.org.uy/online/site/publicacion-ver.php?id=986>
74. \_\_\_\_\_. 2005. Cultivares de trigo INIA. In: Jornada Técnica Cultivos de Invierno (2005, Colonia) Memorias. Montevideo, INIA. pp. 56-62 (Actividades de Difusión no. 404).
75. VIEGA, L.; MARTÍN, V.; URRESTARAZÚ, H. 1992. Efecto del nivel de nitrógeno y estado fisiológico sobre la actividad de la nitrato reductasa en tres variedades de cebada cervecera. In: Reunión Nacional de Investigadores de Cebada (3ª., 1992, Minas, Uruguay). Trabajos presentados. Minas, Mesa Nacional de Investigadores de Cebada Cervecera. pp. 117-123.
76. WALL, J. 1971. Disulfide bonds; determination, location and influence on molecular properties of proteins. *Agric. and Food Chem.* 19: 619-625.
77. WOODING, A.; KAVALE, S.; MCRITCHIE, F.; STODDARD, F.; WALLACE, A. 2000. Effects of nitrogen and sulfur fertilizer on protein composition, mixing requirements, and dough strength of four wheat cultivars. *Cereal Chem.* 77: 798-807.
78. ZUBILLAGA, M. S.; ZUBILLAGA, M.; URRICARIET, S.; LAVADO, R. 2002. Effect of nitrogen sources on ammonia volatilization, grain yield and soil nitrogen losses in no-till wheat in an argentine soil. *Agroch.* 46: 100-107.