

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

FACULTAD DE AGRONOMÍA

**COMPONENTES ECOFISIOLÓGICOS Y NUMÉRICOS DEL
RENDIMIENTO DE TRIGO QUE EXPLICAN EL INCREMENTO DE
RENDIMIENTO DEL PERÍODO 2003-2023**

por

Felipe GANEM CAÑIZAS

**Trabajo final de grado
presentado como uno de los
requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo**

PAYSANDÚ

URUGUAY

2025

Este Trabajo Final de Grado se distribuye bajo licencia
"Creative Commons **Reconocimiento – No Comercial**".



PÁGINA DE APROBACIÓN

Trabajo final de grado aprobado por:

Director/a:

Ing. Agr. (MSc.) Nicolás Fassana

Ing. Agr. (MSc.) Mauricio Bustamante

Tribunal:

Ing. Agr. (MSc.) Nicolás Fassana

Ing. Agr. (PhD.) Nicolás Maltese

Ing. Agr. (MSc.) Maximiliano Verocai

Fecha:

9 de julio de 2025

Estudiante:

Felipe Ganem Cañizas

AGRADECIMIENTOS

En primero lugar quiero agradecer a mis padres por el apoyo incondicional y por impulsarme a dar lo mejor de mí en cada momento. Sin ellos nada de esto hubiese sido posible.

A Juan, un gran compañero que me acompaña desde mi primer examen en la facultad;

A Luis y Thelma que se incorporaron más adelante;

A la “pocha” por ser parte fundamental de este viaje;

A todos aquellos amigos que conocí en el camino, pero en especial a Andrés,

A aquellos profesores que fueron capaces de contagiar su entusiasmo por la agronomía, pero en especial a Nicolás Fassana, mi tutor, por el gran apoyo y seguimiento durante este trabajo.

Por último, a los funcionarios de la EEMAC que gracias a su esfuerzo, fue posible contar con los datos necesarios para este trabajo. En especial a Alejandro Akerman y Matías Van den Dorpel, con quienes coincidí en el trabajo de campo.

TABLA DE CONTENIDO

PÁGINA DE APROBACIÓN	3
AGRADECIMIENTOS	4
TABLA DE CONTENIDO	5
LISTA DE FIGURAS	7
ABREVIATURAS	8
RESUMEN	9
SUMMARY	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. OBJETIVOS	14
2. MARCO TEÓRICO	15
2.1. INCREMENTO DE RENDIMIENTO	15
2.1.1. <i>Incremento de rendimiento a nivel mundial</i>	15
2.1.2. <i>Incremento del rendimiento en Uruguay</i>	18
2.2. ETAPAS DEL CULTIVO	19
2.3. EFECTO AMBIENTAL	20
2.4. COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO	22
2.4.1. <i>Coeficiente de fertilidad de espiga y peso seco de espiga</i>	24
2.4.2. <i>Evolución de componentes</i>	26
2.5. COMPONENTES ECOFISIOLÓGICOS	28
2.5.1. <i>Evolución de componentes</i>	30
2.5.2. <i>Relación fuente-destino</i>	32
2.6. HIPÓTESIS	33
3. MATERIALES Y MÉTODOS	34
3.1. MATERIALES EVALUADOS	35
3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL	35
3.3. MEDICIONES DEL ENSAYO	36

3.4.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO	37
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
4.1.	CLIMA.....	38
4.1.1.	<i>Temperatura</i>	38
4.1.2.	<i>Precipitaciones</i>	39
4.1.3.	<i>Radiación</i>	40
4.1.4.	<i>Coefficiente fototermal</i>	41
4.2.	INCREMENTO DE RENDIMIENTO.....	42
4.3.	COMPONENTES NUMÉRICOS DE RENDIMIENTO	45
4.3.1.	<i>Población de plantas y capacidad de macollaje</i>	45
4.3.2.	<i>Fertilidad de macollos</i>	47
4.3.3.	<i>Caracterización de la espiga</i>	49
4.3.3.1.	Rendimiento espiga	51
4.3.4.	<i>Caracterización del grano</i>	52
4.3.4.1.	Número de granos	53
4.3.4.2.	Peso del grano.....	54
4.3.4.3.	Relación entre el número y peso de granos	55
4.4.	COMPONENTES ECOFISIOLÓGICOS DE RENDIMIENTO.....	56
4.4.1.	<i>Producción de biomasa</i>	56
4.4.2.	<i>Índice de cosecha</i>	57
4.5.	COMPONENTES CLAVES EN LA DIFERENCIA DE RENDIMIENTO	59
4.5.1.	<i>Random Forest</i>	59
4.5.2.	<i>Análisis de regresión</i>	61
4.6.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	64
5.	CONCLUSIONES.....	69
6.	REFERENCIAS	70
7.	ANEXOS	89

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Evolución de temperatura en la Estación experimental (2003 – 2023)	39
Figura 2 Precipitación acumulada en la Estación experimental (2003 – 2023)	40
Figura 3 Radiación acumulada en la Estación experimental (2003 – 2023)	41
Figura 4 Coeficiente fototermal en la Estación experimental (2003 – 2023)	42
Figura 5 Evolución de rendimiento de los materiales evaluados (2003-2023)	43
Figura 6 Evolución de la población de plantas (2003-2023)	45
Figura 7 Evolución de la capacidad de macollaje (2003-2023)	46
Figura 8 Evolución de la fertilidad de macollos (2003-2023)	48
Figura 9 Caracterización de la espiga (2003-2023)	49
Figura 10 Evolución del rendimiento de espiga (2003-2023)	51
Figura 11 Caracterización del grano (2003-2023)	52
Figura 12 Relación entre Número de granos m ⁻² y Peso del grano	55
Figura 13 Evolución en la producción de biomasa (2003-2023)	56
Figura 14 Evolución en el Índice de cosecha (2003-2023)	57
Figura 15 Análisis Random Forest para la diferencia (Tercil-Testigos) en los componentes de rendimiento	59
Figura 16 Regresión del rendimiento (Tercil superior) con los diferentes componentes numéricos (valor relativo)	62
Figura 17 Regresión del rendimiento (Tercil superior) con los diferentes componentes ecofisiológicos	63

ABREVIATURAS

BT: Biomasa total

FE: Fertilidad de espigas (granos PSE⁻¹)

FM: Fertilidad de macollos

IC: Índice de cosecha

NEM: Número de espigas m⁻²

NEP: Número de espigas planta⁻¹

NGE: Número de granos espiga⁻¹

NGM: Número de granos m⁻²

NMM: Número de macollos m⁻²

NMP: Número de macollos planta⁻¹

NPM: Número de plantas m⁻²

PG: Peso de grano

PSE: Peso seco de espigas en antesis

RE: Rendimiento espiga

RESUMEN

Teniendo en cuenta el incremento en la población mundial en las próximas décadas, se estima que la demanda por alimentos también se va a ver incrementada en el futuro, siendo el trigo una de las principales fuentes de energía y proteína. Sin embargo, al tratar con recursos finitos, el mejoramiento genético surge como la alternativa más viable para lograr suplir la creciente demanda.

La variabilidad cuantificada en el progreso genético presentado por diferentes autores, genera cierta incertidumbre en cómo se logrará superar este desafío en el futuro, por lo que es necesario generar información a nivel local que contribuya al conocimiento sobre la evolución y determinantes del rendimiento en trigo.

El presente trabajo tuvo como objetivo estudiar la evolución del rendimiento y de sus principales componentes numéricos y ecofisiológicos, así como identificar posibles interacciones y factores limitantes. Para ello se analizó una base de datos perteneciente al programa de Caracterización de Cultivares de Trigo de la EEMAC para el periodo 2003-2023.

Se seleccionaron los cultivares ubicados en el tercil superior del rendimiento anual y se los comparo con dos testigos de largo plazo (INIA Tijereta e INIA Churrinche), con el fin de identificar los componentes que explican las diferencias de rendimiento entre los cultivares modernos y los antiguos.

Los resultados indican que los cultivares modernos presentaron un tasa de incremento de rendimiento de $86 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($1,37 \% \text{ año}^{-1}$) ($p\text{-valor}=0,0735$), pasando de valores cercanos a 6000 kg ha^{-1} a aproximadamente 8000 kg ha^{-1} al final del período, con una brecha de 1700 kg ha^{-1} entre ambos grupos.

El componente numérico de rendimiento que explicó en mayor medida el incremento de rendimiento, fue el número de granos (número de granos m^{-2}) como era de esperar en función de lo mencionado por la mayor proporción de autores a nivel mundial. En este sentido, los cultivares modernos se diferenciaron de los testigos a una tasa de $207 \text{ granos m}^{-2} \text{ año}^{-1}$. Sin embargo, el peso del grano (mg) se mantuvo constante.

Con respecto a los componentes ecofisiológicos, se registró un incremento en la producción de biomasa acompañado de una disminución en el índice de cosecha. Tomando en cuenta estos resultados, se puede interpretar que los cultivares modernos presentan una menor eficiencia agronómica, dado por un desbalance en la relación biomasa total a cosecha/rendimiento en grano.

Por lo tanto, en un futuro será necesario generar incrementos en la capacidad de fosa de los cultivos, permitiendo lograr aprovechar estas altas producciones de biomasa que están siendo desaprovechadas.

Palabras claves: *Triticum aestivum*, rendimiento potencial seco, componentes numéricos de rendimiento, componentes ecofisiológicos de rendimiento

SUMMARY

Considering the expected increase in the global population over the coming decades, it is estimated that the demand for food will also rise in the future, with wheat being one of the primary sources of energy and protein. However, given the finite nature of resources, genetic improvement emerges as the most viable alternative to meet this growing demand.

The variability quantified in genetic progress reported by different authors introduces some uncertainty regarding how this challenge will be overcome in the future. Therefore, it is necessary to generate local information that contributes to understanding the evolution and determining factors of wheat yield.

This study aimed to analyze the evolution of yield and its main numerical and ecophysiological components, as well as to identify potential interactions and limiting factors. For this purpose, a database from the Wheat Cultivar Characterization Program at EEMAC covering the period 2003-2023 was analyzed.

The cultivars ranked in the top third of annual yield were selected and compared with two long-term reference cultivars (INIA Tijereta and INIA Churrinche) to identify the components explaining yield differences between modern and older cultivars.

The results indicate that modern cultivars exhibited a yield increase rate of $86 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ($1,37\% \text{ year}^{-1}$) (p-value: 0,0735), progressing from values close to 6000 kg ha^{-1} to approximately 8000 kg ha^{-1} at the end of the study period, with a yield gap of $1,700 \text{ kg ha}^{-1}$ between the two groups.

The numerical yield component that most significantly contributed to the yield increase was grain number (grains m^{-2}), which aligns with findings from the majority of authors worldwide. In this regard, modern cultivars differed from the reference cultivars at a rate of $207 \text{ grains m}^{-2} \text{ year}^{-1}$, while grain weight (mg) remained unchanged.

Regarding ecophysiological components, an increase in biomass production was recorded, accompanied by a decline in the harvest index. Based on these results, it can be interpreted that modern cultivars exhibit lower agronomic efficiency due to an imbalance in the ratio of total biomass at harvest to grain yield.

Therefore, in the future, it will be necessary to enhance crop sink capacity, allowing better utilization of the high biomass production that is currently being underutilized.

Keywords: *Triticum aestivum*, potential rainfed yield, numerical yield components, ecophysiological yield components

1. INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum aestivum*) es uno de los cereales más sembrados a nivel mundial. Gracias a su grano rico en almidón y proteína, se posiciona como una fuente primordial de alimento, no solo para el ser humano, sino también para el ganado, al ser incorporado de múltiples maneras en su dieta (Poehlman & Sleper, 2005). En este sentido, el trigo representa una de las principales fuente de proteína y energía. Junto con otros granos como arroz y carne, significan un 50% de energía y proteína del mundo (Abbate et al., 2017).

El siglo pasado se caracterizó por presentar dos realidades contrastantes en cuanto al incremento de la producción. Hasta la primer mitad, el incremento en la producción se explica principalmente por la siembra en áreas naturales (Ernst, 2011).

Los avances tecnológicos y científicos resultado de la segunda Guerra Mundial, principalmente en la década de los 50', fueron fundamentales para lograr grandes progresos en cuanto al mejoramiento genético de estos cultivos, lo cual fue denominado Revolución Verde (Beltrán, 1971; Ceccon, 2008). Dicha revolución se dio a nivel mundial, permitiendo llegar a incrementos del 5,1% hasta 1983 que luego debido a la exploración de suelos marginales, pasó a un incremento anual del 2,5% (Food and Agriculture Organization of the United Nations [FAO], 1995). Incluso algunos autores aseguran que este proceso de cambio inició en la década de los 40' en una serie de programas de experimentación de semillas híbridas de trigo y maíz en México tras la creación del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT) (Picado, 2008).

En la actualidad, mejoradores y productores se enfrentan al gran desafío de suplir el incremento en la demanda de alimento a nivel mundial. Para el 2050, se espera un incremento de la población de 8 a 10 billones en la población mundial (Lutz & Samir, 2010) y según el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo ([CIMMYT], s.f.), la demanda de trigo para el 2050 aumentará en un 50%.

Por otra parte, Fischer et al. (2014) aseguran que en el futuro se dará un incremento en los ingresos económicos en la población. Este cambio se espera que impacte directamente en el mercado de los cereales, ya que, en aquellos sectores con mayores niveles de ingreso, sustitución de proteína vegetal (cereales) por proteína de origen animal. Sin embargo, este cambio en la alimentación implicaría que, en especial para aquellos países más desarrollados, se dé un incremento en la demanda de granos para la alimentación de ganado en encierros.

A su vez, estos autores aseguran que se espera un incremento en la importancia del uso de granos para la producción de biodiesel, por lo que es otra posible vía por la cual se va a incrementar la demanda por trigo y otros cereales.

En este sentido, Ernst (2011) menciona dos posibles alternativas:

1. Ampliar la frontera agrícola, avanzando sobre agroecosistemas más frágiles o,
2. Aumentar los rendimientos manteniendo el área actual.

La agricultura se encuentra limitada por el área apta para la siembra. Es por ello que es necesario tener en cuenta que ésta es finita, siendo imposible expandir indefinidamente la frontera de producción, lo cual, a su vez, lleva a la producción sobre suelos marginales, lo cual va a requerir de superar otras barreras como, por ejemplo, disponibilidad de agua, pH y a su vez, se estarán afectando servicios ecológicos naturales (Ernst, 2011).

Por lo tanto, incrementar el rendimiento alcanzable para lograr incrementar la producción mundial de trigo parece ser la alternativa más realista (Hafner, 2003; Miralles & Slafer, 2007).

En esta misma línea, Quincke et al. (2018) aseguran que, para lograr suplir las demandas, es necesario duplicar los rendimientos actuales a nivel de chacra en Uruguay, llegando a los 6000 kg ha⁻¹, por lo que el rendimiento debería evolucionar a una tasa de por lo menos 80 kg ha⁻¹ año⁻¹.

Desde los 2000`, el rendimiento de trigo ha presentado un incremento promedio a nivel nacional de 78 kg ha⁻¹ año⁻¹ (FAO, 2025)¹. Lograr mejorar la tasa de incremento anual a nivel nacional, implica cuantificar el cambio en los componentes numéricos del rendimiento.

La agricultura juega un rol sumamente importante en la economía del país. Es por ello que considerando únicamente el sector primario explicó un 5% del Producto Bruto Interno (PIB) en el 2023 (Uruguay XXI, 2024). Sin embargo, tomando en cuenta su participación en el sector industrial, de manera indirecta participa en el entorno del 14-16% PIB (Uruguay XXI, 2024).

¹ FAOSTAT: En "Países" se marcó "Uruguay", en "Elementos", "Rendimiento" y en "Productos", "Trigo"

En el ámbito agrícola, el trigo se posiciona como el segundo cultivo de mayor importancia después de la soja, con un área sembrada en la zafra 2023/24 de casi 270 mil hectáreas. La producción de trigo en el Uruguay ha registrado incrementos en las últimas siete zafras, alcanzando un récord de 1.343.772 toneladas en el 2023, con un rendimiento promedio de 5037 kg ha⁻¹ (Uruguay XXI, 2024).

Para poner en perspectiva, a nivel mundial la producción mundial de trigo en la temporada 2023/2024 fue de 799 millones de toneladas, en una superficie total de 220,4 millones de hectáreas (FAO, 2025)².

Así, la importancia de este estudio radica en evaluar el desempeño de los materiales modernos, cuantificando el progreso genético logrado y analizando los factores que han contribuido a su evolución. A su vez, sirve como actualización de trabajos locales como el de Hoffman et al. (2018).

Contar con información actualizada sobre las interacciones entre componentes y su participación en el rendimiento, es una fuente de información sumamente relevante a la hora de decidir futuras líneas de investigación y mejoramiento genético.

1.1. OBJETIVOS

El objetivo general es generar información que permita entender el cambio temporal de los componentes numéricos del rendimiento y su aporte en el incremento de rendimiento de trigo a nivel nacional.

Los objetivos específicos son:

- 1) Cuantificar el incremento de rendimiento alcanzable limitado por agua en los últimos 20 años,
- 2) Identificar los cambios en la estructura de los componentes numéricos y ecofisiológicos,
- 3) Cuantificar la relación entre los componentes numéricos y ecofisiológicos con el incremento de rendimiento alcanzable limitado por agua.

² FAOSTAT: En “Regiones” se marcó “Mundo + (Total)”, en “Elementos”, “Producción – Cantidad y Área cosechada” y en “Productos”, “Trigo”

2. MARCO TEÓRICO

2.1. INCREMENTO DE RENDIMIENTO

Evans y Fischer (1999) definen rendimiento potencial como aquel que se logra por la variedad más adaptada al ambiente donde se produce, que por lo general es la más reciente, por lo que es importante determinar la región en la cual se realiza la evaluación ya que hay una fuerte interacción genotipo-ambiente. A su vez, para alcanzar dicho rendimiento es necesario realizar el mejor uso de insumos agrícolas, logrando excluir el cultivo del estrés tanto biótico como abiótico, sin restricciones de agua, nutrientes ni otros efectos bióticos como malezas ni pestes.

En la práctica, el rendimiento alcanzable limitado por agua, puede plantearse como una meta alcanzable. Este nivel de productividad, se define como el rendimiento potencial logrado en condiciones donde el abastecimiento de agua depende de lo que el suelo sea capaz de almacenar y de las lluvias; siendo altamente dependiente de la localidad, sin limitantes nutricionales y factores reductores (Fischer, 2014; Van Ittersum et al., 2013).

2.1.1. Incremento de rendimiento a nivel mundial

La irrupción de la Revolución Verde a partir de los años 50', llevó a un incremento en el progreso genético del cultivo de trigo. En este sentido, autores como del Pozo et al. (2014) y Matus et al. (2012) en Chile, presentaron resultados que indicaban que los rendimientos hasta 1960 se encontraban estancados, pero a partir de ese momento, se registraron incrementos a una tasa de $43,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (0,51 % año^{-1}) y $246 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (2,6 % año^{-1}). Esta misma tendencia fue registrada por Aisawi et al. (2015) en México, por Calderini et al. (1995) en Argentina y Rodrigues et al. (2007) en Brasil, donde se registraron incrementos similares cercanos a los $45 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (1,5%) analizando la segunda mitad del siglo pasado.

De igual modo, materiales lanzados en España presentaron una tendencia positiva y constante a lo largo de todo el siglo pasado, registrando incrementos de $35,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (0,8% año^{-1}) (Sanchez-Garcia et al., 2013).

Según Shearman et al. (2005), el rendimiento también se incrementó de manera lineal, pero la tasa de incremento de rendimiento fue menor a la mencionada anteriormente, llegando a $22,6 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ hasta fines del siglo pasado.

A su vez, en Francia, Brancourt-Hulmel et al. (2003) presentaron resultados donde, en ambientes con alto aporte de nitrógeno y con control de fungicida, la tasa de incremento para el periodo 1942-1992, fue de aproximadamente $63 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, substancialmente superiores a las mencionadas anteriormente.

No obstante, diferentes autores aseguran que el progreso genético se encuentra mermado, indicando que, en la actualidad, pese a que el rendimiento potencial sigue incrementando, el progreso anual ha disminuido. Miralles y Slafer (2007) afirman que en el periodo 1980 hasta el 2005, a nivel mundial se dio un estancamiento en la evolución del rendimiento con incrementos de $36 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Esta misma tendencia fue reportada también por Lo Valvo et al. (2017) en Argentina, que tras analizar el comportamiento de trigo durante el periodo 1918-2011, concluyeron que entre 1940-1999 se logró un incremento en rendimiento de 51 kg ha^{-1} ($1,17\% \text{ año}^{-1}$). Aun así, en los últimos años del estudio, los incrementos mermaron a 14 kg ha^{-1} ($0,18\% \text{ año}^{-1}$).

En Brasil, Woyann (2018), asegura que el rendimiento de trigo en el periodo 1998 a 2018, no se encuentra estancado, evolucionando a una tasa de $33,9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($1,28\% \text{ año}^{-1}$). Sin embargo, al comparar la tasa de progreso con la presentada por otros autores brasileños como Rodrigues et al. (2007), se podría estimar que en realidad sí se estuviese dando un estancamiento en los materiales modernos.

Estos resultados coinciden con lo mencionado por Fischer y Edmeades (2010) donde también se registraron mermas en el rendimientos a partir de 1970 aproximadamente en evaluaciones realizadas en México. En la mitad del siglo pasado, la tasa de incremento fue de $1\% \text{ año}^{-1}$, pero a finales del siglo, la tasa disminuyó a $0,3\% \text{ año}^{-1}$, lo cual equivale a 24 kg ha^{-1} . A su vez, Fischer (2007), menciona que el progreso de los rendimientos de los materiales lanzados por CIMMYT ha disminuido a $0,5\% \text{ año}^{-1}$ entre 1996-2005, ajustándose a las tasas porcentuales mencionadas anteriormente.

Otros autores atribuyen la merma en el rendimiento debido al clima. Esto se debe a que, al aislar el rendimiento del efecto ambiente, las tendencias eran mayores. Bornhofen et al. (2018) donde se evaluaron materiales durante el periodo 2004-2013, se registraron incrementos lineales de rendimiento de $61,59 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ explicado únicamente por la genética, pero si se toma en cuenta el factor ambiental, este incremento de rendimiento desciende a $39,40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Cabe mencionar que el incremento comercial analizado en dicho trabajo fue de $34,1 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo cual es de esperar dado que a nivel predial se cuenta con menor control ambiental.

Beche et al. (2014) aseguran que no sólo se ha reducido la tasa de incremento del rendimiento, sino que el rendimiento per se, se encuentra estancado tras analizar materiales de origen brasileño a comienzos del siglo XXI en el entorno de los 3500-4000 kg ha⁻¹.

En Francia y Reino Unido, Brisson et al. (2010) y Snape (2004) respectivamente, también se presentaron resultados donde se puede apreciar que a finales del siglo pasado se dio un punto de inflexión donde los rendimientos se estancaron en el entorno de los 7000-8000 kg ha⁻¹. Acreche et al. (2008) aseguran que los materiales españoles se encuentran estancados también en el entorno de los 8000 kg ha⁻¹ pero identificaron que el punto de inflexión se encuentra en 1970.

Sin embargo, tomando en cuenta a Curin et al. (2021) no muestran haber un estancamiento en el incremento de rendimiento en los últimos 50 años de evaluación de materiales argentinos. En dicho periodo, la tasa de incremento fue de aproximadamente 56 kg ha⁻¹ año⁻¹ (0,74% año⁻¹).

En México, Lopes et al. (2012) aseguran que las tasas de incremento de rendimiento entre 1977-2008 fueron de 42 kg ha⁻¹ año⁻¹ (0,7% año⁻¹).

A su vez, en Reino Unido, el incremento de rendimiento potencial fue de aproximadamente 61 kg ha⁻¹ año⁻¹ (0,6% año⁻¹) entre 1989-2008 (Fischer & Edmeades, 2010). En dicho periodo, los rendimientos lograron superar los 10000 kg ha⁻¹, dando como resultado una brecha de rendimiento de 30% del rendimiento potencial.

Abbate y Brach (2020), demostraron que el rendimiento para en trigo durante el periodo 1970-2018 en Argentina presentó un incremento en el progreso con un punto de inflexión en los 2000', pasando de 31 kg ha⁻¹ año⁻¹ a 46 kg ha⁻¹ año⁻¹ en el segundo período. Esto demuestra que no solo no hubo un estancamiento, sino que hubo un incremento en la tasa dado por el mejoramiento genético.

En una evaluación realizada por Xiao et al. (2012) en la región de Shandong (China), se registraron incrementos lineales de rendimiento en materiales lanzados entre 1969 y 2006 de aproximadamente 62 kg ha⁻¹ año⁻¹ (0,85% año⁻¹). Resultados similares fueron presentados por Wu et al. (2014), donde el incremento de rendimiento para el periodo 1945-2011, fue de 66 kg ha⁻¹ año⁻¹ (1% año⁻¹), mientras que Zhou et al. (2007) evaluó materiales que alcanzaron tasas de hasta 72 kg ha⁻¹ año⁻¹ (1,05% año⁻¹), donde la mayor tasa de incremento se dio a partir de 1980' gracias a la introducción de genes de enanismo.

2.1.2. Incremento del rendimiento en Uruguay

En Uruguay, al igual que en el resto del mundo, también se vio reflejado el interés por alcanzar mejores rendimientos potenciales en trigo, y es por ello que numerosos autores demostraron que existe una evolución positiva en cuanto al comportamiento de materiales nacionales.

Tomando en cuenta el estudio realizado por Calderini y Slafer (1998), se puede identificar como los rendimientos no mostraron un incremento significativo hasta el año 1978 aproximadamente, donde a partir de dicho año bisagra, el progreso del rendimiento de chacra anual pasa a ser de $30 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Quincke et al. (2018), donde tras haber analizado las tendencias de rendimiento durante 1918 y 2010, registraron incrementos de $32 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, donde los principales incrementos se dan a partir de finales de los 70´.

En un estudio realizado por Quincke y Kohli (2001) donde se evaluaron materiales durante 1980 y 2000, se registraron incrementos de rendimiento de $76 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($2,4\% \text{ año}^{-1}$) en ambiente con alta fertilidad y de $67 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($2,9\% \text{ año}^{-1}$) en ambiente de baja fertilidad.

La diferencia temporal en el punto de quiebre en el progreso genético de rendimiento entre los materiales nacionales, con lo demostrado anteriormente a nivel regional/mundial (50´ vs 80´), más allá de las diferentes realidades en cuanto a desarrollo experimental, puede estar explicado por la interrupción en el programa de mejoramiento de trigo en Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) en la década de los 50´, ya que generó pérdidas de germoplasma, retrasando el progreso nacional hasta después de los años 60´ (Luizzi, Abbadie et al., 2018).

Según Quincke et al. (2018), el rendimiento en Uruguay pasó de 500 kg ha^{-1} a casi 3100 kg ha^{-1} en los últimos 50 años de evaluación, lo que equivale a $25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. A su vez, se evaluaron condiciones de alta y baja fertilidad, registrando ganancias de $59 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($1,63\% \text{ año}^{-1}$) y $34 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($1,43\% \text{ año}^{-1}$) respectivamente (Bernheim et al., 1998).

Hoffman et al. (2018) presentaron tasas de incremento significativamente superiores a las mencionadas anteriormente, asegurando que hubo un incremento de $185 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ utilizando datos del programa de caracterización de cultivares ubicado en la EEMAC durante el periodo de 2000 al 2014.

Sin embargo, otros autores mencionan haber registrado una merma en la tasa de incremento del rendimiento. En función de la red de experimentos de Evaluación Nacional de Cultivares de INIA-INASE, los mejores 5 cultivares durante un periodo de tiempo que abarca desde 1992 a 2014, ha demostrado incrementos hasta el 2004, donde a partir de este momento, los incrementos en rendimiento se estancan. En este período se pasaron de rendimientos de 2000-5000 kg ha⁻¹ a 3500-8500 kg ha⁻¹ al final del período (Berger et al., 2018). Estos autores afirman que se debe a que el periodo de llenado de grano es relativamente corto comparado con lo presentado en otras regiones, sumado a que el Índice de cosecha (IC) también mostró valores inferiores a lo reportado por otros autores.

En esta misma línea, Godiño (2020) registró incrementos de casi 84 kg ha⁻¹ año⁻¹ durante el período 1997 al 2017 para el total de los materiales evaluados. Si bien existe una tendencia positiva en los rendimientos, esta autora menciona que a partir del 2003 hubo un estancamiento en el entorno de los 6000 kg ha⁻¹. Sin embargo, al analizar los 5 mejores cultivares de cada año, se lograron incrementos de 212 kg ha⁻¹ año⁻¹ (2,7% año⁻¹) superando la barrera de los 10000 kg ha⁻¹; valores muy superiores a lo mencionado por otros autores tanto a nivel nacional como internacional.

En este mismo trabajo, se puede apreciar como los rendimientos más altos, son logrados en La Estanzuela, que se encuentra al sur del país en el departamento de Colonia (Uruguay), lo cual indica que el ambiente (temperatura principalmente) es más favorable para la expresión del rendimiento para trigo (Rubio et al., 2017).

2.2. ETAPAS DEL CULTIVO

Para lograr evaluar el comportamiento de los componentes de rendimiento y su evolución en el tiempo, es necesario precisar en qué etapas del cultivo éstos se definen, ya que va a ser fundamental para comprender las diferentes interacciones que se dan y juegan un rol fundamental en la concreción del rendimiento.

En este sentido, Abbate et al. (1998) y Abbate et al. (2001, como se cita en Abbate, 2017), proponen que el ciclo de cultivo se divide fundamentalmente en tres etapas:

- i. Periodo de generación del área verde
- ii. Periodo de crecimiento de las espigas
- iii. Periodo de llenado del grano

La primera etapa se desarrolla desde emergencia hasta mitad de encañazón, que es cuando se da inicio al crecimiento de la espiga (Abbate, 2017). En este momento se logra llegar al IAF óptimo donde se capta más del 90% de radiación incidente Abbate (2004), por lo que es fundamental para lograr un buen aparato fotosintético, va a ser fundamental para abastecer al grano. A su vez, el largo de esta etapa va a ser menor en la medida que aumenta la temperatura y el fotoperíodo.

Con respecto al periodo de crecimiento de la espiga, es necesario aclarar que según estudios realizados por Fischer (1985), esta etapa abarca el periodo crítico del cultivo, que comienza entre 20-30 días previo a antesis y finaliza con el inicio del llenado de grano, donde coincide con la iniciación de espiguilla terminal y antesis. Al finalizar esta etapa, se define el número de granos, por lo que explica la importancia en el rendimiento dada su correlación con el mismo (Slafer, 2003).

Por último, desde antesis a madurez fisiológica se da el llenado de grano, finalizando así el ciclo del cultivo y determinando el rendimiento final. El peso del grano se determina sólo en esta última etapa, mientras que el número de granos se determina a lo largo de todo el ciclo del cultivo (Miralles et al., 2003), explicando así su importancia en la concreción de rendimiento.

2.3. EFECTO AMBIENTAL

El clima juega un rol fundamental en la concreción de rendimiento, y es por eso que, para lograr altos rendimientos, es necesario ubicar el periodo crítico en las mejores condiciones de temperatura y radiación posible. A su vez, se ha visto que tanto la temperatura, como la disponibilidad hídrica durante post-floración, van a determinar el peso del grano (Abbate, 2017).

El rango de temperaturas que permiten el normal crecimiento y desarrollo del cultivo, varían a lo largo del ciclo. En este sentido, Slafer y Rawson (1995) aseguran que la temperatura base del cultivo pasa de temperaturas por debajo de los 0 °C en germinación a los 7 °C en llenado de grano.

A modo general, se espera que, frente a aumentos de temperatura, la duración en días de cada una de las fases sea menor. Tomando en cuenta que la temperatura promedio óptima durante el llenado es de 15°C (Chowdhury & Wardlaw, 1978; Lizana & Calderini, 2013; Rivelli et al., 2021), en años con primaveras cálidas, se espera que el peso de grano sea menor dado que se acorta la fase de llenado, lo que reduce el peso potencial de los granos (Fischer, 2011; Calderini, Abeledo et al., 1999).

El NGM también se verá afectado frente a incrementos en la temperatura, donde Fischer (1985) demostró haber reducciones de 4% por cada grado de aumento en el lapso de 30 días previo a la floración.

A su vez, Rubio et al. (2017), observaron que el rendimiento se ve afectado cuando se incrementa la temperatura con máximas de 23 °C durante el periodo crítico, lo que dio lugar a una reducción del 24% en el rendimiento de los materiales evaluados.

El cambio climático, no sólo ha llevado a un incremento en la temperatura a nivel global, sino que también se espera un incremento en la concentración de gases de efecto invernadero, donde se esperan incrementos en el CO₂ en un 50% para el 2050 (Prentice et al., 2001). Estos incrementos en el CO₂ ambiental, pueden explicar variaciones en los componentes de rendimiento (Knopf et al., 2024).

En este sentido, Parry et al. (2004) aseguran que al duplicar la concentración de CO₂ de 350 a 720 ppm, se logran incrementos de rendimiento de casi 20%. Kimball et al. (1995) demostró que no solo la producción de biomasa se encontró correlacionada positivamente con el incremento de CO₂, sino que también hubo un incremento de 8% en el rendimiento del cultivo.

A pesar de que se podrían esperar incrementos en el rendimiento, se espera que en un ambiente con mayor concentración de CO₂, favorece la producción de biomasa estructural, sumado a una reducción en el PG, llevando a una reducción en el IC (Knopf et al., 2024). Estos autores, mencionan que la capacidad de utilizar dicho incremento en los asimilados producidos, se encuentra determinado por la capacidad de fosa del cultivo, por lo que indicaría cierta limitación en cuanto a la fuerza de fosa de los mismos.

Con respecto a la disponibilidad hídrica, Rubio et al. (2017), observaron que los rendimientos más altos fueron alcanzados con niveles de entre 30 y 120 mm de precipitación efectiva acumulada durante el PC. Tanto el exceso como la deficiencia hídrica llevan a una ineficiencia en la absorción y aprovechamiento de los nutrientes como nitrógeno.

Por otra parte, Hoffman et al. (2018) resaltaron que los mayores rendimientos se lograron con niveles de 400mm de agua disponible aparente a partir de Z.3.0 (aproximadamente durante septiembre, octubre y noviembre).

Sin embargo, el efecto que presenta una deficiencia hídrica sobre los componentes de rendimiento no es claro ya que depende principalmente del momento donde ocurra la deficiencia hídrica.

Autores como Castro et al. (2018), aseguran que dada la importancia del periodo crítico en la concreción del NGM, se puede ver fuertemente afectado dicho componente frente a condiciones estresantes durante este periodo.

No obstante, Kobata et al. (1992) aseguran que el tamaño del grano fue el principal factor que explica la reducción en el rendimiento.

Otro factor ambiental de suma importancia, es la radiación incidente, ya que juega un rol fundamental en la concreción de rendimiento. Hay evidencia en la cual se asegura que someter al cultivo al frente a diferentes niveles de radiación, se observaron diferencias significativas en cuanto a número y peso del grano (Balbi et al., 2013). Así mismo, Beed et al. (2007), aseguran que, frente a incrementos de radiación incidente, se esperan incrementos lineales en la producción de biomasa.

Por otra parte, el Coeficiente Fototermal (Q) es un indicador ambiental que toma en consideración la radiación incidente (MJ m^{-2}), la temperatura media y la temperatura base, que para trigo el valor utilizado fue $4,5^{\circ}\text{C}$ (Fischer, 1985). Este indicador es estimado para el período crítico (20 días previos y 10 días posteriores a la antesis) y tiene una relación lineal positiva con el número de granos por unidad de superficie (Fischer, 1985).

Dada su importancia a la hora de explicar el rendimiento, tomando en cuenta resultados de la Evaluación de cultivares de trigo 2011 (EEMAC, Facultad de Agronomía) donde valores de Q menores a $1,34 \text{ Mj m}^{-2} \text{ día}^{-1}$, pueden ser limitantes a la hora de alcanzar altos rendimientos (N. Fassana, comunicación personal, 2024).

2.4. COMPONENTES NUMÉRICOS DEL RENDIMIENTO

Es de suma importancia identificar cuáles son los componentes fisiológicos que muestran margen de mejora, es por eso que Slafer (2003), menciona que es necesario investigar acerca de las bases genéticas que determinan dichos componentes.

El rendimiento se desglosa en dos grandes componentes, como lo son el número de granos por unidad de superficie (NGM) y el peso de grano (PG) (Slafer, 2003):

$$\text{Rendimiento} = \text{NGM} \times \text{PG}$$

Para lograr incrementos en el NGM, es necesario mejorar el número de granos espiga⁻¹ (NGE) y/o el número de espigas m⁻² (NEM), ya que ambos se encuentran directamente relacionados con dicho componente (Anexo A). En este sentido, autores como Acreche et al. (2008), Fischer y Stockman (1986), Lo Valvo et al. (2017), Rodrigues et al. (2007) y Valdés et al. (2017) aseguran que el NGM se encuentra estrechamente correlacionado con el NGE, mientras que el NEM no pareciera ser relevante. Sin embargo, García (2012), González et al. (2011), Shearman et al. (2005) y Terrile et al. (2017) concluyeron que el NEM se encuentra correlacionado con el NGM.

Slafer et al. (2014, 2022) aseguran que ambos componentes presentan similar importancia a la hora de explicar cambios en el NGM. No obstante, incrementos en el NGM se explican desde un punto de vista genético por un incremento en el NGE, siendo el NEM un factor que es altamente dependiente del clima.

La limitante surge debido a que al incrementar el NGE, se incrementa el tamaño de la espiga, por lo que aquellos granos que se encuentren en una posición más distal van a presentar menor potencial de llenado dada la competencia entre granos, dando como resultado, un menor PG (Acreche & Slafer, 2005; Calderini & Ortiz-Monasterio, 2003; Elía et al., 2016; Fischer, 2011; González et al., 2014; Miralles & Slafer, 1995, 2005; Reynolds et al., 2009; Rodrigues et al., 2007; Serrago et al., 2013).

La propuesta de estos autores se ajusta a lo mencionado por Slafer y Andrade (1991), que tras analizar el NGE y PG, no encontraron resultados que demuestren haber una correlación negativa entre el número y peso de los granos centrales, lo cual indica que éstos no son afectados por el incremento en la competencia.

A su vez, Duggan y Fowler (2006) explican que el menor desarrollo de los granos distales (principalmente sobre el extremo superior de la espiga), se debe a que los granos basales y centrales, son aquellos que presentan mayor acceso a los asimilados durante el llenado y a su vez, esto va a ver afectado el número de granos que presentan las espiguillas distales. Por otra parte, mencionan que aquellas plantas que lograron producir granos de tamaño más uniforme y mayor NEM, fueron aquellas que alcanzaron mayores rendimientos.

Autores como Ferrante et al. (2017), Foulkes et al. (2011) y Slafer et al. (2022) concluyeron que en realidad no se da una interacción negativa explicada por una competencia por recursos afectando el PG, sino que la limitante está dada por el menor tamaño potencial del grano.

Por otra parte, Sadras y Slafer (2012) mencionan que incremento en el NEM, llevaría a un incremento en el número de espigas secundarias, las cuales se encuentran compuestas por granos de menor tamaño.

Sin embargo, hay autores que presentan resultados donde el NGM y el PG no presentan correlación (Peltonen-Sainio et al., 2007). Estos resultados son promisorios, ya que permiten concluir que sería posible mejorar el NGM sin afectar el PG, lo cual facilitaría el progreso genético a futuro.

No obstante, lograr cambios en el PG pareciera ser otra limitante, no solo por la posible interacción negativa que presenta con el NGM, sino que a su vez, es un componente que presenta poca plasticidad, por lo que es menos afectado por las medidas de manejo (Borrás et al., 2004; Ferrante et al., 2017; Sadras, 2007; Sadras & Slafer, 2012; Slafer et al., 2014, 2022).

2.4.1. Coeficiente de fertilidad de espiga y peso seco de espiga

Como fue mencionado anteriormente, la disponibilidad de asimilados en el periodo crítico es fundamental para lograr altos rendimientos (Bremner & Rawson, 1978; Calderini & Reynolds, 2000; Fischer, 1985; Slafer et al., 2001). Fischer (1984) y Slafer (2003) afirman que se logró incrementar la partición de biomasa hacia las espigas durante el periodo de elongación, lo que favoreció la sobrevivencia de flores y consiguó un incremento en el NGM.

Desde un punto de vista fisiológico, el rendimiento se encuentra explicado por el peso seco de la espiga (sin contar el peso del grano) (PSE) y la fertilidad de espigas (número de grano/peso espiga) (FE) en antésis (Fischer, 2011). Estos componentes son determinantes para estimar la capacidad del cultivo en la administración de los asimilados y su interacción va a definir la posibilidad de incrementar el rendimiento.

A su vez, Slafer (2007) propone dos posibles alternativas para incrementar el PSE para así lograr incrementos en el NGM. Una posible alternativa, es la introducción de genes Lr19, favoreciendo la traslocación de asimilados a la espiga. Otra posible alternativa, es el alargamiento de la etapa de elongación, permitiendo así acumular más biomasa en las espigas.

Fischer (2011) y Slafer y Araus (2007) afirman que la introducción de genes de enanismo, ha favorecido el incremento en la FE. Esto se debe a que, al reducir el tamaño de los tallos, se reduce la competencia que ejercen sobre las espigas en desarrollo, permitiendo así que una mayor proporción de asimilados sea destinada para el desarrollo de éstas.

En esta línea, Xiao et al. (2012), aseguran que el incremento en disponibilidad de asimilados fue utilizado principalmente para la concreción de un mayor NGE. Permitiendo a su vez, mejorar la fertilidad de las espiguillas de las posiciones más distales.

Autores como Fischer (1984, 2007), González et al. (2011) y Slafer et al. (2022), afirman que la FE depende del suministro de asimilados durante el periodo de elongación y anthesis para evitar la mortandad de flores, y es por eso que el PSE es un factor determinante de la FE. González et al. (2010) y Slafer (2003), aseguran que el incremento en el número de flores fértiles m^{-2} , se debió a un incremento en el número de flores fértiles espiguilla⁻¹ en la zona central de la espiga.

Por otra parte, Abbate (2004, 2017), Abbate et al. (2013), Beche et al. (2018), Slafer et al. (2022) y Terrile et al. (2017) demostraron que existe una relación positiva y lineal entre el PSE y el NGM. Es así que, García et al. (2014), establece que el PSE en la etapa de floración es el principal factor que explica el impacto del ambiente en el NGM. Al comparar cultivares previos y posteriores a la introducción de genes de enanismo, las diferencias en el NGM se explican por las variaciones en el PSE.

Sin embargo, Abbate et al. (1997, 1998), Aisawi et al. (2015), Elía et al. (2016), Pretini et al. (2020), concluyeron que en realidad pese a haber una correlación entre el PSE y el NGM, esto se debe principalmente al ambiente, lo que lo vuelve errático. Por ende, proponen que en realidad es la FE presenta mayor correlación con el NGM.

Teniendo en cuenta que los cultivares modernos podrían estar limitados por la fuente, Ferrante et al. (2012) y Terrile et al. (2017) aseguran que el PG se encuentra correlacionado negativamente con la FE, ya que se estaría incrementando el número de granos en posiciones distales.

Por otra parte, en el caso de Fischer (1984) y González et al. (2011) no encontraron correlación entre la FE y el PSE, lo cual indicaría que se podrían incrementar ambos componentes a la misma vez.

En conclusión, si bien las interacciones entre componentes no son claras y varían en función del autor, es de consenso común que es necesario encontrar un equilibrio entre el incremento de los componentes de rendimiento, el largo de las fases y tasas de crecimiento del cultivo, ya que podría llevar al cultivo a desarrollarse sobre un ambiente menos favorable, no permitiendo que se explote el rendimiento potencial (Abeledo et al., 2018; Berger et al., 2018; Slafer, 2003; Slafer et al., 1996, 2001).

2.4.2. Evolución de componentes

Dependiendo de la evolución de los principales componentes numéricos de rendimiento, se puede explicar el desempeño de los materiales con el paso del tiempo. Tal como se indicó anteriormente, el comportamiento del NGM y PG ha sido ampliamente debatido por distintos autores, generando una diversidad de opiniones en base a los resultados que se han obtenido.

En este sentido, ciertos autores aseguran que el rendimiento se encuentra asociado en mayor medida al NGM. Un claro ejemplo de ello es Beche et al. (2014), los cuales concluyeron que tanto para el PG como para el NGM sí se encontró una evolución positiva en el periodo de estudio (1940-2009). Ambos componentes se encontraron correlacionados positivamente con el rendimiento, sin embargo, la correlación entre el rendimiento y el NGM fue más robusta. Estos autores atribuyen el incremento en el PG a un adelantamiento del inicio del llenado del grano, permitiendo que esta etapa sea más larga y coincida en condiciones ambientales óptimas.

En evaluaciones recientes como las de Abeledo et al. (2018) o Curin et al. (2018) en Argentina, de Rodrigues et al. (2007) en Brasil, en China Xiao et al. (2012) y Valdés et al. (2017) en México, afirman que el NGM se ha visto incrementado en los últimos 30-40 años de manera lineal y constante, manteniendo el PG, concluyendo, por lo tanto, indican que el NGM es el principal componente asociado al incremento de rendimiento.

Misma dinámica fue destacada también en materiales evaluados en España, tanto Elía et al. (2016) como Serrago et al. (2013), y en Reino Unido por Shearman et al. (2005), los cuales registraron incrementos significativos tanto para NGM como en NEM. Sin embargo, ni el PG ni el NGE no presentaron una tendencia clara.

Curin et al. (2021) y Lo Valvo et al. (2017) por su parte, demuestran que el NGM se encuentra explicado por una mejora en el NGE, manteniendo constante el NEM y PSE, dando como resultado un incremento en FE.

En Brasil, Vesohoski et al. (2011) y Vieira et al. (2007), también encontraron correlaciones significativas entre el NGE y el rendimiento de grano. A su vez, aseguran que los materiales presentan dificultad para mantener el tamaño de grano debido a que el NGE y el PG se correlacionaron de manera negativa.

Por otra parte, Lo Valvo et al. (2017) identificó que a partir de los 2000' hubo una reducción en la tasa de incremento del NGM, siendo ésta una posible explicación del estancamiento de los rendimientos que se ha registrado por diferentes autores en la actualidad. Estos resultados se encuentran en sintonía con lo mencionado por Junquera et al. (2001) y Slafer y Andrade (1989), donde desde los años 80 aproximadamente, ya se registraron estancamientos en el NGM, indicando que el PG presentaba mayor importancia.

A su vez, del Pozo et al. (2014), aseguran que debido a la Revolución Verde, el incremento en el NGM, llevó a una reducción en el PG de los materiales más actuales, sin embargo, tras haber un estancamiento en el NGM, el peso de éstos tendió a incrementar pese a que no se haya ajustado un modelo significativo.

Esto podría estar relacionado con lo mencionado por Wu et al. (2014) en China, aseguran que el PG fue el componente que se correlacionó principalmente con el rendimiento, por lo que concluyeron que es el encargado de determinar el rendimiento.

En esta misma línea, en Australia el NGM presentó incrementos hasta los 80', donde a partir de dicho periodo se estabilizó sobre los 10000 granos m⁻². Con respecto al PG, se puede apreciar como hubo una interacción negativa con el NGM, ya que hasta los 80' registró una evolución negativa que se revierte hasta la actualidad, donde el PG mostró una evolución positiva (Sadras & Lawson, 2011).

Resultados similares fueron presentados por Lopes et al. (2012) en México, donde a hacia fines del siglo pasado, el NGM se encuentra estancado. En sintonía con lo mencionado anteriormente, Aisawi et al. (2015) no lograron ajustar una tendencia para el NGM ni NGE.

Tomando en cuenta el mejoramiento a nivel local, Quincke y Kohli (2001) afirman que el progreso genético se correlaciona con el incremento en el NGM para el periodo de 1980-2000. Sin embargo, Hoffman et al. (2018) en un ensayo más moderno, aseguran que el componente de rendimiento que explica el progreso genético es el PG pese a que se haya registrado un incremento del NGM en el periodo estudiado (2000-2013). Esto podría demostrar una sustitución en el progreso, donde a fines del siglo pasado el mejoramiento se basó en el incremento en el NGM, sin embargo, los materiales actuales presentan un mejor PG.

Por lo tanto, se podría inferir que el principal componente numérico de rendimiento que fue tomado como punto de selección y mejoramiento durante la Revolución Verde, fue el NGM. Esto ha generado un estancamiento en el PG, lo cual demuestra la baja importancia relativa de dicho componente en términos generales.

2.5. COMPONENTES ECOFISIOLÓGICOS

Como fue mencionado anteriormente, los componentes numéricos de rendimiento son altamente dependientes de disponibilidad de asimilados que presentan las espigas en el periodo de antesis. Es por ello que es necesario analizar la evolución de los componentes ecofisiológicos de rendimientos, como lo son el Índice de cosecha (IC) y la biomasa total en madurez (BT).

Miralles et al. (2014) presentan un modelo de determinación del rendimiento sin limitantes hídricas donde demuestra la importancia de los componentes ecofisiológicos de rendimiento:

$$\text{Rendimiento} = \text{BT} \times \text{IC}$$

Para lograr incrementos en el rendimiento, se debe modificar los componentes ecofisiológicos, ya que son los encargados de determinar la capacidad del cultivo de soportar incrementos en PG y NGM, y la eficiencia en la que lo logra.

Según Duan et al. (2018), el IC se encuentra correlacionado positivamente con el NGM, lo cual indica que mejoras en ambos componentes son fundamentales para incrementar el rendimiento, mientras que el PG se encuentra correlacionado negativamente, especialmente cuando se analizaron materiales de rendimiento alto (Duan et al., 2018).

Con respecto al NGM, Fischer (2011) demostró que éste se encuentra correlacionado con la acumulación de materia seca, especialmente cercano a antesis (20-30 días previos).

El rendimiento alcanzado por un cultivo depende de tres factores:

- a) Radiación incidente acumulada (RIA),
- b) Eficiencia en el uso de la radiación (EUR),
- c) Índice de cosecha (IC).

El primero no es un factor para mejorar, ya que como mencionan Miralles y González (s.f.), los cultivos de hoy en día con un manejo adecuado como densidad de siembra óptima, alcanzan un 95% de RIA.

Dado que la capacidad de intercepción también se encuentra limitada, el siguiente paso a tomar, es la modificación de la eficiencia del uso de la radiación (EUR) (Acreche & Slafer, 2009; Long et al., 2006; Reynolds et al., 2005, 2011). Se estima que, con mejoras en la EUR, se podría incrementar tanto la producción de biomasa, como el PG.

En este sentido, se debería procurar mayores eficiencias a nivel enzimático, principalmente sobre la Rubisco, ya que es el principal factor de que explica las ineficiencias en la fotosíntesis, dado que genera pérdidas de CO₂. (Reynolds et al., 2011; Zhu et al., 2010). Por lo tanto, incrementar la actividad catalítica de esta enzima, reducir la afinidad por el O₂ o incrementar la afinidad por el CO₂ son las posibles alternativas propuestas por Parry et al. (2011).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que, para mantener mayores producciones de biomasa y mayores tasas fotosintéticas, será necesario mejorar la capacidad radicular de los cultivos, no solamente su eficiencia de producción (Austin et al., 1989; Berry et al., 2007; Reynolds et al., 2011).

Con respecto al IC, se ha visto que los niveles alcanzados también se encuentran cercanos al máximo debido a que ha sido uno de los principales puntos de selección para el mejoramiento (García, 2012; Fan et al., 2017). Diversos autores han planteado valores teóricos máximos como Austin et al. (1980) de 0,62; o 0,66 (Shearman et al., 2005).

En evaluaciones a campo, el máximo se encuentra entre 0,50 y 0,55 (Calderini, Reynolds et al., 1999; Duan et al., 2018; Foulkes et al., 2009; Rose & Kage, 2019). Sin embargo, en la mayoría de los trabajos actuales, los niveles de IC no logran superar el 0,4, muy por debajo de lo mencionado anteriormente, por lo que permite concluir que todavía existen posibilidades de mejorar en este aspecto, logrando generar cultivares más eficientes (Beche et al., 2014; González et al., 2011; Lo Valvo et al., 2017; Peltonen-Sainio et al., 2007; Rodrigues et al., 2007).

Resultados presentados por Duan et al. (2018), aseguran que en materiales de bajo rendimiento (<7500kg ha⁻¹), mostraron correlación lineal con la producción de materia seca tanto en antesis como en madurez, lo cual coincide con lo mencionado por Foulkes et al. (2007), García (2012) y Shearman et al. (2005). Sin embargo, para rendimientos superiores, el IC se encuentra altamente correlacionada con el rendimiento.

Para lograr incrementos en el IC, Duan et al. (2018) mencionan que es necesario lograr una producción de biomasa balanceada a lo largo de todo el ciclo. Esto se debe a que es necesario asegurar la acumulación y futura translocación de asimilados hacia el grano. Además, Ercoli et al. (2008) mencionan que el llenado de grano se va a encontrar explicado por lo movilizado a partir de la biomasa previo a antesis y de lo que se produzca posteriormente a antesis, por lo que remarca la importancia de mantener un balance en la producción de biomasa.

A su vez, Berger et al. (2018) y Zhang et al. (2008) sostienen que el rendimiento depende en gran medida por la acumulación de materia seca previo a antesis ya que determina la formación de estructuras como tallos, espigas, granos, pero también juega un rol fundamental en la disponibilidad de nitrógeno durante el llenado de grano.

Por otra parte, Foulkes et al. (2009), mencionan que, para lograr incrementos en el IC, es necesario reducir la proporción de materia seca compuesta por el tallo, ya que, en cierta medida, compite con las espigas por los asimilados. Esto se explica porque al reducir las fajas alternativas, que no aportan al rendimiento, permiten que la partición de asimilados hacia el grano sea mayor (Fischer, 1985).

En regiones cuyo ambiente es estresante durante el llenado de grano, como lo es en el mediterráneo, el rendimiento va a ser más dependiente de la biomasa que el cultivo sea capaz de acumular previo a antesis. En estas condiciones, el estrés hídrico lleva a que el grano dependa de la movilización de asimilados acumulado en las estaciones favorable (Ercoli et al., 2008).

2.5.1. Evolución de componentes

La Revolución Verde generó grandes impactos en la fisiología del cultivo de trigo principalmente a partir del último tercio del siglo XX (Richards, 1996). Al introducir genes de enanismo, no solo se redujo el riesgo de vuelco, sino que además permitió mejorar el IC, dando como resultado una mayor eficiencia de producción. Calderini et al. (1995), afirman que la mejora en el IC, está explicada debido a que, al reducir el tamaño de los tallos, la materia seca compuesta por éstos fue menor.

Dado que en el siglo XX uno de los criterios de selección fue el IC, los resultados han demostrado una evolución positiva siendo el factor principal que explicó el incremento de rendimiento, mientras que la biomasa no mostró grandes cambios, como se pudo apreciar en Argentina (Calderini et al., 1995; Lo Valvo et al., 2017), Chile (del Pozo et al., 2014), España (Acreche et al., 2008), Francia (Brancourt-Hulmel et al., 2003), en China (Zhou et al., 2007) y Foulkes et al. (2009) en Australia.

Incluso en evaluaciones más recientes como las presentadas por Curin et al. (2018, 2021), donde tras evaluar materiales de los últimos 50 años, lograron identificar incrementos de $0,5\% \text{ año}^{-1}$ para el IC, mientras que la BT tampoco presentó incrementos significativos.

Por otra parte, autores como Beche et al. (2014) en Brasil o Duan et al. (2018), Wu et al. (2014) y Xiao et al. (2012) en China, lograron identificar incrementos tanto en el IC como en la producción de biomasa, asegurando así, que ambos componentes fueron correlacionados positivamente con el rendimiento.

Sin embargo, tomando en cuenta los resultados de Rodrigues et al. (2007), pese a haber registrado un leve incremento en el IC, la BT fue el componente que se correlaciona mejor con el rendimiento. Mismos resultados fueron presentados por Rose y Kage (2019) y Sadras y Lawson (2011), donde a su vez, remarcan que el IC también llegó a su máximo, indicando que los rendimientos a finales del siglo pasado, se asocian principalmente a la BT.

Lo mencionado anteriormente, se correlaciona con los resultados presentados por Shearman et al. (2005), los cuales afirman que el rendimiento se encontró explicado tanto por incrementos en el IC como en la BT. Sin embargo, el progreso del IC explicó durante el periodo 1972 a 1980 debido a la introducción de genes de enanismo (*Rht-D1b*), mientras que la BT explicó el rendimiento a partir de dicho momento.

Dado este incremento en la producción de biomasa, Shearman et al. (2005) aseguran que en 1987 el IC llega a un máximo de 0,5 y a partir de dicho año, comienza a disminuir, demostrando que los cultivares a finales del siglo redujeron su eficiencia de producción, lo que remarca la necesidad de mejorar o bien en la producción de biomasa producida o en la partición de dicha biomasa hacia el grano.

Mismos resultados fueron registrados por Aisawi et al. (2015), García et al. (2014) y Valdés et al. (2017), en México, los cuales mencionan que, a partir del 1966, la producción de materia seca se incrementó a razón de 67 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ y se logró correlacionar linealmente con el rendimiento. En este mismo ensayo, no se logró ajustar un modelo para la evolución en el IC, manteniendo niveles entre 0,4-0,47 de IC.

Por último, a nivel nacional se ha visto que los cultivares modernos se encuentran por debajo de los resultados presentados en la región (Berger et al., 2018). Para experimentos realizados tanto en INIA La Estanzuela y EEMAC, Facultad de Agronomía (Hoffman et al., 2018), los cultivares no logran superar niveles de 0.45 de IC. A su vez, los resultados muestran como la BT fue el principal componente en explicar el incremento de rendimiento, mientras que el IC influyó en menor medida sobre el rendimiento.

2.5.2. Relación fuente-destino

Los distintos órganos dentro de la planta van a ejercer una demanda de asimilados, lo que se denomina Fuerza de Fosa (granos) y Fuerza de Fuente (biomasa) (Abeledo et al., 2018). Definir dicha relación es fundamental para analizar la concreción y limitantes de los rendimientos potenciales actuales.

Dependiendo de los resultados, ciertos autores como Acreche et al. (2008), Borrás et al. (2004), Cartelle et al. (2006), Elía et al. (2016), Fischer (2008, 2011), González et al. (2014), Miralles y Slafer (2007), Slafer y Savin (1994) y Slafer et al. (2022), entre otros, aseguran que los materiales actuales se encuentran limitados por la capacidad de fosa, siendo la fuente suficiente para soportar el número de granos actuales.

A su vez, Reynolds et al. (2005, 2017) complementan esta idea asegurando que, dada la biomasa producida, es necesario incrementar el NGM para lograr incrementar la capacidad de fosa en el periodo de llenado y de esta forma, mejorar la eficiencia en el uso de la radiación (EUR).

Sin embargo, otros autores aseguran que, en realidad, los materiales modernos se encuentran limitados por la capacidad de fuente del cultivo ya que no es capaz de soportar incrementos en la fosa (Aisawi et al., 2015; Lo Valvo et al., 2017; Serrago et al., 2013).

Según Abbate et al. (1997), el NEM y el NGE presentan una correlación negativa. Esto podría indicar que los materiales estaban limitados en cuanto a la capacidad de fuente ya que, a su vez, el PG se correlacionó negativamente con el NGM. En este sentido, Calderini y Reynolds (2000) y Slafer (2007) mencionan que el PG de cultivares argentinos se encuentra limitado por la fuente. A su vez, destacan la fase lineal del llenado como la más determinante a la hora de explicar el peso final del grano.

Miralles y Slafer (2007) mencionan que en el futuro será necesario lograr mayores incrementos en la producción de biomasa, lo cual coincide con Berger et al. (2018), donde aseguran que aún para los cultivares modernos, es necesario lograr altas tasas de crecimiento, lo que permitiría incrementar la acumulación de biomasa a la hora del llenado de grano previo a antesis.

Por su parte, Borrás et al. (2004) concluyeron que, en la actualidad, se debería trabajar sobre la optimización de la partición de asimilados hacia los granos (IC) y no tanto sobre la producción de biomasa, lo cual contradice lo mencionado anteriormente.

En cambio, otros autores aseguran que, gracias al mejoramiento, la limitante que presentaban los materiales antiguos en la fosa, los materiales modernos presentan más una co-limitación entre la fuerza y la fosa (Acreche & Slafer, 2009; Rodrigues et al., 2007; Shearman et al., 2005; Slafer et al., 1996).

2.6. HIPÓTESIS

- a) La tasa de incremento de rendimiento asociada al recambio de cultivares es similar a la reportada en la región,
- b) El componente numérico de rendimiento que explica el incremento de rendimiento es el NGM,
- c) La BT es el componente ecofisiológico que se correlaciona en mayor medida con el rendimiento dado que el IC se encuentra cercano al límite biológico.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo se encuentra dentro del marco del programa de caracterización de cultivares de trigo (Sistema de Caracterización de Cultivares de Trigo de la Estación Experimental Mario A. Cassinoni), cuyo objetivo es generar información de los diferentes materiales que se encuentran en el mercado. Cada año la Estación Experimental Mario A. Cassinoni (EEMAC) (32°22'30.68"S; 58°3'40.18"O) recibe los diferentes materiales y mediante el diseño de ensayos, se toma registro de los diferentes componentes que determinan el rendimiento.

La EEMAC cuenta con una estación meteorológica que toma registro diario de temperatura, radiación, precipitaciones y fue a partir de estos datos que fue realizada la caracterización climática del presente estudio.

Según Corsi (1982), el país se puede dividir en cuatro regiones agroclimáticas, siendo la I la de mejor capacidad y la región IV la menos apta para el cultivo de trigo. Los ensayos se ubican en la Región II, caracterizada por temperaturas medias en espigazón mayores a los 20°C y excesos hídricos en espigazón menores a 25 mm.

En base a la carta de reconocimiento de suelos del Uruguay (Escala 1:1.000.000) (Altamirano et al., 1976) los suelos donde se realizaron los ensayos, pertenecen a la Unidad de suelos San Manuel. Éstos son predominante clasificados como Brunosoles Éutricos Típicos y Lúvicos, de color pardo muy oscuro, textura franco arcillo limosa, fertilidad alta y moderadamente bien drenados (Dirección General de Recursos Naturales [DGRN], s.f.)³.

Por otra parte, se encuentra dentro de la formación geológica Fray Bentos, la cual se caracteriza por sus "Areniscas muy finas y loess, con porcentaje variable de arena fina, a veces muy arcillosas, masivas, de color naranja. En la base desarrolla niveles lodolíticos, fangolíticos y brechoides. Sedimentación continental peridesértica" (Preciozzi et al., 1985, p. 14).

³ Visor DGRN: En "Suelos" se marcó "Grupos CONEAT".

3.1. MATERIALES EVALUADOS

Los cultivares fueron seleccionados en función del rendimiento, tomando el tercil superior para cada año (Anexo B), lo que permitió diferenciar un grupo con mejor comportamiento y así apreciar mejor la brecha de rendimiento en comparación con los testigos. Para ello, se tomaron las evaluaciones realizadas en los últimos 20 años (2003 a 2023) comparando únicamente materiales de ciclo intermedio.

INIA Churrinche e INIA Tijereta fueron seleccionados como testigos de largo plazo debido a que su comportamiento ya es conocido, resultado de años de evaluación. Gracias a este extenso análisis, se ha obtenido información detallada y confiable sobre su rendimiento bajo diversas condiciones, lo que los convierte en referencias ideales para comparar otros cultivares.

Por un lado, INIA Churrinche es un material de media capacidad de macollaje y sincronización regular (Hoffman et al., 2023) que fue liberado al mercado en el año 2000 y es resultado del cruzamiento entre LE 2154 (ciclo corto) y Estanzuela Federal (ciclo largo) (Luizzi, Quincke et al., 2018).

Con respecto a INIA Tijereta, es un material de alta capacidad de macollaje y buena sincronización (Hoffman et al., 2023). Éste fue liberado en el año 1997 y parte del cruzamiento entre Estanzuela Calandria y LE 2132 (Luizzi, Quincke et al., 2018).

3.2. DISEÑO EXPERIMENTAL

El diseño experimental consta de entre dos bloques y tres bloques cuya ubicación varía cada año, dentro de los cuales se asigna de manera aleatoria las diferentes parcelas cuyo número va a estar determinado por el número de cultivares a evaluar. La unidad experimental donde es sembrada cada variedad, consta de 6 surcos manteniendo una distancia entre hileras de 19 cm, ocupando un área de 0,9 m de ancho por 5 metros de largo.

Para lograr rendimientos potenciales, los cultivares fueron sembrados dentro del periodo óptimo de siembra, ubicándose desde finales de mayo a inicios de junio (entre 25/5 y 21/6) (Hoffman & Castro, 2012; Montiel, 2017) y a una densidad óptima de 30 plantas m^{-1} según lo recomendado por la bibliografía (García Lamothe, 2017; Hoffman, 1995).

A su vez, el manejo nutricional se ajustó en función de los requerimientos del cultivo mediante la implementación de muestreo de suelos previo a la siembra y en Z.2.2, mientras que en Z.3.0 y Z.3.3 se realizaron muestreos de planta, por lo tanto, no se esperaba que el rendimiento haya sido limitante por este aspecto (Fassana, 2019).

Por último, para evitar que el cultivo se encuentre estresado por plagas y malezas, se realizaron aplicaciones frente a la aparición de los primeros signos dentro de las parcelas.

La tecnología utilizada para el manejo de los ensayos no presentó grandes variaciones, por lo que se espera que las diferencias en rendimiento se deban a la interacción entre el genotipo y el ambiente.

3.3. MEDICIONES DEL ENSAYO

El criterio tomado para definir el estado del cultivo, es que el 80% de los cultivares se encuentre en cada estadio, tomando como referencia la escala Zadoks (Zadoks et al., 1974).

Las mediciones que se hacen a campo, acompañan el desarrollo del cultivo. Es por eso que el primer factor en ser estimado, es la población de plantas por unidad de superficie (NPM). Avanzado el ciclo, en Z.3.0 se evalúa el macollaje tomando como referencia dos metros lineales en cada una de las parcelas contando de manera manual cada uno de los macollos. De aquí se obtiene el número de macollos m^{-2} (NMM) y de manera indirecta el número de macollos planta⁻¹ (NMP).

Siguiendo la misma dinámica, en floración se estima el número de espigas m^{-2} (NEM) y el número de espigas planta⁻¹ (NEP) de manera indirecta a partir del NPM. Esto permite estimar la fertilidad de macollos (FM) medida como la totalidad de tallos fértiles, otro componente numérico a ser evaluado.

Por último, para estimar el rendimiento, biomasa total (incluyendo biomasa aérea y órganos reproductivos), NGM y PG, se cosechan los dos metros lineales que han sido evaluados a lo largo del ciclo y son enviados al laboratorio. De esta manera, son secadas las muestras en un horno, permitiendo estimar la materia seca producida.

3.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para la representación gráfica tanto de la evolución de los componentes, como de las correlaciones presentadas en el trabajo, se utilizaron las planillas de cálculo Excel.

En el análisis estadístico fueron utilizados dos programas. Infostat (Versión 2020) fue utilizado para realizar regresión lineal (p -valor $< 0,1$) a la hora de determinar los modelos de evolución del rendimiento y de los diferentes componentes a lo largo del periodo de estudio (primer o segundo orden). Los diferentes modelos fueron seleccionados en función de su significancia (menor coeficiente de p -valor) y teniendo en cuenta que presente sentido biológico. Es por eso, que en algunos casos, por más que el modelo no sea el más ajustado, se explica debido a que es lo más esperable en la realidad.

Del análisis de datos, fueron excluidos los años 2003 para el tercil superior y el 2021 para los testigos. El criterio utilizado fue debido a que superaban los límites establecidos por la diferencia entre la media y dos veces el desvío estándar. De esta forma, se logró determinar que dichos años eran atípicos.

El mismo programa fue utilizado también para los diferentes análisis de correlación entre componentes y el análisis de regresión entre los componentes y el rendimiento.

Por otra parte, el análisis de Random Forest fue realizado utilizando el programa R (Versión 4. 4. 3). Éste fue utilizado para identificar cuáles fueron los componentes que explicaron las diferencias de rendimiento entre los dos grupos evaluados.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CLIMA

Como fue mencionado anteriormente, es importante caracterizar el ambiente de producción ya que, en interacción con los cultivares, determinará el rendimiento del cultivo. Esto se debe a que no solo se modifica el cultivo (en días) en función de los cambios de temperatura y fotoperíodo, sino que también pueden suceder condiciones extremas en el régimen hídrico o térmico que van a afectar el desempeño del cultivo dependiendo del momento que sucedan.

El análisis de las condiciones climáticas entre años, permite identificar si los cambios en rendimiento se explican por un cambio climático o si efectivamente los nuevos materiales presentan un incremento en el rendimiento.

El efecto climático sobre los cultivares va a ser evaluado en función del comportamiento de los testigos de largo plazo. Esto se debe a que su comportamiento debería ser estable si el ambiente es el mismo, por lo que cualquier cambio en su rendimiento y morfología, va a estar explicado por un cambio en las condiciones de producción.

4.1.1. Temperatura

En los diferentes años de evaluación, las condiciones térmicas fueron óptimas. La temperatura media, mínima y máxima fueron relativamente constantes entre años, observándose un incremento en torno al 2018 (Figura 1a).

A su vez, si se toma en cuenta únicamente el ciclo del cultivo (mayo a noviembre), la temperatura media fue de 13 °C (julio) ascendiendo hacia final de ciclo a los 19 °C (noviembre) (Figura 1b).

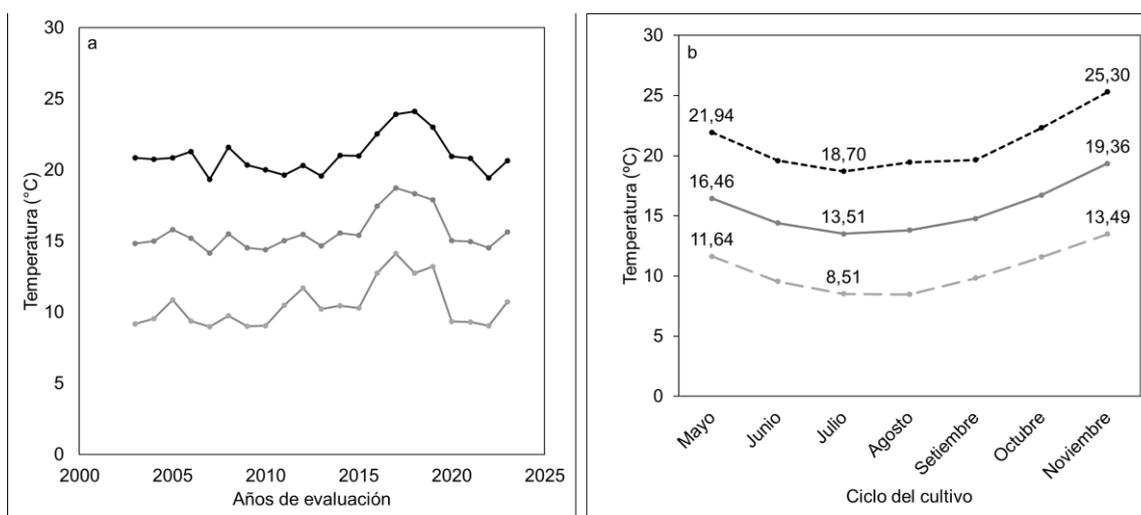
Por lo tanto, teniendo en cuenta lo mencionado por Rubio et al. (2017), la temperatura durante el periodo crítico fue menor a 23 °C en promedio, por lo que el NGM no se vería afectado por la temperatura.

Sin embargo, durante el periodo de llenado de grano, supera la temperatura óptima de 15°C (Chowdhury & Wardlaw, 1978; Lizana & Calderini, 2013; Rivelli et al., 2021), lo cual podría limitar el PG debido a que se acorta dicha fase.

Con respecto a las heladas, se denomina helada agrometeorológica cuando la temperatura registrada a nivel del suelo es menor a 0°C (Castaño et al., 2011) y es importante identificar el periodo con heladas, ya que pueden afectar el rendimiento potencial (Slafer, 2003). En el 65% de los años de evaluación se registraron heladas y como se puede apreciar en el Anexo C, no hubo heladas cercanas a antesis, lo cual hubiese significado mermas en el rendimiento.

Figura 1

Evolución de temperatura en la Estación experimental (2003 – 2023)



Nota. a) Evolución interanual temperatura; b) Evolución intra-anual temperatura. Temperatura máxima (línea negra discontinua), Temperatura media (línea gris oscura y continua) y Temperatura mínima (línea gris claro y discontinua). Elaborado a partir de datos meteorológicos tomados de la Estación Meteorológica automática EEMAC (N. Fassana, comunicación personal, 11 de octubre, 2024).

4.1.2. Precipitaciones

El rango de precipitaciones acumuladas durante el ciclo de crecimiento del cultivo, presenta gran variabilidad (Figura 2), con niveles máximos en torno a los 1100 mm en el 2012 y 2017, y mínimos en el 2008 con tan solo 332 mm; considerando mayo por la recarga de agua en el perfil y sin considerar noviembre por la fase en que se encuentra el cultivo.

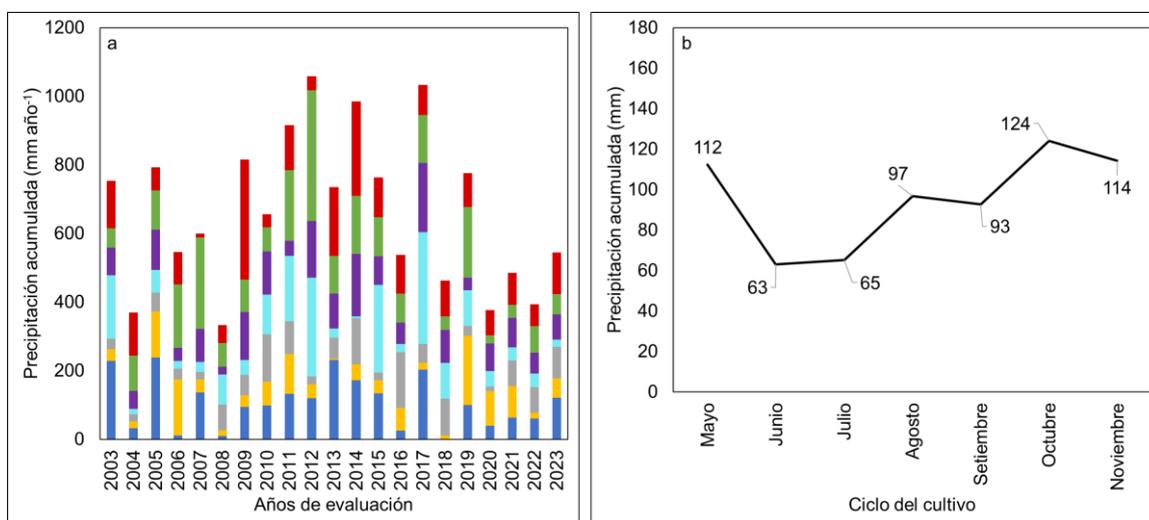
Analizando el promedio mensual, se puede apreciar que la primavera presentó los mayores niveles de precipitación promedio, siendo octubre el mes más lluvioso con 124 mm en promedio de los 20 años, mientras que el primer tercio del invierno (junio y julio) es el período con menor disponibilidad hídrica (en torno a 65 mm mensuales).

El posible efecto adverso, se puede ver disminuido por la posibilidad de acumular agua en el perfil del suelo dado por las precipitaciones moderadas de mayo (Figura 2 b).

Las precipitaciones acumuladas durante el periodo crítico, se encontraron entre los 91 mm en 2008 y 546 mm en 2012, lo cual se encuentra por encima de lo mencionado por Rubio et al. (2017). Contabilizando las precipitaciones acumuladas a partir de Z.3.0 (septiembre aproximadamente), en promedio se estuvo cercano a los valores propuestos por Hoffman et al. (2018) de 400mm donde registraron los mayores rendimientos.

Figura 2

Precipitación acumulada en la Estación experimental (2003 – 2023)



Nota. a) Precipitación acumulada anual: mayo (azul), junio (amarillo), julio (gris), agosto (celeste), septiembre (violeta), octubre (verde) y noviembre (rojo); b) precipitación acumulada mensual. Elaborado a partir de datos meteorológicos tomados de la Estación Meteorológica automática EEMAC (N. Fassana, comunicación personal, 11 de octubre, 2024).

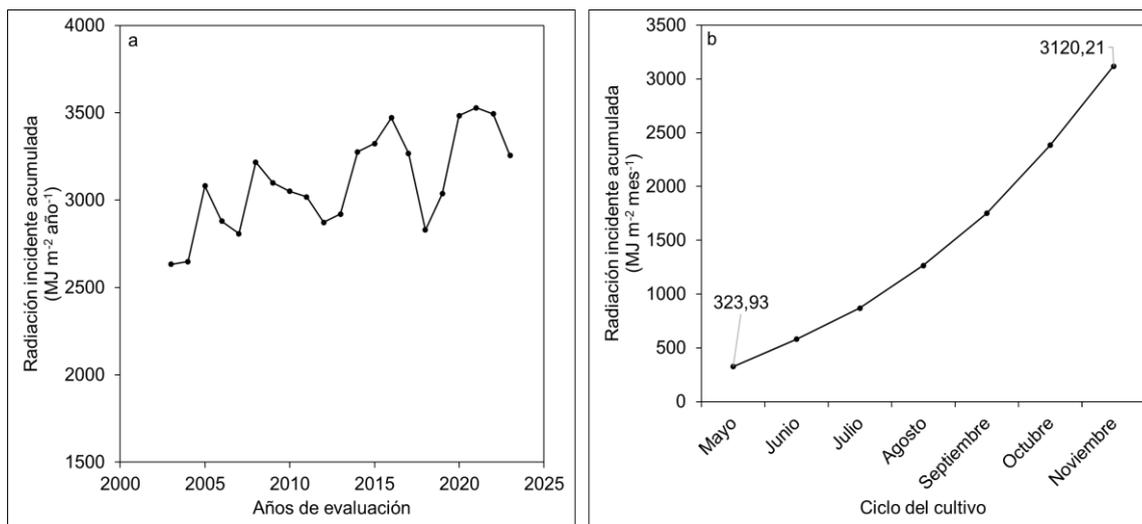
4.1.3. Radiación

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se puede apreciar cómo hubo una evolución positiva y significativa a lo largo de los años de evaluación. A su vez, a lo largo del año se puede apreciar como al finalizar el ciclo del cultivo se llega a acumular 3120 MJ m⁻² (Figura 3b).

Si bien el análisis estadístico indica un incremento en la radiación, es fundamental considerar que este resultado no implica una viabilidad práctica. Las conclusiones deben interpretarse en función de la realidad física del sistema, dado que un aumento tan marcado en un período corto de tiempo resulta improbable desde una perspectiva física y ambiental.

Figura 3

Radiación acumulada en la Estación experimental (2003 – 2023)



Nota. a) Radiación acumulada anual; b) Radiación acumulada mensual. Elaborado a partir de datos meteorológicos tomados de la Estación Meteorológica automática EEMAC (N. Fassana, comunicación personal, 11 de octubre, 2024).

4.1.4. Coeficiente fototermal

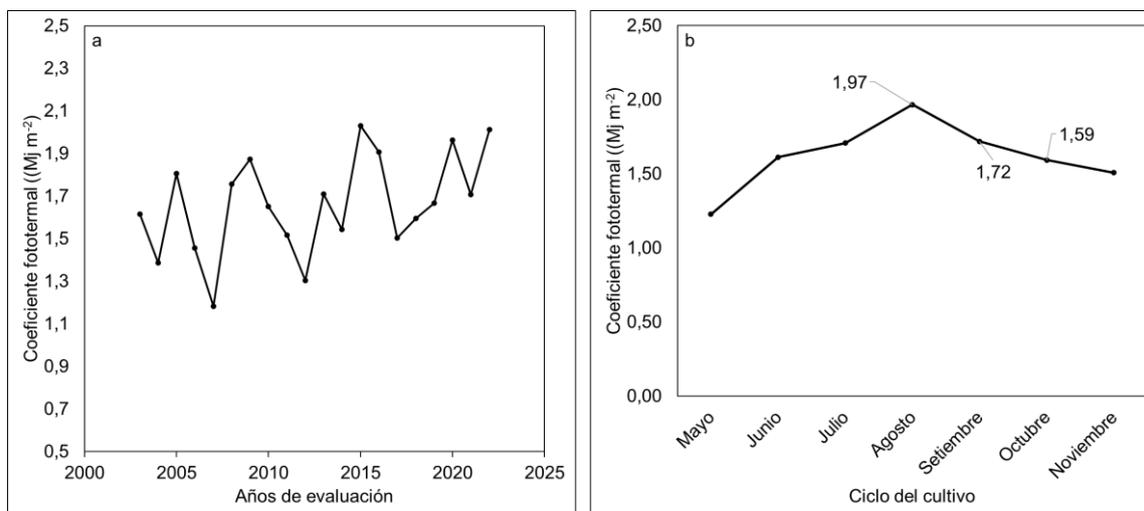
Se observó variabilidad entre años, pero con una leve tendencia al incremento hacia la actualidad. Este comportamiento está dado principalmente por el patrón de incremento de la radiación incidente (Figura 4a), lo cual es esperable que ejerza un efecto positivo en el rendimiento en grano, y por lo tanto puede estar explicando parte de los resultados.

Se identificó que los valores más altos del coeficiente fototermal se registran durante agosto y septiembre. Esto sugiere que es en este periodo donde se concentra el momento crítico, lo cual fue corroborado por los datos obtenidos en los ensayos.

Como se puede apreciar en la Figura 4a, en promedio durante todo el periodo se encontró por encima del valor crítico de $1,34 \text{ MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ (N. Fassana, comunicación personal, 2024), únicamente en el 2007 y 2012 se encontró por debajo de dicho umbral, por lo que, en términos generales, el rendimiento no fue limitado por el ambiente.

Figura 4

Coefficiente fototermal en la Estación experimental (2003 – 2023)



Nota. a) Promedio anual coeficiente fototermal; b) Promedio mensual coeficiente fototermal. Elaborado a partir de datos meteorológicos tomados de la Estación Meteorológica automática EEMAC (N. Fassana, comunicación personal, 11 de octubre, 2024).

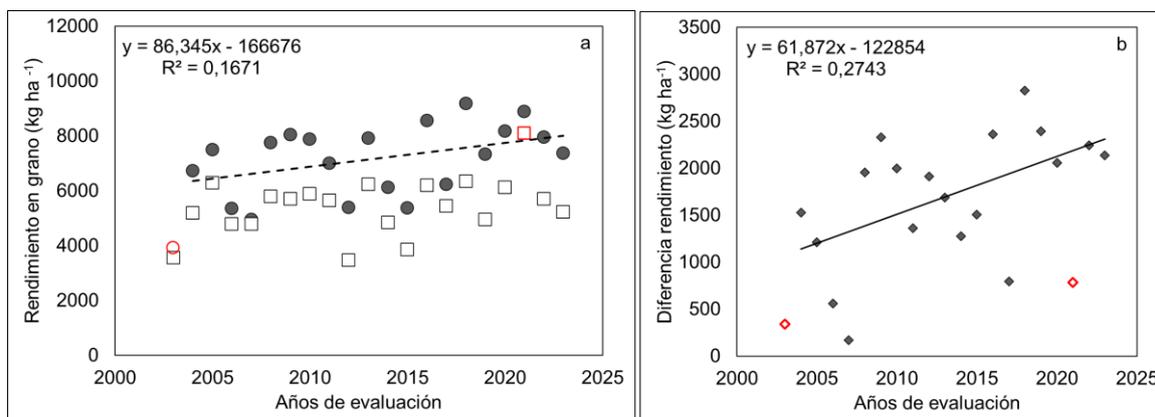
4.2. INCREMENTO DE RENDIMIENTO

A continuación, se presenta la evolución del rendimiento (Figura 5). Tomando en cuenta el modelo ajustado para los cultivares modernos, se pasó de unos 6200 kg ha⁻¹ a unos casi 8000 kg ha⁻¹, con una tasa de incremento de 86 kg ha⁻¹ año⁻¹ (1,37 % año⁻¹) (p-valor=0,0735), permitiendo generar una brecha de aproximadamente 2500 kg ha⁻¹ con respecto a los testigos a final del periodo (Figura 5b).

Por otro lado, los testigos no presentaron un patrón de cambio en el rendimiento en grano en los años de evaluación, observándose un rendimiento promedio de 5389 kg ha⁻¹ (Figura 5a). Esto se encuentra dentro de lo esperado, ya que, al ser testigos de largo plazo, no se esperaban cambios en su comportamiento, ya que la genética es la misma (p-valor=0,316).

Figura 5

Evolución de rendimiento de los materiales evaluados (2003-2023)



Nota. (a) Comparación de evolución de rendimiento de testigos (□) y tercil superior (●). (b) Valor relativo (◆). Los datos outliers corresponden al año 2003 (○) y 2021 (□). P-valor < 0,1 (línea discontinua); p-valor < 0,05 (línea continua).

El presente trabajo sirve como continuación del estudio realizado por Hoffman et al. (2018) mencionado anteriormente, por lo que se podría inferir que existe cierto estancamiento en el rendimiento. Por lo tanto, realizando un análisis global de ambos trabajos, se puede inferir que los rendimientos a partir del 2014 han presentado cierto estancamiento a pesar de que en este trabajo el modelo muestre lo contrario.

A su vez, en el estudio realizado por Godiño (2020), donde se comparó los 5 mejores cultivares de cada año con un testigo de largo plazo como INIA Tijereta, registró una brecha de 1866 kg ha⁻¹, siendo significativamente inferior a la registrada en el presente trabajo. En dicho trabajo, la tasa de incremento de rendimiento fue de 84 kg ha⁻¹ año⁻¹ (1,78% año⁻¹) lo cual se asemeja a los resultados obtenidos en este trabajo.

Habiendo aclarado esto, se puede mencionar que estos resultados concuerdan con lo reportado por Fischer (2007), Fischer y Edmeades (2010), Miralles y Slafer (2007) y Lo Valvo et al. (2017), donde aseguran que la tasa de incremento de rendimiento ha mermado en los cultivares modernos.

Pese a que se intuye que el progreso se encuentra mermado, al comparar los resultados del presente estudio, con lo presentado por otros autores como Curin et al. (2021) en Argentina, Bornhofen et al. (2018) en Brasil y del Pozo et al. (2014) en Chile, entre otros, las tasas fueron de 42 kg ha⁻¹ año⁻¹ (0,74% año⁻¹), 61,59 kg ha⁻¹ (1,68% año⁻¹) y 43,5 kg ha⁻¹ (0,51% año⁻¹) respectivamente, lo cual permite inferir que ya sea por clima o por el mejoramiento genético, los materiales evaluados presentan un mejor comportamiento con el paso del tiempo (progreso genético).

En otras publicaciones como las de Xiao et al. (2012), Zhou et al. (2007) y Wu et al. (2014) donde los resultados fueron de $62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($0,67 \% \text{ año}^{-1}$), $72 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($1,23 \% \text{ año}^{-1}$) y $66 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($1,0 \% \text{ año}^{-1}$) respectivamente, se puede apreciar como la diferencia entre trabajos es menor, pero sigue siendo favorable para los resultados locales.

Los rendimientos alcanzados en el tramo final del período concuerdan con los resultados presentados por Rose y Kage (2019), Lo Valvo et al. (2017), donde los rendimientos alcanzados se encuentran entre los $6000\text{-}9000 \text{ kg ha}^{-1}$. De igual modo, se puede apreciar como el rendimiento logrado, es levemente superior al que presentaron Brisson et al. (2010), Snape (2004) y Acreche et al. (2008) asegurando que el rendimiento se encuentra estancado en los $7000\text{-}8000 \text{ kg ha}^{-1}$.

Comparando estos resultados con un estudio realizado por Beche et al. (2014), los rendimientos alcanzados en dicho trabajo resultaron ser inferiores, logrando rendimientos promedio que se encuentran entre los $3500\text{-}4000 \text{ kg ha}^{-1}$.

Sin embargo, al comparar los materiales evaluados en el presente estudio, se puede apreciar como son levemente inferiores a los registrados por Duan et al. (2018) o Godiño (2020), donde superaron la barrera de los 10000 kg ha^{-1} .

Dado que no se registró una evolución clara en los testigos, se puede intuir que el progreso de los cultivares modernos, no se explica por un cambio en el clima. Sin embargo, como se podrá apreciar más adelante, ciertos componentes de rendimiento sí se vieron afectados por el clima.

La diferencia de rendimiento entre el T.sup y los testigos o “Rendimiento relativo” (Figura 5b), fue de 1701 kg ha^{-1} en promedio y presentó una tasa de incremento de $62 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ($2,67\% \text{ año}^{-1}$) ($p\text{-valor}= 0,0214$), indicando la ventaja que presenta el comportamiento de los cultivares modernos en comparación con los testigos.

El rendimiento de los mejores materiales se encontró correlacionado con el Q en el período crítico (15 septiembre al 15 de octubre) de una manera más firme que con respecto a los testigos (Testigos: $r=0,4$; $p\text{-valor}=0,0831$; Tercil sup. $r=0,59$; $p\text{-valor}=0,0067$). Esto podría indicar, que los cultivares modernos en realidad para expresar su potencial, son más exigentes con el ambiente.

Además, se pudo apreciar como la fecha donde se ubicó el periodo crítico, coincide con lo mencionado por Hoffman et al. (2003), donde aseguran que la fecha óptima para el periodo crítico se encuentra entre el 25 de septiembre y el 20 de octubre (datos no presentados).

4.3. COMPONENTES NUMÉRICOS DE RENDIMIENTO

El análisis de los componentes numéricos de rendimiento es abordado de lo general a lo específico, siguiendo el árbol de componentes (Anexo A). De esta manera se podrá visualizar de una manera clara no solo la evolución de estos, sino que también como interacciones entre sí.

Para cada componente se presenta la evolución en valor absoluto para los testigos como para el tercil superior, pero también se podrá observar la evolución de la diferencia en cada componente o “respuesta al cambio varietal” (*Valor absoluto tercil - Valor absoluto testigo*), también referenciada en el texto como “valor relativo”, permitiendo identificar la superioridad o inferioridad del tercil superior frente a los testigos.

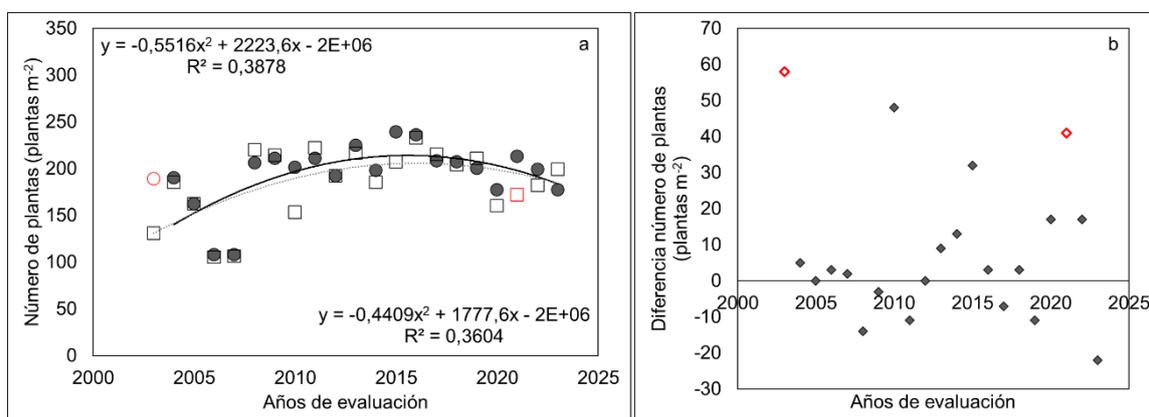
La principal ventaja de presentar los valores en valor relativo es que se elimina el error de muestreador. Este error está dado por la forma en la que el operario decide tomar los datos y ese ligero sesgo que se genera al muestrear, podría llevar a un error al comparar los datos.

4.3.1. Población de plantas y capacidad de macollaje

Los dos componentes base que van a determinar en cierta medida el resto de los componentes, y por lo tanto el rendimiento, son la población de plantas y su capacidad de macollaje (Mundstock, 1998).

Figura 6

Evolución de la población de plantas (2003-2023)



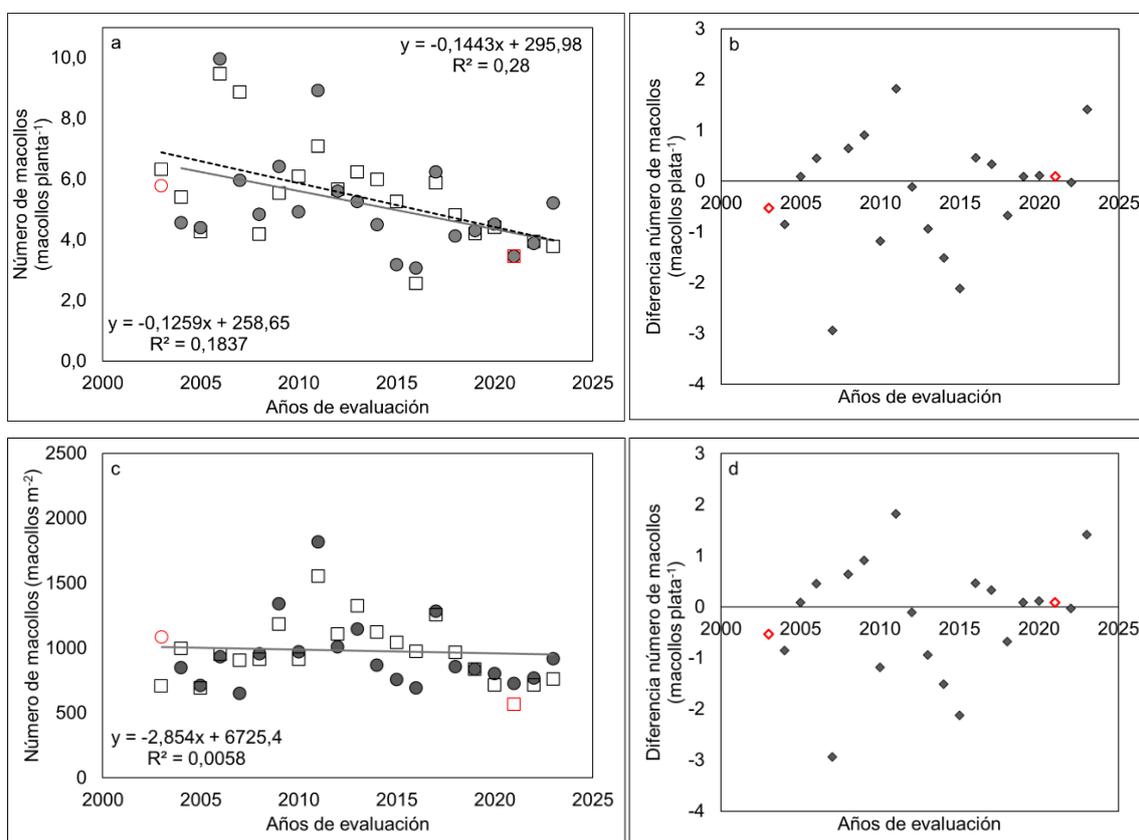
Nota. (a) Comparación de evolución de población de testigos (□) y tercil superior (●). (b) Valor relativo (◆). Los datos outliers corresponden al año 2003 (○) y 2021 (□). P-valor < 0,1 (línea discontinua); p-valor < 0,05 (línea continua).

La población se mostró estable dentro del rango deseado, entre las 150-250 plantas m^{-2} (García Lamothe, 2017; Hoffman, 1995), lo cual era de esperar dada la densidad de siembra seleccionada (Figura 6a). Sin embargo, en los años 2006 y 2007, se puede apreciar una disminución en el NPM, lo cual pudo haber sido por un problema de implantación, probablemente excesos hídricos cercanos a la siembra ya que las demás condiciones ambientales no parecieron ser limitantes.

El NPM que se registró para el grupo de los cultivares superiores, se encuentra correlacionado positivamente con el rendimiento, dato no presentado ($r=0,48$; p -valor= $0,0336$), lo cual demuestra que para los cultivares modernos, se podría incrementar la densidad de siembra para lograr mayores rendimientos.

Figura 7

Evolución de la capacidad de macollaje (2003-2023)



Nota. (a) Comparación de evolución de Número de macollos $planta^{-1}$ de testigos (□) y tercil superior (●). (b y d) Valor relativo (◇). (c) Comparación evolución de Número de macollos $metro^{-2}$ de testigos (□) y tercil superior (●). Los datos outliers corresponden al año 2003 (○) y 2021 (□). P -valor $< 0,1$ (línea discontinua); p -valor $< 0,05$ (línea continua).

Al igual que para el NPM, el NMP se logró ajustar un modelo significativo. De todas formas, es necesario señalar que, sin tener en cuenta los años 2006-2007 ambos componentes se mantuvieron estables. En ambos grupos se puede apreciar como la disminución en el NPM (2006-2007) se vio compensada con un incremento en el NMP (Figura 7c). Esto genera que el modelo ajustado pareciera demostrar un descenso en el NMP, pero en términos generales, se podría inferir que este componente se ha mantenido constante en ambos grupos.

Al analizar el comportamiento relativo (Figura 7b y Figura 7d) de ambos grupos, para estos tres componentes, se puede concluir que en realidad no hubo diferencias significativas, dado que no se observó un patrón definido. Esto permite concluir que en realidad no debería haber una relación entre estos componentes y el incremento en el rendimiento en T. sup. Estos resultados coinciden con lo mencionado por Sanchez-Garcia et al. (2013), donde el NMP no presentó una evaluación durante el siglo XX y tampoco se correlacionó con el rendimiento.

4.3.2. Fertilidad de macollos

La FM se encuentra determinada por la relación entre el NEM y el NMM (Anexo A). Como no se registraron cambios en el NMM, se espera que el NEM se mantenga constante. Por lo tanto, se espera que la tendencia de la FM se encuentre relacionada con la evolución de ambos componentes. Ambos componentes se comportaron de manera similar a lo largo de los años, lo cual explicaría que la FM se mantuviese constante.

Con respecto a la FM, los resultados sugieren que no existe una tendencia clara para ninguno de los dos grupos, por lo que no se pudo ajustar un modelo (Testigos: p-valor=0,13; T.sup: p-valor: 0,15). A su vez, la diferencia en la fertilidad (T.sup.-Testigos), tampoco mostró una tendencia clara (p-valor>0,05), lo que permite interpretar que no hubo diferencias entre ambos grupos, ya que se encuentra cercano a cero.

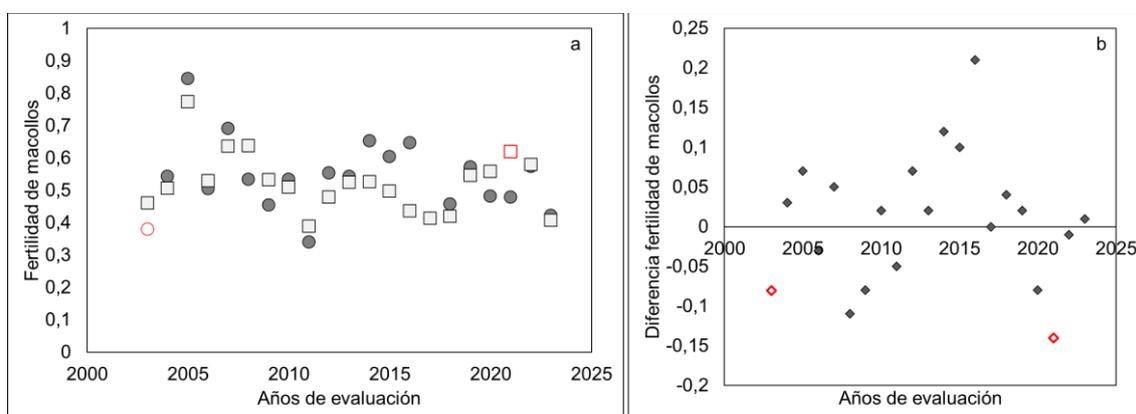
Al analizar la correlación entre componentes, se puede apreciar como la FM se encuentra correlacionada negativamente con el NMM (Testigos: $r=-0,46$; p-valor=0,0398; Tercil superior: $r=-0,67$; p-valor=0,0013), lo que indica que en los cultivares modernos, hay una mayor diferencia entre la tasa de mortalidad de macollos y la aparición de espigas en comparación a los testigos, indicando una posible limitante en la disponibilidad de asimilados.

Esto se correlaciona con el estudio de Sanchez-Garcia et al. (2013), donde la FM presentó un incremento hasta los 50' donde a partir de ese período, se mantuvo constante cerca del 90% (valor superior al registrado por el presente estudio). En dicho trabajo, los materiales mantuvieron un NMP inferior a los 2,2 macollos planta⁻¹, significativamente inferior a los presentados anteriormente (4 a 6 macollos planta⁻¹).

El NEM se encuentra determinado por la dinámica poblacional de los macollos. Es por ello que la disponibilidad de recursos va a modular la proporción de macollos fértiles ya que determina la tasa de mortalidad (Slafer et al., 2014).

Figura 8

Evolución de la fertilidad de macollos (2003-2023)



Nota. (a) Comparación de evolución de Fertilidad de macollos de testigos (□) y tercil superior (●). (b) Valor relativo (◆). Los datos outliers corresponden al año 2003 (○) y 2021 (□).

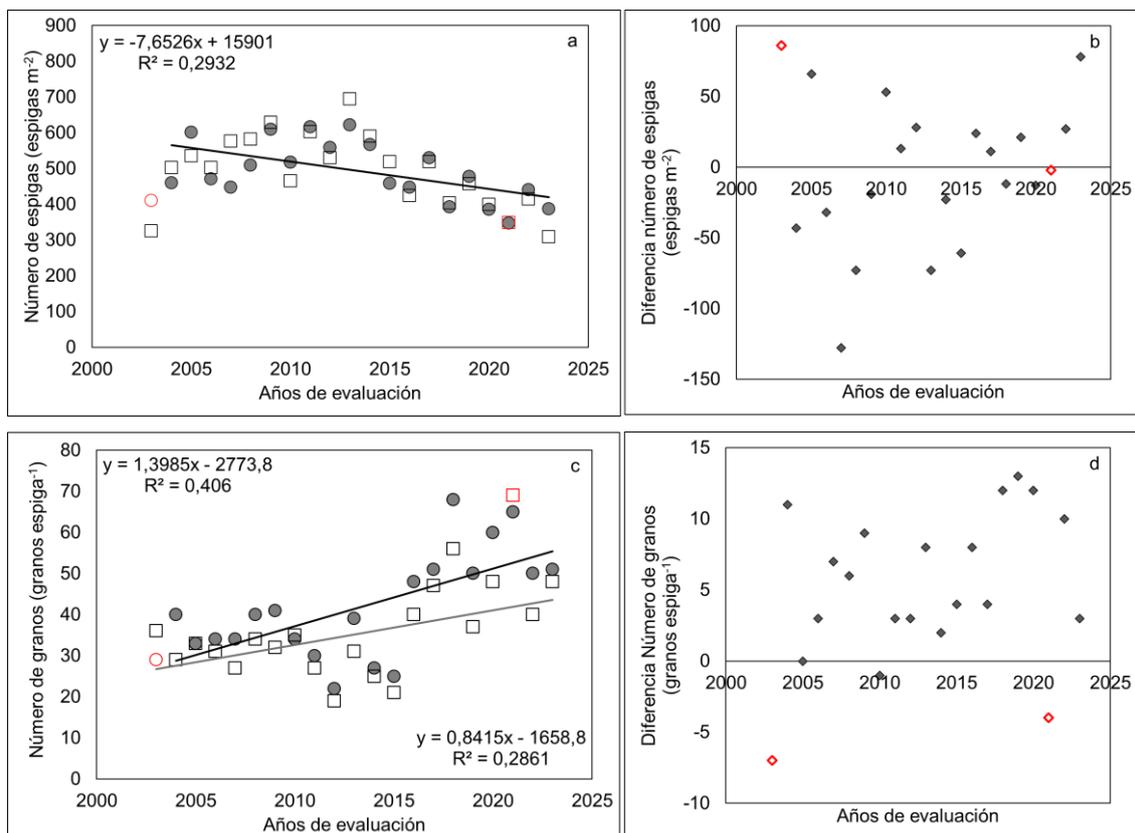
4.3.3. Caracterización de la espiga

Para el presente trabajo, tanto el NGE, como el NEM, no mostraron diferencias al comparar ambos grupos. Sin embargo, mientras que el primero mostró una tendencia positiva (Figura 9c), el NEM mostró un declive a partir del 2013 llegando a las 300 espigas m^{-2} (Figura 9a). Esto no coincide con los resultados presentados por Curin et al. (2021), donde afirman que el NEM se vio incrementado en el periodo de estudio, llegando a valores de 600 espigas m^{-2} y entre 30-40 granos espiga $^{-1}$.

Sin embargo, los valores registrados se encuentran dentro del rango propuesto por Miralles et al. (2014), donde aseguran que en condiciones normales, es esperable encontrar entre 400-700 espigas m^{-2} .

Figura 9

Caracterización de la espiga (2003-2023)



Nota. (a) Comparación de evolución de Número de espigas m^{-2} de testigos (\square) y tercil superior (\bullet). (b y d) Valor relativo (\blacklozenge). (c) Comparación evolución de Número de granos espiga $^{-1}$ de testigos (\square) y tercil superior (\bullet). Los datos outliers corresponden al año 2003 (\circ) y 2021 (\square). P-valor $< 0,1$ (línea discontinua); p-valor $< 0,05$ (línea continua).

Con respecto al NGE, se puede interpretar que es el principal factor que explica el incremento en el NGM para ambos grupos con una correlación de 0,81 (p-valor= 0,6124) entre ambos componentes, mientras que NEM resultó ser un factor sin importancia relativa, lo cual concuerda con lo mencionado por Fischer y Stockman (1986), Lo Valvo et al (2017), Valdés et al. (2017) y Slafer et al. (2022).

Sin embargo, el NGE se encuentra correlacionado negativamente con el NEM para ambos grupos (Testigos: $r=-0,61$ p-valor= 0,0045; Tercil sup.: $r=-0,67$ p-valor=0,0014), lo cual indica que en la medida en la que se incrementa el NEM, el cultivo no es capaz de abastecer estas nuevas espigas secundarias, por lo que en realidad estaría limitado en cuanto a fuente (Terrile et al., 2017).

Por lo tanto, se puede inferir que el incremento en el NEM lleva a una reducción en el NGE por una falta de asimilados, pero esto no afecta al PG ya que se distribuye de una manera lo suficientemente homogénea para que no haya interacción entre el PG y el NGE.

Tomando en cuenta estos resultados, donde para el Tercil superior el NGM (Figura 11a) y el NGE (Figura 9c) mostraron una tendencia positiva, se puede intuir que en la medida que pasaron los años, las espigas fueron de mayor tamaño. Estos resultados coinciden con lo publicado por Lo Valvo et al. (2017), Sanchez-Garcia et al. (2013), Vesohoski et al. (2011) y Xiao et al. (2012), donde se observaron incrementos lineales tanto en NGM como en NGE.

A su vez, es importante analizar el PG, ya que no se encuentra correlacionado con el NGE (p-valor= 0,94), lo cual indica que no hay interacción entre estos componentes, esto contradice la teoría donde se asegura que al incrementar el NGE genera una reducción en el PG debido a la posición distal de los nuevos granos.

Es necesario tener en cuenta que el momento en el que se determina el NGM y el NEM, difieren en el tiempo, por lo que podría llevar a conclusiones erróneas. Mientras que el NEM máximo se define en el entorno de z 4.0, el NGM máximo se define en anthesis y el PG se define desde el inicio del periodo de llenado.

4.3.3.1. Rendimiento espiga

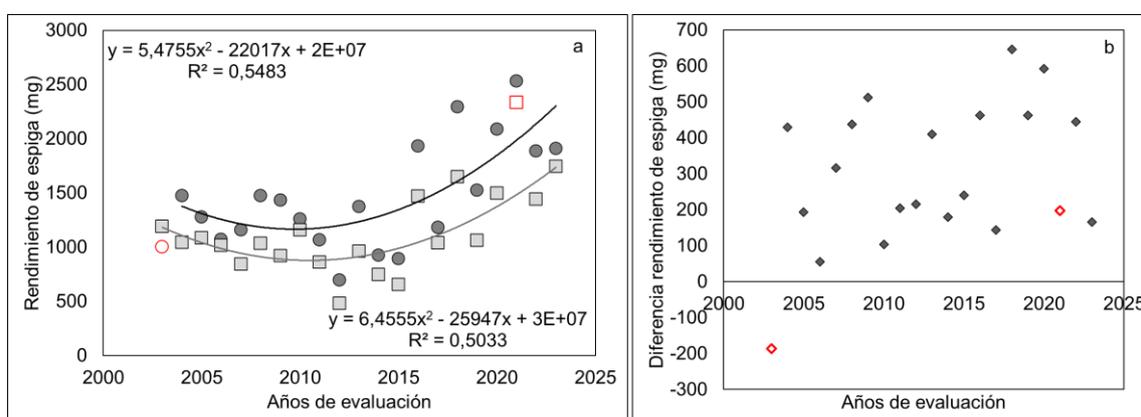
El RE se encuentra determinado teóricamente por el NGE y el PG ($RE = NGE \times PG$). Sin embargo, tomando en cuenta los resultados, el PG para los cultivares modernos no se encontró correlacionado de manera significativa (p -valor= 0,095). Por otra parte, el NGE fue el principal factor en explicar el RE para ambos grupos con un $r = 0,93$ para el tercil y un $r = 0,9$ para los testigos (p -valor < 0,05).

El RE se encuentra correlacionado negativamente con el NEM (Testigos: $r = -0,72$ p -valor= 0,0003; Tercil sup.: $r = -0,70$ p -valor=0,0006) y NEP (Testigos: $r = -0,49$ p -valor= 0,0292; Tercil sup.: $r = -0,6$ p -valor=0,0049). Esto era de esperar ya que el NGE se encuentra limitado por estos componentes.

Como se puede apreciar en la Figura 10a, pareciera que los valores se mantienen estables hasta el 2015, donde a partir de ese año, el RE se dispara en ambos grupos. Esto concuerda con lo visto anteriormente donde el NGE se mantenía constante hasta el 2015 aproximadamente y luego incrementaba (Figura 9c).

Figura 10

Evolución del rendimiento de espiga (2003-2023)



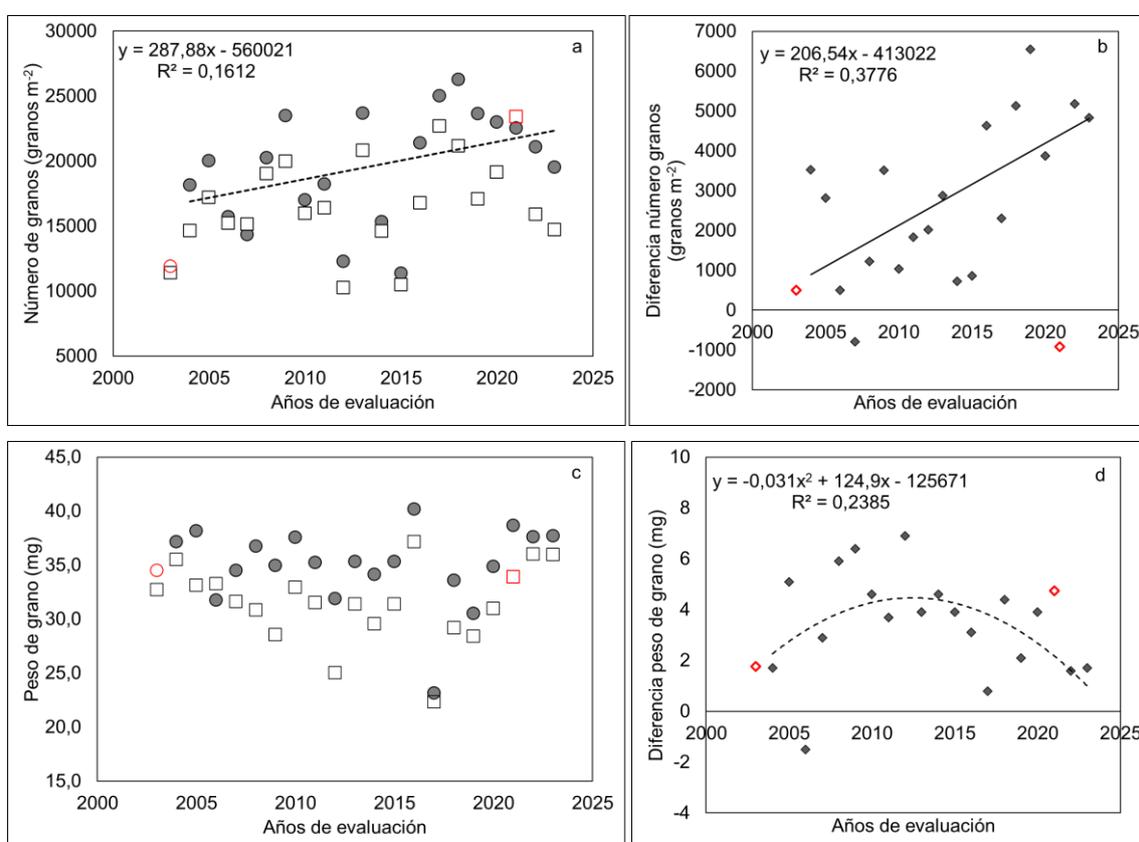
Nota. (a) Comparación de evolución de Rendimiento de espiga de testigos (□) y tercil superior (●). (b) Valor relativo (◆). Los datos outliers corresponden al año 2003 (○) y 2021 (□). P -valor < 0,1 (línea discontinua); p -valor < 0,05 (línea continua).

4.3.4. Caracterización del grano

Como se puede apreciar en ambos gráficos (Figura 11), los valores presentan una gran dispersión, lo cual está dado no solo por un efecto genético, sino también por el clima. Si bien depende del año, también se puede destacar la capacidad de compensación que presenta el cultivo, donde en años que el NGM fue mayor, el PG disminuyó y viceversa. Dos ejemplos más claros donde se ve esta relación, es en los años 2003 y 2017.

Figura 11

Caracterización del grano (2003-2023)



Nota. (a) Comparación de evolución de Número de granos m^{-2} de testigos (\square) y tercil superior (\bullet). (b y d) Valor relativo (\blacklozenge). (c) Comparación evolución de Peso de grano de testigos (\square) y tercil superior (\bullet). Los datos outliers corresponden al año 2003 (\circ) y 2021 (\square). P-valor $< 0,1$ (línea discontinua); p-valor $< 0,05$ (línea continua).

4.3.4.1. Número de granos

Tomando en cuenta los datos analizados, para los cultivares modernos seleccionados se dio un incremento de 288 granos m^{-2} $año^{-1}$ (1,73 % $año^{-1}$), tal como mencionan Abeledo et al. (2018), Beche et al. (2014), Curin et al. (2018), Elía et al. (2016), Rodrigues et al. (2007), Serrago et al. (2013), Valdés et al. (2017), Xiao et al. (2012), mientras que para los testigos no se logró ajustar un modelo significativo (p-valor Testigos= 0,309; p-valor Tercil=0,079).

Se evidencia una diferencia significativa en el NGM entre ambos grupos, con un incremento de 207 granos m^{-2} $año^{-1}$ (4,3% $año^{-1}$; p-valor = 0,0051) (Figura 11b). Los testigos se mantuvieron en torno a los 16000 granos m^{-2} , mientras que el tercil superior superó los 22000 granos m^{-2} . Cabe destacar que en 2018 se registraron 26295 granos m^{-2} , superando ampliamente los valores reportados por Peltonen-Sainio et al. (2007), quienes estimaron un NGM de 18620 granos m^{-2} para cultivares con rendimientos mayores a 8000 kg ha^{-1} . Resultados similares fueron presentados por Lo Valvo et al. (2017), Curin et al. (2021), Aisawi et al. (2015) y Elía et al. (2016), donde el NGM se mantuvo entre los 15000-20000 granos m^{-2} .

Otros autores, pese a haber registrado incrementos en el NGM, evaluaron materiales cuya producción de grano fue menor a la presentada en el presente estudio, lo cual demuestra el gran trabajo de los mejoradores uruguayos. En Brasil, los materiales evaluados por Beche et al. (2014), alcanzaron los 12000 granos m^{-2} .

Los resultados contrastan con lo concluido por Lo Valvo et al. (2017), donde aseguran que el NGM se encuentra estancado, registrando tasas de incremento de 26 granos m^{-2} $año^{-1}$ durante 1999-2011. Misma tendencia que la registrada por Sadras y Lawson (2011) con un NGM estabilizado en los 10000 granos m^{-2} .

Como fue mencionado anteriormente, tanto el llenado del grano como el NGM se encuentran determinados por la cantidad de materia seca acumulada a lo largo del ciclo, pero fundamentalmente durante el periodo crítico. En este sentido, se pudo encontrar una correlación significativa entre el NGM y la BT (Testigos: $r=0,65$ p-valor= 0,0019; Tercil sup.: $r=0,74$ p-valor=0,0002) (Beche et al., 2014). Por el contrario, el PG no se encontró correlacionado con la BT (Testigos: $r=0,65$ p-valor= 0,13; Tercil sup.: $r=0,05$ p-valor= 0,84).

A partir de estos resultados, se puede inferir que la producción de biomasa se da previo a antesis donde permite lograr un mayor NGM, pero la limitante se encuentra durante la etapa de llenado de grano ya que no se encuentra correlacionado con el PG.

4.3.4.2. Peso del grano

Con respecto al PG, no se logró ajustar de manera precisa un modelo para representar su tendencia en valor absoluto (p -valor Test.= 0,78; p -valor Tercil= 0,84), por lo que se estima que en realidad el PG se mantuvo relativamente constante a lo largo del período de estudio. Cabe destacar, que la tendencia en valor relativo sí se pudo ajustar un modelo, sin embargo, se pueden diferenciar dos realidades (p -valor= 0,051).

Los resultados coinciden con lo mencionado por Borrás et al. (2004) sostienen que el PG es un componente estable, lo cual dificulta su mejoramiento. Es por ello, que tanto en el presente estudio, como en los anteriormente mencionados, no se han apreciado cambios. Los cultivares modernos presentaron valores promedio de 35 mg grano⁻¹, mientras que los testigos se mantuvieron en los 31 mg grano⁻¹.

De acuerdo con lo mencionado anteriormente, se puede concluir que los cultivares modernos no han logrado incrementar el PG, lo cual se encuentra en la línea de Lo Valvo et al. (2017) y Abeledo et al. (2018), donde no se encontraron diferencias en el PG entre los cultivares modernos y los antiguos. A su vez, Sanchez-Garcia et al. (2013) presentó resultados donde el PG no se correlacionó con el rendimiento.

Sin embargo, estos resultados no coinciden con autores como Beche et al. (2014), quienes registraron incrementos para el PG. A pesar de ello, dicho incremento no permitió hacer una diferencia con los valores promedio registrados en el presente estudio. Por el contrario, autores como Aisawi et al. (2015), del Pozo et al. (2014), Calderini y Reynolds (2000), si lograron registrar pesos promedio de grano superior, llegando a valores de 74 mg grano⁻¹, 45 mg grano⁻¹, 55 mg grano⁻¹ respectivamente.

En cambio, para materiales evaluados en Argentina, mostraron valores promedios en el entorno de los 30 mg grano⁻¹ (Abeledo et al., 2018; González et al., 2011; González et al., 2014; Lo Valvo et al., 2017; Terrile et al., 2017), lo cual quizás por una cercanía en cuanto al ambiente de producción, los cultivares se asemejan más en cuanto a comportamiento productivo. Así mismo, materiales españoles evaluados entre 2012 y 2014 mostraron PG y NGM similares a los presentados anteriormente, pesos en el entorno de los 40 mg grano⁻¹ (Elía et al., 2016).

Teniendo en cuenta la posible interacción entre componentes, es de esperar que en aquellas evaluaciones cuyos materiales presentaron un menor NGM en comparación al presente estudio, que el PG sea mayor. Es por ello que Peltonen-Sainio et al. (2007), Shearman et al. (2005) y Valdés et al. (2017), presentaron cultivares con PG de entre 45-50 mg grano⁻¹.

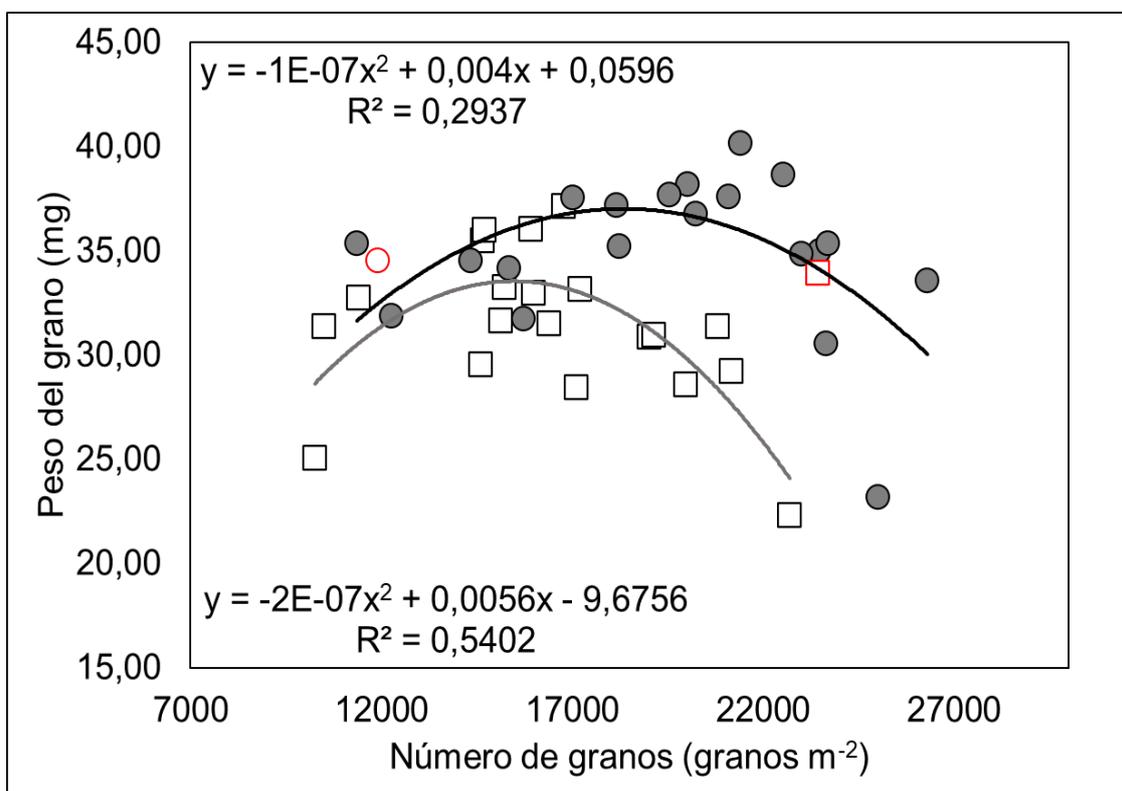
4.3.4.3. Relación entre el número y peso de granos

Tras realizar el análisis de correlación lineal, los resultados obtenidos indican que ambos componentes no se encuentran correlacionados significativamente. Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 12, fue posible ajustar un modelo cuadrático para ambos componentes (Testigos: p-valor= 0,0007; Tercil: p-valor= 0,019).

Para los testigos el vértice de la función se encuentra en el entorno de los 14000 granos, mientras que para los cultivares modernos el punto de inflexión se encuentra en los 20000 granos m^{-2} . Esto demuestra que los cultivares modernos lograron mantener el PG frente a mayores incrementos en el NGM, incluso teniendo en cuenta el alto número que lograron registrar.

Figura 12

Relación entre Número de granos m^{-2} y Peso del grano



Nota. (a) Relación entre el Número y Peso del grano de testigos (\square) y tercil superior (\bullet). Los datos outliers corresponden al año 2003 (\circ) y 2021 (\square). P-valor < 0,1 (línea discontinua); p-valor < 0,05 (línea continua).

4.4. COMPONENTES ECOFISIOLÓGICOS DE RENDIMIENTO

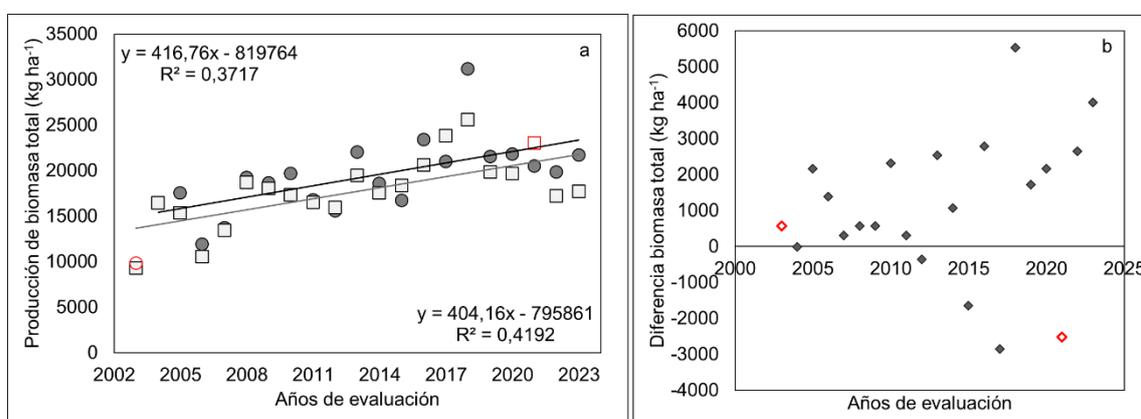
4.4.1. Producción de biomasa

La producción de biomasa se ha visto incrementado a una tasa similar para ambos grupos a lo largo del periodo de evaluación, tal como se puede apreciar en la Figura 13a, por lo que no se encontraron diferencias en cuanto a este componente (Figura 13b).

Tomando en cuenta que los testigos son una misma genética a lo largo del experimento, se estima que el incremento de biomasa se encuentra explicado por cambios en el ambiente.

Figura 13

Evolución en la producción de biomasa (2003-2023)



Nota. (a) Comparación de evolución de Producción de Biomasa total de testigos (□) y tercil superior (●). (b) Valor relativo (◆). Los datos outliers corresponden al año 2003 (○) y 2021 (□). P-valor < 0,1 (línea discontinua); p-valor < 0,05 (línea continua).

A diferencia de lo que mencionan autores como Duan et al. (2018), Zhang et al. (2008) y Lo Valvo et al. (2017), los materiales modernos evaluados, no llegaron a un punto de saturación donde no es posible incrementar la producción de biomasa.

En general, la producción de biomasa registrada por los ensayos del presente estudio, son superiores a las que otros autores mencionan, como por ejemplo Beche et al. (2014), Curin et al. (2018) y Rose y Kage (2019), donde los materiales no superaron la barrera de los 15000 kgMS ha⁻¹.

Por otra parte, al comparar el estudio realizado por Shearman et al. (2005) en Reino Unido o por Aisawi et al. (2015) en México, donde se puede apreciar que en la actualidad, las producciones de biomasa se encuentran entre los 17000 y 21000 kg MS ha⁻¹, valores que se asemejan a los resultados del presente estudio.

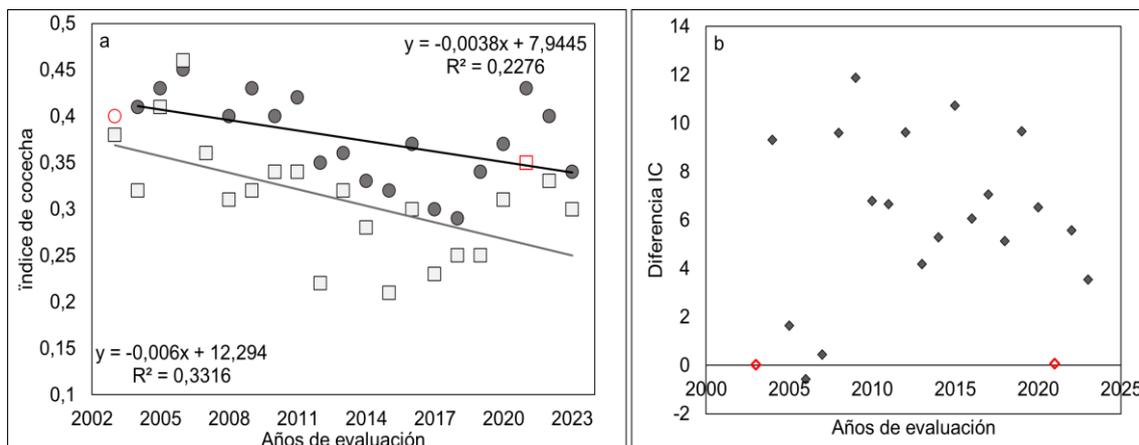
En función de los resultados obtenidos, se puede apreciar como para ambos grupos la BT se encontró correlacionada positivamente con el rendimiento. Sin embargo, fue más significativo para los cultivares modernos que para los testigos (Testigos: $r=0,54$ p -valor= $0,0130$; Tercil sup.: $r=0,77$ p -valor= $0,0001$). Esto podría indicar que en realidad los cultivares modernos son más dependientes de la biomasa, lo cual tiene coherencia ya que ha habido un incremento en el NGM principalmente.

4.4.2. Índice de cosecha

Para el cálculo del IC, es necesario tener en cuenta el rendimiento en grano (kg ha^{-1}) y la producción de biomasa (kg MS ha^{-1}). Pese a que ambos componentes se vieron incrementados a lo largo de todo el periodo (Figura 14), la tasa a la que se vio incrementada la biomasa, fue mayor a la que lo hizo la biomasa compuesta por grano ($416 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ vs $89 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ respectivamente), dando como resultado una reducción en el IC.

Figura 14

Evolución en el Índice de cosecha (2003-2023)



Nota. (a) Comparación de evolución de Índice de cosecha de testigos (\square) y tercil superior (\bullet). (b) Valor relativo (\blacklozenge). Los datos outliers corresponden al año 2003 (\circ) y 2021 (\square). P -valor $< 0,1$ (línea discontinua); p -valor $< 0,05$ (línea continua).

El valor medio de los materiales evaluados se encuentra en el entorno del 0,4 para el tercil y de 0,3 para los testigos. Estos valores se encuentran muy por debajo de lo que menciona la literatura como límite teórico, llegando hasta 0,62 planteado por Austin et al. (1980) o en el caso de Shearman et al. (2005) de 0,66.

Por otra parte, otros estudios muestran valores superiores, como el de Beche et al. (2014) que observaron incrementos en el IC, pasando de valores cercanos al 0,2 en 1940 a un máximo de 0,45 en el 2009, lo cual se encuentra levemente superior a los resultados obtenidos en este trabajo, lo que sigue la línea del estudio realizado por García (2012), Peltonen-Sainio et al. (2008), donde el IC se mantuvo entre 0,4 y 0,5.

A su vez, comparando los resultados de Shearman et al. (2005), pareciera haber una continuación en la tendencia negativa del IC llegando a un mínimo cercano al 0,35 como se pueden apreciar en los resultados obtenidos.

Los resultados obtenidos en China para ambos componentes ecofisiológicos, coinciden con lo mencionado por Xiao et al. (2012) y Duan et al. (2018), donde la producción de biomasa a madurez superó los 18000 kgMS ha⁻¹ y el IC se encontró cercano al 0,40.

Sin embargo, estudios como los de Rose y Kage (2019), donde se evaluaron materiales europeos, las producciones de biomasa fueron notoriamente inferiores, con un límite superior de 17000 kgMS ha⁻¹, pero con IC superiores a los encontrados en los materiales evaluados en el presente trabajo, con valores cercanos a los 0,51.

En esta misma línea, Foulkes et al. (2007) con materiales lanzados a finales del siglo pasado, mostró resultados donde aquellos que lograron mayores rendimientos (superiores a las 11 Mg ha⁻¹), presentaron IC de entre 0,47-0,5; mientras que materiales de menor potencial (8-9 Mg ha⁻¹), registraron valores de IC de entre 0,42-0,46. Estos resultados indican que para lograr mayores rendimientos, es necesario lograr mayores IC, siendo los niveles observados en el presente estudio, inferiores a los mencionados por estos autores.

Los resultados coinciden con lo observado por Aisawi et al. (2015) donde se concluyó que el incremento en la producción de biomasa fue acompañado con una reducción en el IC, siendo la altura de la planta una de las posibles explicaciones.

A partir del análisis climático, se desprenden distintas alternativas para explicar el incremento en la producción de biomasa de los materiales evaluados. Por una parte, se ha registrado un incremento de radiación incidente, lo que explicaría la mayor fotosíntesis que permitió un incremento de la biomasa (Beed et al., 2007).

Como se pudo apreciar en la bibliografía, cambios en la concentración de CO₂, podría tener implicancia en la evolución de los diferentes componentes, explicando el incremento en la BT y la reducción en el IC (Knopf et al., 2024). Por lo tanto, no se debería despreciar el rol del clima en el progreso de rendimiento.

4.5. COMPONENTES CLAVES EN LA DIFERENCIA DE RENDIMIENTO

Habiendo corroborado el incremento de rendimiento de los cultivares modernos con respecto a los testigos de largo plazo y además representado la evolución de los diferentes componentes a lo largo del periodo de estudio, es necesario analizar cómo se compone dicho incremento de rendimiento.

Para el análisis, se tomó la decisión de descartar aquellas variables que se consideraron como recurrentes como, por ejemplo, la FM ya que la misma abarca el NMM y el NEM.

4.5.1. Random Forest

Para identificar aquellos componentes que se encargan de explicar las diferencias en rendimiento entre los cultivares modernos y los testigos de largo plazo, se realizó el análisis por Random Forest. Para este caso, se analizaron las diferencias tanto en rendimiento como en los diferentes componentes.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos, se puede inferir que los componentes estudiados explican un 41% de la variabilidad en el rendimiento. El resto se encuentra explicado por diferentes variables que no han sido evaluadas.

Como se puede apreciar en la Figura 15a, es posible diferenciar tres grupos diferentes de comportamiento. En principio, el NGM, RE y el IC parecieran ser los componentes más determinantes en explicar la diferencia de rendimiento de ambos grupos. En un segundo escalón, se encuentra la BT, PG, NGE y el NEM. Por último, el NMM pareciera casi no tener importancia a la hora de explicar el rendimiento.

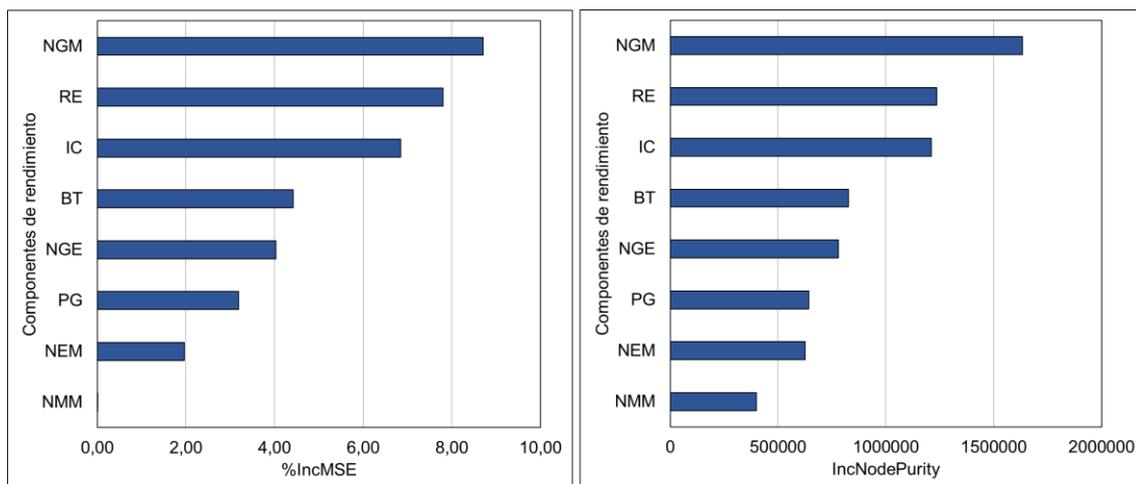
Estos resultados concuerdan con lo observado en la literatura. Comenzando con el NGM, es considerado el principal componente relacionado con el rendimiento (Abeledo et al., 2018; Beche et al., 2014; Curin et al., 2018; Elía et al., 2016; Rodrigues et al., 2007; Serrago et al., 2013; Shearman et al., 2005; Valdés et al., 2017; Xiao et al., 2012) y es por ello que también era de esperar que el RE también sea importante, ya que además de considerar el NGM, considera el PG.

Por otra parte, una posible explicación de que el NMM no presente gran relevancia es que, el cultivo no se encuentra limitado por este componente ya que, en realidad, el número de macollos que cada planta es capaz de producir supera ampliamente los requerimientos del cultivo. En realidad, lo que se debería tomar en cuenta es la proporción de macollos que logran sobrevivir.

Como fue mencionado anteriormente, la limitante de rendimiento para los materiales evaluados es la fuerza de fosa del cultivo, ya que la producción de biomasa superó las necesidades del cultivo. Por lo tanto, era de esperar que tanto el IC como el RE, son dos componentes que explican en gran medida la diferencia de rendimiento.

Figura 15

Análisis Random Forest para la diferencia (Tercil-Testigos) en los componentes de rendimiento



Nota. a) Incremento del error cuadrático medio (IncMSE): Representa el impacto de una variable en el desempeño predictivo del modelo. b) Incremento de la pureza de los nodos (IncNodePurity): Un mayor valor significa que la variable contribuye más a mejorar la calidad de las divisiones en los nodos, haciendo que sea más relevante. NGM (Número de granos m^{-2}), RE (Rendimiento de espiga, $mg\ espiga^{-1}$), IC (Índice de cosecha), BT (Biomasa total a cosecha), NGE (Número de granos espiga $^{-1}$), PG (Peso de grano, $mg\ grano^{-1}$), NEM (Número de espigas m^{-2}), y NMM (Número de macollos m^{-2}).

4.5.2. Análisis de regresión

Dado que el análisis por Random Forest no es capaz de identificar cuantitativamente la participación de cada componente en el rendimiento, se decidió cuantificar el incremento de rendimiento que explicaron los diferentes componentes mediante un análisis de regresión. De esta manera, se puede apreciar como en la medida que se modifica un componente, el cambio esperado en el rendimiento.

Para poder realizar el análisis se decidió calcular el valor relativo (Valor absoluto/promedio de todo el periodo). De esta manera se logra estandarizar todos los componentes en una misma unidad.

El rendimiento de los cultivares modernos no presentó correlación significativa con el NEM ni con el NMM (Figura 16e y Figura 16f), lo que concuerda con los resultados presentados en el Random Forest. Esto explica por qué la FM tampoco presentó correlación con el rendimiento, lo cual no coincide con los resultados presentados por Paccapelo y Lorda (1988), donde la FM se encontró correlacionado directamente con el rendimiento.

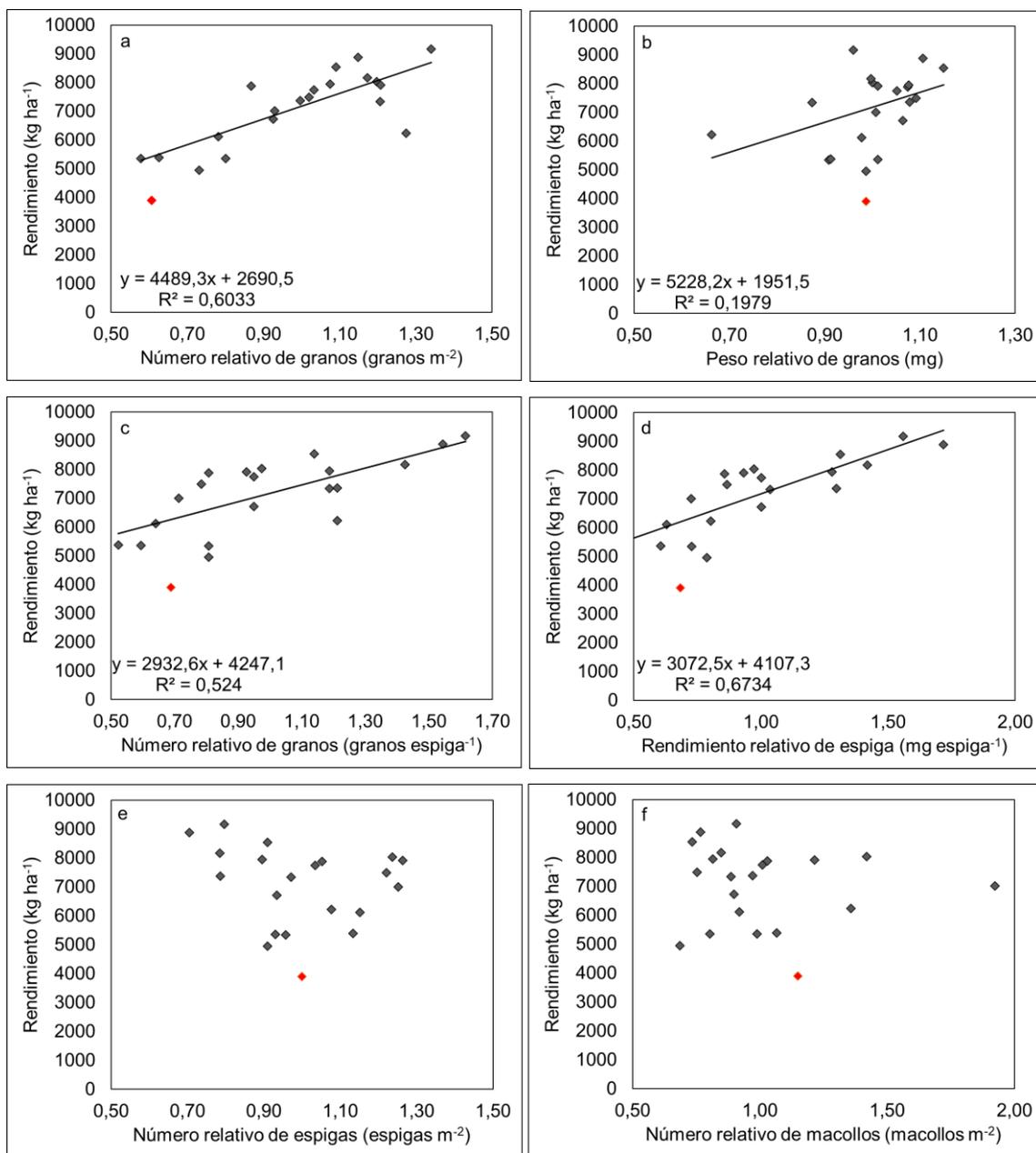
Dado que el NMM no es una limitante ya que en realidad se da una sobreproducción de estos, tiene sentido que no se haya encontrado un modelo significativo que explique incrementos de rendimientos por incrementos en este componente, tal como se mencionó en el análisis de Random Forest.

A su vez, se puede apreciar que pequeños cambios en el PG generaran los mayores cambios en el rendimiento (Figura 16b). De todas formas, es necesario tener en cuenta que como fue mencionado anteriormente, el PG no presentó grandes variaciones con el paso del tiempo, ya que es un componente estable.

Estos resultados coinciden parcialmente con lo mencionado por Franklin et al. (2017), donde el PG y NGE presentaron correlación positiva con el rendimiento, siendo fundamentales para el mejoramiento en el futuro. Sin embargo, estos autores identificaron que el NEM presentó correlación significativa con el rendimiento.

Figura 16

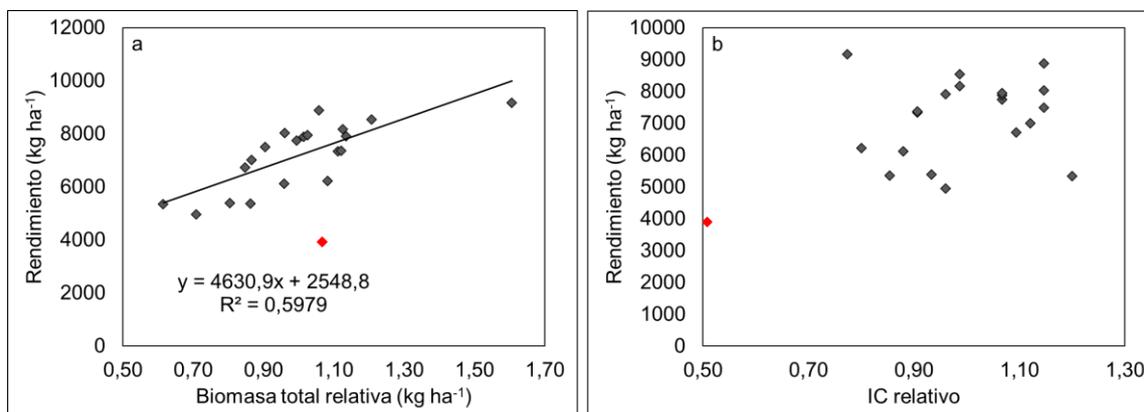
Regresión del rendimiento (Tercil superior) con los diferentes componentes numéricos (valor relativo)



Nota. Regresión entre el Rendimiento y los diferentes componentes (♦). a) Número de granos (granos m⁻²); b) Número de granos (granos espiga⁻¹); c) Peso del grano (mg); d) Rendimiento de espiga (mg espiga⁻¹); e) Número de espigas (espigas m⁻²); f) Número de macollos (macollos m⁻²). Los datos outliers corresponden al año 2003 (♦).

Figura 17

Regresión del rendimiento (Tercil superior) con los diferentes componentes ecofisiológicos



Nota. Regresión entre el Rendimiento y los diferentes componentes (◆). a) Producción de biomasa (kg ha⁻¹); b) Índice de cosecha. Los datos outliers corresponden al año 2003 (◆).

A pesar de que el IC explica en gran medida la diferencia de rendimiento en ambos grupos (Figura 15), la razón principal es que el IC de los testigos tuvo una tasa de descenso más pronunciada en comparación con los cultivares modernos, y no tanto debido al comportamiento de estos últimos. Tal como se aprecia en la Figura 14, el IC de ambos grupos mostró una tendencia negativa, lo cual explica la falta de correlación significativa de este componente con el rendimiento en sí.

Con respecto a la BT, se puede apreciar cómo fue fundamental para la concreción de rendimiento. Estos resultados coinciden con lo mencionado por Ferrante et al. (2017), Foulkes et al. (2007) y García (2012), donde el rendimiento se encontró correlacionado únicamente con la BT. Sin embargo, teniendo en cuenta la evolución a lo largo del periodo, y el análisis Random Forest, no pareciera ser uno de los principales componentes en explicar la diferencia de rendimiento en ambos grupos.

Es necesario realizar énfasis en el PG, ya que es un componente que tomando en cuenta su evolución, no ha sido un componente que haya sido mejorado. Sin embargo, es fundamental para lograr altos rendimientos ya que se encuentra correlacionado con el rendimiento (Figura 16b). A su vez, esto permitirá mejorar el IC, lo cual indicaría que los materiales son más eficientes. También coincide con Duan et al. (2018) ya que estos autores aseguran que en un futuro va a ser necesario lograr mejoras en la eficiencia de los materiales.

4.6. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Con respecto al rendimiento, dado el criterio planteado para el nivel de significancia (p -valor $< 0,1$), se puede inferir que hay una tendencia positiva para los cultivares modernos (Ver figura 5a). Sin embargo, si se es más riguroso, el modelo no es significativo, por lo que se podría dar a entender que en realidad no hubo progreso en el periodo de estudio, lo cual coincide con Berger et al. (2018) y Godiño (2020). De todas formas, el rendimiento relativo (Figura 5b), donde elimina el efecto del muestreador, sí dio significativo al 5%.

Teniendo en cuenta lo mencionado por Quincke et al. (2018), donde afirman que la tasa de progreso genético debería ser de por lo menos $80 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se podría inferir que todavía es necesario lograr mejoras en el progreso genético.

El rendimiento se encuentra por encima de lo que muchos autores han presentado, no solo en valor absoluto, sino en su tasa de progreso. Esto indica que quizás ya se esté llegando al máximo que el ambiente puede ofrecer. En particular, se destaca el caso del PG, cuya respuesta podría estar siendo afectada negativamente por temperaturas elevadas durante el período de llenado.

A su vez, dado el diseño experimental de los ensayos de evaluación, no es posible aislar el efecto ambiente, por lo que no se puede afirmar que el incremento de rendimiento se debe exclusivamente a un efecto genético.

A la hora de interpretar los resultados, es necesario distinguir entre dos tipos de análisis fundamentales y complementarios. Por un lado, están los componentes que explican el rendimiento, es decir, aquellos factores que influyen directamente en la productividad del cultivo. Por otro lado, se encuentran los componentes que explican la diferencia entre los cultivares modernos y los testigos de largo plazo, lo que permite evaluar la evolución y el impacto del mejoramiento.

Realizar una comparación entre la evolución de los diferentes componentes, y la importancia de éstos en explicar el incremento de rendimiento, es una alternativa para explicar la diferencia de rendimiento de ambos grupos. Dos ejemplos claros son el PG y BT. Ambos componentes se correlacionaron de manera contundente con el rendimiento, pero dado que no se encontraron grandes diferencias entre ambos grupos, no parecieran ser dos componentes que expliquen la superioridad de los cultivares modernos. Esto se correlaciona con los resultados obtenidos por el Random Forest, ya que ambos componentes presentaron una importancia media.

La importancia del PG podría estar dada ya que al contar con un gran NGM, pequeños cambios en el PG generan grandes cambios en el rendimiento. A su vez, los valores registrados en el presente estudio, son sensiblemente inferiores a los presentados por otros autores como Aisawi et al. (2015), del Pozo et al. (2014) o Guzmán et al. (2017).

El NGM no solo presentó una evolución positiva para el caso de los cultivares modernos en comparación a los testigos, sino que también este componente explicó el incremento de rendimiento. Asimismo, el NGM es superior a lo que se ha observado en la bibliografía extranjera. De todas formas, para dicho componente, sucede algo similar a lo mencionado con el rendimiento, donde la evolución en valor absoluto presentó una significancia poco contundente (p -valor= 0,0793), mientras que al aislar dicho valor del efecto muestreador, dio significativo (p -valor= 0,0051).

Por otra parte, el IC es un indicador que refuerza el hecho de que en realidad la limitante del rendimiento está dada por la fosa, ya que, pese a que hubo un incremento de la biomasa, la menor tasa de progreso en cuanto a materia seca que representa el grano explicó una reducción en este índice. Es por ello, que los cultivares se han vuelto menos eficientes y para el caso de los materiales evaluados en este trabajo, los valores son bajos comparados con lo que afirman otros autores a nivel mundial.

Pese a esta reducción en la eficiencia de los materiales modernos, es necesario remarcar que, debido a la mayor producción de biomasa, estos materiales presentaron mayor capacidad de mantener el PG frente a incrementos en el NGM, clave para explicar la superioridad en el comportamiento en comparación a los testigos (Figura 12).

Duan et al. (2018), propone incrementar el NGM para mejorar el IC, sin embargo, en el presente estudio el componente que presentó una correlación significativa con el IC fue el PG ($r=0,47$; p -valor=0,038), por lo que se podría intuir que sería una limitante a superar en el futuro. En la misma línea Zhang et al. (2012), aseguran que, para incrementar el IC, se necesita incrementar el potencial de fosa, lo que le permite acumular una mayor cantidad de asimilados pertenecientes a la removilización y así lograr materiales más balanceados en cuanto a producción de materia seca.

Como mencionan Berger et al. (2018) y Ercoli et al. (2008), para lograr incrementar los rendimientos, es necesario encontrar un balance entre el largo de la etapa vegetativa que permita incrementar la acumulación de biomasa y ubicar el periodo crítico en condiciones ambientales óptimas (Abeledo et al., 2018).

Teniendo en cuenta que el NGM se vio incrementado a lo largo del periodo de estudio y se encontró correlacionado con la BT, se puede estimar que la producción de biomasa se encuentra demasiado concentrada previo a anthesis, lo cual permitió incrementar tanto el NGM (Duan et al., 2018). Estos autores también mencionan que la capacidad de transportar asimilados para el llenado de grano puede verse limitado, quizás es por ello que en el presente estudio no se encontraron correlacionados el PG con la BT.

Lograr un balance en la relación fuente:fosa, es el camino a seguir en el futuro, permitiendo incrementos de rendimiento ya que se incrementa la eficiencia de producción, aprovechando en mayor medida la radiación interceptada (Reynolds et al., 2017).

Para incrementar el IC, el componente que se encontró correlacionado positivamente fue el PG. No obstante, el mejoramiento se encuentra limitado dada la poca plasticidad que presenta dicho componente, lo cual dificulta su manipulación (Borrás et al., 2004; Ferrante et al., 2017; Sadras, 2007; Sadras & Slafer, 2012; Slafer et al., 2014, 2022). De igual modo, se pudo apreciar como en la medida que se superan los 20000 granos m^{-2} , se da una reducción en el PG, por lo que se debería favorecer el transporte de asimilados hacia el grano durante el periodo de llenado.

Esto concuerda con lo mencionado por Berger et al. (2018), donde atribuye bajos niveles de IC a que el periodo de llenado de grano es relativamente corto comparado con lo presentado en otras regiones, lo cual lleva a que el PG sea bajo, lo cual también se pudo observar en el presente estudio.

Por lo tanto, se puede ver como el ambiente jugó un rol fundamental en la determinación del rendimiento. Por un lado, se puede inferir que el CO_2 y radiación, han permitido que se de un incremento en la producción de biomasa (analizando la tendencia de los testigos), lo cual es favorable para el incremento de rendimiento. Sin embargo, también podría estar explicando la pérdida en eficiencia, ya que el PG estaría limitado por las altas temperaturas durante el llenado, lo cual limita la capacidad de fosa del cultivo.

Otro componente que permite identificar si la capacidad de fuente del cultivo es capaz de soportar incrementos en el número de granos, es el NEM. En este trabajo, se puede apreciar como en la medida que avanza el estudio, el NEM tiende a reducirse, lo cual indica que los cultivos modernos no son capaces de soportar un mayor número de macollos fértiles compitiendo por recursos. Esto refuerza la idea de que los cultivares se encuentran desbalanceados.

A su vez, como fue discutido anteriormente, la FM no presentó incrementos a lo largo del periodo de estudio (Figura 8). Teniendo en cuenta que el número de macollos y espiguillas/espiga que inician el desarrollo es significativamente superior al que avanzado el ciclo sobreviven, Slafer et al. (2022) aseguran que se debería lograr un mayor equilibrio entre la tasa de aparición y la de mortalidad, permitiendo así un mejor uso de los recursos, ya que es un proceso muy costoso. Sin embargo, como se puede apreciar en la Figura 14a, la BT incrementa, lo que permite inferir que en realidad habría un desbalance en la producción de biomasa.

Por otra parte, los resultados muestran haber también una interacción significativa entre la población y el rendimiento de los cultivares modernos ($r=0,48$; p -valor= $0,0336$), lo cual podría servir como primer paso para futuros estudios donde se logre ajustar la población en función del cultivar. Conocer cómo cada cultivar construye su rendimiento, permitiría a su vez, realizar manejos más ajustados al ambiente de producción. Dependiendo de las características del cultivar se podría, por ejemplo, modificar la densidad de siembra.

Tomando en cuenta lo mencionado por Hoffman et al. (2023), la población no es un factor que explique incrementos en el rendimiento. Son casos puntuales los que presentan respuesta al cambio de población y éste incremento en el rendimiento se explica por un incremento en la producción de biomasa. Los resultados obtenidos en el presente trabajo, coinciden con lo anteriormente mencionado donde la producción de biomasa se encuentra correlacionada con la población (Testigos: $r=0,73$; p -valor= $0,0003$; Tercil superior: $r=0,53$; p -valor= $0,0163$).

En función de los resultados obtenidos, se puede inferir que tanto las medias de manejo, como el ambiente, permitieron que el cultivo se desarrolle con normalidad, lo que permitió que los cultivares alcancen altos rendimientos en aquellos años más favorables. En este sentido, elección de fecha de siembra, manejo nutricional y control tanto de enfermedades, como de plagas fueron acertados.

En un futuro se debería considerar incluir al plan de evaluación la medición de biomasa en antésis, la FE y PSE. Contar con estos componentes, permitiría identificar de manera más precisa la limitante del cultivo en cuanto a la disponibilidad de asimilados en el período crítico.

Para identificar la limitante en cuanto al PG, se podría realizar un estudio más detallado enfocado en la variación de peso en función de la posición dentro de la espiga. Otra alternativa sería evaluar la relación entre componentes del macollo principal, con los resultados de las macollas secundarias, lo que permite identificar posibles

deficiencias en los asimilados por competencia.

Así, Slafer (2003) y Foulkes et al. (2009), reconocen que el camino a seguir debe estar relacionado con la implementación de marcadores moleculares (QTLs), dado que los componentes y por lo tanto el rendimiento, están regulados por genes multigenes, por lo que esta técnica permitiría comprender en profundidad las interacciones entre componentes.

Por último, se debe tener en cuenta que los resultados obtenidos parten de una base de datos donde cada variedad se repite por lo general durante 2 años, por lo que las conclusiones se van a ver muy influenciadas por las condiciones climáticas de cada año de evaluación. Para lograr resultados más precisos y aislarlos del ambiente, se debería repetir durante una mayor cantidad de años, lo cual es muy costoso ya que involucraría gran cantidad de recursos; o se podrían implementar modelos de simulación (Ritchie & Alagarswamy, 2002).

5. CONCLUSIONES

Es posible afirmar que hubo un incremento de rendimiento alcanzable en condiciones de secano de los cultivares modernos con respecto a los testigos de largo plazo, mientras que estos últimos no mostraron una tendencia clara según lo esperado.

Dicha tasa de incremento, es superior a lo que se ha presentado por otros autores en la región. Sin embargo, al comparar los resultados con estudio actuales locales, se puede apreciar como la tasa es inferior a la presentada por Godiño (2020) o Hoffman et al. (2018).

El NGM fue el principal componente numérico en explicar el incremento de rendimiento. Esto se puede corroborar con los análisis realizados, ya que, desde un principio, se puede apreciar cómo tanto en valor absoluto como relativo, se pudo ajustar una tendencia positiva significativa, lo cual demuestra que es un factor diferencial entre ambos grupos. A su vez, tras analizar los resultados obtenidos a partir del Random Forest, se destaca dentro del grupo con mayor importancia en la diferencia de rendimientos entre ambos grupos.

Sin embargo, los resultados obtenidos por parte de los componentes ecofisiológicos es más confuso, ya que el IC explicó la diferencia de rendimiento entre ambos grupos, pero su evolución fue negativa con el paso del tiempo.

Por otra parte, la BT si evolucionó positivamente, pero el tercil superior no se logró diferenciar con los testigos de largo plazo. Tomando en cuenta que el objetivo del presente estudio es comparar materiales antiguos con modernos, el principal componente es el IC.

Por último, se puede apreciar que el IC se mantiene por debajo del límite biológico. Su tendencia descendente resalta la necesidad de optimizar este componente en el futuro, con el objetivo de mejorar la eficiencia de los materiales. Este avance permitiría no solo una utilización más efectiva de los insumos, sino también un mejor aprovechamiento de la biomasa generada.

6. REFERENCIAS

- Abbate, P. E. (2004). Ecofisiología de trigo: Aspectos prácticos para el manejo del cultivo. En Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa (Ed.), *XII Congreso: La Hora de Empowerment* (pp. 121- 127). AAPRESID.
https://www.researchgate.net/profile/Pablo-Abbate2/publication/307984867_ECOFISIOLOGIA_DE_TRIGO_ASPECTOS_PRACTICOS_PARA_EL_MANEJO_DEL_CULTIVO/links/57d628e608ae6399a393f0f0/ECOFISIOLOGIA-DE-TRIGO-ASPECTOS-PRACTICOS-PARA-EL-MANEJO-DEL-CULTIVO.pdf
- Abbate, P. E. (2017). Bases ecofisiológicas del manejo del cultivo de trigo en la región pampeana. En G. A. Divito, & F. O. García (Eds.), *Manual del Cultivo de Trigo* (pp. 33-52). IPNI. <https://t.ly/gm2gn>
- Abbate, P. E., Andrade, F. H., Lázaro, L., Bariffi, J. H., Berardocco, H. G., Inza, V. H., & Marturano, F. (1998). Grain yield increase in recent Argentine wheat cultivars. *Crop Science*, 38(5), 1203-1209.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800050015x>
- Abbate, P. E., & Brach, A. M. (2020). Efectos del cambio climático y del mejoramiento genético sobre el rendimiento de trigo en el Norte de Santa Fe en las primeras dos décadas del siglo XXI. *Agrotecnia*, (29), 5-18.
<http://dx.doi.org/10.30972/agr.0294116>
- Abbate, P. E., Cardós, M. J., & Campaña, L. E. (2017). El trigo, su difusión, importancia como alimento y consumo. En G. A. Divito, & F. O. García (Eds.), *Manual del Cultivo de Trigo* (pp. 7-19). IPNI.
https://www.researchgate.net/publication/320465244_El_trigo_su_difusion_importancia_como_alimento_y_consumo
- Abbate, P. E., Lázaro, L., & Andrade, F. H. (1997) ¿Es posible incrementar el número de granos por unidad de superficie? En M. M. Kohli, & D. L. Martino (Eds.), *Explorando altos rendimientos de trigo* (pp. 71-90). CIMMYT; INIA.
https://books.google.com.uy/books?hl=es&lr=&id=BwsR8srlzSoC&oi=fnd&pg=PA1&dq=explorando+altos+rendimiento&ots=RIKRQP8EX4&sig=xRTp1w9OhLof7ZBWB7weT-eSNIY&redir_esc=y#v=onepage&q=explorando%20altos%20rendimiento&f=false

- Abbate, P. E., Pontaroli, A. C., Lázaro, L., & Gutheim, F. (2013). A method of screening for spike fertility in wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 151(3), 322-330. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000068>
- Abeledo, L. G., Serrago, R. A., de San Celedonio, R. P., Lo Valvo, P. J., & Miralles, D. J. (2018). Limitantes al rendimiento en trigo y cebada. *Agronomía & Ambiente*, 37(1), 71-84. <http://hdl.handle.net/11336/97219>
- Acreche, M. M., Briceño-Félix, G., Sánchez, J. A. M., & Slafer, G. A. (2008). Physiological bases of genetic gains in Mediterranean bread wheat yield in Spain. *European Journal of Agronomy*, 28(3), 162-170. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.07.001>
- Acreche, M. M., & Slafer, G. A. (2005). Grain weight response to increases in number of grains in wheat in a Mediterranean area. *Field Crops Research*, 98(1), 52-59. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.12.005>
- Acreche, M. M., & Slafer, G. A. (2009). Grain weight, radiation interception and use efficiency as affected by sink-strength in Mediterranean wheats released from 1940 to 2005. *Field Crops Research*, 110(2), 98-105. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2008.07.006>
- Aisawi, K. A. B., Reynolds, M. P., Singh, R. P., & Foulkes, M. J. (2015). The Physiological Basis of the Genetic Progress in Yield Potential of CIMMYT Spring Wheat Cultivars from 1966 to 2009. *Crop Science*, 55(4), 1749-1764. <https://doi.org/10.2135/cropsci2014.09.0601>
- Altamirano, A., Da Silva, H., Durán, A., Echeverría, A., Panario, D., & Puentes, R. (1976). *Carta de reconocimiento de suelos de Uruguay: Vol. I. Clasificación de suelos*. MAP.
- Austin, R. B., Bingham, J., Blackwell, R. D., Evans, L. T., Ford, M. A., Morgan, C. L., & Taylor, M. (1980). Genetic improvement in winter wheat yields since 1900 and associated physiological changes. *The Journal of Agricultural Science*, 94(3), 675-689. <https://doi.org/10.1017/S0021859600028665>
- Austin, R. B., Ford, M. A., & Morgan, C. L. (1989). Genetic improvement in the yield of winter wheat: A further evaluation. *The Journal of Agricultural Science*, 112(3), 295-301. <https://doi.org/10.1017/S0021859600085749>

- Balbi, C. N., Rodríguez, E., & Neiff, N. (2013). Tasa de crecimiento de espigas de trigo (*Triticum aestivum*) en diferentes niveles de radiación incidente en Corrientes. *Agrotecnia*, (21), 11-17. <https://doi.org/10.30972/agr.021323>
- Beche, E., Benin, G., da Silva, C. L., Munaro, L. B., & Marchese, J. A. (2014). Genetic gain in yield and changes associated with physiological traits in Brazilian wheat during the 20th century. *European Journal of Agronomy*, 61, 49-59. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2014.08.005>
- Beche, E., da Silva, C. L., Todeschini, M. H., Milioli, A. S., Benin, G., & Marchese, J. A. (2018). Improvement in Brazilian wheat breeding: Changes in developmental phases and ecophysiological traits. *Euphytica*, 214, Artículo e56. <https://doi.org/10.1007/s10681-018-2134-2>
- Beed, F. D., Paveley, N. D., & Sylvester-Bradley, R. (2007). Predictability of wheat growth and yield in light-limited conditions. *Journal of Agricultural Science*, 145(1), 63-79. <https://doi.org/10.1017/S0021859606006678>
- Beltrán, L. R. (1971). *La Revolución Verde y el desarrollo rural latinoamericano*. IICA. https://books.google.com.uy/books?hl=es&lr=&id=DmwOAQAIAAJ&oi=fnd&pg=PA37&dq=revoluci%C3%B3n+verde+y+trigo&ots=AQFjvxsC16&sig=0Ik8ZP4E5Gd4iWL3IFVTd0-2iJ0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false
- Berger, A., Gaso, D., Calistro, R., & Morales, M. (2018). Limitantes ambientales y potencial de rendimiento de trigo en Uruguay. En S. Germán, M. Quincke, D. Vázquez, M. Castro, S. Pereyra, P. Silva, & A. García (Eds.), *Seminario Internacional "1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela"* (pp. 112-123). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12033/1/st-241-2018.pdf>
- Bernheim, G., Kohli, M. M., & Verges, R. P. (1998). Progreso genético para rendimiento de grano en trigo de ciclo corto en Uruguay durante el período 1958-1997. En M. M. Kohli & D. Martino (Eds.), *Explorando altos rendimientos de trigo* (pp. 317-331). CIMMYT; INIA. <https://books.google.com.uy/books?id=BwsR8srlzSoC&lpg=PA1&dq=explorand%20altos%20rendimiento&lr&hl=es&pg=PA317#v=onepage&q&f=false>
- Berry, P. M., Sylvester-Bradley, R., & Berry, S. (2007). Ideotype design for lodging-resistant wheat. *Euphytica*, 154, 165-179. <https://doi.org/10.1007/s10681-006-9284-3>

- Bornhofen, E., Todeschini, M. H., Stoco, M. G., Madureira, A., Marchioro, V. S., Storck, L., & Benin, G. (2018). Wheat Yield Improvements in Brazil: Roles of Genetics and Environment. *Crop Science*, *58*(3), 1082-1093.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2017.06.0358>
- Borrás, L., Slafer, G. A., & Otegui, M. E. (2004). Seed dry weight response to source-sink manipulations in wheat, maize and soybean: a quantitative reappraisal. *Field Crops Research*, *86*(2-3), 131-146.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.08.002>
- Brancourt-Hulmel, M., Doussinault, G., Lecomte, C., Bérard, P., Le Buanec, B., & Trottet, M. (2003). Genetic Improvement of Agronomic Traits of Winter Wheat Cultivars Released in France from 1946 to 1992. *Crop Science*, *43*(1), 37-45.
<https://doi.org/10.2135/cropsci2003.3700>
- Bremner, P. M., & Rawson, H. M. (1978). The weights of individual grains of the wheat ear in relation to their growth potential, the supply of assimilate and interaction between grains. *Australian Journal of Plant Physiology*, *5*(1), 61-72.
<https://doi.org/10.1071/PP9780061>
- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F., & Huard, F. (2010). Why are wheat yields stagnating in Europe?: A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research*, *119*(1), 201-212. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.07.012>
- Calderini, D. F., Abeledo, L. G., Savin, R., & Slafer, G. A. (1999). Final grain weight in wheat as affected by short periods of high temperature during pre- and post-anthesis under field conditions. *Australian Journal Plant Physiology*, *26*(5), 453-458. <https://doi.org/10.1071/PP99015>
- Calderini, D. F., Dreccer, M. F., & Slafer, G. A. (1995). Genetic improvement in wheat yield and associated traits: A re-examination of previous results and the latest trends. *Plant Breeding*, *114*(2), 108-112. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1995.tb00772.x>
- Calderini, D. F., & Ortiz-Monasterio, I. (2003). Grain position affects grain macronutrient and micronutrient concentrations in wheat. *Crops Science*, *43*(1), 141-151. <https://doi.org/10.2135/cropsci2003.1410>
- Calderini, D. F., & Reynolds, M. P. (2000). Changes in grain weight as consequence of degrading treatments at pre- and post-anthesis in synthetic hexaploid lines of wheat (*Triticum durum* T. Tauschii). *Australian Journal of Plant Physiology*, *27*(3), 183-191. <https://doi.org/10.1071/PP99066>

- Calderini, D. F., Reynolds, M. P., & Slafer, G. A. (1999). Genetic gains in wheat yield and main physiological changes associated with them during the 20th century. En E. H. Satorre & G. A. Slafer (Eds.), *Wheat: Ecology and physiology of yield determination* (pp. 351-377). Food Product Press.
- Calderini, D. F., & Slafer, G. A. (1998). Changes in yield and yield stability in wheat during the 20th century. *Field Crops Research*, 57(3), 335-347.
[https://doi.org/10.1016/S0378-4290\(98\)00080-X](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(98)00080-X)
- Cartelle, A., Pedró, A., Savin, R., & Slafer, G. A. (2006). Grain weight responses to postanthesis spikelet-trimming in an old and a modern wheat under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*, 25(4), 365-371.
<https://doi.org/10.1016/j.eja.2006.07.004>
- Castaño, J. P., Giménez, A., Ceroni, M., Furest, J., & Aunchayna, R. (Eds.). (2011). *Caracterización agroclimática del Uruguay 1980-2009*. INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/2538/1/18429021211104157.pdf>
- Castro, M., Hoffman, E., Pérez, O., & Viega, L. (2018). Variabilidad en la respuesta al estrés hídrico de cultivares de trigo en Uruguay. En S. Germán, M. Quincke, D. Vázquez, M. Castro, S. Pereyra, P. Silva, & A. García (Eds.), *Seminario Internacional "1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela"* (pp. 78-86). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12033/1/st-241-2018.pdf>
- Ceccon, E. (2008). La revolución verde: Tragedia en dos actos. *Ciencias*, (91), 21-29.
<https://www.revistacienciasunam.com/images/stories/Articles/91/02/La%20revolucion%20verde%20tragedia%20en%20dos%20actos.pdf>
- Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. (s.f.). *Investigación del Trigo*.
<https://www.cimmyt.org/es/nuestro-trabajo/trigo/>
- Chowdhury, S. I., & Wardlaw, I. F. (1978). The effect of temperature on kernel development in cereals. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(2), 205-223. <https://doi.org/10.1071/AR9780205>
- Corsi, W. C. (1982). *Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos*. MGAP; Estación Experimental Agropecuaria La Estanzuela.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6079/1/CIAAB-Miscelanea-40-1982.pdf>

- Curin, F., Otegui, M. E., & González, F. G. (2018). Progreso de rendimiento en trigo argentino en los últimos 30 años bajo condiciones potenciales y limitadas por nitrógeno y/o agua. *Revista de Tecnología Agropecuaria*, 10(36), 26-29. <http://hdl.handle.net/11336/176225>
- Curin, F., Otegui, M. E., & González, F. G. (2021). Wheat yield progress and stability during the last five decades in Argentina. *Field Crops Research*, 269, Artículo e108183. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2021.108183>
- del Pozo, A., Matus, I., Serret, M. D., & Araus, J. L. (2014). Agronomic and physiological traits associated with breeding advances of wheat under high-productive Mediterranean conditions: The case of Chile. *Environmental and Experimental Botany*, 103, 180-189. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2013.09.016>
- Dirección General de Recursos Naturales. (s.f.). *Carta de suelos y cartografía de campo natural*. MGAP. <https://dgrn.mgap.gub.uy/js/visores/dgrn/>
- Duan, J., Wu, Y., Zhou, Y., Ren, X., Shao, Y., Feng, W., Zhu, Y., He, L., & Guo, T. (2018). Approach to higher wheat yield in the Huang-Huai plain: Improving post-anthesis productivity to increase harvest index. *Frontiers in Plant Science*, 9, Artículo e1457. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01457>
- Duggan, B. L., & Fowler, D. B. (2006). Yield Structure and Kernel Potential of Winter Wheat on the Canadian Prairies. *Crop Science*, 46(4), 1479-1487. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.06-0126>
- Elía, M., Savin, R., & Slafer, G. A. (2016). Fruiting efficiency in wheat: Physiological aspects and genetic variation among modern cultivars. *Field Crops Research*, 191, 83-90. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2016.02.019>
- Ercoli, L., Lulli, L., Mariotti, M., Masoni, A., & Arduini, I. (2008). Post-anthesis dry matter and nitrogen dynamics in durum wheat as affected by nitrogen supply and soil water availability. *European Journal of Agronomy*, 28(2), 138-147. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.06.002>
- Ernst, O. (2011). Cambios en la agricultura, situación actual y demandas de investigación. En A. Castro, E. Hoffman, & L. Viega (Eds.), *Limitaciones para la productividad de trigo y cebada* (pp. 3-9). CYTED. [http://www.metrice.udl.cat/es/misc/Limitaciones para la productividad de trigo y cebada 2011.pdf](http://www.metrice.udl.cat/es/misc/Limitaciones_para_la_productividad_de_trigo_y_cebada_2011.pdf)

- Evans, L. T., & Fischer, R. A. (1999). Yield potential: Its definition, measurement, and significance. *Crop Science*, 39(6), 1544-1551.
<https://doi.org/10.2135/cropsci1999.3961544x>
- Fan, J., McConkey, B., Janzen, H. H., Townley-Smith, L., & Wang, H. (2017). Harvest index-yield relationship for estimating crop residue in cold continental climates. *Field Crops Research*, 204, 153-157. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.014>
- Fassana, C. N. (2019). *Diagnóstico y predicción de respuesta nitrogenada en base al estado nutricional de trigo en Z.33* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29335>
- Ferrante, A., Cartelle, J., Savin, R., & Slafer, G. A. (2017). Yield determination, interplay between major components and yield stability in a traditional and a contemporary wheat across a wide range of environments. *Field Crops Research*, 203, 114-127. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.12.028>
- Ferrante, A., Savin, R., & Slafer, G. A. (2012). Differences in yield physiology between modern, well adapted durum wheat cultivars grown under contrasting conditions. *Field Crops Research*, 136, 52-64.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.07.015>
- Fischer, R. A. (1984). Growth and yield of wheat. En W. H. Smith, & S. J. Banta (Eds.), *Potential productivity of field crops under different environments* (pp. 129-154). International Rice Research Institute.
- Fischer, R. A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science*, 105(2), 447-461.
<https://doi.org/10.1017/S0021859600056495>
- Fischer, R. A. (2007). Understanding the physiological basis of yield potential in wheat. *The Journal of Agricultural Science*, 145(2), 99-113.
<https://doi.org/10.1017/S0021859607006843>
- Fischer, R. A. (2008). The importance of grain or kernel number in wheat: A reply to Sinclair and Jamieson. *Field Crops Research*, 105(1-2), 15-21.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2007.04.002>
- Fischer, R. A. (2011). Wheat physiology: A review of recent developments. *Crop & Pasture Science*, 62(2), 95-114. <https://doi.org/10.1071/CP10344>
- Fischer, R. A. (2014). Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research*, 182, 9-18.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.12.006>

- Fischer, R. A., Byerlee, D., & Edmeades, G. O. (2014). *Crop yields and global food security: Will yield increase continue to feed the world?* ACIAR.
https://www.researchgate.net/publication/282713287_Crop_yields_and_global_food_security_will_yield_increase_continue_to_feed_the_world_ACIAR_Monograph_No_158_Australian_Centre_for_International_Agricultural_Research
- Fischer, R. A., & Edmeades, G. O. (2010). Breeding and cereal yield progress. *Crop Science*, 50(S1), S-85-S-98. <https://doi.org/10.2135/cropsci2009.10.0564>
- Fischer, R. A., & Stockman, Y. M. (1986). Increase kernel number in Norin 10-Derived dwarf wheat: Evaluation of the Cause. *Australian Journal of Plant Physiology*, 13(6), 767-784. <https://doi.org/10.1071/PP9860767>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (1995). *Enseñanzas de la revolución verde: Hacia una nueva revolución verde*.
<https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/55ab9601-7811-43e4-aa0f-98cce9888a34/content>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2025). *FAOSTAT*.
<https://www.fao.org/faostat/es/#data/QCL>
- Foulkes, M. J., Reynolds, M. P., & Sylvester-Bradley, R. (2009). Genetic improvement of grain crops: Yield potential. En V. O. Sadras & D. Calderini (Eds.), *Crop physiology: Applications for genetic improvement and agronomy* (pp. 355-385). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374431-9.00015-3>
- Foulkes, M. J., Slafer, G. A., Davies, W. J., Berry, P. M., Sylvester-Bradley, R., Martre, P., Calderini, D. F., Griffiths, S., & Reynolds, M. P. (2011). Raising yield potential of wheat: III: Optimizing partitioning to grain while maintaining lodging resistance. *Journal of Experimental Botany*, 62(2), 469-486.
<https://doi.org/10.1093/jxb/erq300>
- Foulkes, M. J., Snape, J. W., Shearman, V. J., Reynolds, M. P., Gaju, O., & Sylvester-Bradley, R. (2007). Genetic progress in yield potential in wheat: Recent advances and future prospects. *The Journal of Agricultural Science*, 145(1), 17-29. <https://doi.org/10.1017/S0021859607006740>
- Franklin, S., Marza, F., Butrón, R., & Quispe, F. (2017). Correlación y coeficientes de sendero para variables agronómicas y componentes de rendimiento de trigo harinero. *Revista Científica de Investigación INFO-INIAF*, 1(6), 54-60.
http://revistasbolivianas.umsa.bo/pdf/rciii/v1n6/v1n6_a09.pdf

- García, G. A. (2012). *Rendimiento potencial en trigo: Identificación de atributos ecofisiológicos favorables en líneas doble haploide* [Tesis de maestría, Universidad de Buenos Aires]. Repositorio Institucional Científico y Académico. <http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/maestria/2012garciaaguillermoariel.pdf>
- García, G. A., Serrago, R. A., González, F. G., Slafer, G. A., Reynolds, M. P., & Miralles D. J. (2014). Wheat grain number: Identification of favourable physiological traits in an elite doubled-haploid population. *Field Crops Research*, 168, 126-134. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2014.07.018>
- García Lamothe, A. (2017). Densidad de siembra en trigo. *Revista INIA*, (49), 17-22. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6995/1/revista-INIA-49.p.17-22.pdf>
- Godiño, M. (2020). *Rendimiento de Trigo (Triticum aestivum L.) en Uruguay durante el período 1997-2018* [Tesis de maestría, Universidad de la República]. Colibri. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/29941>
- González, F. G., Aldabe, M. L., Terrile, I. I., & Rondanini, D. P. (2014). Grain weight response to different postflowering source: Sink ratios in modern high-yielding Argentinean wheats differing in spike fruiting efficiency. *Crop Science*, 54(1), 297-309. <https://doi.org/10.2135/cropsci2013.03.0157>
- González, F. G., García, G. A., Miralles, D. J., & Slafer, G. A. (2010). Bases fisiológicas y genéticas del desarrollo reproductivo en trigo como determinante del número de granos. En D. J. Miralles, L. N. Aguirrezábal, M. E. Otegui, B. C. Kruk, & N. Izquierdo (Eds.), *Avances en ecofisiología de cultivos de granos* (pp. 1-21). Universidad Nacional de Buenos Aires.
- González, F. G., Terrile, I. I., & Falcón, M. O. (2011). Spike fertility and duration of stem elongation as promising traits to improve potential grain number (and yield): Variation in modern Argentinean wheats. *Crop Science*, 51(4), 1693-1702. <https://doi.org/10.2135/cropsci2010.08.0447>
- Guzmán, C., Autrique, E., Mondal, S., Huerta-Espino, J., Singh, R. P., Vargas, M., Crossa, J., Amaya, A., & Peña, R. J. (2017). Genetic improvement of grain quality traits for CIMMYT semi-dwarf spring bread wheat varieties developed during 1965-2015: 50 years of breeding. *Field Crops Research*, 210, 192-196. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.06.002>
- Hafner, S. (2003). Trends in maize, rice, and wheat yields for 188 nations over the past 40 years: A prevalence of linear growth. *Agriculture, ecosystems & environment*, 97(1-3), 275-283. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(03\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(03)00019-7)

- Hoffman, E. M. (1995). Respuesta de los cultivos de invierno a la densidad de siembra: I. Trigo. *Cangüé*, 2(3), 8-12. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/44688>
- Hoffman, E. M., & Castro, A. J. (2012). Cambios en la fecha de siembra de los cultivos de invierno en Uruguay: Implicancias sobre el rendimiento y el riesgo. *Cangüé*, (32), 16-21. <https://cangu.eemac.edu.uy/2012/12/no-32/>
- Hoffman, E. M., Ernst, O., Benitez, A., & Borghi, E. (2003). Fecha de floración: Efecto de la elección de variedades y su época de siembra. *Cangüé*, 8(24), 21-22. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/48654>
- Hoffman, E. M., Fassana, C. N., Akerman, A., & Van den Dorpel, M. (2023). *Caracterización de cultivares de trigo 2023: Evaluación 2022*. Universidad de la República. <https://portal.fagro.edu.uy/wp-content/uploads/2024/10/Caracterizacion-Trigo-2022-Informe-2023.pdf>
- Hoffman, E., Locatelli, A., Fassana, N., Viega, L., & Castro, A. J. (2018). Evaluación de la evolución de la oferta varietal de trigo en Uruguay en el siglo XXI. En S. Germán, M. Quincke, D. Vázquez, M. Castro, S. Pereyra, P. Silva, & A. García (Eds.), *Seminario Internacional "1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela"* (pp. 99-111). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12033/1/st-241-2018.pdf>
- Junquera, A., Conti, V., Roncallo, P., Bellacomo, G., Fernandez, I., Moteoliva, S., Polci, P., & Miranda, R. (2001). Avance genético en trigo. En M. M. Kohli, M. Díaz de Ackermann, & M. Castro (Eds.), *Estrategias y metodologías utilizadas en el mejoramiento de trigo: Un enfoque multidisciplinario* (pp. 290-291). CIMMYT; INIA. <https://repository.cimmyt.org/entities/publication/fa72c3f0-7f26-4349-99ed-941c2ce0f88d/full>
- Kimball, B. A., Pinter, P. J., Garcia, R. L., Lamorte, R. L., Wall, G. W., Hunsaker, D. J., Wechsung, G., Wechsung, F., & Kartschall, T. (1995). Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Global Change Biology*, 1(6), 429-442. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.1995.tb00041.x>
- Knopf, O., Castro, A., Bendig, J., Pude, R., Kleist, E., Poorter, H., Rascher, U., & Muller, O. (2024). Field phenotyping of ten wheat cultivars under elevated CO₂ shows seasonal differences in chlorophyll fluorescence, plant height and vegetation indices. *Frontiers in Plant Science*, 14, Artículo e1304751. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1304751>

- Kobata, T., Palta, J. A., & Turner, N. C. (1992). Rate of development of postanthesis water deficits and grain filling of spring wheat. *Crop Science*, 32(5), 1238-1242. <https://doi.org/10.2135/cropsci1992.0011183X003200050035x>
- Lizana, X. C., & Calderini, D. F. (2013). Yield and grain quality of wheat in response to increased temperatures at key periods for grain number and grain weight determination: Considerations for the climatic change scenarios of Chile. *The Journal of Agricultural Science*, 151(2), 209-221. <https://doi.org/10.1017/S0021859612000639>
- Long, S. P., Zhu, X. G., Naidu, S. L., & Ort, D. R. (2006). Can improvement in photosynthesis increase crop yields? *Plant, cell & environment*, 29(3), 315-330. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01493.x>
- Lopes, M. S., Reynolds, M. P., Manes, Y., Singh, R. P., Crossa, J., & Braun, H. J. (2012). Genetic yield gains and changes in associated traits of CIMMYT spring bread wheat in a “historic” set representing 30 years of breeding. *Crop Science*, 52(3), 1123-1131. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.09.0467>
- Lo Valvo, P. J., Miralles, D. J., & Serrago, R. A. (2017). Genetic progress in Argentine bread wheat varieties released between 1918 and 2011: Changes in physiological and numerical yield components. *Field Crops Research*, 221, 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.08.014>
- Luizzi, D., Abbadie, T., Gatti, I., Quincke, M., Condón, F., Pereyra, S., Vázquez, D., Díaz, M., & Germán, S. (2018). Consideraciones finales. En S. Germán, & D. Luizzi (Eds.), *100 años de mejoramiento de trigo en INIA La Estanzuela* (pp. 68-72). INIA. <https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/10979/1/INIA-100-anos-de-mejoramiento-de-trigo-en-INIA-La-Estanzuela.cap.7.p.68-72.pdf>
- Luizzi, D., Quincke, M., Condón, F., Abbadie, T., Gatti, I., & Germán, S. (2018). Uso del germoplasma en el Programa de Mejoramiento Genético de Trigo. En S. Germán, & D. Luizzi (Eds.), *100 años de mejoramiento de trigo en INIA La Estanzuela* (pp. 17-37). INIA. <https://www.inia.uy/sites/default/files/publications/2024-10/INIA-100-anos-de-mejoramiento-de-trigo-en-INIA-La-Estanzuela.cap.p7-36.pdf>
- Lutz, W., & Samir, K. C. (2010). Dimensions of global population projections: what do we know about future population trends and structures? *Philosophical transactions of the royal society*, 365(1554), 2779-2791. <https://doi.org/10.1098/rstb.2010.0133>

- Matus, I., Mellado, M., Pinares, M., Madariaga, R., & del Pozo, A. (2012). Genetic progress in winter wheat cultivars released in Chile from 1920 to 2000. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(3), 303-308. <http://hdl.handle.net/1807/45990>
- Miralles, D. J., & González, F. G. (s.f.). *El trigo en Argentina: Perspectivas ecofisiológicas del pasado, presente y futuro para aumentar el rendimiento*. https://www.academia.edu/6009381/EL_TRIGO_EN_ARGENTINA_Perspectivas_ecofisiologicas_del_pasado_presente_y_futuro_para_aumentar_el_rendimiento
- Miralles, D. J., González, F. G., Abeledo, L. G., Serrago, R. A., Alzueta, I., García, G. A., de San Caledonio, R. P., & Lo Valvo, P. (Eds.). (2014). *Manual de trigo y cebada para el Cono Sur: Procesos fisiológicos y bases de manejo*. CYTED. <https://studylib.es/doc/2389081/miralles---manual-de-trigo---press.pdf>
- Miralles, D. J., & Slafer, G. A. (1995). Yield biomass and yield components in dwarf, semi-dwarf and tall isogonic lines of spring wheat under recommended and late sowing dates. *Plant Breeding*, 114(5), 392-396. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1995.tb00818.x>
- Miralles, D. J., & Slafer, G. A. (2005). Individual grain weight responses to genetic reduction in culm length in wheat as affected by source-sink manipulations. *Field Crops Research*, 43(2-3), 55-66. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(95\)00041-N](https://doi.org/10.1016/0378-4290(95)00041-N)
- Miralles, D. J., & Slafer, G. A. (2007). Sink limitations to yield in wheat: How could it be reduced? *Journal of Agricultural Science*, 145(2), 139-149. <http://hdl.handle.net/10459.1/30343>
- Miralles, D. J., Windauer, L. B., & Gómez, N. V. (2003). Factores que regulan el desarrollo de los cultivos de granos. En E. Satorre, R. Benech-Arnold, G. A. Slafer, E. De la Fuente, D. Miralles, M. E. Otegui, & R. Savin. (Eds.), *Producción de granos: Bases funcionales de su manejo* (pp. 61-74). Universidad de Buenos Aires.
- Montiel, R. (2017). *Efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento en grano y características agronómicas en trigo (Triticum aestivum L.)* [Trabajo final de grado, Universidad Nacional de Córdoba]. Repositorio Digital de la Universidad Nacional de Córdoba. <https://rdu.unc.edu.ar/items/3557385f-822f-4e8e-a020-6a3e67fe3a7d>

- Mundstock, C. M. (1998). Relaciones entre el crecimiento y el desarrollo para la determinación del rendimiento de trigo. En M. M. Kohli, & D. L. Martino (Eds.), *Explorando altos rendimientos de trigo* (pp. 59-70). CIMMYT; INIA.
[https://books.google.com.uy/books?id=BwsR8srIzSoC&lpg=PA1&dq=explorand
o%20altos%20rendimiento&lr&hl=es&pg=PA59#v=onepage&q=explorando%20
altos%20rendimiento&f=false](https://books.google.com.uy/books?id=BwsR8srIzSoC&lpg=PA1&dq=explorand+o%20altos%20rendimiento&lr&hl=es&pg=PA59#v=onepage&q=explorando%20altos%20rendimiento&f=false)
- Paccapelo, H. A., & Lorda, H. O. (1988). Determinación de los efectos relativos directos e indirectos de los componentes sobre el rendimiento de trigo. *Semiárida*, 3(2), 15-29.
<https://cerac.unlpam.edu.ar/index.php/semiarida/article/view/5114>
- Parry, M. A. J., Reynolds, M., Salvucci, M. E., Raines, C., Andralojc, P. J., Zhu, X. G., Price, G. D., Condon, A. G., & Furbank, R. T. (2011). Raising yield potential of wheat. II: Increasing photosynthetic capacity and efficiency. *Journal of Experimental Botany*, 62(2), 453-467. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq304>
- Parry, M. A. J., Rosenzweig, C., Iglesias, A., Livermore, M., & Fischer, G. (2004). Effects of climate change on global food production under SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global environmental change*, 14(1), 53-67.
<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2003.10.008>
- Peltonen-Sainio, P., Kangas, A., Salo, Y., & Jauhiainen, L. (2007). Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: Evidence based on 30 years of multi-location trials. *Field Crops Research*, 100(2-3), 179-188. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.002>
- Peltonen-Sainio, P., Muurinen, S., Rajala, A., & Jauhiainen, L. (2008). Variation in harvest index of modern spring barley, oat and wheat cultivars adapted to northern growing conditions. *The Journal of Agricultural Science*, 146(1), 35-47.
<https://doi.org/10.1017/S0021859607007368>
- Picado, W. (2008). Ciencia y geopolítica en los orígenes de la Revolución Verde. *Revista de Ciencias Ambientales*, 36(2), 46-56. <https://doi.org/10.15359/rca.36-2.6>
- Poehlman, J. M., & Sleper, D. A. (2005). *Mejoramiento genético de las cosechas* (2ª ed.). Limusa.
- Preciozzi, F., Spoturno, J., Heinzen, W., & Rossi, P. (1985). *Memoria Explicativa de La Carta Geológica del Uruguay a la escala 1:500.000*. MIEM.
[https://www.scribd.com/document/604977840/Memoria%20Explicativa%20de%
20La%20Carta%20Geologic](https://www.scribd.com/document/604977840/Memoria%20Explicativa%20de%20La%20Carta%20Geologic)

- Prentice, I. C., Farquahar, G. D., Fasham, M. J. R., Goulden, M. L., Heimann, M., Jaramillo, V. J., Kheshgi, H. S., Le Quéré, C., Scholes, R. J., & Wallace, D. W. R. (2001). The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. En L. Pitelka, & A. Ramirez Rojas (Eds.), *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 183-237). Cambridge University Press.
https://www.researchgate.net/publication/354370244_The_Carbon_Cycle_and_Atmospheric_Carbon_Dioxide
- Pretini, N., Terrile, I. I., Gazaba, L. N., Donaire, G. M., Arisnabarreta, S., Vanzetti, L. S., & González, F. G. (2020). A comprehensive study of spike fruiting efficiency in wheat. *Crop Science*, 60(3), 1541-1555. <https://doi.org/10.1002/csc.2.20143>
- Quincke, M., & Kohli, M. M. (2001). Progreso genético para rendimiento de grano en trigo de ciclo largo en Uruguay. En M. M. Kohli, M. Díaz de Ackermann, & M. Castro (Eds.), *Estrategias y metodologías utilizadas en el mejoramiento de trigo: Un enfoque multidisciplinario* (pp. 287-289). CIMMYT; INIA.
<https://repository.cimmyt.org/entities/publication/fa72c3f0-7f26-4349-99ed-941c2ce0f88d/full>
- Quincke, M., Pereyra, S., Vázquez, D., Silva, P., & Germán, S. (2018). Hitos y perspectivas del mejoramiento genético de trigo en Uruguay. En S. Germán, M. Quincke, D. Vázquez, M. Castro, S. Pereyra, P. Silva, & A. García (Eds.), *Seminario Internacional "1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela"* (pp. 2-11). INIA.
<https://ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/12033/1/st-241-2018.pdf>
- Reynolds, M. P., Bonnett, D., Chapman, S. C., Furbank, R. T., Manès, Y., Mather, D. E., & Parry, M. A. J. (2011). Raising yield potential of wheat. I: Overview of a consortium approach and breeding strategies. *Journal of Experimental Botany*, 62(2), 439-452. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq311>
- Reynolds, M. P., Foulkes, M. J., Slafer, G. A., Berry, P., Parry, M. A. J., Snape, J. W., & Angus, W. (2009). Raising yield potential in wheat. *Journal of Experimental Botany*, 60(7), 1899-1918. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp016>

- Reynolds, M. P., Pask, A. J. D., Hoppitt, W. J. E., Sonder, K., Sukumaran, S., Molero, G., Saint-Pierre, C., Payne, T., Singh, R. P., Braun, H. J., González, F. G., Terrile, I. I., Barma, N. C. D., Hakim, A., He, Z., Fan, Z., Novoselovic, D., Maghraby, M., Gad, K. I. M., ... Joshi, A. K. (2017). Strategic crossing of biomass and harvest index - source and sink - achieves genetic gains in wheat. *Euphytica*, 213, Artículo e257. <https://doi.org/10.1007/s10681-017-2040-z>
- Reynolds, M. P., Pellegrineschi, A., & Skovmand, B. (2005). Sink-limitation to yield and biomass: A summary of some investigations in spring wheat. *Annals of Applied Biology*, 146(1), 39-49. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2005.03100.x>
- Richards, R. A. (1996). Increasing the yield potential of wheat: Manipulating sources and sinks. En M. P. Reynolds, S. Rajaram, & A. McNab (Eds.), *Increasing yield potential in wheat: Breaking the barriers* (pp. 134-149). CIMMYT. <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/aa73745f-445a-4ae4-979c-800ffaa46d87/content>
- Ritchie, J. T., & Alagarswamy, G. (2002). Computer simulation of barley growth, development and yield. En G. A. Slafer, J. L. Molina-Cano, R. Savin, J. L. Araus, & I. Romagosa (Eds.), *Barley science: Recent advances from molecular biology to agronomy of yield and quality* (pp. 445-479). Food Product Press. <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003578536-16/computer-simulation-barley-growth-development-yield-joe-ritchie-gopalsamy-alagarswamy>
- Rivelli, G. M., Abeledo, L. G., Calderini, D. F., Miralles, D. J., & Rondanini, D. P. (2021). Rendimiento de trigo y colza afectados por estrés térmico y sombreado en ambientes productivos contrastantes. *Revista técnica de cultivos de invierno*, 3, 10-16. <http://hdl.handle.net/11336/168373>
- Rodrigues, O., Lhamby, J. C. B., Didonet, A. D., & Marchese, J. A. (2007). Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: Yield improvement and associated changes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(6), 817-825. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600008>
- Rose, T., & Kage, H. (2019). The contribution of functional traits to the breeding progress of central-European winter wheat under differing crop management intensities. *Frontiers in Plant Science*, 10, Artículo e1521. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01521>

- Rubio, V., Garcia Lamothe, A., & Pereyra, S. (2017). Impacto de la variabilidad climática en el cultivo de trigo. *Revista INIA*, (48), 13-16.
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.30727.50084>
- Sadras, V. O. (2007). Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crops Research*, 100(2-3), 125-138.
<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2006.07.004>
- Sadras, V. O., & Lawson, C. (2011). Genetic gain in yield and associated changes in phenotype, trait plasticity and competitive ability of South Australian wheat varieties released between 1958 and 2007. *Crop and Pasture Science*, 62(7), 533-549. <https://doi.org/10.1071/CP11060>
- Sadras, V. O., & Slafer, G. A. (2012). Environmental modulation of yield components in cereals: Heritabilities reveal a hierarchy of phenotypic plasticities. *Field Crops Research*, 127, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.11.014>
- Sanchez-Garcia, M., Royo, C., Aparicio, N., Martín-Sánchez, J. A., & Álvaro, F. (2013). Genetic improvement of bread wheat yield and associated trait in Spain during the 20th century. *The Journal of Agricultural Science*, 151(1), 105-118.
<https://doi.org/10.1017/S0021859612000330>
- Serrago, R. A., Alzueta, I., Savin, R., & Slafer, G. A. (2013). Understanding grain yield responses to source-sink ratios during grain filling in wheat and barley under contrasting environments. *Field Crops Research*, 150, 42-51.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2013.05.016>
- Shearman, V. J., Sylvester-Bradley, R., Scott, R. K., & Foulkes, M. J. (2005). Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. *Crop Science*, 45(1), 175-185. <https://doi.org/10.2135/cropsci2005.0175a>
- Slafer, G. A. (2003). Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of Applied Biology*, 142(2), 117-128.
<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2003.tb00237.x>
- Slafer, G. A. (2007). Physiology of determination of major wheat yield components. En H. T. Buck, J. E. Nisi, & N. Salomón (Eds.), *Wheat Production in Stressed Environments* (pp. 557-565). Springer. <https://doi.org/10.1007/1-4020-5497-1>
- Slafer, G. A., Abeledo, L. G., Miralles, D. J., González, F. G., & Whitechurch, E. M. (2001). Photoperiod sensitivity during stem elongation as an avenue to raise potential yield in wheat. *Euphytica*, 119, 191-197.
<https://doi.org/10.1023/A:1017535632171>

- Slafer, G. A., & Andrade, F. H. (1989). Genetic improvement in bread wheat (*Triticum aestivum*) yield in Argentina. *Field Crops Research*, 21(3-4), 289-296. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(89\)90010-5](https://doi.org/10.1016/0378-4290(89)90010-5)
- Slafer, G. A., & Andrade, F. H. (1991). Changes in physiological attributes of the dry matter economy of bread wheat (*Triticum aestivum*) through genetic improvement of grain yield potential at different regions of the world. *Euphytica*, 58, 37-49. <https://doi.org/10.1007/BF00035338>
- Slafer, G. A., & Araus, J. L. (2007). Physiological traits for improving wheat yield under a wide range of conditions. En J. H. J. Spiertz, P. C. Struik, & H. H. Van Laar (Eds.), *Scale and Complexity in Plant Systems Research: Gene-Plant-Crop Relations* (pp. 147-156). Springer. https://www.researchgate.net/publication/228475110_Physiological_Traits_for_Improving_Wheat_Yield_Under_a_Wide_Range_of_Conditions
- Slafer, G. A., Calderini, D. F., & Miralles, D. J. (1996). Yield components and compensation in wheat: opportunities for further increasing yield potential. En M. P. Reynolds, S. Rajaram, & A. McNab (Eds.), *Increasing Yield Potential in Wheat: Breaking the Barriers* (pp. 101-133). CIMMYT. <https://repository.cimmyt.org/server/api/core/bitstreams/aa73745f-445a-4ae4-979c-800ffaa46d87/content>
- Slafer, G. A., García, G. A., Serrago, R. A., & Miralles, D. J. (2022). Physiological drivers of responses of grains per m² to environmental and genetic factors in wheat. *Field Crops Research*, 285, Artículo e108593. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108593>
- Slafer, G. A., & Rawson, H. M. (1995). Rates and cardinal temperatures for processes of development in wheat: Effects of temperature and thermal amplitude. *Functional Plant Biology*, 22(6), 913-926. <https://doi.org/10.1071/PP9950913>
- Slafer, G. A., & Savin, R. (1994). Source-sink relationships and grain mass at different positions within the spike in wheat. *Field Crops Research*, 37(1), 39-49. [https://doi.org/10.1016/0378-4290\(94\)90080-9](https://doi.org/10.1016/0378-4290(94)90080-9)
- Slafer, G. A., Savin, R., & Sadras, V. O. (2014). Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Research*, 157, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.004>

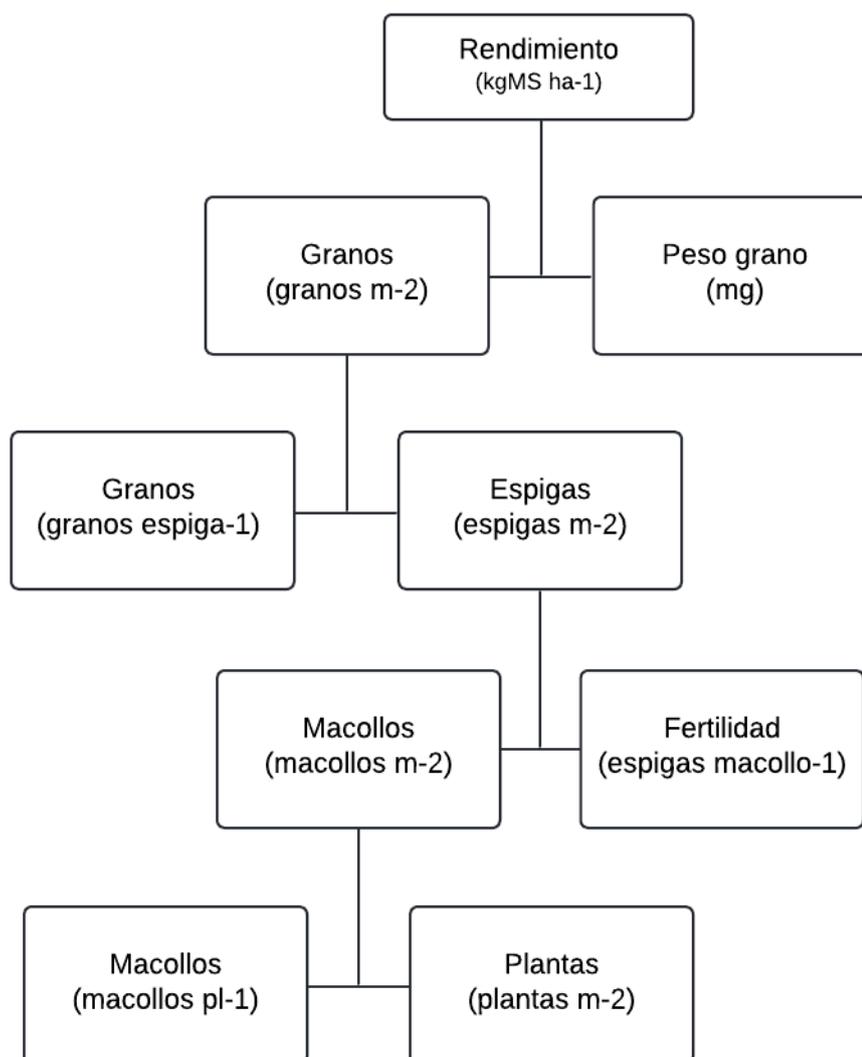
- Snape, J. (2004). Challenges of integrating conventional breeding and biotechnology: A personal view! En T. Fischer, & N. Turner (Eds.), *4th International Crop Science Congress: New directions for a diverse planet*.
<https://www.researchgate.net/publication/228718852>
- Terrile, I. I., Miralles, D. J., & González, F. G. (2017). Fruiting efficiency in wheat (*Triticum aestivum* L): Trait response to different growing conditions and its relation to spike dry weight at anthesis and grain weight at harvest. *Field Crops Research*, 201, 86-96. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.09.026>
- Uruguay XXI. (2024). *Sector agrícola en Uruguay*.
<https://www.uruguayxxi.gub.uy/uploads/informacion/3c65f7d9c47fd2235bbc5752bd3ad5c2f005ec88.pdf>
- Valdés, C., Estrada, G., Martínez, C., & Domínguez, A. (2017). Rendimiento de grano en trigo modificado por cambios en la fuente durante el llenado de grano. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8(1), 79-90.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v8i1.73>
- Van Ittersum, M. K., Cassman, K. G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., & Hochman, Z. (2013). Yield gap analysis with local to global relevance: A review. *Field Crops Research*, 143, 4-17. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.09.009>
- Vesohoski, F., Marchioro, V. S., Franco, F. D. A., & Cantelle, A. (2011). Componentes do rendimento de grãos em trigo e seus efeitos diretos e indiretos na produtividade. *Revista Ceres*, 58(3), 337-341. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2011000300014>
- Vieira, E. A., Oliveira, A. C., Carvalho, F. I., Martins, L. F., Benin, G., Silva, J. A., Coimbra, J. L., Martins, A. F., Carvalho, M. F., & Ribeiro, G. C. (2007). Análise de trilha entre os componentes primários e secundários do rendimento de grãos em trigo. *Revista Brasileira de Agrociência*, 13(2), 169-174.
https://www.researchgate.net/publication/28241593_Analise_de_trilha_entre_os_componentes_primarios_e_secundarios_do_rendimento_de_graos_em_trigo
- Woyann, L. (2018). *Ganho genético e seleção em gerações iniciais e em linhagens de trigo por meio de modelos mistos* [Disertación doctoral, Universidade Tecnológica Federal do Paraná]. Repositório Institucional da UTFPR.
<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/3161>

- Wu, W., Li, C., Ma, B., Shah, F., Liu, Y., & Liao, Y. (2014). Genetic progress in wheat yield and associated traits in China since 1945 and future prospects. *Euphytica*, 196, 155-168. <https://doi.org/10.1007/s10681-013-1033-9>
- Xiao, Y. G., Qian, Z. G., Wu, K., Liu, J. J., Xia, X. C., Ji, W. Q., & He, Z. H. (2012). Genetic gains in grain yield and physiological traits of winter wheat in Shandong Province, China, from 1969 to 2006. *Crop Science*, 52(1), 44-56. <https://doi.org/10.2135/cropsci2011.05.0246>
- Zadoks, J. C., Chang, T. T., & Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research*, 14(6), 415-421. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3180.1974.tb01084.x>
- Zhang, H. P., Turner, N. C., & Poole, M. L. (2012). Increasing the harvest index of wheat in the high rainfall zones of southern Australia. *Field Crops Research*, 129, 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2012.02.002>
- Zhang, X. Y., Chen, S. Y., Sun, H. Y., Pei, D., & Wang, Y. M. (2008). Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat. *Irrigation Science*, 27, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s00271-008-0131-2>
- Zhou, Y., He, Z. H., Sui, X. X., Xia, X. C., Zhang, X. K., & Zhang, G. S. (2007). Genetic improvement of grain yield and associated traits in the northern China winter wheat region from 1960 to 2000. *Crop Science*, 47(1), 245-253. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.03.0175>
- Zhu, X. G., Long, S. P., & Ort, D. R. (2010). Improving photosynthetic efficiency for greater yield. *Annual review of plant biology*, 61(1), 235-261. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042809-112206>

7. ANEXOS

Anexo A

Árbol de componentes numéricos de rendimiento



Nota. Esquema modificado en función de Slafer (2003).

Bibliografía anexo A

Slafer, G. A. (2003). Genetic basis of yield as viewed from a crop physiologist's perspective. *Annals of Applied Biology* 142(2), 117-128.

<https://doi.org/10.1111/j.1744-7348.2003.tb00237.x>

Anexo B

Listado de materiales pertenecientes al tercil superior

Año	Total materiales	Seleccionados	Nombres
2003	5	1	Baguette 10
2004	7	1	Onix
2005	8	1	Inia 05-1
2006	8	1	Inia Carancho (LE 2310)
2007	8	1	Biointa 1001
2008	12	3	Atlax, Baguette 9, Nogal
2009	13	3	Baguette 9, Don Alberto, Nogal
2010	15	4	Baguette 17, Bionita 1006, Don Alberto, ORL05-004
2011	11	2	Baguette 601, Don Alberto
2012	9	2	Baguette 501, Baguette 601
2013	14	3	Bk 103, DM 1114, Don Alberto
2014	15	4	Fuste, Klein Rayo, Syn 300, Tec 12
2015	16	4	DM Ceibo, LE 2409, Fuste, Syn 211
2016	14	3	DM Ceibo, Don Alberto, Syn 211
2017	12	3	Baguette 19, DM 1407, LE 2428
2018	11	2	Ñandubay, DM 1601
2019	12	3	Fuste, LG 1601, Ñandubay
2020	13	3	Baguette 620, DM Pehuen, FD 16ww339
2021	13	3	Baguette 11, DM Catalpa, Klein Favorito II
2022	11	2	Don Alberto, LE 2475
2023	7	1	Don Alberto

Nota. Elaborado a partir de la base de datos de Sistema de Caracterización de Cultivares de Trigo de la EEMAC 2003-2023 (N. Fassana, comunicación personal, 11 de octubre, 2024).

Anexo C

Régimen de heladas para el periodo 2003-2023 en EEMAC (Paysandú)

Año	Primer helada	Última helada	Antesis
2003	8-jun.	26-ago.	sd
2004	30-jun.	12-sep.	sd
2005	No	No	sd
2006	24-jun.	21-ago.	sd
2007	30-jun.	11-ago.	sd
2008	30-may.	16-jun.	sd
2009	10-jun.	10-ago.	sd
2010	16-jul.	5-ago.	4-oct.
2011	27-jun.	7-jul.	4-oct.
2012	7-jun.	30-jul.	1-oct.
2013	20-jun.	27-ago.	29-sep.
2014	No	No	27-sep.
2015	12-jun.	15-jul.	25-sep.
2016	No	No	23-sep.
2017	No	No	20-sep.
2018	sd	sd	4-oct.
2019	No	No	4-oct.
2020	14-jul.	21-ago.	23-sep.
2021	No	No	22-sep.
2022	18-jun.	19-ago.	5-oct.
2023	No	No	4-oct.

Nota. En el periodo 2003 – 2009 no se cuenta con registros de fecha de antesis.

Elaborado a partir de datos meteorológicos tomados de la Estación Meteorológica automática EEMAC (N. Fassana, comunicación personal, 11 de octubre, 2024).