

SELECCIÓN POR EFICIENCIA DE USO DE NITRÓGENO (N) Y FÓSFORO (P)

A García Lamothe¹

RESUMEN

Los ambientes naturales típicamente presentan una combinación de diferentes estreses abióticos donde la baja disponibilidad de algunos nutrientes constituye un problema serio que conduce a la necesidad de aplicar fertilizantes. Los niveles en general sub-óptimo de N y P aseguran la respuesta a estos nutrientes en trigo, y requieren de aplicaciones anuales de los mismos para mantener la productividad. Ante esa necesidad y el peso que los fertilizantes tienen en la estructura de costos de producción, es importante aumentar la eficiencia de uso de los mismos. La eficiencia de uso de nutrientes puede responder al menos a dos componentes o factores: la recuperación de un nutriente desde el suelo relacionada a la arquitectura y funcionamiento de la raíz, (exploración del suelo con mínimo costo energético), y la eficiencia con que es usado internamente por la planta. Como respuesta adaptativa de la planta, la eficiencia puede darse a varios niveles, a nivel celular, del cultivo, estrictamente de la raíz, etc. Incorporarla al mejoramiento requeriría conocer los procesos fisiológicos, metabólicos y físico-químicos que contribuyen a mejorar esos aspectos. En general los mecanismos de adaptación vinculados a la raíz pueden ser funcionales a más de un nutriente. Si se enfoca el mejoramiento a desarrollar sistemas radiculares largos que exploren mayor volumen de suelo la planta puede captar más N y P. En el caso del N, debido a su movilidad, recuperar al que se ha movido a capas

profundas del suelo, incluso acceder a más agua y tolerar más la sequía. Los programas de mejoramiento que seleccionan a favor de cultivares de alto rendimiento, están seleccionando por eficiencia de adquisición de nutrientes pues a mayor rendimiento mayor utilización de los mismos. Sin embargo al trabajar con niveles de nutrientes no limitantes se puede enmascarar diferencias en eficiencia entre cultivares. Cuando el objetivo del mejoramiento es lograr resistencia a enfermedades, se reduce el riesgo de sufrir los estreses que los patógenos desencadenan en las plantas, en consecuencia es mayor la probabilidad de expresar el potencial y también de usar eficientemente los nutrientes. En el caso del N, si la selección tiene como objetivo la calidad panadera del grano, estrechamente relacionada a la absorción de N y a la redistribución interna, contribuye a seleccionar por eficiencia. En cuanto a la eficiencia de adquisición del P, los avances relacionados al mejoramiento se deberían más a la generación de cultivares de altos potencial con mayor demanda de P que a otros aspectos, o estos son menos evidentes. Este trabajo pretende abordar en qué medida se ha mejorado al menos en forma indirecta, la eficiencia de uso de esos nutrientes, los más usados como fertilizante en el cultivo de trigo, y cuya utilización implica un riesgo potencial de contaminación ambiental cuando no son usados eficientemente por los cultivos. Además las implicancias o dificultades de agregar ese objetivo específico al mejoramiento del cultivo de trigo y las posibilidades de avance.

¹ INIA La Estanzuela – Ruta 50 km 11, Colonia
E-mail: agarcia@inia.org.uy

INTRODUCCIÓN

Los estreses abióticos en los ambientes naturales

En los ambientes donde crecen los cultivos se combinan estreses bióticos y abióticos, estos últimos propiciados por condiciones climáticas, edáficas y/o disponibilidad de agua. En este trabajo se abordarán en particular, el efecto de la escasez de los nutrientes nitrógeno (N) y fósforo (P) y la ineficiencia de uso de los mismos. El N por ser la mayor limitante del crecimiento de los cereales y en el caso del trigo afectar la calidad del grano (García Lamothe, 2006). Además al ser requerido en grandes cantidades incide fuertemente en los costos de producción. En sistemas agrícolas intensivos, sobre todo con dominancia del cultivo de soja, se genera un balance negativo de N en el suelo que debe contrarrestarse con buenas prácticas de fertilización. Por otro lado, la baja utilización de N por el cultivo tiene impacto negativo en el medio ambiental al quedar expuesto a mecanismos naturales de pérdida contaminantes (García Lamothe, A, 1994; Riley *et al.*, 2001). El N es el principal responsable de la huella de carbono y contribuye al efecto negativo de la agricultura en los recursos naturales (generación de gases de efecto invernadero, contaminación del agua con nitrato, etc.). El P por su lado, es escaso en la mayor parte de los suelos del país y debe agregarse anualmente para mantener la productividad del cultivo debido a que el fosfato reacciona con la matriz del suelo perdiendo bio-disponibilidad.

En consecuencia también el P tiene un peso considerable en el costo de producción del cultivo, que irá en aumento con el agotamiento de los yacimientos de P. También el P contribuye a la degradación ambiental si ocurren pérdidas del nutriente y éstas llegan a fuentes de agua.

Un índice de sustentabilidad de los sistemas de producción agrícola es la eficiencia de uso de un recurso expresado como el producto obtenido por unidad de insumo utilizado (Moll *et al.*, 1982). En un sistema de producción intensiva con base a alto

uso de insumos, la eficiencia con que se usen tanto el N como el P es crucial para:

- a) mantener la productividad
- b) reducir el costo de producción
- c) minimizar el impacto negativo en el medio ambiente.

Este último punto, aunque más difícil de cuantificar en términos económicos, no es menos importante. A modo de ejemplo, en el caso del N se debieron fijar niveles máximos tolerables de nitrato en el agua para consumo; las pérdidas de óxido nitroso deben ser consideradas en los inventarios de gases con efecto invernadero en los balances de producción «limpia»; la pérdida de nitrato y los balances negativos de N en el suelo tienden a la acidificación y a reducir la materia orgánica del mismo (García Lamothe *et al.*, 2009). Tanto el N como el P contribuyen a la eutrofización de los medios acuáticos. El estado trófico se define con base al nutriente más limitante y en éstos, en la mayoría de los casos es el fósforo. La contaminación con P del agua causa un desequilibrio ecológico que repercute negativamente en actividades recreativas, en la salud, y encarece los tratamientos de potabilización del agua.

¿Qué se puede hacer para mejorar la eficiencia de uso de estos nutrientes?

Por un lado, optimizar las prácticas de manejo del cultivo lo que se logra ajustando la agronomía para cada situación particular (García Lamothe, 1994). Por otro, generando cultivares más eficientes en la adquisición de nutrientes. El objetivo de este trabajo, es considerar esta segunda estrategia pues se relaciona con el mejoramiento genético, para ello la temática propuesta es:

- 1) La eficiencia de uso de nutrientes (N-P), definición y qué factores la controlan.
- 2) Cómo ha afectado el mejoramiento genético del trigo a la eficiencia (N y P).
- 3) Factibilidad de incluir eficiencia en la selección y acelerar el progreso genético.

I. Definición de eficiencia y factores que la controlan

Hay diferentes tipos de eficiencia. Moll et al. (1982) la definió como el producto obtenido por unidad de insumo utilizado, lo que representa a la eficiencia agronómica. Pero se pueden distinguir por lo menos dos aspectos diferentes: la eficiencia de recuperación (ER) y la eficiencia interna (EI) (Dobermann, 2007). La ER puede variar en función del compartimiento que se considere para estimarla (planta entera, biomasa aérea, parte cosechada, etc.) y la fuente del nutriente recuperado (fertilizante, aporte del suelo, abono, etc.) (Bruulsema *et al.*, 2004). En este caso la ER se considera como la proporción del nutriente presente en la biomasa aérea (grano y paja) a madurez fisiológica del trigo en relación a la cantidad de nutriente disponible durante su ciclo. La eficiencia interna (EI), como los kg de rendimiento por kg de nutriente efectivamente absorbido. La Eficiencia de Uso de N (EFUN) es comúnmente asimilada a la eficiencia agronómica: cantidad de grano producido por unidad de N disponible (igual razonamiento cabe para P), y según Huggins y Pan (1993) es indicadora de diferenciación entre sistemas de cultivos y sus componentes asociados a procesos del suelo y del genotipo. La EFUN es el resultado de la recuperación de N (ER) y la producción de grano por unidad de N absorbido (EI) (Bock, 1984; Kanampiu *et al.*, 1997).

En este punto cabe aclarar que la variabilidad genética respecto a eficiencia de uso, si bien guarda relación con la adaptación a la agricultura de bajos insumos, no es igual, y no está dentro del enfoque de esta discusión, en la cual la agricultura de altos insumos es la que nos preocupa pues el objetivo es obtener alto rendimiento por unidad de área. No obstante para el caso del P alguno de estos mecanismos pueden cobrar significación como se discutirá más adelante.

I.1. Factores que afectan la eficiencia de uso de un nutriente

Son varios los factores que controlan la adquisición de nutrientes, algunos se relacionan a características del suelo y otros de las plantas, y al hablar de fertilidad del suelo en cierta forma se abarcan ambos, por un lado a la cantidad de nutriente presente y por otro la posibilidad de acceder a él.

Entre los factores relacionados al suelo son relevantes el estatus hídrico, la temperatura, la acidez o alcalinidad, la existencia de impedimentos físicos (compactación, nivel de oxígeno, etc.), la concentración de un nutriente. Entre los relacionados a las plantas se citan: el genotipo, el patrón de crecimiento, arquitectura de raíces, la capacidad de establecer relaciones simbióticas con otros organismos, o de alterar la química de la rizósfera, etc. (Rengel y Marschner, 2005).

La variación genética para la adquisición de nutrientes proviene de diferencias del sistema radicular, tasas de absorción, de asimilación, procesos rizosféricos que alteran la mineralización y solubilización de N y P respectivamente. En tanto que la variación en el uso interno para formación de grano, proviene principalmente de diferencias en requerimientos para el crecimiento y desarrollo (Singh y Buresh, 1994). Genotipos eficientes poseen a menudo más de una de estas características.

I.2. El sistema radicular del trigo

El mecanismo de entrada más importante de nutrientes a la planta es a través de raíz. El sistema radicular del trigo es del tipo fasciculado y su mayor o menor desarrollo depende del genotipo, pero además de factores intrínsecos al suelo (Gregory, P., 2006), de la época de la siembra, del agua disponible, entre otros, que dificulta caracterizarlo.

La raíz toma nutrientes de la solución del suelo y estos se mueven por el apoplasto (paredes celulares y espacio entre ellas) o entre célula y célula a través de las membranas. Hay varias características morfológicas de las raíces que afectan la adquisición de nutrientes: la longitud, la densidad,

la superficie específica, la tasa de crecimiento, los pelos radiculares (densidad y longitud) son las más citadas (Hodge *et al.*, 2009). El efecto de cada una de ellas sobre la eficiencia depende en gran medida del nutriente. El nitrato es muy móvil y llega a la raíz principalmente por flujo de masa, por lo que en este caso una raíz más larga es importante para captar N lavado en profundidad. Para el caso del P, el fosfato es relativamente inmóvil por lo que es fundamental que la raíz entre en contacto con el ión. Como la mayor concentración de P se encuentra en superficie, un desarrollo abundante de raíces laterales superficiales finas y pelos radiculares con mayor superficie de absorción es más importante que el crecimiento en profundidad (longitud). En cuanto a la tasa de crecimiento y absorción, son funcionales a los dos nutrientes.

Es posible afirmar que para mejorar la absorción de nutrientes (la ER) sería recomendable seleccionar por alguna característica deseable de las raíces antes mencionadas. Sin embargo es complicado debido a la influencia del ambiente sobre el crecimiento y la morfología de las raíces, como se mencionó anteriormente, más allá de lo laborioso que resultaría el fenotipado.

II. ¿El mejoramiento genético del trigo ha aumentado la eficiencia de adquisición de nutrientes (N y P)?

Si bien el programa de mejoramiento de trigo no ha seleccionado directamente por eficiencia, es probable que haya sido modificada como consecuencia de otros aspectos que sí han sido objetivo de la selección. Se discute a continuación cómo ha evolucionado la EFUN y de P en función a tres grandes objetivos de selección del trigo del programa de mejoramiento de INIA:

- 1) alto rendimiento
- 2) resistencia a enfermedades
- 3) calidad del grano para panificación

II.1 Rendimiento en grano

Uruguay está ubicado en una región considerada para trigo de latitud baja (< 35°),

con inviernos de temperatura moderada y alta humedad relativa. Las lluvias son mayores o igual a 500 mm durante el ciclo del cultivo, con promedios mensuales similares y cercanos a 100 mm, pero valores puntuales muy variables entre años. Estas variaciones causan en general dos tipos de problemas en el cultivo de trigo: los asociados a excesos o a déficit hídrico, y los relacionados al ataque de enfermedades fundamentalmente vinculados a los primeros (Díaz *et al.*, 2014). El clima permite el doble cultivo y en la actualidad la soja es el cultivo de verano que acompaña al trigo en las rotaciones agrícolas, pero puede ser el girasol, el sorgo o el maíz, según el sistema de producción. En rotaciones con predominio de trigo/soja, si bien el cereal no es el cultivo principal desde el punto de vista económico, llena un espacio estratégico donde no hay otro cultivo tan rentable y estable como él, protegiendo al suelo durante el invierno de los procesos erosivos. Aún en estas condiciones que pueden considerarse sub-óptimas para producir trigo, el potencial de rendimiento de la genética local llega a superar las 8 toneladas por hectárea con una producción de granos del orden de 23 mil por m² (García Lamothe y Díaz de Ackermann, 2007b).

Con el fin de evaluar el progreso genético independientemente del efecto de nuevas prácticas agronómicas o el efecto año, el Programa de Mejoramiento de Trigo de La Estanzuela dirigido actualmente por el Ing. Martín Quincke, siembra periódicamente cultivares que han sido liberados a lo largo de los años desde que comenzara el mejoramiento en Uruguay. Si bien esa actividad no tiene el rigor científico de un experimento con repeticiones, es una buena referencia de la evolución del rendimiento potencial (sin limitantes nutricionales ni sanitarias) y el índice de cosecha del trigo. Los datos obtenidos en los años 2012 y 2013 han sido utilizados como base para esta discusión (figura 1) acerca del progreso genético del potencial del trigo, asociado a la eficiencia de uso de N y P.

Desde que se inició el mejoramiento y hasta principio de los 80 (s. XX) se observa una mejora constante aunque a tasa reducida en los potenciales de rendimiento. Con la

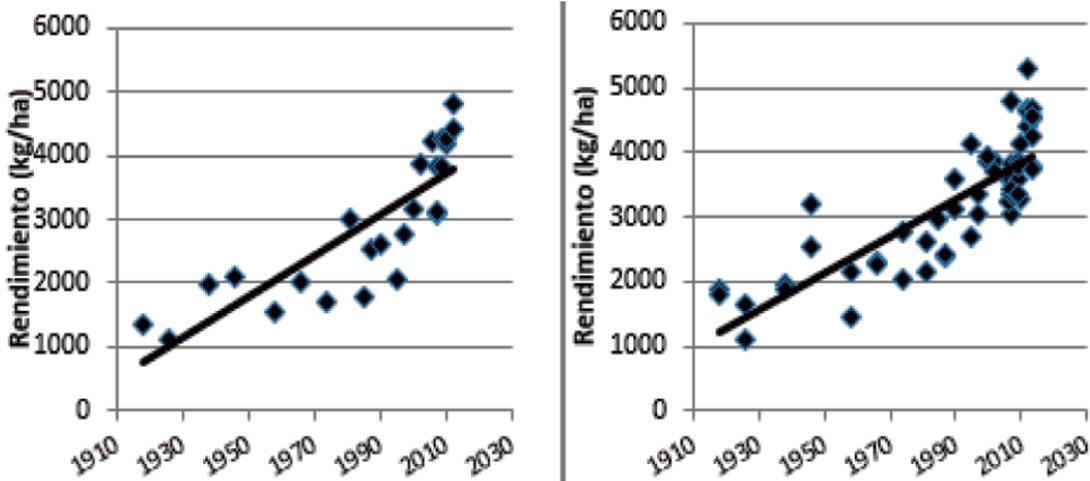


Figura 1. Progreso genético del rendimiento de trigo (kg/ha) años 2012 y 2013.

introducción de cultivares CIMMYT de caña más corta, menos susceptible al vuelco y con mayor respuesta a N, se verificó un cambio notable en la tasa del progreso genético (3 % anual) relacionada principalmente con el índice de cosecha (Figura 2).

La media nacional de trigo ha seguido ese progreso pero deja en evidencia una amplia brecha tecnológica de casi 200 % tendiente a aumentar levemente con el tiempo. No obstante esa brecha no considera la variabilidad natural de las chacras comparada con la homogeneidad buscada en los experimentos, si lo hiciera se reduciría a la mitad.

Los cultivares de alto rendimiento tienen requerimientos mayores de nutrientes, por

consiguiente ha aumentado la adquisición de N y P con el incremento en el rendimiento, consecuencia del mejoramiento genético. Tanto para el N como para el P la tendencia es hacia un aumento de la ER en los cultivares de más reciente liberación. De hecho para el caso del N la recuperación aparente de N hace tres décadas era en promedio de sólo 30 % (García Lamothe A., 1994). Las dosis de N recomendadas no superaban los 60 kg/ha (en chacras viejas) y las usadas más comúnmente a nivel de producción eran cercanas a 30 kg/ha. En la actualidad la dosis de N para obtener el máximo físico es hasta 100 % mayor en cultivares nuevos respecto a los antiguos, pero el rendimiento en grano por

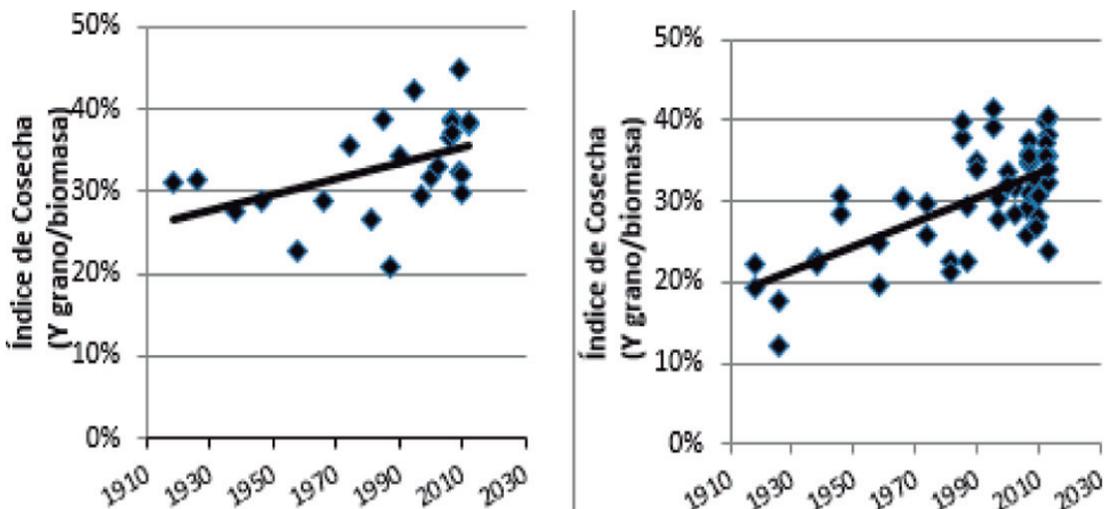


Figura 2. Evolución de Índice de cosecha del trigo, años 2012 y 2013.

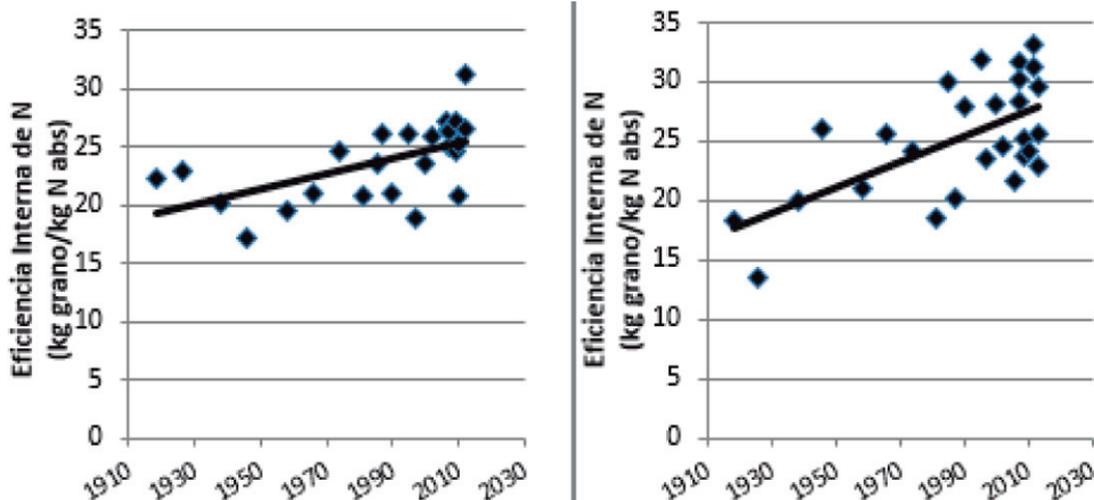


Figura 3. Evolución de la eficiencia Interna del Nitrógeno, años 2012 y 2013.

unidad de área se ha multiplicado como mínimo por dos veces y media, lo que ha aumentado la demanda de N (García Lamothe, 2010).

En cuanto a la EI, también incrementó significativamente pues del N presente en la biomasa, efectivamente absorbido por el cultivo, una proporción mayor es utilizada para formar granos (figura 3). Sin embargo cabe resaltar que aún en cultivares nuevos hay una dispersión importante de los datos (de 20 a 30 kg de grano/kg de N absorbido) lo que indica existen diferencias entre genotipos que habría que explorar y posibles de utilizar en la selección.

El aumento en la EI para el caso del N puede atribuirse, al menos en parte, a una menor demanda del nutriente para el crecimiento de la caña (caña más corta) que dejaría más N disponible para el desarrollo de la espiga, ya que ambos procesos coinciden en el tiempo. Estas modificaciones han incrementado la EFUN (eficiencia agronómica) que por muchos años fue del orden de 10-12 kg de grano por kg de N aplicado y que actualmente oscila entre 20-25 kg de grano por kg de N aplicado en condiciones de N limitante y cuando se hace un buen manejo general del cultivo (García Lamothe, 2004).

En el caso del P con base a los datos del 2012 podría concluirse que la EI en promedio se mantuvo constante, eso significaría

que si bien aumentó la adquisición del nutriente asociada al mayor rendimiento, no el número de granos por unidad de P absorbido (figura 4). Sin embargo los registros del año 2013 muestran lo contrario, la EI promedio tiende a mejorar en los materiales recientemente liberados.

Un tema con el P es que por un lado, admite un consumo de lujo por las plantas cuando está presente en exceso en el suelo. En este sentido la fertilización con P en el año 2012 fue casi el doble de la aplicada en el 2013, y si bien ambas se ajustaron con base a los análisis de suelo (Bray I) para que el P no fuese limitante, es probable que la disponibilidad del P determinada por el análisis y la del fertilizante no fuese igual y la dosis de 53 unidades de P_2O_5 /ha aplicada en el 2012 no haya requerido desarrollar mecanismos adaptativos para lograr obtener el P requerido sino que hubo consumo de lujo. Por otro lado, el ambiente edáfico y las condiciones climáticas fueron diferentes entre años, pudiendo contribuir a que la cantidad de nutriente adquirido fuese a su vez diferente en uno y otro caso.

Si esta es una hipótesis correcta y las condiciones edafo-climáticas del año 2012 incluyendo la fertilización, no permitieron se expresara el aumento en EI para el caso del P, sería recomendable que una vez identificados los cultivares elite pudieran probarse en condiciones de P limitante porque lo que

sí fue evidente sobre todo en el 2013, es una gran variación en EI entre los cultivares liberados más recientemente (150 a 300 kg de grano/kg de P absorbido).

II.2 Resistencia a enfermedades

Las enfermedades del trigo causadas por hongos son en nuestro país una de las principales causas de pérdida de productividad del cultivo (Díaz de Ackermann *et al.*, 1998, García Lamothe, 1998). La severidad del ataque de patógenos y la magnitud de los daños dependen de las condiciones climáticas del año. Los efectos negativos sobre las plantas ocurren a diferente nivel y mediante diversos mecanismos como: la producción de toxinas, de enzimas, hormonas y/o polisacáridos, afectando la absorción de nutrientes. En consecuencia al no permitir la expresión del potencial se reduce la ER de los fertilizantes e incluso la EI. En el caso del N el particionamiento hacia los granos desde el follaje es fuertemente inhibido por las enfermedades.

Los problemas sanitarios más frecuentes en trigo asociados a mermas significativas del rendimiento ocurren cuando las condiciones ambientales favorecen la incidencia temprana de patógenos responsables principalmente de manchas foliares, roya de la hoja y fusariosis de la espiga, pero también de otras enfermedades. El efecto sobre el rendimiento se ha asociado a senescencia prematura de hojas, producción de granos livianos de bajo peso hectolítrico y/o menor producción de número de granos/m².

El esfuerzo constante del Programa de Mejoramiento ha permitido liberar cultivares con diverso grado de resistencia a una o más de estas enfermedades, lo que ha contribuido a mejorar la eficiencia de uso de los nutrientes. Por ejemplo, Génesis 2366, de liberación reciente, surge de trabajos vinculados al convenio INIA-CIMMYT y combina genética introducida (USA) con genética local adaptada, y tiene excelente sanidad foliar y resistencia a fusariosis de la espiga (Quincke, 2012).

Lograr resistencia a patógenos mediante el mejoramiento genético reduce el riesgo de merma del rendimiento e incremen-

ta la estabilidad ante condiciones climáticas adversas y por ello es clave para mejorar la eficiencia de uso de nutrientes como el N, pero también el P y otros esenciales para el cultivo. Independientemente del desarrollo del control químico para proteger a los cultivos de los patógenos, la resistencia a enfermedades ha tenido y tiene enorme potencial en la selección indirecta por eficiencia de adquisición de nutrientes. Quizás el beneficio sea mayor en el caso del N debido a que patógenos biotróficos como las royas presentan mayor severidad a altas dosis del nutriente (García Lamothe y Díaz de Ackermann, 2007).

II.3. Calidad del grano para panificación

Para que los fertilizantes sean utilizados lo más eficientemente posible es un requisito esencial que el grano de trigo se ajuste al uso final que se pretenda del mismo. Comúnmente para cierto cultivar de trigo existe una relación positiva entre la concentración de N del grano (proteína) y la calidad panadera. No es raro que el incremento en rendimiento logrado por mejoramiento sea acompañado por una peor calidad panadera. Ese hecho ha llevado a un debate acerca de la existencia de una relación negativa entre % de proteína del grano y rendimiento. No obstante hay evidencias que sugieren que el N del grano puede incrementar explotando diferencias genéticas que existen para la adquisición de N, y la adquisición de N tardío (post-floración), y para su particionamiento al grano (Beninati y Busch, 1992), habiéndose identificado genes mayores que confieren alta proteína sin detrimento del rendimiento.

No obstante sí es evidente la relación negativa entre el índice de cosecha y la concentración proteica del grano, puesto que buena parte del N del grano proviene del asimilado en los órganos no reproductivos de las plantas (60–95% del N proviene de raíces y tallos según Habash *et al.*, 2006). El mejoramiento genético ha contribuido a aumentar el índice de cosecha del trigo (Figura 2) lo que significa que aunque haya tendido a aumentar la biomasa, es mayor el impacto

sobre la cantidad de granos producidos. Si el N proviniera sólo del asimilado antes de floración el hecho de producir más granos tendería indefectiblemente a una caída del porcentaje de N de los granos, algo que no ocurre cuando es adecuada la disponibilidad tardía de N y agua en el suelo (García Lamothe, 2006). El mejoramiento genético ha logrado incrementar el rendimiento, el IC y mantener los niveles de proteína en el grano, lo que sugiere que además de un mejor particionamiento del N (proceso limitado por la fisiología, puesto que suplir la demanda de carbohidratos de las espigas requiere que prosiga la fotosíntesis y no haya senescencia prematura) se seleccionaron cultivares con capacidad de absorber y asimilar N post-floración, una característica de cultivares de alto rendimiento (García Lamothe, 2004).

En conclusión: el mejoramiento genético a través del desarrollo de cultivares de alto rendimiento y buena sanidad ha contribuido a mejorar la ER de los nutrientes. Además, seleccionar por rendimiento y calidad panadera ha mejorado la EI del N. En el caso del P, la mejora de la ER si bien reduce la cantidad de P soluble del fertilizante capaz de reaccionar con el suelo, sugiere un agotamiento más rápido del P. En este sentido es interesante que el mejoramiento tendiera a aumentar más la EI pues es a través de ella que se puede reducir la necesidad de agregar P y producir igual o más granos.

III. ¿Es factible introducir eficiencia de uso de N y P como criterio para la selección?

Selección por caracteres deseables en las raíces

Ya se discutió la importancia de la raíz en la adquisición de nutrientes y en ese sentido existe variabilidad genética como para desarrollar líneas superiores tanto para N como para P. Un mejoramiento enfocado a desarrollar sistemas radiculares más largos que a exploren mayor volumen de suelo y competan mejor por diversos nutrientes (Malamy, 2005) significaría también mayor acceso al agua (eficiencia de uso de agua) y mejor capacidad para recuperar nutrientes

móviles que se han movido a capas más profunda del suelo como el nitrato. Para que tanto el N como el P fueran favorecidos, el ideotipo de raíz es probable que deba tener profuso desarrollo en superficie de raíces laterales finas y pelos radiculares y crecimiento en profundidad de otras raíces.

El fenotipado para características de las raíces demanda tiempo, recursos y es complicado debido a los factores ambientales que afectan su desarrollo. No obstante se pueden usar caracteres indirectos en la selección relacionados con los sistemas radiculares, por ejemplo, el rápido desarrollo inicial, o la duración del área foliar que, independientemente de las condiciones ambientales, sugieren la existencia de una raíz eficiente.

Aparte de estos aspectos relacionados a la raíz, en general funcionales a varios nutrientes, mejorar la adquisición de nutrientes requiere un conocimiento de los procesos fisiológicos, metabólicos y físico-químicos que pueden afectar la absorción, conocer la heredabilidad de los caracteres y la posibilidad de utilizarlos en mejoramiento.

Los mecanismos involucrados van desde aquellos que operan a nivel celular hasta los que operan a escala del cultivo, incluyen: asimilación de nitrato, de fosfato, particionamiento de nutrientes, fotosíntesis de la canopia, la tolerancia a la sequía, entre otros.

III.1. ¿Cómo se podría acelerar el progreso genético?

Eficiencia de uso del N (EFUN)

Como se discutió anteriormente la EFUN (ER y EI) aumentó sin que directamente haya sido objeto de la selección, aunque existe variación genética en trigo y cebada para estos aspectos que puede explotarse. Algunas características que aparecen como prometedoras para seleccionar por EFUN son: además de la raíces largas, una alta capacidad de acumular N en los tallos, asociada a alta tasa de absorción de N, baja concentración de N en la lámina foliar, alta eficiencia de movilización post-antesis desde los tallos a los granos, y por el contrario baja movilización desde las hojas a los granos para

retrasar la senescencia, alta capacidad de absorción y asimilación de N post-antesis, síntesis de cierto tipo de proteína en el grano, etc.

Sin embargo, utilizar estos caracteres en la selección implica también un laborioso fenotipado y la capacidad de realizarlo en condiciones confiables es quizás una de las principales limitantes de la selección por EFUN. Es posible, no obstante, valerse de herramientas como son los diferentes sensores hoy disponibles, para hacer un «*screening*» de genotipos midiendo por ejemplo, reflectancia de la canopia, contenido de clorofila, y actividad fotosintética. La reflectancia espectral de la canopia (CRS en inglés) es una técnica que se basa en la absorción de la luz de una longitud de onda específica. Las características del espectro son afectadas por el tamaño de la canopia, la concentración de N y la senescencia. Esta medida ha sido usada para medir producción temprana de biomasa en diferentes genotipos de trigo (Babar *et al.*, 2006) y obtener medidas objetivas de senescencia (Adamsen *et al.*, 1999), o determinar estados de madurez (Gupta *et al.*, 2001). Esas mediciones pueden complementarse con datos de rendimiento y proteína del grano y establecer el estado fisiológico de diferentes genotipos en forma rápida y económica. Otros parámetros sencillos de fenotipar como el tamaño y peso de los granos, relacionados a la EFUN, pueden ser complementarios. Con base a esas mediciones con sensores y otras, se pueden identificar los loci responsables de las características relacionadas a la EFUN (QTL) y desarrollar marcadores moleculares que permitan usarlos en los programas de mejoramiento y acelerar los procesos.

Para lograr calidad panadera el objetivo debería ser reducir la necesidad de excesiva fertilización-N lo que requiere mayor acumulación de N antes de la antesis, eficiente translocación de ese N a los granos y N adquirido posteriormente, durante el llenado del grano. Ello sería posible manteniendo alta la actividad de las enzimas responsables de la asimilación (ej.: glutamino sintetasa) (Foulkes *et al.*, 2009).

Eficiencia de uso de P

Lograr desarrollar cultivares más eficientes en el uso de P sería ideal tanto para suelos pobres en P y con escasa capacidad de retención, como para suelos fijadores de P (Lynch, 2007; Fageria *et al.*, 2008); también requiere conocer los mecanismos involucrados, especialmente a la EI.

En el caso del P al ser poco móvil, es la raíz que tiene que llegar a él y cierta morfología del sistema radicular le favorecería. No obstante la selección fenotípica de los mejores sistemas radiculares, como ya se comentó, es complicada y demanda tiempo (Miklas *et al.*, 2006) y al no ser práctica tiende a ser evitada por los mejoradores.

Es importante tener presente que una planta que crece con baja disponibilidad de P pone en marcha mecanismos adaptativos para aumentar el acceso al nutriente (ER) o internamente usar menos P (EI) (Vance *et al.*, 2003); este último aspecto debería ser más explorado y explotado por el mejoramiento. Obviamente el mejorador debe trabajar junto al fisiólogo para lograr un avance más efectivo y rápido.

Existen diferencias genéticas entre cultivares que los hacen más o menos tolerantes a bajo nivel de P, por lo que en este caso el «*screening*» debería hacerse en cultivares elite en sistemas con P limitante como se mencionó anteriormente.

Dentro de los varios mecanismos adaptativos relacionados a las raíces, hay uno que parece más promisorio: *la formación diferencial de raíces y de pelos radiculares*. Se ha determinado que en cultivares de trigo y cebada existe variación genética para esta característica (Gahoonia *et al.*, 1997). Los pelos no sólo acceden a zonas donde la raíz no llega (ejemplo suelos compactados), sino que tienen mayor superficie específica para la absorción y además, un aspecto fundamental: exudan sustancias (ácidos orgánicos, protones, fosfatasas) que aumentan la disponibilidad de P presente en el suelo (Hinsinger, 2001, Richardson *et al.*, 2009). Estas estructuras reducen el costo metabólico de la planta pues producirlas y mantenerlas requieren menos energía. El mejoramiento con

asistencia molecular y uso de marcadores puede permitir un avance más rápido pero requiere el fenotipado y ubicar QTLs en un mapa genético para transferir los alelos al material de elite.

En cuanto al *desarrollo de plantas transgénicas* los intentos para mejorar la adquisición específica de P han ido por el lado del uso de bacterias específicas o genes de plantas para promover la solubilización del P. Tanto el transporte de P como la solubilización parecen relacionarse con los pelos radiculares y si bien se ha determinado sobre-expresión de enzimas en diversos cultivos que exudadas a la rizósfera pueden hidrolizar hasta el 50% del P orgánico (Anderson, 1980) y que podría tener efecto sinérgico con la mayor absorción de los pelos radiculares, es posible que la complejidad de los procesos involucrados y las trabas a los transgénicos retarden el avance en este sentido.

AGRADECIMIENTOS:

Agradezco de manera especial a los Ing. Martín y Andrés Quincke por brindarme la valiosa información obtenida en los «históricos de trigo» del 2012 y 2013, y en especial a Andrés por su colaboración con la elaboración de los gráficos.

BIBLIOGRAFÍA

- Adamsen FJ, Pinter PJ, Barnes EM, LaMorte RL, Wall RW, Leavitt SW, Kimball BA. 1999. Measuring wheat senescence using a digital camera. *Crop Sci.* (39) 719-724.
- Anderson G. 1980. Assessing organic phosphorus in soil. En: Sample EC, Kamprath EJ (Eds). *The role of Phosphorus in Agriculture*. ASA, Madison, WI, USA, pp. 411-431.
- Babar MA, Reynolds MP, Van Ginkel M, Klatt AR, Raun WR, Stone ML. 2006. Spectral reflectance indices as a potential indirect selection criteria for wheat yield under irrigation. *Crop Sci.* (46) 578-588.
- Beninati NF, Busch RH. 1992. Grain protein inheritance and nitrogen uptake and redistribution in a spring wheat cross. *Crop Sci.* (32) 1471-1475.
- Bock BR. 1984. Efficient use of nitrogen in cropping systems. En: Hauck RD (Ed.) *Nitrogen in crop production*. ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wis., USA. pp. 273-294.
- Bruulsema TW, Fixen PE, Snyder CS. 2004. Fertilizer Nutrient Recovery in Sustainable Cropping Systems. *Better Crops* 88 (49)15-17.
- Díaz de Ackermann M, Kohli MM, Ceretta S, Abbadie T, Ibáñez V. 1998. Importancia de las enfermedades en la producción del trigo en Uruguay. En: *Explorando altos rendimientos de trigo*. Kohli MM, Martino D. (Eds). INIA La Estanzuela, Colonia Uruguay, octubre 20-23, 1997. pp 259-276.
- Diaz R, Rubio V, Garcia Lamothe A, Quincke A. 2014. Efecto de la variabilidad climática en la producción de trigo y medidas de adaptación para reducir riesgos. En: *Congreso Uruguayo de Suelos, VI encuentro SUCS*. Colonia- Uruguay 6-8 agosto, 2014.
- Dobermann AK. 2007. Nutrient Use Efficiency – measurement and management. IFA-International Workshop on fertilizer best management practices. March 7-9. Brussels, Belgium.
- Fageria NK, Baligar VC, Li YC. 2008. The role of nutrient efficient plants in improving crop yields in the twenty first century. *J. Plant Nutr.* (31) 1121-1157.
- Foulkes MJ, Hawkesford MJ, Barraclough PB, Holdsworth MJ, Kerr S, Kightley S, Shewry PR. 2009. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. *Field Crops Research* (114) 329-342.
- Gahoonia TS, Care D, Nielsen NE. 1997. Root hairs and phosphorus acquisition of wheat and barley cultivars. *Plant & Soil* (191) 181-188.
- García Lamothe A. 1994. Manejo del Nitrógeno para aumentar la productividad en trigo. Serie Técnica N°54. Unidad de Difusión INIA, Montevideo. Uruguay. 27 p.
- García Lamothe A. 1998. Fertilización con N y potencial de rendimiento en trigo. En: *Explorando altos rendimientos de trigo*. Kohli MM, Martino D (Eds.) La Estanzuela.

- la, Colonia-Uruguay, octubre 20-23, 1997. pp 207-246.
- García Lamothe A. 2004. Manejo de la fertilización con nitrógeno en trigo y su interacción con otras prácticas agronómicas. Unidad de Difusión INIA-Uruguay. Serie Técnica N°144. 39 p.
- García Lamothe A. 2006. El efecto de la nutrición mineral sobre el rendimiento y la calidad del grano de trigo. En: Jornada de Cultivos de Invierno: «Trigo: Calidad vs. Rendimiento». Unidad de Difusión INIA-Uruguay. Serie Actividades de Difusión N°444. pp 8-21.
- García Lamothe A, Díaz de Ackermann M. 2007. Interacción de la respuesta a N con el ataque de roya de hoja en trigo. En: Jornada de Cultivos de Invierno. Unidad de Difusión, INIA-Uruguay Serie Actividades de Difusión N°484. pp 25-38.
- García Lamothe A, Díaz de Ackermann M. 2007b. Tecnología para Altos Rendimientos de Trigo. En: Jornada de Cultivos de Invierno. Unidad de Difusión INIA-Uruguay. Serie Actividades de Difusión N°484. pp 45-50.
- García Lamothe A, Díaz R, Morón A, Sawchik J, Quincke A. 2009. El balance de N y la sostenibilidad de los agro ecosistemas. En: Simposio «Efectos de la Agricultura, la Lechería y la Ganadería en el Recurso Natural Suelo: Impactos y Propuestas». Unidad de Difusión INIA-Uruguay Serie Actividades de Difusión N°587. pp 7-16.
- García Lamothe A. 2010. Más de 25 años de Investigación en Manejo de la Fertilización en Trigo. En: Jornada Técnica: «El efecto de la Agricultura en la Calidad de los Suelos y Fertilización de Cultivos». Mercedes-Uruguay, mayo 2010. Serie Actividades de Difusión N°605. Pp. 19-24.
- Gregory P. 2006. Plant roots, growth, activity and interaction with soils. Blackwell Publishing, Oxford. 318 p.
- Gupta RK, Vijayand D, Prasad TS. 2001. Characterisation of red-near infrared transition for wheat and chickpea using 3 nm bandwidth data. Adv.Space Res.(28)89-194.
- Habash DZ, Bernard S, Shondelmaier J, Weyen Y, Quarrie SA. 2006. The genetics of nitrogen use on hexaploid wheat: N utilization, development and yield. Theoretical and Applied Genetics (114) 403-419.
- Hinsinger P. 2001. Bioavailability of soil inorganic P in the rhizosphere as affected by root-induced chemical changes: a review. Plant Soil (237) 173-195.
- Hodge A, Berta G, Doussan C, Merchan F, Crespi A. 2009. Plant root growth, architecture and function. Plant & Soil (321) 153-187.
- Huggins, DR, Pan W. 1993. Nitrogen efficiency component analysis: an evaluation of cropping system differences in productivity. Agron. J. (85) 898-905.
- Kanampiu FK, Raun W, Johnson GV. 1997. Effect of nitrogen rate on plant nitrogen loss in winter wheat varieties. J. Plant Nutr. (20) 389-40.
- Lynch JP. 2007. Roots of the second green revolution. Austr. J. Bot. (55) 493-512.
- Malamy JE. 2005. Intrinsic and environmental response pathways that regulate root system architecture. Plant Cell Environ. (28) 67-77.
- Miklas PN, Kelly JD, Beebe SE, Blair MW. 2006. Common bean breeding for resistance against biotic and abiotic stresses, from classical to MAS breeding. Euphytica (147) 105-131.
- Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA. 1982. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency to nitrogen utilization. Agron. J. (74) 562-564.
- Quincke M. 2012. Una opción para cada situación productiva: nuevas variedades GENESIS – «Lo mejor del Trigo». En: Jornada Cultivos de Invierno 2012. INIA-Uruguay. Serie Actividades de Difusión N°677.
- Rengel Z, Marschner P. 2005. Nutrient availability and management in the rhizosphere: exploiting genotypic differences. New Phytol (168) 305-12.
- Riley WJ, Ortiz-Monasterio I, Matson PA. 2001. Nitrogen leaching and soil nitrate, nitrite, and ammonium levels under irrigated wheat in Northern Mexico. Nutrient Cycling in Agroecosystems (61) 223-236.

- Richardson AE, Hocking PJ, Simpson RJ, George TS. 2009. Plant mechanisms to optimize access to soil phosphorus. *Crop Past. Sci.* (60) 124-143.
- Singh U, Buresh R. 1994. Fertilizer technology for increased fertilizer efficiency in paddy rice fields. En: 15th World Congress of Soil Science, Acapulco, Mx. (5) 643-653.
- Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL. 2003. Phosphorus acquisition and use, critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phyt.* (57) 423-447.