

**UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA**

**RENDIMIENTO DE TRIGO (*Triticum aestivum* L.) EN
URUGUAY DURANTE EL PERÍODO 1997-2018**

por

Marcela GODIÑO SILVA

TESIS presentada como uno
de los requisitos para obtener
el título de *Magister* en
Ciencias Agrarias opción
Ciencias Vegetales.

MONTEVIDEO
URUGUAY
Junio 2020

Tesis aprobada por el tribunal integrado por el Ing. Agr. Ph.D. Federico Condón, Ing.Agr. Ph.D. Mónica Cadenazzi e Ing. Agr. Ph.D. Martín Quincke, el 8 de junio de 2020. Autora: Ing. Agr. Marcela Godiño Silva. Director Ing. Agr. Ph.D. Andres Berger Ricca.

Dedico este trabajo a mi padre Juan Adolfo Godiño.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco muy especialmente a mi director de tesis, Andrés Berger, por haber guiado y acompañado la realización de este trabajo.

Al Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) y al Instituto Nacional de Semillas (INASE) por haberme brindado la posibilidad de realizarlo con información de su propiedad.

A la Agencia Nacional de Investigación e Innovación (ANII) por el apoyo económico, a través de las Becas de Posgrado Nacional.

A Marina Castro, Beatriz Castro y Martín Quincke por la valiosa información proporcionada y su continuo apoyo durante el proceso.

A Mónica Cadenazzi, Oswaldo Ernst y Federico Condón por participar en los tribunales y aportar valiosas sugerencias.

A mi familia por el incondicional apoyo de siempre.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	VI
RESUMEN	VII
SUMMARY.....	VIII
1. <u>INTRODUCCIÓN</u>.....	1
1.1. RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE TRIGO.....	1
1.1.1. <u>Potencial de rendimiento y rendimiento potencial</u>.....	1
1.1.2. <u>Rendimiento potencial en seco</u>	5
1.1.3. <u>Rendimiento alcanzable</u>	6
1.1.4. <u>Rendimiento comercial</u>	7
1.1.5. <u>Brechas de rendimiento</u>	8
1.2. RENDIMIENTO Y BRECHAS EN URUGUAY.....	9
1.3. ECOFISIOLOGÍA PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO.....	10
1.3.1. <u>Etapas del ciclo del cultivo</u>.....	10
1.3.2. <u>Componentes de rendimiento</u>.....	11
1.3.3. <u>Factores determinantes del rendimiento</u>.....	14
1.3.3.1. Factores ambientales	14
1.3.3.2. Factores de manejo	18
2. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>.....	21
3. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	25
3.1. RENDIMIENTO EXPERIMENTAL MEDIO	25
3.2. RENDIMIENTO EXPERIMENTAL DE LOS CULTIVARES SUPERIORES.....	27
3.3. RENDIMIENTO COMERCIAL.....	40
3.4 VARIABLES ASOCIADAS A LA VARICIÓN DEL RENDIMIENTO.....	42

3.4.1. <u>Variables asociadas al rendimiento de los materiales de ciclo intermedio</u>	42
3.4.2. <u>Variables asociadas al rendimiento de los materiales de ciclo largo</u>	53
4. <u>CONCLUSIONES</u>	62
5. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	64
6. <u>ANEXO 1: RENDIMIENTO DE TRIGO EN URUGUAY: PERÍODO 1997-2018</u>	78

RESUMEN

La proyección de producción de alimentos para lograr la seguridad alimentaria mundial hacia el año 2050, muestra la necesidad de duplicar la producción actual. Existe preocupación a nivel mundial porque algunos de los países más productivos, que representan el 25% del suministro mundial de trigo, están teniendo reducción en las tasas de incremento de rendimiento. El objetivo de este trabajo fue estudiar desde un punto de vista ecofisiológico los principales cambios ocurridos en la productividad en el período 1997-2018 y analizar las determinantes del rendimiento alcanzado. Se utilizó la técnica de meta-análisis aplicada a información de trigos de ciclo intermedio y largo, proveniente de experimentos de la Red Nacional de Evaluación de Cultivares y del Programa de Mejoramiento Genético Nacional. El aumento de rendimiento producido en el período fue significativo. Los nuevos cultivares de ciclo intermedio asociados a nuevas tecnologías de manejo, rindieron un 31,5 % más que los testigos y los de ciclo largo un 20,4 % más. El progreso genético promedio en el período, determinado como la diferencia entre los 5 cultivares de mejor comportamiento y un testigo fijo (INIA Tijereta) fue de 1866 kg ha⁻¹ (40,2%) para los ciclos intermedios y de 1230 kg ha⁻¹ (26,5%) para los ciclos largos. Las variables que mostraron mayor incidencia en el rendimiento fueron: la radiación y la temperatura en el período crítico (floración -20 + 10 días), la lluvia en el período emergencia-floración, la presencia de tratamiento sanitario, la fertilización y el efecto del año. El coeficiente fototermal en el período crítico resultó significativo solo para los ciclos intermedios, reafirmando su mayor dependencia a lo que ocurra en este período. En cambio, para los ciclos largos la variable extra de significación fue la época de siembra, confirmando la importancia de que una época de siembra temprana les asegure suficiente área foliar para sustentar el correcto desempeño en la fase reproductiva.

Palabras clave: trigo, ecofisiología, rendimiento potencial, progreso genético, brecha de rendimiento

WHEAT (*Triticum aestivum* L.) YIELD IN URUGUAY DURING THE PERIOD 1997 – 2018

SUMMARY

The projection of food production to achieve world food security towards the year 2050 shows the need to double the current food production. There is worldwide concern, because some of the most productive countries, that represent 25% of the world's wheat supply, are showing reductions in their yield growth rates. The objective of this work was to study from an ecophysiological point of view, the main changes in productivity in the period 1997-2018 and study the determinants of the achieved performance. The meta-analysis technique was applied to performance data of intermediate and long cycle wheats, from experiments of the National Evaluation and the National Wheat Breeding Program. The yield increase during the period was significant. New intermediate cycle cultivars yielded 31,5%, and long cycle yielded 20,4% more than check cultivars as the result of genetic gain and the improvement of agronomic practices. The average genetic progress in the period, determined as the difference between the 5 best-performing cultivars and a fixed control (INIA Tijereta) was 1866 kg ha⁻¹ (40,2%) for intermediate and 1230 kg ha⁻¹ (26,5%) for long cycle cultivars. The variables that showed the greatest impact on the yield were: radiation and temperature in the critical period (flowering -20 + 10 days), rainfall in the emergency-flowering period, disease control, fertilization, and the year effect. The photothermal coefficient in the critical period was significant only for the intermediate cycle cultivars, reaffirming their greater dependence on what occurs in this period. For the long cycle cultivars, the extra variable of significance was the planting date, confirming the importance that during the vegetative period an early planting dates ensures the achievement of enough foliar area to support a proper performance in the reproductive phase.

Keywords: wheat, ecophysiology, potential yield, genetic progress, yield gap

1. INTRODUCCIÓN

1.1. RENDIMIENTO DEL CULTIVO DE TRIGO

El rendimiento del cultivo de trigo es el peso del grano a un determinado contenido de humedad, por unidad de área cosechada. Generalmente se expresa en toneladas por hectárea. El contenido de humedad aceptado es generalmente el establecido como límite para la comercialización del grano y puede tener pequeñas variaciones entre países, pero generalmente está entre 12 y 15% (Chapagain y Good, 2015; Fischer, 2015). En Uruguay es de 13,5 %. Esta definición de rendimiento es la comúnmente empleada en transacciones comerciales, pero existen varias definiciones más complejas que son de mayor utilidad a la investigación y el mejoramiento genético, y se detallan a continuación.

1.1.1. Potencial de rendimiento y rendimiento potencial

El potencial de rendimiento es un concepto difícil de definir, pero que ha probado tener utilidad y su análisis ha realizado importantes aportes al modelamiento de los cultivos. A medida que la agronomía y el mejoramiento genético evolucionan, mejoran las posibilidades de aumentar el rendimiento potencial.

El término “potencial de rendimiento” en muchos casos se utiliza como sinónimo de “rendimiento potencial” (Evans y Fischer, 1999) y ha sido definido por Evans citado por Gent (1998), como el rendimiento de un cultivar cuando ha crecido en un ambiente al cual está adaptado, sin limitaciones de nutrientes y agua, con control de enfermedades, plagas, malezas y cualquier otro estrés que el cultivo pueda tener. Evans y Fisher (1999) adoptan esta definición haciendo algunas puntualizaciones importantes en su determinación: a) que la referencia a cultivar y ambiente implica que el potencial de rendimiento es una función de su interacción; y ambiente involucra localidad y año a través de la incidencia de la radiación, temperatura y fotoperíodo en el momento y espacio, b) que la variedad esté “adaptada” significa que hay un cierto grado

de adaptación, pero no necesariamente perfecta adaptación de sus fases de desarrollo al ambiente y sus características, c) que en la mayoría de los casos es muy difícil asegurar que se está trabajando con un suministro de agua y nutrientes no limitante y que se tiene a los factores bióticos y abióticos en absoluto control.

En base a esto sugiere que se reserve el término “potencial de rendimiento” para el máximo rendimiento que puede ser alcanzado por un cultivar en un determinado ambiente. Este podrá ser determinado por modelos de simulación que puedan realizar suposiciones que reflejen las mejores condiciones agronómicas y fisiológicas para ese cultivar en particular.

El mismo autor posteriormente agrega dos conceptos importantes a la definición de “rendimiento potencial”: que la determinación debe ser realizada con el mejor manejo agronómico, y con la misma base de recursos naturales y sistema de cultivo que tiene la región a la que se refiere el potencial de rendimiento en particular.

En resumen, el rendimiento potencial ha sido redefinido por Fisher (2015) como el rendimiento esperado con:

- (i) La variedad mejor adaptada
- (ii) El mejor manejo agronómico y gestión de otros insumos
- (iii) Ausencia de estreses bióticos y abióticos manejables
- (iv) Con la misma base de recursos naturales y sistema de cultivo que tiene la región.

Cuando el cultivo se encuentra en las condiciones óptimas que la determinación requiere, la tasa de crecimiento está determinada por la radiación solar, la temperatura, el CO₂ atmosférico y los rasgos genéticos que determinan la duración del período de crecimiento y la interceptación de luz por el dosel del cultivo (van Ittersum 2013, van Wart et al., 2013, van Oort et

al., 2017). El rendimiento potencial es específico para la ubicación en que se determina debido al clima, pero en teoría no depende de las propiedades del suelo, suponiendo que los requerimientos de agua y nutrientes pueden ser cubiertos con el manejo.

La estimación de rendimiento potencial en muchos casos se realiza en ensayos y puede estar referida a una variedad o a una localidad.

Los ensayos para determinar el rendimiento potencial de una variedad deben ser aplicables a la localidad y con una base de recursos naturales (tipo de suelo, clima y topografía) similar, (nunca superior). Además, se deben considerar mejoras en el manejo de largo plazo (irrigación, materia orgánica, drenaje) y el muestreo de un número razonable de estaciones. El suplemento de agua debe ser óptimo ya sea por riego, o por precipitaciones bien distribuidas y suficientes para satisfacer toda la evapotranspiración potencial del cultivo, (ET_p=el uso sin limitaciones de agua del cultivo desde la siembra hasta la cosecha) (Fisher, 2015).

Para obtener la estimación, los ensayos comparativos pueden tener las variedades en todas las localidades o ser ensayos desbalanceados en los que las variedades van cambiando a través de los años (situación que ocurre en programas de mejoramiento genético o de evaluación de cultivares). Estos ensayos serían apropiados para estimar el potencial de rendimiento siempre y cuando incluyan tratamiento sanitario, aunque la aplicación de fungicida no es una práctica generalizada en este tipo de experimentos. No obstante, en la mayoría de ellos se reportan los niveles de enfermedad y esta información podría ser usada para corregir el rendimiento (Fischer, 2015).

Sin embargo, es importante restringir tales comparaciones a aquellos ensayos realizados antes de que se hayan producido quiebres de resistencia a enfermedades y pestes en el cultivar de referencia, de lo contrario se estaría estimando incorrectamente el progreso en el potencial de rendimiento (Fischer, 2015).

Para analizar estos ensayos generalmente se trabaja con cuantiles o se pueden aplicar algunos métodos como la función de frontera o funciones límites para identificar los mayores rendimientos para un nivel de disponibilidad de recursos determinado (Shatar y Mc Bratney 2004, Ernst 2014, Hochman et al., 2012).

Estos ensayos tienen una utilidad adicional y permiten un análisis más directo cuando, además de las mediciones de rendimiento, se tiene información detallada sobre factores de manejo, suelo y clima que probablemente estén afectando los rendimientos (Lobell et al., 2009). Ejemplo de esto es el trabajo de Calviño y Sadras (2002), que estudió la relación entre el rendimiento, y variables de clima y manejo en la Pampa argentina, concluyendo que el manejo para reducir los déficits hídricos de fin de temporada era la mejor estrategia para mejorar los rendimientos. En ausencia de esta información, igualmente es posible acercarse a comprender las determinantes del rendimiento, analizando el comportamiento de los rendimientos en el espacio y en el tiempo (Hall y Richards, 2013). Del mismo modo, el análisis de los rendimientos a lo largo del tiempo puede indicar la importancia relativa de factores dependientes de la ubicación (Lobell et al., 2009).

Otra forma de estimar el rendimiento potencial es a través de modelos que en su mayoría simulan el desarrollo fenológico en relación con el tiempo fototérmico, asimilación neta, asignación de recursos a diferentes órganos, transpiración y dinámica del agua del suelo. Los modelos menos sofisticados simplifican la simulación de la asimilación neta, mediante el uso de un valor estándar para eficiencia del uso de la radiación que explica ambos fotosíntesis y respiración (Lobell et al., 2009). Estos modelos pueden ser usados para predecir el potencial de rendimiento en otros ambientes (ej. en diferentes años, localidades, fechas de siembra etc.). Su utilización requiere de un

conjunto de datos que varían según el modelo, pero que generalmente incluyen: temperatura diaria máxima y mínima del aire a la altura del dosel, radiación solar, lluvia, humedad relativa, fecha y profundidad de siembra, fecha de emergencia, coeficientes de desarrollo fenológico (coeficiente fototermal), etc. Los sesgos en esta metodología pueden aparecer si la información incluida no representa adecuadamente la base de recursos naturales de la región de interés. Los modelos deben ser actualizados frecuentemente para reflejar modificaciones que puedan haberse producido en las variedades nuevas que se van incorporando, que pueden cambiar su potencial de rendimiento o la duración de las fases de desarrollo (Palosuo et al, 2011).

Muchas particularidades pueden estar escondidas en las definiciones y en las determinaciones de rendimiento potencial, pero de cualquier forma sigue siendo una muy buena herramienta para estudiar cambios en el rendimiento.

1.1.2. Rendimiento potencial en seco

El rendimiento potencial en seco es el rendimiento obtenido sin otra limitante manejable diferente al suministro de agua que ocurre naturalmente. Gran parte de la cosecha mundial de cereales se cultiva en situaciones de seco, donde el suministro de agua almacenada en el suelo a la siembra, más la precipitación durante el ciclo del cultivo, están muy por debajo de la evapotranspiración potencial (ETp). Estas circunstancias son tan diferentes a condiciones de agua no limitante que frecuentemente resulta más razonable trabajar con el rendimiento potencial en seco, especialmente cuando la ET real promedio es inferior al 70% de la ETp (Fischer, 2015).

En este caso, el crecimiento del cultivo depende de la temperatura, radiación solar y la concentración de CO₂ atmosférico durante el período de crecimiento, de las características genéticas de los cultivares sembrados y del

suministro de agua y, por lo tanto, el rendimiento en secano además está influenciado por el tipo de suelo y la topografía.

Tanto la temperatura, como la radiación y la lluvia son factores ambientales que varían en el año y por lo tanto el rendimiento potencial en secano depende no solo de la localidad, sino también de la época de siembra y ciclo del cultivar. Esto último es una característica genética que determina la duración del período de crecimiento cuando el cultivar es sembrado en una época determinada (Lobell et al., 2009).

La determinación del rendimiento potencial en secano es similar a la del rendimiento potencial y los sesgos pueden surgir debido a la variación en la distribución de la lluvia con respecto a las etapas de desarrollo del cultivo. No obstante, su utilización como una función lineal del suministro de agua, se considera un valioso punto de referencia y los modelos de simulación son especialmente útiles para entender las desviaciones esperadas debidas a las variaciones en el suministro de agua (Fischer, 2015).

En el caso de modelos de simulación además de las variables climáticas y de manejo antes mencionadas, es necesario tener información del tipo de suelo, los contenidos de humedad a la siembra y la profundidad efectiva de las raíces del cultivo (Lobell et al., 2009).

Estimaciones precisas de rendimiento potencial y rendimiento potencial en secano son de mucha utilidad para interpretar las tendencias de rendimiento en regiones y países donde los datos agregados indican un estancamiento del rendimiento (Cassman et al. 2010, Lobell et al. 2009).

1.1.3. Rendimiento alcanzable

Es el mayor rendimiento alcanzado a través del uso de la mejor tecnología disponible. Algunos estudios utilizan el rendimiento alcanzable como una aproximación al rendimiento potencial o al rendimiento potencial en secano (Hally Richards, 2013; Sadras et al., 2015).

Algunos autores como Fischer (2015) agrega un componente económico y define al rendimiento alcanzable como el obtenido por un agricultor con recursos naturales promedio cuando han adoptado prácticas y niveles de insumos económicamente óptimos. Esta definición debe balancear niveles óptimos de insumos con atención al riesgo económico.

El rendimiento alcanzable generalmente está un 20–30% por debajo del rendimiento potencial en situaciones donde los precios internacionales y costos de transporte son razonables (Fischer, 2015).

La lista de factores que comúnmente afectan el crecimiento de los cultivos y los rendimientos en chacra son variados y pueden incluir estreses de naturaleza bióticas o abiótica, factores que se relacionan principalmente al manejo y otros a las propiedades del suelo, así como interacciones entre ellos.

1.1.4. Rendimiento comercial

El rendimiento comercial representa el rendimiento promedio de campo, regional o nacional. Es definido como el rendimiento obtenido por los productores, en un determinado momento y en una determinada región, bajo prácticas de manejo generalizadas en la misma (fecha de siembra, ciclo, densidad, manejo sanitario y de nutrientes, etc.) (van Ittersum, 2013).

Este parámetro generalmente se reporta desde mediciones de rendimiento realizadas por los agricultores, a partir de encuestas y/o estadísticas locales o nacionales, que se realizan anualmente por los gobiernos, o por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO), y se difunden a través de la base de datos de acceso público FAOSTAT (FAO, 2012).

A pesar de que el rendimiento comercial es ampliamente utilizado, su determinación puede tener problemas de precisión, por inapropiada recopilación de datos, diferentes contenidos de humedad al momento del reporte, errores de muestreo y cuestiones relacionadas al procesamiento de

los datos (Fischer, 2015). Por otra parte, la cantidad de años utilizada para estimarlo debe ser un equilibrio que contemple la variabilidad en los rendimientos y la necesidad de evitar efectos temporales debidos a cambios tecnológicos o climáticos (van Ittersum, 2013).

van Wart et al.(2013) hace referencia a que generalmente se llega a una meseta o techo en el rendimiento comercial y que es imposible que el rendimiento promedio en una región o nación alcance el rendimiento potencial o potencial en seco por dos razones: (1) el 100% de los agricultores no llega a lograr el óptimo manejo del cultivo y del suelo requerido para alcanzar el rendimiento potencial, y (2) a medida que el rendimiento se acerca al techo, la respuesta del cultivo a los insumos adicionales muestra un rendimiento marginal decreciente, lo que disminuye el margen costo-beneficio de los insumos adicionales y reduce los incentivos para explotar la brecha restante entre los niveles de rendimiento comercial y potencial. En función de esto los rendimientos promedio regionales y nacionales se estabilizarán cuando alcancen 70-90% del rendimiento potencial o del rendimiento potencial en seco.

1.1.5. Brechas de rendimiento

La diferencia entre rendimiento potencial y rendimiento alcanzable en seco representa la brecha de rendimiento mejorable a través de tecnologías que permitan un mejor aprovechamiento del agua (Manlla et al. 2012, Hochman et al. 2012). No obstante, dadas las incertidumbres que rodean al rendimiento alcanzable es más fácil discutir la brecha de rendimiento como la diferencia entre el rendimiento comercial o de chacra y el rendimiento potencial o potencial en seco (Monzón et al. 2016). Por otra parte, también es más apropiado expresar las brechas de rendimiento como porcentaje del rendimiento comercial ya que cuando se discute la seguridad alimentaria, tanto la producción mundial de granos, como los incrementos de rendimiento

estarán directamente relacionados con este parámetro y no con el rendimiento potencial (Fischer et al., 2014).

Para entender las brechas de rendimiento el desafío es identificar entre las numerosas posibles causas que determinan bajos rendimientos, cuáles son las que tienen mayor influencia y si es posible cuantificar los aumentos de rendimiento que se podrían lograr al eliminarlas (Lobell et al., 2009).

1.2. RENDIMIENTO Y BRECHAS EN URUGUAY

El rendimiento comercial de trigo ha tenido un constante aumento, que fue estimado por Ernst (2006) tomando un período desde 1960-2004 en $41\text{kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$

Estudios más recientes indican que la productividad ha crecido desde 1970 a una tasa de $54\text{kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ ($r^2=0,74$), lo que equivale a un progreso del 2,8 % anual, sobre una base de 1938kg ha^{-1} de rendimiento medio. No obstante, lo anterior, en el presente siglo el crecimiento se ha estancado ($12\text{kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$ para el período 2000-2013) y el rendimiento promedio del país ha presentado una alta variabilidad asociada a las diferencias climáticas entre años ($r^2 = 0,02$) (Hoffman et al., 2014).

En cuanto al rendimiento potencial, Diaz y Abadie (1998), citado por Berger et al. (2014) estudiando el período 1974-1990 encontraron crecimientos moderados pero constantes. En La Estanzuela fue donde se observaron menores tasas de crecimiento anual del rendimiento potencial ($78\text{kg ha}^{-1}\text{año}^{-1}$).

Berger et al. (2014) estudiando el período 1992-2014 con datos de los ensayos de la Red Nacional de Evaluación de Cultivares de Trigo (INIA-INASE) menciona un aumento aparente en los rendimientos, ocurrido durante la primera mitad del periodo, que cambió los rendimientos en un rango de $2000\text{-}5000\text{kg ha}^{-1}$ y un posterior estancamiento en un nivel superior entre $3500\text{-}8000\text{kg ha}^{-1}$ hacia el final del período. El avance en el rendimiento

potencial lo atribuye al progreso genético que ha permitido capitalizar mejoras en el manejo del cultivo, principalmente asociadas a la fertilidad de suelos.

El progreso del potencial estimado del 2000 al 2013 trabajando con el tercio de los cultivares superiores en ensayos de la Evaluación de Cultivares de la Estación Experimental Dr. Mario A. Cassinoni (EEMAC) fue de 185 kg ha⁻¹año⁻¹ (equivalente a una ganancia de 2,7 % anual). El rendimiento promedio de los testigos, para todo el período sin considerar a los años 2001 y 2002 (donde las condiciones de exceso de precipitaciones y fusarium afectaron severamente el rendimiento), fue de 5174 kg ha⁻¹, con un mínimo de 3474 kg ha⁻¹ y un máximo de 6225 kg ha⁻¹. La evaluación en el año 2013 arrojó una ventaja relativa de 31 % con relación a los testigos de largo plazo, equivalente a un progreso genético de 2,4 % anual (Hoffman et al., 2014).

El Proyecto Global Yield Gap and Water Productivity Atlas (GYGA-www.yieldgap.org) que mapea rendimiento y brechas a nivel global, ha estimado el promedio de rendimiento comercial de Uruguay en 3000 kg ha⁻¹, el rendimiento potencial en secano en 6070 kg ha⁻¹ y el rendimiento potencial en 6750 kg ha⁻¹. Tomando como base estos rendimientos se puede calcular la brecha entre rendimiento potencial en secano y rendimiento comercial en 3070 kg ha⁻¹ y la brecha entre rendimiento potencial y comercial en 3750 kg ha⁻¹.

1.3. ECOFISIOLOGÍA PARA MEJORAR EL RENDIMIENTO

1.3.1. Etapas del ciclo del cultivo

El rendimiento en grano de un cultivo de trigo puede expresarse como el producto entre dos componentes: el número de granos por unidad de superficie y el peso por grano. El número de granos m⁻² se define alrededor de anthesis (floración) y el peso de mil granos, al finalizar el período de llenado. Entonces, desde el punto de vista de la generación del rendimiento, diferentes autores dividen el ciclo del cultivo de trigo en tres etapas o períodos:

1. Período de generación del área foliar (desarrollo vegetativo): Comienza con la emergencia del cultivo y termina con la aparición de las espigas, abarcando el macollaje y la mitad de la encañazón. Durante esta etapa, el fenómeno más importante es la expansión del área foliar del cultivo y al final de la misma el cultivo generalmente tiene suficiente área foliar como para cerrar totalmente el surco e interceptar más del 90 % de la radiación solar disponible (Abbate, 2004). El área foliar suele aumentar hasta 10-15 días antes de antesis y la duración de esta etapa es mayor en los cultivares de ciclo largo que en los cortos.

2. Período de crecimiento de las espigas o período crítico: En nuestras latitudes esta etapa comienza cuando las espigas empiezan a crecer (cuando tienen solo el 5% de su peso final) unos 20-25 días antes de antesis, coincidiendo con mediados de encañazón, con la diferenciación del segundo nudo en el vástago principal y con la expansión de la ante última hoja. La etapa se extiende hasta una semana después de antesis. En este estado queda definido el número de granos m^{-2} . La información existente indica que hasta una semana después de antesis, el ambiente puede modificar el número de granos y los granos fijados en este período alcanzarán la madurez con un peso de mil que dependerá de las condiciones de la etapa siguiente. El período de crecimiento de las espigas dura 27-32 días dependiendo de las condiciones ambientales, con poca variación entre cultivares. Los factores que más influyen sobre la duración de este período son los factores que modifican el desarrollo, principalmente la temperatura y el fotoperíodo.

3. Período de llenado de los granos: Comienza pocos días después de antesis y finaliza con la madurez del grano, quedando así determinado el peso de mil granos y el rendimiento (Abbate, 2004).

1.3.2. Componentes de rendimiento

El rendimiento de trigo está determinado por el número de plantas (Npl), el número de macollos por planta, el número de espigas ($NEpl^{-1}$), el peso

seco de las espigas, el número de espiguillas por espigas, el número de granos por espiga (NGE) y el peso del grano. Puede ser analizado a través del modelo que desglosa al rendimiento en sus componentes numéricos:

$$\text{Rendimiento (g m}^{-2}\text{)} = \text{NG (\# m}^{-2}\text{)} \times \text{peso de los granos (g) y}$$

$$\text{NG (\# m}^{-2}\text{)} = \text{Npl (m}^{-2}\text{)} \times \text{NE pl}^{-1} \times \text{NGE}$$

Alternativamente, la generación de rendimiento puede ser analizada a través de un modelo ligado al crecimiento del cultivo durante todo su ciclo o particionado por sub-fases de interés (ej. pre vs. post floración), en el cual la biomasa generada es función de la radiación fotosintéticamente activa interceptada (RFAi) acumulada y de la eficiencia de uso de la radiación (EUR), donde el producto de la biomasa generada por el índice de cosecha (IC) define finalmente el rendimiento del cultivo (Alzueta 2008, Slafer 2007).

$$\text{Rendimiento (g m}^{-2}\text{)} = \text{Biomasa total (g m}^{-2}\text{)} \times \text{IC y}$$

$$\text{Biomasa (g m}^{-2}\text{)} = \text{RFAi (MJ m}^{-2}\text{)} \times \text{EUR (gMS MJ}^{-1}\text{)}$$

El mejoramiento genético del rendimiento en trigo ha estado fuertemente asociado con incrementos en el número de granos por unidad de área (NG) e índice de cosecha (IC) (Shearman et al., 2005), considerado este último, como la proporción de la biomasa total que representa el grano cosechado. Los incrementos en el IC fueron debidos a reducciones en la altura de planta, lo cual modificó la biomasa producida y por consiguiente su distribución hacia los órganos reproductivos incrementando el NG (Valdés et al, 2017).

El número de granos es considerado por numerosos autores como el componente más importante en la formación de rendimiento (Fischer 1993, Sayre et al.1996, González et al. 2003, Abbate et al. 1995).

Este parámetro es determinado durante la etapa de crecimiento de la espiga y la fecundación y fijación de las flores (período crítico). También existe

una buena relación entre el número de granos por m^{-2} y el peso de espiga por m^{-2} en el momento de la floración. El crecimiento de la espiga depende de la tasa de crecimiento de la planta, y la partición de los carbohidratos entre los órganos en crecimiento dentro de la misma fase. El órgano que ejerce la principal competencia a la espiga es el tallo, aunque la competencia también proviene de la acumulación de carbohidratos, probablemente como reservas para asegurar un buen llenado de grano en caso de presentarse condiciones adversas (Wall 1997, Miralles 2004, Salinas 2015).

El peso seco de las espigas m^{-2} se puede analizar como el producto entre su tasa de crecimiento (acumulación de materia seca por unidad de superficie y por día) y la duración en días de esta etapa, que a su vez está determinada principalmente por la temperatura, y dura alrededor de 350 grados $día^{-1}$ (Abbate, 2004). La tasa de crecimiento de las espigas está asociada con la tasa de crecimiento del cultivo. Cuanto más crece el cultivo durante el período de crecimiento de las espigas, más van a crecer las espigas y mayor será el número de granos.

El enfoque sobre la determinación del rendimiento, propuesto por Fischer, citado por Abbate et al. (1998) para condiciones potenciales (sin limitaciones de agua ni nutrientes), se apoya en la idea de que el suministro de hidratos de carbono generados por medio de la fotosíntesis (fotoasimilados) a las flores diferenciadas determina su supervivencia, y en consecuencia el número de granos m^{-2} .

Sin limitantes hídricas ni nutricionales, la tasa de crecimiento del cultivo se relaciona directamente con la cantidad de radiación que intercepte. Entonces, para que el cultivo alcance la tasa de crecimiento potencial, debe tener suficiente área foliar como para captar toda la radiación solar que le llega. Para alcanzar el rendimiento potencial, el suelo debe estar totalmente cubierto de material verde, cuando están creciendo las espigas (canopeo totalmente cerrado o "full canopy closure").

Sinclair y Jamieson (2006) refutan la idea de que el número de granos sea el componente clave en el rendimiento, y postulan que tanto el número de granos, como el rendimiento están restringidos por la habilidad del cultivo de acumular recursos, especialmente nitrógeno. La determinación del número de granos (frecuentemente identificada con capacidad de fosa) está asociada con las condiciones del cultivo: tipo de siembra, tamaño y área de hojas, contenido de nitrógeno (generalmente asociados con la capacidad de fuente) que permitirán que el grano crezca. Estos autores afirman que la causa de la alta correlación que generalmente se encuentra entre el número de granos y el rendimiento se debe a que ambas variables están determinadas por los mismos factores, y no a que una variable sea causante de la otra.

1.3.3. Factores determinantes del rendimiento

La expresión de los componentes de rendimiento de un cultivo de trigo depende de su constitución genética, pero además de las limitaciones impuestas por las condiciones ambientales (clima) y por las condiciones de manejo.

1.3.3.1. Factores ambientales

La duración de las distintas etapas ontogénicas, y el desarrollo del cultivo de trigo está regulado por varios factores ambientales determinantes: el fotoperiodo (o duración del día), la temperatura, la radiación, la vernalización (requerimientos de horas de frío) y la disponibilidad de agua de lluvia (Miralles, 2004).

Se ha determinado un período crítico en la definición del rendimiento que comprende desde los 20 días previos a la antesis hasta los 10 días posteriores a la misma (Fischer 2015, Fischer 1985).

En el trigo, las condiciones ambientales durante esta etapa son claves, ya que afectan de forma directa al rendimiento final, teniendo especial

incidencia sobre el número de granos y en menor medida sobre el peso de los mismos (Salinas, 2015).

El incremento en el fotoperiodo actúa acelerando el desarrollo y produciendo un acortamiento de las fases ontogénicas (Salinas, 2015). En cultivares sensibles, con fotoperiodos más largos el período de crecimiento de la espiga se acorta, dando lugar a una reducción del número de granos.

Una fecha de floración tardía origina un período de crecimiento de las espigas más corto, ya que se somete al cultivo a condiciones de mayor temperatura y mayor fotoperiodo, y en consecuencia el rendimiento potencial disminuye.

La radiación incrementa la tasa de crecimiento del cultivo, de manera que mientras más radiación (energía) intercepte el cultivo, mayor acumulación de materia seca y rendimiento (Salinas, 2015).

La temperatura es un factor que afecta la duración de todas las etapas ontogénicas del cultivo desde la emergencia hasta la madurez fisiológica. Impacta de diferentes maneras, con incrementos de la misma se acelera el desarrollo y se produce un acortamiento de las fases ontogénicas. Además, los registros extremos (mínimas y máximas) tienen distintos impactos según el momento del ciclo en que ocurran (Salinas, 2015).

Durante el ciclo vegetativo, temperaturas más cálidas promueven una floración más temprana comparada con la ocurrencia de temperaturas frescas para el mismo periodo (Miralles, 2004).

Durante la espigazón y el llenado de granos las temperaturas elevadas afectan la tasa de desarrollo y como consecuencia reducen la duración de estas etapas, impactando en la diferenciación del número de granos y por lo tanto disminuyendo el rendimiento (Salinas, 2015). También pueden acortar el período de llenado y deprimir el peso potencial de los granos (peso que alcanza un grano sin la competencia de los otros) (Abbate, 2004).

Las temperaturas bajas y la radiación solar alta durante la segunda etapa del cultivo favorecen el desarrollo de un mayor número de granos (Abbate, 2004). Los mayores rendimientos observados en las épocas tempranas se deben a una mayor duración de los estadios tempranos del desarrollo de la espiga, fundamentales en la determinación del número de espiguillas por espiga, los que tienen gran importancia como determinantes del rendimiento (D'Amico et al. citado por Laclaú y Rodríguez, 2012).

Sin embargo, temperaturas muy bajas pueden afectar negativamente el rendimiento, por daño directo sobre las estructuras del cultivo. En trigo, el umbral de tolerancia a temperaturas bajas en el estado de encañazón es de -4 °C y en el estado de espiga embuchada de -2 °C, durante un periodo no mayor a 2 horas. Mientras más avanzado se encuentre la etapa reproductiva, mayor será el efecto negativo sobre el rendimiento (Salinas, 2015).

El cociente fototermal (Q) representa la relación existente entre la radiación efectiva diaria en superficie y la temperatura media diaria, y es una medida del potencial de crecimiento por unidad de tiempo térmico de desarrollo. En el período crítico es el índice que relaciona el efecto positivo de la radiación con el efecto negativo de la temperatura sobre la tasa de crecimiento y la definición del número de granos (Fischer, 1985).

$$Q = R / (T_{med} - T_b)$$

Donde: R= radiación (MJ/m²/día), T_{med} = temperatura media durante el período crítico (°C), T_b = temperatura base para el desarrollo de 4,5 °C.

En general la fecha de espigazón óptima se produce cuando en antesis se combinan bajos riesgos de heladas y alto coeficiente fototermal, ya que de esta manera se producen grandes cantidades de biomasa, que maximizan la interceptación de la radiación, aumentando el número de grano por unidad de superficie (Gómez et al., 2013). Para las condiciones de Uruguay esta fecha se ubica entre el 25 de septiembre y el 20 de octubre (Hoffman et al., 2003).

No es recomendable anticipar el periodo crítico con valores mayores de Q, por el riesgo de heladas (Salinas, 2015).

La disponibilidad de agua puede afectar el rendimiento en cualquiera de las tres etapas del cultivo. Las limitantes hídricas pueden reducir la interceptación de la radiación solar por una menor exposición del área foliar o por muerte de hojas. Las reducciones tempranas del área foliar no producen caídas de rendimiento, si pasado el período de estrés, el cultivo alcanza suficiente área foliar como para interceptar la radiación disponible durante el período de crecimiento de las espigas. Por el contrario, si el cultivo no logra un nivel adecuado de área foliar el rendimiento se verá afectado, incluso aunque se restablezca la disponibilidad de agua posteriormente.

Una deficiencia hídrica también determina una menor eficiencia de uso de la radiación interceptada, lo que contribuye a reducir el número de granos m^{-2} cuando el estrés se produce durante el período de crecimiento de las espigas. Existen además otros efectos del estrés hídrico que reducen el número de granos, independientemente de la disminución del peso de las espigas. Estos efectos operan afectando la supervivencia de las flores formadas (Abbate y Cantarero, 2001).

El déficit hídrico durante el llenado del grano reduce el crecimiento del cultivo en esta etapa y en consecuencia puede afectar el peso de mil granos. Las sequías durante el llenado son frecuentes fundamentalmente en siembras tardías. En general, están acompañadas de altas temperaturas, confundiendo los efectos. Sin embargo, la etapa de llenado no suele ser la más crítica para la determinación del rendimiento de trigo por lo mencionado en las secciones anteriores. La sequía puede afectar el rendimiento a través del peso de mil granos sólo si el número de granos a llenar es alto, es decir en condiciones de muy alto rendimiento (Abbate, 2004).

1.3.3.2. Factores de manejo

Los principales factores de manejo que afectan el rendimiento son la disponibilidad de nitrógeno, la época de siembra y la densidad de siembra.

El principal efecto de una deficiencia de nitrógeno es que no se genera suficiente área foliar como para captar toda la radiación disponible, disminuyendo la eficiencia de uso de la radiación (como consecuencia, la tasa de crecimiento del cultivo por unidad de radiación interceptada se reduce).

Cuando la deficiencia de nitrógeno ocurre en el período crítico el peso seco de las espigas se reduce como consecuencia de que el crecimiento de las espigas tiende a reducirse por adelanto de la fecha de antesis, y se reduce la fertilidad de las espigas, por lo que para un peso de espiga dado la cantidad de granos logrados es menor (Abbate et al., 1995).

Por otra parte, la deficiencia de nitrógeno no solo afecta la eficiencia de uso de la radiación, sino también la utilización de otros nutrientes y recursos (i.e. agua disponible y radiación interceptada).

Sin limitaciones de nutrientes ni de agua, por cada 1 % de pérdida en la radiación interceptada durante el período de crecimiento de las espigas, el número de granos m^{-2} cae aproximadamente 0,7 %, mientras que, en presencia de deficiencias de nitrógeno durante el período de crecimiento de las espigas, la caída alcanzará aproximadamente 1,6 % (Abbate et al., 1995).

Si la deficiencia de nitrógeno afecta solamente las etapas tempranas del cultivo, el efecto sobre el número de granos es semejante en magnitud al de reducir la radiación incidente.

Desde el punto de vista del cultivo, lo importante de la fertilización nitrogenada es lograr que la disponibilidad de nitrógeno no limite el crecimiento durante la etapa de crecimiento de la espiga. El cultivo puede tolerar una deficiencia de nitrógeno temprana si se satisface ese objetivo (Chá y Durán, 2001).

La variación de la época de siembra en trigo determina cambios sustanciales en el ambiente que explorará el cultivo lo cual modifica la duración de los eventos fenológicos y la capacidad de captura de radiación, determinando la producción de biomasa y consecuentemente el rendimiento de grano (Otegui y López citados por Fernández et al. 2008, Hoffman et al., 2003).

Las medidas de manejo en situaciones de secano e incluso bajo riego suplementario, comienzan por elegir una fecha de siembra óptima, como principal estrategia que permita asegurar que el periodo crítico del cultivo, donde se define el rendimiento, transcurra con condiciones ambientales favorables de radiación, temperatura, fotoperiodo y precipitaciones. Si el resto de las prácticas de manejo son correctas (selección de cultivares, estrategias de fertilización y manejo integrado de plagas, etc.) con seguridad se podrán obtener los mayores rendimientos posibles de lograr para el ambiente de ese año (Hoffman y Castro 2012, Hernández et al. 2015).

Aunque el trigo tiene tolerancia a heladas, si estas ocurren durante la floración pueden llegar a generar pérdidas totales dependiendo de su intensidad y duración. Por este motivo, para definir una fecha de siembra óptima, también hay que tener en cuenta que la probabilidad de riesgo de helada en floración debe ser menor al 10 % (Hoffman y Castro 2012).

La densidad óptima va a ser aquella que permita que, al inicio del período de crecimiento de las espigas, el cultivo logre la cobertura total del suelo, e intercepte toda la radiación solar incidente. Esa área foliar se deberá generar en la etapa previa al período crítico. Cuanto más corta sea la etapa de generación de área foliar, mayor será la densidad óptima. Un cultivo tendrá menos tiempo para generar área foliar si su ciclo es corto, la temperatura es cálida o los días son largos. Entonces, la capacidad de generar área foliar depende en gran medida del ciclo del cultivar y de la fecha de siembra. Con cultivares de ciclo largo y fechas de siembra tempranas se alarga la etapa de

macollaje, permitiendo utilizar menores densidades de siembra. La meta por cumplir es que el cultivo cierre el surco cuando empiezan a crecer las espigas, este es un buen indicador de que la densidad de siembra es correcta. No es bueno que esto ocurra con mucha anticipación para evitar un consumo de agua innecesarios o problemas de vuelco.

Estableciendo la fecha de floración óptima y sabiendo cual es el largo del ciclo, se puede definir la fecha de siembra óptima de cada cultivar. En general, al retrasar la fecha de antesis el rendimiento potencial cae, la probabilidad de déficit hídrico aumenta y la eficiencia de uso del agua disminuye (Abbate et al., 2002). Entonces, la fecha de floración óptima será la más temprana posible con bajo riesgo de heladas. Esto es válido independientemente del ciclo del cultivar (Abbate, 2004).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizó una extensa revisión de información publicada y sin publicar de experimentos realizados por técnicos del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA- La Estanzuela) en el período 1996-2018:

- Experimentos de la Evaluación Nacional de Cultivares de Trigo INASE-INIA (1996-2018)
- Experimentos Elite y Final del Programa de Mejoramiento Genético de Trigo de INIA (PMGT) (2013-2017)
- Experimentos de progreso genético del PMGT (2013-2014)

Se generó una base de datos que reunió información de comportamiento para 13.378 casos provenientes de cultivares de ciclo intermedio y largo, en 6 localidades (La Estanzuela, Young, Dolores, Paysandú y dos localidades de Mercedes).

La información recogida de los ensayos incluyó: rendimiento, ciclo, localidad, presencia o ausencia de fungicida, época de siembra, fertilización, fechas de siembra, emergencia, espigazón, floración, madurez fisiológica y cosecha. En base a las fechas se calcularon los períodos de siembra-emergencia (SI-EM), emergencia-espigazón (EM-ES), floración -20 + 10 días (FL -20+10) y espigazón-madurez fisiológica (ES-MF) para cada parcela experimental individualmente. Para la localidad La Estanzuela a estos períodos se le ajustaron las variables climáticas: temperatura, radiación y lluvia, y se calculó el coeficiente fototermal (Q) según Fischer, (1993).

Para determinar si existieron cambios en el rendimiento y en su variabilidad, se realizaron regresiones rendimiento-año, del rendimiento experimental utilizando la base de datos completa y del rendimiento comercial utilizando datos de la Dirección de Estadísticas Agropecuarias del Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca, que se obtienen anualmente en base a encuestas a productores.

Por otra parte, se analizaron los datos utilizando meta-análisis y meta-regresión. El Meta-análisis (MA), abarca una serie de métodos estadísticos que pueden aplicarse a un conjunto de datos, que han sido recopilados de trabajos independientes entorno a un objeto de estudio y permite reportar valores de media y desvío estándar para el efecto del tratamiento y usar procedimientos análogos al análisis de varianza y regresión (Borenstein et al. 2009, Miguez et al. 2013, Pittelkow et al. 2015, Bruno et al. 2016, Buttarelli et al. 2019).

Se realizaron dos meta-análisis por ciclo. El primero comparó el rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares por experimento, con el rendimiento promedio de los testigos utilizados en la Evaluación Nacional de Cultivares de Trigo (ENCT) INIA-INASE, por año y por localidad, agrupando los datos según presencia o ausencia de tratamiento sanitario.

El experimento de la ENCT generalmente tiene dos testigos comerciales por año (representativos de lo que se está sembrando a nivel comercial), más un testigo de ciclo largo y un testigo de ciclo corto. Como testigo de ciclo largo se utiliza una variedad única (INIA Tijereta). Para esta comparación se utilizaron los testigos comerciales más el testigo del ciclo del experimento.

El segundo meta-análisis comparó el rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares con el rendimiento promedio del testigo de ciclo largo (INIA Tijereta) por año y por localidad, agrupando de igual forma, por presencia o ausencia de funguicida.

Para identificar factores que explican los cambios de rendimientos, y así poder determinar cuáles tuvieron más incidencia, se realizó una meta-regresión del rendimiento en la localidad La Estanzuela con las siguientes covariables: fungicida (con/sin), época de siembra, año, fertilización (dosis total), temperatura promedio a la siembra (-5+10 días), lluvia promedio a la siembra (-5+10 días), Q promedio periodo EM – FL, Q promedio periodo

floración -20+10 días, Q promedio FL – MF, radiación promedio periodo EM – FL, radiación promedio periodo floración -20+10días, radiación periodo FL – MF, radiación acumulada EM – FL, radiación acumulada FL -MF, temperatura promedio periodo floración -20+10días, lluvia acumulada periodo EM – FL, lluvia acumulada floración -20+10días y lluvia acumulada periodo FL – MF.

Tanto para los meta-análisis como para la meta-regresión se utilizó el rendimiento en Kg ha⁻¹ como el tamaño de efecto a ser analizado, y el desvío estándar como medida de variabilidad. Los experimentos se identificaron por la combinación de la localidad y el año en que fueron realizados. Los datos de rendimiento medio se agruparon por presencia o ausencia de fungicida, debido a que los experimentos de la Evaluación Nacional de Cultivares de Trigo (ENCT) tienen el objetivo de analizar el comportamiento sanitario de las variedades, por lo que se realizan sin presencia de fungicida. A partir del año 2010 se comenzaron a incluir además ensayos con fungicida.

Se utilizó un modelo de efectos aleatorios debido a la necesidad de considerar la presencia de fuentes de heterogeneidad entre los ensayos. Al utilizar el modelo de efectos aleatorios, asumimos que el tamaño real del efecto pueda variar de un experimento a otro y, por lo tanto, el objetivo fue estimar la media de estos parámetros.

Para realizar la prueba de significancia se utilizó la distribución Z porque en todos los casos se trabajó con más de 30 experimentos y por lo tanto las diferencias entre usar la distribución t y Z son menores.

Para estimar el valor de tau cuadrado (τ^2), la verdadera varianza entre estudios, se utilizó el método de momentos (también conocido como Método de Der Simonian y Laird). Este método no depende de ningún supuesto sobre la distribución de los efectos aleatorios, por lo que resulta más robusto que los métodos de Máxima Verosimilitud (ML) o Máxima Verosimilitud Restringida (REML), que sí dependen del supuesto de que los efectos aleatorios tienen una distribución normal (Borenstein et al., 2009).

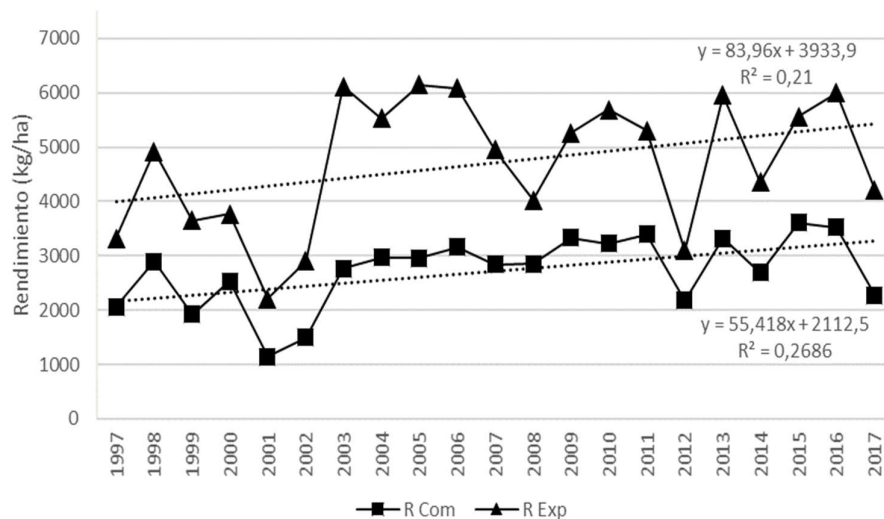
El análisis estadístico se realizó con Infostat (Di Rienzo et al., 2015) y Comprehensive Meta-Analysis Versión 3, de prueba (Borenstein et al., 2013).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. RENDIMIENTO EXPERIMENTAL MEDIO

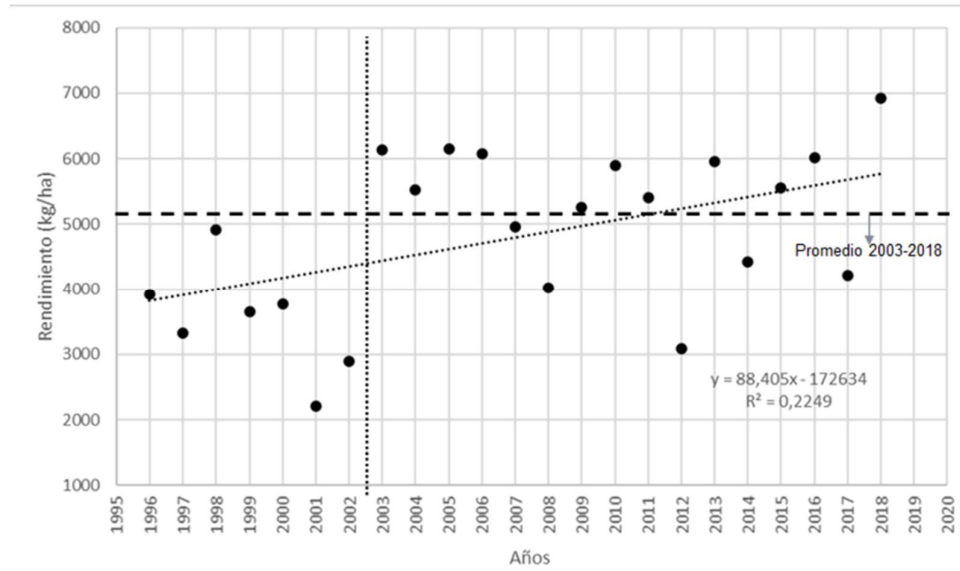
El rendimiento experimental promedio de trigo ha crecido significativamente ($p \leq 0,030$) con una relación positiva de baja magnitud, a un ritmo de $84 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ y una variación interanual importante ($r^2=0.21$) (Figura 1) que equivale a un 1,8 % sobre un promedio de 4717 kg ha^{-1} de rendimiento medio.

Figura 1. Rendimiento comercial (cuadrados) y experimental (Triángulos) de trigo en el período 1997-2017.



Si analizamos el rendimiento promedio de los experimentos vemos que podrían diferenciarse dos períodos: uno anterior al 2003 donde los rendimientos promedio no superaban los 5000 kg ha^{-1} y otro posterior donde en la mayoría de los años se supera este rendimiento, pero con un estancamiento en la producción alrededor de los 6000 kg ha^{-1} (Figura 2).

Figura 2. Rendimiento promedio experimental de trigo en el período 1997-2017.



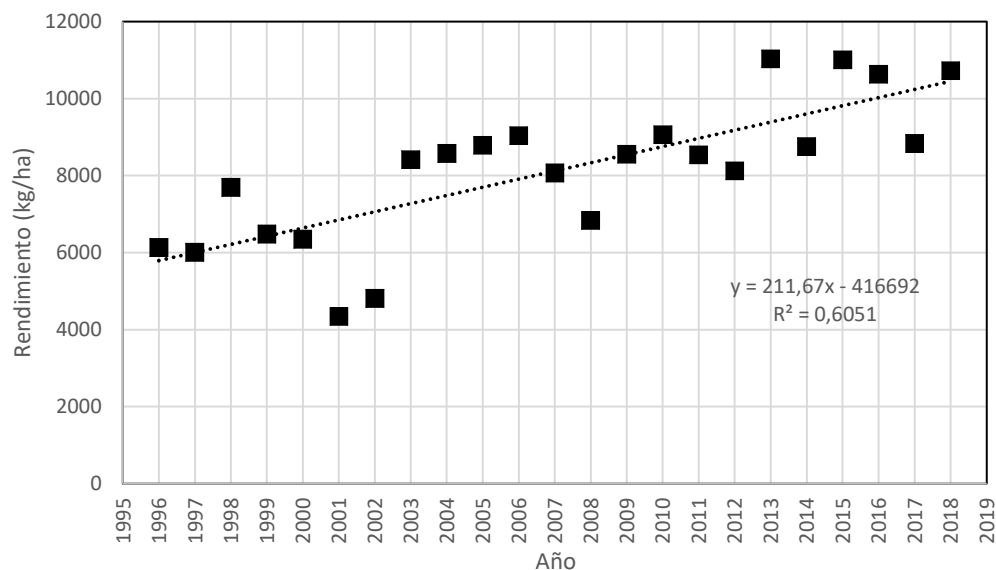
La principal explicación para este posible salto de rendimiento en 2003 podría ser el recambio varietal que se produjo luego de dos años muy difíciles por la incidencia de *Fusarium* spp. En estos años (2001 y 2002), las condiciones climáticas durante la etapa de espigazón y llenado de grano fueron un factor decisivo para la ocurrencia de las epidemias, pero también hubieron otros factores que contribuyeron a la escala del problema, como que no habían cultivares con resistencia efectiva a la enfermedad y que los sistemas de producción habían tenido un incremento muy importante del área de siembra directa, que favorece un mayor volumen de rastrojo, creando un ambiente propicio para la esporulación y reservorio del hongo. Ante esta situación, hubo que cambiar hacia variedades de mejor comportamiento, provenientes de algunas líneas que se venían trabajando a nivel nacional o materiales que fueron introducidos principalmente de Argentina (Marina Castro, comunicación personal, 6 de julio, 2019).

Lo Valvo et al., citado por Abeledo et al. (2018) estudiando el período 1918-2011 en Argentina, determinaron que la evolución del rendimiento experimental también presentó fases bien definidas: (i) una primer fase en la que la tasa de aumento de rendimiento fue muy baja (0,02 % año⁻¹), (ii) una segunda fase con aumento lineal y positivo del rendimiento (1,17 % año⁻¹), y (iii) una tercer y última fase con nuevamente baja tasa de aumento de rendimiento (0,18 % año⁻¹).

3.2. RENDIMIENTO EXPERIMENTAL DE LOS CULTIVARES SUPERIORES

El rendimiento experimental de los 5 mejores cultivares por experimento creció significativamente ($p \leq 0,0001$) y con una menor variación interanual ($r^2 = 0.6$), a razón de 212 kg ha⁻¹año⁻¹, equivalente a un 2,7 % por año sobre una base de 7898 kg ha⁻¹ de rendimiento medio, (Figura 3).

Figura 3. Rendimiento de los 5 mejores cultivares por año.



Estos resultados confirman la tendencia encontrada por Berger et al. (2015), quienes analizaron el período 1992-2014 y mencionan que el aumento de los rendimientos fue desde un rango de 2000-5000 kg ha^{-1} a inicios del periodo, a un rango entre 3500 y 8500 kg ha^{-1} al final, siendo el ingreso de nuevos cultivares con mayor potencial de rendimiento, el factor que posiblemente determinó el cambio. Entre ellos se destacan notoriamente aquellos de origen europeo que durante varios años estuvieron en la parte superior del ranking de rendimiento, y sobre el final del periodo, la incorporación de características de alto potencial en líneas locales.

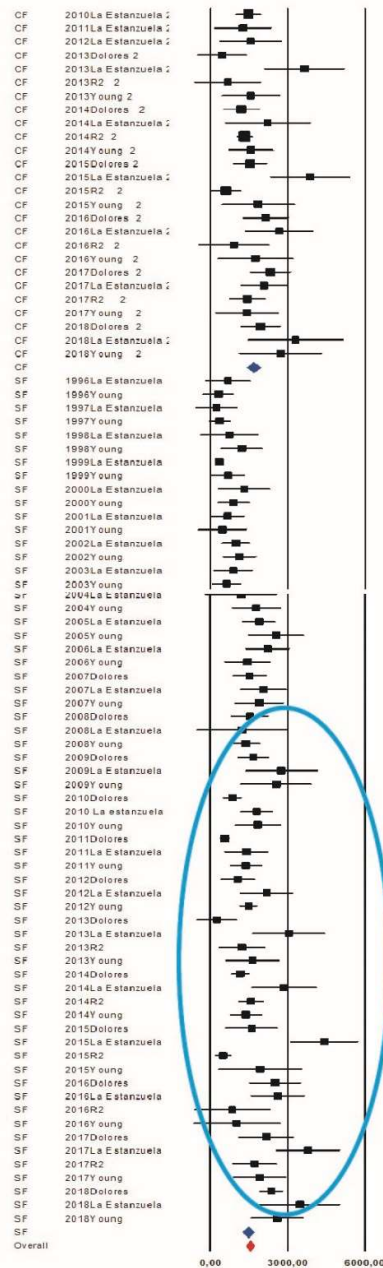
En estudios realizados por Hoffman et al. (2014) se pudo observar un incremento del rendimiento de 185 kg de grano $ha^{-1}año^{-1}$ en el tercil superior de los cultivares evaluados en el Programa de Caracterización de Cultivares de Trigo (PCCT) de la Facultad de Agronomía entre el 2000 y el 2013, lo que equivale a un progreso del 2,7 % anual. En este trabajo se concluye que efectivamente ha existido un progreso en el potencial de los cultivares de elite en ese período, y que se están sembrando a nivel comercial genotipos con creciente potencial. Sin embargo, se menciona que ese creciente potencial no se está reflejando en la evolución de los rendimientos del cultivo a escala nacional y que esto probablemente se deba al deterioro de la productividad en el ambiente que se le está ofreciendo a los nuevos genotipos.

Separando los experimentos por ciclo, año y localidad, la comparación en un meta-análisis de los 5 mejores cultivares con los testigos utilizados en la Evaluación Nacional de Cultivares (ENCT INIA-INASE), agrupando por presencia o ausencia de fungicida, mostró que, en promedio en el período de 20 años, los 5 mejores cultivares de ciclo intermedio rindieron 1527 kg ha^{-1} más que los testigos ($p \leq 0,0001$) (Figura 4). El intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 1368 y uno superior de 1686 kg ha^{-1} . La variabilidad entre años fue muy considerable y se pudo estimar que un 71,5 % de la varianza total corresponde a varianza real, no adjudicable al error experimental.

En los ensayos de ciclo intermedio sin fungicida la diferencia a favor de los 5 mejores fue de 1455 kg ha⁻¹. El intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 1257 y uno superior de 1654 kg ha⁻¹. En los ensayos con fungicida esta diferencia fue de 1657 kg ha⁻¹ y el intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 1368 y uno superior de 1686 kg ha⁻¹.

Los experimentos sin fungicida muestran hacia el final del período un aumento de las diferencias de rendimiento entre zonas (Figura 4). En La Estanzuela se logran aumentos de rendimiento considerables y siempre se han mantenido por encima de las demás zonas. Los rendimientos de Dolores son levemente inferiores, pero siguen la tendencia en aumento de los de La Estanzuela, sin embargo, la zona de Young no logra acompasar los cambios, mostrando aumentos de rendimientos inferiores. Dado que no ha habido cambios de manejo considerable en los experimentos, la evolución más lenta de los rendimientos en Young posiblemente se deba a diferencias en la degradación o capacidad de recuperación de los suelos en esa zona o diferencias en el manejo de la fertilización nitrogenada (que no aumento en los últimos años de la serie como si lo hizo en Dolores).

Figura 4. Diferencia entre el rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de ciclo intermedio (CI) por localidad y año, y el rendimiento promedio de los testigos utilizados en el ensayo de Evaluación Nacional de Cultivares de Trigo (INIA-INASE), agrupando por presencia o ausencia de funguicida.



La diferencia de medias de cada experimento se representa mediante el rectángulo negro de tamaño proporcional al número de cultivares incluidos en el ensayo y la línea horizontal indica el intervalo de confianza al 95%. Las líneas verticales marcan la magnitud de las diferencias. En la medida que el IC toque esta línea, se estará indicando ausencia de diferencias significativas. Los valores de los resultados agregados ya sea por grupo (con o sin fungicida) o generales se muestran con un rombo. El eje horizontal del rombo indica la magnitud del intervalo de confianza, mientras que su eje vertical indica el valor (estimador) que resulta de la combinación de todos los resultados.

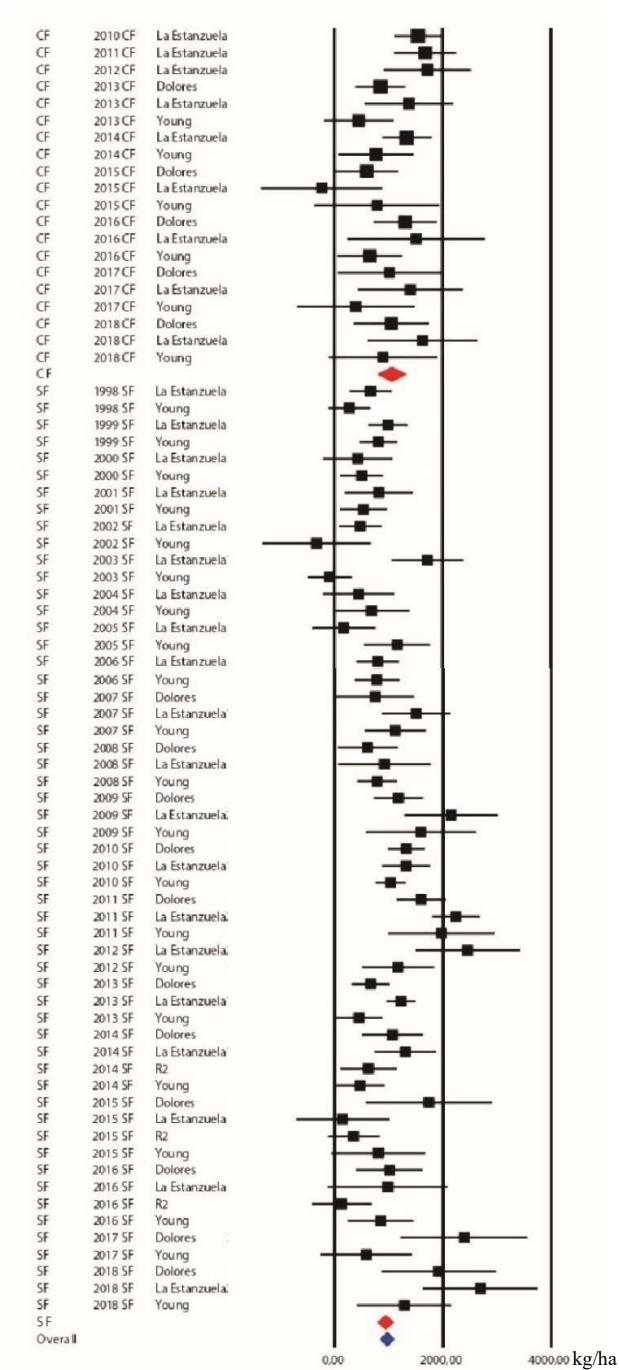
A pesar de la mayor dispersión que se puede observar al final del período en los experimentos sin fungicida, la Figura 4 muestra claramente como se ha producido un corrimiento desde diferencias más cercanas a 0 en el principio del período, hasta diferencias más cercanas a los 3000 kg ha⁻¹ al final.

Al analizar los ensayos de ciclo largo las diferencias de rendimiento con respecto a los testigos fueron menores. El meta-análisis muestra que los 5 mejores cultivares rindieron en promedio 972 kg ha⁻¹ más que los testigos ($p \leq 0,0001$) (Figura 5). El intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 851 y uno superior de 1094 kg ha⁻¹. La variabilidad entre años fue muy considerable y 74,5 % de la varianza total corresponde a varianza real, no adjudicable al error experimental.

En los ensayos de ciclo largo, sin fungicida, la diferencia a favor de los 5 mejores fue de 944 kg ha⁻¹. El intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 805 y uno superior de 1082 kg ha⁻¹. En los ensayos con fungicida esta diferencia fue de 1066 kg ha⁻¹ y el intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 815 y uno superior de 1318 kg ha⁻¹.

Dado que en este caso la comparación se realiza con testigos que van cambiando en el tiempo, las diferencias antes mencionadas nos estarían dando una idea de la evolución del rendimiento potencial del cultivo de trigo en el período.

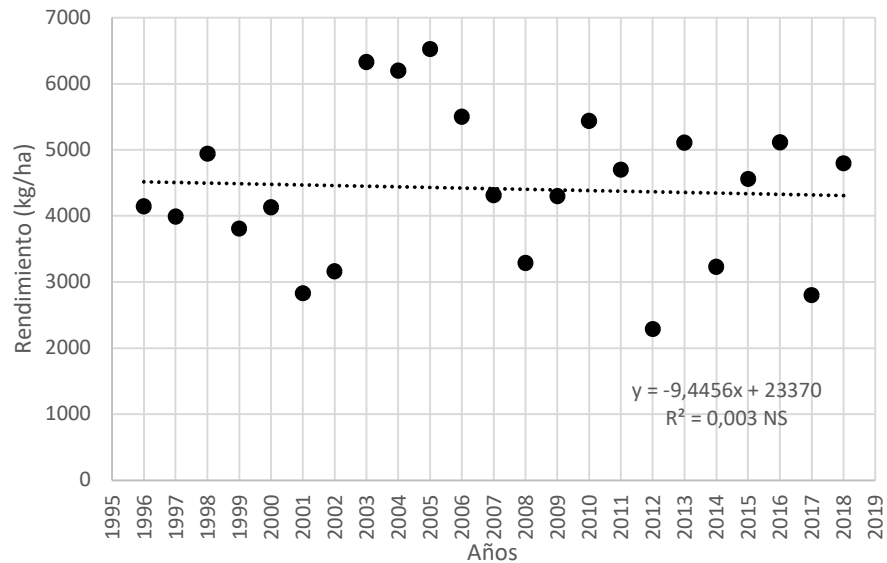
Figura 5. Diferencia entre el rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de ciclo largo (CL) por localidad y año, y el rendimiento promedio de los testigos utilizados en el ensayo de Evaluación Nacional de Cultivares de Trigo (INIA-INASE), agrupando por presencia o ausencia de fungicida.



La diferencia de medias de cada experimento se representa mediante el rectángulo negro de tamaño proporcional al número de cultivares incluidos en el ensayo y la línea horizontal indica el intervalo de confianza al 95%. Las líneas verticales marcan la magnitud de las diferencias. En la medida que el IC toque esta línea, se estará indicando ausencia de diferencias significativas. Los valores de los resultados agregados ya sea por grupo (con o sin fungicida) o generales se muestran con un rombo. El eje horizontal del rombo indica la magnitud del intervalo de confianza, mientras que su eje vertical indica el valor (estimador) que resulta de la combinación de todos los resultados.

Para tener una idea más aproximada del progreso genético se comparó el rendimiento de los 5 mejores cultivares por año y localidad, con un testigo fijo (INIA Tijereta), previa verificación del comportamiento de este testigo en el período. Este material de ciclo largo fue desarrollado localmente, se liberó en 1997, y tuvo una amplia difusión por su rendimiento, estabilidad de producción y gran flexibilidad de época de siembra. Se utilizó comercialmente hasta 2013, permaneciendo como testigo de ciclo largo en los experimentos de ENCT (INIA-INASE) hasta la fecha (Luizzi et al., 2018).

Figura 6. Rendimiento (kg ha^{-1}) de INIA Tijereta en ensayos sin fungicida en el período 1996-2018 en las localidades de La Estanzuela, Dolores y Young.



Tanto en experimentos con y sin fungicida, la regresión del rendimiento de INIA Tijereta en función del paso del tiempo no tuvo ajuste significativo (Figura 6), indicando un comportamiento estable de la variedad que la posiciona como un testigo adecuado para contrastar los rendimientos y así poder determinar el avance genético.

El meta-análisis que compara el rendimiento de los 5 mejores cultivares de ciclo intermedio (CI) con INIA Tijereta indica que en el promedio del período ha habido un progreso genético de 1866 kg ha⁻¹ (Figura 7). El intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 1653 y uno superior de 2079 kg ha⁻¹.

Los cultivares de ciclo intermedio en ensayos sin fungicida (SF), tuvieron una diferencia de rendimiento de 1604 kg ha⁻¹ con respecto a INIA Tijereta. El intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 1364 y uno superior de 1845 kg ha⁻¹. Los ensayos con fungicida (CF) tuvieron una diferencia de 2821 kg ha⁻¹ (Figura 7) y el intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 2361 y uno superior de 3281 kg ha⁻¹. La presencia del fungicida permite una mejor expresión del potencial de los cultivares y por tanto brinda una idea más aproximada del progreso genético que en el caso de los ciclos intermedios es bastante considerable especialmente si tomamos en cuenta que estamos manejando promedios y por tanto existen cultivares que superan ampliamente este valor de diferencia.

En la figura 7 en la parte correspondiente al grupo sin fungicida nuevamente se puede apreciar el corrimiento desde diferencias cercanas a 0 kg ha⁻¹ en el comienzo del período, a diferencias que se acercan o sobrepasan los 3000 kg ha⁻¹ hacia el final, lo que indica un considerable progreso genético para los ciclos intermedios.

Si bien las diferencias de los 5 mejores cultivares con INIA Tijereta son muy considerables, hay que hacer una salvedad, y es que se está comparando materiales de ciclo intermedio con un material de ciclo largo, y estos no necesariamente responden de igual forma a las variaciones

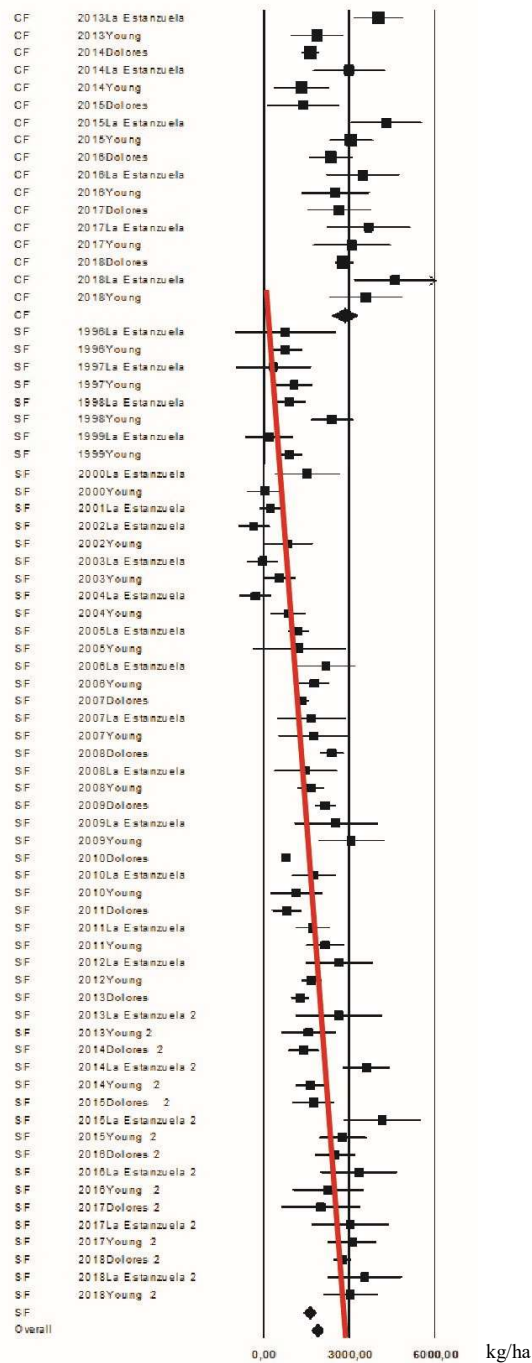
interanuales de oferta ambiental. Independientemente de esto, tener un material fijo en todos los experimentos resulta un muy buen punto de referencia y a los efectos prácticos consideramos que esta sobreestimación o subestimación resulta de menor importancia.

En el caso de los cultivares de ciclo largo (CL), el progreso genético en el promedio del período fue de 1230 kg ha⁻¹ (Figura 8). El intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 1059 y uno superior de 1402 kg ha⁻¹.

Los 5 mejores cultivares de ciclo largo en ensayos sin fungicida rindieron 1060 kg ha⁻¹ más que INIA Tijereta y el intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 834 y uno superior de 1286 kg ha⁻¹. Los cultivares en ensayos con fungicida rindieron en promedio 1463 kg ha⁻¹ más (Figura 8). El intervalo de confianza tuvo un límite inferior de 1199 y uno superior de 1726 kg ha⁻¹.

La diferencia de los ciclos intermedios con INIA Tijereta es mayor que la diferencia de los ciclos largos con INIA Tijereta, y la evolución de las diferencias hacia los 2500 y 3000 kg son más claras en los ciclos intermedios y más errática en los ciclos largos. Esto posiblemente se deba a que los ciclos largos son en su mayoría materiales de origen regional (principalmente nacional, o de Argentina) y por lo tanto más adaptados y estables en su comportamiento. En cambio, en los ciclos intermedios se han incorporado variedades de origen europeo que presentan muy altos rendimientos, pero pueden ser más sensibles a los eventos climáticos problemáticos.

Figura 7. Diferencia entre el rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de ciclo intermedio (CI) por localidad y año, y el rendimiento promedio de INIA Tijereta, agrupando por presencia o ausencia de fungicida.



Quincke y Kohli (2003) estimaron el progreso genético del Programa de Mejoramiento de Trigo de INIA en el período 1981-2001, con un experimento específicamente diseñado, con materiales de ciclo largo. Los resultados mostraron un avance genético de $90 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ equivalente a 2,9 % anual y $72 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ equivalente a 2,7 % anual, con y sin fungicida respectivamente, y en condiciones de alta fertilidad.

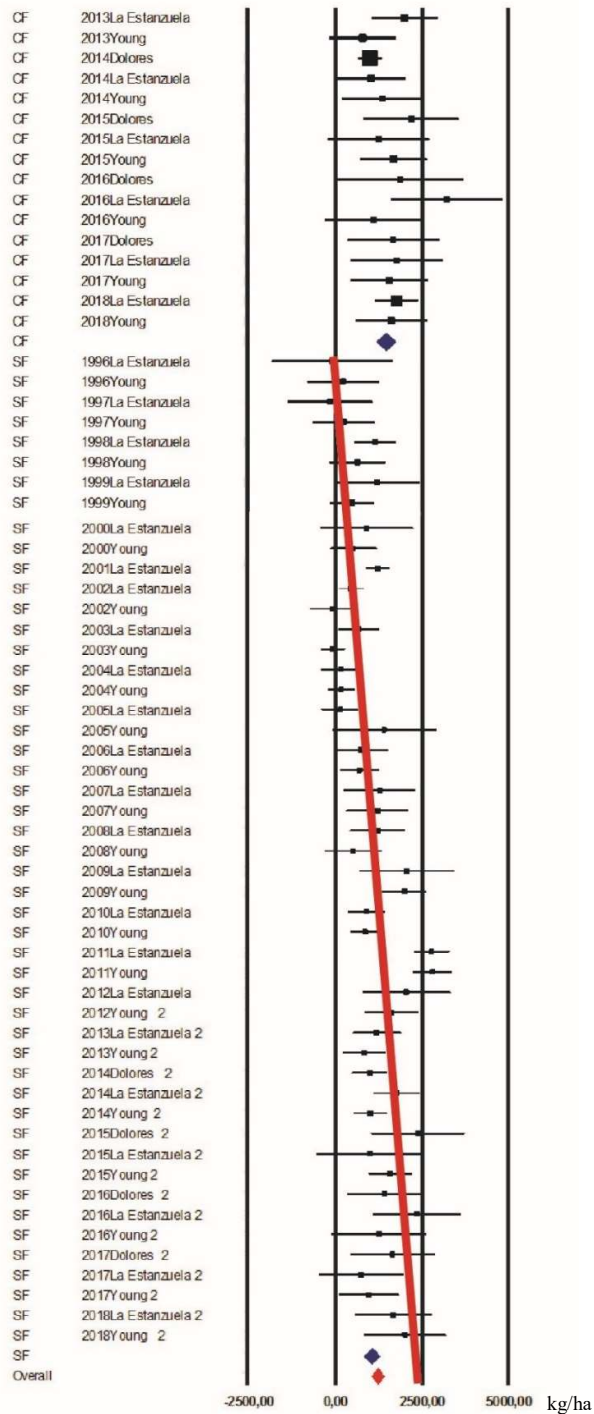
Hoffman et al. (2014) estudiaron el desempeño (sin discriminación por ciclo) de los cultivares del grupo de elite del Programa de Caracterización de Cultivares de Trigo (PPCT) de la Facultad de Agronomía, en el año 2013. Estos cultivares con control de enfermedades y ajuste de población óptima, tuvieron un rendimiento 2800 kg ha^{-1} superior a los testigos sin control de enfermedades ni ajuste de población ($8042 \text{ vs. } 5274$; 52 % superior). Para las condiciones del trabajo, esa diferencia representa el efecto conjunto del mejoramiento genético, el manejo y la explotación de la interacción genotipo x ambiente por la vía del ajuste del manejo al genotipo. El efecto de la renovación varietal, que da una idea del progreso genético en este grupo de elite, sin considerar sanidad ni ajuste de población fue de 33 % y con control sanitario fue de 22 %.

A nivel regional, en Argentina Lo Valvo et al. citado por Abeledo et al. (2018) estudiando el período 1918-2011 determinaron que la evolución del rendimiento a causa del mejoramiento genético presentó tres fases: (i) una primer fase (1918-1940) en la que la tasa de aumento de rendimiento fue muy baja ($0,8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; $0,02 \text{ \% año}^{-1}$), (ii) una segunda fase (1940-1999) con aumento lineal y positivo del rendimiento ($51 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; $1,17 \text{ \% año}^{-1}$), y (iii) una tercer y última fase (1999-2011) con nuevamente baja tasa de aumento de rendimiento ($14 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; $0,18 \text{ \% año}^{-1}$).

Rodríguez et al. (2007) estudiaron el impacto de la mejora genética en el rendimiento de grano de trigo en la región sur de Brasil. Compararon siete cultivares de trigo liberados entre 1940 y 1992 por aspectos fisiológicos

asociados con el rendimiento de grano. La ganancia genética determinada en el rendimiento de grano fue de 44,9 kg ha⁻¹ año⁻¹. Posteriormente Bornhofen et al. (2017) midieron la ganancia genética lograda en el programa de mejoramiento de trigo de la Cooperativa Central de Investigación Agrícola (COODETEC), a través de la evaluación anual de líneas en ensayos multi-ambiente del 2004 al 2013. El avance genético general estimado en rendimiento fue de 61,59 kg ha⁻¹ año⁻¹ (1,68 % año⁻¹) y las diferencias entre regiones delimitadas según el valor para cultivo y uso (VCU), estuvieron entre 31,38 a 115,33 kg ha⁻¹ año⁻¹. En este trabajo y a diferencia de algunos estudios anteriores, se concluye que no hay estancamiento en el progreso de los rendimientos y que los esfuerzos de las instituciones de investigación brasileña para desarrollar nuevos cultivares han producido resultados aditivos. Woyann (2018), por su parte, estudiando 126 cultivares en el período 2002-2015 en 25 zonas, determinaron un progreso genético de 33,9 kg ha⁻¹año⁻¹ ($r^2 = 0,53$, $P < 0.01$), que representa un incremento de 1,28 % año⁻¹ y concuerdan con Bornhofen et al. (2017) en que no hay un estancamiento del progreso genético en Brasil, después del 2000.

Figura 8. Diferencia entre el rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de ciclo intermedio (CL) por localidad y año, y el rendimiento promedio de INIA Tijereta, agrupando por presencia o ausencia de fungicida.



3.3. RENDIMIENTO COMERCIAL

El rendimiento comercial de trigo en el período 1997-2017 ha venido aumentando sostenidamente con una relación significativa ($p \leq 0,030$), de baja magnitud, a razón de $55,4 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, equivalente a un 2 % por año sobre una base de 2722 kg ha^{-1} de rendimiento medio (Figura 1). Este valor es superior a la estimación realizada por Ernst (2006) de $41 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para el período 1960-2000, pero muy similar al estimado por Hoffman et al. (2014), de $54 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ considerando el período 1970-2013. El mismo autor considerando el período 2000-2013 menciona un estancamiento de los rendimientos en $12 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ con una alta variabilidad asociada a las diferencias climáticas entre años ($r^2 = 0.02$). Analizado en este contexto, los resultados de este trabajo podrían estar confirmando esta tendencia a un estancamiento o muy bajo crecimiento del rendimiento comercial en los últimos años.

En este período se han sucedido una serie de cambios trascendentes en la estructura y características de la agricultura uruguaya. Los cultivos de secano hasta el 2000 ocupaban un área de siembra baja, mayormente con laboreo, donde el trigo se insertaba en un sistema de rotación de cultivos y pasturas con leguminosas, y existía una preponderancia absoluta de los cereales de invierno (trigo y cebada). En un período corto de tiempo, se dejó de labrear el suelo y de rotar cultivos con pasturas, se quintuplicó el área sembrada y se extendió la producción hacia nuevas zonas no tradicionales que presentan menor aptitud agrícola en relación al litoral del país (Hoffman et al., 2014). Hacia el final de este periodo, el sistema tiene a la soja como cultivo principal, se han acumulado años de agricultura continua sin rotar con leguminosas forrajeras y existen balances negativos de nutrientes, en especial de nitrógeno (N) (Ernst y Siri, 2011), potasio y en menor medida fosforo (Mazzilli et al., 2014). Estos cambios posiblemente están contribuyendo a mantener acotado el aumento de rendimiento comercial.

A partir del 2011/12, zafra en que se sembró la mayor área de trigo del período (593 hectáreas), el área de siembra ha disminuido marcadamente estabilizándose alrededor de 200 mil hectáreas en los últimos años (Souto y Rava, 2018) y la siembra en zonas no tradicionales se ha revertido. El hecho de que el cultivo vuelva a las zonas del litoral, a los mejores suelos agrícolas, podría tener incidencia positiva en el rendimiento promedio. Pero, por otra parte, la disminución del área sembrada ha provocado un aumento de la relación área de verano/invierno, y de esta forma la proporción de chacras que quedan en rastrojo o con un cultivo de cobertura, también ha aumentado, lo que podría estar incidiendo en forma negativa, por aceleración en las pérdidas de materia orgánica del suelo o peor relación C/N en las chacras.

En la medida que el mejoramiento genético eleva el potencial de rendimiento de los cultivos, crece la demanda de N y, por lo tanto, la fertilización nitrogenada pasa a ser una determinante significativa de la concreción del potencial de rendimiento (Sinclair y Horie 1989, Salvaghiotti et al. 2009, Berger et al. 2015).

En este período, el sistema de agricultura continúa ha provocado un agotamiento de la materia orgánica fácilmente descomponible y con ello una reducción en la capacidad del suelo de aportar N (García et al. 2009; Mazzilli et al. 2015, Berger et al. 2015), determinando un incremento en las cantidades de N que es necesario aplicar a los cultivos. Si bien los productores han aumentado las dosis de nitrógeno utilizadas, la brecha en relación a las necesidades de N se ha incrementado, y ello explica en parte la variación del rendimiento de los cereales entre chacras y empresas en Uruguay (Ernst 2014, Hoffman et al. 2014, Mazzilli et al. 2014).

Según Hoffman et al. (2014), este desajuste entre las dosis de N aplicadas y el aumento de las necesidades de los cultivos es uno de los principales responsables del lento crecimiento de la productividad nacional de los cereales en los últimos años.

En Argentina la evolución de los rendimientos logrados a nivel productivo a lo largo del período 1961-2016 representó una tasa de ganancia anual de rendimiento de 32 kg ha⁻¹ año⁻¹. En términos relativos, la tasa anual de aumento de rendimiento fue de 1,58% año⁻¹(Abeledo et al, 2018). Sin embargo, Argentina tiene mucha variabilidad en la aptitud de las zonas productoras de trigo, y en el mismo trabajo se menciona que en las regiones más productivas de Argentina (como el sureste), el crecimiento de la productividad a partir de 1993 es de 99 kg ha⁻¹año⁻¹.

3.4. VARIABLES ASOCIADAS A LA VARIACIÓN DE RENDIMIENTO EN EL PERÍODO

3.4.1. Variables asociadas al rendimiento de los materiales de ciclo intermedio

Para los ciclos intermedios y tomando los 5 mejores cultivares de todos los experimentos realizados en la localidad La Estanzuela, el modelo de mejor ajuste en la meta-regresión logró explicar un 58 % de la varianza total e incluyó a las siguientes variables: coeficiente fototermal en el período crítico (Q floración -20+10), fungicida (Con F), año (A) y fertilización (F).

Modelo 1

$$Y(\text{kg/ha}) = -382500,1 + 2958,0 Q_{-20+10} + 1202,1 \text{ si CF} + 191,9 A - 12,3 F$$

En este modelo las variables de mayor peso fueron el año (que explicó un 21% de la variabilidad y el fungicida que explicó el 15 % de la variabilidad total, el Q y la fertilización explicaron 10 y 12 % respectivamente.

No obstante, como la intención era ver el efecto de las variables climáticas preferimos analizar el segundo modelo de mejor ajuste (R^2 análogo = 0,57) que incluía las variables climáticas analizadas como covariables ligadas: coeficiente fototermal en el período crítico (Q floración -20+10 días),

radiación promedio en el período crítico (R), temperatura en el período crítico (T) y lluvia acumulada desde emergencia a floración (LL). Además, incluía también los efectos del año (A), fungicida (Sin F) y fertilización (F).

Modelo 2

$$Y \text{ (kg/ha)} = -247733,2 - 3799,5 Q + 0,0006 R - 1186,3 T + 1,7 LL + 134,9 A - 10,0 F - 1151,1 \text{ si SF}$$

El efecto de las variables climáticas tuvo el mayor peso al explicar la variabilidad en los rendimientos (40 %). Al estar presentes en el modelo las variables climáticas, la contribución del efecto año decreció a 4% y el fungicida y la fertilización explicaron el 3 y 10 % respectivamente de la variabilidad restante.

Analizando el comportamiento de las variables climáticas en el modelo 2, el coeficiente fototermal (Q) presentó una tendencia inversa a la esperada. Numerosos autores han concluido que hay una relación directa y positiva entre el crecimiento del trigo y el Q en el período crítico. Cuanto mayor es el coeficiente, mejor ambiente productivo tiene el cultivo, con la salvedad de que no es recomendable anticipar el periodo crítico tratando de captar valores mayores de Q, por el riesgo de heladas tardías que puedan afectar el rendimiento del cultivo (Fischer 1993, Khichar y Ram, 2007; Ahmad et al. 2010).

A nivel local, Hoffman et al. (2017) analizando años sin extremos hídricos (entre 2000 y 2015), con un rango de agua aparente total entre 300 a 500 mm (de Z30 a MF), realizaron un árbol de regresión que particionó los años en dos grupos según el Q. Los 5 años de mayor rendimiento presentaron un valor de Q igual o mayor a 1,7, con un rendimiento medio de 5879 kg ha⁻¹, un 41 % superior al rendimiento medio de los 6 años restantes (4169 kg ha⁻¹).

En este trabajo la tendencia del Q es levemente negativa (Figura 9). Podríamos tratar de explicar esta situación pensando que en este período

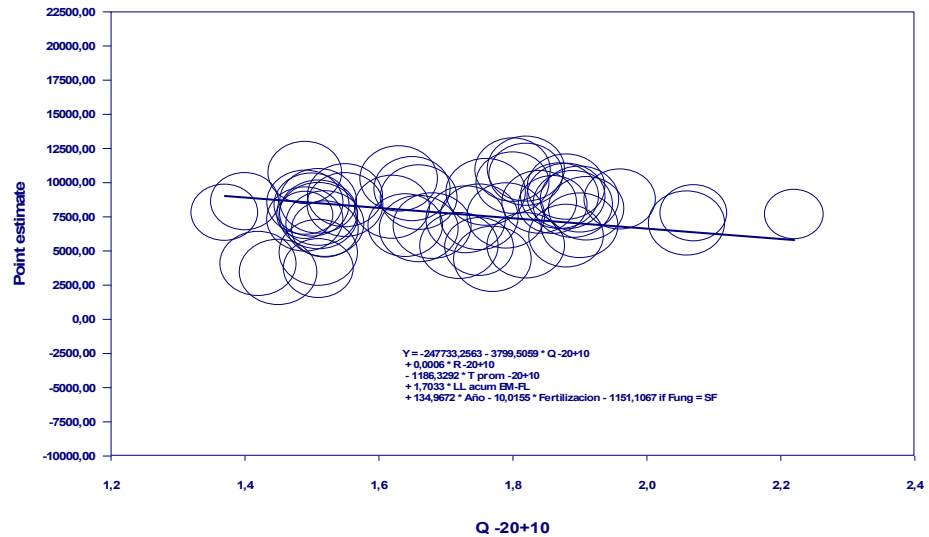
pudo haber varios años con alta incidencia de heladas tardías, o alta proporción de siembras tempranas que puedan haber sufrido los efectos de las bajas temperaturas, sin embargo, esto es poco probable. Gaso et al. (2012) estudiaron la ocurrencia de heladas tardías en la zona de La Estanzuela en el período 1975-2011 y concluyeron que la probabilidad de ocurrencia en los meses donde generalmente se da el período crítico es baja, especialmente si la comparamos con otras zonas del país.

Seguramente este comportamiento, se explique en el hecho de que estamos considerando covariables ligadas y puede haber otros factores intervinientes que no se expresan de manera clara, pero igualmente inciden en el comportamiento de algunos años.

Calviño y Sadras (2002) observaron que el Q no estuvo relacionado al rendimiento de grano durante el período crítico de fijación del número de granos excepto cuando el déficit hídrico en ese momento fue menor a 10 mm. Por otro lado, en un ensayo realizado en la región pampeana de Argentina, el Q solo tuvo una asociación positiva con el rendimiento cuando se aplicó riego, no así en secano (Bredan et al. citado por Fernández y Zingaretti, 2015).

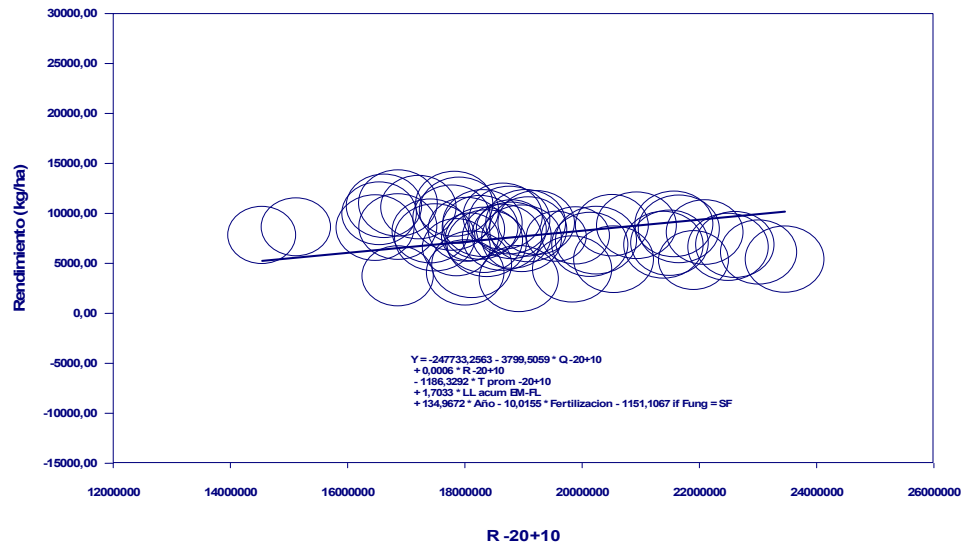
En el modelo analizado la disponibilidad de agua (lluvia) está presente dentro de las variables que explican el rendimiento de los cultivos (Figura 12), sin embargo, la lluvia que aparece es la acumulada en el período emergencia floración, y no en el período crítico. Es probable que la disponibilidad de agua en el suelo al comienzo del período crítico sea más importante que el eventual suministro que se pueda realizar durante el mismo.

Figura 9. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CI por experimento en La Estanzuela, en función del coeficiente fototermal en el período crítico, manteniendo todas las demás variables del modelo 2 constantes.



Otro aspecto curioso es que en el modelo aparece el Q y además aparecen las variables que lo determinan (radiación y temperatura). En el momento en que se saca alguna de estas 3 variables del modelo, inmediatamente el ajuste se reduce (datos no presentados). Esto podría estar indicando que la radiación (Figura 10) y la temperatura (Figura 11), pueden estar interactuando además con otras variables en forma independiente o que las variables están correlacionadas entre ellas, pero tienen magnitudes absolutas diferentes que no se refleja en un índice como es el Q.

Figura 10. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CI por experimento en La Estanzuela, en función de la radiación promedio en el período crítico, manteniendo todas las demás variables del modelo 2 constantes.



Tanto la radiación (Figura 10) como la temperatura (Figura 11) se comportan de la manera esperada, es decir que, a medida que aumenta la radiación, aumenta el rendimiento. Esto puede ser explicado en base a bibliografía, que indica que una mayor producción y partición de asimilados debido a mejores condiciones para la fotosíntesis se traduce en mayor acumulación de peso seco en la espiga.

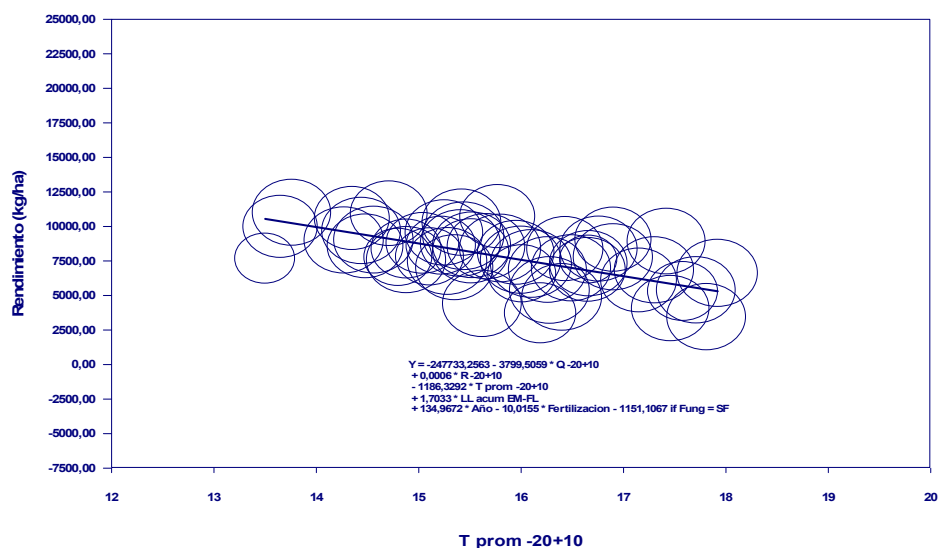
La relación positiva entre el peso de las espigas y el número de flores fértiles en floración demuestra que la cantidad de recursos alojados en la espiga es fundamental para lograr un alto número de granos. De esta manera ante valores iguales de partición de asimilados a espigas, una mayor cantidad de biomasa acumulada a floración determina un mayor peso de las espigas y por lo tanto un mayor número de granos (Balbi et al., 2013).

La temperatura presenta el comportamiento inverso, a medida que aumenta la temperatura disminuye el rendimiento (Figura 11). La bibliografía indica que esto ocurre por el acortamiento de la fase de crecimiento y menor acumulación de peso seco de la espiga. En Uruguay es poco probable que la temperatura media alcance valores mayores a 26°C antes de la floración o en el período crítico, por lo que no tendríamos mayores problemas de temperaturas altas donde tanto el crecimiento como el desarrollo pierden su relación lineal con la temperatura (Wall, 1997). Sin embargo, Rubio et al. (2017) estimaron en base a la información generada durante 21 años en ensayos de potenciales de rendimientos en la misma localidad de La Estanzuela, que las temperaturas altas en el período crítico, con máximas mayores a 23 °C, causaron reducciones en el rendimiento del orden del 24 %.

Slafer (2007) menciona que los cultivos pueden estar sujetos durante su período de crecimiento a dos posibles estreses diferentes con respecto al régimen térmico: (i) crónico, temperaturas moderadamente altas durante todo el período (25 a 32 °C) y (ii) o intermitente, breves períodos (3-5 días) de muy alta temperaturas (33 a 40 °C). Estas breves elevaciones de temperatura no cambian demasiado la temperatura media diaria del período, pero pueden tener un efecto significativo en el rendimiento y calidad de los granos especialmente si ocurren durante el período crítico y llenado del grano.

La principal respuesta durante el período de pre-antesis frente a temperaturas elevadas es la reducción en el número de granos por m² y por ende la reducción del rendimiento. En el trabajo anterior se menciona una reducción en el número de granos por unidad de superficie de 4 % por cada grado de aumento en la temperatura en los 30 días previos a la floración. Por otra parte, altas temperaturas durante el desarrollo floral pueden resultar en polen infértil y aborto de granos.

Figura 11. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CI por experimento de La Estanzuela, en función de la temperatura promedio en el período crítico, manteniendo todas las demás variables del modelo 2 constantes.



La variable climática relacionada a la disponibilidad de agua que integró este modelo, y que por lo tanto tienen incidencia en la determinación del rendimiento es la lluvia en el período emergencia – floración (Figura 12). El ajuste lineal en la figura 12 tiene una tendencia muy tenue ($R^2=0,04$), posiblemente porque el comportamiento de esta variable puede tener un componente cuadrático que el modelo no refleja.

Estos resultados contrastan con los estudios de los factores ambientales nacionales realizados por Hoffman et al. (2014) que indican que la principal fuente de variación climática sin interferencia de enfermedades fue el total de agua disponible aparente en los meses de setiembre, octubre y noviembre. En este trabajo, los años críticos, de bajo rendimiento en grano,

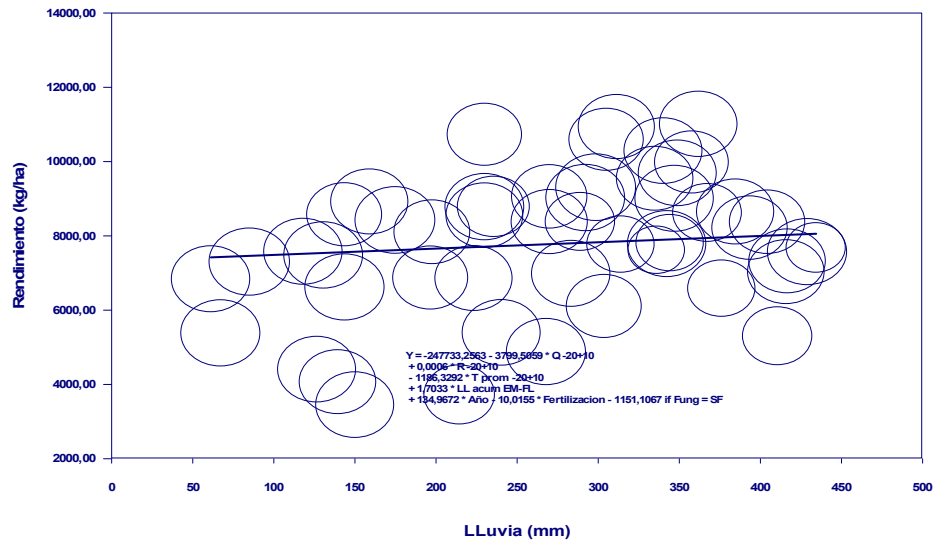
se caracterizaron por fuertes restricciones hídricas impuestas tanto por déficit (2003 y 2006) como por exceso (2007 y 2012). Los años de mayor potencial se caracterizaron por una cantidad total de agua disponible aparente en el mismo período cercana a los 400 mm.

Estudios realizados para determinar el estado de desarrollo en el cual el rendimiento es más sensible al estrés hídrico, han producido resultados todavía inconsistentes. Los períodos más sensibles parecen ser: a) el período de muerte de macollos, b) cuando las flores se forman y los granos cuajan y c) durante el llenado de grano temprano cuando estos pueden abortar debido a falta de asimilados. Varios autores han sugerido que el trigo es más sensible al estrés hídrico desde principio de encañazón hasta grano lechoso (Fernández y Zingaretti, 2015).

Los resultados obtenidos en este trabajo nos permiten manejar la hipótesis de que, si la disponibilidad de agua promedio es adecuada para comenzar la encañazón y el período crítico en buenas condiciones, favoreciendo una alta proporción de macollos que evolucionen a espigas, puede ser un componente importante de base para las futuras etapas de la determinación del rendimiento.

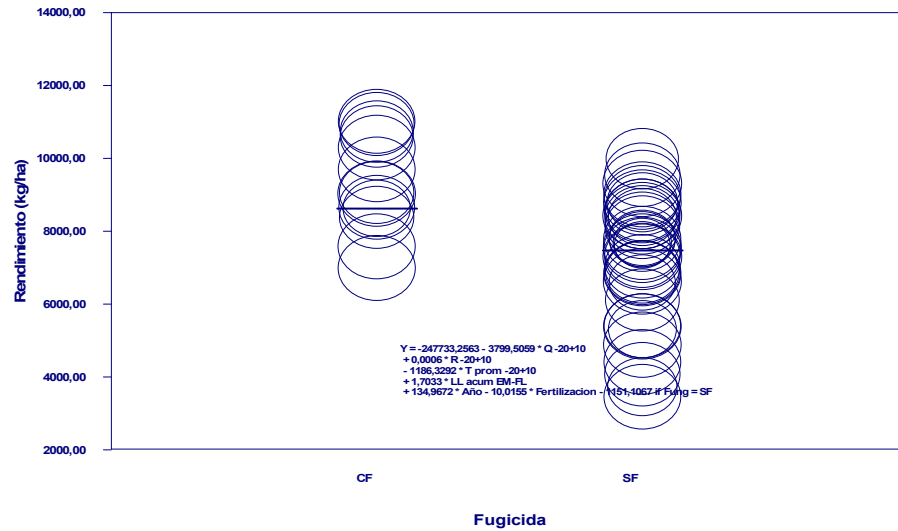
En concordancia con esto, Fernández et al. (2008) realizando estudios de factores determinantes del rendimiento en Santa Fe (Argentina), mencionan que determinar la cantidad de agua útil almacenada en el suelo hasta un metro de profundidad, tiene utilidad para predecir con mucha exactitud los rendimientos a obtener y que la adecuada disponibilidad de agua permite alcanzar el rendimiento potencial, en particular si no hay limitantes hasta el inicio del período de crecimiento de las espigas.

Figura 12. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CI por experimento de La Estanzuela, en función de la lluvia acumulada en el período emergencia –floración, manteniendo todas las demás variables del modelo 2 constantes.



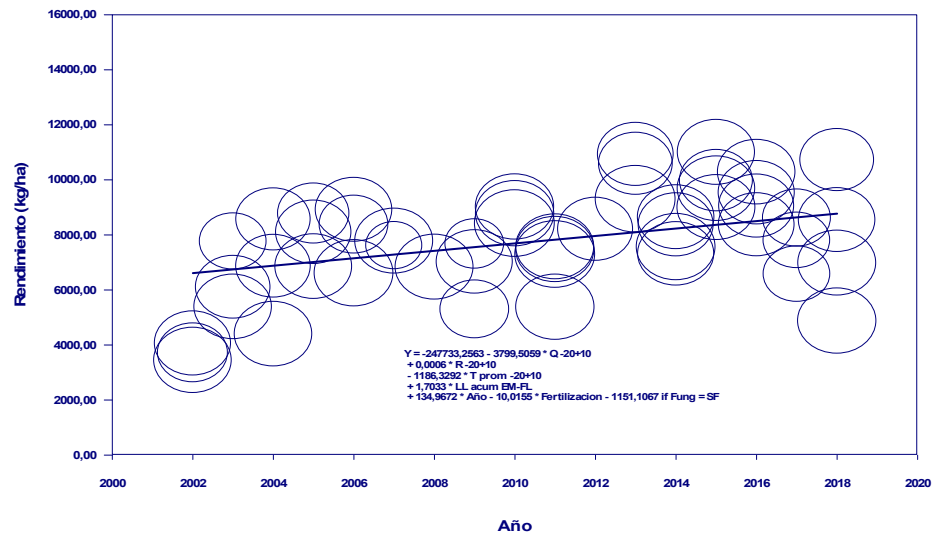
La presencia de tratamiento sanitario tiene el comportamiento esperado en este modelo, es decir que los tratamientos con fungicida en promedio rindieron más que aquellos sin tratamiento y la variabilidad también parece menor, sin embargo, la contribución de esta covariable al R^2 análogo del modelo es de 3 % (Figura 13).

Figura 13. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CI por experimento de La Estanzuela, en función de la presencia o ausencia de fungicida, manteniendo todas las demás variables del modelo 2 constantes.



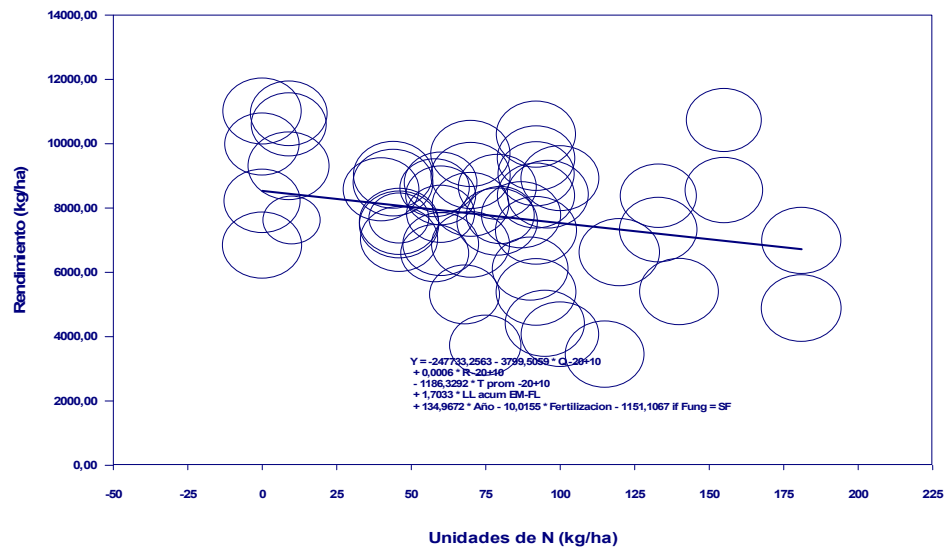
Al incluir las variables climáticas en el modelo el peso del efecto año disminuye a 4%, pero permanece, seguramente debido a que hay otras particularidades del año que inciden y no tienen que ver con las variables de mayor peso (radiación y temperatura en el período crítico y lluvia en emergencia-floración) (Figura 14).

Figura 14. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CI por experimento de La Estanzuela, en función del año, manteniendo todas las demás variables del modelo 2 constantes.



La fertilización explica un 10% de la variabilidad y tiene un comportamiento diferente del esperado, a medida que aumentan las unidades de nitrógeno por hectárea hay una tendencia a la disminución del rendimiento (Figura 15). La posible razón para este comportamiento es que la fertilización no necesariamente refleja la disponibilidad de nitrógeno en el experimento, sino más bien cuanto fue necesario agregar para cubrir los requerimientos estimados. Por este motivo dosis bajas indican indirectamente un suelo o situación de cultivo en el que se requería poco agregado de N extra. Por el contrario, en aquellos sitios con valores altos de agregado se requerían dosis altas, que incluso quizá no se alcanzaron para el potencial esperado, o no fueron tan altas como debieron ser.

Figura 15. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CI por experimento de La Estanzuela, en función de la fertilización, manteniendo todas las demás variables del modelo 2 constantes.



3.4.2. Variables asociadas al rendimiento de los materiales de ciclo largo

En el caso de los ciclos largos el modelo de mayor ajuste (R^2 análogo=0,53) incluyó las variables: radiación (R) y temperatura (T) en el período crítico, lluvia (LL) en el periodo emergencia floración, y el efecto del año (A), del fungicida (SF), de la fertilización (F) y de la época de siembra (ES).

Modelo 3

$$Y \text{ (kg/ha)} = -59163,1 + 0,0005 R - 866,1 T - 2,28 LL - 1413,2 \text{ si SF} + 321,2 \text{ si E1} + 678,1 \text{ si E2} + 35,7 A + 6,5 F$$

Las variables de mayor peso en este caso fueron el fungicida que explicó el 36 % de la variabilidad, la temperatura y radiación en el período

crítico, que explicaron el 10 % y 4 % respectivamente y la fertilización que explicó el 12 %. Las demás variables si bien fueron significativas, no realizaron grandes aportes, lo que indica que su efecto podría estar subestimado o estaría correlacionado con las demás variables.

La radiación y la temperatura en el período crítico de los ciclos largos tuvieron el comportamiento esperado (Figura 16 y 17). Los mejores rendimientos se dieron a medida que la radiación aumentó y la temperatura fue menor. A diferencia de los ciclos intermedios el coeficiente fotothermal (Q) no resultó una variable de incidencia significativa en el rendimiento de los ciclos largos, a pesar de que sí son significativas las variables que lo determinan.

Figura 16. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CL por experimento de La Estanzuela, en función de la radiación en el período crítico, manteniendo todas las demás variables del modelo 3 constantes.

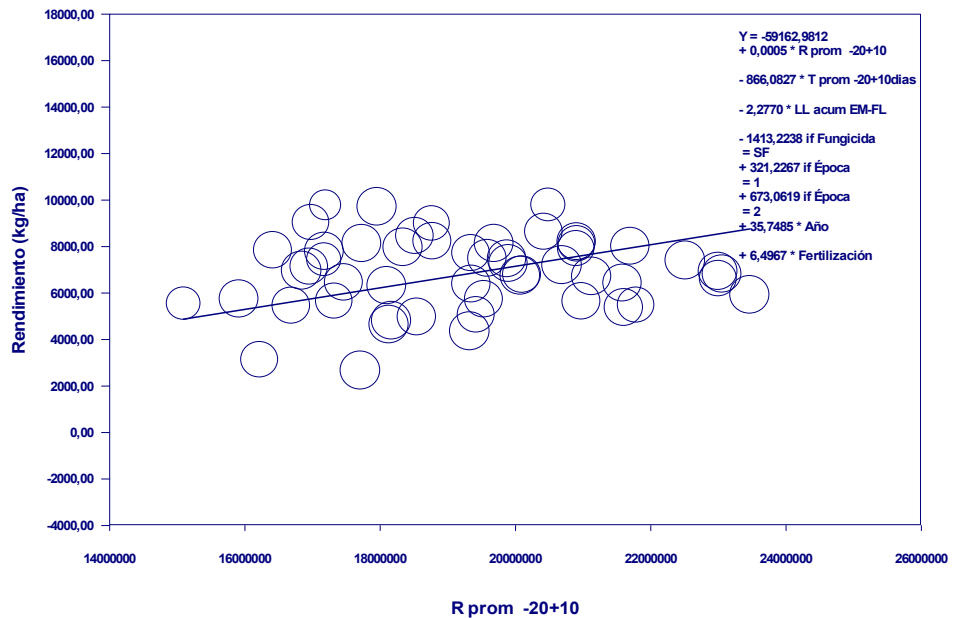
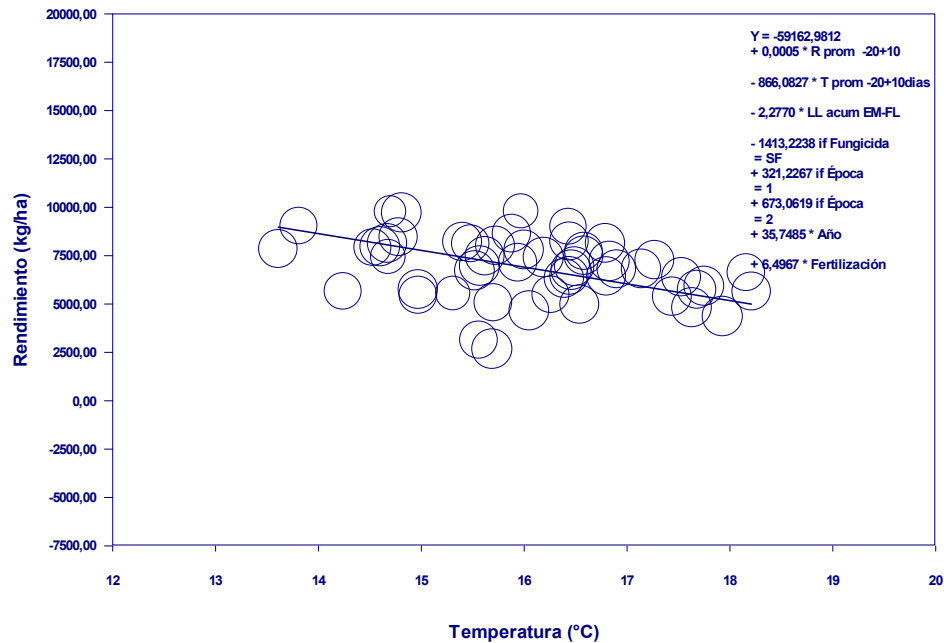
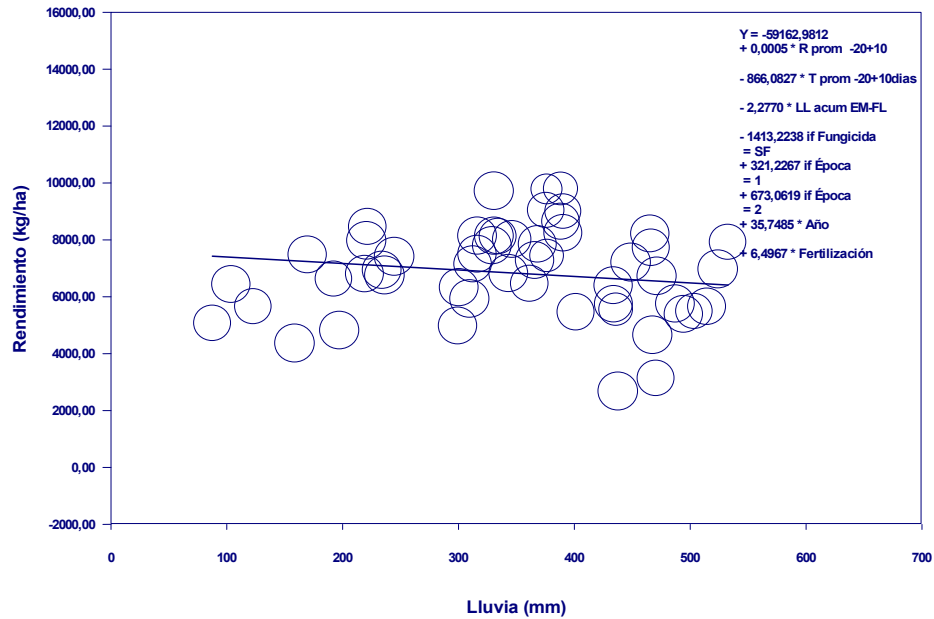


Figura 17. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CL por experimento de la localidad La Estanzuela, en función de la temperatura en el período crítico, manteniendo todas las demás variables del modelo 3 constantes.



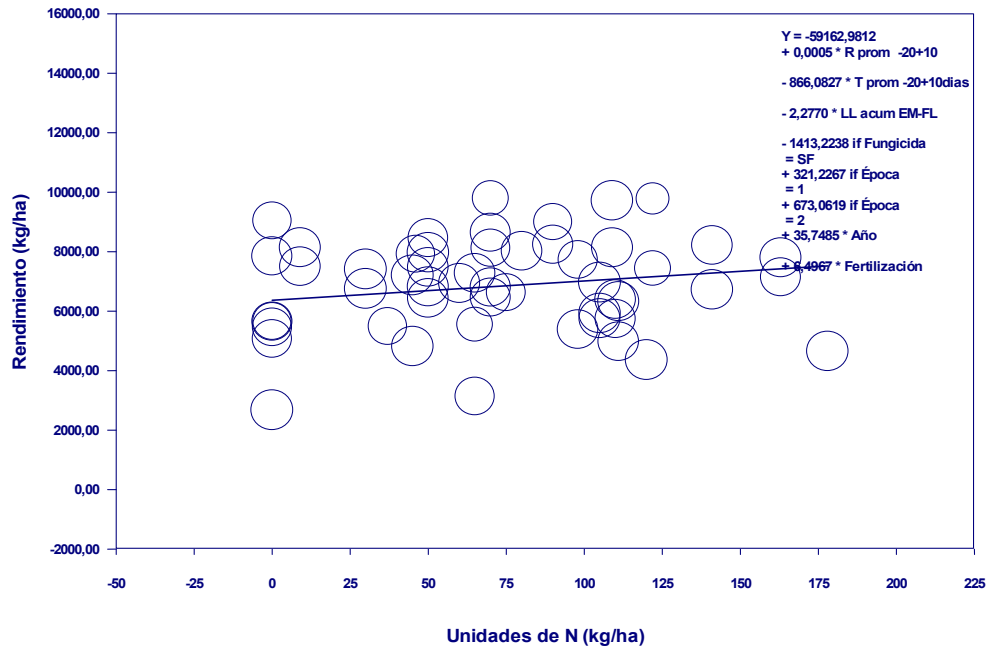
En cuanto a la disponibilidad de agua, la lluvia acumulada en el período emergencia-floración aparece como parámetro de incidencia, al igual que para los ciclos intermedios. Sin embargo, el ajuste lineal para los ciclos largos tiene una tendencia negativa, es decir que cuanto mayor el volumen de lluvia acumulada menor resulta el rendimiento. Posiblemente el comportamiento de esta variable puede tener un componente cuadrático que el modelo no refleja. Independientemente del ciclo, los mayores rendimientos parecen darse con lluvia acumuladas entre 300 y 400 mm. Esto concuerda con los resultados de Hoffman et al. (2014).

Figura 18. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CL por experimento de La Estanzuela, en función de la lluvia acumulada en el período emergencia – floración, manteniendo todas las demás variables del modelo 3 constantes.



La variable fertilización en los ciclos largos tubo el comportamiento esperado, a mayor cantidad de unidades de nitrógeno total, mayor rendimiento, pero como ya se mencionó, sin una pendiente muy pronunciada (Figura 19). Al igual que en los ciclos intermedios aparecen algunos ensayos que sin agregado de fertilizante igual dan rendimientos muy buenos y como ya mencionamos posiblemente sean suelos en muy buenas condiciones que aportaron el nitrógeno que el cultivo necesitó.

Figura 19. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CL por experimento de La Estanzuela, en función de la fertilización, manteniendo todas las demás variables del modelo 3 constantes.



El efecto del año y el tratamiento sanitario se comportaron de la forma esperada (Figura 20 y 21).

Figura 20. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CL por experimento de la localidad La Estanzuela, en función de año, manteniendo todas las demás variables del modelo 3 constantes.

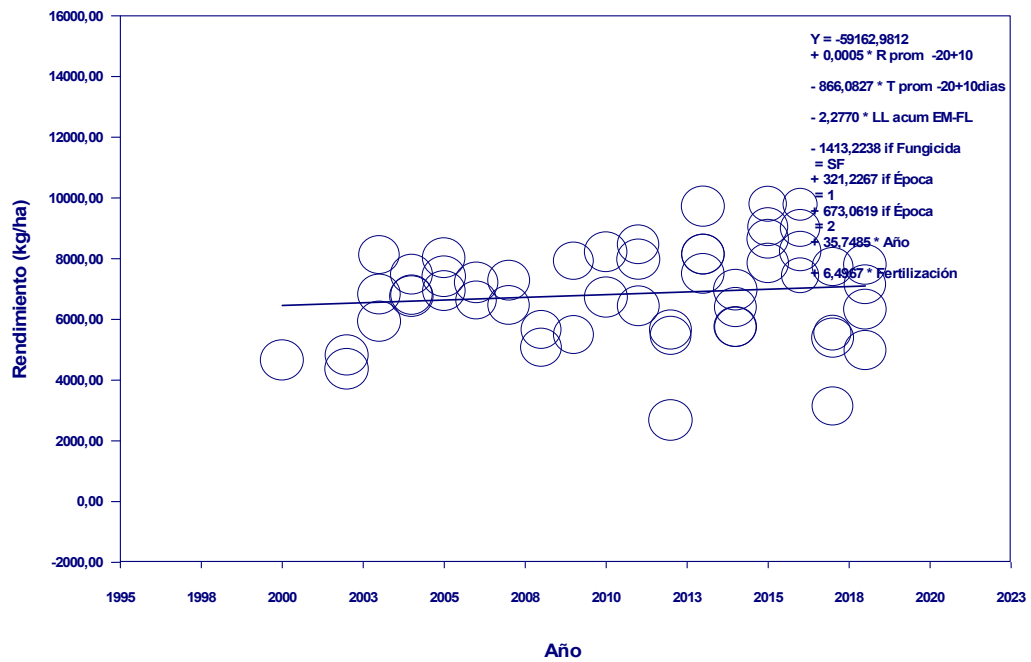
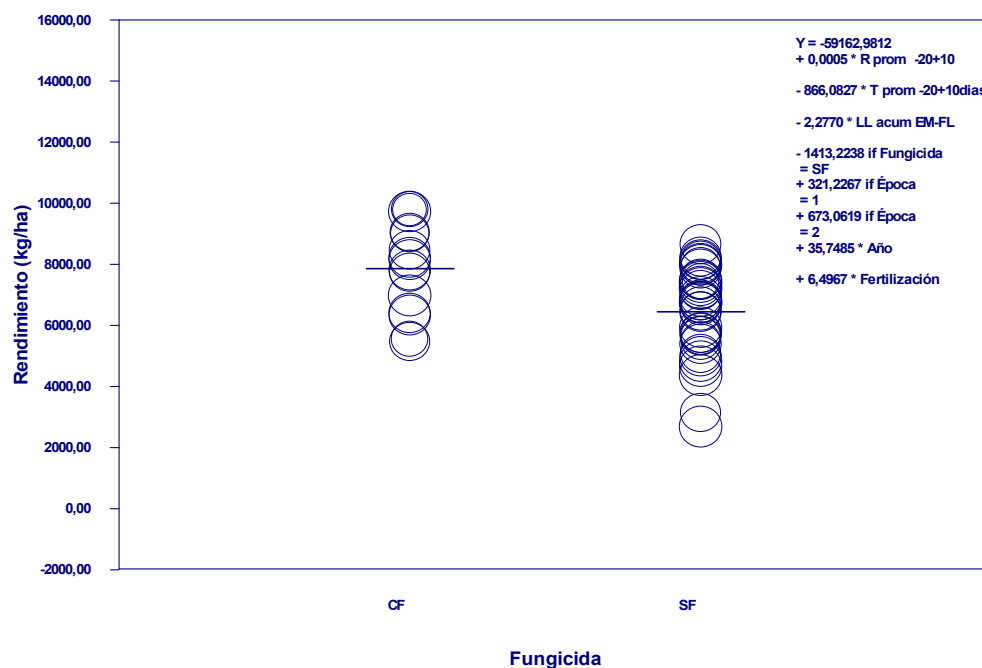


Figura 21. Regresión del rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CL por experimento de La Estanzuela, en función de la presencia o ausencia de fungicida, manteniendo todas las demás variables del modelo constantes.



La época de siembra solo resultó una variable significativa para los ciclos largos. Las épocas de siembra intermedias y tempranas permitieron un mayor rendimiento (Figura 22).

Varios autores han podido demostrar que el rendimiento de los cultivares de ciclo largo es especialmente sensibles al retraso de la época de siembra.

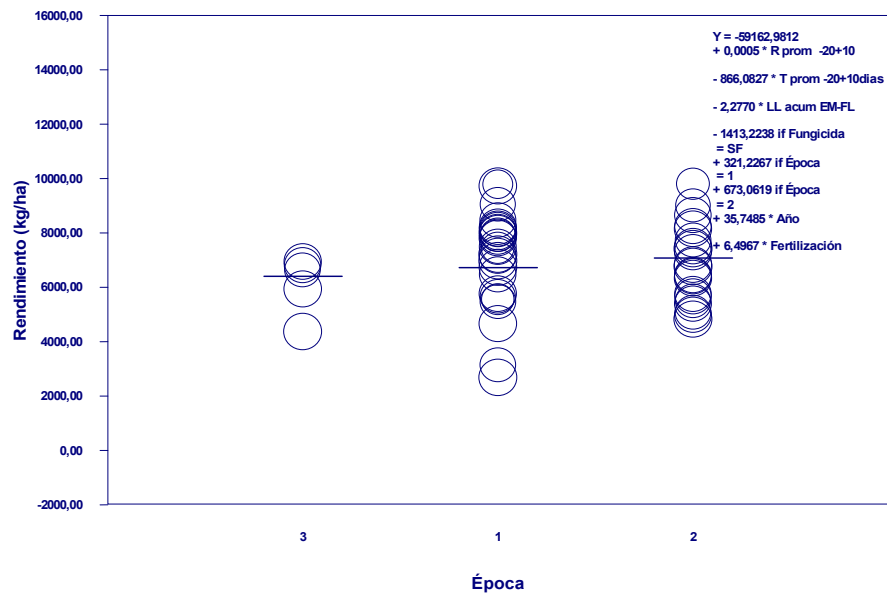
El elemento clave en los ciclos largos es la duración del periodo vegetativo que se correlaciona positiva y significativamente con los componentes del rendimiento en grano: número de espigas, número de granos por espiga y peso del grano. Por cada día de retraso de la fecha de

siembra se produce un retraso de entre 0,48 y 0,75 días en la fecha de antesis, acortando en consecuencia el ciclo del cultivo y disminuyendo el rendimiento en grano entre 6 % y 16 % por semana de retraso en la siembra y la antesis respectivamente. (Gebeyehou et al.1982, Menéndez y Satorre, citados por Montiel, 2017).

Asociado a la duración del ciclo está la producción de biomasa, siembras tempranas producen mayor biomasa y en cultivares de bajo porte esto se puede traducir en una mejor partición de asimilados a la espiga y por lo tanto mayor rendimiento (Gomez-Macpherson y Richards, 1995).

Montiel (2017), estudiando materiales de diferente ciclo en Córdoba Argentina, determinó que el rendimiento en grano se vio disminuido significativamente con el atraso de la fecha de siembra en los materiales de ciclo largo y los rendimientos en épocas tempranas (abril) fueron un 38 % superior a los obtenidos en las fechas más tardías de fines de mayo. En cuanto al número de granos por metro cuadrado, se encontraron diferencias estadísticamente significativas a favor de la fecha de siembra temprana en los ciclos largos (45 %) e intermedio-largo (10 %), pero no para los ciclos cortos. Aunque el aumento de biomasa en la fecha de siembra temprana se produjo independientemente del ciclo, los materiales de ciclo largo mostraron mayores aumentos que los de ciclo más corto (30 % vs 24 %). Gallego (2017) encontró resultados similares en la región del Chaco.

Figura 22. Regresión de rendimiento promedio de los 5 mejores cultivares de CL por experimento de La Estanzuela, en función de la época de siembra, manteniendo todas las demás variables del modelo 3 constantes.



4. CONCLUSIONES

En el período 1997–2017 se ha producido un aumento significativo del rendimiento experimental. El rendimiento experimental promedio de trigo ha crecido en el período con una relación positiva débil ($p \leq 0,030$), a un ritmo de $84 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que equivale a un 1,78 %. Sin embargo, los 5 mejores cultivares por experimento mostraron un incremento promedio de $212 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, equivalente a un 2,6 % por año.

El incremento en el rendimiento de los 5 mejores cultivares por experimento con respecto a los testigos utilizados por la Evaluación Nacional de Cultivares de Trigo fue significativo, en promedio fue de 1527 kg ha^{-1} (31,5 %) para los ciclos intermedios y de 972 kg ha^{-1} (20,4 %) para los ciclos largos.

Los cultivares de ciclo intermedio en ensayos sin tratamiento sanitario rindieron en promedio 1455 kg ha^{-1} (32,4 %) más que los testigos y los cultivares en ensayos con tratamiento sanitario rindieron 1657 kg ha^{-1} (28,8 %) más.

Los cultivares de ciclo largo en ensayos sin tratamiento sanitario mostraron una diferencia de rendimiento de 944 kg ha^{-1} (20,8 %) más que los testigos, y los cultivares con tratamiento sanitario, una diferencia de 1066 kg ha^{-1} (19,9 %).

El progreso genético promedio estimado por el meta-análisis, comparando el rendimiento de los 5 mejores cultivares por experimento con el testigo histórico fijo (INIA Tijereta), en el período de 21 años es de 1866 kg ha^{-1} (40,2 %) para los ciclos intermedios y de 1230 kg ha^{-1} (26,5 %) para los ciclos largos.

Los 5 mejores cultivares de ciclo intermedio en ensayos sin tratamiento sanitario, presentaron una diferencia de rendimiento de 1604 kg ha^{-1} (36,4 %) con respecto al testigo fijo (INIA Tijereta), y en experimentos con tratamiento sanitario la diferencia fue de 2821 kg ha^{-1} (54,2 %).

Los cultivares de ciclo largo en ensayos sin tratamiento sanitario rindieron 1060 kg ha^{-1} (24,0 %) más que el testigo fijo, y los que estuvieron en ensayos con tratamiento sanitario rindieron 1463 kg ha^{-1} más (28,1 %).

Tanto para los ciclos intermedios, como para los ciclos largos, las variables que mostraron mayor incidencia en el rendimiento fueron: la radiación y la temperatura en el período crítico, la lluvia en el período emergencia-floración, la presencia o ausencia de tratamiento sanitario, la fertilización y el efecto del año.

Para los ciclos intermedios la variable extra que se mostró significativa fue el coeficiente fototermal en el período crítico. Esto seguramente se relacione con el hecho de que el rendimiento de los ciclos intermedios es más dependiente de lo que pase en el período crítico y no tan dependiente de lo que pase durante el período vegetativo, ya que tienen la capacidad de acumular área foliar en menor tiempo.

Para los ciclos largos la variable extra que resultó significativa fue la época de siembra. Esto no sorprende, ya que ha sido bien estudiado que en los ciclos largos la importancia de una época de siembra temprana es mayor que para los ciclos intermedios, debido a que necesitan un período razonable de acumulación de materia seca antes de pasar al estado reproductivo.

El meta-análisis resulta muy eficaz para visualizar y comparar evolución de rendimientos promedio en un período, pero para evaluar el aporte de las variables que tienen mayor incidencia en los cambios de rendimiento, podría resultar más útil otro tipo de análisis como un modelo clásico de efectos aleatorios. Se considera importante continuar profundizando y generando información relacionada a estas variables, especialmente de las relacionadas al manejo, trabajando en zonas específicas.

5. BIBLIOGRAFÍA

- Abbate P. 2004. Ecofisiología de trigo: aspectos prácticos para el manejo del cultivo. En: Congreso Nacional de AAPRESID. (12°, 2004, Rosario, Argentina). Proceedings. Rosario Argentina. AAPRESID. 121-127. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/307984867_ECOFISIOLOGIA_DE_TRIGO_ASPECTOS_PRACTICOS_PARA_EL_MANEJO_DEL_CULTIVO
- Abbate P, Andrade F, Lázaro L, Bariffi J, Berardocco H, Inza V and Marturano F. 1998. Grain Yield Increase in Recent Argentine Wheat Cultivars. *Crop Science*, 38(5): 1203-1209
- Abbate P, Andrade F, Culot J. 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *The Journal of Agricultural Science* 124(3): 351-360. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/effects-of-radiation-and-nitrogen-on-number-of-grains-in-wheat/D8F88C51F15EDEC11A788EB53BB55DB5>
- Abeledo L, Serrago R, de San Celedonio R, Lo Valvo P, Miralles D. 2018. Limitantes al rendimiento en trigo y cebada. *Agronomía y ambiente. Revista de la Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos aires.* 38(1):71-84. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/331895907_Limitantes_al_rendimiento_en_trigo_y_cebada
- Ahmad S, Khan M, Haider M, Iqbal Z, Iftikhar Y, Hussain M. 2010. Comparison of yield loss in different wheat varieties/lines due to leaf rust disease. *Pakistan Journal of Phytopathology.* 22(1): 13-15.
- Alzueta I. 2008. Ecofisiología de la generación del rendimiento y la calidad en genotipos de trigo y su comparación con cebada. Tesis Esp. Cultivos de granos. Buenos Aires. Argentina. Universidad de Buenos Aires. 231 p.

Consultado 18 marzo 2019. Disponible en:
<http://ri.agro.uba.ar/files/download/tesis/doctorado/2014alzuetaignacio.pdf>

Balbi C, 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. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: http://baunne.unne.edu.ar/revista_agrotecnia/pdfs/AG_21_13_02-Balbi_Tasa.pdf

Berger A, Morales X, Calistro R. 2015. Trigo: rendimiento, fertilización nitrogenada y calidad. *Revista INIA Uruguay*, 41: 27-30. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/4802/1/2015-n.41-revista-INIA-41.p.27-30-BERGER.pdf>

Berger A, Gaso D, Calistro R, Morales X. 2014. Limitantes ambientales y potencial de rendimiento de trigo en Uruguay. En: *INIA Serie Técnica 241. Seminario Internacional: 1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela: un valioso legado para el futuro.* (2014, La Estanzuela, Colonia). 112 - 123. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/st-241-2018.p.112-123-Berger-et-al.pdf>

Buttarelli F, Díaz P, Ghiglione R, Poncio M, Vargas J. 2019. Revisión sistemática y meta-análisis: efectos de la fertilización nitrogenada sobre el rendimiento en trigo. Tesis. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/11611/Revisi%c3%b3n%20sistem%c3%a1tica%20y%20meta-an%c3%a1lisis%20efectos%20de%20la%20fertilizaci%c3%b3n%20nitr>

[ogenada%20sobre%20el%20rendimiento.pdf?sequence=1&isAllowed=y](#)

Bornhofen E, Benin G, Storck L, Woyann LG, Duarte T, Stoco MG, Marchioro SV. 2017. Métodos estadísticos para estudo de adaptabilidade e estabilidade em trigo. *Bragantia* 76(1):1-10. Consultado 18 de marzo 2019. Disponible en: <http://www.scielo.br/pdf/brag/v76n1/0006-8705-brag-1678-4499557.pdf>

Borenstein M, Hedges L, Higgins J, Rothstein H. 2013. *Comprehensive Meta-Analysis Version 3*. Biostat, Englewood, NJ. [En línea] 18 marzo 2019. https://www.meta-analysis.com/pages/why_do.php?cart=B2D94150685

Borenstein M, Hedges L, Higgins J, Rothstein H. 2009. *Introduction to Meta-Analysis*. Chichester: Wiley. 452 p.

Bruno C, Rueda A, Balzarini M. 2016. *Meta-análisis con InfoStat y su interfase con R*. Universidad Nacional de Córdoba– CONICET. Argentina. 24 p. [Datos sin publicar].

Calviño P, Sadras V. 2002. On-farm assessment of constraints to wheat yield in the south-eastern Pampas. *Field Crops Research*. 74: 1-11. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/222967733_On-farm_assessment_of_constraints_to_wheat_yield_in_the_south-eastern_Pampas

Cassman K, Grassini P, Wart J. 2010. Crop Yield Potential, Yield Trends, and Global Food Security in a Changing Climate. En: Rosenzweig C, y Hillel D. (Editors), in *Handbook of Climate Change and Agroecosystems: Impacts, Adaptation, and Mitigation*. Londres. Imperial College Press, 37-51. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/281263514_Crop_Yield_P

[otential Yield Trends and Global Food Security in a Changing Climate](#)

- Chá G, Duran J. 2001. Respuesta al agregado de nitrógeno tardío (Z3.0 y Z4.7) en rendimiento y calidad de trigo (*Triticum aestivum*). Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 123 p.
- Chapagain T, Good A. 2015. Yield and Production Gaps in Rainfed Wheat, Barley, and Canola in Alberta. *Frontiers in Plant Science*. 6: 1-10. Consultado 4 octubre 2018. Disponible en: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4646961/>
- Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. 2015. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. [En línea] 18 marzo 2019. <http://www.infostat.com.ar>
- Ernst O. 2014. Efecto de los años de agricultura continua sobre el rendimiento actual y alcanzable de trigo en Uruguay. En: Congreso Uruguayo de ciencias de suelo. Intensificando el conocimiento del suelo y medioambiente para producir más y mejor. VI encuentro de la SUCS. Consultado 24 octubre 2018. Disponible en: <http://www.suelos.com.uy/pdf/p/i-t.pdf>
- Ernst O, Siri Prieto G. 2011. La agricultura en Uruguay: su trayectoria y consecuencias. En: Simposio Nacional de Agricultura de Secano. (2º, 2011, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. Paysandú. Hemisferio Sur. 149-163.
- Ernst O. 2006. Trigo: variables de manejo determinantes del rendimiento y su variabilidad entre y dentro de años. *Cangue* 28: 16-20.
- Evans LT, Fischer RA. 1999. Yield potential: its definition, measurement, and significance. *Crop Science* 39, 1544–1551.

- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2012. FAOSTAT Database. Roma, Italia: FAO. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Fernández M, Zingaretti O. 2015. El uso consuntivo en el período crítico para la predicción del rendimiento en grano de trigo pan, trigo candeal y triticale en la región semiárida pampeana. *Semiarida*.25(2): 29-39. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <http://www.biblioteca.unlpam.edu.ar/pubpdf/rev-agro/v25n2a03fernandez.pdf>
- Fernández M, Zingaretti O, Bredad R, Mirassón H, Faraldo M, Ferrero C, Dedurana J, Fioretti M. 2008. Efecto de la época de siembra y el genotipo sobre el rendimiento de trigo y sus componentes en el oeste de la región semiárida pampeana central. En: Congreso Nacional del Trigo. (7°, 2008. Santa Rosa La Pampa, Argentina). Trabajos presentados. Santa Rosa La Pampa, Argentina. INTA. 1-5.
- Fischer R. 2015. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Research* 182: 9–18. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429014003396?via%3Dihub>
- Fischer R, Byerlee D, Edmeades G. 2014. Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? ACIAR Monograph No. 158. Australian Centre for International Agricultural Research. Canberra. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: 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. 1993. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Research*. 33: 57-80. Consultado 18 marzo 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0378429093900944>
- Fischer R. 1985. Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science*. 105:447-461.
- Gallego M. 2017. Evaluación de cultivares de trigo. Campaña 2016/2017. INTA Las Breñas. [En línea] 18 marzo 2019. https://inta.gob.ar/sites/default/files/inta_lasbrenas_informe_ensayos_d_e_trigo_2016-2017.pdf
- García A, Quincke A, Pereira S, Díaz M. 2009. Respuesta a Cloruro de Potasio (KCl) en trigo y cebada. En: Jornada de Cultivos de Invierno: INIA La Estanzuela. Montevideo: INIA. Actividades de Difusión. 566: 13 – 18.
- Gasó D, Berger A, Ibañez W, Ceretta S. 2012. Adaptación de cultivos de invierno, trigo y cebada a la zona agrícola del noreste de Uruguay. INIA Serie Técnica 200. 28 p.
- Gebeyehou G, Knott D, Baker R. 1982. Relationships among durations of vegetative and grain filling phases, yield components, and grain yield in durum wheat cultivars. *Crop Science* 22:287-290. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <https://dl.sciencesocieties.org/publications/cs/abstracts/22/2/CS0220020287>
- Gent M. 1998. Crop evolution, adaptation and yield: L.T. Evans. Cambridge University Press, UK, 1996. Hardback version published 1993. *Field Crops Research*. 55: 283–284. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257214432_Crop_evolution_a_daptation_and_yield_LT_Evans_Cambridge_University_Press_UK_1996_ISBN_0-521-29588-

[0 500 pp paperback UK 2295 US 4295 Hardback version published 1993 ISBN 0-521-22571-X UK 6500 US 10000](#)

- Gómez D, Fraschina J, Salines J, Vagliente C, Arce L, Rearte F, Bainotti C y Donaire G. 2013. Fecha de espigazón para máximo rendimiento de trigo (*Triticum aestivum* L.). En: Información técnica de trigo y otros cultivos de invierno, campaña 2013. INTA Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Santa Fe. Estación Experimental Agropecuaria Rafaela. Publicación Miscelánea 125: 33-36. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en: http://rafaela.inta.gov.ar/info/miscelaneas/125/misc125_inta-publicacion-trigo-2013.pdf
- Gomez-Macpherson H, Richards R. 1995. Effect of sowing time on yield and agronomic characteristics of wheat in south-eastern Australia. Australian Journal of Agricultural Research 46 (7):1381-1399. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201301511990>
- González F, Slafer G, Miralles D. 2003. Floret development and survival in wheat plants exposed to contrasting photoperiod and radiation environments during stem elongation. Functional Plant Biology 32(3):189–197. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/240506749_Floret_development_and_survival_in_wheat_plants_exposed_to_contrasting_photoperiod_and_radiation_environments_during_stem_elongation
- Hall A, Richards R. 2013. Prognosis for genetic improvement of yield potential and water-limited yield of major grain crops. Field Crops Research. 143:18-33. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429012001876>
- Hernández N, Soto F, Plana R. 2015. Comportamiento del crecimiento y rendimiento del cultivo del trigo (*Triticum aestivum* L.) en tres fechas de

siembra. Cultivos Tropicales, 36 (1): 83-88. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: http://scielo.sld.cu/pdf/ctr/v36n1/en_ctr11115.pdf

Hochman Z, Gobbett D, Holzworth D, McClelland T, van Rees H, Marinoni O, Navarro J, Horana H. 2012. Quantifying yield gaps in rainfed cropping systems: A case study of wheat in Australia. Field Crops Research 136: 85–96. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en: <http://yieldgapaustralia.com.au/wp-content/uploads/2016/03/Hochman-et-al-2012-Yield-Gap.pdf>

Hoffman E, Perdomo C, Fassana N, Ernst O, Berger A. 2017. Realidades y mitos en el manejo del nitrógeno en cereales de invierno en Uruguay. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 27: 3-7. Consultado 9 de noviembre de 2017. Disponible en: [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/4FA3887E0FCDB20F032581AD006582B8/\\$FILE/IAH%2027%20-%20Septiembre%202017.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/4FA3887E0FCDB20F032581AD006582B8/$FILE/IAH%2027%20-%20Septiembre%202017.pdf)

Hoffman E, Locatelli A, Fassana N, Viega L, Castro A. 2014. Una evaluación sobre la evolución de la oferta varietal de trigo en Uruguay en el siglo XXI. En: Seminario Internacional: 1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela: un valioso legado para el futuro. 2014. INIA La Estanzuela, Colonia. Uruguay. 99 – 111. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/st-241-2018.pdf>

Hoffman E, Castro A. 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. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: http://www.eemac.edu.uy/canque/joomdocs/canque032_hoffman.pdf

Hoffman E, Ernst O, Benitez A, Borghi E. 2003. Fecha de floración: efecto de la elección de variedades y su época de siembra. Cangüé 24: 21-22.

Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en:
http://www.eemac.edu.uy/cangue/joomdocs/Cangue_24/20-22.pdf

Khichar M, Ram N. 2007. Photothermal effect on growth and yield of wheat under different sowing environments and planting systems. *Indian Journal of Agricultural Research*. 41(2): 92-96.

Lacláú W, Rodríguez P. 2012. Efecto de la época de siembra sobre el rendimiento en trigo. relevamiento de chacras del litoral oeste. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 88 p. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en:
<https://www.colibri.udelar.edu.uy/jspui/bitstream/20.500.12008/1705/1/3800lac.pdf>

Lobell B, Cassman K, Field C. 2009. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annual Review of Environment and Resources*. 34: 179-204. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/224959750_Crop_Yield_Gaps_Their_Importance_Magnitudes_and_Causes

Luizzi D, Quincke M, Abadie T, Gatti I, Germán S. 2018. Cultivares. En: Germán, S, Luizzi D. (Eds.). 100 años de mejoramiento de trigo en INIA. La Estanzuela, Uruguay. INIA. 46-60. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en:
<http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/10977/1/INIA-100-anos-de-mejoramiento-de-trigo-en-INIA-La-Estanzuela.cap.5.p.45-60.pdf>

Manlla A, Castellarín J, Salvagiotti F. 2012. Rendimiento potencial de trigo y brechas de producción según genotipo y fecha de siembra. Análisis de dos años de experiencias en Oliveros (Santa Fe). *Para Mejorar la Producción* 47: 13-18. Consultado 9 noviembre 2017. Disponible en:
<https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-rendimiento-potencial-trigo-y-brechas-produccion-segn-.pdf>

- Mazzilli S, Ernst O, Sastre A, Terra G. 2015. Disponibilidad de nitratos en sistemas agrícolas sin laboreo y su relación con variables ambientales y de manejo. *Agrociencia* 19 (1): 97 – 104. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en: http://www.scielo.edu.uy/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2301-15482015000100015
- Mazzilli S, Kemanian A, Ernst O, Jackson R, Piñeiro G. 2014. Priming of soil organic carbon decomposition induced by corn compared to soybean crops. *Soil Biology and Biochemistry* 75: 273 – 281. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262306722_Priming_of_soil_organic_carbon_decomposition_induced_by_corn_compared_to_soybean_crops
- Miguez F H, Pérez AA, Frasco J, Zapiola M. 2013. Meta-analysis of nitrogen fertilization effects on wheat grain protein in Argentina. *Open Science Repository Agriculture*. [En línea] 1 de octubre de 2017. <https://pdfs.semanticscholar.org/c2d8/548761869672da2c76dd0bedd8f27c75d6f2.pdf>
- Miralles D. 2004. Consideraciones sobre ecofisiología y manejo de Trigo. INTA Rafaela. Información técnica de trigo. Campaña 2004. Publicación Miscelánea N° 101. 7p. Consultado 1 octubre 2017. Disponible en: http://rafaela.inta.gov.ar/info/miscelaneas/101/trigo2004_n1.pdf
- Montiel R. 2017. Efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento en grano y características agronómicas en trigo (*Triticum aestivum* L.). Tesis Ing. Agr. Córdoba, Argentina. Universidad Nacional de Córdoba, Facultad de Ciencias Agropecuarias. 18 p. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6029>
- Monzón J, Aramburú F, Andrade F, Grassini P. 2016. Rendimientos Potenciales y Brechas de Rendimiento en Argentina. En: Congreso

AAPRESID (24 °, 2016, Santa Fe, Argentina) Actas. Rosario. AAPRESID. Consultado 24 octubre 2017. Disponible en: https://nanopdf.com/download/monzon-rendimientos-potenciales-y-brechas-de-rendimiento-en_pdf

Palosuo T, Kersebaum K, Angulo C, Hlavinka M, Olesen J, Patil R, Ruget F, Rumbaur C, Takac J, Trnka M, Bindi C, Ewert F, Ferrise R, Mirschel W, Saylan B, Rötter R. 2011. Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe: A comparison of eight crop growth models. *European Journal of Agronomy*. 35: 103-114. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/233864049_Simulation_of_winter_wheat_yield_and_its_variability_in_different_climates_of_Europe_A_comparison_of_eight_crop_growth_models

Pittelkow CM, Linquist BA, Lundy ME, Liang XQ, van Groenigen KJ, Lee J, van Gestel N, Six J.; Venterea RT, van Kessel C. 2015. When does no-till yield more? A global meta-analysis. *Field Crops Research*. 183: 156–168. Consultado 27 octubre 2017. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429015300228?via%3Dihub>

Quincke M, Kohli MM. 2003. Progreso genético para rendimiento de grano en trigo de ciclo largo en Uruguay. En: MM Kohli, M Díaz, M Castro (Eds.). *Estrategias y metodologías utilizadas en el mejoramiento de trigo. Seminario Internacional (2001, La Estanzuela, Uruguay)*. Poster. La Estanzuela, Uruguay. CIMMYT-INIA. 287-289. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <https://repository.cimmyt.org/xmlui/bitstream/handle/10883/1255/76539.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rodríguez O, Lhamby JCB, Didonet AD, Marchese JA. 2007. Cincuenta años de mejoramiento de trigo en el sur de Brasil: la mejora del rendimiento y

los cambios asociados. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 42: 817-825. Consultado 18 de marzo 2019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2007000600008>

Rubio V, García A, Pereyra S. 2017. Impacto de la variabilidad climática en el cultivo de trigo. Revista INIA. 49: 13-16. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en: <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/6994/1/revista-INIA-49.p.13-16.pdf>

Sadras V, Cassman K, Grassini P, Hall A, Bastiaanssen W, Laborte A, Milne A, Sileshi G, Steduto P. 2015. Yield gap analysis of field crops – Methods and case studies. FAO Water Reports 41. 63 p. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i4695e.pdf>

Salinas A. 2015. Impacto de los factores ambientales en la definición de los rendimientos de los cultivos: Trigo, Resultados de la campaña 2013. Grupo Manejo de Cultivos INTA Manfredi. Engormix. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/impacto-factores-ambientales-definicion-t32673.htm>

Salvaghiotti F, Castellarín J, Miralles D, Pedrol H. 2009. Sulfur fertilization improves nitrogen use efficiency in wheat by increasing nitrogen uptake. Field Crop Research. 113: 170-177.

Sayre K, Rajaram S, Fischer R. 1996. Yield Potential Progress in Short Bread Wheats in Northwest Mexico. Crop Science 37(1): 36-42. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/250117718_Yield_Potential_Progress_in_Short_Bread_Wheats_in_Northwest_Mexico

Shatar T, Mc Bratney A. 2004. Boundary-line analysis of field-scale yield response to soil properties. Journal of Agricultural Science 142: 553–560. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en:

<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-agricultural-science/article/boundaryline-analysis-of-fieldscale-yield-response-to-soil-properties/5C2C74CA0C6D193CFB0AD8BDA0FD4B34>

Shearman V, Sylvester-Bradley R, Scott R, Foulkes M. 2005. Physiological Processes Associated with Wheat Yield Progress in the UK. *Crop Science* 45(1):175-185. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/279540107_Physiological_processes_associated_with_Wheat_Yield_Progress_in_the_UK

Sinclair T, Jamieson P. 2006. Grain number, wheat yield, and bottling beer: An analysis. *Field Crops Research*. 98. 60–67. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/257213716_Grain_number_wheat_yield_and_bottling_beer_An_analysis

Sinclair T, Horie T. 1989. Leaf Nitrogen, Photosynthesis, and Crop Radiation Use Efficiency: A Review. *Crop Science*. 29:90-98.

Slafer G. 2007. Physiology of determination of major wheat yield components. En: Buck H, Nisi J, Salomón N. *Wheat production in stressed environments. Developments in Plant Breeding*, 12: 557–565. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/1-4020-5497-1_68#citeas

Souto G, Rava C. 2018. Trigo y derivados: situación y perspectivas. En: MGAP-OPYPA (Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca –Oficina de Programación y Políticas Agropecuarias) *Anuario 2018*. Montevideo. 133-135. Consultado 18 de marzo 2019. Disponible en: http://www.mgap.gub.uy/sites/default/files/8_anuario_2018_-_trigo_y_derivados.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): 77-88. Consultado 18 de

marzo 2019. Disponible en:
<https://www.redalyc.org/pdf/2631/263149891007.pdf>

van Ittersum M, Cassman K, Grassini P, Wolf J, Tiftonell P, Hochman Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance—A review. *Field Crops Research*, 143: 4-17. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en:
<https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1766&context=agronomyfacpub>

van Oort P, Saito K, Dienga I, Grassini P, Cassman K, van Ittersum M. 2017. Can yield gap analysis be used to inform R&D prioritization? *Global Food Security*, 12: 109-118. Consultado 11 noviembre 2018. Disponible en:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2211912416300621>

van Wart J, Kersebaum K, Peng S, Milner M, Cassman K. 2013. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Research*, 143: 34-43. Consultado 9 noviembre 2018. Disponible en:
<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S0378429012004066?token=FB3DE0B3230C711BEDEF8F177BADFBC29F7087387D7D9134F82D3F921DF58EA179DDF07312AE8A82E9A5E201DC4406>

Wall P. 1997. Rendimiento y el cociente fototérmico ¿Una relación inevitable? En: Seminario Internacional: Explorando altos rendimientos de trigo. 1997 INIA La Estanzuela, Colonia. Uruguay. Proceedings. Colonia. INIA-CIMMYT. 47-57. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en:
<https://repository.cimmyt.org/bitstream/handle/10883/1240/68277.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Woyann L. 2018. Ganho genético e seleção em gerações iniciais e em linhagens de trigo por meio de modelos mistos. Tesis de doctorado em agronomia. Pato Branco, Brasil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 98p. Consultado 18 marzo 2019. Disponible en:
http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/3161/1/PB_PPGAG_D_Woyann%2C%20Leomar%20Guilherme_2018.pdf

6. ANEXO

Wheat (*Triticum aestivum*) yield in Uruguay: period 1997-2018

Editor

Name Surname,
Organization, city,
country.
ORCID

<https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Rendimiento de trigo (*Triticum aestivum*) en Uruguay: período 1997-2018

Correspondence

Name Surname,
e-mail

Received dd month yyyy
Accepted dd month yyyy
Published dd month
yyyy

Rendimiento do trigo (*Triticum aestivum*) no Uruguai: período 1997-2018

Citation

Author1, Author2,
Author3. Article title.
Agrociencia Uruguay
[Internet]. yyyy [cited dd
mmm yyyy];v(i):artíclenº.

Available from:

<http://agrocienciauruguay.y-uy/ojs/index.php/agrociencia/article/view/xx>

Godiño, M¹; Berger, A²

¹ Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Mesa Nacional de Trigo. Montevideo, Uruguay. ORCID <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>.

² Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), Estación Experimental INIA La Estanzuela, Colonia, Uruguay ORCID <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Abstract

An analysis of the productive potential of the country, enables to identify challenges and opportunities for improvement. The objective of this work was to study from an ecophysiological point of view, the main changes in Uruguayan productivity during 1997-2018 period and study the determinants of the achieved performance. The meta-analysis technique was applied to performance data of wheats, from experiments of the National Evaluation and the National Genetic Improvement Program. The increase in yield during the period was significant. New intermediate season cultivars yielded 31,5 % more than the control cultivars and those of the long season 20,4 % more as the result of genetic gain and improvement of agronomic practices. The average genetic progress in the period, determined as the difference between the 5 best-performing cultivars and a fixed control (INIA Tijereta) was 40,2 % for intermediate and 26,5 % for long season varieties. Regardless of the season, the variables that showed the greatest impact on the yield were: radiation and temperature in the critical period, rainfall in the emergency-flowering period, the sanitary treatment, fertilization and the effect of the year. The photothermal coefficient in the critical period was significant only for the intermediate season cultivars, reaffirming their greater dependence on the characteristics of this period. On the other hand, for the long season cultivars the extra variable of significance was the sowing date, confirming the importance that an early sowing date assures them enough foliar area to support the later stages.

Keywords: ecophysiology, genetic progress, potential yield, wheat, yield gap

Resumen

Analizar el potencial productivo del país, permite identificar desafíos y oportunidades para el sector triguero. El objetivo de este trabajo fue estudiar desde un punto de vista ecofisiológico los cambios ocurridos en la productividad de Uruguay en el período 1997-2018 y analizar las determinantes del rendimiento alcanzado. Se realizó un meta-análisis con información de trigos, de experimentos de la Red Nacional de Evaluación de Cultivares y del Programa de Mejoramiento Genético Nacional. El aumento de rendimiento producido en el período fue significativo. Los nuevos cultivares de ciclo intermedio asociados a nuevas tecnologías, rindieron un 31,5 % más que los testigos y los de ciclo largo un 20,4 % más. El progreso genético promedio en el período, determinado como la diferencia entre los 5 cultivares de mejor comportamiento y un testigo fijo (INIA Tijereta) fue de 40,2 % para los ciclos intermedios y de 26,5 % para los ciclos largos. Independientemente del ciclo, las variables que mostraron mayor incidencia en el rendimiento fueron: la radiación y la temperatura en el período crítico, la lluvia en el período emergencia-floración, la presencia de tratamiento sanitario, la fertilización y el efecto del año. El coeficiente fototermal en el período crítico resultó significativo solo para los ciclos intermedios, reafirmando la dependencia de estos materiales a las características del período. En cambio, para los ciclos largos la variable extra de significación fue la época de siembra, confirmando la importancia de que una época de siembra temprana les asegure suficiente área foliar para sustentar las etapas posteriores.

Palabras clave: brecha de rendimiento, ecofisiología, progreso genético, rendimiento potencial, trigo

Resumo

Analisar o potencial produtivo do país permite identificar desafios e oportunidades para o setor de trigo. O objetivo deste trabalho foi estudar, do ponto de vista ecofisiológico, as mudanças ocorridas na produtividade do Uruguai no período 1997-2018, e analisar os determinantes do desempenho alcançado. Uma meta-análise foi realizada com informações sobre o trigo, provenientes dos experimentos da Rede Nacional de Avaliação de Cultivares e do Programa Nacional de Melhoramento Genético. O aumento no rendimento produzido no período foi significativo. As novas cultivares de ciclo intermediário associadas às novas tecnologias renderam 31,5% a mais que as testemunhas e as cultivares de ciclo longo 20,4% a mais. O progresso genético médio no período, determinado como a diferença entre as 5 cultivares com melhor desempenho e um controle fixo (INIA Tijereta), foi de 40,2% para os ciclos intermediários e 26,5% para os ciclos longos. Independentemente do ciclo, as variáveis que apresentaram maior incidência no desempenho foram: radiação e temperatura no período crítico, chuva no período de emergência-floração, presença de tratamento sanitário, fertilização e efeito do ano. O coeficiente fototérmico no período crítico foi significativo apenas para os ciclos intermediários, reafirmando a dependência desses materiais nas características do período. Por outro lado, para os cultivares de ciclo longo, a variável extra significativa foi a época de plantio, confirmando a importância de uma época de plantio precoce para garantir a área foliar suficiente para suportar os estágios mais avançados do desenvolvimento.

Palavras-chave: ecofisiologia, lacuna de produtividade, progresso genético, rendimento potencial, trigo

1. Introduction

The projection of food production to achieve world food security towards the year 2050 shows the need to double the current food production. There is worldwide concern, because some of the most productive countries, that represent 25 % of the world's wheat supply, are showing reductions in their yield growth rates (Cassman et al., 2010; Chapagain y Good, 2015; Fischer et al., 2014). The performance of the different countries is measured through estimates of potential yield, water-limited yield potential, attainable yield and actual or commercial yield, and the difference between these parameters is used to estimate the technological gaps. There are several methods to estimate these yields, simulation models, indirect determinations with sequential comparisons, analysis of

the results of experiments carried out in different locations in long time series, which compare new cultivars with older cultivars (van Wart et al., 2013). Accurate estimates of these parameters, especially water-limited yield and attainable yield, as well as estimates of genetic progress are very useful for interpreting trends in the evolution of a country's yield (Cassman et al. 2010, Lobell et al. 2009). The study of yield evolution would not be complete without a study of the determinants of the behavior found. The expression of the yield of a wheat crop depends on its genetic, but also on the limitations imposed by environmental conditions (climate) and by management conditions. The duration of the different ontogenetic stages of wheat crop is regulated by 3 determining environmental factors: i) temperature, ii) photoperiod (or day length) and iii)

vernalization (cold hour requirements) (Abbate, 2004; Miralles, 2004; Fischer, 2015; Fischer, 1993; Salinas, 2015). Among the management factors, the nitrogen availability and the time and density of planting generally have a very important incidence (Abbate et al., 1995; Hoffman et al., 2003; Hoffman and Castro 2012, Hernández et al. 2015; Abbate et al., 2004). In Uruguay we have valuable information on the behavior of wheats from the trials of the National Evaluation and the National Genetic Improvement Program, therefore, the objective of this work was to systematize this information to analyze the evolution of yield and study from an eco-physiological point of view, the changes occurred and the determining factors of the performance achieved in the period 1997-2018.

2. Materials and Methods

2.1 An extensive review of published and unpublished data was carried out on a large number of trials from the National Institute for Agricultural Research (INIA-La Estanzuela) and the National Seed Institute (INASE) in the period 1996-2018. A database with information of the behavior in 13.378 experimental plots, planted with intermediate and long cycle cultivars, in 6 locations (La Estanzuela, Young, Dolores, Paysandú and 2 locations in Mercedes), was made. The information collected included: yield, cycle, location, fungicide use, sowing season, fertilization, as well as sowing, emergence, gleaning, flowering, physiological maturity and harvest dates. Based on these dates, the seed-emergence (SI-EM) period, emergence-spike (EM-SP) period, critical period of flowering -20 + 10 days (FL -20 + 10) period and spike-physiological maturity (SP- FM) period were calculated for each experimental plot individually. The climatic

variables: temperature, radiation and rain were adjusted to these periods, as well as the photothermal coefficient (Q) calculated according to Fischer, 1993. In order to know the progress in the yield and its variability, once the information was systematized, regressions and different meta-analyzes were carried out contrasting the performance of the 5 best cultivars per experiment, with the controls used in the experiment of the National Evaluation of Cultivars of Wheat (INIA-INASE). Meta-analyzes were also carried out to estimate genetic progress, but in this case, contrasting the behavior of the 5 best cultivars with a long-cycle fixed control (INIA Tijereta) that was present in most of the experiments. To explore the causes that promoted the progress of yield, and thus be able to determine which of them had highest incidence, a meta-regression was performed with the following covariates: fungicide (with / without), sowing season, year, fertilization (total dose), average temperature at planting (-5 + 10 days), average rain at planting (-5 + 10 days), average Q at EM - FL period, average Q at flowering -20 + 10 days period, average Q at FL - MF period, average radiation at EM - FL period, average radiation at critical period (flowering -20 + 10 days), radiation at FL - FM period, accumulated radiation at EM - FL period, accumulated radiation at FL -FM period, average temperature at critical period, accumulated rain at EM - FL period, accumulated rain at critical period and accumulated rain at FL - FM period. For both meta-analysis and meta-regression, the yield in Kg ha⁻¹ was used as the effect size to be analyzed, and the standard deviation as the measure of variability. The experiments were identified according to the location and the year in which they were carried out. The average yield data were grouped by presence or absence of fungicide, since one of the objectives of the

experiments of the National Evaluation of Wheat Cultivars (ENCT) is analyzing the sanitary behavior of the varieties, and therefore a part of them are performed without the application of fungicide. A random effects model was used since the sources of heterogeneity between trials needed to be considered. To perform the significance test, the Z distribution was used, because in all cases we worked with a large number of data sets. To estimate the value of tau squared (τ^2), the true variance between studies, the Der Simonian and Laird method was used. This method does not depend on any assumption about the distribution of random effects, so it is more robust. Statistical analysis was performed with InfoStat® version 9.0 (InfoStat Group, FCA, National University of Cordoba, Argentina) () and Comprehensive Meta-Analysis Version 3, (trial), (Biostat, Englewood, USA).

2.2 Transparency of data

Data not available: The data set that supports the results of this study is not publicly available.

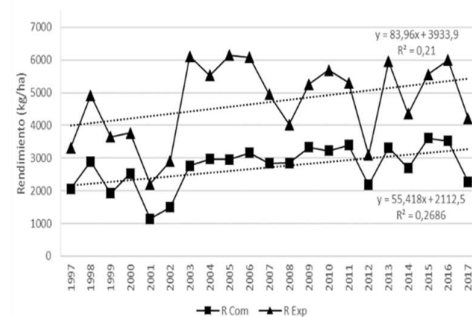
3. Results and discussion

3.1 Average experimental yield

The average experimental yield of wheat has grown in the period with a weak positive relationship ($p \leq 0.030$), at a rate of $84 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ (Figure 1), equivalent to 1.78% on a 4717 kg ha^{-1} of medium yield. In the average yield of the experiments, we can clearly differentiate two periods: one prior to 2003 where the average yields did not exceed 5000 kg ha^{-1} and another later where in most years this yield is exceeded, but with a production stagnation around 6000 kg ha^{-1} . The main explanation for this change in 2003 seems to be the varietal

replacement that occurred after two exceedingly difficult years due to the incidence of *Fusarium* spp. In these years (2001 and 2002), the climatic conditions during the period of ear and grain filling were a decisive factor for the occurrence of the epidemics, but there were also other factors that contributed to the scale of the problem, such as there were no cultivars with effective resistance to the disease and that the production systems had had a very important increase in the direct sowing area, favoring a greater volume of stubble and creating a conducive environment for the sporulation and reservoir of the fungus.

Figure 1. Commercial and experimental wheat yield in the period 1997-2017.



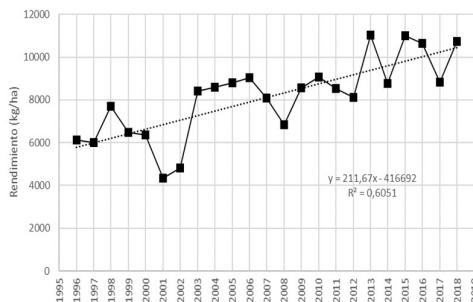
. In this situation, it was necessary to change towards varieties with better behavior, coming from some new nationally developed lines or materials that were mainly introduced from Argentina (Castro, 2019 pers. Comm.).

3.2 Experimental yield of the superior cultivars

The yield of the 5 best cultivars per experiment showed a sustained growth with an average positive relation ($p \leq 0.0001$), at a rate of $212 \text{ kg ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$, equivalent to 2.6% per year, considering 7898 kg ha^{-1} as the average yield (Figure 2). At the end of the period the yield increase seems to be stabilizing. These results confirm the trend found by Berger et al. 2015, who analyzed

the period 1992-2014 and mention that the increase in yields went from a range of 2000-5000 kg/ha at the beginning of the period, to a range between 3500 and 8500 kg/ha at the end. New cultivars with higher yield potential, may be the determinant of this change, specially those of European origin that for several years were at the top of the yield ranking and, at the end of the period, also the incorporation of high yield features in local lines. In studies by Hoffman et al. (2014) it was also possible to observe an increase in yield of 185 kg of grain ha⁻¹ year⁻¹ in the upper tertile of the cultivars evaluated in the Wheat Cultivars Characterization Program (WCCP) of the Faculty of Agronomy, between 2000 and 2013, which is equivalent to 2.7 % annual progress. This work concludes that there has indeed been progress in the potential of elite cultivars in that period, and that genotypes with increasing potential are being planted commercially.

Figure 2. Average yield of the 5 best cultivars per experiment per year.



However, this growing potential is not being reflected in the evolution of crop yields on a national scale. The inability of the system to take advantage of genetic advancement is likely to be associated with the deterioration of productivity in the environment being offered to the new genotypes. Separating the experiments by year and location, the comparison in a meta-analysis of the 5 best cultivars with the controls used in the

National Evaluation of Cultivars (ENCT INIA-INASE), showed that, on average in the 20-year period, the The 5 best cultivars yielded 1,527 kg ha⁻¹ more than the controls (p≤0,0001). The variability between years was very considerable and it could be estimated that 71.5 % of the total variance corresponds to real variance, not attributable to experimental error. The meta-analysis grouping by presence or absence of fungicide also showed significant differences between groups (Table 1).

Table 1. Increase in the average Yield of the 5 best cultivars per experiment in relation to the ENCT controls, in trials with and without the presence of sanitary treatment.

	Con Fungicida Kg/ha	%	Sin Fungicida Kg/ha	%
Ciclo intermedio	1657	28,8	1455	32,4
Ciclo largo	1066	19,9	944	20,8

Given that in this case the comparison is made with controls that change over time, the aforementioned differences would give us an idea of the evolution of the wheat crop potential yield in the period. To get a better idea of the genetic progress, the yield of the 5 best cultivars per year and locality was compared with a fixed control (INIA Tijereta), after verifying the behavior of this control in the period. This long cycle material was developed locally, it was released in 1997, and it had a wide diffusion due to its yield, production stability and great flexibility in the planting season. It was used commercially until 2013, remaining as a long-cycle control in ENCT (INIA-INASE) experiments to date (Luizzi et al., 2018). Both in experiments with and without

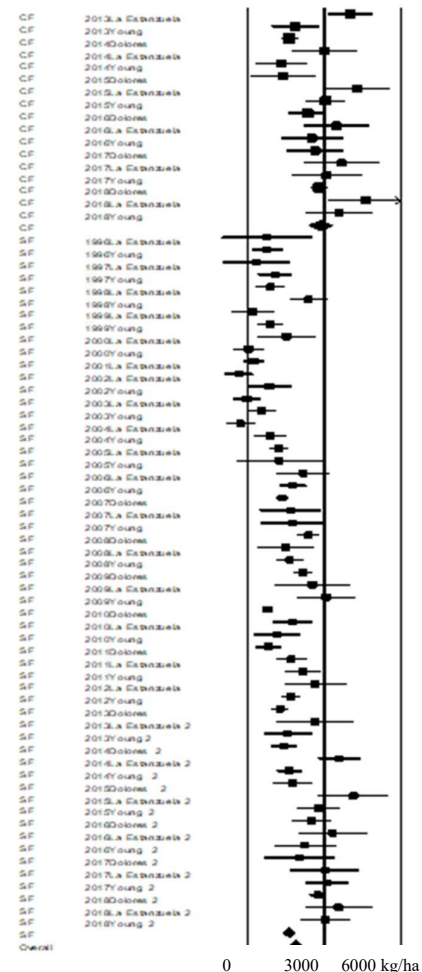
fungicide, the regression of the yield of INIA Tijereta as a function of time did not have a significant adjustment, indicating a stable behavior of the variety, that shows it is an adequate control to determine the genetic progress. In the period there has been an average genetic progress of 1866 kg ha⁻¹ (Figure 3). Grouping by presence or absence of fungicide, the differences in both intermediate and long cycles are significant (Table 2).

Table 2. Genetic progress of the 5 best cultivars per experiment in relation to INIA Tijereta, in trials with and without the presence of sanitary treatment.

	Con Fungicida Kg/ha	%	Sin Fungicida Kg/ha	%
Ciclo intermedio	2821	60,8	1604	36,4
Ciclo largo	1463	28,1	1060	24,0

The presence of the fungicide allows a better expression of the potential of the cultivars and therefore provides a more approximate idea of the genetic progress that in the intermediate cycles is quite considerable, especially if we take into account that we are managing averages and therefore there are cultivars that far exceed this yield difference value. Although the differences of the 5 best cultivars with INIA Tijereta are important, it must be considered that intermediate cycle materials are being compared with a long cycle material, and these do not necessarily respond in the same way to year-on-year variations in the environmental conditions. Regardless of this, having a material present in all experiments is a very good benchmark and for practical purposes this overestimation or underestimation is of minor importance.

Figure 3. Difference between the average yield of the 5 best intermediate cycle (IC) cultivars and the average yield of INIA Tijereta.



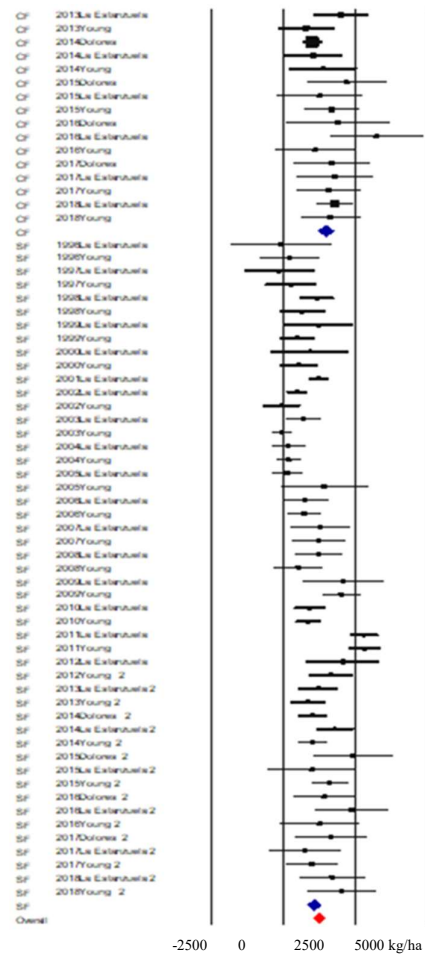
For long cycle cultivars (LC), the average genetic progress in the period was 1230 kg ha⁻¹ (Figure 4). The difference of the intermediate cycles with INIA Tijereta is greater than the difference of the long cycles with INIA Tijereta, and the evolution of the differences towards 2500 and 3000 kg are clearer in the intermediate cycles and more erratic in the long cycles. The possible reason for this, is that long cycles are mostly regional originated materials (national, from Argentina or Brazil) and

therefore more adapted and stable in their behavior. On the other hand, the intermediate cycle cultivars are mostly European, have remarkably high yields, but may be more sensitive to climatic events. Quincke and Kohli (2003) previously estimated the genetic progress of the INIA Wheat Improvement Program in the period 1981-2001, in a specifically designed experiment with long-cycle materials and high fertility conditions. The results showed a genetic progress of 90 kg ha⁻¹ year⁻¹ equivalent to 2.9% per year with sanitary treatment and 72 kg ha⁻¹ year⁻¹ equivalent to 2.7% per year without sanitary treatment. Hoffman et al. (2014) studied the performance (without cycle discrimination) of the cultivars of the elite group of the Wheat Cultivars Characterization Program (PPCT) of the Faculty of Agronomy, in 2013. These cultivars with disease control and optimal population adjustment yielded 2800 kg ha⁻¹ higher than the controls without disease control or population adjustment (8042 vs. 5274; 52% higher). This difference represents the joint effect of genetic improvement, management and exploitation of the genotype x environment interaction through the adjustment of management to the genotype. The effect of cultivar renewal, which gives an idea of genetic progress in this elite group (without considering health or population adjustment) was 22% with sanitary treatment and 33% without it.

3.3 Variables associated with the increase in yield in the period

Both for intermediate and long cycles cultivars, the variables that showed the highest incidence in the yield performance were: radiation and temperature in the critical period, rain in the emergency-flowering period, the presence of sanitary treatment, fertilization and the effect of the year.

Figure 4. Difference between the average yield of the 5 best long cycle (LC) cultivars and the average yield of INIA Tijereta.



For the intermediate cycles, the extra variable that was significant was the photothermal coefficient (Q) in the critical period. This is surely related to the fact that the performance of the short cycles is more dependent on what happens in the critical period and not so dependent on what happens in the vegetative period, since they have the ability to accumulate leaf area index in less time. For the intermediate cycles and working only with La Estanzuela location, the best model fit in the meta-regression achieved 57% and included the following climatic variables linked:

photothermal coefficient (Q flowering -20 + 10 days), average radiation in the critical period (R), temperature in the critical period (T) and accumulated rain from emergence to flowering (Rain). In addition, it also included the effect of the year (Y) of the fungicide (F and WF) and of the fertilization (F).

Modelo 1

$$Y = -247733,2 - 3799,5 Q + 0,0006 R - 1186,3 T + 1,7 \text{ Rain} + 134,9 Y - 10,0 F - 1151,1 \text{ WF}$$

The climatic variables had the greatest weight when explaining the variability in the yields (40%). As the climatic variables were present in the model, the contribution of the year effect decreased to 4% and the fungicide and fertilization explained 3 and 10% respectively of the remaining variability. Another curious aspect is that the Q appears in the model and also the variables that determine it (radiation and temperature). The moment any of these 3 variables are removed from the model, the adjustment is immediately reduced. This could be indicating that radiation and temperature may also be interacting with other variables independently. Both radiation and temperature behave in the expected way, that is, as the radiation increases, the yield increases due to greater production and partitioning of assimilates and greater accumulation of dry weight in the spike. The temperature exhibits the inverse behavior, as the temperature increases, the yield decreases due to the shortening of the growth phase and less accumulation of dry weight in the spike. Rubio et al. (2017) working with yield potentials trials in 21 years, in the same location of La Estanzuela, found that high temperatures in the critical period, with maximums greater than 23 °C, caused 24%

yield reductions. The climatic variable related to the availability of water in this model is rainfall in the emergency - flowering period. These results contrast with the studies of several authors that have suggested that wheat is more sensitive to water stress from the start of stem elongation to milky grain (Hoffman et al., 2014; Fernández et al., 2008). The results obtained could be indicating that perhaps an adequate availability of water that allows the initiation of the stem elongation and the critical period in good conditions, favoring a high proportion of tillers that evolve to ears, may be an important base component for future stages of yield determination. In agreement with this, Fernández et al. (2008) in Santa Fé, Argentina, mention that the adequate availability of water allows the potential yield to be reached, particularly if there are no limitations until the beginning of the ears growth period. The fertilization variable in the model does not have the expected behavior, as the nitrogen units per hectare increase, there is a tendency to yield decrease. The possible reason for this behavior is that fertilization does not necessarily reflect the availability of nitrogen in the experiment, it only reflects how much nitrogen was needed to cover the estimated requirements. For this reason, low doses indirectly indicate a favorable soil or cultivation situation in which little addition of extra N was required. For long cycles, the significant extra variable was the sowing time. This is not surprising, since it has been well studied that in these cultivars the importance of an early sowing season is greater, because they need a reasonable dry matter accumulation period before entering the reproductive state. The best model fit (analog R² = 0.53) included the variables: radiation (R) and temperature (T) in the critical period, rain (Rain) in the emergency-flowering period, and the effect of the year

(Y), fungicide (F or WF), fertilization (F) and sowing date (SD).

Modelo 3

$$Y = -59163,1 + 0,0005 R - 866,1 T - 2,28 \text{ Rain} - 1413,2 \text{ si F} + 321,2 \text{ si SD1} + 678,1 \text{ si SD2} + 35,7 Y + 6,5 F$$

The most important variables in this case were the fungicide, that explained 36% of the variability, the temperature in the critical period, which explained 10%, and the fertilization that explained 12%. The photothermal coefficient (Q) was not significant in the performance of long cycles, despite the fact that the variables that determine it were significant (R y T). The intermediate and early sowing dates allowed a higher yield. Several authors have been able to demonstrate that the yield of long cycle cultivars is especially sensitive to the delay of the sowing date. The key element in long cycle cultivars is the length of the vegetative period that is positively and significantly correlated with two components of grain yield: the number of grains per spike and the weight of the grain. (Gebeyehou et al. 1982, Menéndez and Satorre, cited by Montiel, 2017). Associated with the duration of the cycle is the production of biomass, early plantings produce greater biomass and in low-growing cultivars this can translate into a better partition of assimilated to the spike and therefore higher yield (Gomez-Macpherson and Richards, 1995).

4. Conclusions

In the 20-year period, there has been a significant increase in yield with respect to the controls used by the ENCT, which on average is 1527 kg ha⁻¹ for the intermediate cycles and 972 kg ha⁻¹ for the long cycles. The average genetic progress in the last 10-year period is 2821 kg ha⁻¹ for the intermediate cycles and 1463 kg ha⁻¹ for

the long cycles. The management variables that have the greatest impact on the yield are the fungicide treatment and the fertilization. The planting season only showed incidence in the long cycles. The climatic variables, radiation and temperature, have a greater incidence on the critical period, determining the Q. Outside the critical period the only variable that was significant was the rain in the EM-FL period. The Q affects the yield of the intermediate cycles only in the critical period.

Author contribution statement

MG y AB, writing and edition, interpretation of results, data and statistical analysis.

References

1. Cassman K, Grassini P, Wart J. Crop Yield Potential, Yield Trends, and Global Food Security in a Changing Climate. In: Rosenzweig C, Hillel D, editors, Handbook of Climate Change and Agroecosystems: Impacts, Adaptation, and Mitigation. Londres: Imperial College Press; 2005. p.37-51.
2. Chapagain T, Good A. Yield and Production Gaps in Rainfed Wheat, Barley, and Canola in Alberta. *Front. Plant Sci.* 2015; (990): 1-10.
3. Fischer R, Byerlee D, Edmeades G. Crop yields and global food security: will yield increase continue to feed the world? *ACIAR Monograph.* 2014. 158. 634p
4. van Wart J, Kersebaum K, Peng S, Milner M, Cassman K. Estimating crop yield potential at regional to national scales. *Field Crops Res.* 2013;143: 34-43.
5. Lobell B, Cassman K, Field C. Crop Yield Gaps: Their Importance, Magnitudes, and Causes. *Annu. Rev. Environ. Resour.*

2009; 34: 179-204.

6. Abbate P. Ecofisiología de trigo: aspectos prácticos para el manejo del cultivo. In: XII Congreso Nacional de AAPRESID: La hora del empowerment; 2004 Ago 10-13; Rosario, Argentina. Apresid. 2004;121-127.

7. Miralles D. Consideraciones sobre ecofisiología y manejo de Trigo. INTA Rafaela. Información técnica de trigo. Campaña 2004. Publicación Miscelánea N° 101. 2004; 7p.

8. Fischer R. Definitions and determination of crop yield, yield gaps, and of rates of change. *Field Crops Res.* 2015; 182: 9–18.

9. Fischer R. Irrigated spring wheat and timing and amount of nitrogen fertilizer. II. Physiology of grain yield response. *Field Crops Research.* 1993; 33: 57-80.

10. Salinas A. Impacto de los factores ambientales en la definición de los rendimientos de los cultivos: Trigo, Resultados de la campaña 2013. [Internet]. 2015 [cited 2019 Mar 18]; Available from: <https://www.engormix.com/agricultura/articulos/impacto-factores-ambientales-definicion-t32673.htm>

11. Abbate P, Andrade F, Culot J. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *J. Agric. Sci.* 1995;124(3): 351-360.

12. Hoffman E, Ernst O, Benitez A, Borghi E. Fecha de floración: efecto de la elección de variedades y su época de siembra. *Cangüé.* 2003; 24: 21-22.

13. Hoffman E, Castro A. Cambios en la fecha de siembra de los cultivos de invierno en Uruguay; implicancias sobre el rendimiento y el riesgo. *Cangüé.* 2012;

32:16-21.

14. Hernández N, Soto F, Plana R. Comportamiento del crecimiento y rendimiento del cultivo del trigo (*Triticum aestivum* L.) en tres fechas de siembra. *Cultivos Tropicales.* 2015; 36 (1): 83-88.

15. Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CW. InfoStat versión 2015. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. [Internet]. 2015 [cited 2019 Mar 18]; Available from: <http://www.infostat.com.ar>

16. Borenstein M, Hedges L, Higgins J, Rothstein H. *Comprehensive Meta-Analysis Version 3.* Biostat, Englewood, NJ. [Internet]. 2015 [cited 2019 Mar 18]; Available from: https://www.meta-analysis.com/pages/why_do.php?cart=B2D94150685

17. Hoffman E, Locatelli A, Fassana N, Viega L, Castro A. Una evaluación sobre la evolución de la oferta varietal de trigo en Uruguay en el siglo XXI. In: Germán S, Quincke M, Vázquez D, Castro M, Pereyra S, Silva P, García A, editors. *Seminario Internacional: 1914-2014, un siglo de mejoramiento de trigo en La Estanzuela: un valioso legado para el futuro.* 2014 Ago 27-29. Colonia, Uruguay. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA. 2018. 99-111.

18. Luizzi D, Quincke M, Abadie T, Gatti I, Germán S. Cultivares. In: Germán, S, Luizzi D. editors. *100 años de mejoramiento de trigo en INIA. La Estanzuela. Unidad de Comunicación y Transferencia de Tecnología del INIA.* 2018. p. 46-60.

19. Quincke M, Kohli MM. Progreso genético para rendimiento de grano en trigo de ciclo largo en Uruguay. En: MM Kohli, M Díaz, M Castro, editors. *Seminario Internacional: Estrategias y*

metodologías utilizadas en el mejoramiento de trigo. 2001 oct 8-11; La Estanzuela, Colonia. CIMMYT- INIA. 2003; 287-289.

20. Rubio V, García A, Pereyra S. Impacto de la variabilidad climática en el cultivo de trigo. Revista INIA. 2017; 49: 13-16.

21. Fernández M, Zingaretti O, Brevedad R, Mirassón H, Faraldo M, Ferrero C, Dedurana J, Fioretti M. Efecto de la época de siembra y el genotipo sobre el rendimiento de trigo y sus componentes en el oeste de la región semiárida pampeana central. In: INTA–UNLPAM, editors. VII Congreso Nacional del Trigo. 2008 Jul 2-4; Santa Rosa La Pampa; LAPAM. 2008. p.1-5.

22. Gebeyehou G, Knott D, Baker R. Relationships among durations of vegetative and grain filling phases, yield components, and grain yield in durum wheat cultivars. *CropSci*. 1982. 22:287-290.

23. Montiel R. Efecto de la fecha de siembra sobre el rendimiento en grano y características agronómicas en trigo (*Triticum aestivum* L.). [graduate's thesis]. Montevideo (UY): Universidad de la República, Facultad de Agronomía; 2017 [cited 2019 Mar 18]. 18 p. Available from: <https://rdu.unc.edu.ar/handle/11086/6029>

24. Gomez-Macpherson H, Richards R. Effect of sowing time on yield and agronomic characteristics of wheat in south-eastern Australia. *Aust. J. Agric*. 46 (7):1381-1399.