



*Universidad Nacional de Córdoba  
Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Escuela para Graduados*



---

**EFFECTO DE LA SELECCIÓN RECURRENTE SOBRE EL  
COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO E INDUSTRIAL EN  
TRIGO CULTIVADO BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE  
LABRANZA**

**Ricardo Héctor MAICH**

**Tesis**

**Para optar al grado Académico de  
Doctor en Ciencias Agropecuarias**

**Córdoba, 2017**

**EFFECTO DE LA SELECCIÓN RECURRENTE SOBRE EL  
COMPORTAMIENTO AGRONÓMICO E INDUSTRIAL EN  
TRIGO CULTIVADO BAJO DISTINTOS SISTEMAS DE  
LABRANZA**

**Ricardo Héctor MAICH**

**Comisión Asesora de Tesis**

**Director:** Dr. Alberto Edel León

**Asesores:** Dra. Susana Hang

Dr. Andrés Ravelo

**Tribunal Examinador de Tesis**

Dra. Ana Clara Pontaroli .....

Dr. Héctor Paccapelo .....

Dra. Susana Hang .....

*Agradecimientos*

Al Dr. Honoris Causa Julio Alejandro Di Rienzo

## **RESUMEN**

El objetivo general de esta tesis doctoral fue el de analizar los cambios producidos a nivel de variables agronómicas e industriales en trigo sujeto a un esquema de selección recurrente (SR). Durante el bienio 2011-2012, 44 familias, cuatro por cada población evaluada ( $C_0$  al  $C_{10}$ ), fueron cultivadas en siembra convencional (SC) y en siembra directa (SD). A causa de la restricción impuesta por el manejo de lotes, se recurrió a un diseño en bloques completos con dos repeticiones ubicados en cada sistema de manejo. Se determinó días a espigazón, altura de la planta, rendimiento en grano (G) y en biomasa aérea y peso de mil granos (PG). Se estimaron índice de cosecha (IC) y número de granos por metro cuadrado (NG). A partir de una muestra de diez espigas se determinó el número de espiguillas y granos por espiga. Se midió el rastrojo remanente, a partir de éste se estimó el contenido de cenizas expresado en base a la cantidad rastrojo incinerado. Para estimar el porcentaje de carbono se partió de la suposición de que el 50% de la materia orgánica es carbono. Se consideraron como pruebas predictivas de calidad industrial al porcentaje de proteínas (PROT), la capacidad de retención de ácido láctico (SRC-lac) y el índice de sedimentación en dodecil sulfato de sodio (IS-SDS). La información fue analizada estadísticamente mediante una regresión lineal mixta. Para el análisis de las relaciones entre G, sus componentes y los parámetros de calidad se usó el coeficiente de correlación de Spearman. Cuando el material se cultivó en SC las pendientes resultaron significativamente distintas de cero para G, IC, NG, el número de espiguillas y granos por espiga. Cuando el material se evaluó en SD solo se constataron tendencias significativas para el número de espiguillas y granos por espiga. Con el transcurrir de los ciclos de selección el porcentaje de cenizas aumentó cuando el material se evaluó en SC y disminuyó en SD. A lo largo de los diez ciclos de SR evaluados, el porcentaje de carbono en el rastrojo disminuyó en SC a la vez que aumentó en SD. Circunscribiendo el análisis al sistema de labranza donde se constató un progreso significativo para G (SC), PROT se asoció negativamente con G y sus respectivos componentes (IC, PG y NG). La prueba IS-SDS hizo lo propio con PG; mientras que la prueba SRC-lac se asoció positivamente con G, IC, PG y NG. La medición simultánea en SC y SD del progreso genético luego de diez ciclos de SR obtenidos en SC, muestra un avance significativo solo cuando la evaluación del material se condujo en SC. El incremento en el contenido de cenizas observado en SC, en simultáneo con el progreso genético para G, se explica por el mayor consumo de agua en los ciclos más avanzados de SR. Al igual que lo acontecido con las cenizas, el porcentaje de carbono en el rastrojo en SC disminuyó concomitantemente con el aumento en G, producto de la removilización de las reservas a los granos. En SC y al cabo de diez ciclos de SR el progreso logrado para G estuvo acompañado por una merma en PROT. Sin embargo, en los ciclos de selección más avanzados esta disminución fue compensada por una mejor calidad proteica.

**PALABRAS CLAVE:** trigo, progreso genético, rendimiento, proteína, sistema de labranza.

## **ABSTRACT**

The general objective of this doctoral thesis was to determine the change for agronomical behavior and grain quality through ten cycles of recurrent selection (RS) in bread wheat. During two seasons (2011 and 2012) the 44 S-derived families (four/C<sub>0</sub> to C<sub>10</sub> populations) were evaluated under conventional (CT) and non tillage systems (NT). Because of aleatorization restriction, imposed by the tillage practices, two replicates in complete blocks were allocated within each field. Days to anthesis, plant height, grain (G) and biomass yield and 1000-grain weight (GW) were determined. The grain number per m<sup>2</sup> (GN) and harvest index (HI) was also estimated. From a random sample of 10 tillers the spikelet per spike and grains per spike were measured. Straw dry weight was measured. Ash content (%) was expressed on dry mass basis. In order to estimate the carbon content, we based our calculation on the assumption that organic matter is 50% carbon. Flour protein content (PROT), sodium dodecyl sulphate sedimentation (IS-SDS) and lactic acid SRC (LASRC) were considered as end-use quality predictive tests. A linear mixed model (regression) was fitted to the experimental data. The Spearman correlation coefficient was used to measure the relationships among yield, its components and grain quality parameters. The slopes, under CT, were significant greater than zero for G, HI, GN, spikelet per spike and seeds per spike. Under NT spikelet per spike and seeds per spike showing slopes significantly greater than zero. The ash percentage increased under CT, but decreased under NT in response to the number of selection cycles. Carbon content decreases under CT, but increases under NT. Within the context of CT, flour protein content was negatively associated with G, HI, GW and GN agronomic variables. The IS-SDS has a negative association with GW; meanwhile, LASRC associated positively with G, HI, GW and GN agronomic variables. The concurrent evaluation in CT and NT soil managements of ten cycles of a RS program performed under CT confirmed the occurrence of a significant genetic progress only under CT. The observed increase for straw ash content, according with the genetic progress for G obtained under CT, would be related to the highest water consumption in the more advanced RS cycles. Consistent with these results, the percentage of straw carbon content decreased concomitantly with the genetic progress for G, as a result of the mobilization of reserves to the grains. Confining the discussion to the CT results, after ten cycles of recurrent selection the highest grain yield achieved was accompanied by a decrease in protein percentage. However, the decrease in the percentage of protein in more advanced selection cycles was offset by an improvement of its quality.

**KEY WORDS:** wheat, genetic progress, grain yield, grain protein, soil management.

## PRÓLOGO

En plena dictadura militar (1980) partí hacia Europa con el apoyo de mi tía Elvira que hizo las veces de mecenas. En primera instancia recaí en Inglaterra donde me perfeccioné en el habla inglesa, para luego partir a Italia donde un conocido de Elvira había logrado una entrevista con el responsable de la Sezione di Fiorenzuola d'Arda (Piacenza) el Dr. Michelle Stanca. En la Universidad Estatal de Milán obtuve el título de Especialista en Genética Aplicada con la defensa de la tesis titulada "Selección recurrente en cebada (*Hordeum vulgare* L.) para el desarrollo de poblaciones sintéticas" bajo la dirección del Prof. Dr. Ercole Ottaviano. Recuerdo las palabras del Prof. Ottaviano en la época que comenzaba a tener auge la genética molecular cuando, palabras más, palabras menos, me sugería que en vez de elegir como tema de tesis lo molecular me inclinase por el mejoramiento genético mediante el uso de la selección recurrente en plantas autógamas. El argumento en el que basó su sugerencia fue que al regresar a Argentina la infraestructura que necesitaría para continuar con la selección recurrente sería mínima. No se equivocó. De vuelta al país (1985) di inicio a un programa de selección recurrente en trigo para lo cual utilicé como progenitores a dieciséis variedades comerciales en uso y en desuso. Para brindar una idea de la base de germoplasma inicial, la variedad más vieja databa del año 1954 (Olaeta Artillero) y la más nueva del año 1980 (Las Rosas INTA). A lo largo de los treinta años transcurridos desde el comienzo del programa de mejoramiento se modificó el criterio de selección, para volver nuevamente al rendimiento en grano; se abandonó la siembra convencional, para adoptar la siembra directa; se realizaron estudios moleculares referidos a las gluteninas de alto peso molecular (HMG); como así también se evaluó la calidad industrial de la harinas llegando a la panificación experimental. Paralelamente se iniciaron otros programas de selección recurrente en los que se recombina el germoplasma por así decirlo "nativo" con materiales comerciales, o se recombinan entre sí sólo materiales comerciales. Desde 1985 la evaluación y selección del material se lleva a cabo ininterrumpidamente en el Área experimental del Campo Escuela de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (UNC). Hacia finales de los '90 comenzaron a divulgarse los resultados obtenidos en los programas de mejoramiento genético vegetal en revistas nacionales e internacionales, haciendo principalmente hincapié en la estimación de heredabilidades realizadas, tal de determinar cuál criterio de selección resultaba más eficiente. En el 2007 se publicaron los últimos resultados correspondientes a seis ciclos de selección recurrente evaluados a lo largo de un trienio en siembra convencional. En esa ocasión no se obtuvo un progreso genético para el rendimiento en grano. A partir del ciclo de selección recurrente número diez el suelo comenzó a manejarse en siembra directa y decidí inscribirme (año 2011) al Doctorado en Ciencias Agropecuarias que se ofrece en la Escuela de Graduados de la Facultad. El doctorarme a los 60 años no surgió de presión alguna, tenía en claro quiénes serían los integrantes de

mi comisión y el tema de tesis. También quería honrar a quienes me acompañan en la empresa con capítulos en los que se tratan temas de su competencia. Así surgieron los cuatro capítulos que componen la Tesis. El segundo, publicado en la revista *Cereal Research Communications* en el volumen 42(3): 525-533 (2014) en coautoría con el Dr. Julio Di Rienzo, aborda exclusivamente el análisis de variables agronómicas. En el capítulo tres, publicado en la revista *Cereal Research Communications* 45 (1): 146-153 (2017) en coautoría con los Dres. Alberto León (Director de Tesis), María Eugenia Steffolani y Julio Di Rienzo, se desarrolla el tema de la asociación entre variables agronómicas y aquellas vinculadas a la calidad industrial de las harinas. Finalmente en el cuarto capítulo, a publicarse en la revista *Cereal Research Communications* en el volumen 45 (2) (2017) en coautoría con los Dres. Susana Hang (Asesora de Tesis) y Julio Di Rienzo, se analizan los cambios en el porcentaje de carbono y de cenizas en el rastrojo al cabo de diez ciclos de selección recurrente. Los diez ciclos de selección recurrente insumieron veinte años de vida, el tiempo suficiente para completar de tres a cuatro carreras de grado, el tiempo suficiente para comprobar que las leyes de Mendel se cumplen, el tiempo suficiente para traer tres hijos a la vida, el tiempo suficiente para fortalecer la perseverancia y el tiempo suficiente para enamorarme aún más de la profesión de ingeniero agrónomo.

## TABLA DE CONTENIDO

### CAPÍTULO 1

Efecto de la selección recurrente sobre el comportamiento agronómico e industrial en trigo cultivado bajo distintos sistemas de labranza

Introducción	1
Hipótesis general	4
Hipótesis	4
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Bibliografía	5

### CAPÍTULO 2

Interacción genotipo x sistema de labranza en un programa de selección recurrente en trigo

Resumen	7
Introducción	7
Materiales y Métodos	8
Resultados	10
Discusión	11
Bibliografía	25

### CAPÍTULO 3

Asociación entre caracteres de interés agronómico e industrial en trigo (*Triticum aestivum* L.) al cabo de diez ciclos de selección recurrente

Resumen	29
Introducción	30
Materiales y Métodos	31
Resultados	32



Discusión	33
Bibliografía	37

#### CAPÍTULO 4

Variaciones en la producción de rastrojo y su contenido en cenizas y carbono luego de diez ciclos de selección recurrente en trigo cultivado en siembra convencional y siembra directa

Resumen	39
Introducción	40
Materiales y Métodos	41
Resultados	43
Discusión	44
Conclusiones	45
Bibliografía	50

CONCLUSIONES GENERALES	53
------------------------	----

## LISTAS DE TABLAS

Tabla 2.1: Características del suelo en las dos condiciones de manejo (LC=labranza convencional, SD=siembra directa)

14

Tabla 2.2: Resumen de p-valores para las hipótesis de pendientes iguales a cero (primeras dos columnas de la tabla) y para la diferencia de ordenadas al origen (tercera columna) de las rectas de regresión de cada característica en el número de ciclos de selección recurrente bajo labranza convencional y siembra directa.

14

Tabla 3.1. Coeficientes de correlación de Spearman y sus correspondientes p-valores entre el rendimiento y sus componentes y parámetros de calidad, bajo siembra convencional.

35

Tabla3.2. Coeficientes de correlación de Spearman y sus correspondientes p-valores entre el rendimiento y sus componentes y parámetros de calidad, bajo siembra directa.

35

## LISTAS DE FIGURAS

- Figura 2.1. Cambios en el rendimiento en grano ( $\text{g m}^{-2}$ ) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 15
- Figura 2.2. Cambios en el rendimiento en biomasa aérea ( $\text{g m}^{-2}$ ) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 16
- Figura 2.3. Cambios en el índice de cosecha (%) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 17
- Figura 2.4. Cambios en el número de granos por metro cuadrado respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 18
- Figura 2.5. Cambios en el peso de mil granos (g) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 19
- Figura 2.6. Cambios en el número de espiguillas por espiga respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 20
- Figura 2.7. Cambios en el número de granos por espiga respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 21
- Figura 2.8. Cambios en la altura de la planta (cm) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 22
- Figura 2.9. Cambios en el número de días desde la siembra hasta el espigazón respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos). 23
- Figura 4.1: Contenido de cenizas (%) versus número de ciclos de selección recurrente. Círculos negros y grises corresponde a siembra convencional y directa respectivamente. Líneas sólidas y punteadas son las correspondientes rectas de regresión para siembra convencional y directa respectivamente.  $Y_c$  e  $Y_d$  son las ecuaciones de rectas de regresión estimadas para siembra convencional y directa respectivamente. 45
- Figura 4.2: Contenido de carbono (%) versus número de ciclos de selección recurrente. Círculos negros y grises corresponde a siembra convencional y directa respectivamente. Líneas

sólidas y punteadas son las correspondientes rectas de regresión para siembra convencional y directa respectivamente.  $Y_c$  e  $Y_d$  son las ecuaciones de rectas de regresión estimadas para siembra convencional y directa respectivamente. 46

Figura 4.3: Carbono secuestrado por unidad de área ( $\text{g m}^{-2}$ ) versus número de ciclos de selección recurrente. Círculos negros y grises corresponde a siembra convencional y directa respectivamente. Líneas sólidas y punteadas son las correspondientes rectas de regresión para siembra convencional y directa respectivamente.  $Y_c$  e  $Y_d$  son las ecuaciones de rectas de regresión estimadas para siembra convencional y directa respectivamente. 47

Figura 4.4: Producción de rastrojo por unidad de área ( $\text{g m}^{-2}$ ) versus número de ciclos de selección recurrente. Círculos negros y grises corresponde a siembra convencional y directa respectivamente. Líneas sólidas y punteadas son las correspondientes rectas de regresión para siembra convencional y directa respectivamente.  $Y_c$  e  $Y_d$  son las ecuaciones de rectas de regresión estimadas para siembra convencional y directa respectivamente. 48

## LISTA DE ABREVIATURAS

C<sub>0</sub>: población de origen

C<sub>0</sub>, C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>, C<sub>5</sub>, C<sub>6</sub>, C<sub>7</sub>, C<sub>8</sub>, C<sub>9</sub> y C<sub>10</sub>: ciclos de SR

CT: conventional tillage

Δ: discriminación del isótopo de carbono 13C

F<sub>1</sub>: primera generación filial

F<sub>2</sub>: segunda generación filial

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations

G: rendimiento en grano

G: grain yield

GN: grain number per m<sup>2</sup> (GN)

GW: 1000-grain weight

HI: harvest index

HMG: gluteninas de alto peso molecular

HSP: heat shock protein

IC: índice de cosecha

IS-SDS: índice de sedimentación en dodecil sulfato de sodio

IS-SDS: sodium dodecyl sulphate sedimentation

LASRC: lactic acid SRC

NG: número de granos por metro cuadrado

NT: non tillage

PG: peso de mil granos

PROT: porcentaje de proteínas

PROT: flour protein content

PSAC: peso seco de la muestra antes de la combustión

PSPC: peso seco de la muestra posterior a la combustión

RS: recurrent selection

S<sub>0</sub>: progenie obtenida por cruzamiento manual

SC: siembra convencional

SD: siembra directa

SR: selección recurrente

SRC-lac: capacidad de retención de ácido láctico

TE: eficiencia de transpiración



# CAPÍTULO 1

## **Efecto de la selección recurrente sobre el comportamiento agronómico e industrial en trigo cultivado bajo distintos sistemas de labranza**

### **Introducción**

Casi de manera simultánea al redescubrimiento de las leyes de Mendel a principios del siglo veinte, y con el aporte de la biometría, el mejoramiento genético comenzó a sistematizarse a través de los llamados esquemas de selección. En principio, los distintos métodos de mejoramiento se idearon en función del sistema reproductivo de la especie a mejorar. Así, para el caso del maíz (especie diclino monoica) la tarea de cruzamientos se vio favorecida ya que con cubrir la mazorca de la planta madre y polinizarla con el polen de la planta padre se lograba el objetivo. Gracias a esto, los programas de mejoramiento en maíz giraron alrededor del mejoramiento poblacional, basados en la selección recurrente (SR). El objetivo primario del mejoramiento de las poblaciones genéticamente heterogéneas por medio de la selección recurrente es mejorar las poblaciones en forma gradual y continua descartando las fracciones pobres en cada ciclo. En la fracción superior los individuos seleccionados se cruzan entre sí para producir una nueva generación para el siguiente ciclo de selección (Hallauer y Darrah, 1985).

Por su parte, al ser el trigo una especie autógena es necesario proceder a emascular (remoción de anteras) la estructura floral hermafrodita para polinizar las flores de la espiga que hará las veces de madre con polen de la planta padre. Por lo general la primera generación filial ( $F_1$ ) no es sujeta a evaluación alguna y se la cultiva con esmero tal de lograr una segunda generación filial ( $F_2$ ) del al menos 2000 semillas tal de lograr un número suficiente de plantas segregantes y/o recombinantes. A partir de esta instancia los métodos de mejoramiento divergen en función de que se permita a la población seguir autofecundándose sin selección artificial hasta alcanzar un elevado grado de homocigosis (método masal) o se selecciona visualmente por cuatro o cinco generaciones de autofecundación (método genealógico). Acto seguido los caminos convergen en una ulterior evaluación y selección de las líneas experimentales en base a ensayos comparativos de rendimiento. Sin embargo tienen algo en común que conspira con la liberación de la variabilidad genética potencial, se prevé la recombinación a un solo

evento meiótico por lo que las líneas seleccionadas no diferirán lo suficiente de sus progenitores a raíz de conservar inalterados bloques de ligamiento debido a que el evento de recombinación se vio acotado a una generación de cruzamiento.

Esta circunstancia es lo que motivó a Jensen (1970) a proponer un sistema en el que participen muchos progenitores, los que son cruzados con asiduidad tal de promover la ruptura de los bloques de ligamiento y liberar la variabilidad genética potencial a través de la recombinación génica. A partir de la publicación de ese trabajo se adoptó el uso de la SR en especies autógamas. Sin embargo, la dificultad que implica emasculación y cruzar especies naturalmente cleistógamas y el avance de la biotecnología determinó que el auge inicial se diluyese hacia finales de los '90. Al margen de estas consideraciones, la SR subyace como uno de los métodos convencionales de mejoramiento más sustentables en lo que concierne a mantener y generar variabilidad genética.

En trigo, la SR ha sido usada para mejorar el porcentaje de proteínas del grano (Delzer *et al.*, 1995), el peso de la semilla (Wiersma *et al.*, 2001) y el rendimiento en semilla (Maich *et al.*, 2003). Si bien los antecedentes respecto a la utilidad de la SR para mejorar el rendimiento en experimentos de largo plazo son escasos, hay estudios que mostraron que luego de seis ciclos de SR se lograron incrementos en el rendimiento a nivel de espiga, aunque no se reflejó en un aumento en la producción de semillas por unidad de superficie (Maich *et al.*, 2007).

En términos generales, rendimiento y contenido de proteínas de la semilla están negativa y linealmente relacionadas (Williams *et al.*, 2008; Niu *et al.*, 2010). La magnitud con la que una cantidad determinada de proteína se diluye en una mayor translocación de hidratos de carbono a la semilla explica en parte esta asociación negativa (Acreche y Slafer, 2009). Sin embargo, los resultados de Groos *et al.* (2002) muestran que es posible mejorar ambos caracteres simultáneamente. La cantidad de proteínas del grano es una forma de medir indirectamente las propiedades de la harina para producir pan. Sin embargo, cuando el intervalo de variación es bajo, el nivel de predicción desaparece (Steffolani *et al.*, 2007). Por su parte, una disminución en la cantidad de proteínas no necesariamente implica una merma en la calidad de éstas (Hristov *et al.*, 2010). Finalmente, y desde una perspectiva fisiológica, altos valores de conductividad estomática y contenidos de cenizas en órganos vegetativos implican una alta capacidad de extraer agua del suelo y en consecuencia alcanzar mayores rendimientos (Monneveux *et al.*, 2004).

El suelo es uno de los factores principales a ser considerados en relación a la sustentabilidad agro-ecológica dado que es un recurso no renovable y limitado. La siembra convencional se basa en un laboreo intensivo del recurso edáfico y lo deja desprotegido ante los procesos erosivos. La no roturación del suelo y la acumulación de "mulch" desarrollado a partir de los residuos de cosecha son dos aspectos clave de los



sistemas conservacionistas. Estas dos estrategias permiten reducir la erosión hídrica y eólica, favorecen la infiltración del agua y la actividad microbiana, llegando a incrementar el contenido de la materia orgánica del suelo. La concepción general es que los sistemas conservacionistas contribuyen a mejorar la calidad del suelo, más aún cuando se considera que la intensificación agrícola avanza sobre regiones marginales.

La siembra directa es una forma de labranza conservacionista donde se suprimen las prácticas de laboreo del suelo. Según un informe de la FAO (FAO, 2010), a nivel mundial la superficie bajo siembra directa es del 6 % (117 millones de hectáreas) de la superficie agrícola total, siendo el continente americano el que más superficie agrícola tiene bajo este sistema de labranza. En países como Argentina, Brasil, Paraguay y Uruguay más del 70% del área total cultivada se realiza en sistema de siembra directa. En los últimos años la siembra directa ha crecido alrededor de 6 millones de hectáreas por año (Derpsch y Friedrich, 2010).

Dentro de este contexto, la mayoría de los programas de mejoramiento se han conducido bajo un manejo convencional del suelo, por lo que medir la presencia de interacciones entre los genotipos de trigo y el sistema de labranza es prioritario para este cultivo invernal, que se realiza en condiciones de secano en la estación seca. A este punto cabe preguntarse si las variedades modernas de trigo mantendrán su superioridad agronómica independientemente de la práctica de manejo bajo las cuales son evaluadas. Según Joshi *et al.* (2007) se deberían desarrollar genotipos que se adapten a las nuevas prácticas de manejo. Por otra parte, los resultados de Anderson (2010) muestran que las interacciones genotipo x ambiente y genotipo x manejo no fueron relevantes.

## **Hipótesis general**

La selección recurrente promueve un mejoramiento cíclico continuo manteniendo el polimorfismo genético independientemente del contexto ambiental en el que se desarrolle.

## **Hipótesis**

- 1) El comportamiento agronómico en trigo puede ser mejorado con el uso de un esquema de selección recurrente.
- 2) El incremento del rendimiento en semilla está acompañado por una disminución en el porcentaje de proteínas del grano.
- 3) El progreso genético no es afectado por el sistema de labranza adoptado.
- 4) El progreso genético para el rendimiento en grano está asociado a un incremento en el contenido de cenizas en el rastrojo.

## **Objetivo general**

Analizar los cambios producidos a nivel de variables agronómicas e industriales en germoplasma de trigo sujeto a un esquema de selección recurrente evaluado bajo distintos sistemas de labranza.

## **Objetivos específicos**

- 1) Medir el progreso genético con respecto al comportamiento agronómico en trigo al cabo de diez ciclos de selección recurrente.
- 2) Evaluar el efecto de la selección recurrente para el comportamiento agronómico sobre la calidad industrial de las harinas.
- 3) Comparar el progreso genético bajo condiciones de siembra convencional y directa.
- 4) Determinar los cambios en el contenido de cenizas en el rastrojo.

## **Bibliografía**

Acreche M.M. and Slafer G.A. 2009. Variation of grain nitrogen content in relation with grain yield in old and modern Spanish wheats grown under a wide range of agronomic conditions in a Mediterranean region. *The Journal of Agricultural Science* 147: 657–667.

Anderson W.K. .2010. Closing the gap between actual and potential yield of rainfed wheat. The impacts of environment, management and cultivar. *Field Crops Research* 116: 14–22.

Delzer B.W., Busch R.H. and Hareland G.A. 1995. Recurrent selection for grain proteinin hard red spring wheat. *Crop Science* 33:924-928.

Derpsch R. and Friedrich T. 2010. Global Overview of Conservation Agriculture Adoption. En: IV World Congress on Conservation Agriculture. New Delhi, India, February 2009. Available at <http://www.fao.org/ag/ca/doc/Derpsch-Friedrich-Global-overview-CA-adoption3.pdf>. Verified 08 July 2010. FAO, Roma.

FAO, 2010. Adoption of Conservation Agriculture, in Conservation Agriculture website of FAO, <http://www.fao.org/ag/ca/6c.html> Consulted in April 2010. Subject CA Adoption Worldwide.

Groos C., Robert N., Bervas E and Charmet G. 2002. Genetic analysis of grain protein-content, grain yield and thousand-kernel weight in bread wheat. *Theoretical and Applied Genetics* 106: 1032-1040.

Hallauer A.R. and Darrah L.L. 1985. Compendium of recurrent selection methods and their application. *Critical Reviews in Plant Sciences* 3: 1-33.

Hristov N., Mladenov N., Djuric V., Kondic-Spika A. and Marjanovic-Jeromela A. 2010. Improvement of wheat quality in cultivars released in Serbia during the 20 century. *Cereal Research Communications* 38:111-121.

Jensen N.F. 1970. A diallel selective mating system for cereal breeding. *Crop Science* 10:629-635.

Joshi A.K., Chand R., Arun B., Singh R.P. and Ortiz, R. 2007. Breeding crops for reduced-tillage management in the intensive, rice–wheat systems of South Asia. *Euphytica* 153:135–151.

Maich R.H., Torres L.E., Manera G.A. and Dubois M.E. 2003. Grain yield improvement in bread wheat (*Triticum aestivum* L.) after three cycles of recurrent selection. *Journal of Genetics. & Breeding* 57: 201-206.

Maich R., Ortega D., Masgrau A. and Manera G. 2007. Genetic achievements under rainfed conditions. En : *Wheat production in stressed environments*. Buck H.T., Nisi J.E. and Salomón (eds.). Springer, The Netherlands, pp. 321-329.

Monneveux P., Reynolds M. P., González- Santoyo H., Peña J., Mayr L. and Zapata F.2004. Relationships between grain yield, flag leaf morphology, carbon isotope discrimination and ash content in irrigated wheat. *Journal of Agronomy & Crop Science* 190:395-401.

Niu N., Arief V.N., DeLacy I.H., Lush D., Sheppard J. and Dieters M.J. 2010. Genetic gain in yield and protein over two cycles of a wheat recurrent selection program. *Breeding Science* 60:181-186.

Stefollani M.E., Pérez G.T., Ribotta P.D. and León A.E. 2007. Relationship between variety classification and bread making quality in argentine wheats. *International Journal of Agricultural Research* 2: 33-42.

Wiersma J.J., Busch R.H., Fulcher G.G. and Hareland G.A. 2001. Recurrent selection for kernel weight in spring wheat. *Crop Science* 41: 999-1005.

Williams R.M., O'Brien L., Eagles H.A., Solah V.A. and Jayasena V. 2008. The influences of genotype, environment and genotype x environment interaction on wheat quality. *Australian Journal of Agricultural Research* 59:95-111.

## CAPÍTULO 2

### Interacción genotipo x sistema de labranza en un programa de selección recurrente en trigo

#### Resumen

El objetivo de este capítulo fue medir el progreso genético en siembra convencional y en siembra directa para el rendimiento en grano y otras variables agronómicas al cabo de 10 ciclos de selección recurrente de un programa de mejoramiento conducido en seco y en siembra convencional. Durante dos años consecutivos (2011 y 2012) 44 familias, cuatro por cada una de las poblaciones evaluadas ( $C_0$  al  $C_{10}$ ), fueron evaluadas en siembra convencional y en siembra directa en dos lotes contiguos. Las variables medidas fueron: fecha de floración, altura de la planta, rendimiento en grano y biomasa aérea, y el peso de mil granos. Por su parte se estimaron el índice de cosecha y el número de granos por  $m^2$ . A partir de una muestra de diez espigas se determinó el número de espiguillas y granos por espiga. La información fue analizada estadísticamente mediante una regresión lineal mixta. Cuando el material se cultivó en siembra convencional las pendientes resultaron significativamente distintas de cero para el rendimiento en grano, el índice de cosecha, el número de granos por  $m^2$ , el número de espiguillas y granos por espiga. Cuando el material se evaluó en siembra directa solo se constataron tendencias significativas para el número de espiguillas y granos por espiga. Para la mayoría de los caracteres se puso en evidencia una diferencia significativa en cuanto a la intercepción a la ordenada en el origen entre la siembra convencional y la siembra directa, lo que debe ser interpretado como un efecto de ambos sistemas de labranza sobre el comportamiento agronómico del cultivo. La medición simultánea en siembra convencional y siembra directa del progreso genético luego de diez ciclos de selección recurrente obtenidos en siembra convencional, muestran un avance significativo solo cuando la evaluación del material se condujo en siembra convencional.

**Palabras clave:** *Triticum aestivum* (L), rendimiento en grano, progreso genético, manejo del suelo.

#### Introducción

Con el cambio climático global se verá resentida la biodiversidad, principalmente en los ambientes marginales. Una manera de hacer frente a este desafío es recurrir a estrategias

de adaptación sustentadas en un esquema evolutivo de mejoramiento poblacional (Ceccarelli *et al.*, 2010). Se requieren muchos ciclos de selección y entrecruzamiento para piramidar los genes responsables de la determinación de un carácter de importancia económica (Trethowan *et al.*, 2010). Una de las alternativas puede radicar en acumular los alelos favorables recurriendo al uso de un esquema de selección recurrente (SR), una de las estrategias más prometedoras de mejoramiento genético poblacional. En cada ciclo de selección, los materiales seleccionados son cruzados entre sí para dar origen al material que será evaluado en el siguiente ciclo de SR. Puede llevar muchos años o aún décadas poner en evidencia a campo un cambio en la expresión fenotípica del carácter objeto de mejora (Briggs y Goldman, 2006). Más aún, los programas de mejoramiento deben poner énfasis en el desarrollo de material genético que se adapte a las prácticas agronómicas conservacionistas, con las que se mejora el almacenamiento del agua en el suelo, elevando en consecuencia el potencial productivo de los ambientes marginales. En la mayoría de los trabajos publicados hasta la fecha los cultivares evaluados se desarrollaron en un contexto de siembra convencional (Trethowan *et al.*, 2005), por lo que se debería considerar también la alternativa de caracterizar al germoplasma sujeto a mejora en un suelo conducido en labranza mínima o cero.

La presencia de interacciones entre genotipos y sistemas de labranza advierte sobre que el desarrollo de nuevos materiales debería considerar el sistema de labranza en el que crecerá y se desarrollará el material (Joshi *et al.*, 2007). No obstante, se cuenta con información en la que se asevera que aquellos materiales seleccionados en un suelo manejado sin labranza se comportan agronómicamente bien tanto en siembra convencional como en directa (Trethowan *et al.*, 2010). Dentro de este contexto, y en base a que el rendimiento incrementa más en las nuevas variedades con altos potenciales a medida que éstas disponen de más agua, es posible generar una interacción positiva entre genotipos y requerimientos nutricionales a través de prácticas de manejo que minimicen los procesos erosivos del suelo (Fischer, 2009).

El objetivo de este capítulo fue medir el progreso genético en siembra convencional y en siembra directa para el rendimiento en grano y otras variables agronómicas al cabo de 10 ciclos de selección recurrente de un programa de mejoramiento conducido en seco y en siembra convencional.

## **Materiales y Métodos**

### *El programa de selección recurrente*

El programa de SR se condujo en el Campo Escuela de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Córdoba), Córdoba (31° 29' S; 64° 00' O) en la región central semiárida de Argentina sobre un suelo Haplustol Éntico. Se utilizaron

dieciséis variedades comerciales de trigo para pan (*Triticum aestivum* L.), a saber: Leones INTA, Diamante INTA, Marcos Juárez INTA, Victoria INTA, Chasicó INTA, Las Rosas INTA, Klein Fortín, Klein Atlas, Buck Namuncurá, Buck Cencerro, Buck Pucará, Olaeta Artillero, Dekalb Tala, Cargill Trigal 700, Cargill Trigal 800 y Northing Pan 70. Estas variedades se cruzaron entre sí dando origen a 83 combinaciones  $F_1$  consideradas como la población de origen ( $C_0$ ) y punto de partida del esquema de SR en el que se insumieron dos años por ciclo (evaluación-selección y entrecruzamiento). En cada ciclo de selección recurrente el material seleccionado, en número no menor a diez sobre un total de entre cuarenta y cincuenta progenies  $S_0$  evaluadas, se cruzó según un esquema dialélico completo. Se utilizó como unidad de selección a las progenies  $S_0$ , cultivadas en parcelas de un surco de 1,3 m de longitud distanciados por 0,20 m, a una densidad de siembra de 100 semillas  $m^{-2}$ , sin repeticiones pero con controles sistemáticos cada nueve unidades experimentales.

A lo largo de los diez ciclos de SR el criterio de selección varió. Durante los primeros ciclos de SR ( $C_0$  al  $C_3$ ) el rendimiento en semilla por espiga o parcela se constituyó en el criterio de selección excluyente. Para la constitución de cuarto ciclo de SR ( $C_4$ ) se tuvo en cuenta además al índice de cosecha y a la biomasa aérea. El uso de un índice de selección constituido por 18 variables agronómicas fue el criterio de selección que se utilizó en el  $C_5$  y  $C_6$ . A partir del séptimo ( $C_7$ ) hasta el décimo ciclo ( $C_{10}$ ) inclusive, el criterio de selección también fue un índice de selección pero esta vez constituido por 11 variables agronómicas medidas en su totalidad a nivel parcelar, destacándose el rendimiento en grano, sus principales componentes fisiológicos (índice de cosecha y biomasa aérea) y numéricos (peso del grano y su número por metro cuadrado) (Maich *et al.*, 2006). El programa de mejoramiento se condujo en seco, sin fertilización y en siembra convencional.

#### *La medición del progreso genético*

Por cada ciclo de SR se crearon mezclas de semillas de las progenies seleccionadas y conservadas en cámara de frío. En el 2009 se cultivaron muestras de cada una de las once poblaciones segregantes, correspondientes a las mezclas de semillas pertenecientes a los ciclos de SR evaluados: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 10, a razón de 50 semillas por ciclo en siembra directa y con una distribución espacial equidistante. Aquellas plantas con un número mínimo de espigas fértiles fueron trilladas para obtener una cantidad suficiente de semillas para la evaluación a campo de las familias derivadas, cuatro por población para un total de 44. Durante el 2010 se realizó un ensayo preliminar en siembra directa.

En el transcurso del bienio 2011-2012 las 44 familias derivadas fueron evaluadas en siembra convencional y en siembra directa en dos lotes contiguos, ubicados en el mismo sitio donde se condujo el programa de selección. En cuanto al manejo convencional del suelo este se retrotrae a treinta años, mientras que a partir del 2005 parte del lote se

comenzó a manejar en siembra directa. En ambos sistemas de manejo no se recurrió a fertilización alguna y la rotación fue común, cereales de invierno.

Cada unidad experimental (familia) fue evaluada en parcelas de un surco de 5 m de longitud espaciados por 0,20 m con una densidad de siembra de 250 semillas viables  $m^{-2}$ . A causa de la restricción a la aleatorización impuesta por el manejo de lotes, se recurrió a un diseño en bloques completos con dos repeticiones ubicados en cada sistema de manejo. A nivel parcelar se determinaron: la fecha de floración, la altura de la planta (cm), rendimiento en grano y en biomasa aérea ( $g m^{-2}$ ) y peso de mil granos (g). Por su parte se estimaron el índice de cosecha en porcentaje como el cociente entre el rendimiento en grano y la producción de biomasa aérea y el número de granos por metro cuadrado para lo cual se dividió el rendimiento en grano por metro cuadrado por el peso individual de cada grano. A partir de una muestra de diez espigas por parcela se midieron el número de espiguillas y granos por espiga.

La información fue analizada estadísticamente mediante un modelo lineal mixto para cada uno de los caracteres estudiados. Los efectos fijos del modelo incluyeron el sistema de manejo del suelo (siembra convencional y siembra directa), el número de ciclos de SR como covariable y la interacción entre ambos. Al especificar los efectos fijos de esta manera se obtuvieron dos regresiones lineales, uno por cada sistema de labranza. Los efectos aleatorios incluyeron al efecto del año, bloques dentro de año-sistema de labranza, familias y las interacciones aleatorias entre los años y los efectos fijos del modelo. Un nivel de significación del 5% fue usado al momento de interpretar los resultados.

## Resultados

Las características edáficas de los lotes sujetos a siembra convencional y a siembra directa al momento de la siembra se presentan en la Tabla 2.1. En las Figuras 2.1 a la 2.9 se muestran las regresiones lineales para cada carácter. Los valores de probabilidad para la hipótesis de pendiente nula en siembra convencional y en directa se presentan en la Tabla 2.2 (primeras dos columnas). En la tercera columna de la Tabla 2.2 se detallan los valores de probabilidad para la hipótesis de no diferencias en cuanto a la intercepción en el eje de las Y de las pendientes correspondientes a la siembra convencional y a la siembra directa.

Cuando el material se cultivó en siembra convencional se observaron pendientes significativamente mayores a cero para el rendimiento en grano (Figura 2.1), índice de cosecha (Figura 2.3), número de granos por metro cuadrado (Figura 2.4), número de espiguillas (Figura 2.6) y granos por espiga (Figura 2.7) (Tabla 2.2 primera columna). En siembra directa pendientes significativamente mayores a cero se presentaron para el



número de espiguillas (Figura 2.6) y de granos por espiga (Figura 2.7y Tabla 2.2, segunda columna).

Al comparar las intercepciones de las regresiones lineales entre ambos sistemas de manejo del suelo (Tabla 2.2, tercera columna), el análisis estadístico puso en evidencia diferencias significativas para el rendimiento en grano (Figura 2.1) y sus principales componentes: índice de cosecha (Figura 2.3), peso de mil granos (Figura 2.5) y número de éstos por metro cuadrado (Figura 2.4).

## **Discusión**

Un incremento significativo en cuanto al rendimiento en grano de  $6 \text{ g m}^{-2}$  por cada ciclo de selección se logró cultivando el material en siembra convencional. De tal modo que, al cabo de diez ciclos de selección recurrente, se alcanzó un progreso genético acumulado del 24%. Por su parte, en siembra directa, el rendimiento en grano incrementó por ciclo alrededor de  $3 \text{ g m}^{-2}$ , no habiéndose alcanzado significancia estadística (Tabla 2.2 y Figura 2.1).

Independientemente del año de evaluación, el rendimiento en grano promedio obtenido en siembra directa resultó un 50% menor al logrado en siembra convencional. Respecto a los factores ambientales que pueden encontrarse a la base de esta merma en el rendimiento pueden mencionarse los siguientes: el agua almacenada, el nitrógeno disponible a la siembra o el nivel de salinidad del suelo. Los valores de nitrógeno disponible a la siembra garantizaban rendimientos de grano superiores a los  $200 \text{ g m}^{-2}$  que lejos estuvieron de alcanzarse en SD. Por su parte, el valor de conductividad eléctrica resultó casi el doble en SC que en SD (Tabla 2.1). Finalmente, la merma en los rendimientos en siembra directa respecto a la siembra convencional puede deberse a diferencias en cuanto al balance del agua en el suelo. Si bien se da por sabido que la siembra directa tiene un efecto positivo en cuanto al almacenamiento del agua en el suelo, este sistema de manejo del suelo puede incidir negativamente en la absorción de agua por parte de las plantas (De Vita *et al.*, 2007). En siembra directa y al momento de la cosecha se dispuso de una mayor cantidad de agua remanente en el suelo respecto al manejo en siembra convencional (Tabla 2.1), aun habiendo partido con la misma cantidad de agua almacenada a la siembra (Tabla 2.1, año 2011). Al respecto, Álvarez *et al.* (2009) sostienen que los suelos Haplustoles Énticos, como el que caracteriza al sitio experimental, poseen una escasa capacidad de regenerar macro-poros lo que indefectiblemente conduce a la necesidad de roturar periódicamente el suelo tal de potenciar el funcionamiento hídrico del suelo. A raíz de esta situación, a las ventajas de la siembra directa es necesario anteponer algunas desventajas o circunstancias no comunes a la siembra convencional que pueden limitar el rendimiento.

En sintonía con lo afirmado anteriormente, y ante la eventualidad de que las interacciones genotipos x sistemas de labranza alcancen magnitud estadística, Mandal *et al.* (2010) advierten que los genotipos seleccionados en los centros de mejoramiento bajo condiciones de cultivo sin limitantes pueden defecionar cuando cultivados en ambientes con limitantes bióticas y abióticas. Sin embargo, Trethowan *et al.* (2009) resaltan que aseveraciones de esta índole surgen de la evaluación de un reducido número de genotipos lo que obviamente las relativiza. Al respecto, la revisión hecha por Carena *et al.* (2009) arroja como síntesis que no es necesario el desarrollo de cultivares que se adapten específicamente a la siembra directa ya que los cultivares desarrollados en un sistema de labranza convencional se comportan aceptablemente también en siembra directa. Más aún, hay autores que sostienen que los continuos cambios que ocurren en el germoplasma sujeto a mejora genética junto a la actualización en el manejo del suelo, le quitan sustento a la idea de conducir programas de mejoramiento paralelos (Sip *et al.*, 2009).

Los presentes resultados no avalan lo antedicho ya que, luego de diez ciclos de selección recurrente tanto el rendimiento en grano como el progreso genético para este carácter se vieron afectados por el sistema de labranza utilizado. Por lo tanto los programas de mejoramiento genético vegetal deberían focalizarse en la obtención de genotipos que sean sinérgicos con las prácticas agronómicas emergentes tal como lo señalan Higginbotham *et al.* (2011).

El índice de cosecha en trigo se ha visto incrementado durante el siglo veinte. Más aún, en los cultivares modernos de trigo al índice de cosecha le cupo el mayor peso en cuanto al aumento del potencial de rendimiento (Zhang *et al.*, 2012; Bustos *et al.*, 2013). Los resultados obtenidos en siembra convencional (Figura 2.3) resultan coincidentes con los publicados por otros autores (Green *et al.*, 2012; Lopes *et al.*, 2012; Matus *et al.*, 2012; Xiao *et al.*, 2012; Sanchez-García *et al.*, 2013), donde se alcanzó un progreso genético significativo simultáneo al logrado para el rendimiento en grano. En otras palabras, la variación en el índice de cosecha estuvo fuertemente asociada a los ciclos de selección recurrente desarrollados.

Diversos estudios retrospectivos asocian los incrementos en rendimiento en grano con nulas variaciones (Acreche *et al.*, 2008) o aumentos significativos (Rodrigues *et al.*, 2007; Reynolds *et al.*, 2009; Xiao *et al.*, 2012) en cuanto a la producción total de biomasa aérea. Los resultados que se muestran no presentan tendencia alguna en cuanto a la producción de biomasa en relación a los ciclos de selección recurrente transcurridos (Figura 2.2 y Tabla 2.2). En sintonía con las conclusiones de Royo *et al.* (2007), el incremento en el rendimiento en grano se debió a cambios en la partición de fotoasimilados dentro de la planta y no debido a una mayor producción de biomasa. Un claro indicio de que el

progreso genético para el rendimiento grano estuvo limitado más por el número de destinos (granos) que por la magnitud de la fuente (biomasa).

Al igual que lo sucedido con el índice de cosecha, los resultados de Shearman *et al.* (2005) y de Guarda *et al.* (2004) muestran como el número de granos por unidad de superficie contribuyó al progreso genético del rendimiento en grano. Con respecto a la asociación entre el número de granos y su peso individual, Morgounov *et al.* (2010) demostraron que el número de granos por unidad de superficie y el peso de mil granos estuvieron linealmente correlacionados con el rendimiento en grano. Sin embargo, diversos autores han demostrado que el incremento en el número de granos por unidad de superficie a lo largo del tiempo no incidió en el peso individual de éstos (Rodrigues *et al.*, 2007; Acreche *et al.*, 2008). Resultados similares fueron obtenidos en el presente estudio cuando el cultivo de trigo se condujo en siembra convencional. Coincidente con lo observado con el rendimiento en grano y el índice de cosecha, la interacción entre ciclos de selección y sistemas de labranzas redujeron significativamente el progreso genético para el número de granos por unidad de superficie en siembra directa.

Algunos trabajos (Morgounov *et al.*, 2010; Tian *et al.*, 2011; Zheng *et al.*, 2011) ponen en evidencia que pesos de granos más altos estuvieron asociados al mejoramiento del rendimiento. Por el contrario, Rodrigues *et al.* (2007), Zhou *et al.* (2007) y Acreche *et al.* (2008) no detectaron un cambio significativo en cuanto al peso del grano al comparar cultivares de trigos modernos y antiguos. El peso de mil granos no mostró una tendencia definida en este estudio (Figura 2.5 y Tabla 2.2, 1° y 2° columna), lo que está indicando que la totalidad de los fotoasimilados disponibles se partitionaron al número de granos más que al peso de éstos (Tabla 2.2 y Figura 2.4).

Contrariamente a lo citado por Tian *et al.* (2011) pero coincidente con lo observado por Acreche *et al.* (2008), en este trabajo el número de espiguillas por espiga mostró un progreso genético significativo (Figura 2.6).

Se ha comprobado que el número de granos por espiga está asociado a la estabilidad del rendimiento en ambientes contrastantes, que la componente genética predominante de su heredabilidad es de tipo aditivo y que explica en gran medida el progreso genético logrado para el rendimiento en grano (Acreche *et al.*, 2008; Mladenov *et al.*, 2011; Tian *et al.*, 2011). Para este componente del rendimiento las interacciones genotipo por sistema de labranza por lo general resultaron estadísticamente no significativas (Kumudini *et al.*, 2008). Haciendo la salvedad que solamente durante los ciclos quinto y sexto de SR se considero a este carácter como criterio de selección conjuntamente con otras diecisiete variables, el hecho de que no se haya detectado diferencias entre los sistemas de labranza en cuanto a la tasa de progreso genético para el número de granos por espiga, advierte sobre la necesidad de prestar atención a caracteres que hasta el momento han recibido

escasa atención como criterio de selección (Tabla 2.2 y Figura 2.7). A lo largo de un trienio de evaluación en SD (2010-2011-2012) y de un bienio de evaluación en SC (2011-2012) el número de granos por espiga resultó el único carácter que puso de manifiesto un progreso significativo independientemente del contexto macro (años) y micro (labranza) ambiental en el que se lo midió. De lo que se desprende que un mayor número de granos por espiga se requerirá para un contexto productivo con continuos cambios en lo que respecta a la mecanización durante la cosecha, a las condiciones ambientales durante el crecimiento y el desarrollo del cultivo, y a los sistemas de labranza.

La fecha de espigazón se considera como un carácter adaptativo relevante. Iniciar la etapa reproductiva demasiado temprano o demasiado tarde en la vida de un individuo puede tener un impacto negativo en su aptitud biológica, es decir, dejar descendencia. Algunos estudios muestran una disminución significativa en cuanto a días a espigazón (Guarda *et al.*, 2004; Lopes *et al.*, 2012). Los resultados aquí obtenidos concuerdan con otros citados en bibliografía (Underdahl *et al.*, 2008; Graybosch y Peterson, 2010; Mladenov *et al.*, 2011; Mustăţea y Saulescu, 2011), donde rendimientos más altos se alcanzaron sin por ello prolongar el ciclo biológico del cultivo (Figura 2.9). En sintonía con las conclusiones de Morgounov *et al.* (2010), el germoplasma sujeto a mejora fijó su ciclo biológico en uno de tipo intermedio como el más apropiado, más allá de contar en el germoplasma usado con variedades con distintos ciclos biológicos.

Una tendencia general a una disminución en la altura de la planta de trigo es la resultante de los programas de mejoramiento genético en la especie (Zhou *et al.*, 2007; Xiao *et al.*, 2012). Sin embargo, no resulta biológicamente compatible una ulterior reducción de la altura con una mayor partición a grano. Tal como lo señalan distintos trabajos (Mustăţea y Saulescu, 2011; Zhenget *et al.*, 2011; Lopes *et al.*, 2012), la altura óptima ya ha sido alcanzada. De acuerdo al ideotipo de planta presentado por Reynolds *et al.* (1994), los trigos bajos están mejor adaptados a condiciones de cultivo sin limitantes (riego, fertilización, tratamientos fitosanitarios), mientras que los trigos altos se adaptan mejor a condiciones de cultivo adversas en la que priman los estreses de índole biótico y abiótico. En función de que la altura de la planta no sufrió variaciones a lo largo de los ciclos de selección recurrente evaluados (Figura 2.8), y teniendo en cuenta que alguna de las variedades usadas como progenitoras eran altas (por ejemplo, Olaeta Artillero), semienanas (por ejemplo, Marcos Juárez INTA) o enanas (Norkin Pan 70), se puede afirmar que los genotipos con alturas intermedias, ni tan altos ni tan bajos, serían aquellos con mejor comportamiento agronómico bajo condiciones de secano con estrés hídrico terminal.

Consistente con la circunstancia de que la mayoría del proceso de selección recurrente se condujo en siembra convencional, el progreso genético alcanzó significancia solo cuando la respuesta a la selección se midió bajo este tipo de labranza. Estos resultados han

generado un replanteo del programa de mejoramiento genético en curso adoptando prácticas de manejo del suelo sustentables tal como la siembra directa.

**Tabla 2.1: Características del suelo en las dos condiciones de manejo (LC=labranza convencional, SD=siembra directa).**

Características	LC		SD	
	2011	2012	2011	2012
Materia orgánica (%)	2,65	2,57	2,52	2,57
Carbono orgánico total (g kg <sup>-1</sup> )	1,54	1,49	1,46	1,49
Nitrógeno orgánico total (g kg <sup>-1</sup> )	0,145	0,141	0,139	0,142
Relación C/N	10,6	10,6	10,5	10,5
N- NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	35,8	38,8	27,70	20,9
S - SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> (mg kg <sup>-1</sup> )	18,7	20,0	13,3	6,7
P (mg kg <sup>-1</sup> )	81,2	87,7	83,1	99,6
pH	6,21	6,35	6,33	6,23
Conductividad eléctrica (mS cm <sup>-1</sup> )	1,40	1,20	0,90	0,70
Agua en el suelo a la siembra (%)	18,9	15,3	18,80	18,9
Agua en el suelo a la cosecha (%)	8,80	10,7	10,30	14,7

**Tabla 2.2: Resumen de p-valores para las hipótesis de pendientes iguales a cero (primeras dos columnas de la tabla) y para la diferencia de ordenadas al origen (tercera columna) de las rectas de regresión de cada característica en el número de ciclos de selección recurrente bajo labranza convencional y siembra directa.**

Característica	LC-pendiente	SD-pendiente	Dif. OO (LC-SD)
	p-valor	p-valor	p-valor
Rendimiento en grano (g/m <sup>2</sup> )	0,024934	0,380968	<0,000001
Biomasa aérea (g/m <sup>2</sup> )	0,909864	0,558102	0,249356
Índice de cosecha (%)	0,002526	0,284250	<0,000001
Semillas por metro cuadrado	0,012174	0,297416	<0,000001
Peso de 1000 semillas (g)	0,580983	0,872697	0,000105
Espiguillas por espiga	0,003515	0,004733	0,162746
Semillas por espiga	0,001112	0,004099	0,642826
Altura de planta (cm)	0,666049	0,962056	0,541768
Días hasta espigazón	0,683142	0,414454	0,006411

LC: Labranza Convencional, SD: Siembra Directa, OO: Ordenada al Origen

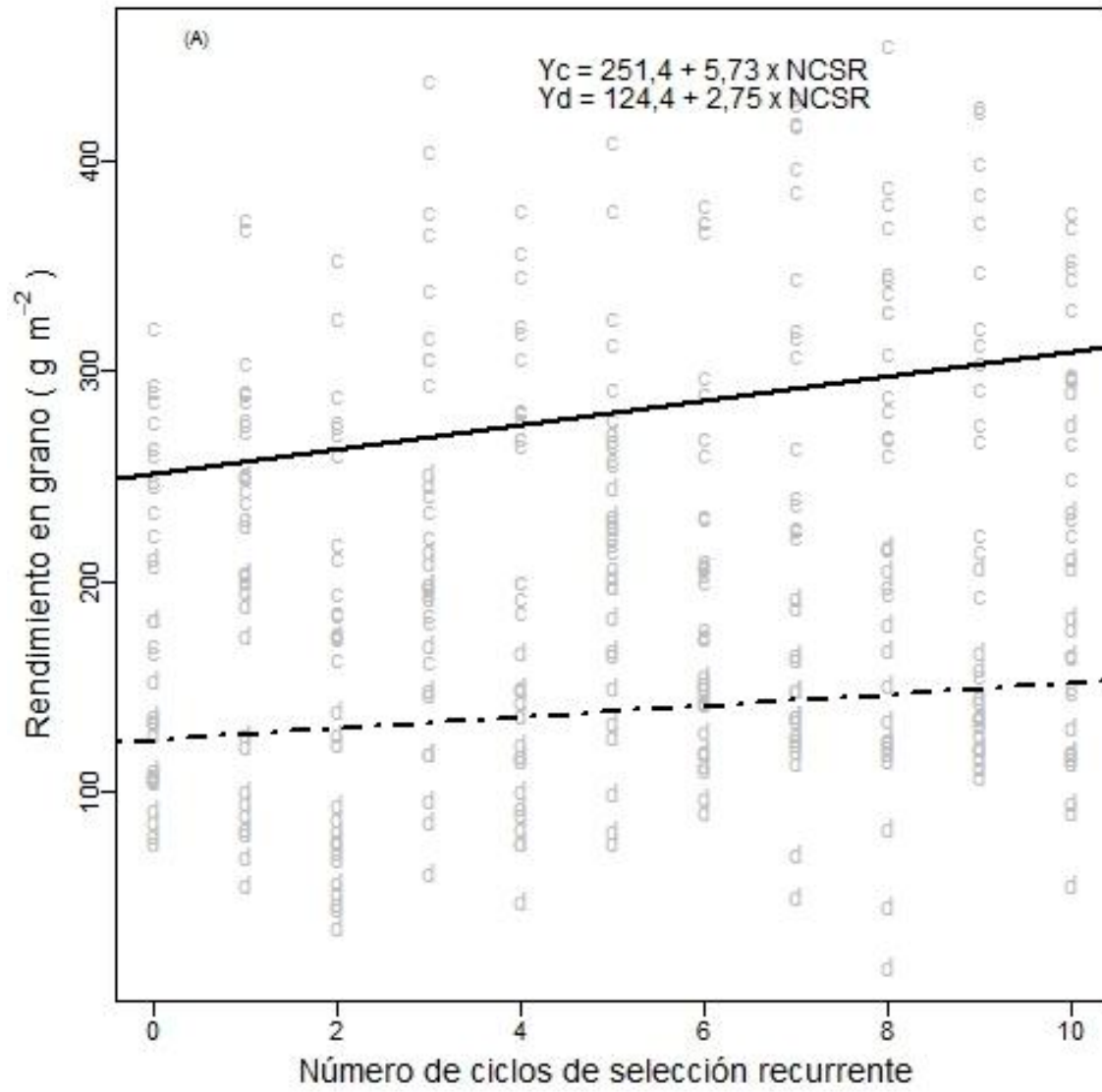


Figura 2.1. Cambios en el rendimiento en grano ( $\text{g m}^{-2}$ ) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional ("c" – línea sólida) y siembra directa ("d" – líneas de puntos).

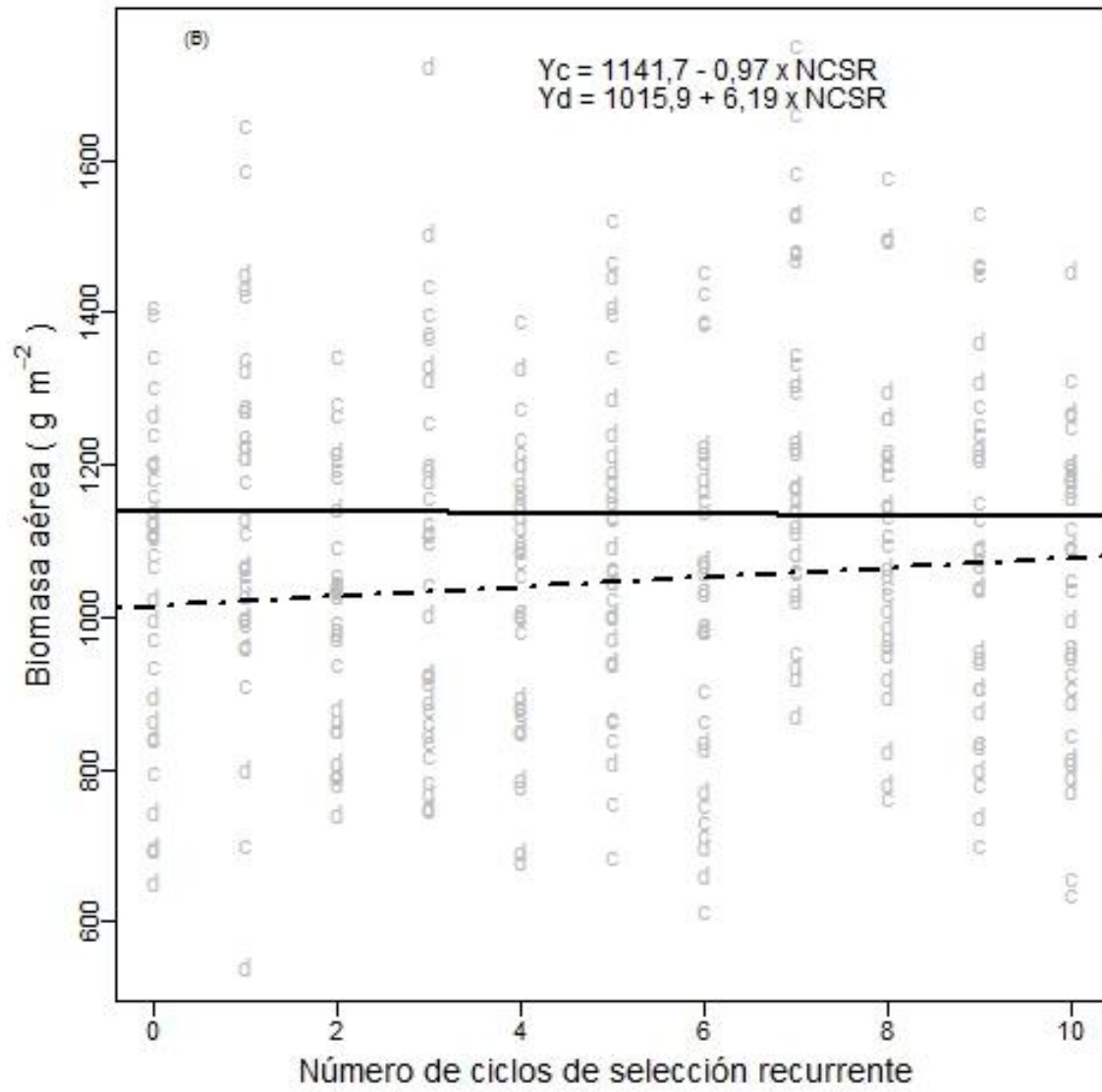


Figura 2.2. Cambios en el rendimiento en biomasa aérea (g m<sup>-2</sup>) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional ("c" – línea sólida) y siembra directa ("d" – líneas de puntos).

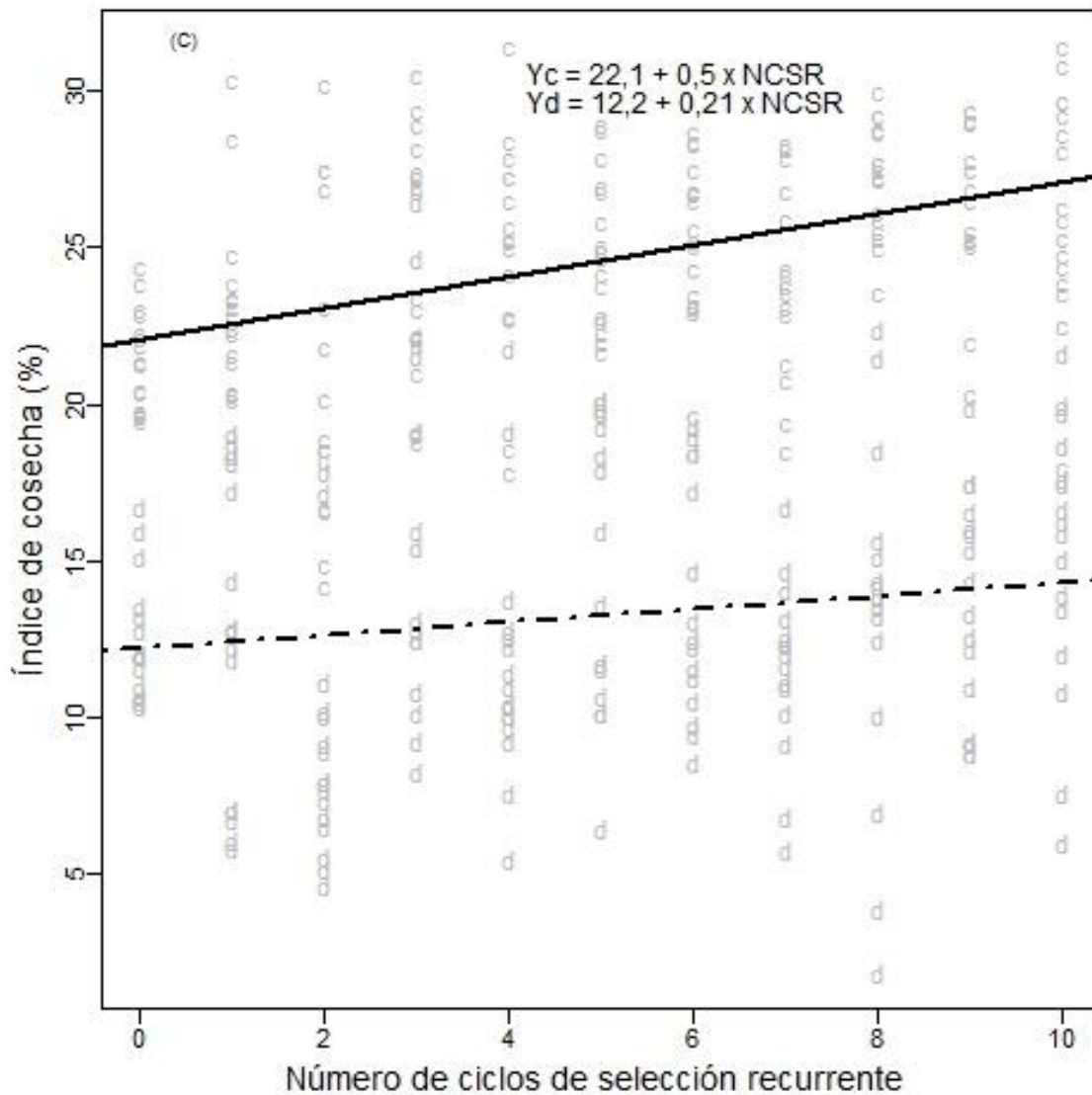


Figura 2.3. Cambios en el índice de cosecha (%) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos).



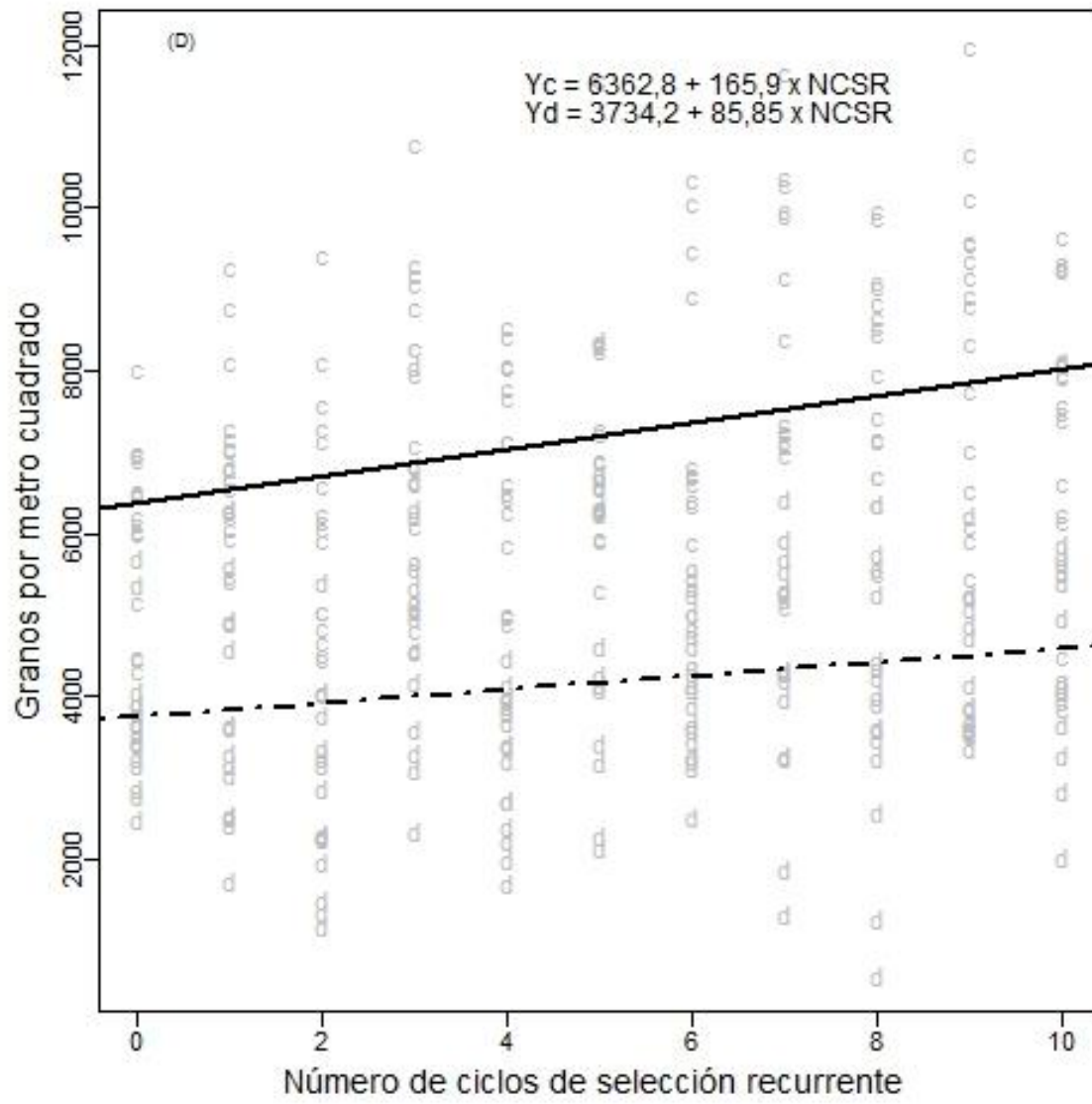


Figura 2.4. Cambios en el número de granos por metro cuadrado respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos).

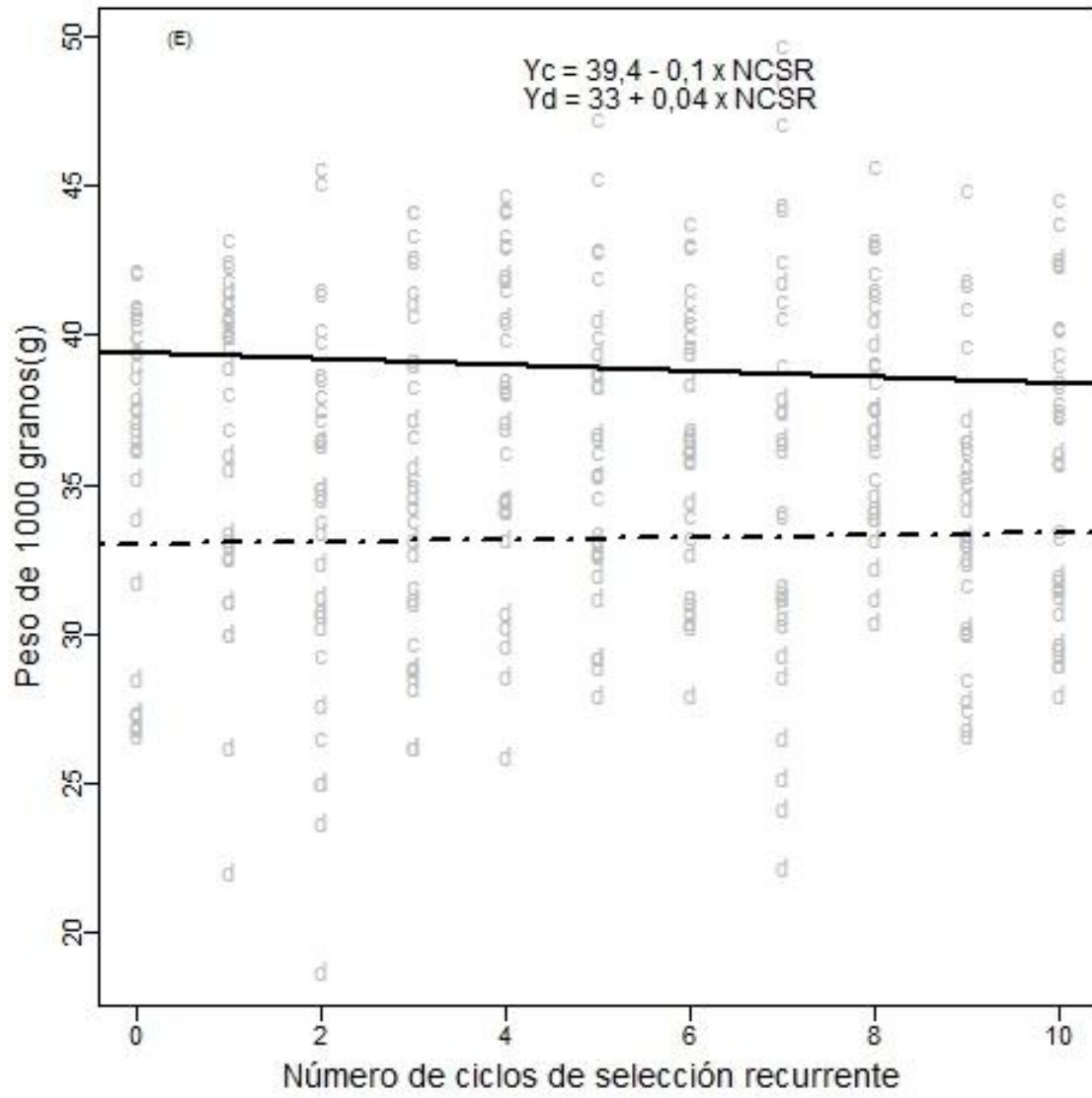


Figura 2.5. Cambios en el peso de mil granos (g) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos).

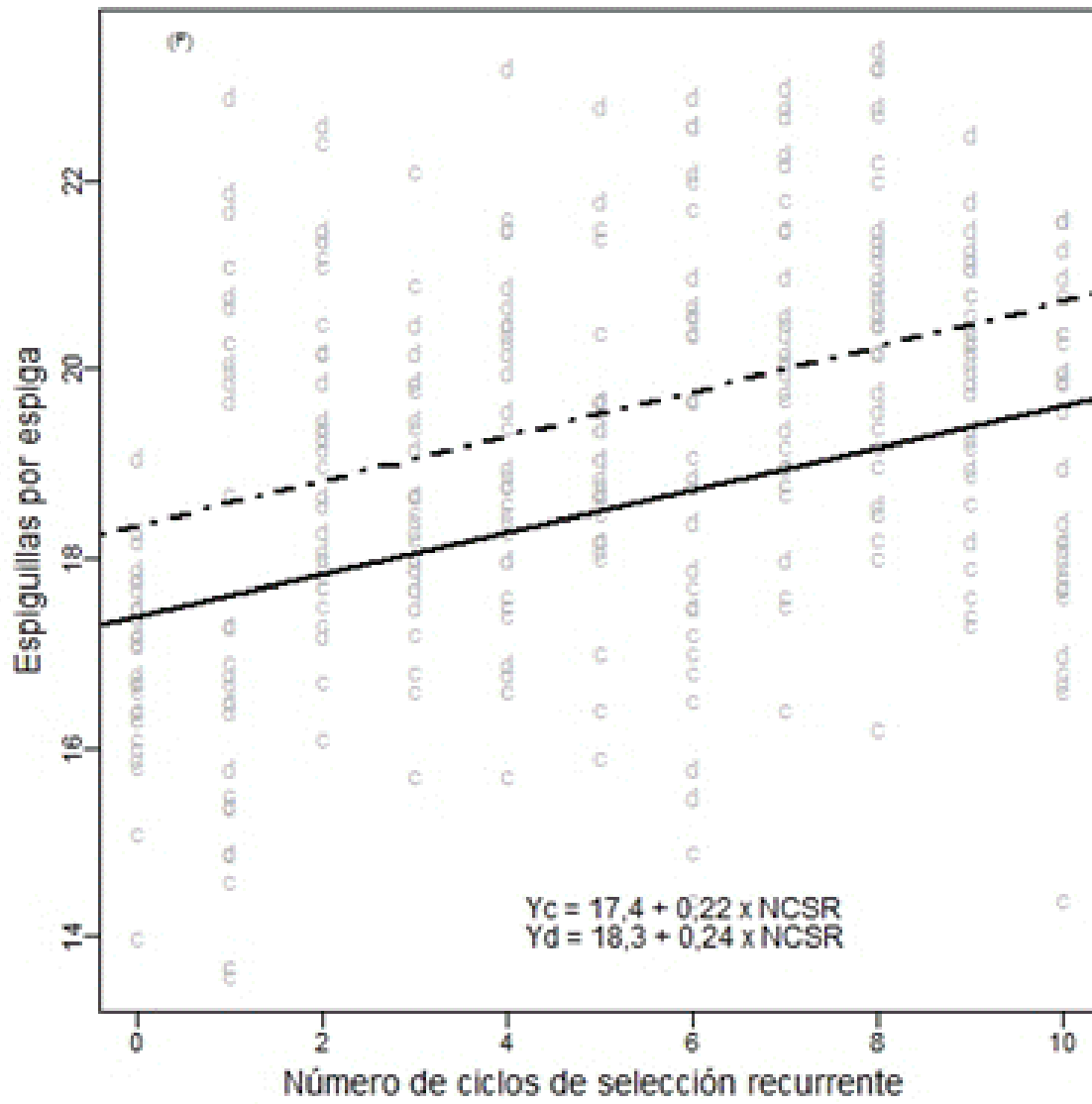


Figura 2.6. Cambios en el número de espiguillas por espiga respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos).

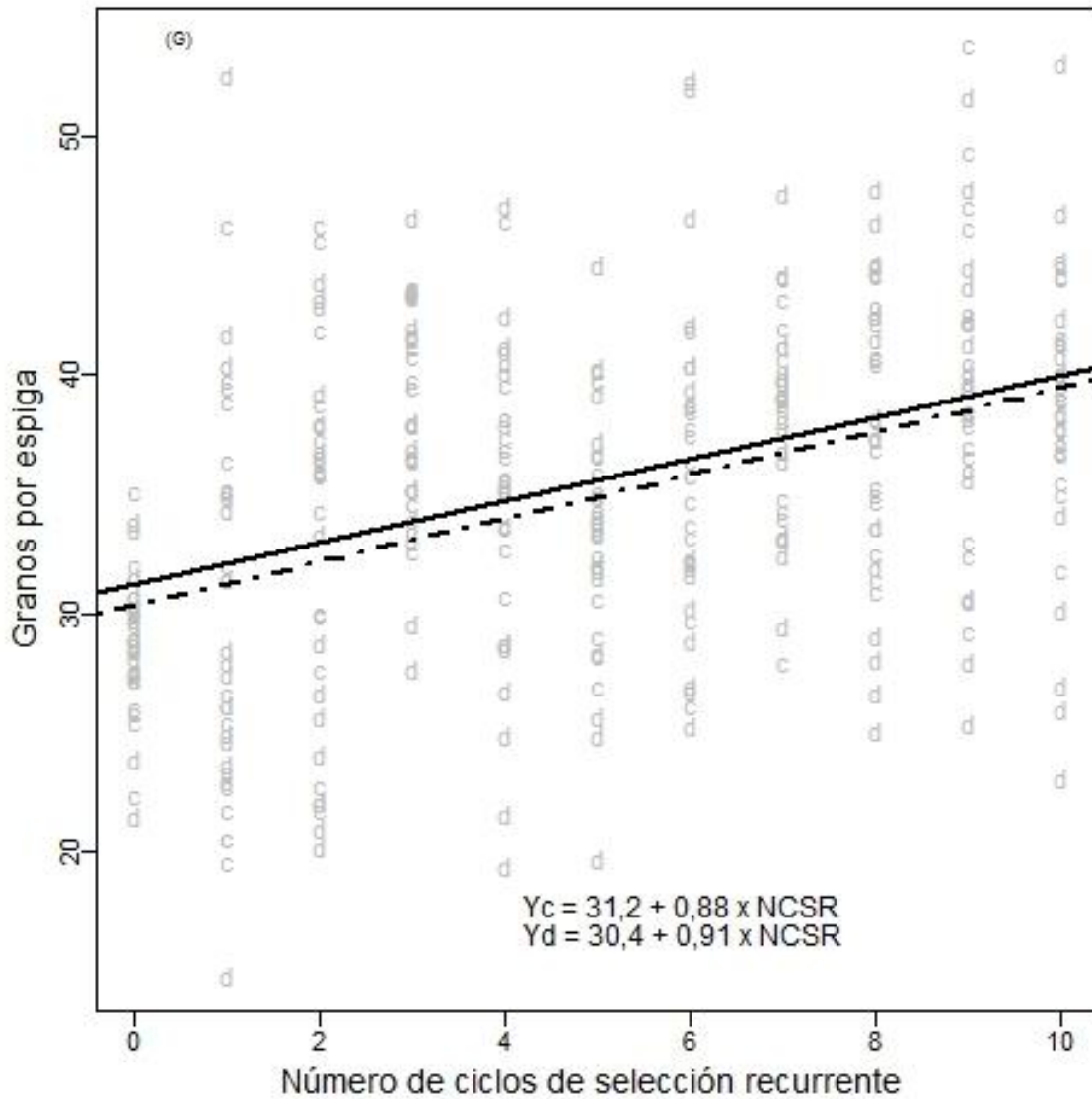


Figura 2.7. Cambios en el número de granos por espiga respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos).

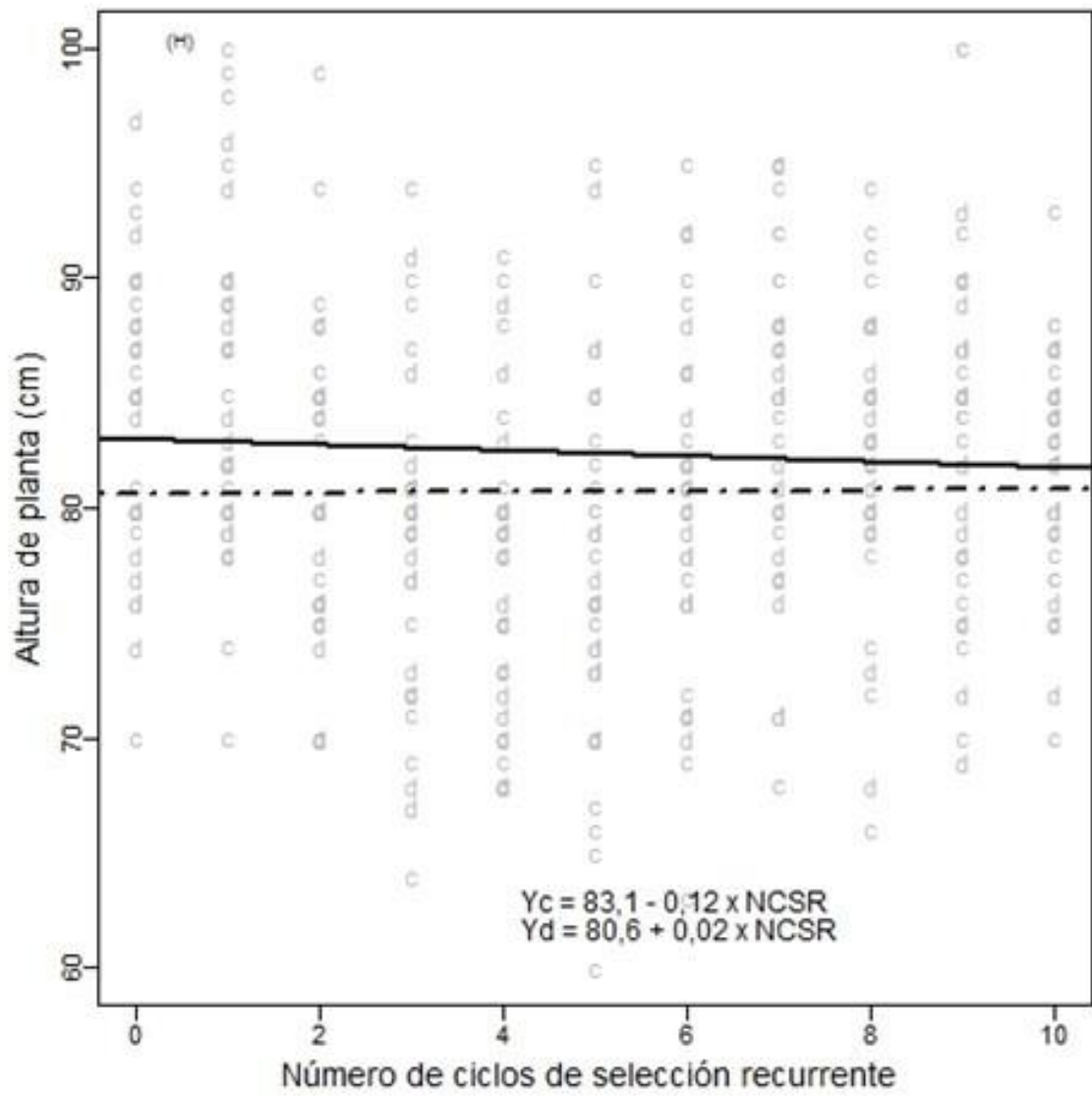


Figura 2.8. Cambios en la altura de la planta (cm) respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional (“c” – línea sólida) y siembra directa (“d” – líneas de puntos).

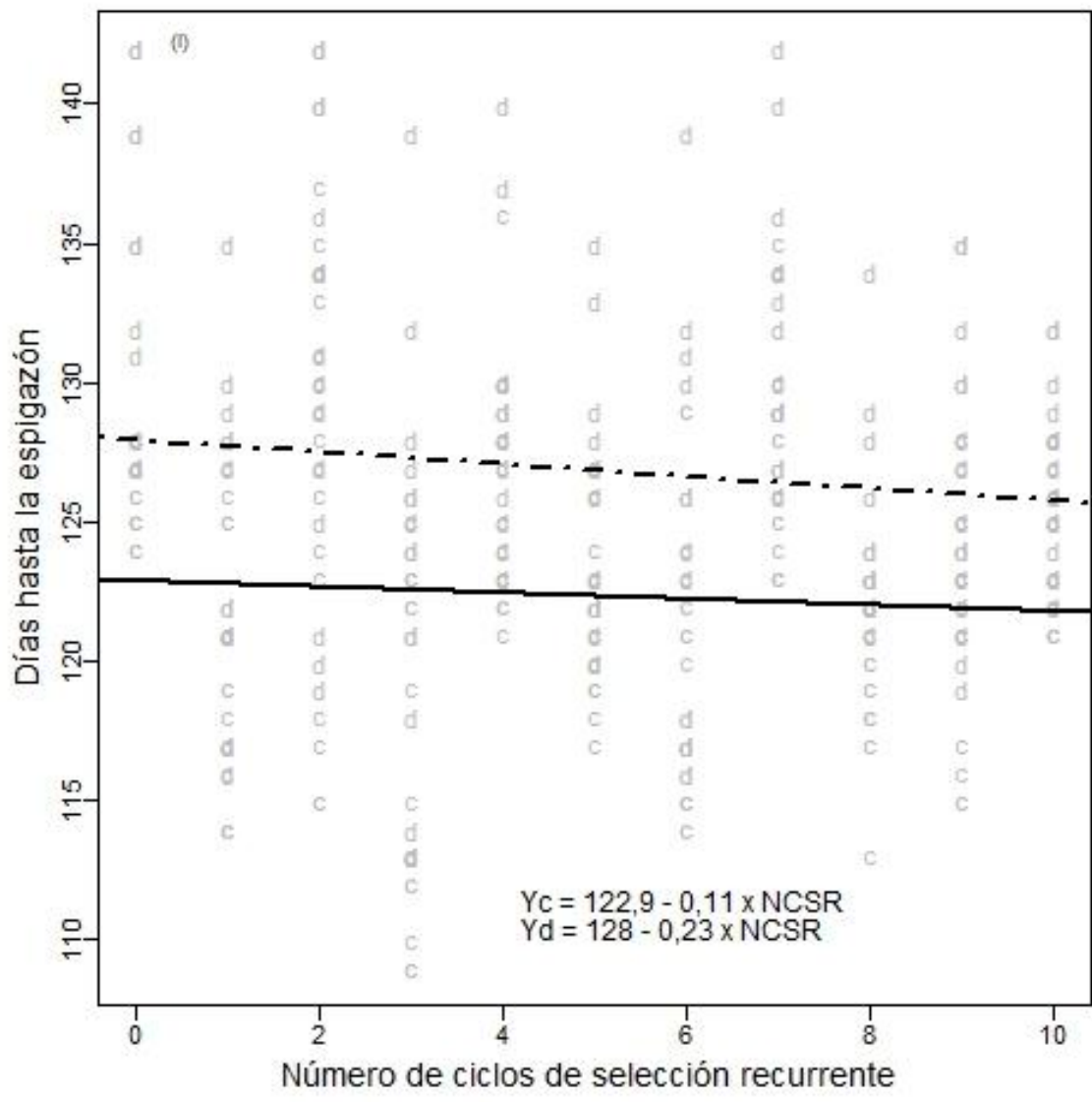


Figura 2.9. Cambios en el número de días desde la siembra hasta el espigazón respecto al número de ciclos de selección recurrente (NCSR), bajo labranza convencional ("c" – línea sólida) y siembra directa ("d" – líneas de puntos).

## **Bibliografía**

Acreche M.M., Briceño-Félix G., Martín-Sánchez J.A. and Slafer G.A. 2008. Physiological bases of genetic gains in Mediterranean bread wheat yield in Spain. *European Journal of Agronomy* 28:162–170.

Álvarez C.R., Torres Duggan M., Chamorro E.R., D'Ambrosio D. and Taboada M.A. 2009. Descompactación de suelos franco limosos en siembra directa: efectos sobre las propiedades edáficas y los cultivos. *Ciencia del Suelo* 27:159-169.

Briggs W.H. and Goldman I.L. 2006. Genetic variation and selection response in model breeding populations of *Brassica rapa* following a diversity bottleneck. *Genetics* 172:457-465.

Bustos D.V., Hasan A.K., Reynolds M.P. and Calderini D.F. 2013. Combining high grain number and weight through a DH-population to improve grain yield potential of wheat in high-yielding environments. *Field Crops Research* 145:106–115.

Carena M.J., Yang J., Caffarel J.C., Mergoum M. and Hallauer A.R. 2009. Do different production environments justify separate maize breeding programs? *Euphytica* 169:141–150.

Ceccarelli S., Grando S., Maatougui M., Michael M., Slash M., Haghparast R., Rahmanian M., Taheri A., Al-Yassin A., Benbelkacem A., Labdi M., Mimoun H. and Nachit M. 2010. Plant breeding and climate changes. *Journal of Agricultural Science* 148:627-637.

De Vita P., Di Paolo E., Fecondo G., Di Fonzo N. and Pisante M. 2007. No-tillage and conventional tillage effects on durum wheat yield, grain quality and soil moisture content in southern Italy. *Soil Tillage Research* 92:69–78.

Fischer R.A. 2009. Farming systems of Australia: exploiting the synergy between genetic improvement and agronomy. In: Sadras V. and Calderini D. (eds), *Crop physiology: Applications for Genetic Improvements and Agronomy*. Elsevier. Amsterdam, The Netherlands. pp. 23-54.

Graybosch R.A. and Peterson C.J. 2010. Genetic improvement in winter wheat yields in the great plains of North America, 1959-2008. *Crop Science* 50:1882-1890.

Green A.J., Berger G., Griffey C.A., Pitman R., Thomason W., Balota M. and Ahmed A. 2012. Genetic Yield Improvement in Soft Red Winter Wheat in the Eastern United States from 1919 to 2009. *Crop Science* 52:2097-2108.

Guarda G., Padovan S. and Delogu G. 2004. Grain yield, nitrogen-use efficiency and baking quality of old and modern Italian bread-wheat cultivars grown at different nitrogen levels. *European Journal of Agronomy* 21:181–192.

Higginbotham R.W., Jones S. S. and Carter A.H. 2011. Adaptability of wheat cultivars to a late-planted no-till fallow production system. *Sustainability* 3: 1224-1233.

Joshi A. K., Chand R., Arun B., Singh R. P. and Ortiz R. 2007. Breeding crops for reduced-tillage management in the intensive, rice–wheat systems of South Asia. *Euphytica* 153: 135–151.

Kumudini S., Grabau L., Van Sanford D. and Omielan J. 2008. Analysis of yield-formation processes under no-till and conventional tillage for soft red winter wheat in the south-central region. *Agronomy Journal* 100:1026–1032.

Lopes M.S., Reynolds M.P., Manes Y., Singh R.P., Crossa J. and Braun H.J. 2012. Genetic yield gains and changes in associated traits of CIMMYT spring bread wheat in a “historic” set representing 30 years of breeding. *Crop Science* 52:1123-1131.

Maich R.H., Chaves A.G., Coraglio M.C., Costero B. and Torres L.E. 2006. Agronomic performance of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) and hexaploid triticale (X *Triticosecale* Wittmack) based on the use of a selection index. *Cereal Research Communications* 34:1123-1127.

Mandal N.P., Sinha P.K., Variar M., Shukla V.D., Perraju P., Mehta A., Pathak A.R., Dwivedi J.L., Rathi S.P.S., Bhandarkar S., Singh B.N., Singh D.N., Panda S., Mishra N.C., Singh Y.V., Pandya R., Singh M.K., Sanger R.B.S., Bhatt J.C., Sharma R.K., Raman A., Kumar A. and Atlin G. 2010. Implications of genotype × input interactions in breeding superior genotypes for favorable and unfavorable rain fed upland environments. *Field Crops Research* 118:135–144.

Matus I., Mellado M., Pinares M., Madariaga R. and del Pozo A. 2012. Genetic progress in winter wheat cultivars released in Chile from 1920 to 2000. *Chilean Journal. of Agricultural Research* 72:303-308.

Mladenov N., Hristov N., Kondic-Spika A., Djuric V., Jevtic R. and Mladenov V. 2011. Breeding progress in grain yield of winter wheat cultivars grown at different nitrogen levels in semiarid conditions. *Breeding Science* 61:260–268.

Morgounov A., Zykin V., Belan I., Roseeva L., Zelenskiy Y., Gomez-Becerra H.F., Budak H. and Bekes F. 2010. Genetic gains for grain yield in high latitude spring wheat grown in Western Siberia in 1900–2008. *Field Crops Research* 117:101-112.

Mustăţea P. and Saulescu N.N. 2011. Estimation of genetic trends in yield and agronomic traits of recent Romanian winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars, using direct comparisons in multi-year, multi-location yield trials. *Romanian Agricultural Research* 28:18-24.



- Reynolds M.P., Acevedo E., Sayre K.D. and Fischer R.A. 1994. Yield potential in modern wheat varieties: Its association with a less competitive ideotype. *Field Crops Research* 37:149–160.
- Reynolds M., Foulkes M.J., Slafer G.A., Berry P., Parry M.A.J., Snape J.W. and Angus W.J. 2009. Raising yield potential in wheat. *Journal of Experimental Botany* 60:1899–1918.
- Rodrigues O., Barreneche Lhamby J.C., Didonet A.D. and Marchese J.A. 2007. Fifty years of wheat breeding in Southern Brazil: yield improvement and associated changes. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 42:817-825.
- Royo C., Álvaro F., Martos V., Ramdani A., Isidro J., Villegas D. and García del Moral L.F. 2007. Genetic changes in durum wheat yield components and associated traits in Italian and Spanish varieties during the 20th century. *Euphytica* 155:259–270.
- Sanchez-García M., Royo C., Aparicio N., Martín-Sánchez J.A. and Álvaro F 2013. Genetic improvement of bread wheat yield and associated traits in Spain during the 20th century. *Journal of Agricultural Science* 151:105–118.
- Shearman V.J., Sylvester-Bradley R., Scott R.K. and Foulkes M.J. 2005. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. *Crop Science* 45:175-185.
- Sip V., Ruzek P., Chrpova J., Vavera R. and Kusa H. 2009. The effect of tillage practice, input level and environment on the grain yield of winter wheat in the Czech Republic. *Field Crops Research* 113:131–137.
- Tian Z., Jing Q., Dai T., Jiang D. and Cao W. 2011. Effects of genetic improvements on grain yield and agronomic traits of winter wheat in the Yangtze River Basin of China. *Field Crops Research* 124:417-425.
- Trethowan R.M., Reynolds M., Sayre K. and Ortiz-Monasterio I. 2005. Adapting wheat cultivars to resource conserving farming practices and human nutritional needs. *Association of Applied Biologists. Annals of Applied Biology* 146:405–413.
- Trethowan R., Manes Y. and Chattha T. 2009. Breeding for improved adaptation to conservation agriculture improves crop yields. 4th World Congress on Conservation Agriculture, New Delhi, India. pp. 207-211.
- Trethowan R. M., Turner M. A. and Chattha T. M. 2010. Breeding strategies to adapt crops to a changing climate. Chapter 9. En: Lobell D. and Burke M. (eds), *Climate Change and Food Security, Advances in Global Change Research* 37(Part III):155-174.
- Underdahl J.L., Mergoum M., Ransom J.K and Schatz B.G. 2008. Agronomic traits improvement and associations in hard red spring wheat cultivars released in North Dakota from 1968 to 2006. *Crop Science* 48:158–166.

Xiao Y.G., Qian Z.G., Wu K., Liu J.J., Xia X.C., Ji W.Q. and He Z.H. 2012. Genetic gains in grain yield and physiological traits of winter wheat in Shandong Province, China, from 1969 to 2006. *Crop Science* 52:44-56.

Zhang H., Turner N.C. and Poole M.L. 2012. Increasing the harvest index of wheat in the high rainfall zones of southern Australia. *Field Crops Research* 129:111–123.

Zheng T.C., Zhang X.K., Yin G.H., Wang L.N., Han Y.L., Chen L., Huang F., Tang J.W., Xia X.C. and He Z.H. 2011. Genetic gains in grain yield, net photosynthesis and stomatal conductance achieved in Henan Province of China between 1981 and 2008. *Field Crops Research* 122:225–233.

Zhou Y., He Z. H., Sui X. X., Xia X. C., Zhang X. K. and Zhang G. S. 2007. Genetic improvement of grain yield and associated traits in the northern China winter wheat region from 1960 to 2000. *Crop Science* 47:245-253.

## CAPÍTULO 3

### **Asociación entre caracteres de interés agronómico e industrial en trigo (*Triticum aestivum* L) al cabo de diez ciclos de selección recurrente**

#### **Resumen**

El objetivo del presente capítulo fue analizar las relaciones entre el comportamiento agronómico y la calidad industrial del grano de trigo, cultivado en secano y luego de diez ciclos de selección recurrente. Veinticuatro líneas, cuatro por cada uno de los ciclos 0, 2, 4, 6, 8 y 10 de selección recurrente, fueron evaluadas durante dos años consecutivos (2011 y 2012). Las líneas experimentales fueron cultivadas tanto en siembra convencional como en siembra directa. Se midieron el rendimiento en grano y el peso de mil granos, por su parte se estimaron el índice de cosecha y el número de granos por metro cuadrado. Se consideraron como pruebas predictivas de calidad industrial de las harinas al porcentaje de proteínas, a la capacidad de retención de ácido láctico (SRC-lac) y al índice de sedimentación en dodecil sulfato de sodio (IS-SDS). Se usó el coeficiente de correlación de Spearman con el fin de analizar las relaciones entre el rendimiento en grano, sus componentes y los parámetros de calidad del grano. Cuando el cultivo de trigo se condujo en siembra convencional, el porcentaje de proteínas de la harina se asoció negativamente con el rendimiento en grano y sus respectivos componentes. La prueba IS-SDS hizo lo propio con el peso del grano; mientras que la prueba SRC-lac se asoció positivamente con todas las variables agronómicas analizadas. En siembra directa resultaron positivas las asociaciones entre la prueba IS-SDS y el índice de cosecha del mismo modo que lo hizo la el ensayo SRC-lac con la totalidad de las variables agronómicas. Circunscribiendo la discusión de los resultados al manejo del cultivo en siembra convencional, al cabo de diez ciclos de selección recurrente el progreso logrado para el rendimiento en grano estuvo acompañado por una merma el porcentaje de proteínas de la harina. Sin embargo, la disminución en el porcentaje de proteínas en los ciclos de selección más avanzados fue compensada por un mejoramiento en la calidad proteica.

**Palabras clave:** rendimiento, contenido de proteínas, mejoramiento genético

## Introducción

En un contexto productivo encaminado a adoptar prácticas de manejo del suelo cada vez más sustentables (por ejemplo, la siembra directa), resulta insoslayable medir el progreso genético no solo bajo un sistema de labranza convencional (SC) sino también en siembra directa (SD).

El rendimiento en grano (G) y el contenido de proteínas (PROT), esta última variable a través de su contribución a la calidad industrial de la harina, son los caracteres más importantes en la determinación del valor económico de un cultivo de trigo (Delzer *et al.*, 1995). En consecuencia, el desarrollo de variedades de trigo con altos potenciales de rendimiento en grano y a su vez resistentes a estreses de índole biótico y abiótico, con una aceptable calidad panadera, constituye el principal objetivo en un programa de mejoramiento genético en trigo para pan (Tayyar, 2010). La comparación de cultivares de distintas épocas brinda una interesante perspectiva evolutiva respecto a los cambios acontecidos a nivel de variables morfofisiológicas, agronómicas y cualitativas (De Vita *et al.*, 2007). Para alcanzar dicho cometido se suelen comparar líneas altamente productivas respecto a testigos históricos de probada aptitud, variedades antiguas versus modernas (Giunta *et al.*, 2007), como así también genotipos derivados de sucesivos ciclos de selección recurrente (SR) (Maich and Di Rienzo, 2014).

En muchos países del mundo el mejoramiento genético en trigo ha repercutido positivamente sobre el rendimiento en grano. La mayoría de estos estudios muestran que conjuntamente con el incremento en G se constató un aumento en el índice de cosecha (IC), aumentos pequeños o insignificantes en la producción de biomasa aérea, disminución en la altura de la planta y un mayor número de granos (NG) por metro cuadrado (De Vita *et al.*, 2007; Zhou *et al.*, 2007), sin por ello modificar el peso individual de éstos (PG) (Brancourt-Hulmel *et al.*, 2003).

Al igual que otros cultivos, una mayor partición del carbono secuestrado a los granos se refleja en una relación negativa entre G y PROT (Oury and Godin, 2007). Esta caída en el contenido de proteínas de los granos por lo general no se encuentra asociada a efectos genéticos sino más bien a su dilución en una mayor cantidad de carbohidratos particionados a los granos (De Vita *et al.*, 2007).

Sin embargo, la disminución en la cantidad de proteínas y el contenido de gluten húmedo se ha visto compensada con un mejoramiento en la calidad proteica (Hristov *et al.*, 2010). En algunas ocasiones el mayor contenido proteico del grano no se refleja en la calidad de la harina, mientras que la prueba del índice de sedimentación en dodecil sulfato de sodio (IS-SDS) sí lo hace (Peighambardoust *et al.*, 2011). La asociación negativa entre la prueba IS-SDS y el rendimiento en grano, señalada en el trabajo de Oelofse *et al.* (2010), se atribuye a la correlación positiva entre la prueba IS-SDS y el contenido de proteínas de la

harina. La prueba de la capacidad de retención de ácido láctico (SRC-lac) se encuentra asociada a la formación del entramado del gluten durante la panificación y a su fuerza; por lo que resulta de utilidad toda vez que se deba predecir la aptitud panadera de la harina de trigo (Colombo *et al.*, 2008).

En función de los argumentos esgrimidos con anterioridad, el hecho de haberse alcanzado un progreso significativo en cuanto al rendimiento en grano no necesariamente implica una caída en la calidad industrial de la harina de trigo. El objetivo del presente estudio fue el de analizar, al cabo de diez ciclos de selección recurrente desarrollados en secano las relaciones entre variables agronómicas y cualitativas asociadas a la calidad industrial de las harinas.

## **Materiales y Métodos**

### *Material experimental*

Dieciséis variedades comerciales de trigo para pan (*Triticum aestivum* L.) se cruzaron entre sí en 1985 obteniéndose 83 combinaciones híbridas  $F_1$  consideradas a la postre como la población original ( $C_0$ ) y punto de partida para un programa de selección basado en un esquema de SR con una duración de dos años por ciclo (evaluación y entrecruzamiento). El programa de mejoramiento se llevó a adelante en el Campo Escuela de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Córdoba), Córdoba ( $31^\circ 29' S$ ;  $64^\circ 00' W$ ) en la región central semiárida de Argentina. En cada ocasión el manejo del cultivo se condujo en condiciones de secano. Por ciclo se utilizaron como unidades de selección a familias de hermanos completos o  $S_0$ . Como criterio de selección se usó un índice en el que se combinaron variables asociadas a la espiga, el rendimiento en grano y sus principales componentes fisiológicas (biomasa aérea e índice de cosecha) y numéricas (número y peso del grano). Cabe destacarse que el programa de mejoramiento se condujo bajo un sistema de siembra convencional sin haber recurrido a fertilización alguna. Mezclas de semilla de las progenies  $S_0$  seleccionadas en cada ciclo perteneciente a los ciclos  $C_0$ ,  $C_2$ ,  $C_4$ ,  $C_6$ ,  $C_8$  y  $C_{10}$  se multiplicaron anualmente. Durante el año 2009 se cultivaron de manera espaciada plantas pertenecientes a cada uno de los ciclos mencionados. Se escogieron cuatro plantas por ciclo con una producción de grano adecuada para la ulterior evaluación como familias derivadas.

### *Ensayos a campo*

Las veinticuatro líneas, cuatro por cada uno de los ciclos de SR 0, 2, 4, 6, 8 y 10, fueron evaluadas durante dos años consecutivos (2011 y 2012) en condiciones de secano y en el mismo sitio donde se desarrolló el programa de selección. La evaluación de las líneas experimentales se condujo tanto en SC como en SD. A raíz de la restricción impuesta por

los sistemas de manejo del suelo utilizados, se recurrió a sendos diseños en bloques completos aleatorizados con dos repeticiones ubicados en sectores colindantes manejados en SC y SD por más de ocho años. Las unidades experimentales consistieron en parcelas de un surco de 5 metros de longitud distanciados por 20 cm, habiéndose recurrido a una densidad de siembra de 250 semillas viables  $m^{-2}$ . A nivel parcelar se midieron el G ( $g\ m^{-2}$ ) y el PG (g); como así también se estimaron el IC (%) a partir del cociente entre G y la producción de biomasa aérea por 100, y el NG por metro cuadrado estimado a partir de G y PG.

#### *Pruebas cualitativas*

Las muestras de harina se obtuvieron con un molino Agromatic AG AQC 109 (Suiza). El contenido de proteínas se determinó por el Micro Método de Kjeldhal modificado para ácido bórico (Método 46-13, AACC, 2000). Los valores de proteína se calcularon como  $N \times 5,7$  y se ajustaron a 14 % de humedad (Método 44-19, AACC, 2000). Los valores del IS-SDS se determinaron pesando 1 g de harina que se humedeció en una probeta de 25mL con 8mL de solución de Coomassie (10mg/L). La muestra se agitó en primera instancia con cinco inversiones manuales y luego mediante vortex durante 1 min. Se mantuvo en reposo 2 min 40 s y se agitó con vortex por 5 s. Se dejó reposar 1 min 55 s y se agitó nuevamente por 5 s, para luego agregar 12 mL de SDS al 2% (w/v). Se llevó a un agitador oscilatorio 1 min, finalmente se mantuvo en reposo 14 min y se leyó el volumen de harina humectada expresado en  $cm^3$  (AACC, 2000). La prueba de la capacidad de retención de ácido láctico (SRC-lac) se hizo de acuerdo al Método 56-11 (AACC, 2000). Para realizar esta prueba se usó una muestra 5 g de harina suspendida en una solución al 5% de ácido láctico. Se la dejó hidratar durante 20 min con sucesivas agitaciones cada 5 min. Posteriormente las muestras se centrifugaron a 1000 g durante 15 min, se descartó el sobrenadante y se dejó escurrir el tubo a  $90^\circ$  durante un lapso de 10 min. Por diferencia de peso se determinó la cantidad de agua retenida obteniéndose el porcentaje de SRC.

#### *Análisis estadístico*

Se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman para analizar las relaciones entre G, PG, IC, NG, PROT, IS-SDS y SRC-lac. Para tal fin se usó el programa estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2013).

### **Resultados**

En las tablas 3.1 (SC) y 3.2 (SD) se presentan las asociaciones entre las variables analizadas. Contextualizando los resultados al manejo del cultivo en SC, las correlaciones entre las variables agronómicas resultaron significativas y positivas, hecha la salvedad para la asociación entre PG y NG (Tabla 3.1). Con respecto a las variables cualitativas,

PROT puso de manifiesto una asociación positiva con IS-SDS, tal como esta última variable lo hizo con SRC-lac (Tabla 3.1). Al analizar las relaciones entre variables agronómicas y cualitativas, PROT se asoció negativamente con G, IC, PG y NG (Tabla 3.1). Cuando se toma en cuenta las dos pruebas predictivas de la calidad industrial de la harina (IS-SDS y SRC-lac) y su asociación con las variables agronómicas, la prueba IS-SDS evidenció una asociación negativa solo con PG. Por su parte, el SRC-lac se asoció de manera positiva con las cuatro variables agronómicas analizadas (Tabla 3.1).

Cuando se procede al análisis de los resultados del cultivo conducido en SD (Tabla 3.2), y al igual de lo observado en SC, las variables agronómicas se asociaron de manera positiva entre sí, a excepción de PG y NG. Una asociación negativa se constató entre las variables cualitativas PROT y SRC-lac, como así también entre PROT y PG. Por su parte se observaron asociaciones positivas entre IS-SDS y el IC, al igual que entre SRC-lac y la totalidad de las variables agronómicas analizadas (Tabla 3.2).

### **Discusión**

Estos resultados deben ser contextualizados en el esquema de selección recurrente del cual derivan los materiales analizados. Maich and Di Rienzo (2014) observaron un progreso genético significativo para G cuando el cultivo se condujo en SC, lo que no ocurrió en el caso de SD.

Sin embargo, se constató un avance significativo para el rendimiento en grano por espiga (componente de G) cuando se midió la respuesta a la selección en SD. Circunscribiendo la discusión a los resultados obtenidos en SC, después de diez ciclos de selección recurrente los valores logrados más altos de G estuvieron acompañados por una disminución en el porcentaje de proteínas.

La reconocida relación negativa entre G y PROT se vio confirmada con estos resultados. Las pruebas predictivas de calidad (IS-SDS y SRC-lac) respondieron de manera distinta con el devenir de los ciclos de SR.

Como era de esperar, la prueba IS-SDS se asoció con las variables agronómicas tal como lo hizo PROT, alcanzando significancia estadística solo con PG. La ausencia de una correlación significativa entre G y IS-SDS se contradice con los resultados obtenidos por otros autores (Oelofse *et al.*, 2010), donde ambas variables se asociaron negativamente.

La asociación entre SRC-lac y las variables agronómicas se diferenció de la que puso de manifiesto PROT con éstas últimas. La asociación positiva entre SRC-lac y la totalidad de las variables agronómicas analizadas nos indica que no necesariamente cantidad (PROT) y calidad (SRC-lac) de las proteínas van de la mano.

El progreso genético alcanzado para el rendimiento en grano por espiga, cuando se midió en SD, brinda argumentos adicionales respecto al mejoramiento de la calidad de las

harinas. La disminución en el porcentaje de proteínas con el transcurrir de los ciclos de SR fue compensada con un mejoramiento de su calidad.

Esta respuesta diferencial por parte de la cantidad y la calidad de las proteínas respecto al progreso genético alcanzado para G puede en parte explicarse por el hecho de que el programa de mejoramiento genético vegetal se conduce en un ambiente semiárido y en seco.

Li *et al.* (2013) observaron que el IS-SDS aumentó de manera significativa cuando el cultivo pasó de una situación sin estrés a una condición de sequía o estrés por calor. Al comparar los dos sistemas de manejo del suelo (SC y SD) Maich and Di Rienzo (2014) observaron una merma significativa en el rendimiento cuando al trigo se lo cultivó en SD.

En otros términos, en SD el cultivo de trigo estuvo sujeto a un estrés de índole abiótico en alguna etapa de su desarrollo, lo que indujo una merma en el rendimiento en grano. A diferencia de lo que ocurre cuando se habla de tolerancia a un estrés biótico, sustentada por lo general en determinantes monogénicos, la respuesta a los estreses abióticos son de característica multigénica, lo que dificulta el mejoramiento genético en tal sentido (Vinocur and Altman, 2005).

A raíz de que las proteínas están directamente involucradas con la respuesta al estrés por parte de la planta, los estudios inherentes a la proteómica pueden contribuir significativamente a desentrañar las posibles relaciones entre la abundancia de proteínas y la adaptación de las plantas al estrés (Kosová *et al.*, 2011).

La producción de proteínas específicas por parte de las plantas es lo que las distingue, no obstante, responden de manera similar ante situaciones de estrés produciendo proteínas de choque térmico (HSP, por sus siglas en inglés), lo que pone de manifiesto una estrategia adaptativa común por parte de las plantas (Timperio *et al.*, 2008).

Las HSP y otras chaperonas garantizan a las proteínas y al ARN su estabilidad estructural frente a temperaturas extremas (Wang *et al.*, 2004). Algunas HSP se encuentran asociadas a la calidad de las harinas (Wardlaw *et al.*, 2002). Al respecto, Altenbach (2012) observó cambios en cuanto los componentes proteicos del gluten (gliadinas y gluteninas) en respuesta a la temperatura y la sequía.

En cuanto a la asociación entre HSP y gluteninas se ha observado que la presencia de la HSP 70 no estuvo asociada a la pérdida de fuerza de la masa (Blumenthal *et al.*, 1998), probablemente debido a modificaciones post-traduccionales de fosforilación y glicosilación de las gluteninas (Lin *et al.*, 2005). Sin embargo, la secuenciación de los genes aguas arriba de la región codificante para las gluteninas de alto peso molecular no permitió detectar la presencia de promotores de choque térmico (Blumenthal *et al.*, 1998).



Por su parte, se ha observado que varios tipos de gliadinas actúan como proteínas de choque térmico, de hecho, en los genes gliadínicos secuenciados se encuentran presentes un buen número de elementos de choque térmico (Blumenthal *et al.*, 1994). A raíz de este tipo de asociación, se ha sugerido que la calidad de la harina puede verse deteriorada, no habiéndose demostrado hasta el momento (Maestri *et al.*, 2002).

Si bien no se cuenta con evidencias experimentales contundentes respecto a que la acumulación de las HSP se encuentra asociada a la calidad panadera de la harina de trigo (Maestri *et al.*, 2002), el desarrollo de cultivares con una creciente adaptación al cambio climático global mediante el uso de un esquema de mejoramiento convencional como la SR, desarrollado en secano, sujeto frecuentemente a temperaturas extremas y un estrés hídrico terminal durante el llenado del grano, nos permitiría producir semilla con una aceptable viabilidad, incrementar el rendimiento en grano y, por qué no, mejorar la calidad industrial de las harinas. De confirmarse esta previsión, cualquier deterioro en la calidad de la harina no debería endilgarse a causas genéticas. Sin embargo, se debe tener mucho cuidado de mantener los actuales valores de fuerza de la masa tal de no exceder los niveles requeridos por parte de la industria panadera.

En síntesis, es posible lograr altos rendimientos en grano conjuntamente con una adecuada calidad funcional de las harinas. Producto del programa de SR conducido en secano se obtuvieron genotipos de trigo tolerantes a los estreses de índole abiótica propios del ambiente. Sin embargo, el contenido de proteínas debería ser mantenido en los valores actuales a medida que aumenta el rendimiento en grano.

**Tabla 3.1. Coeficientes de correlación de Spearman y sus correspondientes p-valores entre el rendimiento y sus componentes y parámetros de calidad, bajo siembra convencional.**

(n=96)	Rendimiento (g m <sup>-2</sup> )	Índice de cosecha (%)	Peso del grano (g)	Granos/ m <sup>2</sup>	Proteína (%)	SDS (ml)
Índice de cosecha (%)	0,69 (p < 0,0001)					
Peso del grano (g)	0,41 (p < 0,0001)	0,30 (p = 0,0034)				
Granos/m <sup>2</sup>	0,94 (p < 0,0001)	0,65 (p < 0,0001)	0,12 (p = 0,2451)			
Proteína (%)	-0,64 (p < 0,0001)	-0,40 (p < 0,0001)	-0,31 (p = 0,0021)	-0,59 (p < 0,0001)		
IS-SDS (ml)	-0,20 (p = 0,0513)	-0,05 (p = 0,6477)	-0,30 (p = 0,0028)	-0,12 (p = 0,2520)	0,33 (p = 0,0009)	
SRC-lac (%)	0,35 (p = 0,0004)	0,31 (p = 0,0020)	0,25 (p = 0,0127)	0,28 (p = 0,0054)	0,05 (p = 0,6568)	0,24 (p = 0,0202)

**Tabla3.2. Coeficientes de correlación de Spearman y sus correspondientes p-valores entre el rendimiento y sus componentes y parámetros de calidad, bajo siembra directa.**

(n=96)	Rendimiento (g m <sup>-2</sup> )	Índice de cosecha (%)	Peso del grano (g)	Granos/ m <sup>2</sup>	Proteína (%)	SDS (ml)
Índice de cosecha (%)	0,86 (p < 0,0001)					
Peso del grano (g)	0,48 (p < 0,0001)	0,32 (p = 0,0013)				
Granos/ m <sup>2</sup>	0,93 (p < 0,0001)	0,83 (p < 0,0001)	0,18 (p = 0,0814)			
Proteína (%)	-0,09 (p = 0,3595)	0,17 (p = 0,0904)	-0,29 (p = 0,0038)	0,01 (p = 0,8899)		
IS-SDS (ml)	0,09 (p = 0,3667)	0,22 (p = 0,0291)	-0,07 (p = 0,5232)	0,13 (p = 0,1984)	0,13 (p = 0,2131)	
SRC-lac (%)	0,50 (p < 0,0001)	0,35 (p = 0,0004)	0,50 (p < 0,0001)	0,33 (p = 0,0012)	-0,28 (p = 0,0057)	0,14 (p = 0,1621)

## Bibliografía

AACC 2000. Approved Methods of the American Association of Cereal Chemists, American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN. U.S.A.

Altenbach S. B. 2012. New insights into the effects of high temperature, drought and post-anthesis fertilizer on wheat grain development. *Journal of Cereal Science* 56: 39-50.

Blumenthal C., Wrigley C.W., Batey I.L. and Barlow E.W.R. 1994. The heat-shock response relevant to molecular and structural changes in wheat yield and quality. *Australian Journal of Plant Physiology* 21: 901 – 909.

Blumenthal C., Stone P.J., Gras P. W., Bekes F., Clarke B., Barlow E. W. R., Appels R. and Wrigley C. W. 1998. Heat-shock protein 70 and dough-quality changes resulting from heat stress during grain filling in wheat. *Cereal Chemistry* 75: 43-50.

Brancourt-Hulmel M., Doussinault G., Lecomte C., Bérard P., Le Buanec B. and Trottet M. 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Science* 43: 37-45.

Colombo A., Pérez G.T., Ribotta P.D. and León A.E. 2008. A Comparative study of physicochemical tests for quality prediction of Argentine wheat flours used as corrector flours and for cookie production. *Journal of Cereal Science* 45: 775-780.

De Vita P., Li Destri Nicosia O., Nigro F., Platani C., Riefolo C., Di Fonzo N. and Cattivelli L. 2007. Breeding progress in morpho-physiological, agronomical and qualitative traits of durum wheat cultivars released in Italy during the 20th century. *European Journal of Agronomy* 26: 39–53.

Delzer B. W., Busch R. H. and Hareland G. A. 1995. Recurrent selection for grain protein in hard red spring wheat. *Crop Science* 35: 730-735.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. and Robledo C.W. InfoStat versión 2013. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Giunta F., Motzo R. and Pruneddu G. 2007. Trends since 1900 in the yield potential of Italian-bred durum wheat cultivars. *European Journal of Agronomy* 27:12–24.

Hristov N., Mladenov N., Djuric V., Kondic-Spika A. and Marjanovic-Jeromela A. 2010. Improvement of wheat quality in cultivars released in Serbia during the 20 century. *Cereal Research Communications* 38:111-121.

Kosová K., Vítámvás P., Prášil I. T. and Renaut J. 2011. Plant proteome changes under abiotic stress-contribution of proteomics studies to understanding plant stress response. *Journal of Proteomics*.74:1301–1322.

Li Y., Wu Y., Hernandez-Espinosa N. and Peña R. J. 2013. The influence of drought and heat stress on the expression of end-use quality parameters of common wheat. *Journal of Cereal Science* 57:73-78.

Lin S.K., Chan M.C., Tsai Y.G. and Lur H.S. 2005. Proteomic analysis of the expression of proteins related to rice quality during caryopsis development and the effect of high temperature on expression. *Proteomics* 5:2140-2156.

Maich R.H. and Di Rienzo J.A. 2014. Genotype  $\times$  tillage interaction in a recurrent selection program in wheat. *Cereal Research Communications* 42: 525-533.

Maestri E., Klueva N., Perrotta C., Gulli M., Nguyen H. T. and Marmioli N. 2002. Molecular genetics of heat tolerance and heat shock proteins in cereals. *Plant Molecular Biology* 48: 667-681.

Oelofse R.M., Labuschagne M.T. and van Deventer C.S. 2010. Influencing factors of Sodium Dodecyl Sulfate sedimentation in bread wheat. *Journal of Cereal Science* 52:96-99.

Oury F.X. and Godin C. 2007. Yield and grain protein concentration in bread wheat: how to use the negative relationship between the two characters to identify favourable genotypes? *Euphytica* 157:45-57.

Peighambardoust S.H., Ghamari M. and Naghavi S. 2011. Application of gel-protein analysis compared to conventional quality tests in characterisation of Iranian wheat cultivars. *Cereal Research Communications* 39(3): 394-404.

Tayyar S. 2010. Variation in grain yield and quality of romanian bread wheat varieties compared to local varieties in northwestern turkey. *Romanian Biotechnological Letters* 15: 5189-5196.

Timperio A.M., Egidio M.G. and Zolla L. 2008. Proteomics applied on plant abiotic stresses: Role of heat shock proteins (HSP). *Journal of Proteomics* 71: 391-411.

Vinocur B. and Altman A. 2005. Recent advances in engineering plant tolerance to abiotic stress: achievements and limitations. *Current Opinion in Biotechnology* 16: 123-132.

Wang M.L., Zhao Y., Chen F. and Yin X.C. 2004. Inheritance and potentials of a mutated dwarfing gene *ndf1* in *Brassica napus*. *Plant Breeding* 123: 449-453.

Wardlaw I. F., Blumenthal C., Larroque O. and Wrigley C. W. 2002. Contrasting effects of chronic heat stress and heat shock on kernel weight and flour quality in wheat. *Functional Plant Biology* 29: 25 - 34.

Zhou Y., He Z. H., Sui X.X., Xia X. C., Zhang X. K. and Zhang G. S. 2007. Genetic improvement of grain yield and associated traits in the northern China winter wheat region from 1960 to 2000. *Crop Science* 47: 245-253.

## CAPÍTULO 4

# Variaciones en la producción de rastrojo y su contenido en cenizas y carbono luego de diez ciclos de selección recurrente en trigo cultivado en siembra convencional y siembra directa

### Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar los cambios en la producción de rastrojo, y los correspondientes contenidos de cenizas y carbono, a través de diez ciclos de selección recurrente en trigo cultivado en siembra convencional (SC) y siembra directa (SD). Se evaluaron veinticuatro genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.), cuatro por cada uno de los siguientes ciclos de selección recurrente (SR): 0, 2, 4, 6, 8 y 10. Los ensayos se implantaron a campo durante un bienio (2011 y 2012). El contenido de cenizas (%) se expresó en base a la cantidad de materia seca incinerada. Para estimar el porcentaje de carbono se partió de la suposición de que el 50% de la materia orgánica es carbono. Se midió el rastrojo remanente luego de la trilla ( $\text{g m}^{-2}$ ). Se recurrió a un modelo lineal mixto (regresión) para describir estadísticamente los cambios en los valores medios de las variables analizadas como respuesta a la selección y al tipo de labranza. Con el transcurrir de los ciclos de selección el porcentaje de cenizas aumentó cuando el material se evaluó en SC y disminuyó en SD. A lo largo de los diez ciclos de SR evaluados, el porcentaje de carbono en el rastrojo disminuyó en SC a la vez que aumentó en SD en medio punto de porcentaje. La cantidad de carbono secuestrado y remanente en el rastrojo disminuyó a razón  $5 \text{ g m}^{-2}\text{ciclo}^{-1}$  en SC ( $p=0,0092$ ) mientras que no sufrió cambio estadísticamente significativo en SD ( $p=0,1436$ ). Por su parte, la producción de rastrojo disminuyó significativamente en  $12 \text{ g m}^{-2}\text{ciclo}^{-1}$  en SC sin cambios por su parte en SD ( $p=0,1844$ ). El incremento en el contenido de cenizas observado en SC se explica por el mayor consumo de agua en los ciclos más avanzados de SR. En sintonía con lo acontecido a nivel de cenizas, el porcentaje de carbono en el rastrojo en SC disminuyó producto de la removilización de las reservas desde tallos y hojas a los granos.

**Palabras clave:** contenido de cenizas y carbono en rastrojo, progreso genético, sistemas de labranza.

## Introducción

El mecanismo por el cual se acumulan los minerales en los tejidos vegetales puede explicarse, parcialmente, por el transporte pasivo a través de los vasos xilemáticos por efecto de la transpiración (Cabrera-Bosquet *et al.*, 2009). Así, una alta tasa de transpiración induce a un incremento en la cantidad de minerales transportados hacia las hojas (Zhu *et al.*, 2008). En este contexto, Merah *et al.* (2001) llegan a hipotetizar que una baja eficiencia de transpiración (TE) puede resultar en una mayor tasa de partición de materia seca a los granos. Por su parte, Monneveux *et al.* (2006) afirman que seleccionando durante la madurez del grano para una alta tasa de discriminación del isótopo de carbono  $^{13}\text{C}$  ( $\Delta$ ) se promueve, bajo condiciones de estrés hídrico, altos valores de conductancia estomática, baja eficiencia transpiratoria y altos rendimientos en grano. Debido a los altos costos del instrumental para medir  $\Delta$  y la destreza requerida a tal fin, se ha propuesto a la determinación del contenido de cenizas (minerales) como un método alternativo a la cuantificación de  $\Delta$  (Araus *et al.*, 1998; Merah *et al.*, 1999). Masle *et al.* (1992) observaron que aquellos genotipos con una alta tasa de transpiración por unidad de materia seca producida (baja TE y alto  $\Delta$ ) poseían un más alto contenido de cenizas en la materia seca de las hojas. Así mismo, Misra *et al.* (2006) encontraron una correlación positiva y significativa entre el contenido de cenizas en hoja y el rendimiento en grano en cultivos sujetos a sequía o estrés hídrico posterior a la floración. En consecuencia, altos valores de conductancia estomática (indicio de intercambio gaseoso a nivel de estomas) y de cenizas en los órganos vegetativos se encuentran asociados a altos rendimientos en grano. Varios autores apoyan esta hipótesis: Araus *et al.*, 1998; Merah *et al.*, 1999; Araus *et al.*, 2001; and Monneveux *et al.*, 2004 (a). En este contexto, comparar materiales derivados de sucesivos ciclos de selección recurrente puede brindar elementos de juicio acerca de la tendencia evolutiva del contenido de cenizas.

Gajri *et al.* (1992) observaron que la superioridad agronómica de la siembra convencional (SC) en relación a la siembra directa (SD) estuvo acompañada por una mayor tasa de transpiración. La adopción de la SD trajo aparejado un insoslayable beneficio como un mayor almacenamiento de agua en el suelo, pero una limitante no menos importante, la inmovilización del nitrógeno y su concomitante inaccesibilidad para las plantas (López-Bellido y López-Bellido, 2001). El hecho de que la SD garantice una mayor cantidad de agua almacenada en el suelo no significa que el cultivo incremente el uso de ésta (Baumhardt y Jones, 2002). Más aún, Fabrizzi *et al.* (2005) observaron que la mayor cantidad de agua remanente en el suelo al momento de la cosecha fue la resultante de un menor crecimiento del cultivo debido a un déficit de nitrógeno. Sin embargo, la respuesta agronómica a la SD de un cultivo de trigo estuvo en función de la disponibilidad de agua más que la de nitrógeno (O'leary y Connor, 1997; Fuentes *et al.*, 2003). En tal sentido, la

merma en el rendimiento observada en SD puede ser consecuencia de un menor consumo de agua por parte del cultivo durante encañazón (López y Arrúe, 1997).

El objetivo de este estudio fue medir los cambios ocurridos a nivel de producción de rastrojo y el contenido de carbono y cenizas en tejidos vegetativos luego de diez ciclos de selección recurrente en trigo evaluados en siembra directa y siembra convencional.

## **Materiales y Métodos**

### *Material experimental*

Veinticuatro genotipos de trigo (*Triticum aestivum* L.), cuatro por cada uno de los ciclos 0, 2, 4, 6, 8 y 10 de selección recurrente (SR), fueron evaluados en este trabajo. Los veinticuatro genotipos no difirieron de manera sustantiva en cuanto a su fenología. Cada ciclo de selección recurrente insumió dos años (evaluación y entrecruzamiento de los materiales seleccionados). La unidad de selección correspondió a una progenie resultante del cruzamiento entre dos materiales (familias de hermanos completos) denominada  $S_0$ . Como criterio de selección durante los primeros diez ciclos de SR se utilizó un índice en el que se combinaron variables asociadas a la espiga, como así también al rendimiento en grano y sus principales componentes fisiológicas (biomasa aérea e índice de cosecha) y numéricas (peso y número de granos). Dentro de cada población (ciclo) se escogieron cuatro plantas que garantizaban un número de semillas que permitiera su evaluación a campo como familias derivadas.

### *Sitio y manejo del cultivo*

Los ensayos se condujeron en secano en el Campo Escuela de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (Universidad Nacional de Córdoba), Córdoba (31° 29' S; 64° 00' O) en la región central semiárida de Argentina, en un suelo Haplustol Éntico (2,5% de materia orgánica y un pH de 6,3) con una profundidad de 0,60 m. El suelo es rico en fosforo y posee una capacidad de retención de agua de alrededor del 20%. Los ensayos se condujeron durante dos años consecutivos (2011 y 2012). Mientras que las fechas de siembra resultó el 10 y 8 de mayo en los años 2011 y 2012, respectivamente. En ambos años la floración aconteció en setiembre mientras que la cosecha se sustanció en octubre. Los veinticuatro genotipos se evaluaron en SC y SD en dos lotes contiguos situados en el mismo ambiente en el que se conduce el programa de SR. A tal fin se utilizaron parcelas de un surco de 5 m de longitud distanciados entre sí por 20 cm habiéndose utilizado una densidad de siembra de 250 semillas viables  $m^{-2}$ . Debido a las restricciones de aleatorización impuestas por los sistemas de labranza, se recurrió a un diseño en bloques completos con dos repeticiones en cada sistema de labranza. El control de malezas se realizó manualmente.

### *Condiciones climáticas*

El clima de la región, soleado y seco durante el desarrollo del cultivo de trigo, es representativo de muchos ambientes del mundo en desarrollo donde se cultiva la especie. Uno de los estreses más frecuentes que se presenta en un cultivo de trigo conducido en seco, es por déficit hídrico posterior a la floración. Durante el año 2011 se contabilizaron en el periodo mayo-octubre 141,5 mm de precipitaciones, lo que indujo un marcado estrés durante la floración del cultivo. Por el contrario, el año 2012 resultó algo más húmedo (236,5 mm). El agua almacenada en el suelo se cuantificó a la siembra y a la cosecha. Para el cálculo del agua consumida por parte del cultivo (W) se recurrió a la siguiente ecuación:  $W = \text{agua a la siembra} - \text{agua a la cosecha} + \text{precipitaciones}$ . La evapotranspiración acumulada durante el ciclo de cultivo resultó de 373,5 mm (2011) y 347,5 mm (2012).

### *Variables evaluadas*

**Cenizas:** Los tejidos vegetativos (tallos, vainas y hojas) de cada genotipo fueron procesados hasta obtener una muestra finamente molida. Se procesó el material 5 cm por encima de la base de la planta. El contenido en cenizas se determinó en base al método 08-01 de la AACCC (American Association of Cereal Chemists, 1995). Dos gramos de materia seca se depositaron en crisoles de porcelana previamente pesados los que fueron introducidos en una mufla e incinerados a 575 °C por 16 horas. El contenido de cenizas (%) se expresó en base al peso de la materia seca incinerada. Por cada muestra se realizaron dos réplicas técnicas.

**Carbono:** El método utilizado para estimar el porcentaje de materia orgánica se basó en la pérdida de masa por ignición de una muestra de materia seca calentada hasta la temperatura de incineración. El porcentaje de muestra que se perdió por ignición se calculó de la siguiente manera:  $(\text{PSAC} - \text{PSPC}) / \text{PSAC} \times 100$ . Donde PSAC es el peso seco de la muestra antes de la combustión y PSPC el peso seco de la muestra posterior a la combustión. Por su parte y con el fin de estimar el contenido de carbono, se partió del supuesto que el 50% de la materia orgánica corresponde a carbono (Pribyl, 2010).

**Rastrojo:** Posterior a la trilla se procedió a tomar una muestra de rastrojo y secarlo durante 48 horas a 80 °C. Se estimó la producción de rastrojo (0% de humedad) por unidad de superficie ( $\text{g m}^{-2}$ ).

### *Análisis estadístico*

Para cada variable, la información fue analizada mediante una regresión lineal en el número de ciclos de SR, teniendo en cuenta el sistema de labranza. El modelo incluyó, además, efectos aleatorios. Los términos fijos del modelo incluyeron el sistema de labranza del suelo (siembra convencional y siembra directa), el número de ciclos de SR



como regresora y la interacción entre ambos. Al especificar los efectos fijos de esta manera se obtuvieron dos rectas de regresión lineal, una por cada sistema de labranza. Los efectos aleatorios incluyeron la campaña, los bloques dentro de campaña-sistema de labranza, familias y las interacciones aleatorias entre campaña y los efectos fijos del modelo. Un nivel de significancia del 5% fue usado al momento de interpretar los resultados. Estos modelos se ajustaron mediante la función lme de la librería nlme del lenguaje R, utilizado como interfaz el programa estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.*, 2014).

## Resultados

La línea de regresión del contenido de cenizas (%) respecto a los ciclos de selección recurrente difirió según el sistema de labranza utilizado ( $p=0,0012$ ). Si bien al inicio el programa de selección (ciclo cero) no se constataron diferencias estadísticamente significativas en cuanto al contenido de cenizas ( $p=0,1251$ ), con el transcurrir de los ciclos de SR el porcentaje de cenizas se incrementó en SC, del mismo modo que disminuyó cuando el progreso genético se midió en SD (Figura 4.1).

Más allá de no haberse constatado diferencias significativas en cuanto al contenido de carbono en el rastrojo al inicio del programa de mejoramiento genético ( $p=0,1239$ ), se pudo comprobar que las pendientes de las regresiones lineales asociadas a los ciclos de SR estuvieron influenciadas por las prácticas de manejo del suelo implementadas al momento de medir la respuesta a la selección ( $p=0,0012$ ) (Figura 4.2). El contenido de carbono disminuyó en SC e incrementó en SD en un medio punto porcentual luego de diez ciclos de SR o de veinte años de haber iniciado el programa de mejoramiento genético.

Al igual que lo señalado para las variables: porcentaje de cenizas y contenido de carbono en el rastrojo, las regresiones lineales entre cantidad de carbono secuestrado por unidad de área ( $\text{g m}^{-2}$ ) y ciclos de SR evaluados se vieron influenciadas por los sistemas de labranza (SC y SD) al momento de medir el progreso genético ( $p=0,0001$ ), más allá de que al inicio del programa de selección no se hayan detectado diferencias ( $p=0,2639$ ) (Figura 4.3). Se observó una merma significativa de  $5 \text{ g m}^{-2} \text{ ciclo}^{-1}$  de carbono secuestrado a nivel de rastrojo en el trigo cultivado en SC ( $p=0,0092$ ), no habiéndose detectado por su parte variación alguna en SD ( $p=0,1436$ ).

En cuanto a la producción de rastrojo por unidad de área ( $\text{g m}^{-2}$ ) y su relación lineal con los ciclos de SR, se constató un comportamiento disímil según el sistema de labranza utilizado ( $p=0,0003$ ) (Figura 4.4). Los sistemas de labranza no incidieron significativamente en la producción de rastrojo en el ciclo inicial ( $p=0,1777$ ), manifestándose a partir de éste una tendencia a la disminución del orden de  $12 \text{ g m}^{-2} \text{ ciclo}^{-1}$  cuando el trigo se cultivó en SC, sin cambios para el caso de la SD ( $p=0,1844$ ).

## Discusión

El aumento en el contenido de cenizas en el rastrojo, cuando el progreso genético se midió en SC, estaría en función de la mayor tasa de transpiración en los ciclos más avanzados de SR. Al respecto, Misra *et al.* (2010) y Zhang *et al.* (2010) concluyen diciendo que el contenido de cenizas es un buen predictor de la transpiración. Más aún, Sadras y Connor (1991) observaron una consistente y a la vez simple asociación entre el índice de cosecha y la cantidad de agua transpirada luego de espigazón. Monneveux *et al.* (2004 a-b) demostraron que los altos rendimientos en trigo estuvieron asociados con altos valores de cenizas en el rastrojo; en sintonía con lo antedicho, el aumento en el rendimiento en grano en SC, observado por Maich y Di Rienzo (2014) al evaluar los mismos materiales, también estuvo acompañado por altos valores de cenizas en el rastrojo. No habiendo sido el agua almacenada en el suelo un factor limitante, la reducción en el contenido de cenizas en el cultivo conducido en SD es consecuencia directa de una disminución en la tasa transpiratoria asociada a la ausencia de progreso genético para el rendimiento en grano (Maich y Di Rienzo, 2014).

Considerando que el contenido de cenizas está relacionado a la eficiencia con la cual el carbono es particionado al grano (Zhu *et al.*, 2009); la disminución en el porcentaje de carbono en el rastrojo con el transcurrir de los ciclos de SR es el resultado de la removilización de las reservas desde los pseudotallos y hojas (fuente) a los granos (destinos). Circunstancia que se plasmó en un incremento del rendimiento en grano y el índice de cosecha después de diez ciclos de SR evaluados en SC, no así en SD, tal como lo muestran los resultados de Maich y Di Rienzo (2014). Los argumentos que se esgrimen a continuación sirven de sustento a la aseveración de que el cultivo conducido en SD sufrió un estrés hídrico durante el llenado del grano: 1) la producción de biomasa aérea no difirió entre los cultivos conducidos en SC y SD independientemente del ciclo de SR, 2) los cultivos conducidos en SC y SD partieron con la misma cantidad de agua almacenada en el suelo, 3) la disponibilidad de nitrógeno en el suelo a la siembra no fue una limitante y 4) al momento de la cosecha el agua remanente en el suelo en el cultivo en SD resultó mayor a la registrada en SC (Maich y Di Rienzo, 2014). Ante este panorama, y en línea con lo afirmado por Blum (1998) respecto a la asociación negativa entre rendimiento potencial y el uso de las reservas para el llenado de los granos ante condiciones de estrés hídrico, el rendimiento en grano en el cultivo conducido en SD se vio seriamente afectado.

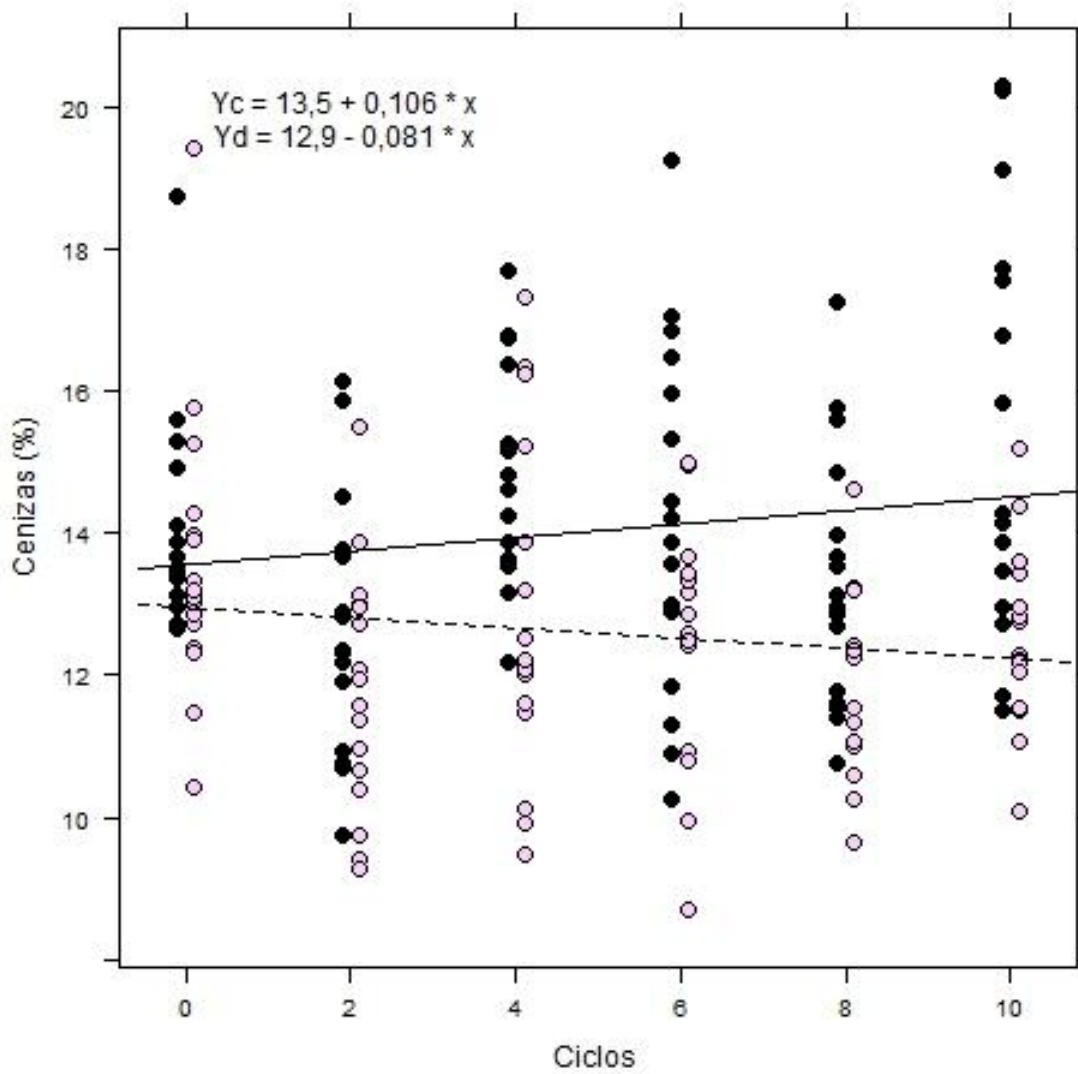
La disminución en la cantidad de carbono remanente en el rastrojo en el sistema de labranza convencional, luego de diez ciclos de selección recurrente, se explica por la mayor tasa de exportación de los fotoasimilados por parte del cultivo hacia los granos. En tal sentido, Zhang *et al.* (2008) observaron una asociación positiva entre el índice de

cosecha y la eficiencia con la que se moviliza la materia seca durante el llenado de los granos. Por el contrario, la ausencia de variación en cuanto a la cantidad de carbono secuestrado remanente en el rastrojo en siembra directa, radica en el hecho de que el cultivo almacenó reservas en sus tejidos vegetativos, pero se vio imposibilitado de removilizarla a los granos debido a las severas restricciones hídricas.

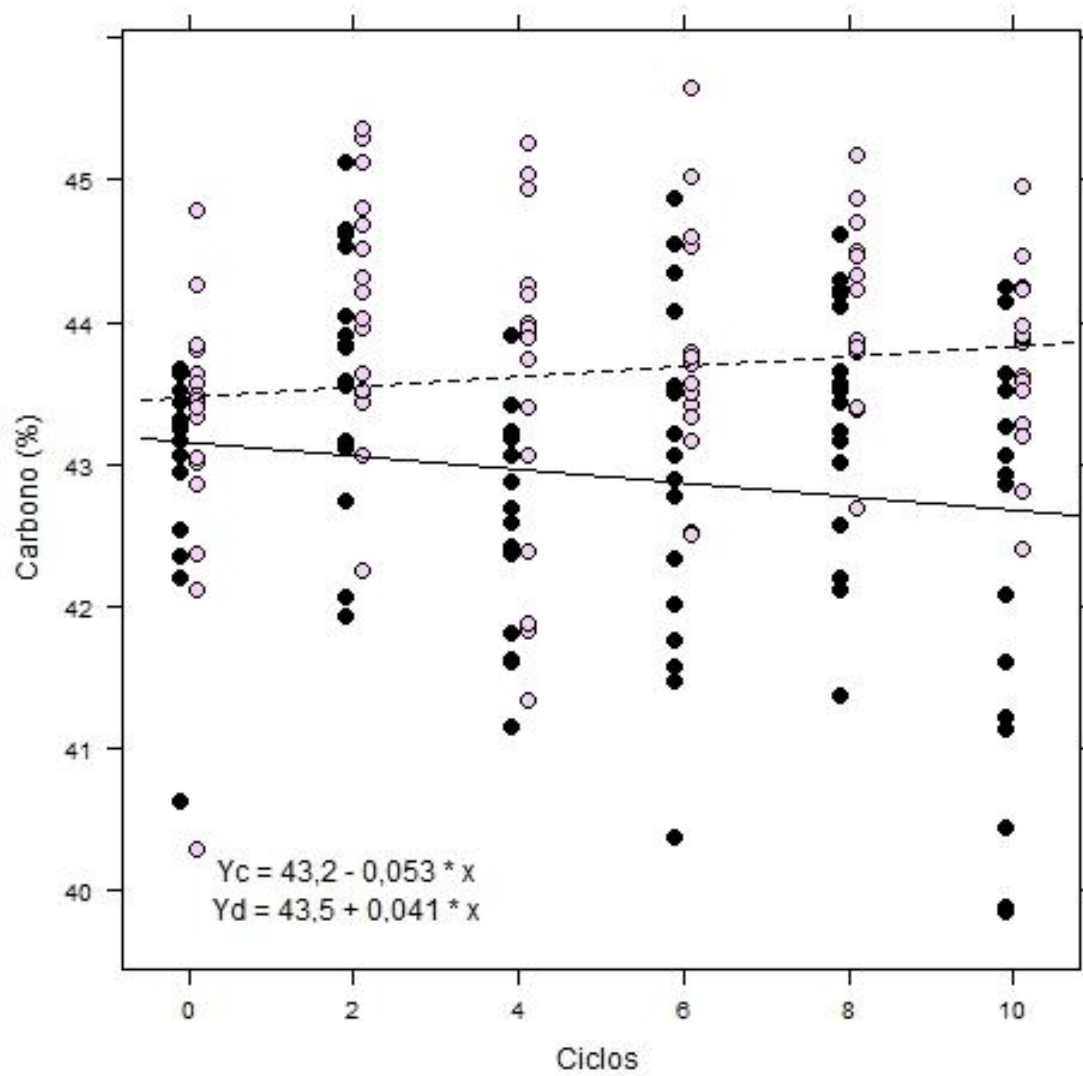
Los resultados obtenidos en este trabajo muestran una merma significativa en la producción de rastrojo en SC, y teniendo en cuenta que Maich y Di Rienzo (2014) no observaron progreso genético alguno en cuanto a la producción de biomasa aérea cuando el cultivo de trigo se condujo en SC como en SD, la capacidad creciente de particionar la biomasa aérea a rendimiento en grano (índice de cosecha) en SC repercutió en una menor cantidad de rastrojo remanente en el suelo. Por su parte, el hecho de no haberse observado cambios significativos respecto a la producción de rastrojo en SD debe asociarse con la también ausencia de cambios respecto al índice de cosecha en el mencionado sistema de labranza.

### **Conclusiones**

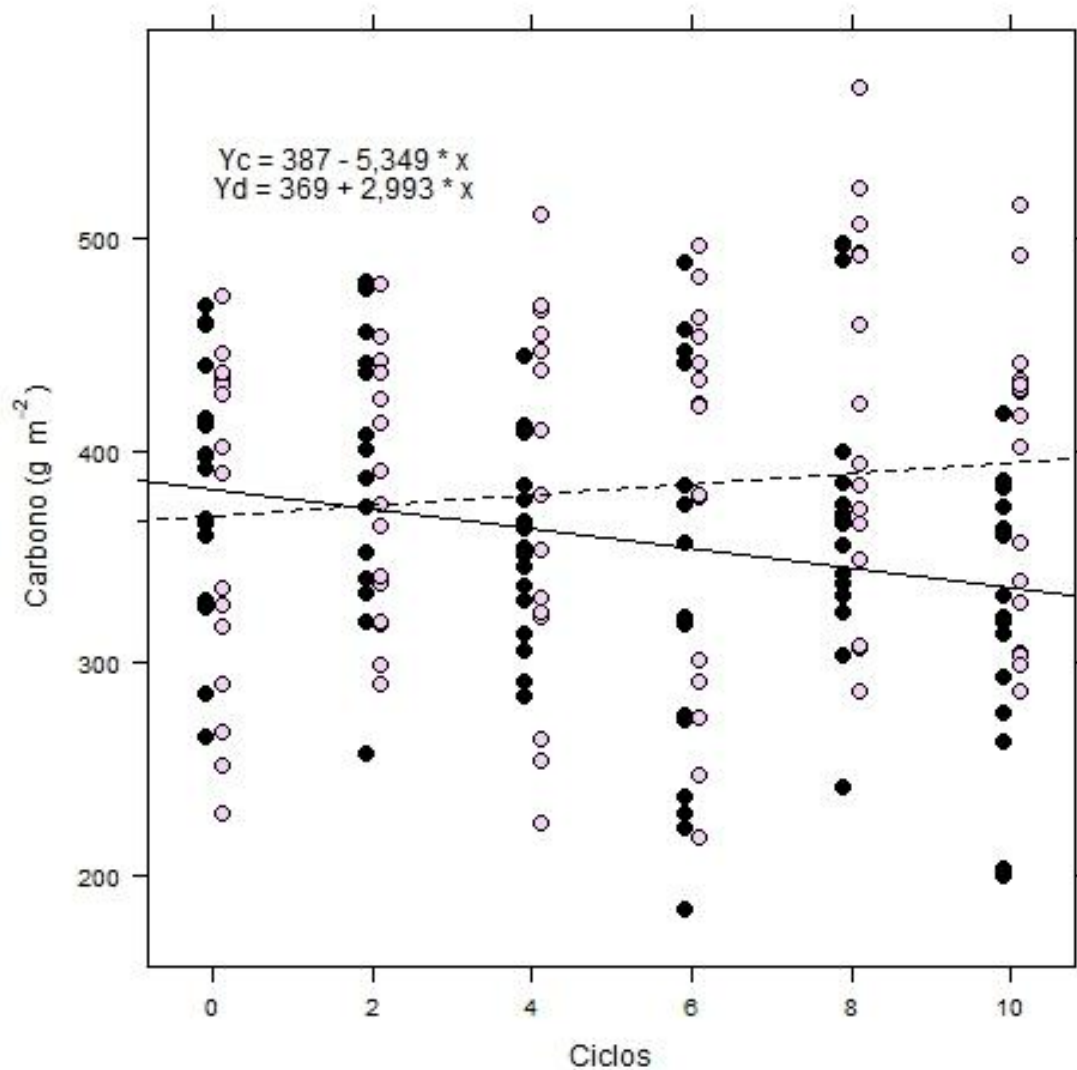
En síntesis, el aumento en el porcentaje de cenizas y la disminución en el porcentaje de carbono a nivel de rastrojo en el cultivo conducido en SC, puede estar relacionado con la mayor tasa de transpiración y movilización de fotoasimilados hacia el grano en los ciclos más avanzados de selección recurrente.



**Figura 4.1: Contenido de cenizas (%) versus número de ciclos de selección recurrente. Círculos negros y grises corresponde a siembra convencional y directa respectivamente. Líneas sólidas y punteadas son las correspondientes rectas de regresión para siembra convencional y directa respectivamente. Yc e Yd son las ecuaciones de rectas de regresión estimadas para siembra convencional y directa respectivamente.**



**Figura 4.2: Contenido de carbono (%) versus número de ciclos de selección recurrente. Círculos negros y grises corresponde a siembra convencional y directa respectivamente. Líneas sólidas y punteadas son las correspondientes rectas de regresión para siembra convencional y directa respectivamente. Yc e Yd son las ecuaciones de rectas de regresión estimadas para siembra convencional y directa respectivamente.**



**Figura 4.3: Carbono secuestrado por unidad de área (g m<sup>-2</sup>) versus número de ciclos de selección recurrente. Círculos negros y grises corresponde a siembra convencional y directa respectivamente. Líneas sólidas y punteadas son las correspondientes rectas de regresión para siembra convencional y directa respectivamente. Yc e Yd son las ecuaciones de rectas de regresión estimadas para siembra convencional y directa respectivamente.**

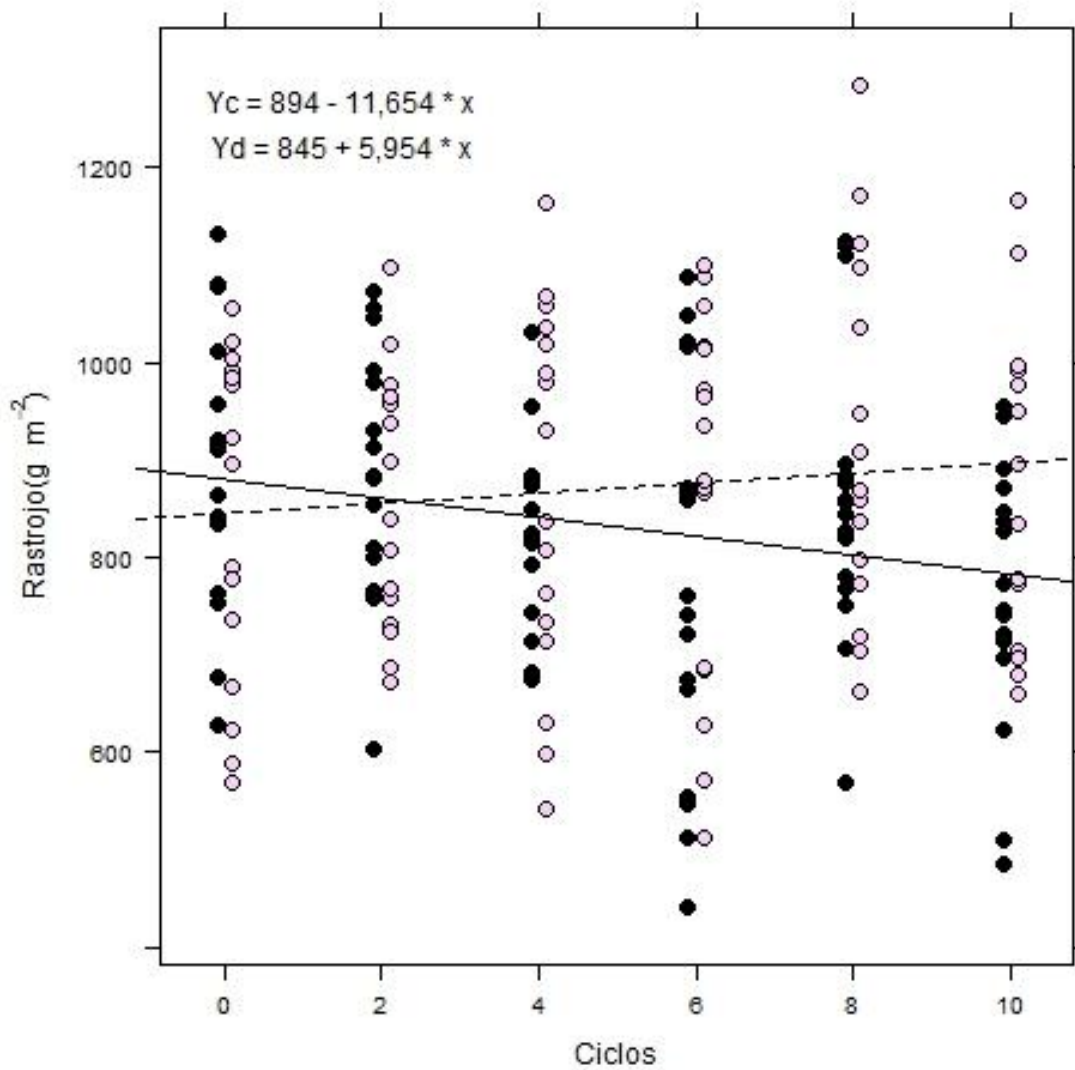


Figura 4.4: Producción de rastrojo por unidad de área ( $\text{g m}^{-2}$ ) versus número de ciclos de selección recurrente. Círculos negros y grises corresponde a siembra convencional y directa respectivamente. Líneas sólidas y punteadas son las correspondientes rectas de regresión para siembra convencional y directa respectivamente.  $Y_c$  e  $Y_d$  son las ecuaciones de rectas de regresión estimadas para siembra convencional y directa respectivamente.

## **Bibliografía**

American Association of Cereal Chemists, 1995: AACC Approved Methods, 9th ed, Method 08-01. The Association, St Paul, MN.

Araus J. L., Amaro T., Casadesús J., Asbati A. and Nachit M. M. 1998. Relationships between ash content, carbon isotope discrimination and yield in durum wheat. *Australian Journal of Plant Physiology* 25: 835–842.

Araus J. L., Casadesus J. and Bort J. 2001. Recent tools for the screening of physiological traits determining yield. In: M. P. Reynolds, J. I. Ortiz- Monasterio, and A. McNab (eds), *Application of Physiology in Wheat Breeding*, pp. 59-77. CIMMYT, Mexico.

Baumhardt R. L. and Jones O. R. 2002. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum for a clay loam in Texas. *Soil and tillage research* 68: 71-82.

Blum A. 1998. Improving wheat grain filling under stress by stem reserve mobilization. *Euphytica* 100:77–83.

Cabrera-Bosquet L., Sánchez C. and Araus J. L. 2009. How yield relates to ash content,  $\Delta^{13}\text{C}$  and  $\Delta^{18}\text{O}$  in maize grown under different water regimes. *Annals of Botany* 104: 1207–1216.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M. and Robledo C.W. *InfoStat versión 2014*. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

Fabrizzi K.P., García F.O., Costa J.L. and Picone L.I. 2005. Soil water dynamics, physical properties and corn and wheat responses to minimum and no-tillage systems in the southern Pampas of Argentina. *Soil & Tillage Research* 81: 57–69.

Fuentes J.P., Flury M., Huggins D.R. and Bezdicsek D.F. 2003. Soil water and nitrogen dynamics in dryland cropping systems of Washington State, USA. *Soil and Tillage Research* 71:33-47.

Gajri P. R., Arora V. K. and Prihar S. S. 1992. Tillage management for efficient water and nitrogen use in wheat following rice. *Soil and Tillage Research* 24: 167-182.

López M. V. and Arrúe J. L. 1997. Growth, yield and water use efficiency of winter barley in response to conservation tillage in a semi-arid region of Spain. *Soil and Tillage Research* 44:35-54.

López-Bellido R. J. and López-Bellido L. 2001. Efficiency of nitrogen in wheat under Mediterranean conditions: effect of tillage, crop rotation and N fertilization. *Field Crops Research* 71: 31–46.



- Maich R. and Di Rienzo J.A. 2014. Genotype x tillage interaction in a recurrent selection program in wheat. *Cereal Research Communications* 42:525–533.
- Masle J., Farquhar G.D. and Wong S.C. 1992. Transpiration ratio and plant mineral content are related among genotypes of a range of species. *Australian Journal of Plant Physiology* 19: 709–721.
- Merah O., Deléens E. and Monneveux P. 1999. Grain yield, carbon isotope discrimination, mineral and silicon content in durum wheat under different precipitation regimes. *Physiologia Plantarum* 107: 387–394.
- Merah O., Deléens E. and Monneveux P. 2001a. Relationships between carbon isotope discrimination, dry matter production, and harvest index in durum wheat. *Journal of Plant Physiology* 158:723–729.
- Misra S. C., Randive R., Rao V. S., Sheshshayee M. S., Serraj R. and Monneveux P. 2006. Relationship between Carbon Isotope Discrimination, Ash Content and Grain Yield in Wheat in the Peninsular Zone of India. *J. Agronomy & Crop Science* 192: 352-362.
- Misra S.C., Shinde S., Geerts S., Rao V.S. and Monneveux P. 2010. Can carbon isotope discrimination and ash content predict grain yield and water use efficiency in wheat? *Agricultural Water Management* 97:57-65.
- Monneveux P., Rekika D., Acevedo E. and Merah O. 2006. Effect of drought on leaf gas exchange, carbon isotope discrimination, transpiration efficiency and productivity in field grown durum wheat genotypes. *Plant Science* 170:867-872.
- Monneveux P., Reynolds M. P., González- Santoyo H., Peña J., Mayr L. and Zapata F. 2004 a. Relationships between grain yield, flag leaf morphology, carbon isotope discrimination and ash content in irrigated wheat. *J. Agronomy & Crop Science* 190:395-401.
- Monneveux P., Reynolds M.P., Trethowan R., Peña J. and Zapata F. 2004 b. Carbon isotope discrimination, leaf ash content and grain yield in bread and durum wheat grown under full-irrigated conditions. *J. of Agronomy & Crop Science* 190:389-394.
- O'leary G. J. and Connor D. J. 1997. Stubble retention and tillage in a semi-arid environment: 3. Response of wheat. *Field Crops Research* 54:39-50.
- Pribyl D.W. 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156: 75–83.
- Sadras V.O. and Connor D.J. 1991. Physiological basis of the response of harvest index to the fraction of water transpired after anthesis: A simple model to estimate harvest index for determinate species. *Field Crops Research* 26:227-239.

Zhang X., Chen S., Sun H., Pei D. and Wang Y. 2008. Dry matter, harvest index, grain yield and water use efficiency as affected by water supply in winter wheat. *Irrigation Science* 27:1–10.

Zhang X., Chen S., Sun H., Wang Y. and Shao L. 2010. Water use efficiency and associated traits in winter wheat cultivars in the North China Plain. *Agricultural Water Management* 97:1117-1125.

Zhu L., Liang Z. S., Xu X. and Li S. H. 2008. Relationship between carbon isotope discrimination and mineral content in wheat grown under three different water regimes. *J. Agronomy & Crop Science* 194:421–428.

Zhu L., Liang Z.S., Xu X., Li S.H. and Monneveux P. 2009. Evidences for the association between carbon isotope discrimination and grain yield—Ash content and stem carbohydrate in spring wheat grown in Ningxia (Northwest China). *Plant Science* 176:758-767.

## CONCLUSIONES GENERALES

Los resultados obtenidos en los distintos capítulos están atravesados por una situación insoslayable, el cambio de manejo al cual fue sujeto el suelo. De los diez ciclos de selección recurrente, sólo el décimo fue ejecutado en siembra directa. No debería llamar la atención que sólo cuando el material se cultivó en siembra convencional fue posible detectar un progreso genético significativo para el rendimiento y sus principales componentes. Del mismo modo que proceder a seleccionar en SD facilitaría la identificación de genotipos con altos potenciales de rendimiento cuando cultivados en suelos no disturbados por la labranza convencional.

Resulta interesante destacar que estos cambios estuvieron acompañados por cambios en los porcentajes de cenizas (aumentó) y de carbono (disminuyó) en el rastrojo. Con el progresar de los ciclos de selección los niveles de ceniza en el rastrojo fueron más altos resultado de una mayor tasa de transpiración. Concomitante fue la partición de carbono a los granos, haciendo que el porcentaje de dicho elemento químico en el rastrojo fuese menor en los ciclos más avanzados. En un ambiente con estrés hídrico terminal como el de la región central semiárida de Córdoba (Argentina) el rendimiento en grano se sustenta en una menor eficiencia en el uso del agua debido a un mayor consumo (transpiración) por unidad de grano fijado.

Un verdadero capítulo aparte es el referido a la asociación entre variables agronómicas y cualitativas. La asociación negativa entre el rendimiento en grano y el porcentaje de proteínas de éste no resultó una novedad. A medida que se alcanzaban rendimientos más altos los porcentajes de proteína bajaban. El efecto de compensación entre cantidades de carbono y nitrógeno en lo absoluto se extrapoló a la calidad de las proteínas. Las pruebas predictivas de calidad no se vieron afectadas, o si lo hicieron, mostraron un mejoramiento de la calidad en sintonía con el aumento en la producción de grano independientemente del manejo del suelo. Ambiente y genética repercuten tanto en la cantidad como en la composición proteica de la harina influyendo en última instancia sobre la calidad industrial de ésta. Sin embargo, se cuenta con sólidos argumentos acerca de que la calidad del trigo está en función de la composición más que de la cantidad de proteínas.

Al momento de la defensa de la presente tesis doctoral, el programa de selección recurrente comenzado hace treinta años se encuentra en su décimo quinto ciclo. Por su parte, la adopción de la siembra directa como sistema de manejo del suelo conlleva nuevos desafíos tanto para el cultivo como para el fitomejorador. La impedancia física que ejerce el suelo al crecimiento y desarrollo de las raíces, la inmovilización del nitrógeno por parte de los microorganismos del suelo y el sustrato que brinda el rastrojo a enfermedades foliares, son algunos de los aspectos a investigar de aquí en más.