

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA

**DIAGNÓSTICO Y PREDICCIÓN DE RESPUESTA NITROGENADA EN BASE  
AL ESTADO NUTRICIONAL DE TRIGO EN Z.33**

por

César Nicolás **FASSANA PEREIRA**

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

MONTEVIDEO  
URUGUAY  
(JULIO 2019)

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Ing. Agr. (MSc.) Luis Viega, Ing. Agr. (MSc.) Ricardo José Miguel Melchiori, Ing. Agr. (PhD.) Kathrin Grahmann el 24 de Julio de 2019.  
Autor: Ing. Agr. César Nicolás Fassana Pereira. Director Ing. Agr. (Dr.) Oswaldo Ernst Benech. Co-director Ing. Agr. (Ph.D.) Andrés Berger Ricca.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Yessi Rodriguez por el apoyo incondicional durante todo el proceso y comprensión por los tiempos dedicados a la tesis.

A Oswaldo Ernst, Esteban Hoffman y Andrés Berger, por la oportunidad y confianza depositada. Además de profesionales, son excelentes personas.

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

## TABLA DE CONTENIDO

	Página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS.....	III
RESUMEN.....	VI
SUMMARY.....	VII
<b><u>1. INTRODUCCIÓN</u></b> .....	1
1.1. OBJETIVOS.....	3
<b><u>2. DIAGNÓSTICO DE CONDICIÓN NITROGENADA Y BRECHA DE RENDIMIENTO POR NITRÓGENO A TRES NUDOS EN TRIGO</u></b> .....	4
2.1. RESUMEN.....	4
2.2. SUMMARY.....	4
2.3. INTRODUCCIÓN.....	5
2.4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
<u>2.4.1. Base de datos</u> .....	8
<u>2.4.2. Ajuste de la CDN y corrección por INN crítico en Z.33</u> .....	11
<u>2.4.3. Validación del INN crítico como indicador de deficiencia de N en Z.33 y respuesta a la fertilización</u> .....	11
<u>2.4.4. Brecha de rendimiento</u> .....	12
<u>2.4.5. Brecha de rendimiento y variables de cultivo que la definen</u> .....	12
<u>2.4.6. Brecha de rendimiento por nutrición nitrogenada deficitaria en Z.33</u> .....	12
2.5. RESULTADOS.....	13
<u>2.5.1. Descripción de la base de datos</u> .....	13
<u>2.5.2. Curva de dilución de N y estimación del INN crítico a Z.33</u> .....	13
<u>2.5.3. Brecha de rendimiento por deficiencia nitrogenada a Z.33</u> .....	16
2.6. DISCUSIÓN.....	18
2.7. CONCLUSIONES.....	21

2.8. AGRADECIMIENTOS .....	21
2.9. REFERENCIAS .....	22
<b><u>3. RESPUESTA AL NITRÓGENO EN TRES NUDOS EN TRIGO Y CAPACIDAD DEL NDVI PARA ESTIMAR INN</u></b> .....	<b>27</b>
3.1. RESUMEN .....	27
3.2. SUMMARY .....	27
3.3. INTRODUCCIÓN .....	28
3.4. MATERIALES Y MÉTODOS .....	31
<u>3.4.1. Análisis de datos</u> .....	32
3.5. RESULTADOS .....	33
<u>3.5.1. Respuesta al agregado de nitrógeno en Z.33</u> .....	33
<u>3.5.2. Estimación de INN mediante NDVI en Z.33</u> .....	34
<u>3.5.3. Capacidad del NDVI como estimador de respuesta al agregado de N en Z.33</u> .....	36
3.6. DISCUSIÓN .....	40
<u>3.6.1. Respuesta al agregado de nitrógeno en Z.33</u> .....	40
<u>3.6.2. Estimación de INN mediante NDVI en Z.33</u> .....	41
<u>3.6.3. Capacidad del NDVI como estimador de respuesta al agregado de N en Z.33</u> .....	41
3.7. CONCLUSIONES .....	43
3.8. AGRADECIMIENTOS .....	43
3.9. REFERENCIAS .....	44
<b><u>4. DISCUSIÓN GENERAL</u></b> .....	<b>50</b>
4.1. AJUSTE Y CORRECCIÓN DE CDN PARA MAXIMIZAR RENDIMIENTO EN CONDICIONES DE SECANO .....	50

4.2. BRECHA DE RENDIMIENTO POR DEFICIENCIA NITROGENADA POSTERIOR A Z.30 .....	51
4.3. RESPUESTA AL AGREGADO DE N EN Z.33.....	51
4.4. NDVI COMO HERRAMIENTA AUXILIAR.....	52
<u>5. CONCLUSIONES GLOBALES.....</u>	54
<u>6. BIBLIOGRAFÍA.....</u>	55

## RESUMEN

La recomendación de dosis de nitrógeno (N) en trigo implica cuantificar la disponibilidad de  $N-NO_3^-$  en suelo a siembra y Z.22 y N total en planta (Nt) a Z.30. En los últimos 15 años, aumentó el N recomendado, consecuencia del incremento de la dosis en Z.30, generando pulsos de N que no son absorbidos de inmediato. Sin embargo, existe respuesta a dosis mayores a las recomendadas, evidenciando brecha de rendimiento por N (BR). Dos procesos la explican: i) menor aporte de N por el suelo, generado por la desarticulación del sistema de rotación pastura-cultivo; ii) aumento de la demanda de cultivos por incremento del rendimiento potencial. Se propone mejorar la sincronía entre oferta y demanda, definiendo la cantidad de N a agregar en base al estado nutricional del cultivo en Z.33. Los objetivos fueron: i) ajustar la curva de dilución de N (CDN) bajo condiciones de secano; ii) estimar la BR en Z.33; iii) generar y validar el nivel crítico del índice de nutrición nitrogenada (INN) como predictor de respuesta al agregado de N en Z.33; iv) cuantificar la existencia de respuesta al N en Z.33; v) evaluar la capacidad del NDVI (*Normal difference vegetation index*) como estimador del INN; vi) cuantificar la respuesta en rendimiento a N agregado en Z.33 en comparación al rendimiento obtenido siguiendo el modelo actual de recomendación. Se dispuso de una base de datos compuesta por experimentos de respuesta al N, con muestreos de materia seca (MS) y Nt en Z.22, Z.30, Z.33 y Z.65, conducidos durante 2011/16 en el litoral agrícola uruguayo, con los cuales se ajustó la CDN bajo condiciones de secano. Se realizaron experimentos en faja durante 2015/16, captando variaciones en la disponibilidad de N por el suelo. Se contrastó un testigo absoluto, un testigo tecnológico (Tt) (modelo actual) y un tratamiento homólogo al anterior más 50 unidades de N en Z.33. Se muestreo NDVI en Z.33 y rendimiento en grano, ambos en grilla. Para las condiciones de Uruguay, la CDN es  $N_c = 4,17MS^{-0,31}$  con 78% de aciertos en la respuesta al N en Z.33. Se identificaron dos ambientes productivos que generaron diferencias en la BR. No se logró relación significativa entre INN-NDVI, pero sí una tendencia entre ellas. En rendimientos  $<4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  no hubo respuesta a N en Z.33 o fue inferior al Tt, mientras que en rendimientos  $>4,5 \text{ Mg ha}^{-1}$  fue mayor que el Tt. En un mismo rango de rendimiento, la magnitud de la respuesta estuvo asociada a rangos de NDVI, permitiendo definir tendencias en la respuesta al agregado de N en Z.33.

**Palabras claves:** INN, índice de nutrición nitrogenada, NDVI.

## DIAGNOSIS AND PREDICTION OF NITROGEN RESPONSE BASED ON THE NUTRITIONAL STATUS OF WHEAT IN Z.33.

### SUMMARY

The recommendation of nitrogen (N) doses in wheat involves quantifying the availability of  $\text{N-NO}_3^-$  at planting and at Z.22 and total N in the plant (Nt) at Z.30. In the last 15 years, the recommended N increased due to the increase of the dose at Z.30, generating pulses of N that are not absorbed immediately. However, there is a response to doses higher than those recommended, showing a yield gap for N (BR). Two processes explain it: i) lower contribution of N by the soil, generated by the disarticulation of the pasture-crop rotation system; ii) increased crop demand due to an increase in potential yield. It is proposed to improve the synchrony between supply and demand, defining the quantity of N to be added based on the nutritional status of the crop at Z.33. The objectives were: i) to adjust the dilution curve of N (DCN) under rainfed conditions; ii) estimate the BR in Z.33; iii) generate and validate the critical level of the nitrogenous nutrition index (NNI) as a predictor of the response to the addition of N in Z.33; iv) quantify the existence of a response to N in Z.33; v) evaluate the capacity of the NDVI (Normal difference vegetation index) as an estimator of the NNI; vi) quantify the yield response to N added in Z.33 compared to the yield obtained following the current recommendation model. A database was available composed of N-response experiments, with dry matter (DM) samples and Nt at Z.22, Z.30, Z.33 and Z.65, conducted during 2011/16 in the Uruguayan agricultural littoral, with which the DCN was adjusted for rainfed. Strip experiments were carried out during 2015/16, capturing variations in the availability of N for the soil. An absolute control, a technological control (Tt) (current model) and a treatment homologous to the previous one plus 50 units of N in Z.33 were contrasted. NDVI, measured at Z.33, and grain yield were determined in grids. For the conditions of Uruguay, the DCN is  $N_c = 4.17DM^{-0.31}$  with 78% correct answers with N at Z.33. Two productive environments were identified that generated differences in the BR. No significant relationship was achieved between INN-NDVI, but a trend between them. In yields  $<4.5 \text{ Mg ha}^{-1}$  there was no response to N at Z.33 or it was lower than Tt, whereas in yields  $>4.5 \text{ Mg ha}^{-1}$  was higher than Tt. In the same range of performance, the magnitude of the response was associated with ranges of NDVI, allowing to define trends in the response to the addition of N at Z.33.

**Keywords:** INN, nitrogenous nutrition index, NDVI.

## 1. INTRODUCCIÓN

Uruguay, pasó de tener un rendimiento promedio de trigo (*Triticum aestivum* L.) de 1851 kg ha<sup>-1</sup> en el año 1990, a producir en promedio casi 3521 kg ha<sup>-1</sup> en el año 2016 (FAO, 2018), representando una tasa de incremento promedio del orden de los 56 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, resultado de mejores prácticas de producción y progreso genético. En la actualidad, el potencial de rendimiento en trigo continúa creciendo dado por la introducción de nuevas variedades. Hoffman *et al.* (2018) para el período 2000-2014 registraron incremento del rendimiento del tercil superior anual de 185 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, lo que equivale a un progreso del 2,7% anual. Sin embargo, la reducción en la tasa de incremento anual del rendimiento nacional de trigo en los últimos 15 años (Hoffman y Ernst, 2017), podría no acompañar la evolución del potencial de los nuevos cultivares.

La investigación nacional reporta una disminución en la oferta de nitrógeno (N) por parte del suelo (Hoffman *et al.*, 2015, Morón y Quincke, 2010), como consecuencia de los cambios en el sistema productivo (Wingeyer *et al.*, 2015, Franzluebbbers *et al.*, 2014). Esto podría estar generando una creciente brecha de rendimiento (BR) atribuible al aumento de la demanda de nutrientes, principalmente N, determinada por el incremento en el rendimiento potencial y la oferta de N compuesta por aporte desde el suelo más la fertilización (Berger *et al.*, 2018, Hoffman *et al.*, 2018, Sadras *et al.*, 2016, Sadras y Lawson, 2013). La cuantificación de BR en referencia a un potencial de rendimiento limitado en N está escasamente desarrollado (Sadras *et al.*, 2015, Hochman *et al.*, 2013).

Deficiencias de N afectan el rendimiento y la concentración de proteína en grano, y por tanto la fertilización nitrogenada es determinante de la variación en la producción del cultivo (Salvaghiotti *et al.*, 2009, Sinclair y Horie, 1989).

La mayor demanda y menor oferta del nutriente generan la necesidad de incrementar el agregado de fertilizante nitrogenado. Hacerlo en un solo momento, atenta contra la productividad parcial del N agregado (Dobermann, 2007, Pierce y Rice, 1988) y podría aumentar la posibilidad de pérdida del nutriente elevando el potencial de contaminación (Cassman *et al.*, 2003). Mejorar la sincronía entre oferta y demanda de N (Angus, 2001, Stickse *et al.*, 1999), podría realizarse fraccionando el agregado de fertilizante nitrogenado, como forma de reducir el problema. Para esto es necesario disponer de un modelo de

diagnóstico de condición nitrogenada del cultivo, posterior al último momento de corrección de oferta de N (Z.30) en la actual propuesta de manejo nitrogenado en cereales de invierno (Hoffman *et al.*, 2010).

En Z.30 ocurre el punto de inflexión en la curva de acumulación de biomasa aérea (MS), pero la máxima tasa de crecimiento y absorción de N ocurre a partir de 3-4 nudos (Dall'Orso *et al.*, 2016; Angus, 2001). En este estadio comienza el periodo crítico de definición del rendimiento en grano (Fischer, 1985), por lo que ocurren las máximas pérdidas de rendimiento en respuesta a deficiencias en la oferta de recursos.

El concepto de INN (Índice de Nutrición Nitrogenada) propuesto por Lemaire *et al.* (2008) en base a curva de dilución de N (Justes *et al.*, 1994), puede ser empleado para identificar condiciones de nutrición nitrogenada deficitaria. Las curvas de dilución de N (CDN) en trigo han sido ajustadas para condiciones de agua no limitantes (Hoogmoed y Sadras, 2018, Zhao *et al.*, 2016, Yao *et al.*, 2014, Reussi *et al.*, 2012, Yue *et al.*, 2012, Ziadi *et al.*, 2010, Lu *et al.*, 2006, Justes *et al.*, 1994), y las mismas tienen la finalidad de determinar la mínima concentración de N en planta necesaria para maximizar la biomasa aérea, pero no para maximizar rendimiento en grano en sistemas de producción de secano. Hoogmoed y Sadras (2018) indicaron que la concentración crítica de N es menor bajo estrés hídrico, parcialmente debido a cambios en la asignación de biomasa. Por lo tanto, el INN derivado del N crítico ajustado para cultivos sin deficiencias hídricas sobreestima la deficiencia de N en cultivos sometidos a estrés hídrico (Hoogmoed *et al.*, 2018).

Se ha generado evidencia nacional que demuestra respuesta al N en dosis mayores a las recomendadas (Hoffman *et al.*, 2013). Esto podría interpretarse como la existencia de BR atribuible a déficit de N, aun empleando las dosis recomendadas por el modelo de manejo nitrogenado. Disponer del INN en base a CDN ajustada para condiciones de secano y corregida para maximizar el rendimiento en grano, podría ayudar a identificar con antelación las condiciones que llevan a la BR y evaluar si el agregado de N en un momento posterior a Z.30, ayuda a reducir esa BR. En caso de ser comprobado, sería necesario crear un método que facilite el diagnóstico y que pueda ser empleado a nivel general de chacra, definiendo zonas de diagnóstico (Peralta *et al.*, 2015, Christy, 2008, Fleming *et al.*, 2004, Mallarino, 2001, Doerge, 1999) o bien empleado para manejo sitio-específico (Cilia *et al.*, 2014, Lukina *et al.*, 2001, Solie *et al.*, 1999, Raun *et al.*, 1998), considerando la variabilidad en potencial de

rendimiento de cada sector del potrero, causada por el uso agrícola y las propiedades naturales de cada sitio. Los avances en investigación sobre la reflectancia de distintas longitudes de onda de la radiación incidente y su relación con parámetros biofísicos del cultivo (Gilbert *et al.*, 1997, Bannari *et al.*, 1995), mediante tecnología de sensoramiento remoto (Hatfield *et al.*, 2008), y la generación de índices espectrales relacionados a esos parámetros biofísicos (Gitelson, 2012), podrían ser utilizados como herramienta para el diagnóstico o identificación de zonas de comportamiento diferencial, contemplando la variabilidad espacial en la oferta de N por parte del suelo y la probable respuesta al agregado de N (Berger *et al.*, 2014, Bredemeier *et al.*, 2007, Rodríguez *et al.*, 2006).

### **1.1. OBJETIVOS**

El objetivo general fue generar un modelo de diagnóstico de condición nitrogenada en trigo, que complemente la actual propuesta de manejo nitrogenado, como base para determinar condición de nutrición deficitaria posterior a Z.30, y que permita reducir la brecha de rendimiento en condiciones de secano.

Los objetivos específicos fueron: i) ajustar la curva de dilución de N bajo condiciones de secano; ii) estimar la brecha de rendimiento generada por deficiencia de N en Z.33; iii) generar y validar niveles críticos de INN como predictores de respuesta al agregado de N en Z.33; iv) cuantificar la existencia de respuesta al N en Z.33; v) evaluar la capacidad del NDVI como estimador de INN; vi) cuantificar la respuesta en rendimiento a N agregado en Z.33 en referencia al rendimiento obtenido siguiendo el modelo actual de recomendación.

Los objetivos fueron desarrollados en dos artículos científicos (capítulo 2 y 3) en función de los requisitos de la revista *Agrociencia Uruguay*.

## **2. DIAGNÓSTICO DE CONDICIÓN NITROGENADA Y BRECHA DE RENDIMIENTO POR NITRÓGENO A TRES NUDOS EN TRIGO**

### **2.1. RESUMEN**

El menor aporte de nitrógeno (N) del suelo generado por la desarticulación del sistema pasturas-cultivos y la demanda de las nuevas variedades de trigo, incrementan las necesidades de agregado de N. Se propone: i) ajustar la curva de dilución de N (CDN) bajo condiciones de secano; ii) estimar la brecha de rendimiento generada por deficiencia de N en Z.33 (BR); iii) generar y validar el nivel crítico del índice de nutrición nitrogenada (INN) como predictor de respuesta al agregado de N en Z.33. La CDN se determinó empleando la metodología propuesta por Justes *et al.*<sup>(1)</sup>, y corregida por nivel crítico de INN para rendimiento relativo. Se identificaron ambientes de producción mediante árbol de clasificación y regresión. Para las condiciones de Uruguay, la CDN que contempla el requerimiento para rendimiento (INN crítico a Z.33=1,24) es  $N_c=4,17MS^{-0,31}$  con una probabilidad de 78% de aciertos en la respuesta al N en Z.33. Los ambientes de producción definidos por rendimiento sin agregado de N, corresponden a distintas capacidades de aporte de N del suelo ( $N_{\text{suelo-Alto}}$  y  $N_{\text{suelo-Bajo}}$ ). El N absorbido a Z.33 fue 29 y 54 kg N ha<sup>-1</sup> en  $N_{\text{suelo-Bajo}}$  y  $N_{\text{suelo-Alto}}$  respectivamente, presentando BR de diferente magnitud. En ambos casos los coeficientes gamma fueron 1,04, con *plateau* 0,03 y 0,10 para  $N_{\text{suelo-Alto}}$  y  $N_{\text{suelo-Bajo}}$  respectivamente. La CDN corregida por nivel crítico de INN, permitió identificar situaciones de respuesta a N en Z.33 y cuantificar la BR. Esta herramienta complementa y mejora el actual modelo de diagnóstico y corrección de deficiencias nitrogenadas.

**Palabras claves:** INN, índice suficiencia nitrogenada, nivel crítico, Z.33, *Triticum aestivum*.

### **Diagnosis of nitrogen condition and yield gap for nitrogen at third node in wheat**

### **2.2. SUMMARY**

The lower nitrogen (N) contribution of the soil generated by the disarticulation of the pasture-crop system and the demand of the new wheat varieties, increase the needs for the application of N. It is proposed: i) to adjust the dilution curve of N (CDN) under limiting water conditions; ii) estimate the yield gap generated by N deficiency in Z.33 (BR); iii) generate and validate the critical level of the nitrogen nutrition index (NNI) as a predictor of the response to

the addition of N in Z.33. The CDN was determined using the methodology proposed by Justes *et al.*<sup>(1)</sup>, and corrected by critical level of NNI for relative performance. Production environments were identified by classification and regression tree. For the conditions of Uruguay, the CDN that contemplates the requirement for yield (critical INN to Z.33=1.24) is  $N_c=4.17MS^{-0.31}$  with a probability of 78% of correct answers to N at Z.33. The production environments defined by yield without addition of N, correspond to different contribution capacities of N from the soil ( $N_{soil-High}$  and  $N_{soil-Low}$ ). The absorbed N at Z.33 was 29 and 54 kg N ha<sup>-1</sup> at  $N_{soil-Low}$  and  $N_{soil-High}$  respectively, presenting BR of different magnitude. In both cases, the gamma coefficients were 1.04, with plateau 0.03 and 0.10 for  $N_{soil-High}$  and  $N_{soil-Low}$ , respectively. The CDN corrected by critical level of NNI, allowed to identify situations of response to N in Z.33 and to quantify the BR. This tool complements and improves the current model of diagnosis and correction of nitrogen deficiencies.

**Keywords:** INN, nitrogen adequacy index, critical level, Z.33, *Triticum aestivum*.

### 2.3. INTRODUCCIÓN

El modelo de diagnóstico de oferta de nitrógeno (N) y recomendación de fertilización en cereales de invierno para las condiciones de Uruguay fue generado entre 1992-2001. Consiste en evaluar la oferta de N en base a la disponibilidad de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en suelo, en el estrato 0-20 cm de profundidad a siembra y cuando el cultivo tiene dos macollos (Z.22); y la concentración de N total en planta (Nt) acompañada de una estimación del potencial de rendimiento esperado a inicio de encañazón (Z.30)<sup>(2)</sup>. Los modelos de dosis recomendada para cada momento fueron definidos para un sistema en el cual los cultivos anuales rotaban con pasturas y con predominio de laboreo convencional. La fase agrícola duraba 3 a 4 años, seguida por una fase con pasturas perennes compuestas de gramíneas y leguminosas de similar duración. A partir del 2002 inició un proceso de cambio del uso del suelo en agricultura, que terminó sustituyendo este sistema de rotación por un sistema de cultivo continuo sin laboreo<sup>(3)(4)</sup>. En los últimos 15 años, la cantidad de N a recomendar utilizando este modelo ha aumentado, lo que se explica fundamentalmente por una alta proporción de situaciones con concentración deficitaria de Nt a Z.30<sup>(5)</sup>. Adicionalmente, se ha cuantificado respuesta a dosis mayores a las recomendadas<sup>(6)</sup>, generando evidencias de la existencia de

una brecha de rendimiento atribuible a déficit de N, aun aplicando las dosis de N recomendado. Dos procesos explicarían la necesidad de fertilizar con mayores dosis: 1) menor aporte de N por parte del suelo como consecuencia de la desarticulación del sistema de rotación pastura-cultivo<sup>(7)(8)(9)</sup> y 2) incremento en la demanda del nutriente por mayores rendimientos de las nuevas variedades<sup>(10)(11)(12)(13)</sup>. El primero es posible cuantificarlo utilizando el modelo de fertilización actual, pero el segundo resulta de un mayor desajuste entre oferta y demanda de N. La mayor parte del déficit se produciría durante los estadios fenológicos posteriores a Z.30, etapa en que se incrementa la demanda del N. En Z.30 ocurre el punto de inflexión en la curva de acumulación de biomasa aérea (MS), pero la máxima tasa de crecimiento y absorción de N ocurre a partir de 3-4 nudos (Z.33-34)<sup>(14)(15)</sup>. En este estadio comienza el periodo crítico de definición del rendimiento en grano<sup>(16)</sup>, por lo que ocurren las máximas pérdidas de rendimiento en respuesta a deficiencias en la oferta de recursos.

El problema radica en que el diagnóstico y recomendación de dosis de N en base a los indicadores que componen el modelo de recomendación actual, implica que la cantidad de N a agregar, principalmente a Z.30, no cubriría totalmente el incremento de la demanda posterior a ese estadio. Existen evidencias de que la alternativa de agregar dosis mayores a las recomendadas generaría pulsos de N que el cultivo no puede absorber de manera inmediata<sup>(5)</sup>, aumentando el riesgo de pérdida y contaminación ambiental<sup>(17)(18)</sup>, reduciendo el uso eficiente y la recuperación aparente de N<sup>(19)</sup>.

Reducir la desincronía entre demanda y oferta de N permitiría concretar el aumento en los rendimientos<sup>(15)(20)</sup>, sin afectar la calidad del grano y minimizar el impacto ambiental. Para lograrlo sería necesario el diagnóstico de la condición nutricional nitrogenada en un estadio posterior a Z.30.

Greenwood<sup>(21)</sup>, definió la concentración crítica de nitrógeno total en planta ( $N_c$ ) como la mínima concentración de  $N_t$  necesaria para obtener máxima tasa de crecimiento del cultivo, la cual varía con el estadio fenológico del cultivo. Conforme aumenta la producción de MS, disminuye el  $N_t$ <sup>(22)</sup> aún con sobreoferta del nutriente<sup>(23)</sup>. El proceso puede representarse con el modelo alométrico propuesto por Lemaire y Salette<sup>(24)</sup>:  $N_c = a * MS^{-b}$ . Donde MS es la cantidad de materia seca acumulada en la parte aérea expresada en  $Mg\ ha^{-1}$ ,  $N_c$  es la concentración total de N en la parte aérea expresada en % de MS,  $b$  es un parámetro adimensional que representa la dilución de N en relación a la MS del cultivo y  $a$  es la

concentración de N del cultivo cuando MS = 1 Mg ha<sup>-1</sup>. En ausencia de factores limitantes, esta relación expresa la dilución del nutriente mientras avanza el ciclo del cultivo<sup>(1)</sup>. La concentración de Nt en diferentes etapas fenológicas es una referencia para diagnosticar el estado de la nutrición nitrogenada con relación a la tasa de crecimiento del cultivo<sup>(25)</sup>. Lemaire *et al.*<sup>(26)</sup> proponen el índice de nutrición nitrogenada (INN), como un indicador que cuantifica el estado nutricional nitrogenado del cultivo contemplando el Nc para crecimiento no limitado. Este índice relaciona la concentración de Nt del cultivo a diagnosticar con el Nc estimado a partir de la curva de dilución de N (CDN) para el nivel de producción de MS disponible, (INN = Nt/Nc).

En este trabajo se plantea como hipótesis que existe una brecha de rendimiento en trigo generada por nutrición deficitaria de N en estadios posteriores a Z.30, que no es contemplada siguiendo el modelo actual de recomendaciones. Esta deficiencia de N es posible diagnosticarla utilizando la CDN y, combinada con el INN, proponer una dosis de N que corrija la deficiencia contemplando la demanda del cultivo. En base a la fisiología del cultivo, el momento elegido para evaluar el estado nutricional del cultivo y corregirlo con fertilización nitrogenada, fue el estadio Z.33.

Los objetivos fueron: i) ajustar la CDN bajo condiciones de secano; ii) estimar la brecha de rendimiento de trigo generada por deficiencia de N en Z.33 y iii) generar y validar niveles críticos de INN como predictores de respuesta al agregado de N en Z.33.

## 2.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El diagrama de la figura 1 presenta el esquema de trabajo seguido.

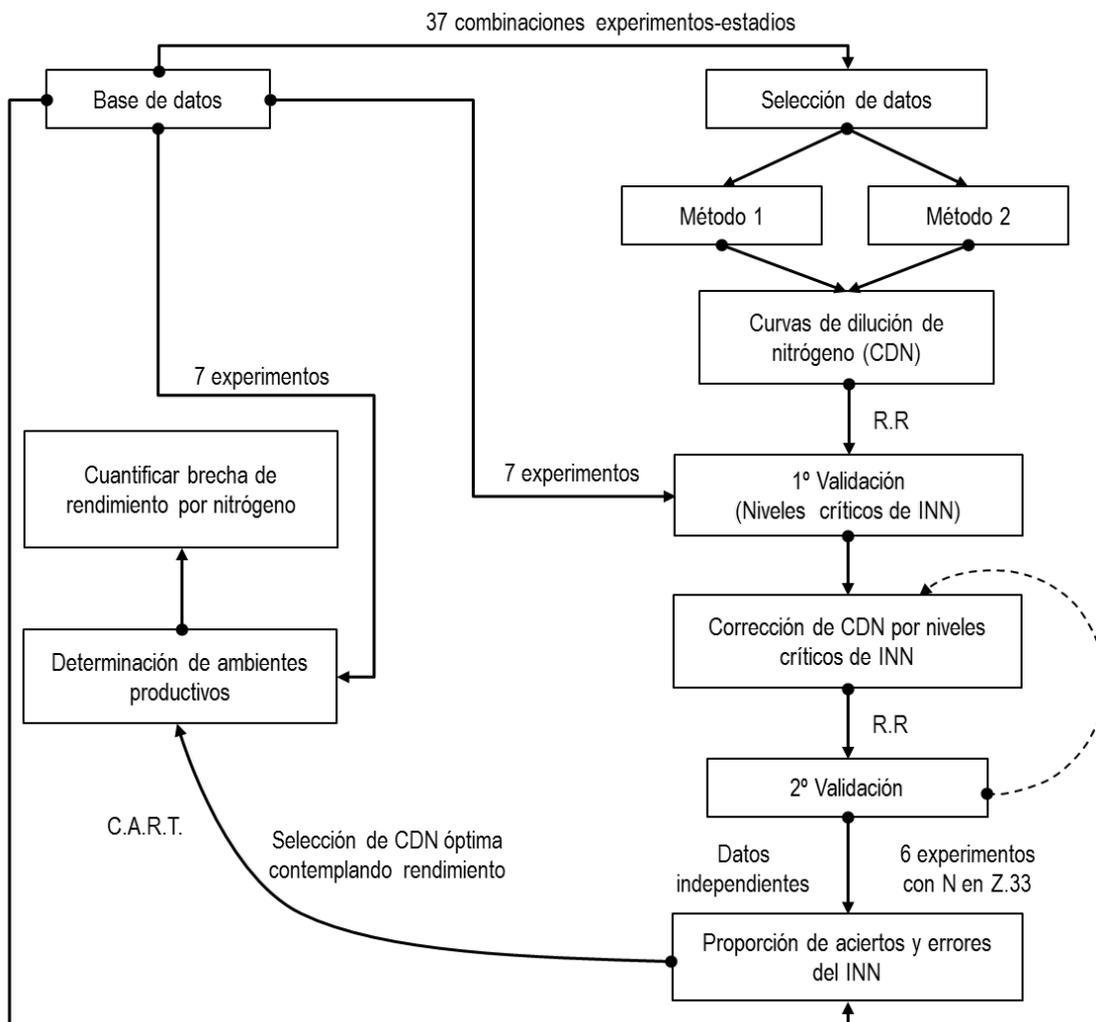


Figura 1. Modelo simplificado de etapas y procesos en la investigación. R.R – Rendimiento relativo; C.A.R.T. - *Classification and Regression Tree*; CDN – Curva de dilución de nitrógeno; INN – Índice de nutrición nitrogenada.

### 2.4.1. Base de datos

Se dispuso de una base de datos compuesta por experimentos de respuesta al agregado de N a la siembra, Z.22 y Z.30 en trigo, con diseño de bloques completos al azar con 3 o 4 repeticiones (Cuadro 1). El rango de dosis de N total agregado fue de 0 a 200 kg N ha<sup>-1</sup>. Los experimentos se realizaron bajo siembra directa, entre los años 2011 y 2016

incluidos, en suelos clasificados como Argiudoles típicos ubicados en el litoral oeste de Uruguay. Las parcelas presentaron tamaño variable entre experimentos, promediando de 4 a 6 metros de ancho y 8 a 10 metros de largo. La superficie de muestreo fue de 2 repeticiones de 4 metros lineales en cada parcela. Se dispuso de mediciones de MS ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) y Nt (%) por método Kjeldahl en diferentes estadios de crecimiento (Z.30, Z.33 y Z.65). Adicionalmente, se realizó un experimento en condiciones controladas (macetas) creando variabilidad en la producción de MS y Nt, en los estadios Z.22, Z.30 y Z.33. La mezcla de suelo elaborada con el objetivo de reducir la disponibilidad de N en el suelo fue de 2/3 de suelo y 1/3 de arena, resultando en textura franco-arenosa. En las macetas destinadas a muestreos en Z.22, las dosis fueron 0, 40, 80 y 120  $\text{kg de N ha}^{-1}$  a siembra. En las macetas destinadas a muestreos en Z.30, las dosis anteriores se fraccionaron en 1/3 a siembra y 2/3 a Z.22. En las macetas destinadas a muestreos en Z.33, el fraccionamiento fue igual al anterior y se agregaron 40  $\text{kg de N ha}^{-1}$  en Z.30.

La base de datos final integró 28 experimentos en localidades y años diferentes, con combinaciones de dosis y momento de fertilización, totalizando 1138 observaciones de MS, Nt y rendimiento en grano.

Las pruebas estadísticas en el análisis de datos se realizaron mediante el paquete estadístico Infostat/L 2016.

Cuadro 1. Características de los sitios experimentales incluidos en la base de datos.

Descripción de sitios experimentales									
No.	Localidad	Año	Textura de suelo	F.S.	Antecesor	Variedad	Dosis de N (kg ha <sup>-1</sup> )	Estadios de muestreo (escala Zadoks)	Re. ± D.E. (Mg ha <sup>-1</sup> )
1*	EEMAC - Paysandú	2016	Franco-arenoso	2-jul	-	Fuste	0-40-80-120	Z.22 - Z.30 - Z.33	-
2	EEMAC - Paysandú	2014	Franco	21-jun	Pastura	Fuste	0-40-80-120	Z.30 - Z.33	5.3±0.8
3	EEMAC - Paysandú	2014	Franco	21-jun	Pastura	Fuste	0-50	Z.30 - Z.65	4.6±0.7
4	Dolores - Soriano	2016	Franco-arcilloso	10-jun	Pastura	Fuste	0-25-50-70-100-125	Z.30 - Z.33	4.6±0.9
5	Dolores - Soriano	2016	Franco-arcilloso	10-jun	Pastura	Ceibo	0-25-50-70-100-125	Z.30 - Z.33	5.1±1.0
6	Sauce Viejo - Río Negro	2015	Limo-arcilloso	21-may	Soja	Fuste	0-30-50	Z.33 - Z.65	3.6±0.9
7	Sauce Viejo - Río Negro	2015	Limo-arcilloso	21-may	Soja	Fuste	0-30-50	Z.33 - Z.65	3.7±0.9
8	Sauce Viejo - Río Negro	2015	Limo-arcilloso	21-may	Soja	Fuste	0-30-50	Z.33 - Z.65	3.7±0.9
9	Sauce Viejo - Río Negro	2015	Limo-arcilloso	21-may	Soja	Fuste	0-30	Z.65	3.9±0.9
10	Camino La Paz - Paysandú	2011	Franco-arcilloso	13-may	Pastura	Baguette 19	0-50-75	Z.65	4.4±0.6
11	Camino La Paz - Paysandú	2011	Franco-limo-arcilloso	22-may	Soja	Nogal	0-25-38	Z.65	4.4±0.6
12	Camino La Paz - Paysandú	2011	Franco-limoso	9-may	Soja	Baguette 19	0-85-128	Z.65	4.1±0.6
13	Camino La Paz - Paysandú	2011	Franco-limo-arcilloso	8-may	Soja	Baguette 19	0-105-158	Z.65	4.9±0.6
14	Camino La Paz - Paysandú	2011	Franco-limoso	10-may	Soja	Nogal	0-35-53	Z.65	4.5±0.5
15	Camino La Paz - Paysandú	2011	Franco-limoso	7-may	Soja	Baguette 19	0-90-135	Z.65	4.9±0.9
16	Camino La Paz - Paysandú	2011	Franco-limoso	3-jun	Soja	Baguette 11	0-90-135	Z.65	4.1±0.8
17	Porbenir - Paysandú	2012	Arcillo-arenoso	4-may	Soja	Baguette 19	0-80-122	Z.65	3.4±0.6
18	Porbenir - Paysandú	2012	Franco-limo-arcilloso	6-jun	Soja	Baguette 601	0-36-54	Z.65	2.4±0.3
19	Young sur - Río Negro	2012	Franco	2-jun	BQ	Nogal	0-41-62	Z.65	2.5±0.3
20	Camino La Paz - Paysandú	2012	Franco-limoso	15-may	Soja	Baguette 19	0-63-95	Z.65	2.6±0.3
21	La Tentación - Paysandú	2012	Franco-limo-arcilloso	12-may	Soja	Baguette 19	0-32-48	Z.65	2.4±0.4
22	Camino La Paz - Paysandú	2012	Franco-limoso	10-may	Soja	Baguette 11	0-45-68	Z.65	2.9±0.5
23	Camino La Paz - Paysandú	2012	Franco-limoso	12-may	Soja	Baguette 11	0-54-81	Z.65	2.7±0.6
24	Camino La Paz - Paysandú	2012	Franco-limoso	15-may	Soja	Baguette 11	0-41-62	Z.65	2.4±0.5
25	Young norte - Paysandú	2012	Franco-limoso	12-may	Soja	Baguette 11	0-63-95	Z.65	3.3±0.5
26	Constancia - Paysandú	2012	Franco-arcilloso	1-jun	Soja	Baguette 11	0-50-75	Z.65	2.9±0.5
27	Constancia - Paysandú	2012	Franco-arcilloso	14-may	Soja	Baguette 11	0-54-81	Z.65	3.0±0.3
28	Constancia - Paysandú	2012	Franco-limo-arcilloso	19-may	Pastura	Baguette 11	0-32-48	Z.65	2.9±0.3

\* - Ensayos sembrados en macetas bajo invernadero. F.S. - Fecha de siembra. Re. - Rendimiento medio del experimento. D.E. - Desvío estándar.

#### **2.4.2. Ajuste de la CDN y corrección por INN crítico en Z.33**

Se determinaron dos CDN, donde los niveles críticos de Nt que componen cada curva se identificaron mediante, 1) metodología propuesta por Justes *et al.*<sup>(1)</sup> (de aquí en más, “CDN”) y 2) de los tratamientos que producían máxima MS (ANAVA y prueba de comparación de medias) en un estadio dado (ej. Z.33), se identificó el de menor Nt en el estadio anterior inmediato (ej. Z.30) (de aquí en más, “CDN-alternativa”). En ambos casos, se empleó ANAVA por modelo lineal general y LSD de Fisher ( $p \leq 0,1$ ). El análisis de regresión no lineal para ajustar el modelo que relaciona MS y Nc, implicó cuadrado medio del error, criterio de información de Akaike y Bayesiano. De los modelos que presentaron menor magnitud de los parámetros, se seleccionó el que mejor representó el proceso biológico que se pretende modelar. Siendo que el ajuste logrado utilizando la CDN-alternativa fue poco promisorio, se presentan sólo los resultados obtenidos para CDN.

El nivel crítico de INN a Z.33 ( $INN_{\text{crítico}}$ ) fue identificado mediante regresión no lineal de dos tramos con *plateau*. La variable de respuesta fue rendimiento relativo (RR) definido como  $RR = Y_{\text{máx}}/Y$ , donde  $Y_{\text{máx}}$  es el rendimiento máximo a nivel de tratamiento para cada experimento. Las observaciones consideradas *outliers*, no fueron incluidas en el análisis ya que presentaron un comportamiento atípico, dado por un limitado crecimiento inicial (baja acumulación de MS y alta Nt que se tradujo en muy bajo nivel de absorción de N a Z.33). El  $INN_{\text{crítico}}$  fue empleado como factor de corrección de la CDN en el rango disponible para Z.33, lo cual generó una nueva curva ( $CDN_{\text{corregida}}$ ) resultado de  $CDN * INN_{\text{crítico}}$  permitiendo estimar los requerimientos de N para maximizar la producción de grano.

#### **2.4.3. Validación del INN crítico como indicador de deficiencia de N en Z.33 y respuesta a la fertilización**

La validación del INN como predictor de respuesta al agregado de N en Z.33, se realizó en base a la evaluación del nivel de acierto del diagnóstico de condición de suficiencia/deficiencia de N, empleando 6 experimentos independientes a los utilizados para determinar la CDN, que incluyeron tres dosis de N en Z.33, (0, 50 y 100 kg ha<sup>-1</sup>). La validación se realizó evaluando el nivel de acierto/error (aciertos, error tipo I y II), en términos de proporción al total de observaciones (n=27), para la variable rendimiento relativo (RR). El

RR fue definido a nivel de tratamiento, siendo la relación entre el rendimiento obtenido con agregado de N en Z.33 y su homólogo en cuanto a manejo nitrogenado previo, pero sin agregado de N en Z.33 ( $RR = Y_{\text{con N Z.33}} / Y_{\text{sin N Z.33}}$ ).

Las condiciones de aciertos se definieron por:

- 1)  $INN < INN_{(RR=1)}$  y  $RR < 1$
- 2)  $INN > 1$  y  $RR > RR_{(plateau)}$

Las condiciones de error en el diagnóstico se dividieron en dos tipos y se definieron por:

- 1) Error tipo I.  $INN < 1$  y  $RR > 1$
- 2) Error tipo II.  $INN > INN_{(RR=1)}$  y  $RR < RR_{(plateau)}$

#### **2.4.4. Brecha de rendimiento**

La brecha de rendimiento ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) por deficiencia nitrogenada (BR) a Z.33 fue definida como la diferencia entre el rendimiento máximo ( $Y_{\text{máx}}$ ) a nivel de tratamiento obtenido en cada experimento (7 experimentos que disponían de determinaciones de MS y Nt a Z.33), y el rendimiento de cada tratamiento ( $BR = Y_{\text{máx}} - Y$ ). La brecha de rendimiento relativa (BRr), corresponde a la BR con relación a la referencia  $Y_{\text{máx}}$  ( $BRr = BR / Y_{\text{máx}}$ ).

#### **2.4.5. Brecha de rendimiento y variables de cultivo que la definen**

Para identificar y jerarquizar relaciones e interacciones entre BR y el conjunto de variables cuantificadas relacionadas al crecimiento y la nutrición del cultivo en Z.33, e identificar posibles grupos de comportamiento diferencial, se utilizó el procedimiento CART (*Classification and Regression Tree*)<sup>(27)(28)</sup>. La variable respuesta fue BR en términos absolutos ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) y como predictores, INN, Nc, rendimiento en grano del tratamiento testigo,  $Y_{\text{máx}}$ , Nt,  $MS_{\text{máx}}$  (MS máxima a nivel de tratamiento obtenido en cada experimento), MS y N absorbido a Z.33. El rendimiento en grano del tratamiento testigo fue considerado como estimador de la capacidad de aporte de N del suelo ( $N_{\text{suelo}}$ ).

#### **2.4.6. Brecha de rendimiento por nutrición nitrogenada deficitaria en Z.33**

El resultado del CART generó dos grupos de datos definidos por INN y  $N_{\text{suelo}}$ . Se cuantificó la relación entre BRr e INN a Z.33, ajustando modelos de regresión no lineal de dos tramos con *plateau* para cada grupo de manera independiente.

## 2.5. RESULTADOS

### 2.5.1. Descripción de la base de datos

La estrategia planteada logró variabilidad de MS y Nt, siendo sus coeficientes de variación (CV) 57,6% y 44,1% para MS y Nt respectivamente (Cuadro 2). El rango de MS varió desde 0,14 Mg ha<sup>-1</sup> en Z.22 a 15,03 Mg ha<sup>-1</sup> en Z.65 con media 5,48 Mg ha<sup>-1</sup> y desvío estándar (DE) 3,16 Mg ha<sup>-1</sup>, y el de Nt se ubicó entre 0,93% en Z.65 y 5,41% en Z.33 con media 2,22% y DE 0,98%.

Cuadro 2. Parámetros descriptivos de biomasa aérea y nitrógeno total en planta en Z.22, Z.30, Z.33 y Z.65.

Estadio	Variable	n	Media	DE	CV	Mín.	Máx.	Mediana	Q <sub>1</sub>	Q <sub>3</sub>
Z.22	MS (Mg ha <sup>-1</sup> )*	10	0,21	0,04	21,4	0,138	0,27	0,21	0,16	0,24
	Nt (%)&	10	4,54	0,56	12,3	3,34	5,2	4,72	4,42	4,87
Z.30	MS (Mg ha <sup>-1</sup> )	111	1,01	0,58	57,6	0,35	3,29	0,74	0,52	1,46
	Nt (%)	111	3,34	0,66	19,7	2,02	4,7	3,2	2,81	3,9
Z.33	MS (Mg ha <sup>-1</sup> )	168	2,8	1,23	43,9	0,48	5,94	3,12	1,61	3,67
	Nt (%)	168	3,08	1,01	32,9	1,2	5,41	2,77	2,36	3,96
Z.65	MS(Mg ha <sup>-1</sup> )	501	7,48	1,94	25,9	3,03	15,03	7,21	6,18	8,42
	Nt (%)	501	1,64	0,32	19,6	0,93	3,04	1,61	1,42	1,8

\* - Biomasa aérea (Mg ha<sup>-1</sup>). & - concentración de N en biomasa aérea (%). n - Número de observaciones; DE - Desvío estándar; CV - Coeficiente de variación; Mín - Valor mínimo; Máx. - Valor máximo; Q<sub>1</sub> - Cuantil 1; Q<sub>3</sub> - Cuantil 3.

### 2.5.2. Curva de dilución de N y estimación del INN crítico a Z.33

Con los muestreos comprendidos entre los estadios fenológicos Z.22 y Z.65 incluidos, de 28 experimentos se identificaron 37 niveles críticos de Nt. Los mismos, se ubicaron en el rango de 1,2 a 4,5 %, con un rango de variación de MS entre 0,21 y 11,5 Mg ha<sup>-1</sup>. El modelo que mejor representó la relación alométrica entre las variables, fue de tipo potencial, logrando explicar el 81 % de la variabilidad de Nt (p<0,0001) (Fig. 2a). Este modelo, describe la mínima

concentración de Nt necesaria para obtener la máxima producción de MS en el estadio fenológico correspondiente.

Se utilizó la CDN ( $N_c = 3,36 * MS^{-0,31}$ ) para estimar el Nc y calcular el INN en Z.33. El INN se relacionó con el RR siguiendo un modelo no lineal de dos tramos con *plateau* (Fig. 2b). La fase lineal ( $R^2 = 0,74$ ) presentó coeficiente beta de 0,65 ( $p < 0,0001$ ) y coeficiente gamma de 1,24, correspondiente al  $INN_{crítico}$  ( $p < 0,0001$ ). Por debajo de este valor existió incremento lineal en el RR en respuesta a la mejora en el INN, mientras que por encima el RR fue 0,94. Los valores de  $INN \geq 1,24$  indicaron que el cultivo se encontró en una situación de N no limitante para maximizar rendimiento en grano, mientras que los valores de  $INN < 1,24$  indicaron condiciones deficitarias de N.

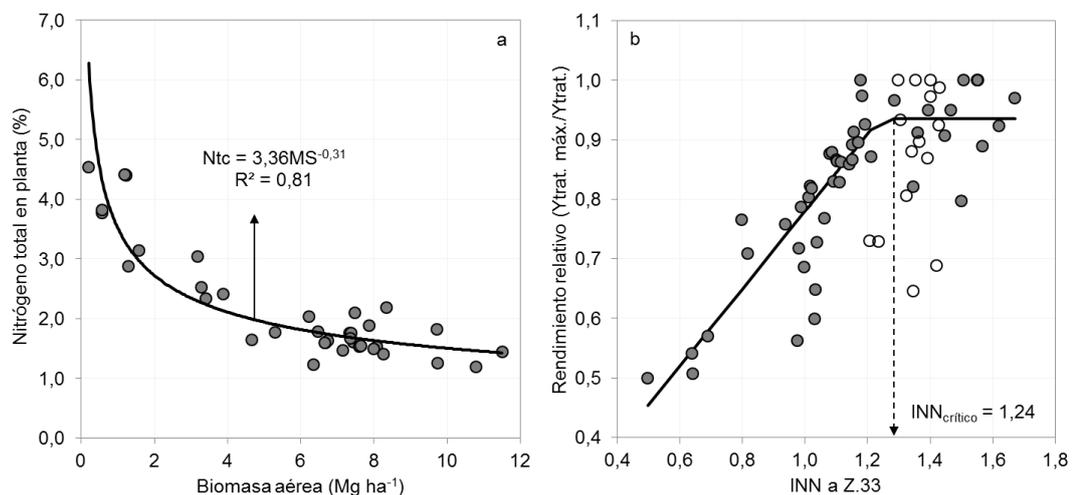


Figura 2. a) Mínima concentración de N necesaria para maximizar la producción de biomasa aérea en trigo bajo condiciones de secano. b) Relación entre INN a Z.33 y RR ( $RR = 0,13 + 0,65 * INN$   $p < 0,0001$  si  $RR < 1,24$  y  $RR = 0,94$  si  $RR \geq 1,24$ ). Círculos vacíos corresponden a *outliers*.

En una segunda validación del INN como estimador de condición nitrogenada (datos no mostrados), en base a  $CDN_{corregida}$ , se corroboró la convergencia del nivel crítico de INN a 1. Esto indica que la corrección de la CDN permite discriminar correctamente condiciones de deficiencia y suficiencia nitrogenada contemplando la maximización del rendimiento en grano.

En la Figura 3 se presenta la CDN ( $N_c = 3,36 * MS^{-0,31}$ ) ajustada siguiendo la metodología propuesta por Justes *et al.*<sup>(1)</sup> (Fig. 2a), y la  $CDN_{corregida}$  para maximizar la producción de grano ( $N_c = 4,17 * MS^{-0,31}$ ). Esta última presentó igual coeficiente de dilución de N ( $b = 0,31$ ), pero una

concentración de N para MS = 1 Mg ha<sup>-1</sup> 24% superior a CDN (a=3,36 vs a=4,17, para CDN y CDN<sub>corregida</sub> respectivamente), indicando una mayor exigencia en el requerimiento de N para maximizar rendimiento en grano en contraste a los requerimientos para maximización de producción de biomasa aérea.

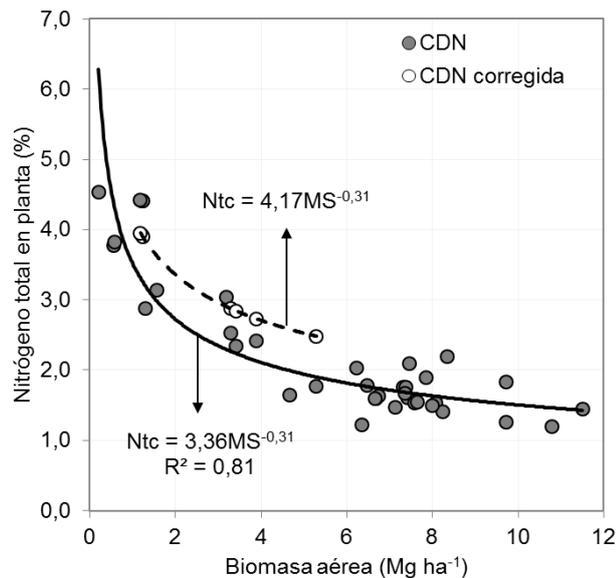


Figura 3. Curva de dilución de nitrógeno corregida para trigo bajo condiciones de sequía. Círculos llenos - mínima concentración de Nt para maximizar crecimiento del cultivo (CDN); círculos vacíos - mínima concentración de Nt para maximizar rendimiento en grano (CDN<sub>corregida</sub>).

La validación realizada con los 6 experimentos independientes mostró que la CDN<sub>corregida</sub> logró predecir de forma acertada la respuesta al agregado de N en Z.33, siendo un 2% superior a CDN. Mientras que el error tipo I, definido como situaciones identificadas como de respuesta positiva en las que no la hubo, fue igual utilizando las dos opciones (CDN y CDN<sub>corregida</sub>), el error tipo II, definido como situaciones identificadas como sin respuesta al agregado de N en Z.33, pero que sí la hubo, fue 4% inferior utilizando CDN<sub>corregida</sub> (Cuadro 3). Estos resultados demuestran para las condiciones de estudio, la validez y utilidad del INN como predictor de respuesta al agregado de N en Z.33, estimado en base a la CDN<sub>corregida</sub> (Fig. 3).

Cuadro 3. Validación de los INNs estimados con  $CDN$  y  $CDN_{\text{corregida}}$  como indicadores de deficiencia de N y respuesta a la fertilización nitrogenada en Z.33.

Método	Aciertos	Error tipo I	Error tipo II
----- % -----			
CDN	74	11	15
$CDN_{\text{corregida}}$	78	11	11

### 2.5.3. Brecha de rendimiento por deficiencia nitrogenada a Z.33

La figura 4, presenta la BR media por deficiencia nitrogenada en Z.33 siendo de 1079  $\text{kg ha}^{-1}$  (recuadro superior en la Fig. 4). Mediante algoritmo de segmentación recursiva por el procedimiento CART, se identificaron dos grupos de comportamiento diferencial, determinados por INN y  $N_{\text{suelo}}$ . Los nodos terminales (GT1, GT2, GT3, GT4, GT5 y GT6) son los resultantes de sucesivas particiones binarias. Cada partición está asociada a una variable y a un valor o umbral en la propia unidad de la variable que particiona el grupo mayor en dos subgrupos.

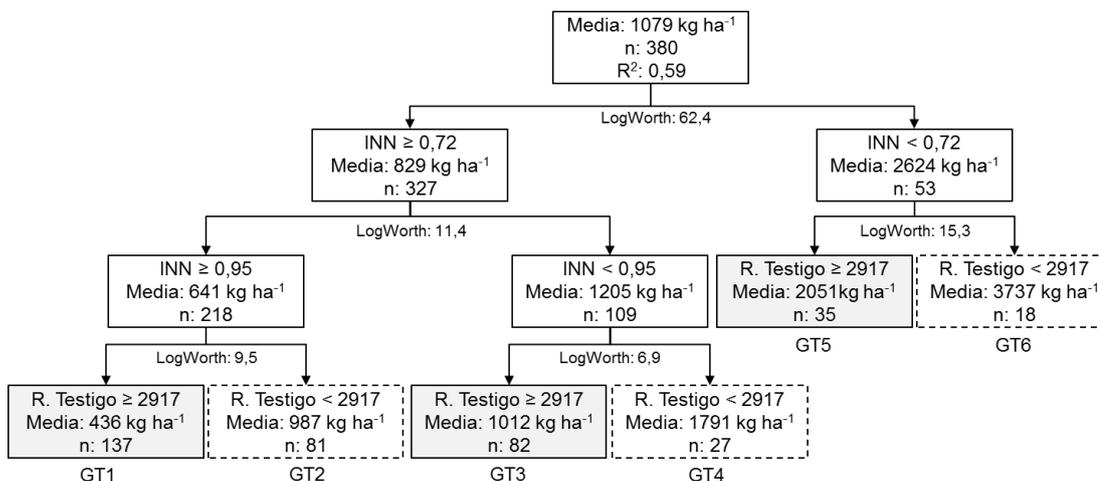


Figura 4. Árbol de clasificación y regresión que describe la relación entre brecha de rendimiento (BR) a Z.33 definida como  $(Y_{\text{máx}} - Y)$  y las variables que describen la nutrición nitrogenada del cultivo (INN) y la capacidad de suministro de N del suelo estimada por el rendimiento de trigo en el tratamiento sin fertilización nitrogenada (R. Testigo). En cada recuadro aparece la variable y el umbral que genera la partición e identificación de ese subgrupo, la significancia estadística de la partición por esta variable aparece entre los

recuadros de cada rama que se abre *LogWorth*, donde  $LogWorth = -\log_{10}(p\text{-value})$ . Cada grupo se describe con el número de datos que engloba (n). GT – grupo terminal.

Los sitios en los que el tratamiento testigo (sin agregado de N) generó rendimientos menores a  $2917 \text{ kg ha}^{-1}$  (GT2, GT4 y GT6) se clasificaron como ambientes de bajo aporte de N del suelo (Fig. 4, recuadros con línea punteada), y las que lograron rendimientos mayores o iguales a  $2917 \text{ kg ha}^{-1}$  (GT1, GT3 y GT5) se definieron como ambientes de alto aporte de N del suelo (Fig. 4, recuadros con línea continua). Estos ambientes se asocian a la capacidad de aporte de N por parte del suelo, ya que el N absorbido por el cultivo a Z.33 tiende a ser mayor a medida que el rendimiento aumenta en los testigos absolutos, a una tasa de  $20 \text{ kg N ha}^{-1}$  ( $p < 0,0001$ ,  $R^2 = 0,86$ ) por cada tonelada de incremento en el rendimiento (datos no mostrados). En los ambientes de bajo aporte, el cultivo a Z.33 absorbió en promedio  $29 \text{ kg N ha}^{-1}$  con CV de 20,5%, mientras que en los ambientes de alto aporte se absorbieron en promedio  $55 \text{ kg N ha}^{-1}$  con CV de 25,3%.

La deficiencia nitrogenada a Z.33, estimada por INN, presentó relación lineal negativa respecto a la BRr ( $p < 0,0001$ ,  $R^2 = 0,66$ ) (datos no mostrados). La función ajustada fue  $BRr = -0,80 \cdot INN + 0,88$ , si  $INN < 0,99$ , valor a partir del cual se alcanzó el *plateau* en BRr de 0,09. La discriminación de ambientes de aporte de N del suelo generada por el CART permitió mejorar el ajuste entre BRr e INN ( $R^2 = 0,85$  y  $0,74$  para ambientes en que  $N_{\text{suelo}}$  determinó  $R. Testigo \geq 2917$  ( $N_{\text{suelo}}\text{-Alto}$ ) y en que  $N_{\text{suelo}}$  determinó  $R. Testigo < 2917$  ( $N_{\text{suelo}}\text{-Bajo}$ ) respectivamente, Fig. 5). La pendiente (beta 1) de la fase lineal decreciente de los modelos ( $-0,97$  vs.  $-0,76$  para  $N_{\text{suelo}}\text{-Bajo}$  y  $N_{\text{suelo}}\text{-Alto}$  respectivamente), para una misma condición nitrogenada (INN) fue mayor en  $N_{\text{suelo}}\text{-Bajo}$  que en  $N_{\text{suelo}}\text{-Alto}$ . En ambos casos los coeficientes gamma fueron 1,04. La BRr en el *plateau* fue de 0,03 y 0,10 para  $N_{\text{suelo}}\text{-Alto}$  y  $N_{\text{suelo}}\text{-Bajo}$  respectivamente, indicando que en este último existieron otras limitantes que deprimieron el rendimiento en grano además de la deficiencia nitrogenada.

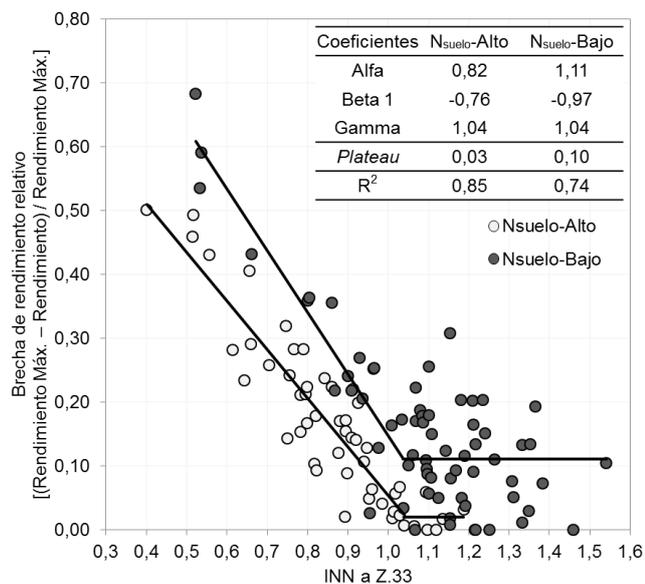


Figura 5. Brecha de rendimiento relativa provocada por deficiencias nitrogenadas a Z.33 según ambiente de aporte de N del suelo. Alfa – intercepto, Beta 1 – pendiente de la fase lineal, Gamma – valor de INN al inicio del *plateau*.

Los rendimientos máximos a nivel de tratamiento, utilizados como referencia para calcular la BRr, fueron 6471 kg ha<sup>-1</sup> y 6668 kg ha<sup>-1</sup> para N<sub>suelo-Alto</sub> y en N<sub>suelo-Bajo</sub> respectivamente. Si bien, la BR promedio fue similar en los dos ambientes (1065 kg ha<sup>-1</sup> y 1095 kg ha<sup>-1</sup> para N<sub>suelo-Alto</sub> y N<sub>suelo-Bajo</sub> respectivamente), la BR máxima fue 5247 kg ha<sup>-1</sup> en N<sub>suelo-Bajo</sub> contra 3040 kg ha<sup>-1</sup> en N<sub>suelo-Alto</sub> (42% de diferencia entre ambientes).

## 2.6. DISCUSIÓN

La CDN para trigo y otros cultivos y pasturas, así como su utilidad está ampliamente reportado en la bibliografía<sup>(29)(30)(31)(32)(33)(34)(35)(36)(37)(38)(1)(39)(40)(24)</sup> para condiciones de agua no limitante. Sin embargo, la evidencia empírica en trigo<sup>(29)</sup> y otros cultivos<sup>(41)(42)</sup> indica que los requerimientos nitrogenados en sistemas de cultivo bajo condiciones de secano, son menores debido en parte, a cambios en la asignación de biomasa<sup>(43)</sup>. En este trabajo el ajuste se hizo bajo las actuales condiciones de producción para Uruguay, en las que la oferta hídrica depende de la cantidad y distribución de las lluvias y de la capacidad de almacenar agua del suelo. Bajo estas condiciones, la producción de MS puede estar limitada por la disponibilidad hídrica. En nuestros resultados, la producción de biomasa resultó baja, principalmente en estadios fenológicos iniciales (Cuadro 2), pudiendo limitar el rendimiento alcanzable<sup>(43)</sup> y la

eficiencia de recuperación del N<sup>(44)</sup>. Para las condiciones de estudio la CDN<sub>corregida</sub> ajustada que maximizó el rendimiento ( $N_c=4,17*MS^{-0,31}$ ), además de no limitar el crecimiento del cultivo, tiene coeficientes similares únicamente a los reportados por Yue *et al.*<sup>(34)</sup> en el norte de china y por Greenwood *et al.*<sup>(39)</sup> en Bélgica y Suecia. La diferencia con los coeficientes ajustados en otros trabajos resulta de la variación esperable dentro de especies<sup>(1)</sup>, sitios experimentales, estadios fenológicos<sup>(39)</sup>, regiones, genotipos y manejo<sup>(45)(46)</sup>, lo cual justifica la necesidad del ajuste local.

Justes *et al.*<sup>(1)</sup> propone que el modelo de la CDN presenta un valor constante de Nc durante las primeras etapas de crecimiento, dado por pequeñas disminuciones de Nc frente al aumento de MS y la falta de competencia por luz entre plantas aisladas<sup>(47)</sup>. En este trabajo la CDN<sub>corregida</sub> no presenta esa meseta característica (Fig. 3, círculos vacíos), siendo que para su estimación el factor de corrección es calculado para Z.33, por lo tanto es válida únicamente para ese estadio, y presenta valores de MS mínima de 1,18 Mg ha<sup>-1</sup>, sin registrarse los valores típicos esperables en los estadios fenológicos iniciales (<1 Mg ha<sup>-1</sup>). Sin embargo, para la CDN (Fig. 3, círculos llenos), la cual fue ajustada utilizando todos los estadios fenológicos disponibles (desde Z.22 a Z.65 incluidos) y que representa la mínima concentración de Nt necesaria para no limitar la producción de MS en cada estadio, la concentración crítica constante de N para MS menores a 1 Mg ha<sup>-1</sup> se la estimo en 4,0%, siendo similar a lo reportado para trigo de primavera en condiciones de secano por Ziadi *et al.*<sup>(35)</sup> (3,9% para acumulación de MS menores a 0,98 Mg ha<sup>-1</sup>), pero menor al 4,4% estimado por Justes *et al.*<sup>(1)</sup> para trigo de invierno sin limitantes hídricas. Este resultado concuerda con Hoogmoed *et al.*<sup>(43)</sup> en cuanto a los menores requerimientos nitrogenados bajo deficiencias hídricas.

Nuestros resultados remarcan que la CDN permite cuantificar los requerimientos nitrogenados sin limitar el crecimiento<sup>(21)</sup>, pero es insuficiente para diagnosticar la necesidad de N para maximizar el rendimiento en grano. Su utilidad resulta porque permite estimar un INN con capacidad de diagnosticar condiciones de suficiencia o deficiencia de N.

La máxima producción de MS en Z.33 se logró con concentraciones de Nc inferiores a las estimadas por la CDN (Fig. 3, círculos llenos) ( $INN_{crítico}=0,84$ , datos no mostrados), lo cual demuestra la capacidad del trigo de absorber más N de lo necesario para el óptimo crecimiento ya reportado por Justes *et al.*<sup>(1)</sup>, Debaeke *et al.*<sup>(48)</sup> y Ziadi *et al.*<sup>(35)</sup>. El Nc que no

limitó el rendimiento ( $RR=0,90$ ), fue superior al definido para MS, sugiriendo la necesidad de mayor absorción de N para concretar rendimiento que para la máxima producción de MS en el estadio correspondiente. Por tanto, bajo condiciones de secano (deficiencias hídricas), la CDN estimada mediante el método propuesto por Justes *et al.*<sup>(1)</sup> subestimaría los requerimientos de N para concretar rendimiento. Utilizando el  $INN_{critico}$  como factor de corrección de la función de CDN, se logró mejorar la capacidad de diagnosticar deficiencias de N en Z.33 que generan pérdidas de rendimiento en grano y por tanto, definir escenarios de respuesta esperada al agregado de N en ese estadio.

La BR por deficiencia nitrogenada en Z.33 varió entre 436 y 3737 kg ha<sup>-1</sup>, dependiendo del INN y  $N_{suelo}$  (Fig. 4). La dependencia del INN resulta directamente del déficit de N en un estadio determinado. En tanto  $N_{suelo}$  estaría estimando la capacidad de suministrar sincronizadamente N desde el suelo durante estadios fenológico siguientes o la existencia de limitantes adicionales al suministro de N. La primera opción implica que la mayor BRr (a igual INN) en condiciones de  $N_{suelo}$ -Bajo respecto de  $N_{suelo}$ -Alto (Fig. 5), resultaría en que la deficiencia de N posterior a Z.33 se agudizó, lo cual requeriría correcciones por fertilización diferencial. El concepto es similar a los grupos de “*alta y baja respuesta esperada a la fertilización nitrogenada*” establecido por Hoffman *et al.*<sup>(2)</sup> para el modelo de uso actual, definidos por calidad del suelo, tipo de rastrojo antecesor, tiempo de barbecho y sistema de labranza. El  $Y_{máx}$  obtenido en ambos ambientes fue similar (6,5 contra 6,7 Mg ha<sup>-1</sup>), lo que indicaría que el N fue la limitante principal. En tanto, la existencia de una  $BRr=0,1$  aun en  $INN > INN_{critico}$  para condiciones de  $N_{suelo}$ -Bajo sugiere la existencia de limitantes adicionales, ya sea de N no satisfechas con una acumulación de N por encima de la CDN a Z.33, o relacionadas a otras propiedades del suelo no directamente relacionadas al suministro de N. Este concepto sería equivalente al manejo por Ernst *et al.*<sup>(49)(50)</sup>, quienes lo atribuyen a deterioro de propiedades físicas del suelo que modifican la eficiencia de uso del N. En ambos escenarios, la gestión diferencial de la fertilización permitiría reducir la BR<sup>(51)</sup>. Es posible que otros nutrientes no sean limitantes a niveles de rendimiento reducidos cuando el cultivo es deficiente en N, pero se vuelven limitantes a niveles de rendimiento más altos, posibles gracias a una mejor nutrición nitrogenada de la planta<sup>(52)</sup>.

Los resultados indican la necesidad de identificar bajo qué ambiente de aporte de N del suelo se realizará el cultivo, con el fin de evitar el exceso en la absorción de N que conduce a

INN>1,04 (Fig. 5) ya que es económicamente indeseable y ambientalmente riesgoso<sup>(12)</sup>, principalmente en ambientes de  $N_{\text{suelo}}$ -Bajo. En sistemas con agricultura continua, mejorar la eficiencia de recuperación de nitrógeno es fundamental, ya que el fertilizante con N es la mayor fuente de ingreso y pérdida de N en los sistemas de cultivo de cereales. Por lo tanto, las prácticas de manejo de cultivos que aumentan la eficiencia de recuperación de N, tienen un impacto sustancial en la cantidad de carga reactiva de N que se escapa de los sistemas de producción de cereales<sup>(44)</sup>.

## 2.7. CONCLUSIONES

Continuar empleando el actual manejo nitrogenado en el sistema productivo dominante, sin considerar la relación demanda vs. oferta de N posterior a Z.30, llevaría al estancamiento o depresión de la producción de trigo y probablemente un mayor impacto en la disminución de la concentración de proteína en grano. La  $CDN_{\text{corregida}}$ , permite el diagnóstico de estado nitrogenado e identifica condiciones de respuesta a N en Z.33. La misma combinada con el INN, permite sincronizar demanda y oferta de N con el fin de reducir la BR por deficiencia del nutriente en Z.33.

La evidencia de la desnutrición nitrogenada a Z.33 y su relación con la BR por N en el mismo estadio, genera la necesidad de adicionar un cuarto momento de diagnóstico al modelo actual de manejo de N en cereales de invierno en Uruguay.

## 2.8. AGRADECIMIENTOS

La investigación que da origen a los resultados en la presente publicación es parte de la Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias del primer autor, quien recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación bajo el código POS\_NAC\_2015\_1\_109778.

Al grupo de Ecofisiología y manejo de cultivos del Depto. de Prod. Veg. de Facultad de Agronomía – UdelaR – EEMAC, responsable de la línea de investigación “Manejo de la nutrición nitrogenada en cereales de invierno en Uruguay”, y a los responsables del proyecto innovagro (FSA\_1\_2013\_1\_12953) titulado “Mejora del sistema actual de diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización nitrogenada en cereales de invierno en Uruguay, mediante estudios de modelación y sensoramiento remoto”, por brindar parte de los datos utilizados en este trabajo.

## 2.9. REFERENCIAS

1. Justes E, Mary B, Meynard J, Machet J, Thelier-Huches L. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany*. 1994;74:397-407.
2. Hoffman E, Perdomo C, Ernst O, Bordolli M, Pastorni M, Pons C, Borghi E. Propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada para cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. IPNI. 2010;46:13-18.
3. Wingeyer AB, Amado T, Pérez-Bidegain M, Studdert GA, Perdomo Varela CH, Garcia FO, Karlen DL. Soil quality impacts of current South American. *Sustainability*. 2015;7:2213-2242.
4. Franzluebbbers AJ, Sawchik J, Taboada MA. Agronomic and environmental impacts of pasture and crop rotations in temperate North and South America. *Agric. Ecosyst. Environ*. 2014;190:18–26.
5. Hoffman E, Fassana N, Mazzilli S, Berger A, Ernst, O. La productividad parcial de los nutrientes. La necesidad de incrementar la eficiencia de uso del nitrógeno. In: Ribeiro A, Barbazan M, editors. IV Simposio Nacional de Agricultura. VII Encuentro de la SUCS. I Encuentro Regional de Políticas de Conservación de Suelos. Buscando del camino para intensificación sostenible para la agricultura. Montevideo: Hemisferio Sur; 2015. p. 131-140.
6. Hoffman E, Fassana N, Perdomo C. Manejo de nitrógeno en cereales de invierno. ¿Agregando más nos estamos quedando cortos?. In: Ribeiro A, Silva H, editors. III Simposio Nacional de Agricultura. No se llega si no se sabe a dónde ir. Pensar en las causas y no solo medir las consecuencias. Montevideo: Hemisferio Sur; 2013. p. 51-62.
7. Morón A, Quincke A. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. Jornada Técnica: El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos. Serie Actividades de Difusión No. 605. Mercedes: INIA; 2010. p. 5-9.
8. Videla C, Pazos A, Trivelin PC, Echeverría HE, Studdert GA. Gross nitrogen mineralization under conventional tillage, no tillage and pasture. *Ciencia del Suelo*. 2005;23:133-144.

9. Heenan DP, Chan KY, Knight PG. Long-term impact of rotation, tillage and stubble management on the loss of soil organic carbon and nitrogen from a Chromic Luvisol. *Soil Tillage Res.* 2004;76:59-68.
10. Berger A, Gaso D, Calistro R, Morales M. Limitantes ambientales y potencial de rendimiento de trigo en Uruguay. In: Germán S, Quincke M, Vázquez D, Castro M, Pereyra S, Silva P, García A, editors. Seminario internacional «1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela». Serie técnica No. 241. Colonia: INIA La Estanzuela; 2018. p. 112-123.
11. Hoffman E, Locatelli A, Fassana N, Viega L, Castro A. Evaluación de la evolución de la oferta varietal de trigo en Uruguay en el siglo XXI. In: Germán S, Quincke M, Vázquez D, Castro M, Pereyra S, Silva P, García A, editors. Seminario internacional «1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela». Serie técnica No. 241. Colonia: INIA La Estanzuela; 2018. p. 99-111.
12. Sadras VO, Hayman PT, Rodriguez D, Monjardino M, Bielich M, Unkovich M, Mudge B, Wang E. Interactions between water and nitrogen in Australian cropping systems: physiological agronomic, economic, breeding and modelling perspectives. *Crop Past. Sci.* 2016;67:1019-1053.
13. Sadras VO, Lawson C. Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Eur. J. Agron.* 2013; 46:34-41.
14. Dall' Orso JI, Fernández EA, Uría PA. Dinámica de aporte de n y s de distintas fuentes de fertilizantes disponibles actualmente en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo – Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 2016. 76p.
15. Angus JF. Nitrogen supply and demand in Australian agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture.* 2001;41:277-288.
16. Fischer RA. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science (Cambridge).* 1985;105:447-461.
17. Cassman KG, Dobermann AR, Walters DT, Yang H. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources.* 2003;28:315-358.
18. Grindlay DJC. Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area. *J. Agric. Sci.* 1997;128:377-396.

19. Martínez JM, Galantini JA, Landriscini MR. Eficiencia en el uso del nitrógeno del trigo en la región semiárida de Buenos Aires (Argentina): efectos de la dosis y momento de aplicación. *Agriscientia*. 2015;32:15-27.
20. Sticksel E, Maidl FX, Retzer F, Fischbeck G. Nitrogen uptake and utilization in winter wheat under different fertilization regimes with particular reference to main stems and tillers. *J. Agron. Crop Sci.* 1999;183:47-52.
21. Greenwood D. Modeling N response of field vegetable crops grown under diverse conditions with N<sub>able</sub>: A review. *Journal of Plant Nutrition*. 2001;24:1799-1815.
22. Karlen DL, Whitney DA. Dry matter accumulation, mineral concentration, and nutrient distribution in winter wheat. *Agron. J.* 1980;72:281-288.
23. Van Keulen H, Seligman NG. Nitrogen balance in the crop. In: *Simulation of water use, nitrogen nutrition and growth of a spring wheat crop*. Pudoc Wageningen. 1987. pp. 66-76.
24. Lemaire G, Salette J. Relationship between growth and nitrogen uptake in a pure grass stand. I. Environmental effects. (In French). *Agronomie*. 1984;4:423-430.
25. Gastal F, Lemaire G. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*. 2002;53:789-799.
26. Lemaire G, Jeuffroy M, Gastal F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. *Theory and practices for crop N management*. *European Journal of Agronomy*. 2008;28:614-624.
27. De'ath G, Fabricius KE. Classification and regression trees: a powerful yet simple technique for ecological data analysis. *Ecology* 2000;81:3178-3192.
28. Breiman L, Friedman JH, Olshen RA, Stone CJ. *Classification and Regression Trees*. Chapman and Hall (Wadsworth, Inc.), New York, NY, USA. 1984;254 pp.
29. Hoogmoed M, Sadras, VO. Water stress scatters nitrogen dilution curves in wheat. *Front. Plant Sci.* 2018;9:406.
30. Zhao B, Ata-UI-Karim ST, Yao X, Tian Y, Cao W, Zhu Y, Liu X. A new curve of critical nitrogen concentration based on spike dry matter for winter wheat in eastern china. *PLoS ONE*. 2016;11:1-17.

31. Ferreira G, Ernst O. Diagnóstico del estado nutricional del cultivo de colza (*Brassica napus*) en base a curvas de dilución de nitrógeno y azufre. *Agrociencia Uruguay*. 2014;18:75-85.
32. Yao X, Zhao B, Tian YC, Liu XJ, Ni J, Cao WX, Zhu Y. Using leaf dry matter to quantify the critical nitrogen dilution curve for winter wheat cultivated in eastern China. *Field Crops Research*. 2014;159:33-42.
33. Reussi N, Echeverría, HE, Sainz Rozas H. Stability of foliar nitrogen:sulfur ratio in spring red wheat and sulfur dilution curve. *Journal of Plant Nutrition*. 2012;35:990-1003.
34. Yue SC, Meng QF, Zhao RF, Li F, Chen XP, Zhang FS, Cui ZL. Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the North China Plain. *Agron. J*. 2012;104:523-529.
35. Ziadi N, Bélanger G, Claessens A, Lefebvre L, Cambouris AN, Tremblay N, Nolin MC, Parent LE. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat. *Agronomy Journal*. 2010;102:241-250.
36. Lu ZG, Dai TB, Jiang D, Jing Q, Qin XD, Cao WX. Effects of different nitrogen rates and dressing ratios on grain yield and quality in weak-gluten wheat. *Journal Triticeae Crops*. 2006;26:75-80. (in Chinese with English abstract).
37. Colnenne C, Meynard J, Reau R, Justes E, Merrien A. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of botany*. 1998;81:311-317.
38. Gastal F, Lemaire G. Nutrition azotée et croissance des peuplements végétaux cultivés. In: Morot-Gaudry JF, editor. *Assimilation de l'azote chez les plantes: aspects physiologiques, biochimiques et moléculaires*. Francia: INRA; 1997. p. 355–367.
39. Greenwood D, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson J. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botan*. 1990;66:425-436.
40. Lemaire G, Denoix A. Croissance estivale en matière sèche de peuplements de fétuque élevée (*Festuca arundinacea* Schreb.) et de dactyle (*Dactylis glomerata* L.) dans l'Ouest de la France. II. Interaction entre les niveaux d'alimentation hydrique et de nutrition azotée. *Agronomie*, EDP Sciences. 1987;7:381-389.

41. Errecart PM, Agnusdei MG, Lattanzi FA, Marino MA, Berone GD. Critical nitrogen concentration declines with soil water availability in tall fescue. *Crop Sci.* 2014;54:318-330.
42. Bélanger G, Walsh JR, Richards JE, Milburn PH, Ziadi N. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in eastern Canada. *American Journal of Potato Research.* 2001;78:355-364.
43. Hoogmoed M, Neuhaus A, Noack S, Sadras VO. Benchmarking wheat yield against crop nitrogen status. *Field Crops Research.* 2018;222:153-163.
44. Cassman KG, Dobermann AR, Walters DT. Agroecosystems, Nitrogen-use Efficiency, and Nitrogen Management, *Ambio.* 2002;31:132-140.
45. Hoogmoed M, Sadras VO. The importance of water-soluble carbohydrates in the theoretical framework for nitrogen dilution in shoot biomass of wheat. *Field Crops Res.* 2016;193:196-200.
46. Xue XP, Wang JG, Guo WQ, Chen BL, Wang YH, Zhang LJ. Accumulation characters of biomass and nitrogen and critical nitrogen concentration dilution model of cotton fruit branch leaf after flowering. *Acta Agronomica Sinica.* 2007;33:669-676.
47. Lemaire G, Gastal F. N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire G, editor. *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops.* Berlin: Springer-Verlag; 1997. p. 3–43.
48. Debaeke P, Rouet P, Justes E. Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: Application to durum wheat. *Journal Plant Nutrition.* 2006;29:75-92.
49. Ernst OR, Dogliotti S, Cadenazzi M, Kemanian AR. Shifting crop-pasture rotations to no-till annual cropping reduces soil quality and wheat yield. *Field Crops Research.* 2018;217:180-187.
50. Ernst OR, Kemanian AR, Mazzilli SR, Cadenazzi M, Dogliotti S. Depressed attainable wheat yields under continuous annual no-till agriculture suggest declining soil productivity. *Field Crops Research.* 2016;186:107-116.
51. Mueller ND, Gerber JS, Johnston M, Ray DK, Ramankutty N, Foley JA. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature.* 2012;490:254-257.
52. Cassman KG. Ecological intensification of cereal production systems: Yield potential, soil quality, and precision agriculture. *Proc. Natl Acad. Sci. USA.* 1999;96:5952-5959.

### **3. RESPUESTA AL NITRÓGENO EN TRES NUDOS EN TRIGO Y CAPACIDAD DEL NDVI PARA ESTIMAR INN**

#### **3.1. RESUMEN**

Fraccionar el agregado de nitrógeno (N), mejora la sincronía entre oferta y demanda, y ayuda a reducir la brecha de rendimiento. Objetivos: i) cuantificar la respuesta al N en Z.33; ii) evaluar el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) como estimador de INN (índice de nutrición nitrogenada); iii) cuantificar la respuesta al N agregado en Z.33 en referencia al rendimiento con el modelo actual. Mediante experimentos en fajas, captando variaciones espaciales en el aporte de N del suelo, se contrastó: testigo absoluto (Ta), testigo tecnológico (Tt), y Tt más 50 unidades de N en Z.33 (Tt+50). NDVI en Z.33, rendimiento y sus componentes fueron muestreados en grilla. Se determinaron ambientes de aporte de N del suelo ( $N_{\text{suelo-Alto}}$ ,  $N_{\text{suelo-Bajo}}$ ). El Ta rindió entre 1680 y 3523 kg ha<sup>-1</sup>. La respuesta del Tt fue 1974 y 2011 kg ha<sup>-1</sup>, y la del Tt+50 fue 2436 y 2214 kg ha<sup>-1</sup> en  $N_{\text{suelo-Alto}}$  y  $N_{\text{suelo-Bajo}}$  respectivamente. El Tt+50 superó al Tt en 462 y 203 kg ha<sup>-1</sup> en  $N_{\text{suelo-Alto}}$  y  $N_{\text{suelo-Bajo}}$  respectivamente. La respuesta al agregado de N a Z.33, fue complementaria al modelo de manejo nitrogenado, principalmente en  $N_{\text{suelo-Alto}}$ . En rendimientos alcanzables ( $R_a$ ) <4,5 Mg ha<sup>-1</sup> la respuesta a N en Z.33 fue igual o menor que en Tt y en  $R_a$  >4,5 Mg ha<sup>-1</sup> fue mayor. No se identificó relación precisa entre NDVI-INN, pero sí una tendencia general. Para un mismo rango de  $R_a$ , la respuesta estuvo asociada a rangos de NDVI, definiendo tendencias en la respuesta al agregado de N en Z.33.

**Palabras claves:** aplicación fraccionada, sensor activo, índice espectral, nitrógeno tardío.

#### **Response to nitrogen at third node in wheat and NDVI capacity to estimate**

#### **3.2. SUMMARY**

Fractioning the nitrogen aggregate (N), improves the synchrony between supply and demand, and helping to reduce the yield gap. Objectives: i) quantify the response to N in Z.33; ii) evaluate the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) as an estimator of NNI (Nitrogen Nutrition Index); iii) quantify the response to the aggregate N in Z.33 in reference to the performance with the current model. By means of experiments in strips, capturing spatial variations in the contribution of N of the soil, we contrasted: control treatment (Ta),

technological treatment (Tt), and Tt plus 50 units of N in Z.33 (Tt+50). NDVI in Z.33, yield and its components were sampled in grid. N soil contribution environments were determined ( $N_{\text{soil-High}}$ ,  $N_{\text{soil-Low}}$ ). The Ta yielded between 1680 and 3523 kg ha<sup>-1</sup>. The Tt response was 1974 and 2011 kg ha<sup>-1</sup>, and that of Tt+50 was 2436 and 2214 kg ha<sup>-1</sup> in  $N_{\text{soil-High}}$  and  $N_{\text{soil-Low}}$ , respectively. The Tt+50 exceeded the Tt in 462 and 203 kg ha<sup>-1</sup> in  $N_{\text{soil-High}}$  and  $N_{\text{soil-Low}}$  respectively. The response to the addition of N to Z.33 was complementary to the nitrogen management model, mainly in  $N_{\text{soil-High}}$ . In attainable yields (Ra) <4.5 Mg ha<sup>-1</sup> the response to N in Z.33 was equal to or less than in Tt and in Ra >4.5 Mg ha<sup>-1</sup> was greater. No precise relationship was identified between NDVI-NNI, but a general trend was found. For the same range of Ra, the answer was associated to ranges of NDVI, defining trends in the response to the aggregate of N in Z.33.

**Keywords:** fractional application, active sensor, spectral index, late nitrogen.

### 3.3. INTRODUCCIÓN

El aumento de la productividad en trigo definido en gran proporción por los avances genéticos en la especie<sup>(1)</sup>, origina cultivos cada vez más demandantes<sup>(2)(3)</sup> de nitrógeno (N). El diagnóstico del estado nutricional del cultivo, en particular de N, tiene como clave la adecuada interpretación de la información emergente por la aparición continua de nuevas metodologías de diagnóstico fruto del avance tecnológico, así como la identificación de potencialidades y limitantes de las herramientas disponibles<sup>(4)</sup>. Los índices de vegetación (IV) han sido propuestos como una forma indirecta de medir variables biofísicas de la vegetación con base en datos espectrales<sup>(5)</sup>, empleando técnicas de sensoramiento remoto para analizar el estado de la vegetación<sup>(6)</sup>. El NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) propuesto por Rouse *et al.*<sup>(7)</sup>, ha sido ampliamente utilizado como parámetro relacionado al estado nitrogenado<sup>(8)</sup>, contenido de clorofila, biomasa verde y rendimiento en pasturas y cultivos<sup>(9)</sup> y para identificar la variabilidad espacial del estado nutricional y la respuesta a la fertilización nitrogenada<sup>(10)(11)(12)</sup>. Sin embargo, este índice tiene como limitante la baja respuesta (saturación) cuando la cobertura vegetal o biomasa es elevada (en general, IAF>3, lo que se corresponde con cobertura del suelo >80%<sup>(13)</sup>), cuando la concentración de N en planta es elevada o en combinación de ambas, perdiendo la sensibilidad para detectar diferencias en estas condiciones<sup>(14)(15)(16)(17)(7)</sup>. En las condiciones de Uruguay, estos valores de cobertura en

trigo ocurren de Z.32-Z.33 en adelante<sup>(18)</sup>, siendo este probablemente el estadio más tardío y el límite de utilidad práctica del NDVI, posterior al cual el NDVI varía poco en magnitud, y otros índices que sí continúan variando pasan a ser más recomendables<sup>(13)</sup>.

Existen modelos de recomendación de dosis de fertilización nitrogenada en pos-emergencia que utilizan NDVI y otros IV para estimar el estado nutricional de los cultivos, por detección remota aplicada en tiempo real. Entre ellos se destacan el algoritmo de Raun *et al.*<sup>(8)</sup> para trigo (utilizado en Feeks 6 o Z.30) que ha sido evaluado en Argentina<sup>(19)</sup>, algoritmo de Holland y Schepers<sup>(20)</sup> para maíz, CCCI (*Canopy Chlorophyll Content Index*) propuesto por Fitzgerald *et al.*<sup>(21)</sup> para trigo (en Z.30), algoritmo de estimación del INN (Índice de Nutrición Nitrogenada<sup>(22)</sup>) propuesto por Mistele y Schmidhalter<sup>(23)</sup> para trigo. Estos modelos pueden ser empleados bajo distintos manejos agronómicos<sup>(24)</sup>, pero no han sido evaluados como complemento a modelos de desarrollo local. En Uruguay la recomendación actual de dosis de N en cereales de invierno se basa en un modelo que involucra tres momentos de diagnóstico de condición nitrogenada (siembra, Z.22 y Z.30)<sup>(25)</sup>. Recientemente con el fin de mejorar y actualizar este modelo, se determinó la curva de dilución de N representada por  $N_c = 4,17 \cdot MS^{-0,31}$  con un 78% de acierto en la probabilidad de respuesta a N en Z.33 (escala Zadoks *et al.*<sup>(26)</sup>) en condiciones de secano (Capítulo 2). En el mismo trabajo se reportó que la brecha de rendimiento generada por desnutrición nitrogenada en Z.33, depende de la capacidad de aporte de N del suelo. Esto demuestra que existen condiciones productivas en las que aun corrigiendo la deficiencia de N en Z.30 (último momento propuesto bajo el actual modelo de recomendaciones), existen deficiencias nutricionales posteriores que generan pérdidas de rendimiento (promedio de brecha de rendimiento relativa: 0,16). Estas pueden ser detectadas utilizando el INN cuando el cultivo se encuentra en Z.33.

Chen<sup>(27)</sup> presenta una revisión de trabajos relacionados a la estimación del contenido de N y producción de biomasa aérea (MS) de cultivos mediante índices obtenidos con sensoramiento remoto, entre ellos NDVI. Sin embargo, son escasos los trabajos<sup>(27)(28)(21)(23)(12)(29)</sup> que consideran el efecto dilución de N<sup>(30)</sup>, para realizar diagnósticos de condición nitrogenada en base a un nivel de referencia. Estos antecedentes llevan a considerar el NDVI (índice relacionado al contenido de N y MS) como posible estimador del INN (índice que contempla el efecto dilución de N), y por tanto, sustituir el muestreo físico de los componentes del INN (MS y concentración de N). Esta estimación podría utilizarse para

diagnosticar la condición media a nivel de chacra, contemplar la variabilidad intra-chacra, lo cual permitiría corregir deficiencias a nivel de zonas en base a un diagnóstico diferencial<sup>(31)(32)(33)(34)(35)</sup> o bien ajustar un algoritmo para manejo sitio-específico para corregir deficiencias nitrogenadas en tiempo real<sup>(28)(29)(36)(37)</sup>.

Planteamos como hipótesis que existe respuesta al agregado de N en Z.33 y que el NDVI es capaz de estimar el INN, permitiendo diagnosticar el estado nitrogenado de trigo en tiempo real en Z.33, y por tanto, condiciones de respuesta al agregado de N en el mismo estadio.

El objetivo general fue, generar una herramienta que facilite el método de diagnóstico del estado nitrogenado de trigo, e identifique condiciones de respuesta al agregado de N a inicio del período crítico (PC) de definición de rendimiento. Para esto, fue necesario i) cuantificar la existencia de respuesta al N en Z.33; ii) evaluar la capacidad del NDVI como estimador de INN; iii) cuantificar la respuesta en rendimiento a N agregado en Z.33 en referencia al rendimiento obtenido siguiendo el modelo actual de recomendación.

### 3.4. MATERIALES Y MÉTODOS

El diagrama de la figura 1, presenta el esquema de trabajo seguido.

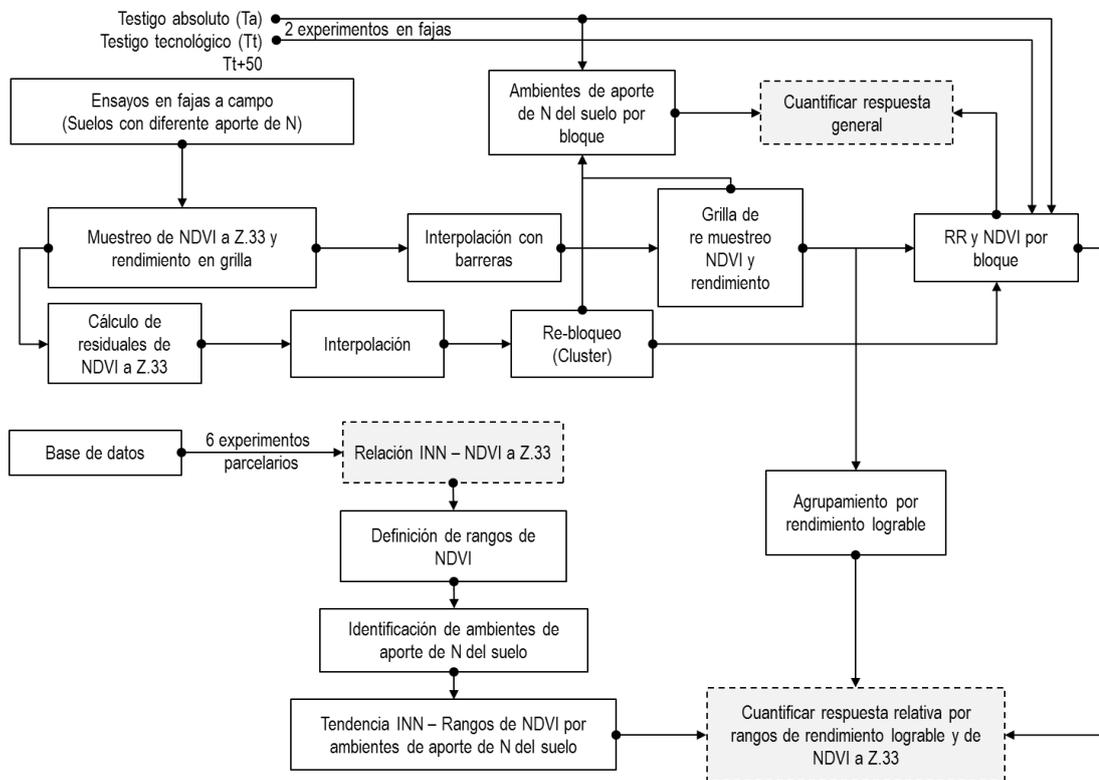


Figura 1. Modelo simplificado de etapas y procesos en la investigación. Recuadros punteados y grises remarcan los objetivos. RR - Rendimiento relativo. INN - Índice de nutrición nitrogenada. NDVI - Normalized Difference Vegetation Index.

La respuesta al agregado de N en Z.33 se cuantificó en dos experimentos en faja realizados en chacras comerciales de trigo (sitio 1: 32°57'43.16"S - 57°40'20.26"O; sitio 2: 32°22'34.19"S - 58° 4'1.42"O), durante 2015 y 2016, sin limitantes de fósforo ni potasio. Para un promedio de 6 muestras de los primeros 10 cm de suelo, el potencial de mineralización de N<sup>(38)</sup> fue 11±2 mg N-NH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> y 30±8 mg N-NH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup>, y el carbono orgánico 1,57±0,5% y 1,97±0,1%, en el sitio 1 y 2 respectivamente. Se evaluaron tres tratamientos: i) testigo absoluto (Ta) sin agregado de N; ii) testigo tecnológico (Tt), en el cual el agregado de N se realizó en base al modelo de diagnóstico y recomendación de N empleado en la actualidad; iii) tratamiento homólogo al anterior más el agregado de 50 unidades de N en Z.33 (Tt+50). Los tratamientos se ubicaron en franjas al azar con 2 repeticiones, cruzando variaciones esperadas en la capacidad de aporte de N por parte del suelo. Se utilizó Urea azufrada (0-40-

0+6S) a siembra y Z.22 y *Solmix* (0-37-0+7S) a Z.30 y Z.33. En cada faja se realizaron muestreos de NDVI en Z.33 utilizando sensor activo *CropCircle™* en dos transectas longitudinales a la faja, distanciadas 5 metros entre sí y con lecturas cada 10 metros entre observaciones de la misma transecta. Además, se realizaron muestreos de rendimiento en grano cada 20 metros en una transecta al centro de cada faja, mediante cosecha manual de seis metros lineales en dos surcos de siembra, en los cuales se cuantificó el número de espigas, granos por espiga, peso de granos y número de granos. En ambos casos se registró la ubicación espacial con GPS.

### **3.4.1. Análisis de datos**

Las variables NDVI y rendimiento en grano presentaron un desfase geográfico en el muestreo. Por lo tanto para ambas variables, se realizó un re-muestreo en grilla a través de interpolación con barreras empleando el método *kriging* ordinario, empleando el software ArcGis 10.0. La distancia de re-muestreo (ancho de celda de la grilla) se estableció en la mitad del rango del semivariograma de la variable con mayor distancia de muestreo en cada zafra. Esto permitió disponer de observaciones de las variables con exactitud para un mismo punto geográfico.

La variabilidad espacial de las propiedades físico-químicas del suelo, se contempló mediante el re-bloqueo de cada experimento. Para esto se realizó análisis de la varianza mediante modelo lineal general para la variable NDVI a Z.33. La fuente de variación fue la aplicación de N. Con los residuales de NDVI obtenidos, se realizó un análisis de conglomerados sin restricción espacial, obteniendo 4 grupos (bloques). A cada bloque se le determinó la pertenencia al tipo de ambiente de aporte de N del suelo, en base al rendimiento medio de  $T_a$  en el bloque (Alto aporte o Bajo aporte,  $N_{\text{suelo-Alto}}$  y  $N_{\text{suelo-Bajo}}$  respectivamente), según lo definido en el capítulo 2. En cada ambiente de aporte de N del suelo, se cuantificó la respuesta al agregado de N en Z.33, como el rendimiento relativo a la media de  $T_a$  para cada bloque ( $RR = T_{a_{\text{medio}}} / T_t + 50$ ), y su comparación con el RR de  $T_t$  ( $RR = T_{a_{\text{medio}}} / T_t$ ).

Para evaluar la relación entre NDVI-INN medidos a Z.33, se dispuso de una base de datos (363 observaciones) integrada por seis experimentos entre 2014 y 2016 (dos por zafra), donde la fuente de variación fue la dosis de N (0 a 200 kg ha<sup>-1</sup>) en arreglo fraccionado entre

siembra, Z.22 y Z.30 logrando variabilidad en MS, concentración de N total en planta (Nt) y por tanto en NDVI a Z.33. El cálculo de INN fue mediante la curva de dilución de nitrógeno corregida reportada en el capítulo 2 ( $CDN_{\text{corregida}}$ ). Al no obtener un modelo que representara la relación NDVI-INN con adecuada precisión, se establecieron rangos arbitrarios de NDVI desde 0,45 (mínimo observado) cada 0,05 hasta 0,90 (máximo observado). Los rangos se utilizaron para evaluar mediante gráfico de cajas, la tendencia de INN para los dos ambientes de aporte de N del suelo ( $N_{\text{suelo-Alto}}$ : 243 observaciones;  $N_{\text{suelo-Bajo}}$ : 120 observaciones). Este procedimiento fue desarrollado para cuantificar la probabilidad de ocurrencia de valores de INN en base a rangos de NDVI en Z.33. Por último, para evaluar la relación entre rangos de NDVI y respuesta al agregado de N en Z.33 como complemento al modelo actual de manejo de N, se utilizaron observaciones de los experimentos en fajas identificando rangos arbitrarios de rendimiento alcanzable (cada  $500 \text{ kg ha}^{-1}$ ) y rendimiento de Tt+50 relativo al Tt. Las diferencias encontradas fueron evaluadas mediante ANAVA con modelo lineal general y prueba de comparación de medias (Tukey al 5%), para componentes del rendimiento expresados en términos relativos a los obtenidos en igual bloque en el Tt.

Las pruebas estadísticas en el análisis de datos se realizaron mediante el paquete estadístico Infostat/L 2016.

### **3.5. RESULTADOS**

#### **3.5.1. Respuesta al agregado de nitrógeno en Z.33**

La media de rendimiento de grano de trigo (1512 observaciones) fue  $4027 \text{ kg ha}^{-1}$  y desvío estándar (DE)  $1180 \text{ kg ha}^{-1}$ . El Ta logró rendimientos comprendidos en el rango  $1680 \text{ kg ha}^{-1}$  a  $3523 \text{ kg ha}^{-1}$  con media  $2644 \text{ kg ha}^{-1}$  y coeficiente de variación (CV) 18% en 516 observaciones. Esto permitió estudiar la respuesta a nivel de  $N_{\text{suelo-Alto}}$  (356 observaciones) y  $N_{\text{suelo-Bajo}}$  (160 observaciones) propuesto en el capítulo 2. El rango de rendimientos del Tt fue entre  $3027 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $5679 \text{ kg ha}^{-1}$  con media  $4619 \text{ kg ha}^{-1}$  y CV 13% en 489 observaciones, mientras que el rendimiento del Tt+50 varió entre  $2346 \text{ kg ha}^{-1}$  y  $6196 \text{ kg ha}^{-1}$  con media  $4864 \text{ kg ha}^{-1}$  y CV 16% en 507 observaciones.

Para rendimientos medios del Ta de  $3205 \text{ kg ha}^{-1}$  en  $N_{\text{suelo-Alto}}$  y  $2466 \text{ kg ha}^{-1}$  en  $N_{\text{suelo-Bajo}}$ , la respuesta en rendimiento media del Tt fue de  $1974 \text{ kg ha}^{-1}$  (RR=0,62, Fig. 2a) con CV

15% y 2011 kg ha<sup>-1</sup> (RR=0,55, Fig. 2a) con CV 24% para N<sub>suelo</sub>-Alto y N<sub>suelo</sub>-Bajo respectivamente, mientras que en Tt+50 la respuesta media fue de 2436 kg ha<sup>-1</sup> (RR=0,57, Fig. 2a) con CV 17% y 2214 kg ha<sup>-1</sup> (RR=0,53, Fig. 2a) con CV 24% para N<sub>suelo</sub>-Alto y N<sub>suelo</sub>-Bajo respectivamente. Lo que representó una diferencia media entre respuesta de Tt y Tt+50 de 462 kg ha<sup>-1</sup> a favor de Tt+50 en N<sub>suelo</sub>-Alto (p<0,0001) y 203 kg ha<sup>-1</sup> a favor de Tt+50 en N<sub>suelo</sub>-Bajo (p=0,0005). La variabilidad de estas diferencias en cada ambiente se puede observar en la magnitud de las distancias de las líneas de probabilidad acumulada para RR del Tt (línea punteada) y RR del Tt+50 (línea continua). La distancia es menor en N<sub>suelo</sub>-Bajo (Fig. 2c) que en N<sub>suelo</sub>-Alto (Fig. 2b) sin existir solapamiento de las líneas en ambos ambientes.

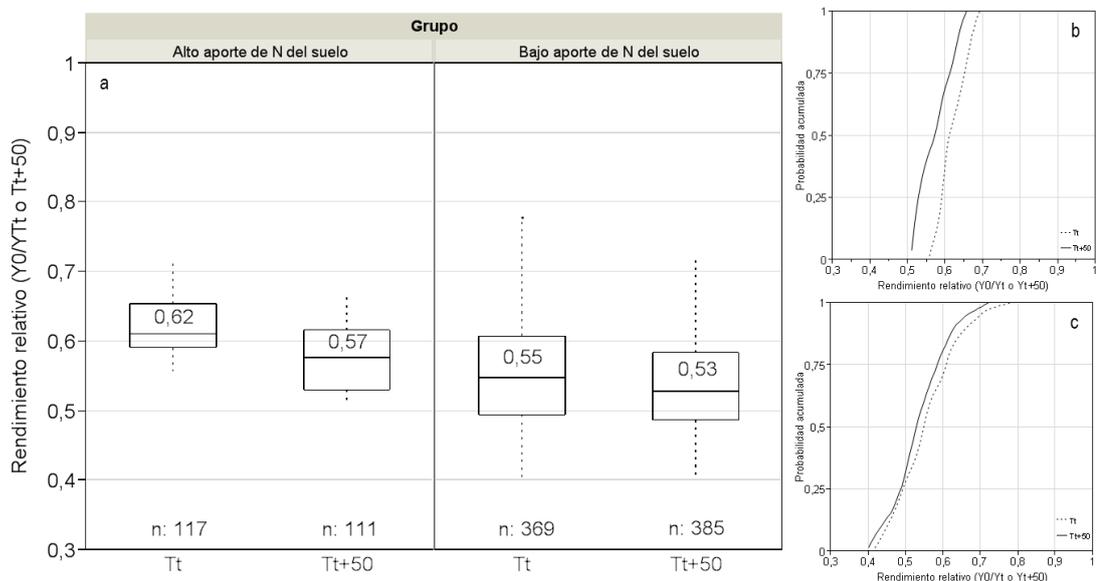


Figura 2. a) Respuesta al agregado de N expresada como rendimiento relativo al testigo absoluto, diferenciada por ambiente de aporte de N del suelo. Contraste de respuesta en grano entre Tt y Tt+50. b) Probabilidad acumulada relativa de la respuesta al agregado de N en Tt (línea punteada) y Tt+50 (línea continua) para N<sub>suelo</sub>-Alto. c) Probabilidad acumulada relativa de la respuesta al agregado de N en Tt (línea punteada) y Tt+50 (línea continua) para N<sub>suelo</sub>-Bajo.

### 3.5.2. Estimación de INN mediante NDVI en Z.33

No fue posible ajustar un modelo preciso para estimar de forma indirecta el INN empleando NDVI a Z.33, ya que para los datos disponibles (Cuadro 1) la magnitud del

margen de variación del INN fue alta para los valores de NDVI ( $R^2=0,45$ ). Aún evaluando las relaciones en forma independiente entre ambientes de capacidad de aporte de N del suelo, la variación continuó siendo elevada. En  $N_{\text{suelo-Alto}}$  el modelo que mejor representó la relación, presento un  $R^2$  de 0,37 y en  $N_{\text{suelo-Bajo}}$  fue de 0,52.

Cuadro 1. Parámetros descriptivos de INN y NDVI generales y por ambiente de capacidad de aporte de N del suelo. n – número de observaciones; DE – Desvío estándar; Mínimo – valor mínimo observado; Máximo – valor máximo observado.

		n	Media	DE	Mínimo	Máximo
General	INN	363	0,98	0,20	0,49	1,57
	NDVI		0,76	0,08	0,45	0,88
$N_{\text{suelo-Alto}}$	INN	243	0,95	0,17	0,56	1,38
	NDVI		0,75	0,07	0,53	0,86
$N_{\text{suelo-Bajo}}$	INN	120	1,04	0,25	0,49	1,57
	NDVI		0,78	0,09	0,45	0,88

A pesar de no existir un modelo matemático preciso que permita estimar INN empleando NDVI, este último permitió saber cuál fue el comportamiento de INN mediante niveles de probabilidad acumulada (Fig. 4). Esto surge al estudiar la tendencia que presenta el INN en función del NDVI agrupado en rangos cada 0,05 desde 0,45 a 0,90 (Fig. 3c). La evolución de tendencia de INN en función de rangos de NDVI para los dos ambientes (Fig. 3a y 3b), presento un comportamiento similar por lo que se consideraron ambas en forma general (Fig. 3c).

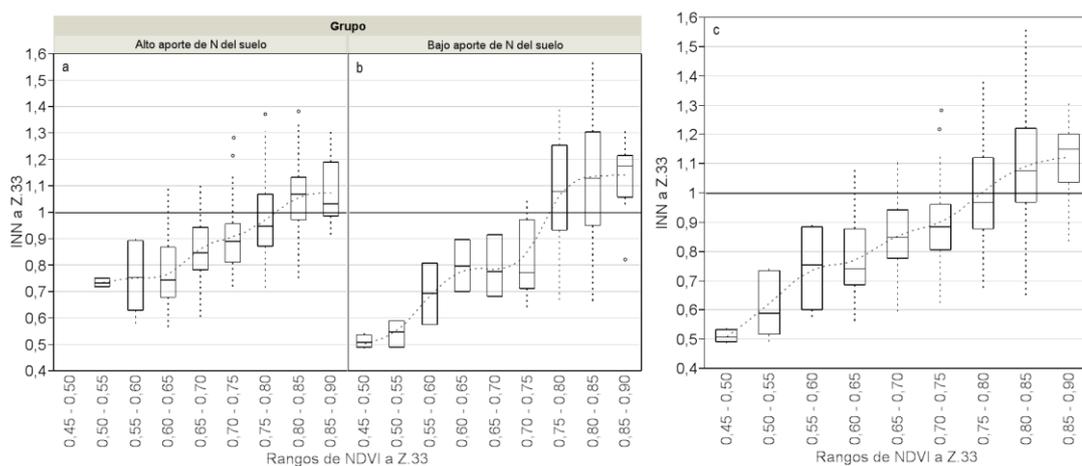


Figura 3. a) Tendencia entre INN y NDVI en Z.33 en ambiente de alto aporte de N del suelo. b) Tendencia entre INN y NDVI en Z.33 en ambiente de bajo aporte de N del suelo. c) Tendencia general entre INN y NDVI en Z.33.

Para rangos de NDVI menores a 0,75 existió como máximo (en el rango 0,70-0,75, triángulos Fig. 4) un 20% de probabilidad de encontrar INN mayor a 1 (Fig. 4, línea horizontal continua), mientras que para rangos de NDVI mayores a 0,75 existió por lo menos (en el rango 0,75-0,80, círculos vacíos Fig. 4) un 45% de probabilidad de encontrar valores de INN mayores a 1 (Fig. 4, línea horizontal punteada). Por lo tanto, valores de NDVI menores a 0,75 podrían definir elevada probabilidad de obtener INN menor a 1 con una clara tendencia a registrar valores de INN cada vez menores. Ocurrió lo opuesto con valores de NDVI mayores a 0,75, donde se observó con elevada probabilidad una clara tendencia a encontrar valores de INN mayores a 1 (Fig. 4).

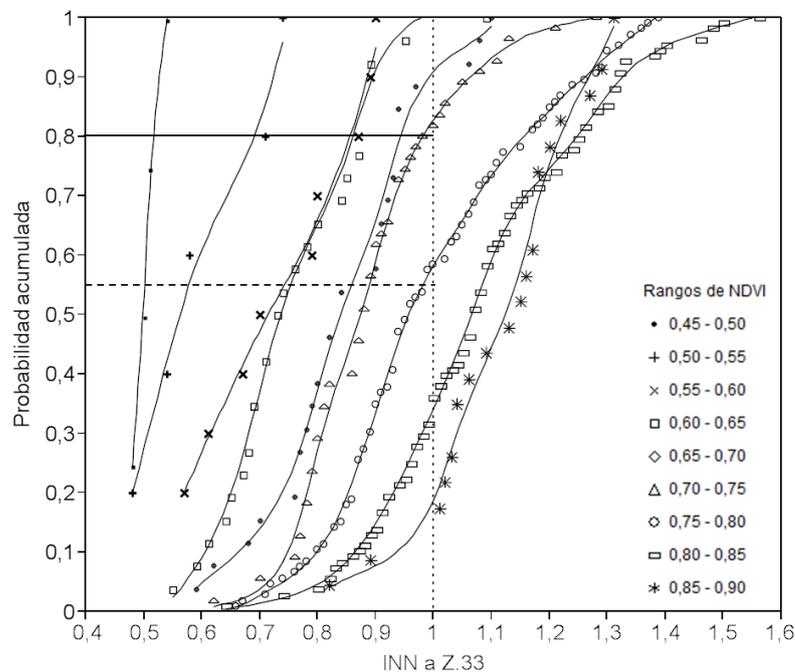


Figura 4. Probabilidad acumulada relativa de magnitud de INN según rangos de NDVI a Z.33.

### 3.5.3. Capacidad del NDVI como estimador de respuesta al agregado de N en Z.33

La respuesta al agregado de N en Z.33 expresada en términos relativos al Tt, presentó una variabilidad comprendida entre 0,77 y 1,19 con media 0,95 y CV 9,4%. Esta variabilidad se redujo a nivel de rangos de rendimiento alcanzable (Fig. 5). Cuando el rendimiento alcanzable se encontró entre 4,0 y 4,5 Mg ha<sup>-1</sup> la respuesta fue nula (respuesta relativa = 1), sin embargo, si fue menor a 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> se observaron respuestas negativas respecto al Tt (respuesta relativa >1), tendiendo a incrementarse conforme aumentó la magnitud del NDVI.

Para rendimientos alcanzables mayores a 4,5 Mg ha<sup>-1</sup>, se registraron respuestas positivas respecto al Tt (respuesta relativa <1) y de mayor magnitud cuanto mayor fue el rendimiento alcanzable. En cada grupo de rendimiento alcanzable la respuesta tendió a reducirse en rangos de NDVI muy bajos (menores a 0,50) o muy altos (mayores a 0,75) (Fig. 5).

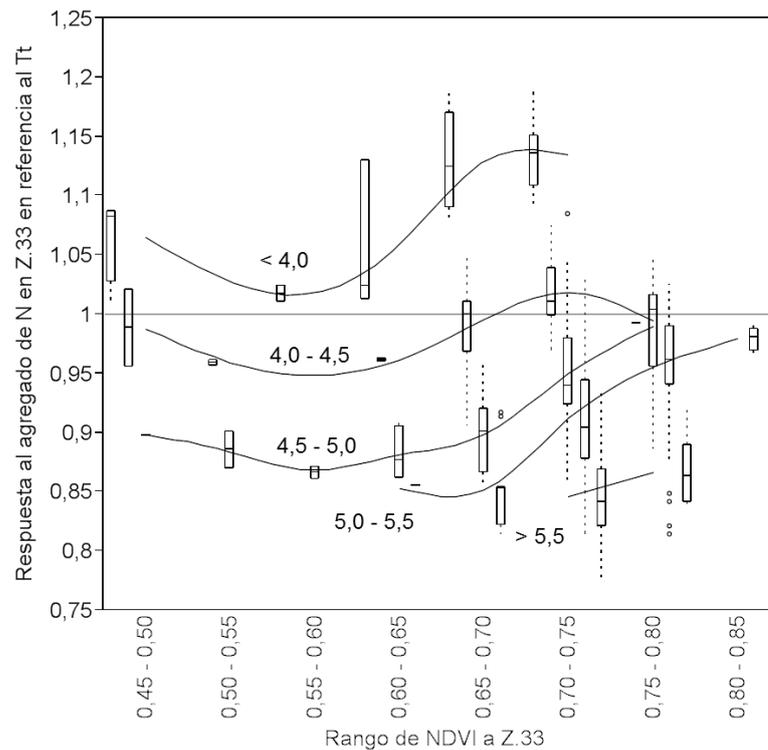


Figura 5. Respuesta al agregado de N como complemento al actual modelo de manejo nitrogenado, según rangos de NDVI y rendimiento alcanzable. Rótulos indican rendimiento alcanzable (Mg ha<sup>-1</sup>).

La respuesta en grano al agregado de N en Z.33 fue significativamente diferente ( $p < 0,05$ ) entre niveles de rendimiento alcanzable en cada rango de NDVI (Cuadro 2). La prueba de comparación de medias fue aplicada a 7 rangos de NDVI (de un total de 8), ya que el rango superior (0,80-0,85) solo dispuso de observaciones para rendimiento alcanzable 5,0 - 5,5 (Fig. 5). De los siete rangos comparados, cuatro presentaron diferencias estadísticas entre todos los niveles de rendimiento alcanzable, mientras que en los restantes tres si bien existió diferencia significativa, los resultados fueron similares en por lo menos dos niveles (Cuadro 2).

Cuadro 2. Comparación de medias de respuesta al agregado de N en Z.33 en referencia al Tt para cada nivel de rendimiento alcanzable según rango de NDVI.  $\pm 0,04$  - desvío estándar. DMS - mínima diferencia significativa. I.C.S. – Intervalo de confianza superior (95%). I.C.I. – Intervalo de confianza inferior (95%). Letras distintas en un mismo rango de NDVI indican diferencias significativas.

Rango NDVI	Rendimiento alcanzable (Mg ha <sup>-1</sup> )	Respuesta al N en Z.33 (Tt/Tt+50)	p-valor DMS <sub>(alfa=0,05)</sub>	I.C.S.	I.C.I.	
0,45 - 0,50	<4,0	1,07±0,04	0,039 0,15	1,01	1,12	a
	4,0 - 4,5	0,99±0,04		0,91	1,06	ab
	4,5 - 5,0	0,90±0		0,79	1,01	b
0,50 - 0,55	4,0 - 4,5	0,96±0	0,037	0,91	1,01	a
	4,5 - 5,0	0,89±0,02	0,07	0,84	0,93	b
0,55 - 0,60	<4,0	1,02±0,01	0,002	0,99	1,04	a
	4,5 - 5,0	0,87±0,01	0,03	0,84	0,89	b
0,60 - 0,65	<4,0	1,06±0,07	0,003 0,13	1,00	1,11	a
	4,0 - 4,5	0,96±0		0,90	1,03	ab
	4,5 - 5,0	0,88±0,02		0,84	0,92	b
	5,0 - 5,5	0,85±0		0,76	0,95	b
0,65 - 0,70	<4,0	1,13±0,04	<0,0001 0,03	1,11	1,15	a
	4,0 - 4,5	1,00±0,03		0,98	1,01	b
	4,5 - 5,0	0,90±0,03		0,89	0,91	c
	5,0 - 5,5	0,85±0,04		0,83	0,87	d
0,70 - 0,75	<4,0	1,13±0,03	<0,0001 0,02	1,12	1,15	a
	4,0 - 4,5	1,02±0,03		1,01	1,03	b
	4,5 - 5,0	0,95±0,05		0,94	0,96	c
	5,0 - 5,5	0,91±0,05		0,90	0,92	d
	>5,5	0,85±0,04		0,83	0,86	e
0,75 - 0,80	4,0 - 4,5	0,99±0	<0,0001 0,07	0,92	1,07	a
	4,5 - 5,0	0,99±0,04		0,97	1,01	ab
	5,0 - 5,5	0,95±0,05		0,94	0,97	b
	>5,5	0,87±0,03		0,86	0,88	c
0,80 - 0,85	5,0 - 5,5	0,98±0,01	-	-	-	-

La respuesta negativa en relación al Tt, observada en rendimientos menores a 4,0 Mg ha<sup>-1</sup> fue un resultado inesperado. Se evaluó la posible asociación de la misma a zonas homogéneas dentro de la chacra, sin encontrar un patrón definido, por lo cual se descartó esa

opción. De los cinco rangos de rendimiento alcanzable propuestos, el de <4,0 Mg ha<sup>-1</sup> fue el único que presentó menor No. granos m<sup>-2</sup> (G m<sup>-2</sup>) que el Tt, sin embargo, todos menos el rango 4,5 - 5,0 presentaron reducción en el peso de granos (Cuadro 3). El mayor No. granos espiga<sup>-1</sup> (GE) en los rangos 5,0 - 5,5 y >5,5 compenso la pérdida de peso de grano pero no en los rangos <4,0 y 4,0 - 4,5, los cuales presentaron GE significativamente menores al Tt, por lo que ambos se vieron afectados en el rendimiento de espiga. El rango 4,0 - 4,5 dispuso de un mayor No. de espigas m<sup>-2</sup> que el rango <4,0, lo cual compensó la reducción del GE logrando aumentar el G m<sup>-2</sup> en comparación al rango <4,0 y al Tt (Cuadro 3).

Cuadro 3. Componentes de rendimiento expresados en términos relativos a la media del testigo tecnológico. Tt – Testigo tecnológico; n - No. de observaciones; ESP - No. de espigas m<sup>-2</sup>; GE - No. de granos espiga<sup>-1</sup>; PG - peso de grano; RE - rendimiento espiga<sup>-1</sup>; G - No. granos m<sup>-2</sup>; ±0,10 - desvío estándar; DMS - mínima diferencia significativa. Letras distintas en sentido vertical indican diferencias significativas.

Rendimiento	n	ESP m <sup>-2</sup>	GE	PG	RE	G m <sup>-2</sup>
Tt	464	1,00±0,12 a	1,00±0,13 b	1,00±0,04 c	1,00±0,14 b	1,00±0,06 b
<4,0	54	0,92±0,10 c	1,22±0,17 a	1,02±0,07 b	1,26±0,17 a	1,06±0,06 a
4,0 - 4,5	90	0,84±0,10 d	1,18±0,13 a	1,04±0,06 a	1,26±0,17 a	0,97±0,06 c
4,5 - 5,0	119	0,94±0,07 bc	1,00±0,10 b	1,01±0,06 bc	1,00±0,08 b	0,95±0,05 d
5,0 - 5,5	127	0,96±0,07 b	0,95±0,06 c	1,03±0,04 b	0,98±0,04 b	0,91±0,04 e
>5,5	102	0,93±0,03 bc	0,90±0,03 d	1,04±0,03 ab	0,93±0,03 c	0,83±0,03 f
Media	956	0,96±0,12	1,03±0,15	1,02±0,05	1,05±0,17	0,97±0,08
p-valor		<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
DMS <sub>(alfa=0,05)</sub>		0,04	0,05	0,02	0,04	0,02

## 3.6. DISCUSIÓN

### 3.6.1. Respuesta al agregado de nitrógeno en Z.33

El agregado de N siguiendo las recomendaciones del modelo actual<sup>(25)</sup>, generó ganancias de rendimiento en grano del orden del 62% en ambiente de  $N_{\text{suelo-Alto}}$  y del 82% en ambiente de  $N_{\text{suelo-Bajo}}$ , respecto al Ta, aunque de similar magnitud absoluta ( $N_{\text{suelo-Alto}}$ : 1974 kg ha<sup>-1</sup> y  $N_{\text{suelo-Bajo}}$ : 2011 kg ha<sup>-1</sup>) y por lo tanto manteniendo una similar productividad parcial del N agregado. Estos resultados reafirman y se suman a la amplia disponibilidad de reportes sobre la importancia del manejo nitrogenado en trigo para contribuir a la reducción de la brecha de rendimiento<sup>(39)(40)</sup>. Sin embargo, el rendimiento bajo el manejo actual fue menor que el alcanzable bajo oferta nitrogenada no deficitaria en estadios posteriores a Z.30 (Fig. 2a). Nuestros resultados muestran, que si se sincroniza la oferta y demanda de N posterior a Z.30 es posible reducir la brecha de rendimiento aún más<sup>(41)(42)</sup>. La sospecha de que la oferta de N del suelo no acompaña la demanda del cultivo posterior a Z.30, aun empleando el modelo actual de manejo nitrogenado, se evidencia en la respuesta diferencial entre el agregado del nutriente en Z.33 y el Tt (Fig. 2a). A pesar que las ganancias de rendimiento en grano en relación al Tt, fueron medias en  $N_{\text{suelo-Alto}}$  (462 kg ha<sup>-1</sup>) a medias-bajas en  $N_{\text{suelo-Bajo}}$  (203 kg ha<sup>-1</sup>), las mismas fueron significativas, indicando que existen condiciones deficitarias de N en Z.33 que limitan el rendimiento en grano aun empleando el modelo actual de manejo nitrogenado. La mayor respuesta en el ambiente de alto aporte de N del suelo ( $N_{\text{suelo-Alto}}$ ), puede interpretarse como el ambiente donde la demanda del cultivo fue mayor. Bajo estas situaciones, otros atributos del suelo (mayor disponibilidad de agua en el suelo, oferta de nutrientes, mejores condiciones físicas del suelo) ayudarían a mejorar la oferta de N para el cultivo y, por lo tanto, generarían condiciones de crecimiento que conllevan a aumentar el rendimiento alcanzable y, con ello, la demanda de N. Resultados similares fueron reportados por Kindred *et al.*<sup>(43)</sup>.

Con estos resultados se confirma la hipótesis en cuanto a que, diagnosticar y corregir una condición deficitaria de N en Z.33, complementa la actual propuesta de diagnóstico y recomendación de dosis de N, aportando a reducir la brecha de rendimiento en grano generada por aporte deficitario de N para el cultivo.

### **3.6.2. Estimación de INN mediante NDVI en Z.33**

Se cuantificó una relación significativa entre NDVI e INN en Z.33 ( $p < 0,0001$ ), pero el ajuste del modelo no permitió estimar en forma precisa la condición nitrogenada del cultivo ( $R^2=0,45$ ), aún de forma independiente entre ambientes de aporte diferencial de N del suelo. Las variaciones en el NDVI, no son únicamente dependientes de la mayor acumulación de N en los tejidos con aplicación de dosis crecientes de fertilizante nitrogenado<sup>(44)</sup>, sino que también de cualquier factor externo que tenga efecto sobre la biomasa<sup>(45)(46)</sup>. A pesar de esto, Heege *et al.*<sup>(47)</sup> reportan que el NDVI tiene la desviación estándar más baja en trigo de invierno, entre los índices espectrales comunes investigados para medir la absorción de N del cultivo, y por su simplicidad y accesibilidad se torna un índice promisorio. La tendencia observada en el modelo semi-empírico (Fig. 3c) podría ser de utilidad a nivel práctico para efectuar un manejo nitrogenado diferenciado, empleando niveles de probabilidad en la estimación de condición nitrogenada del cultivo (Fig. 4). Por ejemplo, si el valor observado de NDVI en la situación a diagnosticar se encuentra en el rango de 0,70-0,75, existe un 80% de probabilidad de que el cultivo se encuentre en deficiencia nitrogenada ( $INN < 1$ ), y por lo tanto es elevada la probabilidad de respuesta al agregado de N en Z.33. Resultados similares fueron reportados por Lukina *et al.*<sup>(29)</sup>, quienes ajustando un modelo exponencial obtuvieron un coeficiente de correlación de 0,75 entre NDVI en estadios 4-6 de Feekes (Z.30-31) y la absorción de N por el cultivo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ). El mayor coeficiente de correlación obtenido, podría estar dado por el nivel de MS de los estadios de muestreo anteriores a los realizados en este trabajo (Z.33).

### **3.6.3. Capacidad del NDVI como estimador de respuesta al agregado de N en Z.33**

La respuesta al N en Z.33, fue incremental ante aumentos en el rendimiento alcanzable, probablemente porque en ausencia de otros factores limitantes, la respuesta a la fertilización nitrogenada se relaciona en forma directa con la demanda del nutriente, la cual se incrementa al aumentar el rendimiento alcanzable<sup>(2)(3)(48)</sup>. En cada rango de rendimiento alcanzable, a excepción de los mayores a  $5,0 \text{ Mg ha}^{-1}$  para el cual no se dispuso de suficientes datos, el comportamiento sigmoideal de las curvas medias presentaron un punto de inflexión en el rango 0,55-0,60 de NDVI. Este rango representa la máxima respuesta

observada (Fig. 5). Para valores de NDVI menores a 0,50, es probable que existieran otros factores limitantes o la magnitud de la deficiencia nitrogenada ocurriera por un período de tiempo prolongado. Si bien existió respuesta al agregado de N, la misma tendió a decrecer, por lo que las necesidades de fertilizante nitrogenado serían menores<sup>(49)</sup>. Estos resultados coinciden con lo reportado para trigo por Raun *et al.*<sup>(8)</sup> y Povh *et al.*<sup>(46)</sup> y para maíz por Holland y Schepers<sup>(20)</sup>. En condiciones de rendimiento alcanzable superiores a 5,0 Mg ha<sup>-1</sup>, no podemos afirmar esto ya que no se dispuso de datos en esa región de NDVI (Fig. 5).

Las diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) en la magnitud de la respuesta para un mismo rango de NDVI entre los niveles de rendimiento alcanzable (Cuadro 2), confieren rigurosidad a las tendencias encontradas en el modelo semi-empírico de estimación de respuesta al agregado de N en Z.33 mediante NDVI (Fig. 5). Sin embargo, para rendimientos alcanzables en el rango de 5,0 – 5,5 Mg ha<sup>-1</sup> no se dispuso de datos de respuesta en rangos de NDVI menores a 0,60 y para rendimientos alcanzables mayores a 5,5 Mg ha<sup>-1</sup> en rangos de NDVI menores a 0,70. En estas secciones del modelo se podría esperar la misma tendencia en la respuesta, y por tanto extrapolarla, pero no disponemos de información suficiente que lo asegure.

La respuesta en rendimiento al agregado de N generalmente es de tipo cuadrática, definiendo una dosis óptima de N a partir de la cual la respuesta comienza a decrecer<sup>(50)(48)</sup>. Siendo que la dosis óptima y por tanto la respuesta al agregado de N en cereales depende del rendimiento alcanzable<sup>(20)(8)</sup>, en el caso del rango de rendimiento alcanzable  $< 4,0$  Mg ha<sup>-1</sup>, la dosis óptima podría ser la correspondiente a Tt, por lo que el agregado de N suplementario en Z.33 generó una reducción en la respuesta. Esto puede estar dado por condiciones de producción que llevan a un escaso crecimiento a inicio de encañazón, reduciendo el potencial y por tanto aumentando la brecha de rendimiento<sup>(39)</sup>, sin que las medidas posteriores logren reducirla de forma eficiente. La reducción en la respuesta estuvo asociada a una disminución en el tamaño de espigas sin presentar compensación por el PG, y a pesar de que las ESP m<sup>-2</sup> fueron mayores que en el Tt, las mismas no lograron mantener el número de granos por metro cuadrado (Cuadro 3). El número de granos por espiga, ha sido citado como uno de los componentes de rendimiento más limitantes para la producción de trigo<sup>(51)(52)</sup>.

La respuesta de rendimiento en grano al agregado de N en Z.33 en relación al Ta (Fig. 2a) y al Tt (Fig. 5), son resultados que confirman la hipótesis de que es posible reducir la

brecha de rendimiento generada por deficiencias nitrogenadas posteriores a Z.30. El modelo semi-empírico (Fig. 3c) permitiría diagnosticar la existencia o no de respuesta al agregado de N en Z.33 contemplando el rendimiento alcanzable (Fig. 5), y por tanto, podría ser utilizado como herramienta de diagnóstico de condición nitrogenada y estimación de probable respuesta, mejorando el actual modelo de manejo nitrogenado en cereales de invierno, mediante una mejor sincronización de oferta y demanda de N.

### **3.7. CONCLUSIONES**

La evidencia de respuesta al agregado de N en Z.33 aun corrigiendo la deficiencia de N en Z.30, demuestra que existen condiciones productivas que llevan a un INN deficiente a Z.33, y por tanto surge la necesidad de diagnosticar la condición nitrogenada en ese estadio y si fuese necesario corregir la oferta de N. El diagnóstico podría efectuarse empleando rangos de NDVI, ya que el mismo es capaz de estimar probabilidades de ocurrencias del INN. El uso de esta tecnología puede ser utilizada como herramienta alternativa o para guiar el muestreo de MS y Nt por zonas o priorizar el muestreo de chacras.

La información presentada y los conceptos discutidos previamente, permitirían definir un esquema tentativo y teórico para el manejo racional de la fertilización nitrogenada de trigo auxiliando la toma de decisiones.

### **3.8. AGRADECIMIENTOS**

La investigación que da origen a los resultados en la presente publicación es parte de la Tesis de Maestría en Ciencias Agrarias del primer autor, quien recibió fondos de la Agencia Nacional de Investigación e Innovación bajo el código POS\_NAC\_2015\_1\_109778.

Al grupo de Ecofisiología y manejo de cultivos del Depto. de Prod. Veg. de Facultad de Agronomía – UdelaR – EEMAC, responsable de la línea de investigación “Manejo de la nutrición nitrogenada en cereales de invierno en Uruguay”, y a los responsables del proyecto innovagro (FSA\_1\_2013\_1\_12953) titulado “Mejora del sistema actual de diagnóstico y recomendación de necesidades de fertilización nitrogenada en cereales de invierno en Uruguay, mediante estudios de modelación y sensoramiento remoto”, por brindar parte de los datos utilizados en este trabajo.

A Daniel Acuña y Federico Felix por aportar los sitios experimentales y colaborar en las tareas logísticas.

### 3.9. REFERENCIAS

1. Berger A, Gaso D, Calistro R, Morales M. Limitantes ambientales y potencial de rendimiento de trigo en Uruguay. In: Germán S, Quincke M, Vázquez D, Castro M, Pereyra S, Silva P, García A, editors. Seminario internacional «1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela». Serie técnica No. 241. Colonia: INIA La Estanzuela; 2018. p. 112-123.
2. Sadras VO, Hayman PT, Rodriguez D, Monjardino M, Bielich M, Unkovich M, Mudge B, Wang E. Interactions between water and nitrogen in Australian cropping systems: physiological agronomic, economic, breeding and modelling perspectives. *Crop Past. Sci.* 2016;67:1019-1053.
3. Sadras VO, Lawson C. Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Eur. J. Agron.* 2013; 46:34-41.
4. Correndo A, García F. Métodos de diagnóstico nutricional en cultivos extensivos en Argentina. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* [Internet]. 2017 [Citado 20 de Mayo de 2019]; 26:3-12. Disponible en: <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/issue/IA-LACS-2017-2>
5. Paz F, Romero ME, Palacios E, Bolaños M, Valdez JR, Aldrete A. Alcances y limitaciones de los índices espectrales de la vegetación: marco teórico. *Terra Latinoamericana.* 2014;32:177-194.
6. Hatfield JL, Gitelson AA, Schepers JS, Walthall CL. Application of spectral remote Sensing for agronomic decisions. *Papers in Natural Resources.* 2008;100:117-131.
7. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW, Harlan JC. Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. NASA/Goddard Space Flight Center (GSFC) type III final report. NASA/GSFC, Greenbelt, MD. 1974. 390p.
8. Raun WR, Solie JB, Stone ML, Martin KL, Freeman KW, Mullen RW, Zhang H, Schepers JS, Johnson GV. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 2005;36:2759-2781.

9. Cao Q, Miao Y, Li F, Gao X, Liu B, Lu D, Chen X. Developing a new Crop Circle active canopy sensor based precision nitrogen management strategy for winter wheat in North China Plain. *Precision Agric.* 2017;18:2-18.
10. Berger AG, Asuaga A, Berteretche M, Beux L, Asuaga J, Garrone M, Calistro R, Morales X. Determinación de las necesidades de refertilización nitrogenada en trigo utilizando sensores activos. In: Congreso uruguayo de suelos 2014. VI encuentro de la SUCS; 6-8 agosto; 2014; Colonia, Uruguay. 2014.
11. Bredemeier C, Grohs DS, Poletto N, Mundstock CM. 2007. Variabilidade espacial de atributos de planta em lavouras de cevada e adubação nitrogenada em taxavariável. In: Reunião Nacional de Pesquisa de Cevada, Passo Fundo, RS. Anais... Passo Fundo: EMBRAPA; 2007. p. 129-138.
12. Rodriguez D, Fitzgerald GF, Belford R, Christensen LK. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. *Australian Journal of Agricultural Research.* 2006;57:781-789.
13. Nguy-Robertson A, Gitelson A, Peng Y, Viña A, Arkebauer T, Rundquist D. Green leaf area index estimation in maize and soybean: Combining vegetation indices to achieve maximal sensitivity. *Agronomy Journal.* 2012;104:1336-1347.
14. Gitelson AA. Wide dynamic range vegetation index for remote quantification of biophysical characteristics of vegetation. *Journal of Plant Physiology.* 2004;161:165-173.
15. Freeman KW, Raun WR, Johnson GV, Mullen RW, Stone ML, Solie JB. Late-season prediction of wheat grain yield and grain protein. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 2003; 4:1837-1852.
16. Gitelson AA, Kaufman YJ, Stark R, Rundquist D. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment.* 2002;80:76-87.
17. Myneni RB, Ramakrishna R, Nemani RR, Running SW. Estimation of global leaf area index and absorbed par using radiative transfer models. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.* 1997;35:1380-1393.
18. Fernández R, Sierra E. Estimación del potencial de rendimiento y respuesta a la refertilización nitrogenada en el cultivo de trigo mediante sensores remotos activos. Tesis Ing. Agr. Fca – Universidad De la Empresa. Montevideo – Uruguay. 2015. 44p.

19. Melchiori RJ, Caviglia OP, Albarenque SM. Manejo sitio-específico del nitrógeno en el cultivo de trigo basado en sensores remotos. In: Melchiori R, Caviglia O, Albarenque S, Kemmerer A, editors. Jornada Nacional de Agricultura de Precisión: Integrando tecnologías para una agricultura sustentable. Buenos Aires: Ediciones INTA; 2009. p. 101-110.
20. Holland KH, Schepers JS. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. *Agronomy Journal*. 2010;102:1415-1424.
21. Fitzgerald G, Rodriguez D, O'Leary G. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index -The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Research*. 2010;116:318-324.
22. Lemaire G, Jeuffroy M, Gastal F. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*. 2008;28:614-624.
23. Mistele B, Schmidhalter U. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *Eur. J. Agron*. 2008;29:184-190.
24. León L. Sensores de nitrógeno para la medición y aplicación en el cultivo en tiempo real. In: Chartuni E, Magdalena C, editors. Manual de agricultura de precisión. Programa Cooperativo para el Desarrollo Tecnológico Agroalimentario y Agroindustrial del Cono Sur. Montevideo: Imprenta Boscana; 2014. p. 146-157.
25. Hoffman E, Perdomo C, Ernst O, Bordolli M, Pastorni M, Pons C, Borghi E. Propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada para cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. IPNI. 2010;46:13-18.
26. Zadoks JC, Chang TT, Konzak CF. A Decimal Code for the Growth Stages of Cereals. *Weed Research*. 1974;14:415-421.
27. Chen P. A comparison of two approaches for estimating the wheat nitrogen nutrition index using remote sensing. *Remote Sens*. 2015;7:4527-4548.
28. Cilia C, Panigada C, Rossini M, Meroni M, Busetto L, Amaducci S, Boschetti M, Picchi V, Colombo R. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. *Remote Sens*. 2014;6:6549-6565.
29. Lukina EV, Freeman KW, Wynn KJ, Thomason WE, Mullen RW, Stone ML, Solie JB, Klatt AR, Johnson GV, Elliott RL, Raun WR. Nitrogen fertilization optimization algorithm

- based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. *J. Plant Nutr.* 2001;24:885-898.
30. Justes E, Mary B, Meynard J, Mchet J, Thelier-Huches L. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany.* 1994;74:397-407.
  31. Peralta NR, Barbieri P, Gowland T, Aparicio V, Costa JL. Agricultura de precisión: dosis variable de nitrógeno en cebada. *Ciencias del suelo.* 2015;33:131-137.
  32. Christy CD. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Comp. Electron. Agric.* 2008;61:10-19.
  33. Fleming KL, Heermann DF, Westfall DG. Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. *Agron. J.* 2004;96:1581-1587.
  34. Mallarino A. Manejo de nutrientes sitio-específico con énfasis en el muestreo de suelos y la fertilización variable con fósforo y potasio. Tercera Jornada de Actualización Técnica para Profesionales "Fertilidad 2001". Buenos Aires: INPOFOS Cono Sur; 2001. p. 8-12.
  35. Doerge T. Management zone concepts. Site-specific management guideline No. 2. Norcross, Georgia, EE.UU. Potash and Phosphate Institute. 1999.
  36. Solie JB, Raun WR, Stone ML. Submeter spatial variability of selected soil and bermudagrass production variables. *Soil Science Society of America Journal.* 1999;63:1724-1733.
  37. Raun WR, Solie JB, Johnson GV, Stone ML, Whitney RW, Lees HL, Sembiring H, Phillips SB. Micro-variability in soil test, plant nutrient, and yield parameters in bermudagrass. *Soil Science Society of America Journal.* 1998;62:683-690.
  38. Waring SS, Bremner J. Ammonium production in soil under water logged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature (Landon).* 1964;201:951-952.
  39. Hoogmoed M, Neuhaus A, Noack S, Sadras VO. Benchmarking wheat yield against crop nitrogen status. *Field Crops Research.* 2018;222:153-163.
  40. Berger AG, Hoffman E, Fassana CN. Nuevas herramientas para el diagnóstico y gestión de la nutrición nitrogenada del cultivo de trigo. In: Ribeiro A, Silva H, editors. V Simposio Nacional de Agricultura. Al futuro, no alcanza con llegar. Montevideo: Hemisferio Sur; 2017. p. 213-223.

41. Mueller ND, Gerber JS, Johnston M, Ray DK, Ramankutty N, Foley JA. Closing yield gaps through nutrient and water management. *Nature*. 2012;490:254-257.
42. Angus JF. Nitrogen supply and demand in Australian agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 2001;41:277-288.
43. Kindred DR, Milne AE, Webster R, Marchant BP, Sylvester-Bradley R. Exploring the spatial variation in the fertilizer-nitrogen requirement of wheat within fields. *The Journal of Agricultural Science*. 2014;153:25-41.
44. Wright DL, Rasmussen VP, Ramsey RD, Baker DJ, Ellsworth JW. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. *GIScience and Remote Sensing*. 2004;41:287-300.
45. Grohs DS, Bredemeier C, Mundstock CM, Poletto N. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. *Engenharia Agrícola*. 2009;29:101-112.
46. Povh FP, Molin JP, Gimenez LM, Pauletti V, Molin R, Salvi JV. Comportamento do NDVI obtido por sensor óticoativoemcerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 2008;43:1075-1083.
47. Heege HJ, Reusch S, Thiessen E. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. *Precision Agriculture*. 2008;9:115-131.
48. Baethgen W. Fertilización nitrogenada de cebada cervecera en el litoral oeste del Uruguay. Serie Técnica N° 24. Colonia: INIA La Estanzuela. 1992. 59p.
49. Hoffman E, Perdomo C, Ernst O. Como enfocar el manejo de la fertilización nitrogenada en cereales de invierno, para la nueva realidad agrícola del Uruguay. In: Castro A, Hoffman E, Viega L, editors. Limitaciones para la productividad de trigo y cebada. Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED). Montevideo: Departamento de publicaciones de la Facultad de Agronomía; 2011. p. 83-93.
50. Barbieri P, Echeverria H, Sainz Rozas H. Dosis óptima económica de nitrógeno en trigo según momento de fertilización en el sudeste bonaerense. *Ci. Suelo (Argentina)*. 2009;27:115-125.

51. Slafer GA, Calderini DF, Miralles DJ, Dreccer MF. Preanthesis shading effects on the number of grains of three bread wheat cultivars of different potential number of grains. *Field Crops Research*. 1994;36:31-39.
52. Fischer RA. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*. 1985;105:447-461.

## 4. DISCUSIÓN GENERAL

### 4.1. AJUSTE Y CORRECCIÓN DE CDN PARA MAXIMIZAR RENDIMIENTO EN CONDICIONES DE SECANO

Hoogmoed y Sadras (2018), Errecart *et al.* (2014) y Bélanger *et al.* (2001) afirman que en sistemas de cultivo bajo condiciones de secano, los requerimientos de N son menores a los registrados en condiciones de agua no limitante, y por lo tanto la CDN ajustada para estas condiciones, puede sobreestimar la demanda de N en sistemas donde la oferta hídrica depende de la cantidad y distribución de las lluvias y de la capacidad de almacenar agua del suelo. Si el diagnóstico y corrección de oferta nitrogenada en condiciones de secano, se realiza en función de la CDN ajustada en ausencia de limitaciones hídricas, podría generar una sobreoferta de N producida por el agregado de fertilizante si el nivel de deficiencia estimada es elevado, o innecesario si el nivel de deficiencia estimada es bajo. Por esto, y porque los coeficientes de la CDN resultan de la variación esperable entre sitios experimentales, estadios fenológicos (Greenwood *et al.*, 1990), regiones, genotipos y manejo (Hoogmoed y Sadras, 2016, Xue *et al.*, 2007), surge la necesidad de ajustar la CDN para la actual condición de producción en Uruguay.

El común denominador en las CDNs ajustadas para trigo en las diferentes regiones de producción (Hoogmoed y Sadras, 2018, Zhao *et al.*, 2016, Yao *et al.*, 2014, Reussi *et al.*, 2012, Yue *et al.*, 2012, Ziadi *et al.*, 2010, Lu *et al.*, 2006, Justes *et al.*, 1994), es que las mismas definen la mínima concentración de N en planta necesaria para no limitar la producción de biomasa aérea. Si bien existe una correlación entre producción de biomasa aérea y rendimiento en grano (Berger *et al.*, 2018, Hoffman *et al.*, 2018, Hoogmoed *et al.*, 2018, Calderini *et al.*, 2012), las CDNs no se ajustan con el fin específico de maximizar el rendimiento. Presentamos un método de corrección a la propuesta de Justes *et al.* (1994) para el ajuste de la CDN. El resultado define un modelo para determinar la concentración crítica de N en planta en función del nivel de producción de biomasa aérea, que permite satisfacer la demanda de N para la misma y contempla los requerimientos de N para maximizar el rendimiento en grano.

La CDN para las condiciones locales, que contempla los requerimientos de N para maximizar el rendimiento en grano, es la herramienta que consideramos imprescindible como

punto de partida para cuantificar la brecha de rendimiento, provocada por deficiencia nitrogenada posterior a Z.30.

#### **4.2. BRECHA DE RENDIMIENTO POR DEFICIENCIA NITROGENADA POSTERIOR A Z.30**

La identificación de brecha de rendimiento dada por deficiencia nitrogenada posterior a Z.30 (último momento de diagnóstico y corrección de deficiencias en el modelo actual), y su relación con el INN, comprueban la hipótesis de que en la actualidad la demanda de N supera la oferta que hasta el momento se consideraba suficiente, y se empleaba como referencia para el agregado de N. Por lo tanto, en este contexto es necesario ajustar la oferta mediante el agregado de fertilizante nitrogenado. Sin embargo, es potencialmente riesgoso aumentar el agregado de N en un momento fijo (Hoffman *et al.*, 2015), por las consecuencias medioambientales (Cassman *et al.*, 2003, Grindlay, 1997) y por la esperable pérdida de eficiencia en el uso del fertilizante agregado (Martínez *et al.*, 2015, Dobermann, 2007, Pierce y Rice, 1988). En este sentido, es necesario sincronizar oferta y demanda de N (Angus, 2001, Sticksel *et al.*, 1999), sumando al actual modelo de manejo nitrogenado, un nuevo momento de diagnóstico y corrección de oferta de N. En concordancia con los antecedentes (Dall' Orso *et al.*, 2016, Angus, 2001), la relevancia del efecto negativo de la intensidad de la deficiencia de N en Z.33 (momento de máxima tasa de crecimiento y absorción de N) sobre la brecha de rendimiento, llevan a considerarlo como el momento indicado para un nuevo diagnóstico en el ciclo del cultivo.

#### **4.3. RESPUESTA AL AGREGADO DE N EN Z.33**

La respuesta al agregado de N en Z.33, es evidencia de que el aumento en potencial de rendimiento de las nuevas variedades, requiere más N del que se ofrece bajo el modelo actual de manejo nitrogenado. En consecuencia, se debe diagnosticar la condición nitrogenada del cultivo y si se registra estado deficitario, corregir la oferta de N. Los resultados demuestran que a inicio del período crítico, la oferta debe contemplar los requerimientos para concretar rendimiento en grano. Por lo tanto, la obtención de elevados rendimientos depende de un correcto diagnóstico de la nutrición nitrogenada, como herramienta para la toma de decisiones (Lemaire *et al.*, 2008). Para determinar si la nutrición nitrogenada es óptima o subóptima con respecto a la tasa de crecimiento del cultivo (Gastal y Lemaire, 2002), la concentración de N crítico es una referencia fundamental en Z.33.

Los resultados obtenidos confirman los antecedentes (Sadras *et al.*, 2016, Sadras y Lawson, 2013, Baethgen, 1992) en cuanto a que el aprovechamiento del N disponible, y por lo tanto el nivel de respuesta del cultivo a la fertilización, está asociada al potencial de rendimiento y por ende a los factores que lo afectan. Cuando las condiciones permiten la respuesta al agregado de N, la aplicación de fertilizante en dosis fraccionadas, garantiza la disponibilidad del nutriente en etapas del cultivo determinantes para la concreción del rendimiento, principalmente debido a su efecto sobre el número de granos por espiga.

#### **4.4. NDVI COMO HERRAMIENTA AUXILIAR**

El avance del conocimiento en estrategias alternativas para la mejora de tecnologías de ajuste de N en tiempo real, sin resignar la eficiencia de uso del nutriente y niveles de precisión, que simplifiquen y permitan reducir los tiempos de muestreo y sus costos, tienen un impacto relevante en la mejora del manejo de este nutriente a nivel de producción y por lo tanto tienden a elevar el nivel de adopción (Samborski *et al.*, 2009, Hatfield *et al.*, 2008).

En las últimas décadas, se ha verificado un incremento en el interés por buscar herramientas que auxilien el uso racional de insumos, para obtener mejores resultados y minimizar el impacto ambiental (Bredemeier *et al.*, 2011). Uruguay no es la excepción, dado por la necesidad de simplificar el diagnóstico de condición nitrogenada a inicio del período crítico de definición del rendimiento en grano (PC) (Z.33), contemplando la variabilidad interna en tiempo real, para evitar muestreos de biomasa aérea y su concentración de N en Z.33. Una alternativa es utilizar la detección remota, ya que su objetivo final es desarrollar técnicas y relaciones para medir los parámetros biofísicos sin ningún tipo de muestreo en tierra (Fitzgerald *et al.*, 2010). En este sentido, los sensores remotos son una herramienta con potencial para el monitoreo del cultivo del trigo, pues hacen posible observar los patrones en toda el área (Wright *et al.*, 2004) y por tanto abordar la variabilidad espacial. Por el contrario, la determinación de los niveles de N por análisis foliar de muestras físicas (muestreo a campo), utiliza una pequeña cantidad de muestras de plantas para determinar la condición nutricional de toda la superficie bajo cultivo, y es posible que no representen con precisión el estado y la distribución de N en todo el cultivo (Fitzgerald *et al.*, 2010).

Nuestros resultados y propuesta de uso del NDVI como herramienta auxiliar en el manejo nitrogenado, reafirman el concepto de que la calibración de índices espectrales

mediante INN puede ser empleada para el diagnóstico de condición nitrogenada (Ravier *et al.*, 2017, Mistele y Schmidhalter, 2008, Ziadi *et al.*, 2008), en cultivos bien irrigados (Jin *et al.*, 2015, Cao *et al.*, 2013) pero la determinación espectral del estado de nitrógeno en cultivos sometidos a estrés hídrico es más compleja (Shiratsuchi *et al.*, 2011). Por esto, el uso de sensores activos para dirigir el diagnóstico y la aplicación de tasa variable de N, se debe limitar a situaciones en las que el estrés por N se identifica como el principal factor limitante de crecimiento del cultivo. Zillmann *et al.* (2006) plantean que la conclusión de la causa del crecimiento limitado de la planta y la variabilidad del campo debe entenderse completamente antes de utilizar sensores para la fertilización. La comprensión de variables de crecimiento no relacionadas con el estrés de N, como el déficit hídrico o el crecimiento reducido debido a la variabilidad de los suelos, debe estar presente. En este sentido, se requiere una densidad mínima de plantas en el campo de visión del sensor para un correcto diagnóstico. En el caso de áreas con baja densidad de plantas, la tasa de aplicación resultante puede ser inapropiada. Tanto la deficiencia nitrogenada como el suelo desnudo en lugar de las plantas modifican la señal en la misma dirección. Zonas del cultivo normalmente desarrolladas con estado nitrogenado deficitario, debe compensarse con un aumento de la fertilización, mientras que no es razonable aplicar altas dosis de N en áreas donde predomina la baja densidad vegetal (Heege *et al.*, 2008).

La estimación de la condición nitrogenada del cultivo mediante NDVI en Z.33 no predijo valores absolutos de INN, pero se podría ajustar a clases de estado nitrogenado: bajo (NDVI <0,55), medio (NDVI entre 0,55 y 0,65), alto (NDVI entre 0,65 y 0,75) y muy alto (NDVI >0,75). Resultados similares fueron reportados por Grohs *et al.* (2009). Por lo tanto, las diferencias de biomasa aérea y la disponibilidad de N detectadas por el NDVI deberían ser consideradas en la refertilización con N en trigo. Esto evitaría la aplicación de una dosis única en áreas donde hay variabilidad espacial, lo que puede llevar a problemas relacionados a sub o sobre oferta en determinadas partes del área, o sea, dosis menores o mayores que la demanda real de las plantas. Al igual que lo reportado por Lukina *et al.* (2001), Raun *et al.* (2005) y Povh *et al.* (2008) en trigo y por Holland y Schepers (2010) en maíz, el procedimiento propuesto prescribe mayores dosis de N en áreas del campo con un alto potencial de rendimiento y una reducción de fertilizante nitrogenado en áreas del campo con un potencial de rendimiento más bajo.

## **5. CONCLUSIONES GLOBALES**

La CDN ajustada por nivel crítico de INN, permitió identificar situaciones de respuesta a N en Z.33 y reducir la BR por deficiencia de N. Esta herramienta complementa y mejora el actual modelo de diagnóstico y corrección de deficiencias nitrogenadas en Uruguay, estimando la respuesta mediante rangos de NDVI y rendimiento esperado. Sin agregado de N posterior a Z.30, cuanto mayor fue la deficiencia nitrogenada a Z.33, se incrementa la BR y esta se define en base al aporte de N del suelo. La evidencia de respuesta al agregado de N en Z.33 en relación al testigo tecnológico (modelo actual), genera antecedentes para la hipótesis de que el manejo de N en trigo que no cuantifique el estado nutricional nitrogenado posterior a Z.30, limita el rendimiento principalmente en ambientes de elevado potencial.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Angus JF. 2001. Nitrogen supply and demand in Australian agriculture. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 41: 277 - 288.
- Bannari A, Morin D, Bonn F, Huete AR. 1995. A review of vegetation indices. *Remote sensing reviews*, 13: 95 - 120.
- Bélanger G, Walsh JR, Richards JE, Milburn PH, Ziadi N. 2001. Critical nitrogen curve and nitrogen nutrition index for potato in eastern Canada. *American Journal of Potato Research*, 78: 355 - 364.
- Berger A, Gaso D, Calistro R, Morales M. 2018. Limitantes ambientales y potencial de rendimiento de trigo en Uruguay. En: Germán S, Quincke M, Vázquez D, Castro M, Pereyra S, Silva P, García A. (Eds.). Seminario internacional «1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela». 27-28-29 de Agosto 2014. Colonia, Uruguay. INIA La Estanzuela. Serie técnica No. 241, pp. 112-123.
- Berger AG, Asuaga A, Berteretche M, Beux L, Asuaga J, Garrone M, Calistro R, Morales X. 2014. Determinación de las necesidades de refertilización nitrogenada en trigo utilizando sensores activos. En: Congreso uruguayo de suelos 2014. VI encuentro de la SUCS; 6-8 agosto; 2014; Colonia, Uruguay.
- Bredemeier C, Almeida D, Variani C, Rosa AT, L. de Souza CH. 2011. Avaliação do potencial produtivo em trigo ao longo do ciclo utilizando um sensor ativo de reflectância. En: Castro A, Hoffman E, Viega L. (Eds.). Limitaciones para la productividad de trigo y cebada. Ciencia y Tecnología para el desarrollo (CYTED). Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía, pp. 135-140.
- Bredemeier C, Grohs DS, Poletto N, Mundstock CM. 2007. Variabilidade espacial de atributos de planta em lavouras de cevada e adubação nitrogenada em taxa variável. In: Reunião Nacional de Pesquisa de Cevada, 26, 2007, Passo Fundo, RS. Anais... Passo Fundo, EMBRAPA, pp. 129-138.
- Calderini DF, Lizana C, Sandaña P, Riegel R. 2012. Productividad de biomasa, captura de recursos y sustentabilidad de trigo y cebada en ambientes de alto potencial de rendimiento del sur de Chile. En: Valle S, Lizana C, Calderini D. (Eds.). Sistemas de producción de trigo y cebada: decisiones de manejo en base a conceptos

- ecofisiológicos para optimizar el rendimiento, la calidad y el uso de los recursos. Valdivia, Chile. CYTED, pp. 66-82.
- Cao Q, Miao Y, Wang H, Huang S, Cheng S, Khosla R, Jiang R. 2013. Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. *Field Crops Research*, 154: 133 – 144.
- Cassman KG, Dobermann AR, Walters DT, Yang H. 2003. Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environment and Resources*, 28: 315 - 358.
- Christy CD. 2008. Real-time measurement of soil attributes using on-the-go near infrared reflectance spectroscopy. *Computers and Electronics in Agriculture*, 61: 10 – 19.
- Cilia C, Panigada C, Rossini M, Meroni M, Busetto L, Amaducci S, Boschetti M, Picchi V, Colombo R. 2014. Nitrogen status assessment for variable rate fertilization in maize through hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 6: 6549 – 6565.
- Dall' Orso JI, Fernández EA, Uría PA. 2016. Dinámica de aporte de n y s de distintas fuentes de fertilizantes disponibles actualmente en Uruguay. Tesis Ing. Agr. Montevideo – Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 76p.
- Dobermann A. 2007. Nutrient use efficiency – measurement and management. Fertilizer best management practices general principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations. IFA International Workshop on Fertilizer Best Management Practices 7-9 March 2007, Brussels, Belgium. 28p.
- Doerge T. 1999. Management zone concepts. Site-specific management guideline No. 2. Norcross, Georgia, EE.UU. Potash and Phosphate Institute.
- Errecart PM, Agnusdei MG, Lattanzi FA, Marino MA, Berone GD. 2014. Critical nitrogen concentration declines with soil water availability in tall fescue. *Crop Science*, 54: 318 - 330.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2018. FAOSTAT. [En línea]. Consultado 01 marzo 2019. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>.
- Fischer RA. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*, 105: 447 - 461.

- Fitzgerald G, Rodriguez D, O'Leary G. 2010. Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index - The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Research*, 116: 318 - 324.
- Fleming KL, Heermann DF, Westfall DG. 2004. Evaluating soil color with farmer input and apparent soil electrical conductivity for management zone delineation. *Agronomy Journal*, 96: 1581 – 1587.
- Franzluebbers AJ, Sawchik J, Taboada MA. 2014. Agronomic and environmental impacts of pasture and crop rotations in temperate North and South America. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190: 18 – 26.
- Gastal F, Lemaire G. 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, 53: 789 - 799.
- Gilbert MA, González-Piqueras J, Garcia-Haro J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. *Revista de Teledetección*, 8: 1 – 10.
- Gitelson AA. 2012. Remote sensing estimation of crop biophysical characteristics at various scales. En: Thenkabail PS, Loyon JG, Huete A. (Eds.). *Hyperspectral remote sensing of vegetation*. Boca Raton, FL, Taylor and Francis. pp. 329-354.
- Greenwood D, Lemaire G, Gosse G, Cruz P, Draycott A, Neeteson J. 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of Botany*, 66: 425 - 436.
- Grindlay DJC. 1997. Towards an explanation of crop nitrogen demand based on the optimization of leaf nitrogen per unit leaf area. *Journal of Agricultural Science*, 128: 377 – 396.
- Grohs DS, Bredemeier C, Mundstock CM, Poletto N. 2009. Modelo para estimativa do potencial produtivo em trigo e cevada por meio do sensor Greenseeker. *Engenharia Agrícola*, 29: 101 - 112.
- Hatfield JL, Gitelson AA, Schepers JS, Walthall CL. 2008. Application of spectral remote Sensing for agronomic decisions. *Papers in Natural Resources*, 100: 117 – 131.
- Heege HJ, Reusch S, Thiessen E. 2008. Prospects and results for optical systems for site-specific on-the-go control of nitrogen-top-dressing in Germany. *Precision Agriculture*, 9: 115 – 131.

- Hochman Z, Carberry PS, Robertson MJ, Gaydon DS, Bell LW, McIntosh PC. 2013. Prospects for ecological intensification of Australian agriculture. *European Journal of Agronomy*, 44: 109 – 123.
- Hoffman E, Locatelli A, Fassana N, Viega L, Castro A. 2018. Evaluación de la evolución de la oferta varietal de trigo en Uruguay en el siglo XXI. En: Germán S, Quincke M, Vázquez D, Castro M, Pereyra S, Silva P, García A. (Eds.). Seminario internacional «1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela». 27-28-29 de Agosto 2014. Colonia, Uruguay. INIA La Estanzuela. Serie técnica No. 241, pp. 99-111.
- Hoffman E, Ernst O. 2017. Capítulo X: Manejo del cultivo de trigo en distintas regiones. Uruguay. En: Divito GA, García FO. (Eds.). Manual del cultivo de trigo. 1° edición. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. International Plant Nutrition Institute. pp. 136-142.
- Hoffman E, Fassana N, Mazzilli S, Berger A, Ernst, O. 2015. La productividad parcial de los nutrientes. La necesidad de incrementar la eficiencia de uso del nitrógeno. En: Ribeiro A, Barbazan M. (Eds.). IV Simposio Nacional de Agricultura. VII Encuentro de la SUCS. I Encuentro Regional de Políticas de Conservación de Suelos. Buscando del camino para intensificación sostenible para la agricultura. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay. Hemisferio Sur. pp. 131-140.
- Hoffman E, Fassana N, Perdomo C. 2013. Manejo de nitrógeno en cereales de invierno. ¿Agregando más nos estamos quedando cortos?. En: Ribeiro A, Silva H. (Eds.). III Simposio Nacional de Agricultura. No se llega si no se sabe a dónde ir. Pensar en las causas y no solo medir las consecuencias. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. Montevideo, Uruguay. Hemisferio Sur. pp. 51-62.
- Hoffman E, Perdomo C, Ernst O, Bordolli M, Pastorni M, Pons C, Borghi E. 2010. Propuesta de manejo de la fertilización nitrogenada para cultivos de invierno en Uruguay. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. IPNI, 46: 13-18.
- Holland KH, Schepers JS. 2010. Derivation of a variable rate nitrogen application model for in-season fertilization of corn. *Agronomy Journal*, 102: 1415 – 1424.

- Hoogmoed M, Neuhaus A, Noack S, Sadras VO. 2018. Benchmarking wheat yield against crop nitrogen status. *Field Crops Research*, 222: 153 - 163.
- Hoogmoed M, Sadras VO. 2018. Water stress scatters nitrogen dilution curves in wheat. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1 – 11.
- Hoogmoed M, Sadras VO. 2016. The importance of water-soluble carbohydrates in the theoretical framework for nitrogen dilution in shoot biomass of wheat. *Field Crops Research*, 193: 196-200.
- Jin XL, Diao WY, Xiao CH, Wang FY, Chen B, Wang KR, Li SK. 2015. Estimation of wheat nitrogen status under drip irrigation with canopy spectral indices. *Journal Agricultural Science*, 153: 1281 – 1291.
- Justes E, Mary B, Meynard J, Machet J, Thelier-Huches L. 1994. Determination of a Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter Wheat Crops. *Annals of Botany*, 74: 397 - 407.
- Lemaire G, Jeuffroy M, Gastal F. 2008. Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy*, 28: 614 - 624.
- Lu ZG, Dai TB, Jiang D, Jing Q, Qin XD, Cao WX. 2006. Effects of different nitrogen rates and dressing ratios on grain yield and quality in weak-gluten wheat. *Journal Triticeae Crops*, 26: 75 - 80 (in Chinese with English abstract).
- Lukina EV, Freeman KW, Wynn KJ, Thomason WE, Mullen RW, Stone ML, Solie JB, Klatt AR, Johnson GV, Elliott RL, Raun WR. 2001. Nitrogen fertilization optimization algorithm based on in-season estimates of yield and plant nitrogen uptake. *Journal Plant Nutrition*, 24: 885 – 898.
- Mallarino A. 2001. Manejo de nutrientes sitio-específico con énfasis en el muestreo de suelos y la fertilización variable con fósforo y potasio. Tercera Jornada de Actualización Técnica para Profesionales “Fertilidad 2001”. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. INPOFOS Cono Sur. pp. 8-12.
- Martínez JM, Galantini JA, Landriscini MR. 2015. Eficiencia en el uso del nitrógeno del trigo en la región semiárida de Buenos Aires (Argentina): efectos de la dosis y momento de aplicación. *Agriscientia*, 32: 15 - 27.

- Mistele B, Schmidhalter U. 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *European Journal of Agronomy*, 29: 184 – 190.
- Morón A, Quincke A. 2010. Avances de resultados en el estudio de la calidad de los suelos en agricultura en el departamento de Soriano. INIA. Uruguay. Jornada Técnica. El efecto de la agricultura en la calidad de los suelos y fertilización de cultivos. Colonia, Uruguay. *Actividades de difusión*, 605: 5 - 9.
- Peralta NR, Barbieri P, Gowland T, Aparicio V, Costa JL. 2015. Agricultura de precisión: dosis variable de nitrógeno en cebada. *Ciencia del suelo (Argentina)*, 33(1): 131 – 137.
- Pierce FJ, Rice CW. 1988. Crop rotations and its impact on efficiency of water and nitrogen use. En: Hargrove WL (Ed.). *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. Madison, Wisconsin, USA. ASA Spec. Publ. 51 ACA, CSSA, and SSSA. pp. 21-42.
- Povh FP, Molin JP, Gimenez LM, Pauletti V, Molin R, Salvi JV. 2008. Comportamento do NDVI obtido por sensor óptico em cereais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 43: 1075 - 1083.
- Raun WR, Solie JB, Stone ML, Martin KL, Freeman KW, Mullen RW, Zhang H, Schepers JS, Johnson GV. 2005. Optical sensor-based algorithm for crop nitrogen fertilization. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 36: 2759 - 2781.
- Raun WR, Solie JB, Johnson GV, Stone ML, Whitney RW, Lees HL, Sembiring H, Phillips SB. 1998. Micro-variability in soil test, plant nutrient, and yield parameters in bermudagrass. *Soil Science Society of America Journal*, 62: 683 – 690.
- Ravier C, Quemada M, Jeuffroy MH. 2017. Use of a chlorophyll meter to assess nitrogen nutrition index during the growth cycle in winter wheat. *Field Crops Research*, 214: 73 – 82.
- Reussi N, Echeverría, HE, Sainz Rozas H. 2012. Stability of foliar nitrogen:sulfur ratio in spring red wheat and sulfur dilution curve. *Journal of Plant Nutrition*, 35: 990 - 1003.
- Rodriguez D, Fitzgerald GF, Belford R, Christensen LK. 2006. Detection of nitrogen deficiency in wheat from spectral reflectance indices and basic crop eco-physiological concepts. *Australian Journal of Agricultural Research*, 57: 781 – 789.

- Sadras VO, Hayman PT, Rodriguez D, Monjardino M, Bielich M, Unkovich M, Mudge B, Wang E. 2016. Interactions between water and nitrogen in Australian cropping systems: physiological agronomic, economic, breeding and modelling perspectives. *Crop & Pasture Science*, 67: 1019 - 1053.
- Sadras VO, Cassman KGGP, Hall AJ, Bastiaanssen WGM, Laborte AG, Milne AE, Sileshi G, Steduto P. 2015. Yield gap analysis of field crops: Methods and case studies. P. FAO Water Reports No. 41, Rome, Italy.
- Sadras VO, Lawson C. 2013. Nitrogen and water-use efficiency of Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *European Journal of Agronomy*, 46: 34 - 41.
- Salvaghiotti F, Castellarín JM, Miralles DJ, Pedrol HM. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. *Field Crop Research*, 113: 170 – 177.
- Samborski SM, Tremblay N, Fallon E. 2009. Strategies to make use of plant sensors based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy Journal*, 101: 800 - 816.
- Shiratsuchi L, Ferguson R, Shanahan J, Adamchuk V, Rundquist D, Marx D, Slater G. 2011. Water and nitrogen effects on active canopy sensor vegetation indices. *Agronomy Journal*, 103: 1815 – 1826.
- Sinclair TR, Horie T. 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis, and crop radiation use efficiency: a review. *Crop Science*, 29: 90 – 98.
- Solie JB, Raun WR, Stone ML. 1999. Submeter spatial variability of selected soil and bermudagrass production variables. *Soil Science Society of America Journal*, 63: 1724 – 1733.
- Stickse E, Mair FX, Retzer F, Fischbeck G. 1999. Nitrogen uptake and utilization in winter wheat under different fertilization regimes with particular reference to main stems and tillers. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 183: 47 – 52.
- Wingeyer AB, Amado T, Pérez-Bidegain M, Studdert GA, Perdomo Varela CH, Garcia FO, Karlen DL. 2015. Soil quality impacts of current South American. *Sustainability*, 7: 2213 – 2242.

- Wright DL, Rasmussen VP, Ramsey RD, Baker DJ, Ellsworth JW. 2004. Canopy reflectance estimation of wheat nitrogen content for grain protein management. *GIScience and Remote Sensing*, 41: 287 - 300.
- Yao X, Zhao B, Tian YC, Liu XJ, Ni J, Cao WX, Zhu Y. 2014. Using leaf dry matter to quantify the critical nitrogen dilution curve for winter wheat cultivated in eastern China. *Field Crops Research*, 159: 33 - 42.
- Yue SC, Meng QF, Zhao RF, Li F, Chen XP, Zhang FS, Cui ZL. 2012. Critical nitrogen dilution curve for optimizing nitrogen management of winter wheat production in the North China Plain. *Agronomy Journal*, 104: 523 - 529.
- Zhao B, Ata-UI-Karim ST, Yao X, Tian Y, Cao W, Zhu Y, Liu X. 2016. A new curve of critical nitrogen concentration based on spike dry matter for winter wheat in eastern china. *PLoS ONE*, 11: 1 - 17.
- Ziadi N, Bélanger G, Claessens A, Lefebvre L, Cambouris AN, Tremblay N, Nolin MC, Parent LE. 2010. Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat. *Agronomy Journal*, 102: 241 - 250.
- Ziadi N, Brassard M, Bélanger G, Claessens A, Tremblay N, Cambouris AN, Nolin MC, Parent LE. 2008. Chlorophyll measurements and nitrogen nutrition index for the evaluation of corn nitrogen status. *Agronomy Journal*, 100: 1264 – 1273.
- Zillmann E, Graeff S, Link J, Batchelor WD, Claupein W. 2006. Assessment of cereal nitrogen requirements derived by optical on-the-go sensors on heterogeneous soils. *Agronomy Journal*, 98: 682 - 690.