



FACULTAD DE AGRONOMÍA
Universidad Nacional de La Pampa

Formación del rendimiento de cultivares de trigo con introducción gen HaHB4 en la región semiárida pampeana

“Trabajo final de graduación presentado para obtener el título de Ingeniero Agrónomo”

Autores:

Matías Cardoso Perassi, Joaquín Montiel Moyano

Director: Dr. Martín Díaz-Zorita
Cátedra de Cereales y Oleaginosas

Co-directora: Dra. Dillchneider, Alexandra
EEA INTA Anguil

Evaluadores:

Ing. Agr. Nuria Kuhn
Dra. Fernanda Gabriela González

FACULTAD DE AGRONOMÍA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PAMPA

Santa Rosa (La Pampa), Mayo del 2024

ÍNDICE

RESUMEN.....	3
ABSTRACT	4
INTRODUCCIÓN	5
HIPÓTESIS	8
OBJETIVO	8
MATERIALES Y MÉTODOS	8
RESULTADOS Y DISCUSION.....	12
CONCLUSIONES	19
BIBLIOGRAFÍA.....	20

RESUMEN

En la región semiárida pampeana los rendimientos de trigo (*Triticum aestivum* L.) son frecuentemente limitados por la oferta hídrica y por la disponibilidad de nutrientes, principalmente nitrógeno. Estudios recientes muestran que la incorporación del gen HaHB4 en trigo mejora su crecimiento en condiciones de estrés hídrico. Sin embargo, las observaciones sobre la contribución de incorporar este gen en sitios del centro de la región semiárida pampeana o ante condiciones contrastantes de nutrición nitrogenada no son conclusivas. El objetivo del estudio es analizar cambios en la formación del rendimiento y en la partición del nitrógeno en material de trigo con incorporación del gen HaHB4 cultivado en condiciones representativas del centro de la región semiárida pampeana. El estudio se realizó durante 2 campañas en un Haplustol Éntico Petrocálcico del campo experimental de la Facultad de Agronomía UNLPam en Santa Rosa (La Pampa, Argentina). Se evaluaron 4 tratamientos, dos cultivares de trigo (Algarrobo y AG-HB4.25) con dos niveles de fertilización nitrogenada (0 y 138 kg ha⁻¹ de N). En ambas campañas, e independientemente del manejo del N, el cultivar AG-HB4.25 aumentó 10 % el peso individual de los granos, 30 % el rendimiento de granos y 18 % la producción de rastrojos sobre Algarrobo. La incorporación de N en los cultivos fue 11 % superior sin mostrar diferencias en la partición hacia los granos.

Palabras clave: regiones semiáridas – nutrición nitrogenada – agricultura de secano – estrés hídrico – nitrógeno en grano.

ABSTRACT**Wheat grain yield formation in cultivars with the introduction of the HaHB4 gene grown in the semiarid pampas**

In the semiarid Pampas region, wheat yields (*Triticum aestivum* L.) are often limited by water and nutrient availability, mainly nitrogen. Recent studies show that incorporating the HaHB4 gene into wheat improves its growth under water stress conditions. However, observations on the contribution of incorporating this gene in sites in the center of the semiarid Pampas region or under contrasting nitrogen nutrition conditions are inconclusive. The objective of the study is to analyze changes in yield formation and nitrogen partitioning in wheat material with incorporation of the HaHB4 gene grown under representative conditions of the center of the semiarid Pampas region. The study was conducted over 2 seasons in a Petrocalcic Entic Haplustoll soil at the experimental field of the Faculty of Agronomy UNLPam in Santa Rosa (La Pampa, Argentina). Four treatments were evaluated, two wheat cultivars (Algarrobo and AG-HB4.25) with two levels of nitrogen fertilization (0 and 138 kg ha⁻¹ of N). In both seasons, regardless of N management, the AG-HB4.25 cultivar increased grain individual weight by 10 %, grain yield by 30 %, and straw production by 18 % compared to Algarrobo. Nitrogen incorporation in crops was 1 % higher without showing differences in partitioning towards grains.

Key words: semiarid regions – nitrogen nutrition – dryland agriculture – water stress – nitrogen in grain.

INTRODUCCIÓN

En regiones semiáridas la productividad de los cultivos está estrechamente relacionada con la disponibilidad de agua, tanto por los aportes de las precipitaciones como por su economía a través de las reservas en el suelo, la oportunidad de las lluvias o las posibilidades de riego. Las regiones semiáridas están sometidas a fenómenos climáticos erráticos, tanto en su variabilidad interanual, como estacional y mensual en las precipitaciones. En general, tanto los rendimientos como la eficiencia de uso del agua son menores en condiciones de moderada restricción hídrica que en campañas con precipitaciones superiores a las normales (Gaggioli *et al.* 2020). En el área agrícola de la provincia de La Pampa, las lluvias durante el invierno y hasta finales de septiembre son frecuentemente insuficientes para alcanzar alta producción de cereales de invierno. El logro de cultivos con altos rendimientos depende de la recarga hídrica durante el otoño y de las lluvias durante el periodo crítico de definición de los componentes numéricos del rendimiento (Quiroga *et al.* 2003; Alvarez *et al.* 2020). El trigo (*Triticum aestivum* L) consume durante su ciclo aproximadamente entre 500 y 550 mm de agua, siendo el período de encañazón donde comienza el incremento en la demanda hídrica (3 a 4 mm día⁻¹) alcanzando la máxima demanda (5 a 6 mm día⁻¹) durante el llenado de los granos (Salinas *et al.* 2015).

En condiciones de secano del centro de la región semiárida pampeana los rendimientos de trigo se relacionan directa y estrechamente con la cantidad de agua del suelo en el momento de la siembra del cultivo (Quiroga *et al.* 2003). También, los rendimientos del trigo varían según la oferta de nutrientes y en particular para esta región se han identificado al nitrógeno (N) y al fósforo, junto al azufre y en algunos casos micronutrientes como el zinc, como los elementos que con mayor frecuencia limitan su producción requiriéndose de su aplicación con fertilizantes específicos

(García y Díaz-Zorita, 2014; Iturri *et al.* 2022). Para alcanzar adecuados resultados productivos, económicos y ambientales es importante la implementación de buenas prácticas de manejo del cultivo incluyendo no solo el manejo de las condiciones de siembra sino de la elección del genotipo y de la aplicación de fertilizantes.

En la oferta actual de cultivares de trigo se dispone de materiales con la incorporación del gen HaHB4 (*Helianthus annuus* HomeoBox 4) que les confiere tolerancia frente a condiciones de sequía. La incorporación del gen HaHB4 que se encuentra naturalmente en girasol y del promotor del gen de ubiquitina (Ubi-1) de maíz, genera la expresión de manera constitutiva del gen HB4 en las células de las plantas de trigo generando aumentos en la eficiencia de uso de agua medidos en términos de rendimiento de grano en el cultivo de trigo. Según Manavella *et al.* (2006), el mecanismo desencadenado por este gen para conferir tolerancia a la sequía no implica el cierre de los estomas sino un retraso en la senescencia a través de la inhibición de los receptores de etileno. En condiciones con limitaciones hídricas moderadas, plantas de *Arabidopsis thaliana* con la incorporación de este gen continuaron creciendo mientras que en los controles sin esta transformación genética mostraron cierre estomático y menor productividad. Bajo estrés hídrico severo durante 10 a 20 días de duración la supervivencia de las plantas fue mayor en las transformadas genéticamente con HaHB4 que para los controles de tipo salvaje (Dezar *et al.* 2005). Esta construcción génica tiene la capacidad de expresarse en todos los tejidos de la planta de manera constitutiva, por lo que no necesita de un evento de estrés hídrico para activarse (Bruno *et al.* 2021). En plantas de soja y de trigo también se logró incorporar este gen y observar su expresión frente a condiciones de restricción en la oferta de agua (González *et al.* 2019; Ribichich *et al.* 2020). En una red de estudios en condiciones de campo desarrollada en el área

agrícola argentina se observó que los cultivos de trigo genéticamente modificados con la incorporación del gen HaHB4 mostraron mayores rendimientos que su contraparte de tipo salvaje en una red de ensayos de campo (González *et al.* 2019; Ribichich *et al.* 2020). En promedio en trigo esta mejora en los rendimientos fue del 6,0 % y del 9,4 % en la eficiencia de uso del agua calculada con relación al total de lluvias recibidas durante el ciclo de los cultivos. Las diferencias en producción entre el cultivar modificado y el control fueron mayormente explicadas por aumento en el número de granos por unidad de superficie (Gonzalez *et al.* 2019). En esta red de estudios, el peso individual de los granos fue menor en el material modificado que en el tipo salvaje en una magnitud que no canceló, por efecto compensatorio (“*trade off*”) los beneficios derivados del mejor crecimiento vegetativo, formación de granos y particionamiento a los granos. Estos estudios, si bien contemplaron una amplia gama de condiciones de crecimiento, particularmente definidas por el balance del agua y las temperaturas del aire durante las etapas reproductivas críticas, no incluyeron sitios de secano representativos del centro de la región semiárida pampeana y se desarrollaron con genotipos no adaptados a estos ambientes.

El N es el principal elemento requerido para la producción de los cereales de invierno, como es el caso del trigo (Echeverría y Sainz Rozas, 2005). Las deficiencias de este nutriente afectan la tasa fotosintética, reducen la expansión foliar y aceleran la senescencia reduciendo la acumulación de materia seca en las plantas, la formación de los granos y su contenido proteico (Ferraris *et al.* 2007). El N, contenido en la solución del suelo, para su incorporación activa en las plantas, se acerca a la superficie de las raíces por flujo masal en formas inorgánicas de nitratos y de amonio (Miravé *et al.* 2014). Por lo tanto, en condiciones de menor disponibilidad de agua, al modificarse el comportamiento de los cultivares mejorando su crecimiento y producción de granos también

sería mayor la eficiencia en el uso del nitrógeno absorbido podría aumentar la capacidad de incorporar y de utilizar el N disponible para las plantas.

HIPÓTESIS

- Cuando hay una restricción hídrica, cultivos de trigo con la introducción del gen HaHB4 tendrían mayores rendimientos asociados a mayor número de granos con menores cambios compensatorios en el peso medio individual de estos.
- En cultivares de trigo con el gen HaHB4 la incorporación de N en la biomasa aérea y su acumulación final en los granos será mayor que en los controles sin esta transformación genética.

OBJETIVO

- Cuantificar en condiciones de campo diferencias en la producción y en los componentes formadores del rendimiento de trigo según la introducción del gen HaHB4 y bajo condiciones contrastantes de manejo del N en 2 campañas representativas de la región semiárida pampeana.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se desarrolló en el campo experimental de la Facultad de agronomía UNLPam (-36.5481525114496, -64.30391966845983) en Santa Rosa La Pampa (Argentina) durante las campañas agrícolas 2021 y 2022. El suelo fue clasificado como Haplustol Éntico Petrocálcico, con

una profundidad efectiva de entre 80 y 120 cm, de textura franco-arenosa y con un contenido de materia orgánica superficial (0 a 20 cm) de 1,7 %.

En cada campaña se implantaron dos cultivares de trigo (Algarrobo y AG-HB4.25) bajo dos niveles de fertilización nitrogenada (Testigo sin fertilizar y Fertilizado al voleo en una aplicación en la siembra de 138 kg ha⁻¹ de N con urea 46:0:0) con un diseño en bloques completamente aleatorizados con 4 repeticiones. El tamaño de las parcelas fue de 1.47 m x 6 m y el resumen de las prácticas de manejo de los cultivos se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Prácticas de manejo del ensayo en la campaña 2021 y 2022 en el campo experimental de la Facultad de Agronomía, UNLPam. FMA: fosfato monoamónico (11:52:0).

Campaña 2021	
Sistema de siembra	Directa
Fecha de siembra	02/07/2021
Densidad de siembra	265 semillas m ⁻²
Distancia entre hileras	21 cm
Control malezas	10/6/2021
Herbicidas (dosis)	Glifosato 3 l ha ⁻¹ + 2,4-D1 l ha ⁻¹
Fertilizante en la siembra(dosis)	FMA150 kg ha ⁻¹
Control de enfermedades	05/10/2021 y 03/11/2021
Fungicida (dosis)	Cripton 1 l ha ⁻¹
Campaña 2022	
Sistema de siembra	Directa
Fecha de siembra	14/06/2022
Densidad de siembra	265 semillas m ⁻²
Distancia entre hileras	21 cm
Control malezas	06/06/2022
Herbicidas (dosis)	Glifosato 3 l ha ⁻¹ + 2,4-D1 l ha ⁻¹
Fertilizante en la siembra (dosis)	FMA 75 kg ha ⁻¹
Control de enfermedades	12/10/2022 y 26/11/2022
Fungicida (dosis)	Cripton 600 cc ha ⁻¹

Luego de alcanzar el estadio de madurez fisiológica se realizó la cosecha y trilla manual de 2 líneas consecutivas de 1 m de longitud representando una superficie de 0,42 m². Se determinó el número de espigas cosechables, el peso seco total de las plantas, el peso de los granos trillados corregidos a 14 % de humedad y el peso medio individual de los granos. El número de granos por unidad de superficie se estimó a partir del cociente entre el rendimiento en grano y el peso individual. Además, se determinó la concentración de nitrógeno (método de Kjeldahl) en la biomasa aérea (rastros) y en los granos. El índice de cosecha (IC) se calculó según el cociente entre el rendimiento en grano y la producción total de materia seca aérea. La extracción de nitrógeno se calculó según el cociente entre la producción de biomasa aérea o de los granos y la concentración de nitrógeno en los rastros o en los granos, respectivamente. El índice de cosecha de nitrógeno (ICN) se calculó según el cociente entre la extracción de N con los granos y la cantidad de N incorporada en la biomasa aérea total de los cultivos (rastros + granos).

El contenido total de agua del suelo (método gravimétrico) se determinó en el momento de la siembra y de madurez fisiológica de los cultivos con muestras compuestas de 20 cm de espesor y hasta los 100 cm de profundidad. La cantidad de agua útil del perfil (AU) se calculó restando al total de agua del suelo el contenido hídrico al punto de marchitez permanente según Quiroga y Bono (2012).

Se registraron los datos climáticos diarios de temperaturas máximas y mínimas y de precipitaciones durante el ciclo del cultivo para cada año obtenidos de la estación climática de Facultad de Agronomía de la UNLPam distante a aproximadamente 1000 m del sitio experimental (Tabla 2; Fig.1).

Tabla 2: Registros de temperaturas (°C) mensuales del aire en abrigo a 1,5 m, históricas (periodo 1977-2017) y durante los dos años de ensayos en el campo de enseñanza de la Facultad de Agronomía de la UNLPam. Min.: temperatura mínima, Max.: temperatura máxima.

Mes	Media histórica			2021			2022		
	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media	Min.	Max.	Media
Junio	2,1	14,3	8,2	-4,8	23,3	7,7	-5,8	21,1	7,0
Julio	1,5	13,9	7,8	-5,0	22,8	7,5	-3,7	22,5	7,9
Agosto	2,7	16,6	9,8	-2,2	29,5	10,6	-4,7	23,9	9,9
Septiembre	5,0	19,2	12,4	0,6	28,6	13,0	-1,2	28,6	13
Octubre	8,7	22,3	15,9	0,6	38,0	16,4	-0,1	30,9	15,6
Noviembre	11,5	26,0	19,2	3,8	34,4	18,6	13,5	28,3	21,4
Diciembre	14,5	29,1	22,1	8,9	36,8	22,3	14,8	33,0	24,4

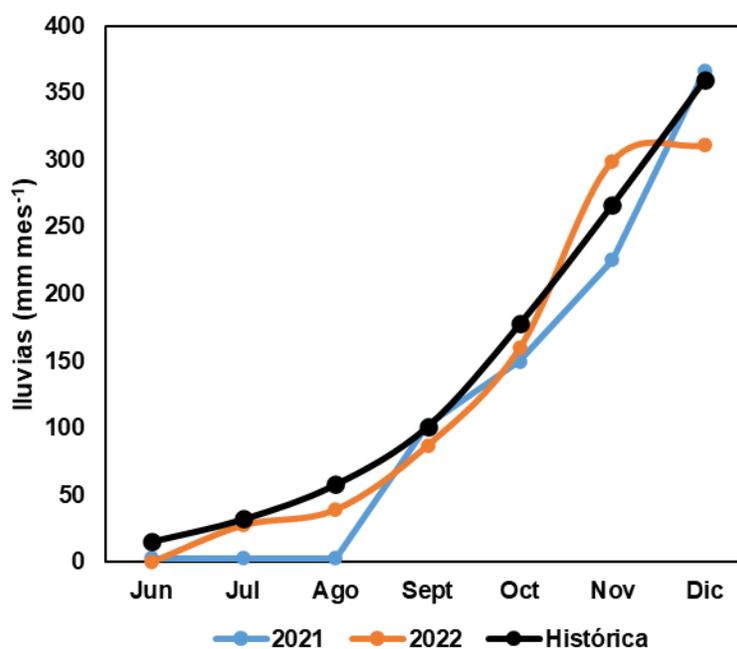


Figura 1: Lluvias mensuales acumuladas durante los dos años de ensayos en el campo de enseñanza de la Facultad de Agronomía de la UNLPam. Media histórica: periodo 1977-2017.

Para el análisis de los resultados de cada campaña se consideró un diseño en bloques completos con 4 réplicas y se emplearon análisis de la varianza, prueba de diferencia mínima significativa de Fisher (LSD) y de regresión (Analytical Software, 2015).

RESULTADOS Y DISCUSION

Los rendimientos de trigo variaron entre 1071 y 6825 kg ha⁻¹. Entre campañas, y en promedio para todos los tratamientos, la mayor producción se observó en el ciclo 2021 que se caracterizó por presentar mayores precipitaciones durante el ciclo de llenado de granos que el cultivo que en el ciclo siguiente (Fig. 1). En suelos con limitaciones en la profundidad explorable por las raíces los rendimientos alcanzados varían según las precipitaciones durante el ciclo del cultivo (Kruger *et al.* 2020). Según Fernandez (2020), la producción del trigo en la región subhúmeda seca pampeana se asocia lineal y positivamente con las lluvias durante el periodo crítico de formación del rendimiento. En ambos años la oferta inicial de agua del suelo, evaluada hasta la capa de tosca (80 a 100 cm de profundidad) fue similar con 47,5 mm en el 2021 y 47,7 mm en el 2022. Estas características son representativas del rango frecuente de condiciones de producción de trigo en la región considerando buenas prácticas para su implantación donde la siembra es recomendada si el perfil del suelo presenta al menos 50 % de agua útil (Fernandez, 2020) variando en su producción según la oferta hídrica durante el inicio de la primavera. En ambas campañas la producción de granos se relacionó estrecha y positivamente con la cantidad de granos cosechados y con mayor dispersión con el peso individual de los granos (Fig.2).

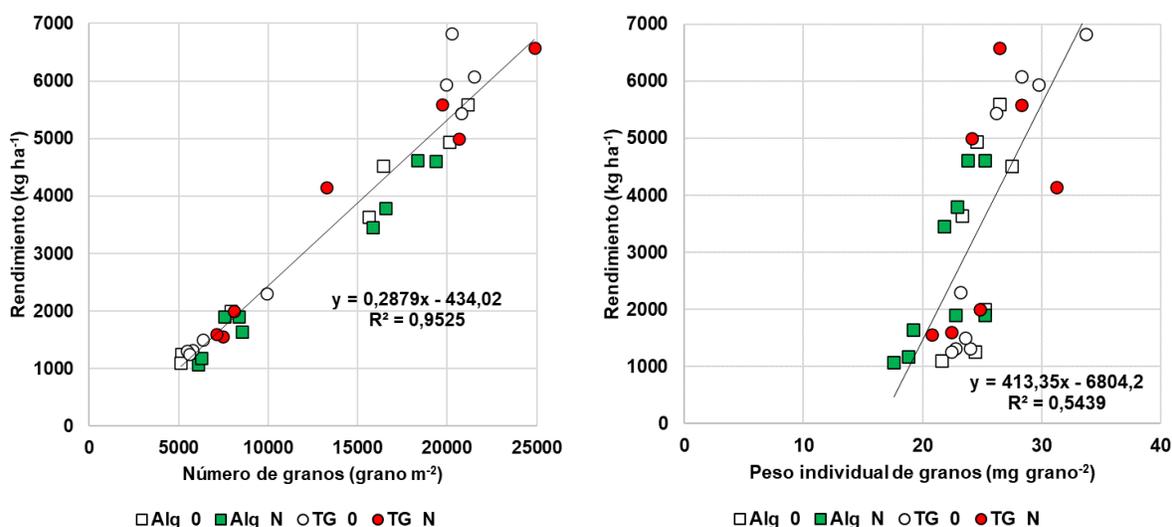


Figura 2: Relaciones entre componentes del rendimiento y la producción de granos de trigo durante 2 campañas según tratamientos de fertilización nitrogenada y cultivares con introducción del gen HaHB4 en el centro de la región semiárida pampeana. Alg_0: Algarrobo sin fertilizar; Alg_N: Algarrobo fertilizado; TG_0: AG-HB4.25 sin fertilizar y TG_N: AG-HB4.25 fertilizado.

Los resultados del análisis de la varianza de los componentes del rendimiento y la producción, de granos y de biomasa, de los cultivos, no mostraron interacciones significativas ($p < 0,10$) entre el manejo de la nutrición nitrogenada y los materiales cultivados (Tabla 3). La fertilización con nitrógeno, promedio de ambas campañas, mostró diferencias en la producción de rastrojos, en el peso individual de los granos y en el índice de cosecha comparado con el control sin fertilizar (Tabla 3).

Tabla 3: Resumen del análisis de la varianza de componentes del rendimiento y producción de trigo en condiciones representativas de la región semiárida pampeana según cultivares y manejo del nitrógeno. NS: efecto no significativo ($p>0,10$), MST: Materia seca total, IC: Índice de cosecha.

Factor de variación	Granos m ⁻²	Peso del grano (mg grano ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Rastrojos (kg ha ⁻¹)	MST (kg ha ⁻¹)	IC
Campaña 2021						
Fertilización (A)	NS	NS	NS	NS	0,10	0,10
Material (B)	NS	0,02	0,01	0,03	NS	NS
Interacción A x B	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Campaña 2022						
Fertilización (A)	0,06	0,10	0,01	0,04	0,01	0,06
Material (B)	0,01	0,06	0,01	0,02	NS	NS
Interacción A x B	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Los efectos de la fertilización nitrogenada sobre la producción de grano difirieron entre campañas describiéndose mayores rendimientos en los tratamientos fertilizados en la campaña 2022 (Tabla 4). En la campaña 2023, con mayor productividad media de los cultivos, los resultados no mostraron diferencias significativas entre los tratamientos de fertilización (Tabla 4). En promedio para las dos campañas, el peso individual de los granos y el índice de cosecha, fueron 8 % y 12 % inferiores que el control sin fertilizar (Tabla 4) y la producción total de biomasa aérea (rastrojos) fue 12 % superior en los tratamientos fertilizados con respecto a los controles sin fertilizar (Tabla 4). Estos resultados validan la contribución del nitrógeno al crecimiento del trigo tal lo descrito en condiciones similares de producción, tanto por oferta hídrica como por cultivares adaptados a la región (Dillchneider *et al.* 2019). El menor peso individual y reducción en el índice de cosecha de granos se explica por las frecuentes condiciones de estrés térmico o hídrico que restringe la duración para el normal llenado de los granos (Fernandez, 2020).

Tabla 4: Promedio de componentes del rendimiento y producción de trigo en condiciones representativas de la región semiárida pampeana según 2 niveles de nutrición nitrogenada promedio de 2 cultivares. Promedio de 2 campañas. MST: materia seca total, IC: Índice de cosecha. Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias ($p < 0,10$) entre los tratamientos de fertilización. La ausencia de letras indica diferencias no significativas ($p < 0,10$) entre tratamientos de fertilización.

Campaña	Tratamiento	Granos m⁻²	Peso del grano (mg grano⁻¹)	Rendimiento (kg ha⁻¹)	Rastrojos (kg ha⁻¹)	IC
2021	Sin fertilizar	19483	27	5373	7068	43 b
	Fertilizado con N	18579	25	4723	7331	39 a
2022	Sin fertilizar	6416 b	23 b	1506 b	2988 b	33 a
	Fertilizado con N	7439 a	21 a	1607 a	3929 a	29 b

En promedio para los dos niveles de nutrición nitrogenada, los componentes de la producción de los cultivos (peso individual de los granos, rendimientos, rastrojos y materia seca total) mostraron diferencias significativas entre los materiales cultivados (Tabla 3). En los cultivares con la incorporación del gen HaHB4, comparados con el control sin transformación, el peso individual de los granos, el rendimiento, la producción de rastrojos y la materia seca total fueron 10 %, 30 %, 18 % y 23 % superiores, respectivamente (Tabla 5). Estos resultados concuerdan con lo descrito por González *et al.* 2019 y 2020 mostrando que la incorporación del gen HaHB4 en plantas de trigo mejora los rendimientos en un amplio rango de niveles de productividad. Ayala *et al.* (2023) concluyeron que estas respuestas son crecientes al aumentar el déficit hídrico o con estrés por calor (temperatura del aire > 30°C) de entre 30 y 70°Cd entre septiembre y noviembre. En las condiciones de estos ensayos las respuestas relativas entre cultivares fueron similares (Tabla 5) sugiriendo que los cultivos estuvieron expuestos a diferentes factores de estrés durante su crecimiento durante la formación del rendimiento.

Tabla 5: Promedio de componentes del rendimiento y producción de dos cultivares de trigo en condiciones representativas de la región semiárida pampeana promedio de 2 niveles de nutrición nitrogenada. IC: Índice de cosecha. Letras diferentes en sentido vertical indican diferencias ($p < 0,10$) entre los tratamientos de fertilización. La ausencia de letras indica diferencias no significativas ($p < 0,10$) entre tratamientos de fertilización.

Campaña	Tratamiento	Granos m^{-2}	Peso del grano ($mg\ grano^{-1}$)	Rendimiento ($kg\ ha^{-1}$)	Rastrojos ($kg\ ha^{-1}$)	IC
2021	Algarrobo	17932	24 a	4397 a	6674 b	40
	Algarrobo HB25	20130	29 b	5698 b	7724 a	42
2022	Algarrobo	6047 b	22 b	1335 b	3100 b	31
	Algarrobo HB25	7808 a	23 a	1778 a	3817 a	32

En las condiciones de estos ensayos, al aumentar la cantidad total de N incorporada en la biomasa aérea (rastrojos + granos) de los cultivos aumentó la cantidad de nitrógeno extraído en los granos (Fig.3)

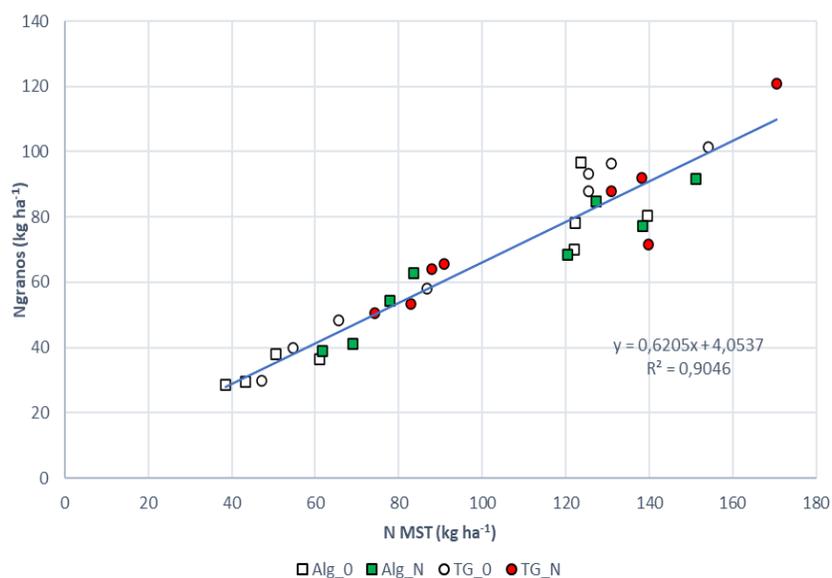


Figura 3: Relación entre cantidad total de Nitrógeno en granos (Ngranos) y cantidad total de Nitrógeno en el cultivo (NMST) para los tratamientos Algarrobo sin fertilizar (Alg_0); Algarrobo fertilizado (Alg_N); AG-HB4.25 sin fertilizar (TG_0) y AG-HB4.25 fertilizado (TG_N).

La concentración y partición del N entre los granos y la biomasa aérea (rastrojos) mostró respuestas independientes entre el manejo de la fertilización nitrogenada y el material cultivado (Tabla 6). La concentración de N en los granos y en los rastrojos y la extracción total de este elemento fueron mayores en los cultivos fertilizados sin describirse diferencias en el índice de cosecha del nutriente (Tabla 7). En promedio para ambas campañas y los 2 cultivares evaluados, en los tratamientos fertilizados la concentración de N en los granos fue 23 % superior que en el control mientras que en los rastrojos esta diferencia fue del 11 % (Tabla 7).

Tabla 6: Resumen del análisis de la varianza de concentración y partición de nitrógeno de trigo en cultivado condiciones representativas de la región semiárida pampeana según cultivares y manejo del nitrógeno. NS: no significativo ($p > 0,10$), MST: Materia seca total, ICN: Índice de cosecha de N.

Factor de variación	N granos		N rastrojos		N MST	ICN
	(%)	(kg ha ⁻¹)	(%)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	
Campaña 2021						
Fertilización (A)	NS	NS	0,03	0,04	NS	NS
Material (B)	NS	0,09	0,01	NS	NS	NS
Interacción A x B	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Campaña 2022						
Fertilización (A)	0,00	0,00	NS	0,01	0,00	NS
Material (B)	0,09	0,02	NS	NS	0,01	NS
Interacción A x B	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Tabla 5: Promedio de componentes de concentración y contenidos totales de nitrógeno en granos y rastrojos de trigo cultivado en dos campañas bajo condiciones representativas de la región semiárida pampeana según 2 niveles de nutrición nitrogenada promedio de 2 cultivares. MST: materia seca del cultivo (NMST); ICN: Índice de cosecha del nitrógeno.

Tratamiento	N granos		N rastrojos		N MST	ICN
	(%)	(kg ha ⁻¹)	(%)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	
Sin fertilizar	2,11 a	63 a	0,59 a	30 a	93 a	68
Fertilizado con N	2,61 b	70 b	0,68 b	39 b	109 b	65

Al comparar los 2 cultivares, en promedio para el manejo del N, solo se observaron diferencias significativas en la cantidad total de N incorporado en los granos, la concentración del N en los rastrojos y en la cantidad total de N en el cultivo (Tabla 6). La información disponible no fue suficiente para describir diferencias en la concentración de N en los granos, al igual que en la extracción con los rastrojos, ni en el índice de cosecha de N (Tabla 6). En los cultivares con la incorporación del gen HaHB4, comparados con el cultivar sin transformar, se observó 19 % más de N incorporado en los granos y 11 % más de N en el cultivo (granos + rastrojos). Al analizar la concentración de N en la materia seca de los rastrojos en los cultivares con la incorporación del gen fue 14 % inferior respecto de su contraparte sin modificar (Tabla 8).

Tabla 6: Promedio de componentes de concentración y contenidos totales de nitrógeno en granos y rastrojos de dos cultivares de trigo en condiciones representativas de la región semiárida pampeana promedio de 2 niveles de nutrición nitrogenada. MST: materia seca del cultivo (NMST); ICN: Índice de cosecha del nitrógeno.

Tratamiento	N granos		N rastrojos		N MST	
	(%)	(kg ha ⁻¹)	(%)	(kg ha ⁻¹)	(kg ha ⁻¹)	ICN
Algarrobo	2,46	61 b	0,68 a	35	96 b	65
Algarrobo HB25	2,26	73 a	0,59 b	34	107 a	68

Independientemente del material cultivado al aumentar los rendimientos en grano la concentración de N en los granos disminuye (Fig. 4). La mayor, y significativa, reducción de la concentración de N en los rastrojos del cultivar con introducción del gen HaHB4 comparado con la dilución en los granos sugiere que el mejor comportamiento de este material ante el estrés también contribuyó a mantener la translocación, acumulación de N en los granos (Tabla 8).

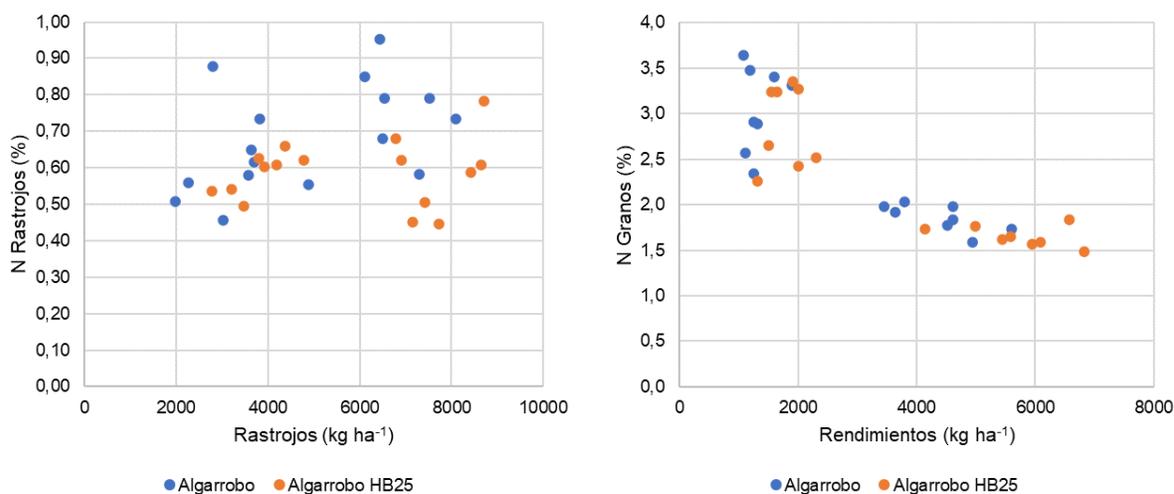


Figura 4: Concentración de nitrógeno y producción de rastrojos o de granos de dos cultivares de trigo en condiciones de producción de la región semiárida pampeana.

CONCLUSIONES

- El cultivo de trigo con la introducción del gen HaHB4 bajo las condiciones estudiadas, mejoró el rendimiento medio (30 %) asociado principalmente a un mayor peso medio de los granos describiendo mejores condiciones para el crecimiento durante el llenado de estos. Estos resultados validan la hipótesis de mejores condiciones de crecimiento durante el ciclo y en la formación del rendimiento de trigo al introducir el gen HaHB4.
- En cultivares de trigo con el gen HaHB4 la incorporación total de N en la biomasa aérea fue mayor, superando en un 11 % a los testigos sin cambios significativos en la concentración de N en granos. La concentración del N en los rastrojos disminuyó, pero sin modificarse significativamente la partición hacia los granos. Estos resultados validan que la incorporación de N en los cultivos también mejora al introducir el gen HaHB4 sin describir cambios en su uso evaluado por el índice de cosecha de N.

BIBLIOGRAFÍA

- Álvarez, C. O. (2020). La importancia del agua para producir trigo en la región semiárida y subhúmeda pampeana. *Notas Agrícolas Pampeanas* N°1: 7-8.
- Analytical Software. (2015). Statistix® 9.1 Analytical Software. Tallahassee, FL. USA.
- Ayala, F., Curin, F., Diaz-Zorita, M., Otegui, M. E., Chan, R. L. y González, F. G. 2023. HB4 transgenic wheat: Ecophysiological components behind the yield impact in a modern cultivar adapted to the Argentine Pampas. 2do Simposio de mejoramiento genético vegetal, Córdoba (Argentina), p.54-58.
- Calafat, B. F., Diaz-Zorita, M., Ferrari, E., Molas, M. L., Picca, A., Yannicari, M. y Zingaretti, O. (2021). Trigo HB4: realidades y desafíos para la región semiárida pampeana. *Notas Agrícolas Pampeanas* N°3: 21-24.
- Dezar, C. A., Gago, G. M., González D. H. y Chan R. L. (2005). Hahb-4, a sunflower homeobox-leucine zipper gene, is a developmental regulator and confers drought tolerance to *Arabidopsis thaliana* plants. *Transgenic Research* 14, 429-440.
- Dillchneider, A., Frasier, I., Funaro, D., Fernández, R. y Quiroga, A. 2019. Estrategias de fertilización nitrogenada para incrementar el rendimiento y proteína de trigo en la región semiárida pampeana. *Semiárida*, 29, 5362.
- Echeverría, H., Barbieri, P., Sainz Rosas, H., y Covacevich, F. (2005). Fertilización nitrogenada y métodos de diagnóstico de requerimientos de nitrógeno en trigo. *Informaciones Agronómicas*, 26, 8-15.
- Fernandez, M. A. (2020), El trigo en la región subhúmeda seca pampeana. Ed.UNLPam, Santa Rosa (LP), Argentina, 202 pp.
- Ferraris, G., Couretot L. y Ponsa J. C. (2007). Evaluación del efecto de un fertilizante foliar nitrogenado sobre el rendimiento, sus componentes, la eficiencia de uso del nitrógeno y la calidad en cebada cervecera y trigo. *Información técnica de Trigo y otros cultivos de invierno, campaña 2007. Publicación Miscelánea N°107. INTA EEA Rafaela* 45:56.
- Gaggioli, C., Noellemeyer, E., & Quiroga, A. R. (2020). Productividad física y económica del agua en cultivos invernales tradicionales y alternativos en la región semiárida pampeana. *Notas Agrícolas Pampeanas* N°1: 4-6.
- García, F. O., Díaz Zorita, M. (2014). La fertilidad de los suelos y el uso de nutrientes en la producción agrícola extensiva de Argentina. *El Deterioro del Suelo y del Ambiente de la Argentina. Tomo I. Parte 2.*
- González, F. G., Rigalli N., Miranda P. V., Romagnoli, M., Ribichich, K. F., Trucco, F., Portapila, M., Otegui, M. E. y Chan, R. L. (2020). An Interdisciplinary Approach to Study the Performance of Second-generation Genetically Modified Crops in Field Trials: A Case Study With Soybean and Wheat Carrying the Sunflower HaHB4 Transcription Factor. *Front Plant Sci. Mar* 6; 11:178.
- González, F. G., Capella, M., Ribichich K. F., Curín, F., Giacomelli, J. I., Ayala, F., Watson, G., Otegui, M. E. y Chan, R. L. (2019). Field-grown transgenic wheat expressing the sunflower gene HaHB4 significantly outyields the wild type. *Journal of Experimental Botany* 70:1669-1681.
- Iturri, A., Kloster, N., Beroisa, C., y Díaz-Zorita, M. (2022). Del nitrógeno en la urea al nitrógeno del suelo. *Notas Agrícolas Pampeanas* N°5: 33-35.

- Kruger, H., Frolla F., y Zilio J. 2020. Soil depth, water availability and wheat yield in the austral pampa of Argentina. *Cienc. Suelo (Argentina)* 38: 274-283.
- Manavella, P. A., Arce A. L., Dezar C. A., Bitton F., Renou J. P., Crespi M. y Chan R. L. 2006. La diafonía entre las vías de señalización del etileno y la sequía está mediada por el factor de transcripción Hahb-4 del girasol. *El diario de la planta* 48,125–137
- Miravé, J. P., Togenetti, J. A., Aguirrezabal, L. A. N. y Assuero, S. G. (2014). Fundamentos de la nutrición mineral en plantas. En Echeverría, H. E., García, F. O., *Fertilidad de suelos y fertilización de cultivos*, Ediciones INTA, 131-154.
- Quiroga, A., Bono, A. (2012). Manual de fertilidad y evaluación de suelos. INTA EEA Anguil *Publicación Técnica* 71: 39-54.
- Quiroga, A., Funaro, D. y Ormeño, O. (2003). Aspectos del manejo del agua del suelo para el cultivo de trigo. En INTA Anguil, *Boletín Técnico* 76:33-44.
- Ribichich, K. F., Chiozza, M., Ávalos-Britez, S., Cabello, J. V., Arce, A. L., Watson, G., Arias, C., Portapila, M., Trucco, F., Otegui, M. E. y Chan, R. L. (2020). Successful field performance in warm and dry environments of soybean expressing the sunflower transcription factor HaHB4. *Revista de Botánica Experimental*, volumen 71, 3142–3156.
- Salinas, A., Giubergia, J. P., Boccardo, M., Severina, I. y Aimar, F. (2015). Consumo y disponibilidad de agua en cultivo de trigo. *Revista Riego y Drenaje*, 56-57.