

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE AGRONOMÍA**



**ESTUDIO DE RASGOS AGRONÓMICOS Y FISIOLÓGICOS DEL TRIGO  
INVERNAL (*TRITICUM AESTIVUM L.*) BAJO DIFERENTES DOSIS DE  
FERTILIZACIÓN NITRÓGENADA**

**POR**

**CRISTIAN ANTONIO CIFUENTES BADILLA**

**MEMORIA PRESENTADO A LA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE**

**2023**

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**ESTUDIO DE RASGOS AGRONÓMICOS Y FISIOLÓGICOS DEL TRIGO  
INVERNAL (*TRITICUM AESTIVUM L.*) BAJO DIFERENTES DOSIS DE  
FERTILIZACIÓN NITRÓGENADA**

**POR**

**CRISTIAN ANTONIO CIFUENTES BADILLA**

**MEMORIA PRESENTADO A LA  
FACULTAD DE AGRONOMÍA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO AGRÓNOMO.**

**CHILLÁN – CHILE**

**2023**

Aprobada por:

Profesor Asistente, Abdelhalim Khaled E.

Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

---

Guía

Profesor Asistente, Miguel Garriga C.

Biólogo, Dr. Cs.

---

Asesor

Profesor Asociado, Nelson Zapata S. M.

Ing. Agrónomo, Dr. Cs.

---

Asesor

**TABLA DE CONTENIDOS**

|                             | <b>Página</b> |
|-----------------------------|---------------|
| RESUMEN .....               | 1             |
| SUMMARY .....               | 1             |
| INTRODUCCIÓN .....          | 2             |
| MATERIALES Y MÉTODOS .....  | 6             |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 10            |
| CONCLUSIONES. ....          | 19            |
| REFERENCIAS.....            | 20            |
| ANEXOS.....                 | 26            |

## INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

|                                                                                                                                                                                          | <b>Página</b> |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Figura 1 Índice de área foliar, fracción del PAR interceptada y PAR interceptado acumulado.....                                                                                          | 12            |
| Figura 2 Seguimiento de crecimiento (directo vs indirecto) y predicción de rendimiento.....                                                                                              | 13            |
| Figura 3 Seguimiento del contenido de clorofila en los dos tratamientos durante la temporada.....                                                                                        | 14            |
| Figura 4 Rasgos agronómicos y componentes de rendimiento.....                                                                                                                            | 15            |
| Figura 5 Componentes de calidad.....                                                                                                                                                     | 17            |
| Anexo 1 Temperaturas mínimas, máximas y precipitación acumulada de las temporadas 2020 – 2023.....                                                                                       | 26            |
| Anexo 2 Diseño experimental en la estación experimental “El Nogal”, Facultad de agronomía, Universidad de Concepción, Campus Chillán.....                                                | 26            |
| Anexo 3 Resultados del análisis químico del suelo en el sitio experimental.                                                                                                              | 27            |
| Anexo 4 Toma de mediciones de interceptación de luz con el ceptómetro: (a) mediciones del PAR incidente en la parte superior del dosel y (b) mediciones del PAR reflejada del dosel..... | 27            |
| Anexo 5 Correlación entre biomasa observada y esperada.....                                                                                                                              | 28            |
| Anexo 6 Catálogo de la variedad Maxwell.....                                                                                                                                             | 28            |
| Anexo 7 Rendimiento (ton ha <sup>-1</sup> ) de Maxwell en comparación con las variedades Kumpa INIA y Dollinco-INIA para diferentes localidades. Promedio de 4 temporadas.....           | 29            |

## **ESTUDIO DE RASGOS AGRONÓMICOS Y FISIOLÓGICOS DEL TRIGO INVERNAL (*TRITICUM AESTIVUM* L.) BAJO DIFERENTES DOSIS DE FERTILIZACIÓN NITRÓGENADA**

### **STUDY OF AGRONOMIC AND PHYSIOLOGICAL TRAITS OF WINTER WHEAT (*TRITICUM AESTIVUM* L.) UNDER DIFFERENT DOSES OF NITROGEN FERTILIZATION**

**Palabras índice adicionales: Trigo, nitrógeno, PAR, proteína, gluten.**

#### **RESUMEN**

El trigo (*Triticum aestivum* L.) es el principal cereal cultivado en Chile. El nitrógeno (N) se considera uno de los factores más importantes que determinan la producción de cultivos, dado que forma parte de los componentes esenciales de las células vegetales, desde las proteínas hasta la clorofila y los genes. El objetivo de esta tesis fue estudiar el efecto de dos dosis de N (baja y alta) sobre el rendimiento de granos, componentes del rendimiento, rasgos fisiológicos y calidad de grano de un cultivar de trigo invernal de alto rendimiento (cv. Maxwell). El ensayo se llevó a cabo en la estación “El Nogal”, de la Universidad de Concepción ubicada en Chillán durante la temporada 2022-2023. Se estableció el ensayo bajo dos tratamientos de nitrógeno, Alto N con 172 kg N ha<sup>-1</sup> y bajo N con 103 kg N ha<sup>-1</sup>. Se evaluó el incremento de biomasa aérea de manera directa (muestras destructivas) e indirecta (con ceptómetro) y en la cosecha se determinó los rasgos agronómicos y los rasgos de la calidad del grano. La dosis de N incrementó la fracción del PAR interceptado ( $f$ ) y el PAR interceptado acumulado (IPAR) y lo que se atribuye a un índice de área foliar mayor. Además, mejoró y aumentó la duración del área foliar activa aumentando con ello la producción de biomasa y el rendimiento y todos sus componentes. De la misma manera al incrementar el N aumentaron los parámetros de calidad de la harina.

#### **SUMMARY**

Wheat (*Triticum aestivum* L.) is the main cereal grown in Chile. Nitrogen (N) is considered one of the most important factors determining crop production

because it is part of the essential compounds of plant cells, from proteins to chlorophyll and genes. This thesis aimed to study the effect of low and high N rates on grain yield, yield components, physiological traits, and grain quality of a high-yielding winter wheat cultivar (Maxwell). The trial was conducted at the "El Nogal" station of the University of Concepción during the 2022-2023 season. The experiment was conducted under two nitrogen treatments, control with 172 kg N ha<sup>-1</sup> and stress with 103 kg N ha<sup>-1</sup>. Aerial biomass development was evaluated directly (by destructive sampling) and indirectly (with a ceptometer), and agronomic and flour quality traits were determined at harvest. The high dose of N increased the fraction of the intercepted PAR ( $f$ ) and the accumulated intercepted PAR (IPAR), which is attributed to a higher leaf area index. In addition, the duration of the active leaf area improved and increased, and therefore biomass production, yield, and all yield components increased. In the same way, when increasing the N, the flour quality traits increased.

## INTRODUCCIÓN

El trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) se desarrolló hace unos 12 mil años en el Medio Oriente (Leonard y Martin, 1963). Es una planta alohexaploide ( $2n = 6x = 42$ ; AABBDD) y se originó por hibridación entre un trigo tetraploide (*Triticum turgidum*  $2n = 4x = 28$ ; AABB) y la gramínea diploide silvestre *Aegilops tauschii* ( $2n = 14$ ; DD) (Cooper, 2015).

La base de la alimentación de la sociedad actual son los cereales como el trigo, el maíz y el arroz. El trigo harinero, es una planta anual de crecimiento invernal o primaveral que, debido a su gran diversidad genética, puede crecer y reproducirse en ambientes muy diversos (Iglesias, 1996). Este cereal proporciona el 20% de las calorías y proteínas consumidas por los humanos, ya sea directamente como pan, o indirectamente por vía de alimentación animal (Reynolds *et al.*, 2012).

El cultivo de trigo irrumpió en 2020/21 con una producción mundial de 776,5 millones de toneladas y una superficie total a cosechar mundialmente de 248,5 millones de hectáreas (Jobet y Ortiz, 2021; FAOSTAT, 2023) lo que lo convierte en el cereal más cultivado del mundo siguiéndolo el maíz y el arroz. En Chile es el cultivo más importante en términos de volumen, superficie y valor económico

de la producción. Se cultiva principalmente en las regiones de Maule, Ñuble, Biobío y La Araucanía, donde se concentra más del 75% de la producción y superficie de siembra, generando gran cantidad de empleos debido al enorme requerimiento de mano de obra necesario para cultivar 226 mil hectáreas (205 mil de trigo harinero y 21 mil de trigo candeal) en la temporada 2020/21 (Jobet y Ortiz, 2021).

El rendimiento del trigo depende de muchos factores, como los climáticos, que no son controlables y constituyen la principal limitante del rendimiento, y los relacionados al manejo del cultivo como el correcto manejo agronómico del suelo, riego, nutrientes, etc., que pueden ser controlados por el productor (del Pozo *et al.*, 2019, 2022). Entre los factores controlables, es muy importante la fertilización con nitrógeno (N), ya que este nutriente mineral es esencial para los cultivos y su ausencia imposibilita completar el ciclo de desarrollo de las plantas (Taiz y Zeiger, 2002). El N es esencial para la síntesis de proteínas, ácidos nucleicos y clorofila en la planta, cumpliendo un rol preponderante en varios procesos fisiológicos durante todo el desarrollo de esta, además, promueve la absorción del potasio y el fósforo (Bloom, 2015). El N requerido para la síntesis de proteínas se acumula en el grano de trigo en desarrollo principalmente a partir de la removilización del N que ha sido asimilado y acumulado previamente en la hoja. Esta removilización se produce a través del floema principalmente en forma de aminoácidos (Feller y Fischer, 1994). Agronómicamente, los componentes del rendimiento espigas por hectárea, granos por espiga y peso de grano se ven afectados por la disponibilidad de N. Además, se ve afectado el valor nutricional (Oropesa, 2012). Dreccer *et al.* (2003) señala que para producir 100 Kg de grano de trigo es necesario que el cultivo absorba 3 Kg de N.

La harina de trigo es capaz de formar una masa firme, capaz de retener gases y dar productos aireados y livianos después de su cocción. Esta propiedad está relacionada con su composición química, especialmente proteica, y particularmente el complejo proteico denominado gluten (León y Rosell, 2007). La proporción de proteína se relaciona directamente con la absorción de N inorgánico del suelo, ya sea de forma natural o química, que luego se transforma en N orgánico en el grano. Por lo tanto, es muy importante aplicar fertilizante nitrogenado durante el período de siembra o macollamiento, este es el mejor

momento para aumentar el rendimiento y la calidad al mismo tiempo. La aplicación en el período anterior o durante la floración no siempre implica reacciones proteicas, depende en gran medida del ambiente (Cuniberti, 1996).

Para los productores y los molinos, la proteína es importante porque afecta los precios del grano, ya que es parte del estándar de comercialización, con bonificaciones y descuentos por encima o por debajo de la base de comercialización del 11%. Por otro lado, el molinero está más preocupado por el contenido de gluten que por el contenido de proteína, porque las proteínas pueden desnaturalizarse por el almacenamiento inadecuado o el secado del grano a altas temperaturas (Cuniberti, 2001). Debido a lo anterior, el gluten se ha convertido en un parámetro importante en el mercado interno.

Durante las etapas de desarrollo vegetativo y reproductivo es muy importante que no haya una deficiencia de N en la planta, dado que esto disminuiría el metabolismo del cultivo, lo que conlleva a una reducción en la producción final (Suarez, 2012). En el trigo la tasa de absorción de N varía a lo largo de su desarrollo, lo que está determinado por la tasa de crecimiento y la composición de nutrientes de su nuevo tejido e influenciado por la disponibilidad de nutrientes y agua, la competencia entre plantas y los factores ambientales que regulan las condiciones de crecimiento de los cultivos (Dreccer *et al.*, 2003). Debido a ello, la dosis de N y el momento de aplicación debe ser el adecuado según su desarrollo para lograr un rendimiento óptimo (Oropesa, 2012). El mayor rendimiento se obtiene utilizando más N al principio del macollado o durante el mismo y una mayor cantidad durante el desarrollo del tallo. El aporte de N demasiado temprano provoca un exceso de espigas pequeñas y estériles. Por otro lado, una fertilización tardía reduce la fertilidad de las espigas (Ortiz-Monasterio, 2002).

La deficiencia de N provoca que el área foliar se reduzca, dado que la expansión de la hoja se ve afectada por la falta de este nutriente generándose una hoja más pequeña, lo que conlleva a una reducción en la intercepción de la luz y, además, disminuye la concentración de clorofila (Ortiz-Monasterio, 2002). El déficit de N se manifiesta como macollaje deficiente, una disminución en el número de espigas por unidad de área y el número de granos por espiga, por otro lado, hay un aumento en el contenido relativo de proteína en el grano, debido a que durante el proceso de llenado de grano se reduce la importación de

carbohidratos al grano (Mengel y Kirkby, 1982). Mientras que el consumo excesivo de N en el cultivo puede provocar condiciones adversas para el rendimiento del trigo, tales como: prolongación de la etapa vegetativa, retraso de la maduración, disminución de la resistencia al frío y al encamado, un aumento en la susceptibilidad a enfermedades y, en casos severos, causa toxicidad que conduce a la necrosis en los tejidos (Hirzel, 2004).

Rendimiento biológico es la materia (biomasa aérea) acumulada por unidad de área, mientras que, el rendimiento de grano o semilla es considerado como la materia seca acumulada solamente en el grano o semilla (Escalante y Kohashi, 1993). La toma de muestras de biomasa proporciona información sobre la tasa de crecimiento del cultivo, tamaño de órganos, área foliar y repartición de la materia seca entre los componentes del dosel, además sirve para poder calcular la eficiencia en el uso de la radiación, y es un punto de partida para las mediciones morfológicas y los análisis de nutrientes o metabolitos (ejemplo, N, P, proteínas, carbohidratos solubles en agua) (Mullan y Pietragalla *et al.*, 2012). El muestreo de biomasa aérea es una medida destructiva y cronológica, dado que hay que cortar los tallos lo más cerca posible del suelo, evitando incluir suelo y raíces. En condiciones de estrés (hídrico o deficiencia de N) el corte de plantas puede ser difícil, ya que se desraízan muy fácilmente. Por otro lado, en parcelas experimentales se requiere un tamaño suficientemente grande que permita coleccionar muestras periódicamente y correlacionar estos resultados con un rendimiento representativo de la parcela. Por lo anterior los investigadores recomendaron usar métodos indirectos para estimar el desarrollo de biomasa aérea y el área foliar de las plantas como el uso de la radiación fotosintéticamente activa (PAR) interceptada (Mullan y Pietragalla *et al.*, 2012). Se logra predecir el potencial de producción de biomasa aérea (BA) y rendimiento de granos (RG) en función del PAR interceptado por el cultivo, desde emergencia (e) a cosecha (c), y el peso seco de la BA acumulada y su partición según las siguientes ecuaciones (Sadras *et al.*, 2016):

$$BA = \sum_e^c (f \times PAR_i) \times EUR$$

$$RG = \sum_e^c (f \times PAR_i) \times EUR \times IC$$

Donde  $f$  es la fracción del PAR interceptado por el cultivo, EUR ( $\text{g MJ}^{-1}$ ) es la eficiencia del uso de radiación y IC ( $= RG/BA$ ) es el índice de cosecha.

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de diferentes dosis de N sobre los rasgos fisiológicos, los rasgos agronómicos y componentes del rendimiento, y calidad de grano de un cultivar de trigo de alto potencial de rendimiento.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Descripción del sitio experimental y el manejo agronómico

El ensayo se llevó a cabo en la Estación Experimental “El Nogal” ( $36^{\circ} 35' 59.4''$  S  $72^{\circ} 05' 03.0''$  O a 133 m.s.n.m) de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Concepción, Campus Chillán, Chillán, Región del Ñuble. En esta región el promedio de la temperatura mínima y máxima fue  $6,18^{\circ}\text{C}$  y  $21,40^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, y las precipitaciones acumuladas fueron 654.3 mm durante el ciclo del cultivo (INIA, 2023; Anexo 1). Se utilizó el cultivar de trigo invernall Maxwell de origen francés que fue introducido en Chile en el año 2004 y liberado comercialmente el año 2012 (Jobet *et al.*, 2017). Se estableció en un diseño de bloques completos, con dos tratamientos de nitrógeno, control con  $172 \text{ kg N ha}^{-1}$  (N+) y estrés con  $103 \text{ kg N ha}^{-1}$  (N-), y cuatro réplicas (parcelas) por tratamiento (Anexo 2). Previo al establecimiento, se realizó un análisis de suelo del sitio experimental (Anexo 3). La siembra se realizó el 8 de junio de 2022 empleando una sembradora MF 400 (Massey Ferguson, USA) y con una dosis de semilla de  $250 \text{ kg ha}^{-1}$ . Se aplicó  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de Mezcla NPK (17-20-20) en la siembra que con lleva la primera dosis de N ( $34 \text{ kg N ha}^{-1}$ ). La segunda dosis de nitrógeno se aplicó a fines de agosto en la etapa de plántulas, Z1.6 en la escala Zadoks (Zadoks *et al.*, 1974) y consistió en  $69 \text{ kg N ha}^{-1}$  (150 kg de urea). Para el control de malezas se usaron los herbicidas MCPA  $1 \text{ L ha}^{-1}$  y Aliado  $0,008 \text{ kg ha}^{-1}$ , los que se aplicaron una semana antes de la tercera aplicación de nitrógeno al ensayo N+, que fue en la etapa Z2.4 (inicio de macollaje) con  $69 \text{ kg N ha}^{-1}$  (150

kg de urea). El tamaño de cada unidad experimental fue de 1,2 m de ancho por 5 m de largo, en total 6 m<sup>2</sup> por parcela, con 7 hileras y un espacio entre ellas de 20 cm. Para evitar el estrés hídrico se aplicó riego suplementario en las etapas críticas del cultivo, ej: inicio del macollaje (Z2.4) y llenado de granos (Z7.3) con 60 mm de agua.

## Evaluaciones

**Evolución de la biomasa acumulada:** Para el seguimiento de la acumulación de biomasa aérea se hicieron muestreos destructivos cada dos semanas desde Z1.5 (etapa de plántula) hasta grano pastoso temprano (Z8.5). Se cortaron a ras de suelo 30 cm lineales de una hilera guardada, luego se dejaron secar por 48 horas a 60°C y finalmente, se pesaron en una balanza.

**Evaluación de la radiación interceptada:** La interceptación del PAR se evaluó cada dos semanas desde etapa de plántulas (Z1.5) hasta grano pastoso temprano (Z8.5) con un sensor Ceptómetro Decagon AccuPAR LP-80 (Decagon devices, USA). Todas las mediciones se realizaron en días despejados desde 12:00 hrs. a 14:00 hrs. En cada parcela se realizaron tres evaluaciones del PAR interceptado en la parte superior del dosel, una medición del PAR transmitido al nivel del suelo y una medición PAR reflejado en la parte superior del dosel (Anexo 4).

Los datos obtenidos fueron utilizados para estimar la producción de biomasa aérea y rendimiento de granos según las siguientes ecuaciones (Mullan y Pietragalla, 2012):

$$\text{Fracción del PAR interceptada } (f) = ((A - B) - C) / (A - B)$$

Donde  $f$  es la fracción del PAR interceptada por el cultivo,  $A$  es la PAR incidente en la parte superior del dosel,  $B$  es la PAR reflejada del dosel y  $C$  es la PAR transmitida en la parte inferior del dosel. Los valores de  $f$  son entre 0 y 1.

El PAR interceptado por el cultivo corresponde a (Cárcova *et al.*, 2003):

$$\text{PAR interceptado } (IPAR) = f * PAR_i$$

Donde  $PAR_i$  es el PAR incidente. Los datos de la radiación solar diaria se obtuvieron por la página agrometeorología del INIA (Agromet, 2023) y se calculó el  $PAR_i$  como un 50% de la radiación solar total. Luego el PAR interceptado

acumulado se calculó desde emergencia hasta el estadio de grano pastoso temprano (Z8.5).

Con lo anterior se obtuvo la eficiencia de uso de radiación (EUR) según la siguiente ecuación (Mullan y Pietragalla, 2012):

$$EUR = \frac{BA}{IPAR \text{ acumulado}}$$

Donde BA es la biomasa área de 1 m<sup>2</sup> en la etapa de grano pastoso temprano (Z8.5).

Luego, se puede predecir el potencial de producción de biomasa aérea y rendimiento de granos según las siguientes ecuaciones (Cárcova *et al.*, 2003):

$$BA = IPAR \text{ acumulado} \times EUR \quad \text{y} \quad RG = IPAR \text{ acumulado} \times EUR \times IC$$

En donde RG es el rendimiento de grano (Kg ha<sup>-1</sup>) e IC es el índice de cosecha (peso de granos/peso de la biomasa área) y se toma en cuenta que el índice de cosecha no alcanza el teórico del 60% (Austin, 1997), por eso se calcula el rendimiento esperado con un IC de 45%.

**Índice de área foliar:** Se utilizó la ley de Beer para estimar el índice de área foliar (del Pozo *et al.*, 2022):

$$C = A \times e^{(-K \times IAF)}$$

Y luego la ecuación se transformó a:

$$IAF = -\ln\left(\frac{C}{A}\right) \times 1/K$$

Donde IAF es el índice de área foliar, K es el coeficiente de extinción del dosel (más información de K está disponible en el manual de Decagon AccuPAR LP-80), y C/A es la transmitancia de la luz.

**Evaluación del contenido de clorofila:** Se determinó el contenido de clorofila mediante el medidor de clorofila Hansatech CL-01 (Hansatech, UK) cada dos semanas desde Z1.5 hasta Z8.5. Todas las mediciones se realizaron desde 12:00 hrs. a 14:00 hrs. Las mediciones se llevaron a cabo en la última hoja expandida de cinco plantas al azar en cada parcela.

**Características agronómicas:** La altura máxima de la planta se tomó en madurez desde el suelo hasta el extremo de la espiga excluyendo las aristas

(AP). En la cosecha (9 de enero, 2023), el número de espigas por metro cuadrado (NEM), el peso seco de la biomasa aérea (BA), el rendimiento de grano (RG) se obtuvo de las tres hileras centrales de la parcela. El índice de cosecha (IC) se obtuvo con la fórmula  $RG/BA$ . El número de granos por espiga (NGE) y el peso de 1.000 granos (PMG) se determinaron en una muestra de 25 espigas tomadas al azar de las mismas hileras cosechadas. Luego se determinó el número de granos por metro cuadrado (NGM).

### **Análisis de calidad de harina:**

Los análisis de calidad se realizaron en el Laboratorio Calidad de Trigo del Centro de Investigaciones Regional Carillanca del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (CIR Carillanca, INIA) según la Norma decreto 63/2014: 1) la humedad de los granos se obtuvo con la Termobalanza Brabender; 2) el número de caída se determinó con el instrumento FN1700 Perten; 3) el peso de hectolitro de los granos se determinó con la balanza Schopper; y 4) el gluten húmedo, gluten seco y gluten index de los granos se determinaron utilizando un equipo Glutomatic 2200 Perten.

Se determinó la proteína cruda de los según el método de Kjeldahl en el Laboratorio de nutrición animal, de la Facultad de Agronomía, de la Universidad de Concepción.

### **Análisis estadístico**

Se realizaron análisis de normalidad (prueba de Shapiro–Wilk) para analizar cuánto difiere la distribución de los datos observados respecto a lo esperado, si procediesen de una distribución normal con la misma media, desviación típica y de homocedasticidad (prueba de Levene), para verificar la homogeneidad de las varianzas. Para identificar posibles diferencias entre los regímenes de nitrógeno (N- vs. N+) en los rasgos agronómicos y fisiológicos se utilizó una prueba t de muestra independiente, para  $P < 0,05$ . Los datos se analizaron utilizando el paquete estadístico SPSS 23 (SPSS Inc., Chicago, IL, EE. UU.). Se crearon figuras del desarrollo de biomasa, índice de área foliar, PARI y comparaciones entre regímenes de nitrógeno (N- vs. N+) usando SigmaPlot 11.0 para Windows (Sysat Software Inc., Point Richmond, CA, EE. UU.) y Excel (Microsoft Corporation, EE.UU.).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Seguimiento de crecimiento y contenido de clorofila

La absorción y utilización de nitrógeno por los cultivos como el trigo están determinadas por factores como la actividad y longitud del sistema radicular, la intensidad de absorción de nitrato, actividad de nitrato reductasa, pérdidas del nitrógeno (N) debido a las características del suelo, lixiviación y producción de carbohidratos (Fathi *et al.*, 1997). La eficiencia del uso de radiación (la cantidad de biomasa producida por la radiación absorbida) está determinada por la cantidad de N foliar por unidad de área foliar.

El aumento de las dosis de N mejora y aumenta la duración del área foliar y la acumulación de la biomasa (Yang *et al.*, 2001; Basso *et al.*, 2005; Ishfaq *et al.*, 2018). Al nivel celular, el aumento de N mejora el tamaño y el número de las células, además mejora la fracción de radiación interceptada por el cultivo ( $f$ ) y el índice del área foliar (IAF) (Figura 1a y b) (Ghani *et al.*, 2000; Semenov *et al.*, 2007). Se observa que luego de un mes aproximadamente desde la tercera aplicación de nitrógeno en el tratamiento N+ se nota considerablemente la diferencia del IAF,  $f$  y el PAR interceptado (IPAR) hasta la madurez fisiológica del cultivo (Figura 1a-c). La  $f$  e IPAR por la planta son de los factores más importantes de la producción de la biomasa del cultivo (Monteith, 1981; Pradhan *et al.*, 2018). La dosis alta de N afectó positivamente ambos parámetros (Figura 1 b y c). Los niveles más altos de  $f$  e IPAR se atribuyen a un IAF más alto (Han *et al.*, 2008; Bassu *et al.*, 2011).

En la Figura 2a, la acumulación de la biomasa aérea durante el ciclo del cultivo evaluado de forma directa (destructiva) tanto como indirecta (con el ceptómetro), fue afectada de manera positiva por el aumento de N. La aplicación de dosis alta de N conduce a una adecuada formación de macollos, así como a un crecimiento y desarrollo del trigo (Ishfaq *et al.*, 2018). También podría deberse a que el aumento de la dosis de N provoca un aumento en la tasa fotosintética (Tranaviciene *et al.*, 2007). Mayor área foliar (Figura 1a) da como resultado una mayor producción total de materia seca (Bali *et al.*, 1991; Kumar y Sharma, 1999). Lo más interesante en nuestro estudio es que las medidas directa e indirecta de la acumulación de biomasa fueron muy parecidas (Figura 2a) en todas las etapas fenológicas del cultivo y las correlaciones entre las dos

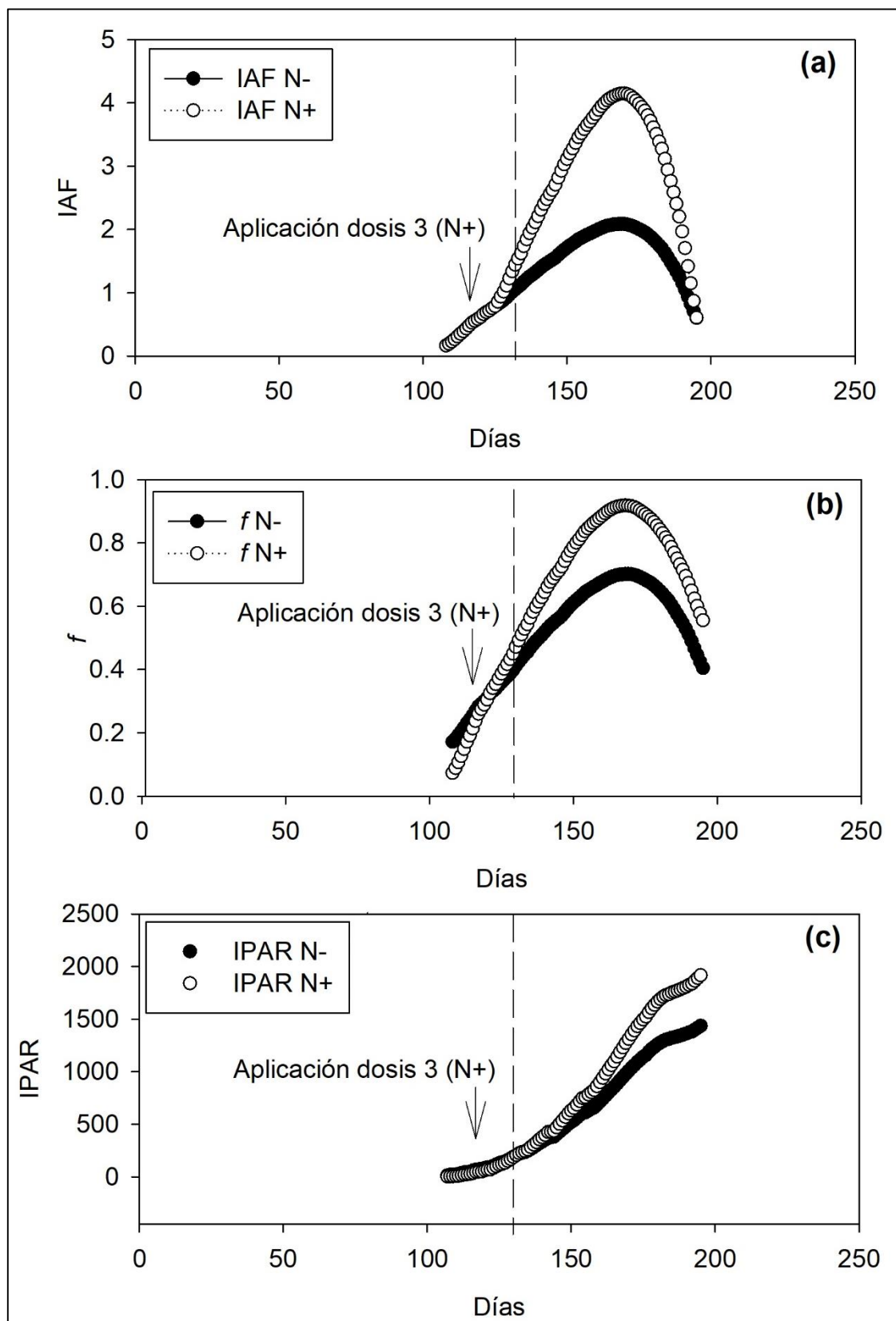
metodologías fueron altamente significativas (Anexo 5), lo que muestra la eficiencia de las metodologías indirectas para evaluar el desarrollo de la biomasa durante el ciclo sin perder la materia del cultivo en la cosecha de muestras destructivas (Mullan y Pietragalla *et al.*, 2012). Además, el rendimiento esperado estimado de las medidas del PAR interceptado muestra valores muy parecidos al rendimiento observado (Figura 2b).

El contenido de N en las células de las hojas está directamente relacionado con la capacidad fotosintética de la hoja y el metabolismo de los carbohidratos, por lo que la estimación de la absorción de nitrógeno puede evaluarse mediante la cantidad de clorofila (Tranaviciene *et al.*, 2007). En la Figura 3 se ve claramente el efecto de la alta dosis de N en la mejora y el aumento de la duración del área foliar activa, mientras que la dosis baja de N aceleró la senescencia (Ishfaq *et al.*, 2018).

### **Rasgos agronómicos y componentes del rendimiento**

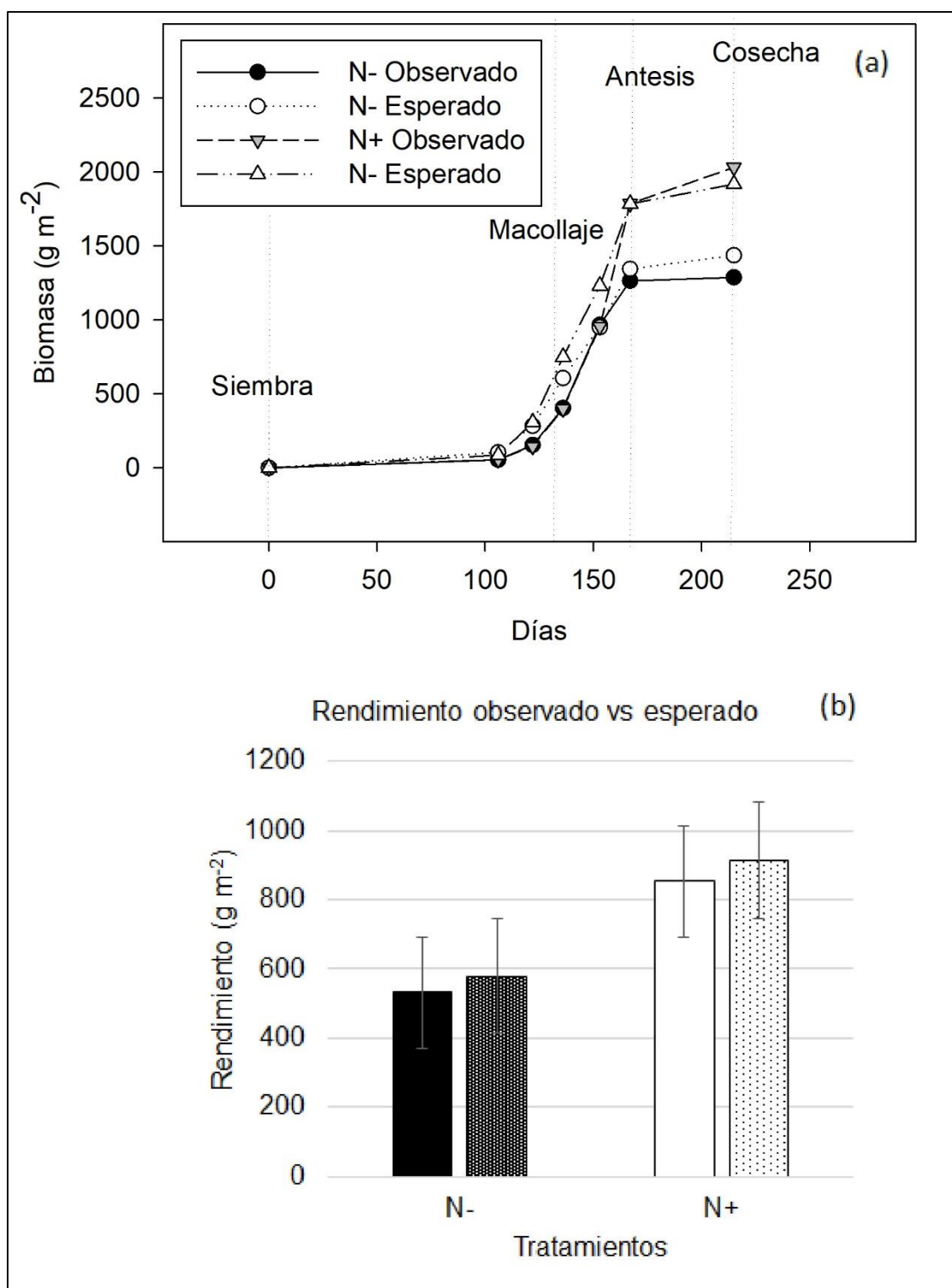
El nitrógeno es un nutriente importante para el desarrollo de las plantas, la deficiencia de este reduce la producción y la calidad de los granos (Ishfaq *et al.*, 2018; Giménez *et al.*, 2020). La utilización de dosis elevadas de N permite la expresión del potencial de rendimiento de las variedades existentes en el mercado actual (Campillo *et al.*, 2007). En nuestro estudio la dosis alta de N aumenta la biomasa total y el rendimiento de granos y sus componentes excepto el índice de cosecha (Figura 4a-g). La biomasa total se define como la producción de toda la materia seca por unidad del cultivo. La producción de biomasa es dependiente de rasgos como la densidad de siembra, altura de la planta, número total de granos por espiga, número de granos por metro cuadrado y número de tallos fértiles (espigas) por metro cuadrado (Rahman *et al.*, 2014). El rendimiento económico en el caso del cultivo de trigo es el rendimiento de granos, que se define como el producto de la multiplicación del número total de los tallos fértiles por metro cuadrado por el número de granos por espiga (Hussain *et al.*, 2006; Ali *et al.*, 2009; Grijalva-Contreras *et al.*, 2016). La alteración de las prácticas de manejo (ej., fertilización y riego) o factores ambientales (ej., enfermedades y altas o bajas temperaturas) afecta la producción de la biomasa y el rendimiento de granos. Varios estudios han reportado el incremento de la producción de la biomasa total y el rendimiento de granos con el aumento de las

Figura 1: Índice de área foliar, fracción del PAR interceptada y PAR interceptado acumulado.



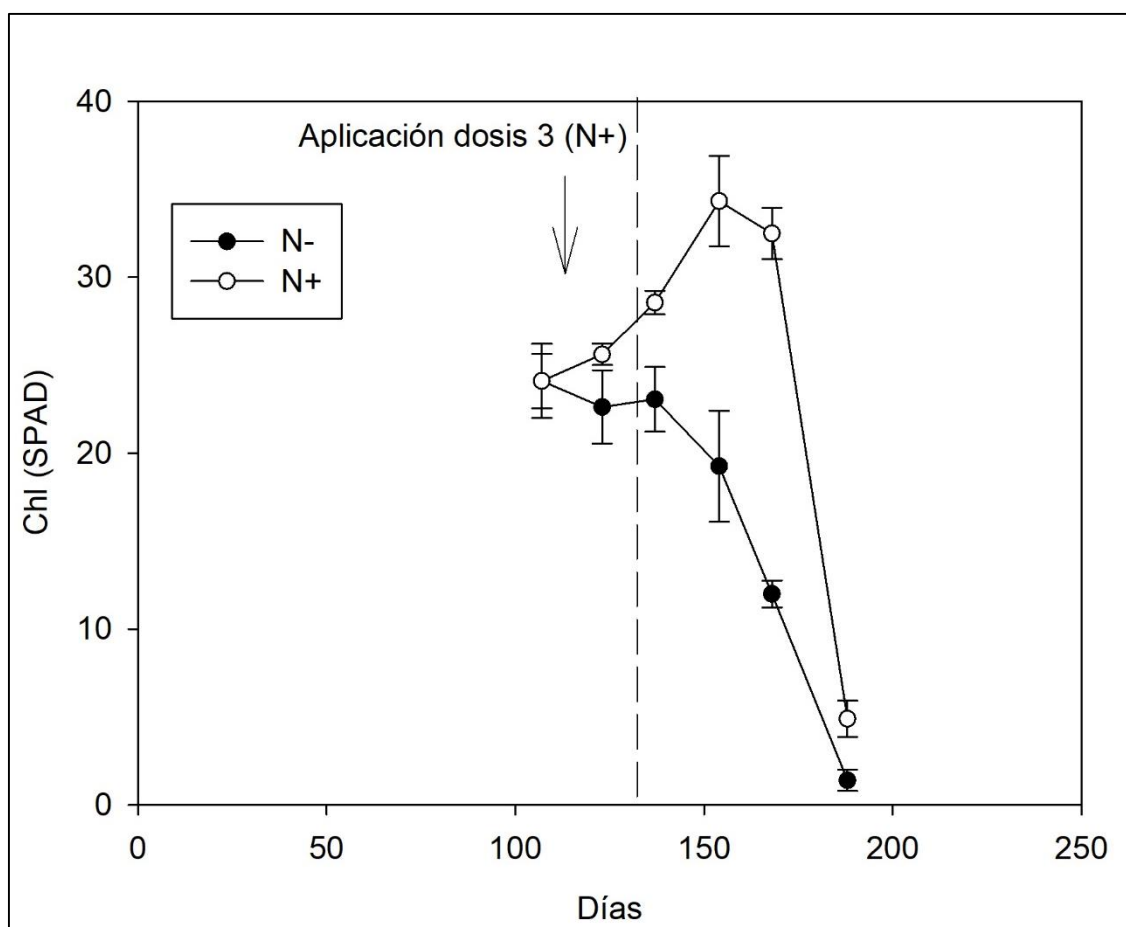
(a) IAF, índice de área foliar; (b)  $f$ , fracción del PAR interceptada y (c) IPAR acumulado, PAR interceptado acumulado.

Figura 2: Seguimiento de crecimiento (directo vs indirecto) y predicción de rendimiento.



(a) Curvas de crecimiento observada y esperadas en los tratamientos N- y N+; y (b) rendimiento granos observado vs. esperado. Los puntos negros representan N- y los puntos blancos representan N+. Las barras sólidas representan rendimiento observado y las barras punteadas el rendimiento esperado.

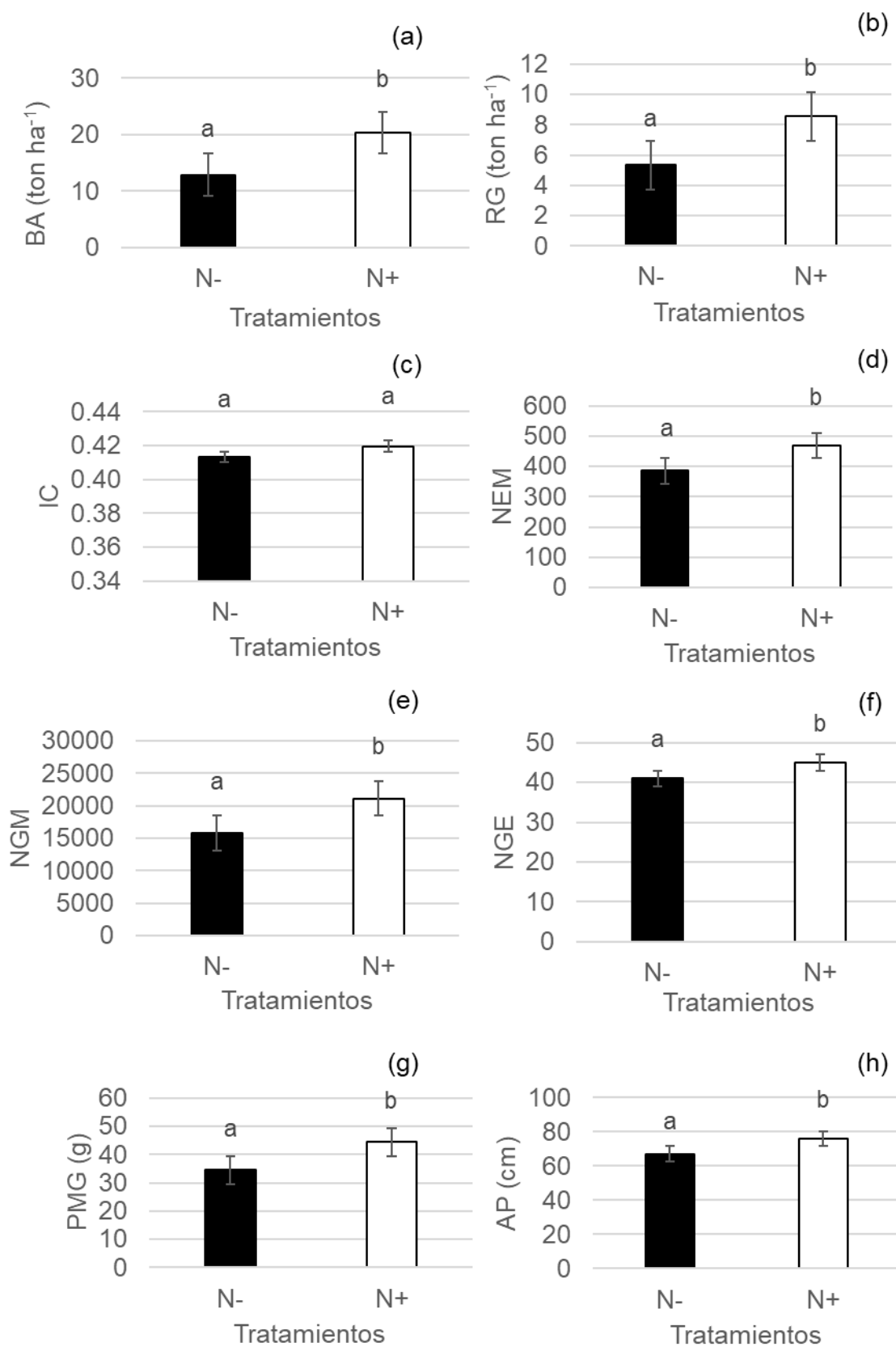
Figura 3: Seguimiento del contenido de clorofila en los dos tratamientos durante la temporada.



dosis de N (Hussain *et al.*, 2006; Ali *et al.*, 2009; Rahman *et al.*, 2014; Grijalva-Contreras *et al.*, 2016; Ishfaq *et al.*, 2018).

La aplicación de nitrógeno incrementó el número de tallos fértiles por metro cuadrado, el peso de mil granos, el número de granos por espiga y número de granos por metro cuadrado (Figura 4 d-g). En trigo, el número de espigas, espiguillas por espiga y peso del grano son los parámetros que principalmente afectan el rendimiento (Grijalva-Contreras *et al.*, 2016). Estos parámetros pueden verse muy influenciados por la correcta adición de nitrógeno y el estado hídrico de la planta. En este estudio se mantuvo el estado hídrico del cultivo en condiciones libres del estrés hídrico y por eso los riegos suplementarios fueron aplicados en las etapas críticas del ciclo del cultivo (es decir, en macollaje y llenado de granos).

Figura 4: Rasgos agronómicos y componentes de rendimiento.



(a) BA, Biomasa total; (b) RG, rendimiento de grano; (c) IC, índice de cosecha; (d) NEM, número de espigas por metro cuadrado; (e) NGM, número de granos por metro cuadrado; (f) NGE, número de granos por espiga; (g) PMG, peso de mil granos; y (h) AP, altura de planta.

Sinclair y Jamieson (2006), explican que el nitrógeno utilizado en las plantas de trigo juega un papel importante en el desarrollo de los antecios y, por lo tanto, en el rendimiento. Según las investigaciones de Langer y Liew (1973), donde se evaluaron los efectos de variar la suplementación de N aplicado en diferentes etapas de crecimiento del cultivo de trigo, revelaron que el número de espiguillas aumenta con el incremento de nitrógeno aplicado al cultivo, produciendo también un mayor número de hojas y, por ende, afectando el rendimiento. En cultivares actuales de trigo, el número de granos por metro cuadrado se encuentra mayormente correlacionado con el número de granos por espiga (Rahman *et al.* 2014). Ali *et al.* (2009), Rahman *et al.* (2014), y Grijalva-Contreras *et al.* (2016) evaluando diferentes dosis de nitrógeno sobre el rendimiento de grano, se llegó a la conclusión que el rendimiento de grano depende mayormente del peso de grano y el número de granos por metro cuadrado. Los resultados de Rahman *et al.* (2014) y Grijalva-Contreras *et al.* (2016) están en acuerdo con nuestro resultado (Figura 4e y g) donde los rendimientos más bajos estuvieron asociados con número y pesos bajos de los granos; y contrario a Ali *et al.* (2009), los mayores rendimientos fueron con granos de trigo con menor peso de granos y alto número de granos por metro cuadrado. En general, la dosis alta de N aumenta el crecimiento vegetativo del cultivo y por eso aumenta la altura de la planta (Figura 4h) (Khaliq *et al.*, 1999; Maqsood *et al.*, 2002).

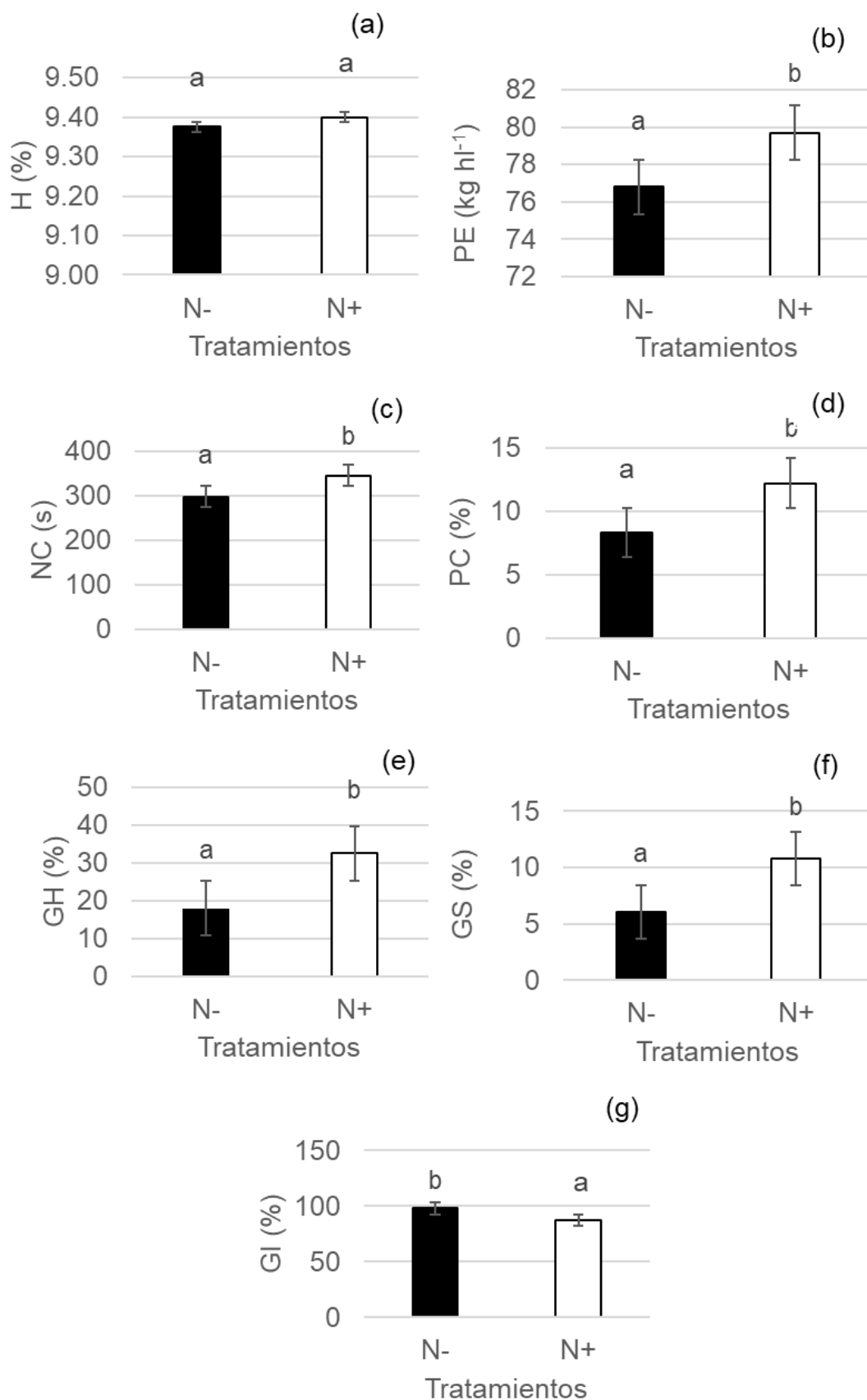
### **Parámetros de Calidad**

El contenido de humedad del grano en las dos dosis de N no muestra diferencias significativas, pero en general fueron bajos con promedio de 9,35% (Figura 5a). El ideal es que sea menor de 14,5%, con el fin de evitar que se produzcan enfermedades por exceso de humedad o que disminuya la calidad del trigo en el transcurso de la etapa de almacenamiento. (Ortega, 2013; Brach, 2017).

Según Fowler *et al.* (1990) la aplicación de N puede incrementar tanto el rendimiento como el contenido de proteína del grano. En general, al incrementar la dosis de N, aumenta el rendimiento y los parámetros de calidad industrial de la harina obtenida (peso hectolitro, % proteínas, gluten húmedo y gluten seco y número de caída) (Figura 5b-f) (Brach, 2017).

El peso hectolitro incrementó con la dosis alta del N (Figura 5b). Al contrario de nuestros resultados, Campillo *et al.* (2007) no encontraron diferencias

Figura 5: Componentes de calidad.



(a) H, humedad; (b) PH, peso hectolitro; (c) NC, número de caída; (d) PC, proteína cruda; (e) GH, gluten húmedo; (f) GS, gluten seco; y (g) GI, gluten índice.

significativas en el peso hectolitro en trigo invernal con el incremento de la dosis del N aplicado desde 0 hasta 300 kg ha<sup>-1</sup>. Existe relación directa entre peso hectolitro de una variedad y su rendimiento de harina, es decir, que un grano bien desarrollado rinde más harina que un grano chupado, y por eso, los granos chupados o arrugados presentan bajo peso del hectolitro, en tanto que los granos llenos tienen más peso hectolitro (Zambrano, 1986). En general, los trigos harineros fluctúan entre los 70 y 80 kg hl<sup>-1</sup>. Bajo este rango son rechazados. (Ortega, 2013).

El valor del número de caída presenta una relación inversa con la actividad amilasa. A veces antes de cosechar el trigo, se producen lluvias tardías entonces en el grano de trigo que, aún está en la espiga, se estimulan procesos relacionados con la germinación, específicamente, reacciones que provocan la formación de azúcares. Los azúcares son consumidos por a las levaduras en la fermentación durante la formación del pan. Un exceso de azúcar (es decir, una elevada actividad alfa-amilásica) provocará que la levadura "coma" demasiado y se produzca un volumen excesivo. Sucederá el efecto contrario si hay poco azúcar (Bamconsultores, 2023). En las dos dosis de alto y bajo N los valores del número de caída (Figura 5c) estuvieron en el rango aceptable de 280 - 380 s (Bamconsultores, 2023).

La proteína proviene del nitrógeno inorgánico del suelo que luego se convierte en nitrógeno orgánico en el grano. Por lo tanto, es muy importante aplicar fertilizante nitrogenado durante la etapa de siembra o siembra-macollaje, este es el momento óptimo para aumentar el rendimiento y la calidad a la vez. La aplicación en el período anterior o durante la plena floración no siempre genera un aumento en las proteínas, esto depende en gran medida del ambiente (Cuniberti, 1996).

En la dosis alta de N, la concentración de gluten húmedo y seco fueron altos siendo superior al 45% del tratamiento de bajo N (Figura 5e y f) siguiendo el mismo patrón del contenido total de proteína (Figura 5d). Estos resultados confirman que la proteína es un estimador rápido y aproximado de la cantidad de gluten probable en una muestra de trigo (Cuniberti y Mir, 2012). Sin embargo, en el trigo la cantidad de gluten y de proteína no siempre están directamente asociados a la calidad, ya que un alto contenido de proteína y/o gluten pueden no indicar una buena fuerza panadera (W) debido a factores genéticos que

afectan la calidad (Andrés *et al.*, 2019). En este estudio las dosis bajas de N afectaron el contenido de proteína, dando un valor de 8,3%, lo que está bajo el estándar de comercialización del 11% (Cuniberti, 2001).

La disminución de la dosis de N aumenta el gluten índice (Figura 5g). En general los valores de las dos dosis estuvieron en el rango de las harinas fuertes que sirven para la elaboración del pan. Las harinas con gluten índice superior al 95 % son consideradas harinas fuertes, mientras que valores inferiores al 60 % se consideran débiles para la producción panadera (Riquelme, 2016).

En el análisis del efecto de los factores abióticos (ej. sequía o deficiencia de N), sobre la cantidad y composición de las proteínas del gluten y su efecto sobre la calidad panadera, varios autores han informado cambios significativos en la composición proteica por causa de la fertilización nitrogenada, generalmente un aumento del fertilizante nitrogenado con lleva al incremento en la concentración de proteína, sin embargo, esta respuesta varía según la dosis y los momentos de aplicación (Lerner *et al.*, 2016; Fernández *et al.*, 2019; Giménez *et al.*, 2020). Fernández *et al.* (2019) reportaron un incremento promedio del 2,9% en la concentración de proteína en grano en debido a la fertilización nitrogenada en macollaje, en un estudio realizado durante 6 años. Nuestros resultados están de acuerdo con los resultados de Giménez *et al.* (2020), que reportaron mayor concentración de proteína en grano con la partición de las dosis de N en la siembra y el macollaje. La aplicación tardía de nitrógeno cerca de la floración favorece la síntesis de proteína en grano, siempre y cuando el agua no sea un factor limitante en el período de llenado de grano (Giménez *et al.*, 2020).

## CONCLUSIONES

El nitrógeno es un importante nutriente para el desarrollo de la planta, la deficiencia del nitrógeno reduce la producción y la calidad de los granos. Bajo condiciones del presente estudio:

- Los niveles más altos de  $f$  e IPAR bajo la dosis alta de N se atribuyen a un IAF más alto. Además, la alta dosis de N en aumentó la duración del área foliar, mientras que la dosis baja de N aceleró la senescencia. Todo lo anterior resultó en mayor rendimiento de granos y mayor producción de biomasa bajo la dosis alta de N.

- La aplicación de la alta dosis de N incrementó el número de tallos fértiles por metro cuadrado, el peso de mil granos, el número de granos por espiga, número de granos por metro cuadrado y altura de planta.
- En general, al incrementar la dosis de N, aumentó los parámetros relacionados con la calidad industrial de las harinas obtenidas, específicamente, peso hectolitro, % proteínas, gluten húmedo, gluten seco y número de caída. Desafortunadamente, en este estudio la dosis baja de N afectó negativamente el contenido de proteína, dado que, resultó en un contenido de 8,3% por debajo del estándar de comercialización del 11% para productores y molinos.

## REFERENCIAS

1. AGROMET (2023). Red agrometeorológica de INIA. [En línea]. INIA, Chile. < <https://agrometeorologia.cl/>>. [Consulta: 02 de diciembre 2022].
2. Agrotop. 2023. Semillas trigo. [En línea]. Empresas Agrotop, Chile. <<https://empresasagrotop.cl/seeds-trigo/>>. [Consulta: 02 diciembre 2022].
3. Ali, M.A., Aslam, M., Hammad, H.M., Abbas, G., M. Akram y Z. Ali. 2009. Effect of Nitrogen Application Timings on Wheat Yield under Thal Environment. J. Agric. Res. 4: 31-35.
4. Andrés, B. W. 2019. Variabilidad en el contenido de gluten en una colección internacional de genotipos de trigo. Memoria de título, ingeniero agrónomo. Universidad Nacional De La Plata. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. La Plata Argentina.
5. Austin, R. B., Edrich, J. A., M.A. Ford y R.D. Blackwell. 1977. The fate of the dry matter, carbohydrates and <sup>14</sup>C lost from the leaves and stems of wheat during grain filling. Ann. Bot. 41: 1309-1321.
6. Bali, S.A, Khan G.M., Shah, M.H., K.N. Singh y T. Singh. 1991. Yield behaviour and various physioagronomic characters of wheat (*Triticum aestivum*) and triticales genotypes as influenced by nitrogen fertilization under the temperate conditions of Kashmir. Indian J. Agron. 36: 482-487.
7. Basso, B. y J.T. Ritchie. 2005. Impact of Compost, Manure, and Inorganic Fertilizer on Nitrate Leaching and Yield for a 6-Year Maize-Alfalfa Rotation in Michigan. Agric Ecosyst Environ. 108: 329-341.

8. Bassu, S., F. Giunta y R. Motzo. 2011. Effects of sowing date and cultivar on radiation use efficiency in durum wheat. *Crop Pasture Sci.* 62: 39–47.
9. Bamconsultores. 2023. La harina se define por 20 parámetros. ¿Cuántos conoces? [en línea]. Córdoba, España. <[https://bamconsultores.com/index.php/home/analisis\\_harina](https://bamconsultores.com/index.php/home/analisis_harina)>. [Consulta: 06 abril 2023].
10. Bloom, A. J. 2015. The increasing importance of distinguishing among plant nitrogen sources. *Curr Opin. Plant Biol.* 25(2):10–16.
11. Brach A. 2017. Trigo: efecto de dosis variables de nitrógeno sobre el rendimiento y calidad de grano y harina en el NE de la provincia de Santa Fe. [en línea]. INTA Reconquista, Argentina. <<https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta.trigo-efecto-dosis-variables-nitrogeno-rendimiento-calidad-grano-y-harina-ne-santa-fe.pdf>>. [Consulta: 06 abril 2023].
12. Campillo, R., C. Jobet y P. Undurraga. 2007. Optimization of nitrogen fertilization for high-yielding potential wheat on Andisols at the Araucanía Region, Chile. *Agricultura Técnica (Chile)*. 67:281-291
13. Cárcova, J., L. Abeledo y M. Pereira. 2003. Análisis de la generación del rendimiento: crecimiento, partición y componentes. pp: 75-98. In: E.H. Satorre, R.L. Benech-Arnold, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui y S. Roxana. (Eds.). *Producción de cultivos de granos: bases funcionales para su manejo*. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
14. Cooper R. 2015. Re-discovering ancient wheat varieties as functional foods. *J. Tradit. Complement. Med.* 29:138-43.
15. Cuniberti, M. 1996. Fertilización nitrogenada, proteínas y calidad del trigo. pp:1-4. Información para extensión INTA Marcos Juárez N°4, Córdoba, Argentina.
16. Cuniberti, M.B. 2001. Factores que inciden en la expresión de la calidad. pp: 1-6. Información técnica N°4. INTA Rafaela. Rafaela, Argentina.
17. Cuniberti M, Mir L. 2012. Relación gluten/proteína en trigo. [en línea]. INTA, Argentina. <[https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-03relacion\\_gh-prot\\_en\\_trigo-cuniberti\\_-mir.pdf](https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-03relacion_gh-prot_en_trigo-cuniberti_-mir.pdf)>. [Consulta: 06 abril 2023].
18. del Pozo, A., Méndez-Espinoza, A., y Yáñez, A. 2019. Fructan metabolism in plant growth and development and stress tolerance. pp: 319–334. In: M. Hossain, V. Kumar, D. Burritt, M. Fujita, y P. Mäkelä (Eds.), *Osmoprotectant-mediated abiotic stress tolerance in plants – Recent advances and future perspectives*. Springer. Switzerland.

19. del Pozo, A., Jobet, C., Matus, I., Méndez-Espinoza, A.M., Garriga, M., D. Castillo y A. Elazab. 2022. Genetic Yield Gains and Changes in Morphophysiological-Related Traits of Winter Wheat in Southern Chilean High-Yielding Environments. *Front. Plant Sci.* 12: 732988.
20. Dreccer, M., Ruiz, R., G. Maddonni y E. Satorre. 2003. Bases Ecofisiológicas de la Nutrición en los Cultivos de Grano. pp: 481-497. In: E.H. Satorre, R.L. Benech-Arnold, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui y S. Roxana. (Eds.). Producción de cultivos de granos: bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.
21. Escalante, J. A. 1993. El rendimiento y crecimiento de frijol: manual para toma de datos. Instituto de Enseñanza e Investigación en Ciencias Agrícolas. México, México.
22. Fathi, G., G McDonald y R.C.M Lance. 1997. Effects of Post-Anthesis Water Stress on the Yield and Grain Protein Concentration of Barley Grown at the Two Level of Nitrogen. *Aust. J. Agric. Res.* 48(1): 67-80.
23. Feller, U. and A.M. Fischer. 1994. Nitrogen metabolism in senescing leaves. *CRC Crit Rev Plant Sci.* 13(1): 241–273.
24. Fernández, M. A., O. Zingaretti y M. Castaño. 2019. Efecto del ambiente, el genotipo y la fertilidad sobre el rendimiento en grano de trigo pan y su calidad en la región subhúmeda-seca pampeana. *Semiárida.* 29(2): 11-24.
25. Fowler, D.B., J. Brydon, B.A. Darroch, M.H. Entz, y A.M. Johnston. 1990. Environment and genotype influence on grain protein concentration of wheat and rye. *Agron. J.* 82: 666-674.
26. Ghani, A., A.N. Ahmad y M. Sarwar. 2000. Interactive Effect of Nitrogen and Water Stress on Nitrogen Content and Grain Yield of Two Wheat (*Triticum aestivum* L.) Varieties. *Pak. J. Agric. Sci.* 37(1): 3-4.
27. Giménez, M., Quiriban, A., R. Fernández y Pereyra Cardozo, M. 2020. Efectos de la fertilización nitrogenada en la composición de las proteínas de la harina y la calidad de la masa en trigo cultivado en la provincia de La Pampa. *Semiárida.* 30(2): 63-77.
28. Grijalva-Contreras, R. L., Robles-Contreras, F., Macías-Duarte, R., J. Santillano-Cázares, y F. Núñez-Ramírez. 2016. Nitrógeno en trigo y su efecto en el rendimiento y en la concentración de nitratos y potasio en el extracto celular de tallo (ECT). *Acta Universitaria.* 26(5): 48-54.
29. Han, H., Li, Z., Ning, T., Zhang, X., Y Shan, y M. Bai. 2008. Radiation use efficiency and yield of winter wheat under deficit irrigation in North China. *Plant Soil Environ.* 54(1): 313–319.

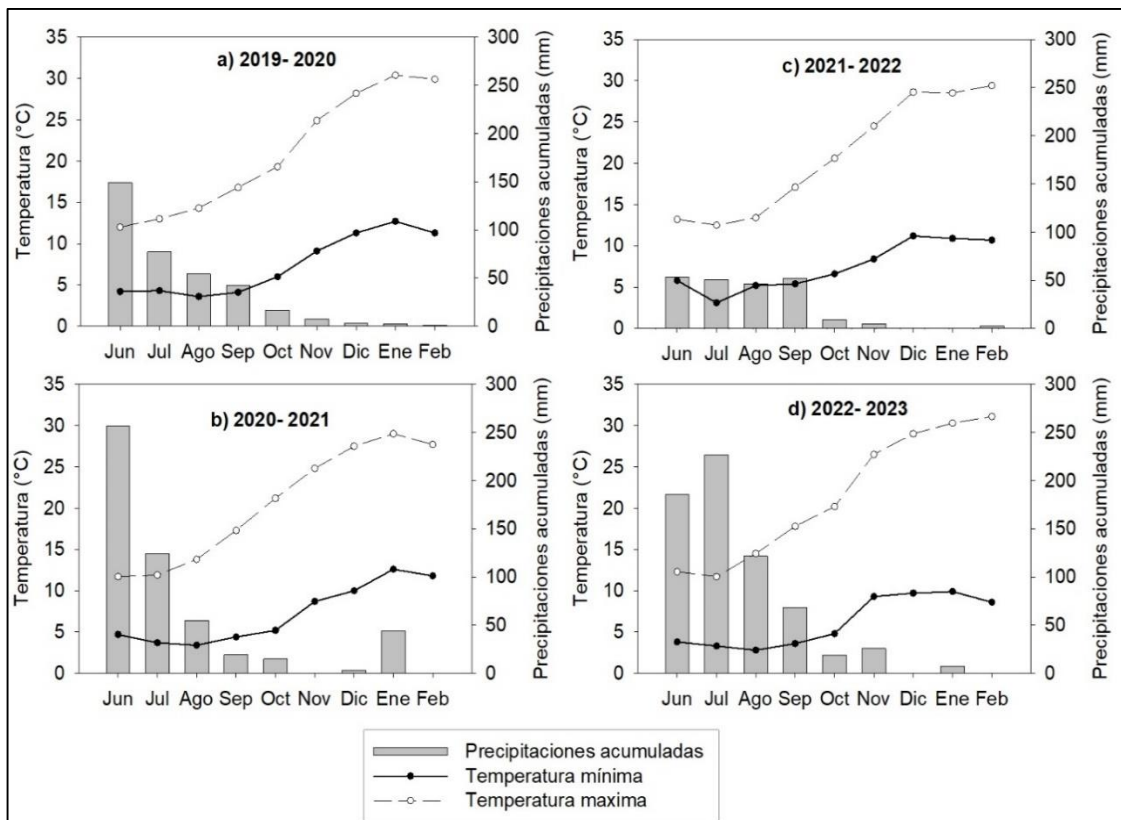
30. Hirzel, J., Meier, S., Matus, I., C. Jobet y R. Camillo. 2004. Fertilización del cultivo de trigo harinero. pp: 11-99. In: J. Hirzel (Ed.). Fertilización de Cultivos en Chile. (2a. ed.) Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Chile.
31. Hussain, I., M.A., Khan y E.A. Khan. 2006. Bread Wheat Varieties as Influenced by Different Nitrogen Levels. J. Zhejiang Univ. Sci. B. 7(1): 70-78.
32. Iglesias, L. A. 1996. Dinámica de la germinación de la semilla de trigo (*Triticum aestivum* L.) con diferentes manejos del agua. Cult. trop.17(1):13-15.
33. Ishfaq, M., Zulfiqar, U., Ahmad, M., Mustafa, C.B., Hamed, A., M.S Aslam and M.Z. Anjum. 2018. Quantification of Radiation Use Efficiency and Yield of Wheat as Influenced by Different Levels of Nitrogen and Water Stress under Semi-Arid Conditions of Faisalabad. Agric. Sci. 9: 873-887.
34. Jobet, C., Madariaga, R., Matus, I., R. Campillo y J Zuñiga. 2017. Maxwell: el cultivar de trigo que ha superado las barreras productivas en el sur de Chile. Chil J Agric Anim Sci. 33: 39-44.
35. Jobet, C. y C. Ortiz. 2021. El trigo se consolida como una opción clave para el sur. [en línea] Mundo Agro, Chile. <<https://mundoagro.cl/el-trigo-se-consolida-como-una-opcion-clave-para-el-sur/>>. [Consulta: 02 diciembre 2022].
36. Khaliq, A., M. Iqbal and S.M.A Basra. 1999. Optimization of Seeding Density and Nitrogen Application in Wheat cv. Inqlab-91 under Faisalabad Conditions. Int J Agric Biol. 1: 241-243.
37. Kumar R y Sharma S N. 1999. Effect of nitrogen on dry matter and nutrient accumulation pattern in wheat (*Triticum aestivum*) under different dates of sowing. Indian J. Agron. 44 (4): 738-744.
38. Langer, R.H.M, Liew y F. K. Y. 1973. Effects of varying nitrogen supply at different stages of the reproductive phase on spikelet and grain production and on grain nitrogen in wheat. Rev. Aust. J. Agric. Res. 24(5): 647-656.
39. León, L. y C. Rosell. 2007. De tales harinas, tales panes. Granos, harinas y productos de panificación en Iberoamérica. Hugo Báez. Córdoba, Argentina.
40. Lerner, S.E., A.F. Arata y A.C. Arrigoni. 2016. Relación entre eficiencia de uso del nitrógeno y calidad industrial en variedades argentinas de Trigo Pan (*Triticum aestivum* L.) con distinta composición de gluten. RIA. 42(1): 29-40.
41. Maqsood, M., Ali, A., Aslam, Z., M. Saeed y S. Ahmad. 2002. Effect of Irrigation and Nitrogen Levels on Grain Yield and Quality of Wheat. International Journal of Agriculture and Biology. 4: 164-165.
42. Mengel, K. y E. Kirkby. 1982. Principles of plant nutrition. (3a ed). International Potash Institute. Worblaufen-Bern, Switzerland.

43. Monteith, J. L. 1981. Climatic variations and growth of crops. QJRMS. 107: 749–774.
44. Mullan, D. y J. Pietragalla. 2012. Interceptación de luz. pp: 54-57. In: J. Pietragalla, D. Mullan, P. Chávez y M. Reynolds (Eds.). Physiological breeding II: a field guide to wheat phenotyping. Cimmyt. México, México.
45. FAOSTAT. 2023. Cultivos y productos de ganadería [En línea]. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura. <<https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>>. [Consulta: 02 de enero 2023].
46. Leonard, W. H y J. H. Martin. 1963. Cereal Crops. Macmillan and Co. London, UK.
47. Oropesa, J.P. 2012. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre rendimiento y calidad en trigo y cebada. Memoria de título, Ingeniería en Producción Agropecuaria. Universidad Católica Argentina, Facultad de Ciencias Agrarias. Buenos Aires, Argentina.
48. Ortega A. 2013. Las características del trigo ideal. [en línea]. El mercurio, Chile. <<https://www.elmercurio.com/Campo/Especiales/Trigo/calidad-del-trigo.aspx>>. [Consulta: 06 abril 2023].
49. Ortiz-Monasterio, J. 2002. Nitrogen management in irrigated spring wheat. pp: 433-451. In: B.C. Curtis, S. Rajaram, y H. Gómez-Macpherson (Eds.). Bread wheat, Improvement and production. FAO. Roma, Italia.
50. Pradhan, S., Sehgal, V.K., Bandyopadhyay, K.K., Panigrahi, P., C.M. Parihar y S.L. Jat. 2018. Radiation interception, extinction coefficient and use efficiency of wheat crop at various irrigation and nitrogen levels in a semi-arid location. Indian J Plant Physiol. 23(3): 416-425.
51. Rahman, M.D., Islam, M., T. Islam y M.D. Karim. 2014. Dry Matter Accumulation, Leaf Area Index and Yield Responses of Wheat under Different Levels of Nitrogen. Bangladesh J. Agriculturist. 7(1): 27-32.
52. Reynolds, M., Foulkes J., Furbank R., Griffiths S., King J., Murchie E., M. Parry y G. Slafer. 2012. Achieving yield gains in wheat. Plant. Cell. Environ. 35(10):1799-823.
53. Riquelme K. 2016. Determinación de Gluten Index y su importancia en la calidad de harinas panaderas. Memoria de título, Ingeniera en Alimentos. Universidad de concepción, Facultad de Ingeniería Agrícola. Chillan, Chile.
54. Sadras, V.O., F.J., Villalobos y E. Fereres. 2016. Radiation Interception, Radiation Use Efficiency and Crop Productivity. pp: 169-188. In: F.J. Villalobos y E. Fereres (Eds.). Principles of Agronomy for Sustainable Agriculture. Springer. Switzerland.

55. Semenov, M.A., P.D. Jamieson y P. Martre. 2007. Deconvoluting Nitrogen Use Efficiency in Wheat: A Simulation Study. *Eur J Agron.* 26(3): 283-294.
56. Sinclair, T. R. y P.D. Jamieson. 2006. Grain number, wheat yield, and bottling beer: An analysis. *Field Crops Res.* 98(1): 60-67. [En línea].
57. Suarez, M. 2012. Requerimientos nutricionales y la fertilización del cultivo del café. [En línea]. Monografias.com, Argentina. <<https://www.monografias.com/trabajos94/requerimientos-nutricionales-y-fertilizacion-del-cultivo-del-cafe/requerimientos-nutricionales-y-fertilizacion-del-cultivo-del-cafe.shtml>>. [Consulta: 02 diciembre 2022].
58. Taiz, L. y E. Zeiger. 2002. *Plant Physiology*, (3a. ed.). Editorial Sinaguer Associates, USA.
59. Tranaviciene, T., Siksnianiene, J., Urbonaviciute, A., Vaguseviciene, I., Samuoliene, G., P. Duckovskis y A. Sliesaravicius. 2007. Effects of Nitrogen Fertilizers on Wheat Photosynthetic Pigment and Carbohydrate Contents. *Biologia.* 53(4):80-84.
60. Yang, J., Zhang, J., Huang, Z., Q. Zhu y W. Wang. 2001. Remobilization of Carbon Reserves in Response to Water Deficit during Grain Filling of Rice. *Field Crops Res earch*, 71(1): 47-55.
61. Zadoks J.C., T.T. Chang y C.F. Konzak. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Res.* 14:415–421.
62. Zambrano, M.M. 1986. Peso del hectolitro en trigo. pp: 15-18. IPA Quilamapu N° 30. Chillán, Chile.

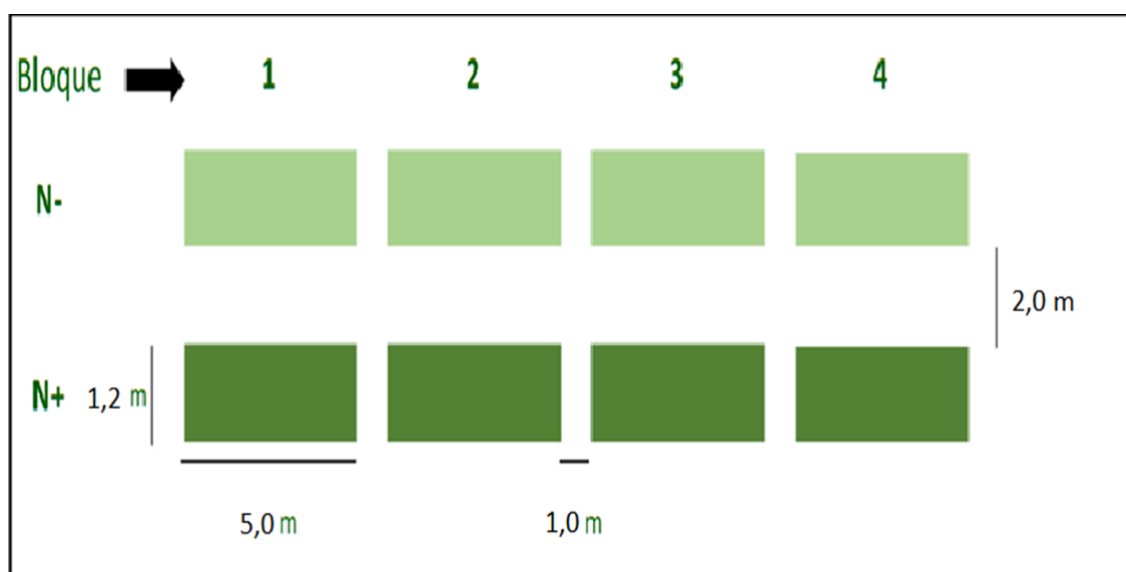
## Anexos

Anexo 1: Temperaturas mínimas, máximas y precipitación acumulada de las temporadas 2020 – 2023.



(Fuente: Agromet, 2023)

Anexo 2: Diseño experimental en la estación experimental “El Nogal”, Facultad de agronomía, Universidad de Concepción, Campus Chillán.



Anexo 3: Resultados del análisis químico del suelo en el sitio experimental.

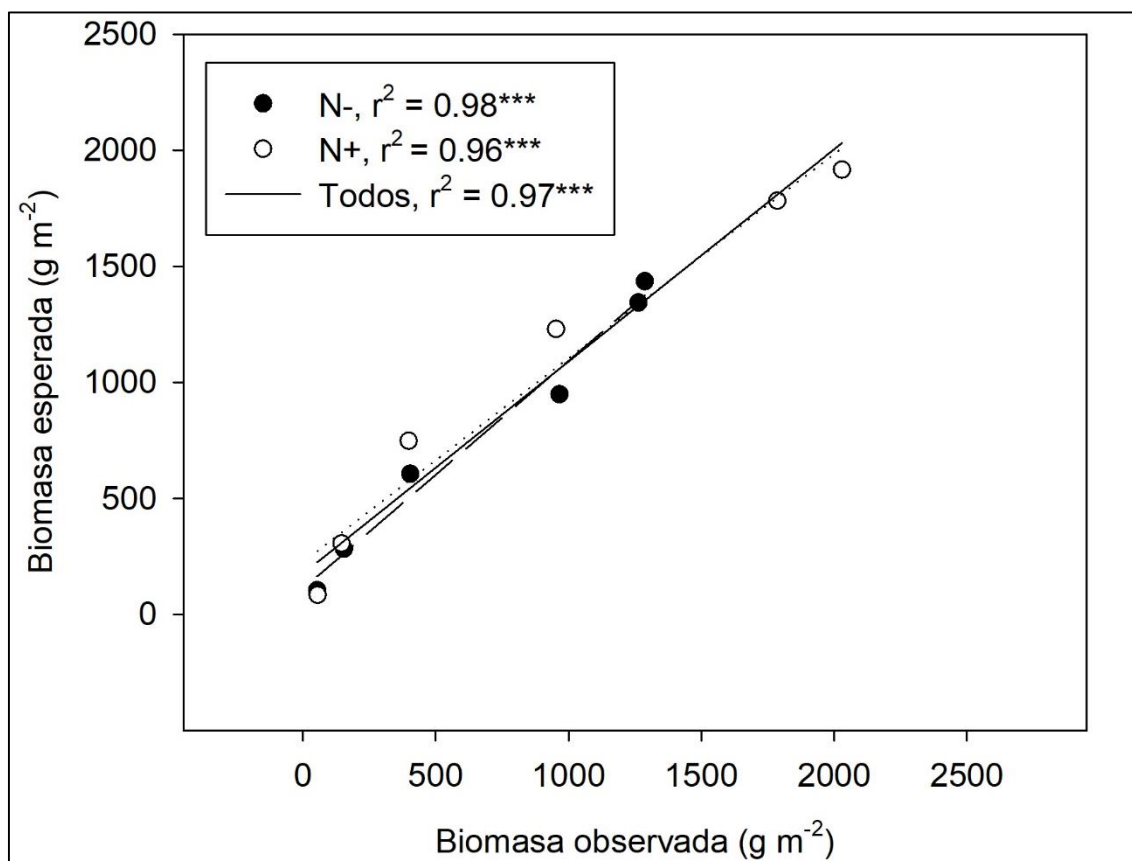
| Suelo                          | Unidades | Valor |
|--------------------------------|----------|-------|
| pH en agua                     | --       | 5,91  |
| Materia Orgánica               | %        | 4,10  |
| Nitratos ( $\text{N-NO}_3^-$ ) | mg/Kg    | 12,1  |
| Amonio ( $\text{N-NH}_4^+$ )   | mg/Kg    | 5,6   |
| Nitrógeno Disponible           | mg/Kg    | 17,7  |
| Fósforo Olsen                  | mg/Kg    | 55,5  |
| K disponible                   | mg/Kg    | 409,3 |
| K intercambiable               | cmol/Kg  | 1,05  |

\* El análisis fue hecho en el laboratorio de análisis de suelo y plantas de la universidad de Concepción.

Anexo 4: Toma de mediciones de interceptación de luz con el ceptómetro: (a) mediciones del PAR incidente en la parte superior del dosel y (b) mediciones del PAR reflejada del dosel.



Anexo 5: Correlación entre biomasa observada y esperada.



Anexo 6: Catálogo de la variedad Maxwell.

**Origen**

Francia (La Empresa Saaten)

**Características**

Hábito de Crecimiento: Invernal

Altura: 70 - 95 cm

Dosis de Semilla: 180 a 200  $\text{kg ha}^{-1}$ Rendimiento Potencial: 11,3  $\text{ton ha}^{-1}$ 

Espiga: Barbada

**Sanidad**

Resistente a Polvillo Estriado y Colorado

Resistente a Oídio

Zona de Siembra

Precordillera y Valle Central (de Talca al Sur)

**Características Industriales**

Gluten Húmedo: 22 a 35%

Peso Hectolitro: de 76 a 80  $\text{kg/hl}$

\* Adaptado de Jobet et al. (2017) y Agrotop (2023).

Anexo 7: Rendimiento ( $\text{ton ha}^{-1}$ ) de Maxwell en comparación con las variedades Kumpa INIA y Dollinco-INIA para diferentes localidades. Promedio de 4 temporadas.

| Localidad | Maxwell | Kumpa-INIA | Dollinco-INIA |
|-----------|---------|------------|---------------|
| Chillán   | 10,7    | 10,3       | 10,0          |
| Traiguén  | 9,9     | 9,1        | 8,2           |
| Temuco    | 9,2     | 9,1        | 8,0           |
| Vilcún    | 9,6     | 9,7        | 8,3           |
| Máfil     | 10,4    | 10,6       | 10,8          |
| Paillaco  | 13,6    | 13,2       | 12,3          |
| Purranque | 16,0    | 13,6       | 13,0          |
| Promedio  | 11,3    | 10,8       | 10,1          |

\*Adaptado de Jobet et al. (2017).