

EL TRIGO EN ARGENTINA: Perspectivas ecofisiológicas del pasado, presente y futuro para aumentar el rendimiento.

Daniel J. Miralles ^{1,2} y Fernanda G. González ^{2,3}

¹ Catedra de Cerealicultura Facultad de Agronomía UBA, IFEVA, Av. San Martín 4453, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, ² CONICET, ³ EEA INTA Pergamino. E-mail: miralles@agro.uba.ar

Breve reseña de la historia de trigo en Argentina: De Gaboto a la actualidad

El trigo se introdujo en el Río de la Plata con la llegada de Sebastián Gaboto en 1527. La primera siembra del cultivo se realizó en el fuerte *Sancti Spiritu*, al margen del río Carcarañá, en la provincia de Santa Fe. La siembra se repitió los dos años siguientes, pero finalmente el fuerte fue abandonado, no así, la siembra del trigo que continuó (aunque en escasas proporciones) por tres siglos alrededor de las aldeas y en parcelas muy limitadas. "El trigo fue, por lo tanto, el cultivo pionero de la colonización agrícola de la región pampeana"

Recién a comienzos del siglo XX se inició formalmente el mejoramiento de los trigos a nivel nacional. Entre los pioneros deben incluirse el Ing. Agr. Enrique Klein quien en el año 1919 se radica en la Argentina donde inicia los trabajos de mejoramiento en la localidad de Plá (Pcia de Buenos Aires) y funda el Criadero KLEIN. Otro pionero del desarrollo de trigo en Argentina es el Ingeniero Agrónomo José Buck, quien en el año 1930, comienza su propio programa de mejoramiento genético y funda el criadero BUCK. Durante la misma década el Ministerio de Agricultura establece seis regiones trigueras, luego reducidas a 5, las que fueron delimitadas en base a las diferencias agroecológicas de cada una de ellas. En el mismo año, se crea la Red Oficial de Ensayos Territoriales (ROET), la cual continua en funcionamiento, con el objetivo de orientar al productor sobre el comportamiento de los distintos cultivares de trigo en cada subregión triguera. Otro de los protagonistas del trigo en Argentina es el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) creado el 4 de diciembre de 1956 con la finalidad de "impulsar, vigorizar y coordinar el desarrollo de la investigación y extensión agropecuaria", destacándose la importancia de este organismo en la promoción y mejoramiento del cultivo.

Durante la primera mitad del siglo XX, el vuelco del cultivo, debido a la altura de la planta, limitaba en forma severa la posibilidad de incrementar el rendimiento a través de un mayor aporte de insumos. Por ello, junto con la mejora de la sanidad y la calidad, el desafío de los mejoradores era reducir la altura de la planta para evitar el vuelco y la pérdida de rendimiento. Ya a comienzos del siglo XX varias investigaciones con el objetivo de reducir la

altura de plantas habían comenzado, como por ejemplo Stamprelli en Italia, Voguel a fines de los años 40 y luego el Dr. Norman Borlaug en los años 50 logran identificar materiales de trigo japoneses de baja estatura derivados del cultivar Norin 10 los cuales se cruzan con variedades comerciales mejicanas, obteniendo a inicios de los años 60 los primeros materiales comerciales semienanos. Nacen así los primeros trigos comerciales que incorporan genes de enanismo, reduciendo la altura de planta y evitando el vuelco. Estos nuevos materiales permitían el uso de una mayor oferta de nutrientes para incrementar el rendimiento sin que se corriera el riesgo de vuelco. El rendimiento potencial del cultivo mostró un importante aumento y los materiales semi-enanos fueron ampliamente difundidos en todo el mundo. En la actualidad más del 95% de las variedades comerciales de trigo que se ofrecen en Argentina tienen alguno de los genes de enanismo que el Dr. Borlaug incorporó a los trigos mejicanos a inicios de los 60. El Dr. Norman Borlaug recibe en el año 1971 el premio Nobel de la Paz, en reconocimiento a sus aportes en el mejoramiento de la producción de trigo.

La actividad del mejoramiento de trigo en nuestro país continúa durante la segunda mitad del siglo con la incorporación de nuevos semilleros en el mercado nacional. En 1976, la Asociación de Cooperativas Argentina (ACA) inicia las actividades de mejora varietal. En los años 80 la empresa Cargill, inscribe en el mercado nacional 6 trigos híbridos, obtenidos en Argentina, que permanecieron en el mercado hasta mediados de los años 90. Durante los últimos años se incorporaron otros semilleros privados como Relmó, Don Mario, Nidera, BioCeres y Sursem, incrementando la competitividad del mercado de mejoramiento de trigo en el país.

Evolución de la superficie y el rendimiento de trigo en Argentina.

En la primera década de 1900 se exportaba alrededor de 3 millones de toneladas de trigo, ocupando nuestro país el primer lugar como exportador mundial con el 23% de la producción. Entre los años 1900 y 1930 la superficie de trigo se incrementó a una tasa de casi 123.000 has por año, alcanzando en el año 1928 el record de área cosechada con un poco mas de 9 millones de hectáreas de trigo (Fig. 1) y una producción de casi 9,5 millones de toneladas que sería superada 10 años mas tarde en 1938.

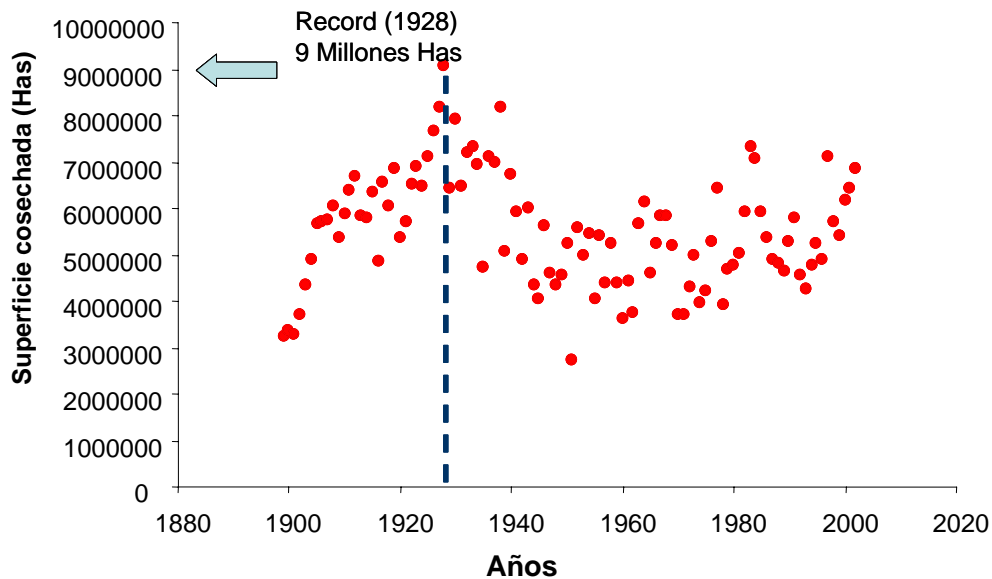


Figura 1: Superficie de trigo cosechada en Argentina (Fuente: SAGyP).

En la actualidad, y considerando los últimos 5 años, la superficie sembrada con trigo en promedio fue de ca. 6 millones de has con un rendimiento medio a nivel nacional de ca. 2.7 Ton/ha (Fig. 2). En nuestro país el rendimiento a aumentado desde principios del siglo XX pero la tasa de incremento fue baja hasta los años 60 (12 Kg/ha.año). A partir de la introducción de los materiales semienanos el redimiento registra incrementos mayores, promediando una tasa de 34 Kg/ha.año (Fig. 2). El rendimiento medio a nivel nacional en Argentina es similar al rendimiento promedio mundial y menor respecto de otros países como el Reino Unido o Francia, donde el regimiento medio a nivel nacional es cercano a las 8 y 7 Ton/ha, respectivamente. Estas diferencias respecto al rendimiento medio de Argentina están vinculadas no solo a diferencias genéticas y al uso de insumos, sino principalmente debido a ambientes explorados por el cultivo. En aquellos países las condiciones de cultivo son más favorables, presentando mayores ofertas de radiación y menor temperatura media, resultando en ambientes con mayor potencialidad de rendimiento. Del mismo modo, la tasa de ganancia en el rendimiento muestra grandes diferencias cuando se comparan diferentes países. Así, por ejemplo el Reino Unido, Francia y Mejico obtuvieron en los últimos 18 años tasas de incremento de rendimiento de 62, 38 y 77 kg/ha.año, respectivamente; mientras que Argentina presentó considerando los últimos años tasas inferiores a los 20 kg/ha año.

Brecha entre rendimientos reales y potenciales

La pregunta que inmediatamente surge a partir de las cifras indicadas arriba es si existe espacio aún para aumentar los rendimientos reales (a nivel de lote de producción) en Argentina. Un informe reciente de la FAO (Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030) muestra para distintos países la brecha

que existe entre los rendimientos potenciales (i.e. la disponibilidad ambiental) y los reales como un indicador de la posibilidad de explotar el ambiente a través de la ganancia genética y tecnológica. A diferencia de países como Alemania donde el rendimiento real estaría muy cercano al rendimiento potencial, en Argentina el rendimiento real solo exploraría ca. 60% del rendimiento que podría ser potencialmente alcanzado. Esta importante brecha entre el rendimiento potencial y real descrita para Argentina implica que existiría aún un gran potencial para aumentar los rendimientos en el futuro. Sin embargo, sería importante conocer cuánto de este potencial a nivel país puede ser aplicado y/o explotado en las distintas zonas de producción. Los modelos de simulación son una herramienta potente y útil para explorar los potenciales de distintas regiones productivas. Utilizando esta herramienta Menéndez y Satorre (2005) determinaron que esta brecha varía entre 22%, en la región Sudeste de la Pcia de Buenos Aires, 35% para la región centro (Sur Córdoba y Santa Fe, Norte de Buenos Aires) y 51%, en la región del Noroeste Argentino.

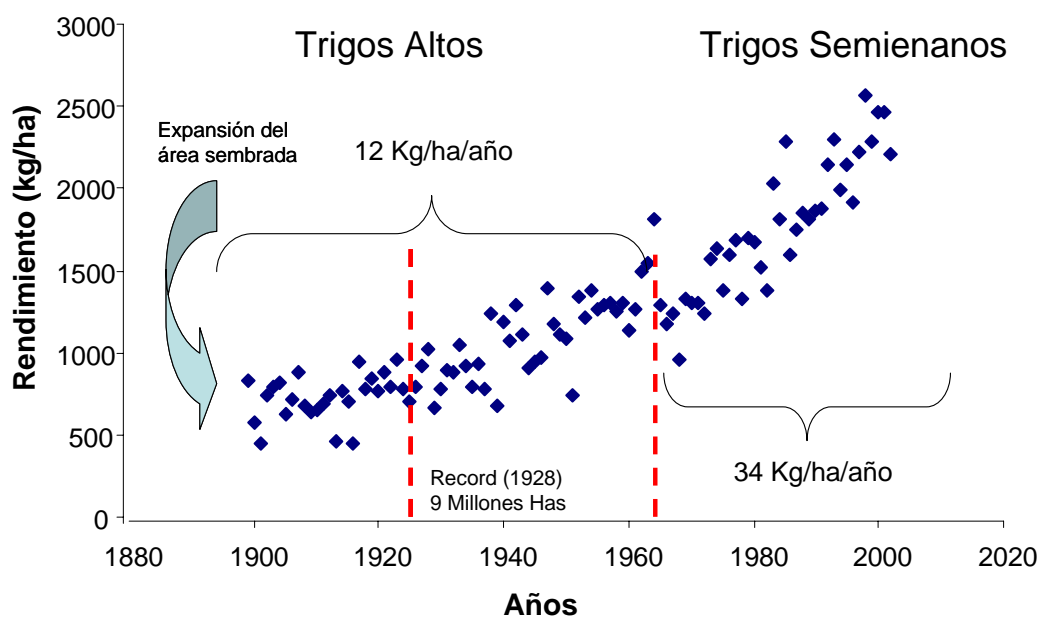


Figura 2: Evolución de los rendimientos a los largo de los años en Argentina (Fuente SAGyP)

Estrategias para aumentar el rendimiento potencial en trigo desde una perspectiva ecofisiológica

El incremento sostenido de la población mundial proyecta una población de ca. 12.000 millones de habitantes en los próximos 30 años. El hecho que los dos cereales que sostienen la alimentación humana sean el trigo y el arroz; indica que la demanda de trigo en los próximos años se incrementará para satisfacer la demanda de la población mundial. De hecho recientemente la

FAO (www.fao.org) sostuvo que se requerirán ca. 1000 millones de toneladas de cereales en el mundo para satisfacer los requerimientos de la población mundial en los próximos 20 años. En este escenario, la seguridad alimentaria ha ganado prioridad en la agenda internacional discutiéndose en el mundo distintas estrategias para aumentar el rendimiento de trigo.

En este sentido, se han descrito diferentes estrategias para aumentar el rendimiento del cultivo (Slafer y Araus, 2007; Miralles y Slafer, 2007; Reynolds et al., 2009). En una reciente revisión Reynolds et al. (2009) describen las principales áreas en las que se ha trabajado con el objetivo de incrementar el rendimiento potencial. Estas áreas pueden resumirse como: (i) eficiencia de fijación de carbono en plantas C3, (ii) fertilidad de las espigas y partición de carbono hacia órganos reproductivos, (iii) aumentos en el peso potencial de los granos, (iv) mecanismos involucrados en el vuelco del cultivo y (v) herramientas genéticas y biotecnológicas que permitan aplicar las plataformas ecofisiológicas a los programas de mejoramiento.

Por razones de espacio en este artículo solo nos concentraremos en los primeros dos aspectos que han sido descritos anteriormente.

Eficiencia de fijación de carbono en plantas C₃

Un modelo sencillo para describir el rendimiento es el sgte:

$$\text{Rend} = \text{RI}_{\text{acum}} \times \text{EUR} \times \text{IC} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde RI_{acum} indica la radiación interceptada acumulada por el cultivo, EUR la eficiencia de uso de la radiación y IC el índice de cosecha del cultivo. Los dos primeros términos definirían la biomasa acumulada por el cultivo

En general la RI_{acum} no parecería ser un atributo a ser mejorado ya que en la actualidad los cultivos mediante prácticas de manejo adecuadas (densidad de siembra, fertilización, etc) son capaces de alcanzar los valores del índice de área foliar (IAF) críticos que les permita lograr una capacidad de interceptación del 95%. Por otro lado, la estrategia común que se observa en el mejoramiento de trigo en todo el mundo y también en Argentina fue el incremento en el índice de cosecha –IC- (i.e. la proporción de materia seca particionada a los granos) más que cambios en la biomasa acumulada. Sin embargo, los valores actuales en el IC, se encuentran cercanos al límite máximo posible en el cultivo lo cual hace necesario pensar en otros atributos a ser modificados como por ejemplo la biomasa total producida por el cultivo y sus atributos fisiológicos. En este sentido, los incrementos en los rendimientos en los últimos 10 años en el Reino Unido han sido logrados a través de aumentos en la biomasa acumulada sin que se produzcan modificaciones en el IC del cultivo (Shearman et al., 2005).

De estos atributos eco fisiológicos que componen la biomasa acumulada por el cultivo, pareciera que la EUR sería el candidato a ser incrementado para lograr aumentos en la biomasa acumulada total del cultivo y por ende en el rendimiento. Los cálculos teóricos vinculados con los valores de RUE indican

que es posible mejorar este atributo en especies C_3 como trigo (Long et al., 2006). Estos incrementos en biomasa mediados por la EUR pueden ser logrados mediante la incorporación de germoplasma exótico en los programas de mejoramiento como 7Ag.7AL (Reynolds et al., 2001; Miralles et al., 2006). Otros atributos vinculados con la estructura del canopeo (plantas con hojas más erectas que permitan una mejor distribución de la radiación dentro del cultivo) podrían contribuir a la mejora en la EUR.

La temperatura del canopeo puede ser utilizada como una variable a ser utilizada en mejoramiento. La mayor brecha entre la temperatura del canopeo del cultivo y el aire indica que el cultivo mantiene un mayor intercambio de CO_2 a través de estomas manteniendo una mayor capacidad transpiratoria. Esta estrategia conduciría a una mayor generación de biomasa y por ende a un mayor rendimiento (Reynolds et al., 1998).

Fertilidad de las espigas y partición de carbono hacia órganos reproductivos

Numerosos trabajos en la literatura han mostrado que aumentos en la partición de asimilados hacia las espigas promueven una mayor fertilidad de las mismas debido a la consistente correlación que existe entre el número de flores fértiles (FF) y el peso seco de las espigas al momento de la floración (Fischer, 1984). Tal como ha sido ampliamente descrito las espiguillas de trigo inician entre 9 a 12 primordios florales de los cuales solo sobreviven entre el 20 al 40%, las que pasan al estado de flor fértil. El periodo donde se produce la mayor mortandad de primordios se produce durante la elongación de los últimos dos entrenudos y especialmente el pedúnculo (Kirby, 1988).

Considerando un modelo simple para expresar el número de granos NG, este depende de:

$$NG = Dur_{PCE} \times TCC_{PCE} \times PE_{PCE} \times CFE \quad \text{Ecuación 2}$$

La duración del periodo de crecimiento activo de la espiga (Dur_{PCE}), la tasa de crecimiento del cultivo durante dicho periodo (TCC_{PCE}), la partición de asimilados a la espiga durante el PCE (PE_{PCE}) y el coeficiente de fertilidad de las espigas (CFE). El producto de los 3 primeros atributos indicados en la ecuación 2 determinan el peso seco de las espigas.

Cualquiera de los distintos atributos descritos en la ecuación 2 podrían ser teóricamente manipulados para aumentar el NG. En este sentido algunos trabajos han alterado artificialmente la Dur_{PCE} mediante el uso del fotoperíodo (Miralles et al., 2000; González et al., 2003, 2005a) de modo de prolongar y/o acortar la duración de la etapa de PCE y establecer el impacto sobre el NG. La hipótesis detrás de dicha manipulación es que "aumentos en la duración del PCE determinarán una mayor partición a las espigas y obteniéndose por lo tanto un mayor número de FF" (Slafer et al., 1995, 2004). Los resultados tanto en cámaras de crecimiento (Miralles et al., 2000) como a campo (González et al., 2003, 2005a) avalaron la hipótesis al menos mediante la manipulación artificial del fotoperíodo a través del ciclo del cultivo. Sin embargo, para

manipular genéticamente la ontogenia del cultivo y lograr cultivares con mayor duración del PCE, sin alterar el tiempo a floración, es necesario establecer cómo responden los genes que controlan la duración de dicha etapa (PCE). Algunas evidencias del grupo de Cereales de invierno de la Cátedra de Cereales (FAUBA) muestran que distintos alelos de genes Ppd pueden afectar diferencialmente la duración de las etapas vegetativa y reproductiva y por ende la duración del PCE (González et al., 2005b, Vázquez et al., 2007). En estos trabajos, al igual que en lo registrado en la manipulación artificial del fotoperíodo, una mayor duración del PCE, debido a la combinación de genes Ppd, redundó en un mayor peso de espiga, y en consecuencia en un mayor número de FF.

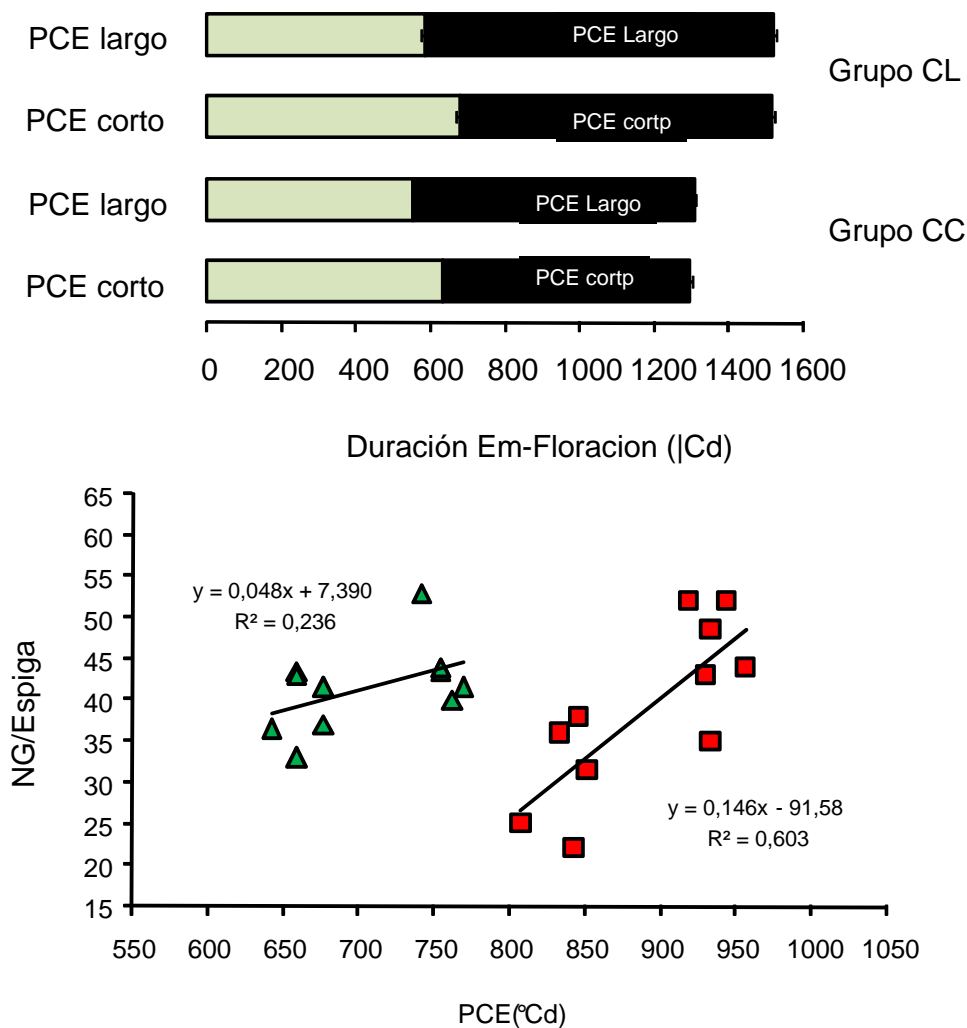


Figura 3: a) Grupos de individuos de ciclo corto (CC) y largo (CL) de periodo de crecimiento de espiga (PCE) seleccionados para igual ciclo a floración dentro de los CC y CL, b) Relación entre el número de granos/espiga (NG/esp) en el vástago principal y el PCE. Tomado de García et al (2008).

Por otro lado, utilizando RIL's para distintas duraciones de la etapa del PCE, logradas mediante la selección de individuos de similar ciclo a floración (Fig. 3 a), se pudo observar que aquellos que presentaban un PCE más prolongado establecían un mayor NG en los vástagos principales (García et al, 2008). Sin embargo, dicha asociación solo fue consistente en los individuos de ciclos largos, no observándose ninguna tendencia entre el NG y PCE en los ciclos cortos (Fig. 3b). Más aún, solo en una de las 4 poblaciones de cruzamiento utilizadas se observó variabilidad en el PCE para similares duraciones de ciclo a floración.

Variabilidad disponible en atributos favorables para mejorar el número de granos en cultivares comerciales usados en Argentina

La posibilidad de encontrar variabilidad genotípica en los materiales comerciales de Argentina abre una puerta para la identificación y selección de alguno/s de los atributos favorables que se han discutido anteriormente. Por ejemplo, la introducción de germoplasma europeo en Argentina ha mejorado alguno de los atributos que promueven el NG/espigas como por ejemplo el coeficiente de fertilidad de las espigas (CFE). En la figura 4 se muestra la relación entre el NG/esp y el peso seco de las espigas para distintos materiales comerciales. Si bien la mayoría de los materiales exploran rangos similares de peso seco de espigas, el NG/Esp en los materiales de origen francés son mayores para una mismo peso seco de espigas lo que sugiere un mayor CFE en estos materiales (Fig. 4).

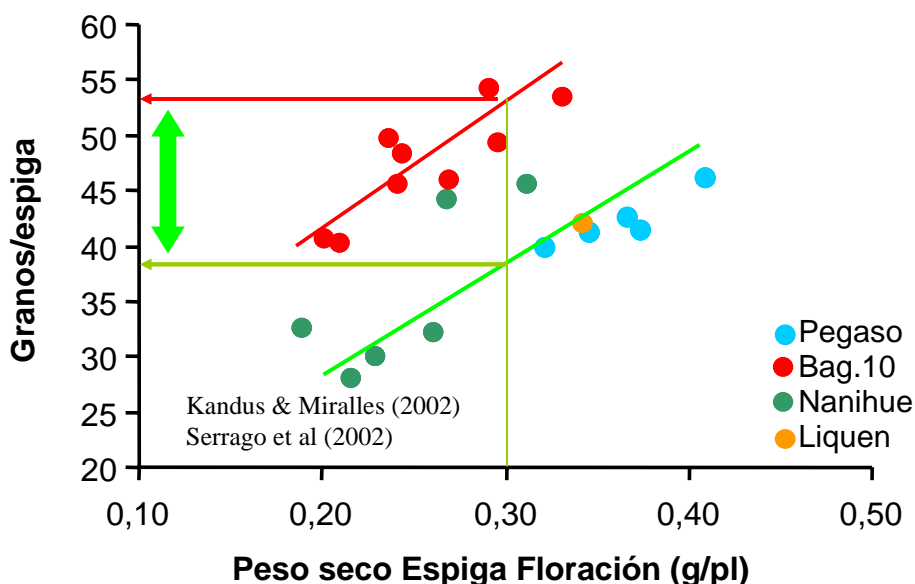


Figura 4: Relación entre el NG/esp y el peso seco de las espigas a floración para materiales tradicionales utilizados en Argentina y un material de germoplasma europeo.

Esta característica ha sido muy importante en el mejoramiento del rendimiento de los cultivares argentinos durante las últimas décadas. Algunas evidencias previas (Abbate et al. 1998) indicaban que parte de la mejora en el número de

granos en cultivares liberados al mercado durante la década del 90 estaban asociados con esta característica. En un trabajo reciente (Flacón et al., 2008) donde se estudiaron 40 cultivares actuales de trigo bajo condiciones de alta fertilidad y riego, se pudo establecer que ca. 45-55% de la diferencia en el número de granos logrados a cosecha entre los cultivares estaba explicado por el CFE (Fig. 5). Otra característica importante como el peso de las espigas en antesis difirió entre cultivares, variando entre 131 y 234 g m⁻² en los ciclos largos y entre 115 y 201 g m⁻² en los ciclos cortos (Fig. 5). En forma contraria a lo generalmente esperado, en ningún caso el peso de espigas en antesis explicó las variaciones del número de granos m⁻² entre cultivares, debido a la gran diferencia entre el CFE. Sin embargo, la existencia de variabilidad indicaría la posibilidad teórica de diseñar un cultivar con alto peso de espiga en antesis y con alto CFE.

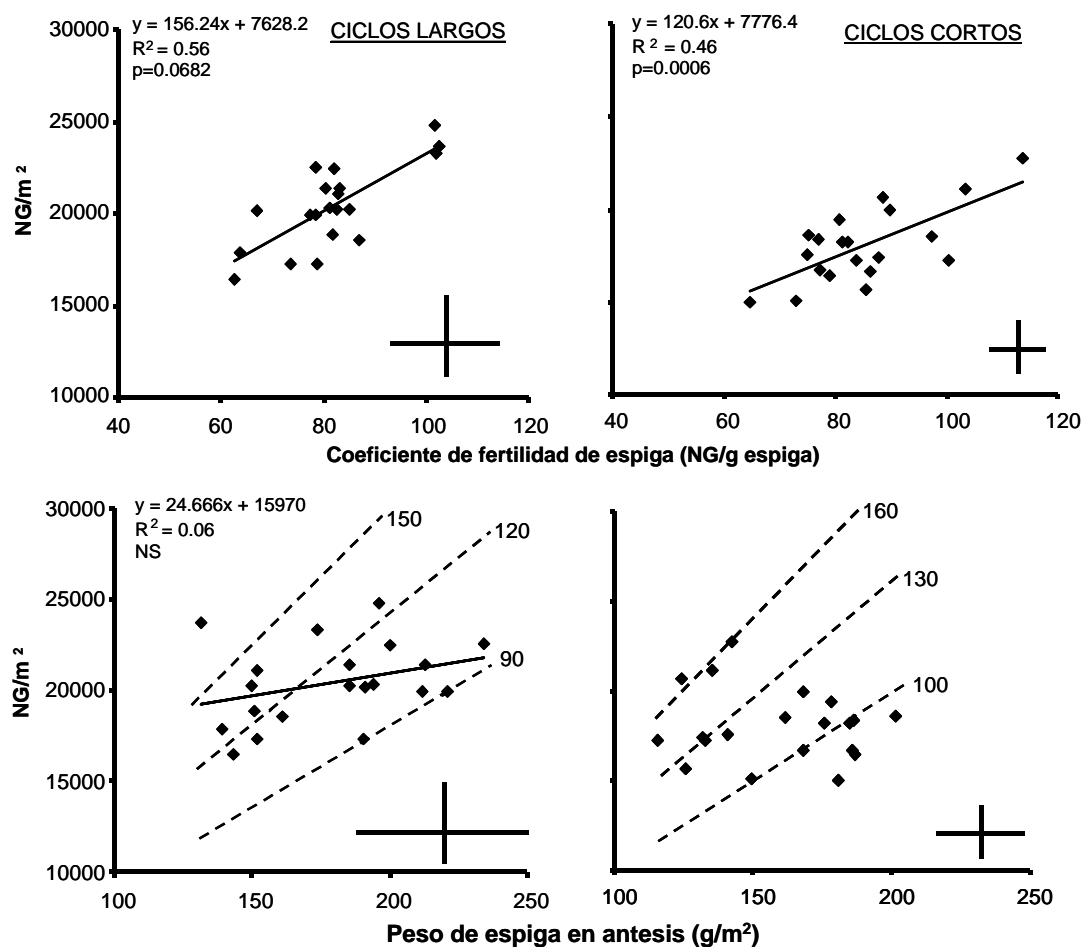


Figura 5: Relación entre el número de granos y a) el coeficiente de fertilidad de las espigas (a cosecha, ie. NG/g espiga a cosecha) y b) el peso de las espigas en antesis. Las líneas punteadas indican líneas de iso coeficiente de fertilidad (en antesis, ie. NG/g espiga en antesis). Las líneas verticales y horizontales ubicadas abajo a la derecha muestran la DMS (0,05).

La Dur_{PCE} y la PE, dos atributos importantes para determinar el peso de las espigas en antesis, también mostraron variabilidad entre los cultivares (Flacón

et al., 2008). La Dur_{PCE} varió entre ca. 25 y 38 días en los ciclos largos y entre ca. 24 y 33 días en los cortos, explicando en forma significativa el 30% de las variaciones del peso de las espigas m^{-2} en antesis sólo en los ciclos largos (Fig. 6). La PE varió entre ca. 10 y 20% en antesis y fue el atributo que explicó en mayor medida las variaciones observadas en el peso de las espigas m^{-2} en antesis entre cultivares (Fig. 6).

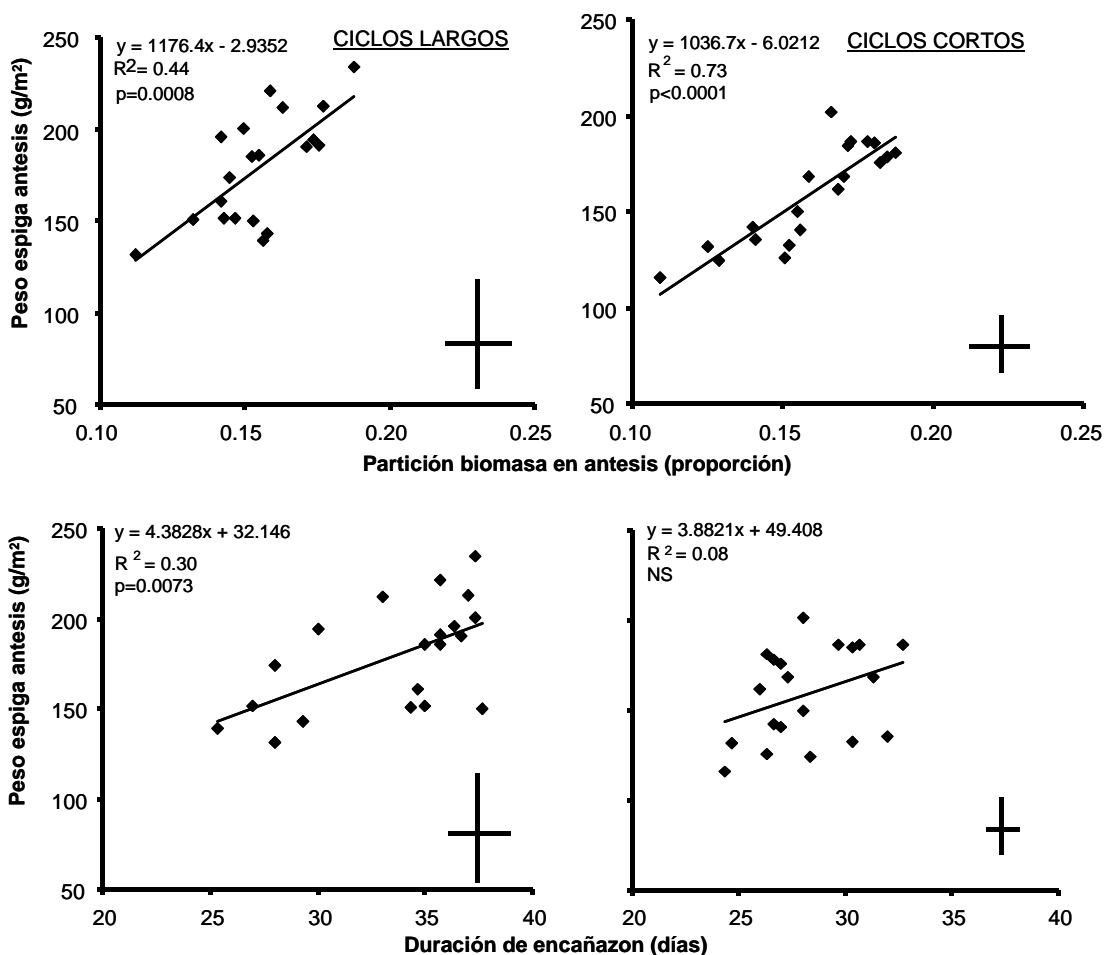


Figura 6. Relación entre peso de espiga y a) partición de biomasa en antesis y b) duración de la encañazon. Las líneas verticales y horizontales ubicadas abajo a la derecha muestran la DMS (0,05).

Estrategias futuras

Debido a la complejidad del carácter y a la falta de conocimiento y herramientas útiles ya sea fisiológicas y/o genéticas con aplicabilidad real en los programas de mejora (Snape & Moore 2007), el mejoramiento de trigo en Argentina y en el mundo se ha basado en la selección del rendimiento *per se*. Como consecuencia de ello los avances genéticos realizados en rendimiento en trigo no pueden en general cuantificarse en función de genes conocidos, con excepción de los genes mayores de resistencia a enfermedades y genes de enanismo (Snape *et al.* 2007). Sin embargo, el avance en trigo en

marcadores moleculares, mapas y herramientas genómicas durante los últimos ca. 10 años ha sido muy importante, permitiendo en la actualidad identificar QTLs asociados a caracteres relativamente mas complejos (Snape *et al.* 2007). Por ello, la identificación de atributos mas simples que el rendimiento en si mismo, y la cuantificación de su variabilidad dentro del ambiente objetivo de mejora es importante como primer paso hacia la generación de poblaciones de mapeo que permitan identificar y validar QTLs para realizar en el futuro selección asistida por marcadores (MAS) en el mejoramiento del rendimiento de trigo (Snape *et al.* 2007). De esta forma se podría acelerar el proceso de mejora y disminuir los costos que implica avanzar un alto número de líneas hasta parcelas de rendimiento dentro de los programas (Fischer 2007).

Referencias

- Abbate PE, Andrade FH, Lazaro L, Bariffi JH, Berardocco HG, Inza VH, Marturano F (1998) Grain yield increase in recent Argentine wheat cultivars. *Crop Science* 38: 1203-1209.
- Falcón M.O., Terrile I., González FG. (2008) Número de granos en trigo en condiciones potenciales: variabilidad en el coeficiente de fertilidad de espiga y en la duración de la encañazón en cultivares de alto rendimiento. VII Congreso Nacional de trigo, V Simposio Nacional de Cereales de Siembra otoño-invernal, I Encuentro del Mercosur.
- Fischer RA (2007) Ideas sobre características morfofisiológicas en el mejoramiento de trigo. En: Workshop Internacional Ecofisiología vegetal aplicada al estudio de la determinación del rendimiento y la calidad en cultivos de granos, pg: LXXI-LXXIV.
- González FG, Slafer GA, Miralles DJ (2003) Grain and floret number in response to photoperiod during stem elongation in fully and slightly vernalized wheats. *Field Crops Research* 81: 17-27.
- González FG, Slafer GA, Miralles DJ (2005a) Photoperiod during stem elongation in wheat: is its impact on fertile floret and grain number determination similar to that of radiation? *Functional Plant Biology* 32: 181-188.
- González FG, Slafer GA, Miralles DJ (2005b) Pre-anthesis development and number of fertile florets in wheat as affected by photoperiod sensitivity genes Ppd-D1 and Ppd-B1. *Euphytica* 146 (3): 253-269.
- Miralles DJ y Slafer GA (2007) Sink limitations to yield in wheat: How could it be reduced? *Journal of Agricultural Science* 145, 139-149.
- Miralles DJ , Richards RA y Slafer GA (2000) Duration of Stem elongation period influence the number of florets in wheat and barley . *Aust Journal Plant Physiol* 27, 931-940.
- Reynolds MP, Singh RP, Ibrahim A, Ageed OAA, Larque-Saavedra, Quick, JS (1998) Evaluating physiological traits to complement empirical selection for wheat in warm environments,. *Euphytica* 100, 171-179.
- Reynolds MP, Foulkes MJ, Slafer GA, Berry P, Parry MAJ, Snape JW y Angus W (2009). Raising yield potential in wheat 60, 1899-1918.
- Slafer GA y Rawson HM (1996) Responses to photoperiod change with phenophase and temperature during wheat development. *FCR* 46, 1-13.
- Slafer GA Savin R (2006) *Physiology of crop yield* . Taylor and Francis Eds.
- Slafer GA y Araus JL (2007) Physiological traits for improving wheat yield under a wide range of conditions . Springer 147-156.
- Snape JW, Moore G. (2007) Reflections and Opportunities: Gene discovery in the complex wheat genome. En: *Wheat production in stressed environments. Proceedings of the 7th International wheat conference, 27 November-2 December 2005, Mar del Plata, Argentina* (Buck HT, Nisi JE, Salomon N Eds.) Springer, Dordrecht, The Netherlands, pp: 677-684.
- Snape JW, Foulkes MJ, Simmonds J, Leverington M, Fish LJ, Wang Y, Ciavarrella M. (2007) Dissecting gene x environmental effects on wheat yields via QTL and physiological analysis. *Euphytica* 154, 401-408.