

“Propuesta del Proyecto aprobada por el PROCISUR”

PROYECTO:

“BASES FISIOLÓGICAS Y GENÉTICAS DE LAS RESPUESTAS DE TRIGO Y SOJA A LIMITANTES BIÓTICAS Y ABIÓTICAS: ESTUDIOS ORIENTADOS AL MEJORAMIENTO GENÉTICO Y AL MANEJO DE LOS CULTIVOS EN EL CONO SUR”

Resumen de la propuesta

Asociado el incremento poblacional y al mejoramiento en la calidad de las dietas se prevé un incremento en la demanda mundial de trigo y soja. Ello abre una gran oportunidad para la región Cono Sur, puesto que gran parte de la economía regional depende de la producción y exportación de dichos cultivos y sus derivados.

La superficie bajo trigo en la región se ha mantenido en las $8,45 \pm 1,16$ mill ha (1970-2014, FAO 2016), con tendencia a la baja en los últimos años (-18 mil ha año⁻¹, debido a las caídas en superficie de Argentina y Brasil), estabilizándose la producción a partir del 2002 en $21,3 \pm 3,3$ mill t.

El rendimiento en grano (RG) promedio de trigo es inferior a la media mundial (salvo en Chile) y dado que no se espera un incremento sensible de la superficie bajo trigo, los futuros incrementos en producción deben lograrse a expensas de mayores RG.

A diferencia de lo observado en trigo, la soja es un cultivo cuya superficie y producción se encuentran en crecimiento casi exponencial en la región, con RG promedio similar al mundial (2,6 t ha⁻¹). Esta expansión de la soja puso en cultivo áreas de baja capacidad productiva e incrementó la deforestación en los bosques nativos. Aumentar el RG de soja (y su estabilidad interanual), a través del manejo y del mejoramiento genético, constituye una forma ambientalmente sustentable de incrementar su producción.

El desafío continuo que representa la variabilidad climática para la producción y el mejoramiento genético se magnifica frente al cambio climático.

El quinto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC 2014) detalla los cambios ambientales que sucederán en el futuro inmediato: i) un consistente e inevitable calentamiento global con incrementos de la temperatura nocturna y una mayor frecuencia de eventos de golpes de calor, ii) una mayor concentración atmosférica de dióxido de carbono, y iii) cambios en las precipitaciones, aumentando en algunas regiones (mayor probabilidad de anegamiento) y disminuyendo en otras (mayor probabilidad de déficit hídrico, DH).

Estos cambios impactarán en mayor o menor medida sobre el RG y la calidad de los cultivos generando, sin lugar a duda, mayor variación interanual. El impacto sobre los cultivos puede ser indirecto, a través de cambios en la presión de las enfermedades, o directo, a través de la generación de estreses abióticos tales como déficit hídrico, anegamiento y estrés térmico, durante el ciclo de los mismos. Los efectos negativos de las tendencias climáticas serán más críticos para la sustentabilidad en los sistemas marginales que en los más aptos para la agricultura, por ello la recomendación es mejorar la producción y el RG en estos últimos ambientes. Una alternativa para lograrlo es desarrollar cultivares que presenten buen potencial de RG con alta estabilidad a través de mejorar su comportamiento frente a estreses bióticos y abióticos.

La caracterización de germoplasma utilizado en la región frente a dichos estreses, la búsqueda de bases fisiológicas y genéticas asociadas a una mayor tolerancia a estreses simples y combinados, y el desarrollo de una plataforma regional de fenotipado ayudarán a los programas de mejoramiento en la selección de progenitores y facilitarán la selección indirecta y/o asistida por marcadores moleculares.

Por otro lado, en el mediano-corto plazo será importante diseñar estrategias de manejo para mitigar los efectos del cambio climático. Caracterizar la respuesta de germoplasma a cambios en la fecha de siembra y modelar dicha respuesta permitirá ajustar, por ejemplo, la fecha siembra de acuerdo a las alteraciones futuras en las fechas de primer y última helada, y a los cambios en frecuencia y ocurrencia de golpes de calor y precipitaciones.

Descripción del Proyecto:

Antecedentes y justificación de la propuesta

Producción, superficie, ganancia de rendimiento y demandas a nivel mundial

Hace poco más de medio siglo (1961), el área mundial ocupada con trigo ya superaba las 200 mill ha (FAO 2016), mientras que la soja era incipiente y prácticamente desconocida, fuera de China (Hartman et al. 2011).

Desde entonces, la superficie destinada a trigo se mantuvo sin mayores variaciones (221 +- 8,18 mill ha), mientras que la de soja tuvo un crecimiento sostenido, totalizando en la actualidad 117 mill ha (FAO 2016). Esta tendencia fue acompañada por un aumento del rendimiento en grano (RG) de la oleaginosa (25,7 kg ha⁻¹ año⁻¹ para el período 1961-2014, FAO 2016), dando lugar así a un incremento sostenido de su producción, alcanzando en la actualidad las 308 mill t (2014, FAO 2016).

En trigo, en cambio, la producción aumentó a una tasa elevada (11,6 mill t año⁻¹) para declinar a casi la mitad (6,26 mill t año⁻¹) a partir de 1991, totalizando en la actualidad 729 mill t (2014, FAO 2016). Esta tendencia es consecuencia de las variaciones en la ganancia de RG, que cayó de 49 kg ha⁻¹ año⁻¹ a 33 kg ha⁻¹ año⁻¹ comparando los períodos 1970-1990 vs 1991-2014 (FAO 2016).

La producción de trigo es clave para la seguridad alimentaria a nivel mundial puesto que provee, junto con el arroz, el 50% de las calorías de la dieta humana (Tweeten y Thompson 2008), previéndose que para 2020 el 68% de la producción se utilizará como alimento directo por el hombre (Moreno Manzur y Valencia Escobar 2011).

En los próximos 35 años su producción mundial deberá incrementarse un 50% respecto a los actuales volúmenes para cubrir la demanda de alimentos asociada al incremento poblacional y a la mejora en la calidad de las dietas (Hall y Richards 2013). Considerando que la superficie en producción se encuentra estabilizada hace años (y no se prevé su incremento futuro), estos aumentos en producción deberán lograrse a expensas de incrementos en el RG. Ante un escenario de desaceleración de la ganancia genética de RG (caída de 34% de la ganancia de RG entre períodos pre y post 1990/91, ver párrafo anterior) las expectativas de alcanzar dichas metas son escasas.

Por su parte, el complejo sojero es uno de los sectores más dinámicos de la economía de los países involucrados (Hillbert et al. 2012). La soja es una importante materia prima para la obtención de harinas para alimentación animal y aceites de uso industrial, principalmente, y en alimentación humana, en menor medida. Dentro de la región, Brasil exporta en general la soja como grano mientras que Argentina lo hace como pellet luego de la extracción de aceite. El mejoramiento de la dieta en los países en desarrollo a base de alimentación animal y una población creciente provocaría un incremento del 19% de la demanda de harina de soja para el 2024 y el uso creciente del aceite en alimentación humana e industrial incrementaría un 21% la demanda mundial de aceite de soja en igual período (USDA 2014). El aumento de su producción a través de futuros incrementos de la superficie bajo cultivo puede generar grandes impactos en la sustentabilidad ambiental si se expande hacia áreas de baja aptitud agrícola y boscosas (Tilman 1999, Foley et al. 2005, Galford et al. 2010, West et al. 2010, Pincén et al. 2010, Volante et al. 2012, Garnett et al. 2013).

Producción, superficie y ganancia de rendimiento a nivel regional

La producción mundial de trigo se encuentra muy atomizada: 16 países suman casi el 80% de la producción, y 20 países producen al menos un 1% del total. Por el contrario, la producción de soja se encuentra muy concentrada ya que sólo 4 países acumulan el 80% de la producción. Los países que conforman el consorcio del presente proyecto producen en su totalidad 23 mill t de trigo, representando el 3,22% de la producción mundial (Argentina 1,91%, Brasil 0,89%, Chile 0,19%, Paraguay 0,12% y Uruguay 0,15%, año 2014, FAO 2016) y 153 mill t de soja, representado el 49,7% de la producción mundial, liderando Brasil y Argentina el ranking después de los EEUU, el principal productor (Argentina 17,31%, Brasil 28,13%, Chile no produce, Paraguay 3,23% y Uruguay 1,02%, año 2014, FAO 2016).

En Argentina el incremento del área destinada a trigo creció desde las 3.7 mill ha en 1970 hasta las 7 mill ha en 1996 (aunque con grandes variaciones interanuales), copiando la producción dicho incremento (creció de 4,9 a 16 mill t).

A partir de allí, la superficie de trigo cayó en forma sostenida hasta promediar las 3,9 mill ha (2010-2014, FAO 2016), una tendencia atribuible a las regulaciones del mercado de exportación en dicho período. La ganancia en RG (34,7 kg ha⁻¹ año⁻¹, 1970-2014, FAO 2016) permitió sostener en parte la producción, la cual promedió las 12 mill t los últimos años, con RG promedio de 2,9 t ha⁻¹ (2010-2014, FAO 2016). En Brasil, la superficie de trigo creció desde 1,9 mill ha en 1970 hasta 3,9 mill ha en 1986, para caer luego en forma sostenida hasta alcanzar sólo 1,0 mill ha en el año 2000. A partir de entonces, se recuperó estabilizándose en los últimos 10 años en 2,2 mill ha. La producción copió estos vaivenes, estabilizándose a partir del 2003 en 5,6 mill t (2010-2014, FAO 2016). La ganancia de RG promedio fue de 41,3 kg ha⁻¹ año⁻¹ (1970-2014), con un RG promedio de 2,5 ton ha⁻¹ en los últimos años (2010-2014, FAO 2016). Los otros tres países del consorcio presentan superficies inferiores al millón de ha. En Chile la superficie cayó en forma sostenida, pero la producción se ha mantenido en 1,3 mill t debido a las grandes tasas de ganancia de RG (105 kg ha⁻¹ año⁻¹) promediando este último las 5,5 t ha⁻¹ (2010-2014, FAO 2016). Paraguay y Uruguay producen actualmente ca. 1,4 mill t cada uno, con aumentos de la superficie bajo cultivo a partir del 2006 y de 1980, respectivamente. La ganancia de RG en Paraguay fue menor que en Uruguay (32,3 kg ha⁻¹ año⁻¹ vs 53,0 kg ha⁻¹ año⁻¹) promediando en los últimos años RG de 2,3 y 2,9 t ha⁻¹ (2010-2014, FAO 2016).

Más allá de las variaciones particulares de cada país, la superficie bajo cultivo de trigo en la región se ha mantenido en las 8,45 ± 1,16 mill ha en el período analizado (1970-2014, FAO 2016), con tendencia a la baja en los últimos años (-18 mil ha año⁻¹, debido a las caídas en superficie de Argentina y Brasil). El RG promedio de trigo en la región es inferior a la media mundial, salvo en Chile, donde hay zonas de excepcional potencial en el sur del país (> 15 t ha⁻¹). Si bien no se ha observado una estabilización en la ganancia de RG a diferencia de lo reportado por otros países (India-Joshi et al. 2007, Finlandia-Peltonen-Saino et al. 2009, Dinamarca-Francia-Holanda-Suiza-Reino Unido-Brisson et al. 2010), éstas no contrabalancearon la tendencia a la disminución de la superficie bajo cultivo, estabilizándose la producción a partir del 2002 en 21,3 ± 3,3 mill t.

Dado que no se espera un aumento significativo en la superficie cultivada con esta especie en la región, el incremento de la producción para cubrir la demanda futura mundial depende enteramente de las ganancias de RG, las cuales dependerán de ajustes en técnicas de manejo y de mejoras en la ganancia genética del RG.

En forma contraria, en soja, el patrón común ha sido el crecimiento sostenido del área a partir de la segunda mitad de los 70' en Brasil, Argentina y Paraguay, para alcanzar en la actualidad unas 20, 30 y 3 mill ha en cada país, respectivamente. En Uruguay, el crecimiento del cultivo se inicia hacia 2003, cubriendo en la actualidad ca. 1,2 mill ha.

El RG también mostró una clara tendencia creciente en casi todos los países, con excepción de Paraguay en que el patrón fue algo más errático. En Argentina el aumento del RG fue mucho más elevado al inicio del período evaluado (89 kg ha⁻¹ año⁻¹ hasta 1991) que con posterioridad (20,6 kg ha⁻¹ año⁻¹).

Esto podría evidenciar (i) una predominancia del cultivo en la región Pampeana central al principio y la expansión a zonas extra Pampeanas de menor potencial en la segunda fase, y (ii) una estabilización en la ganancia de RG a partir de 1998. Actualmente el RG medio de Argentina se ubica en ca. 2,6 t ha⁻¹ (2010-2014, FAO 2016).

En Brasil la tendencia fue inversa, pero con menos diferencia entre las etapas pre (27,5 kg ha⁻¹ año⁻¹) y post (46,4 kg ha⁻¹ año⁻¹) año 2001, llevando el RG medio actual a 2,9 t ha⁻¹(2010-2014, FAO 2016). En Paraguay sólo existió un período de claro y excepcional aumento del RG (143,7 kg ha⁻¹ año⁻¹) entre 1987 y 1995, estabilizándose en 2,5 t ha⁻¹, mientras que en Uruguay existió un aumento sostenido del RG para todo el período desde 1974 (28,5 kg ha⁻¹ año⁻¹), con un promedio actual de 2,5 t ha⁻¹.

Las tendencias descritas para el área y el RG definieron un patrón común para la producción en los cuatro países, con una etapa inicial de menor crecimiento anual, que a partir del inicio de 1980s (Argentina y Brasil) o del inicio de 1990s (Paraguay y Uruguay), aumentó de manera contundente alcanzado en la actualidad una producción de 153 mill t. A partir de 1996, se adoptaron las variedades transgénicas resistentes a glifosato, ocupando en la actualidad el 100% del área en Argentina, el 95% en Paraguay y el 88% en Brasil (James 2012). El doble cultivo trigo-soja y la siembra directa se utiliza en las regiones donde los inviernos son fríos (Argentina, Uruguay y Sur de Brasil), mientras que la rotación soja- maíz se utiliza en la zona del Cerrado Brasileiro.

A diferencia de lo observado en trigo, la soja es un cultivo cuya superficie y producción se encuentran en crecimiento casi exponencial en la región, con RG promedio similar al mundial (2,6 t ha⁻¹). Esta expansión de la soja puso en cultivo áreas de baja capacidad productiva (que se utilizaban para pasturas) e incrementó además la deforestación en los bosques nativos en el NO Argentino (bosque chaqueño) (Pincén et al. 2010, Volante et al. 2012), este de Paraguay y en la selva tropical de la región del Cerrado de Brasil (Fischer et al. 2014), con la consecuente pérdida de carbono orgánico en biomasa y en suelo que incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero (Taboada 2004, Gasparri et al. 2008). Aumentar el RG de soja (y su estabilidad interanual) a través del mejoramiento genético y de ajustes en el manejo constituye una forma ambientalmente sustentable de incrementar su producción para enfrentar las demandas futuras.

¿Cómo sostener las ganancias genéticas de rendimiento? Principales limitantes actuales y futuras a nivel regional

Uno de los elementos más importantes para lograr aumentos en el RG es el progreso genético asociado a la incorporación en los planteos productivos de nuevos materiales genéticos con mayor RG potencial (Reynolds 1996, Sinclair et al. 2004, Reynolds et al. 2009), y/o mayor tolerancia a las enfermedades (Slafer y Andrade 1991, Wu et al. 2014) y/o mayor tolerancia y/o escape a estreses abióticos (Rharrabti et al. 2010, Sadras y Lawson 2011).

La ganancia en RG depende fuertemente del ambiente (Sanchez-Garcia et al. 2013) y del rango de años bajo estudio, por lo que es imposible hablar de un único valor. En Argentina, el RG potencial de trigo (i.e. sin limitantes hídricas ni nutricionales y con control de enfermedades y plagas) entre 1920 y 1980 mostró una tasa de progreso genético de 50 kg ha⁻¹ año⁻¹, asociado principalmente a aumentos en el número de granos por unidad de superficie (Calderini et al. 1995).

Sin embargo, evidencia reciente en Argentina muestra que desde el año 2010 la tasa de progreso genético disminuyó a ca. 15 kg ha⁻¹ año⁻¹ (Lo Valvo com pers). El aumento de rendimiento de granos de trigo en Brasil fue de 29 kg ha⁻¹ año⁻¹, con una ganancia genética de 0,93% año⁻¹, entre 1940 y 2011 (Beche 2013). En Uruguay a fines de los años 90 la tasa de progreso genético estimada para trigos primaverales en condiciones óptimas fue de 59 kg ha⁻¹ año⁻¹, lo que representa en términos relativos una ganancia de 1,63% año⁻¹ (Bernheim et al. 1998). En Chile durante el período 1920-2008 la tasa de ganancia genética se estimó en 33 kg ha⁻¹ año⁻¹ (del Pozo et al. 2014). En todos los casos, salvo en Uruguay, las ganancias genéticas se encuentran por debajo de las requeridas para dar respuesta al incremento poblacional mundial previsto en los próximos 35 años (Hall y Richards 2013, Fischer et al. 2014).

En relación al cultivo de soja, si bien los estudios de ganancia genética del RG no son abundantes, existen estimaciones documentadas tanto para Brasil como para Argentina. En el primer caso, de Toledo (1990) menciona una ganancia genética de 1,1% año⁻¹ para el estado de Paraná, mientras Lange y Federizzi (2009) estimaron una ganancia genética de 0.92 % año⁻¹ para la zona sur de Brasil. Estas cifras representarían entre 50 y 60% de la ganancia de RG de ese país. Una ganancia genética similar (1,1% anual) fue estimada por de Felipe et al. (2016) para Argentina utilizando grupos de madurez III-V en la región central (Pampa Ondulada), indicando que representaría un 50% de la ganancia global de RG.

Estas ganancias coinciden con las estimaciones efectuadas (1,1% anual) para el principal productor mundial, los EEUU (Rincker et al. 2014). Esta similitud sería atribuible al origen norteamericano de las variedades utilizadas para iniciar los programas de mejoramiento en los centros de Argentina y Brasil, como también al persistente intercambio de material genético con los centros de EEUU (de Felipe et al. 2016). Sin embargo, recientemente Lange y Federizzi (2014), analizando un set de 20 años de ensayos multi-ambientales en el sur de Brasil, estimaron ganancias genéticas máximas cercanas a 3.5% año⁻¹, aunque dependiendo del grupo de madurez y la región considerada la ganancia varió entre 0.0 y 71.5 kg ha⁻¹ año⁻¹.

La ganancia genética en RG dependerá fuertemente del ambiente (Sanchez-Garcia et al. 2013) siendo difícil sostener valores aceptables cuando la variabilidad ambiental aumenta (Hall y Richards 2013). El desafío continuo que representa la variabilidad climática para el mejoramiento se magnifica frente al cambio climático (Meinke et al. 2006, Aggarwal et al. 2010). El quinto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC 2014) muestra un consistente e inevitable calentamiento global, debido fundamentalmente a la actividad antrópica.

La temperatura media global se ha incrementado ca. 0,85 °C durante el período 1880-2012, con una importante variabilidad inter-decádica e inter-anual. Además, se destaca una mayor concentración atmosférica de dióxido de carbono y cambios en las precipitaciones, aumentando en algunas regiones y disminuyendo en otras, indicando que el clima futuro presentará una mayor frecuencia de fenómenos climáticos extremos (IPCC 2014).

Los efectos negativos de las tendencias climáticas serán más críticos para la sustentabilidad en los sistemas marginales que en los más aptos para la agricultura, por ello la recomendación es mejorar la producción en estos últimos ambientes (Andrade 2011). Una alternativa para lograrlo es desarrollar cultivares que presenten buen potencial de RG con alta estabilidad a través de mejorar su comportamiento frente a estreses bióticos y abióticos.

La caracterización de germoplasma utilizado en la región frente a dichos estreses, la búsqueda de bases fisiológicas y genéticas asociadas a una mayor tolerancia a estreses simples y combinados, y el desarrollo de una plataforma regional de fenotipado ayudarán a los programas de mejoramiento en la selección de progenitores y facilitarán la selección indirecta y/o asistida por marcadores moleculares. Por otro lado, en el mediano-corto plazo será importante diseñar estrategias de manejo para mitigar los efectos del cambio climático. Caracterizar la respuesta de germoplasma actual a cambios en la fecha de siembra y modelar dicha respuesta permitirá ajustar, por ejemplo, la fecha siembra de acuerdo a las alteraciones futuras en las fechas de primer y última helada, y a los cambios en frecuencia y ocurrencia de golpes de calor y precipitaciones.

1. Estreses

1.1 Estreses Bióticos

Los efectos del cambio climático generan nuevos escenarios para la ocurrencia de enfermedades a lo largo de la región Cono Sur. Cerca de 20 epidemias fueron registradas en los últimos 50 años del siglo XX en Argentina (Galich 1997, Moschini y Fortugno 1996), con pérdidas promedio en el RG de 20-30% y valores máximos de más de 50% en el sistema de siembra directa (Malbran et al. 2014). En Uruguay su frecuencia se ha incrementado alcanzando durante los últimos años una probabilidad de ocurrencia del 25% (Pereyra et al., 2014), registrándose pérdidas de RG de hasta 31% (Díaz y Pereyra 2011). El desarrollo de materiales genéticos con mayor tolerancia a las enfermedades permite sostener la ganancia de RG (Slafer y Andrade 1991, Wu et al. 2014) y disminuir la variación interanual. En trigo, Argentina, Brasil, Paraguay, y Uruguay forman parte de una región epifitológicamente común (Informe Final Proyecto Regional Trigo, PROCISUR, 2009). La fusariosis de la espiga (FET), causada por *Fusarium graminearum*, principalmente, y la roya de la hoja (RH), causada por *Puccinia triticina*, son dos enfermedades que impactan negativamente en el RG y la calidad (Germán et al. 2007, Carretero et al. 2010, Bainotti et al. 2013, Serrago y Miralles 2014). Los daños provocados por FET incluyen reducción en el RG, calidad del grano y contaminación por toxinas. Si bien hay modelos matemáticos que permiten establecer cuál es el pronóstico de riesgo de FET (Moschini y Fortugno 1996, Moschini 2011), estos no están vinculados a la fenología del cultivo. Por ello, es imprescindible combinar la predicción de la ocurrencia de los estados fenológicos del cultivo (en especial espigazón y floración para el caso de esta enfermedad)

y el pronóstico de riesgo climático para que la FET pueda progresar. Esta aproximación puede realizarse mediante el desarrollo de un modelo simple de predicción fenológica (eg. CRONOS, Alzueta et al. 2014) en el que se incorpore el pronóstico de riesgo de FET. La RH es una enfermedad que se observa todos los años, difiriendo sólo en la intensidad de la epifitía. Una característica particular del patógeno causal de RH es la alta especialización evidenciada por la existencia de un alto número de razas fisiológicas que interactúan específicamente con el genotipo del hospedante. Todos los años se producen cambios en la población patógena, tanto en el número de razas como la predominancia de algunas sobre las restantes (Campos 2012, 2013, 2015). Las pérdidas de RG suelen ser mayores cuando el cultivo es infectado previo a la antesis, pudiendo superar el 30% en cultivares altamente susceptibles en Argentina (Campos 2014) y hasta el 60% en Uruguay (Germán et al. 2011). La infección con RH también reduce el área foliar verde y eventualmente la eficiencia en el uso de la radiación, afectando el llenado de los granos. La compensación fotosintética de tejidos sanos y la acumulación de carbohidratos solubles en tallos como mecanismo de reserva ante infecciones de RH pueden explicar la variabilidad genotípica en la tolerancia a dicho patógeno (Carretero et al. 2010, Serrago y Miralles 2014). La Septoriosis de la hoja es una enfermedad endémica que en años con incidencia elevada puede causar pérdidas de RG que varían entre 21 y 54% (Kraan y Nisi 1993, Díaz 2011, Castillo y Cordo 2014), mientras que la roya amarilla, de aparición ocasional, puede resultar en pérdidas iguales o mayores a la RH (Campos 2014). La *Pyricularia* es una enfermedad que se considera una amenaza a nivel mundial y que progresa aceleradamente en las regiones más cálidas de Brasil y Paraguay donde las pérdidas de RG varían del 5 al 100% (Kohli et al. 2011). En Argentina, se la identificó por primera vez en ensayos de trigo de verano en 2007-2008 en la provincia del Chaco (Alberione et al. 2008), constituyendo una enfermedad potencial en Argentina y Uruguay. Por último, la roya del tallo ha emergido como problema relevante por la reducción de la diversidad de la resistencia en variedades ampliamente utilizadas. En este sentido, un conocimiento acabado sobre la identidad de genes de resistencia efectivos (o combinaciones de genes) presentes en cultivares adaptados podría incrementar enormemente la eficiencia en el mejoramiento de cultivares resistentes ya sea por la utilización de estos genes per se o mediante el apilamiento de varios genes efectivos en un fondo genético, proceso llamado piramidización (Vanzetti et al. 2011). En el presente proyecto se caracterizará fenotípica el comportamiento de materiales de trigo a gran parte de las enfermedades anteriormente descriptas (ver objetivo específico B1).

En relación a la soja, hay dos enfermedades que amenazan la sostenibilidad del cultivo en la región, la roya asiática de la soja (RAS) causada por *Phakopsora pachyrhizi*, y la podredumbre carbonosa de la raíz causada por *Macrophomina phaseolina*. La RAS fue identificada por primera vez en marzo del 2001 en el distrito de Pirapó (Paraguay), donde se observó defoliación masiva alrededor de 30 días antes de la madurez normal, causando una pérdida de 50% del RG. En mayo del mismo año fue identificada en el estado de Paraná (Brasil) y al siguiente año se identificó en Argentina, Bolivia y varios estados de Brasil, causando pérdidas de RG entre 10% y 80% (Yorinori 2002). Aparentemente, el inóculo inicial del hongo proviene de África, donde la RAS fue documentada a finales de los '90' (Schermer et al. 2009). En los EEUU, la enfermedad se identificó por primera vez en el 2004 en Lousiana, pero las caídas en RG no fueron tan altas como las reportadas previamente (Cui et al. 2010). Si bien existen cultivares con uno o dos genes de resistencia y fungicidas de última generación, el control es deficiente puesto que la presión del patógeno en los meses de verano es muy alta. Por otro lado, el uso de fungicidas encarece la producción. Por ejemplo, en Brasil, el costo del control con fungicidas fue de US\$ 2200 mill en la campaña 2013/2014, con un promedio de tres aplicaciones por ciclo de cultivo. La podredumbre carbonosa de la raíz es otra de las enfermedades que aparece todos los años en la región, en mayor o menor proporción según las condiciones climáticas, produciendo grandes pérdidas en años secos pues está asociada a la deficiencia hídrica.

En el presente proyecto se pretende generar información valiosa a nivel molecular para avanzar en el desarrollo de plantas transgénicas de soja, utilizando genes esenciales y efectores del hongo causante de RAS que permitan obtener resistencia durable (ver objetivo B2).

1.2. Estrés abióticos

Tal como fue descrito anteriormente, el quinto informe del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC 2014) detalla los cambios ambientales que sucederán en el futuro inmediato: i) un consistente e inevitable calentamiento global con incrementos de la temperatura nocturna y una mayor frecuencia de eventos de golpes de calor, ii) una mayor concentración atmosférica de dióxido de carbono, y iii) cambios en las precipitaciones, aumentando en algunas regiones (mayor probabilidad de anegamiento) y disminuyendo en otras (mayor probabilidad de déficit hídrico, DH). Estos cambios impactarán en mayor o menor medida sobre el RG y la calidad de los cultivos, y sin lugar a duda, generarán mayor variación interanual de los mismos. El estudio de las bases fisiológicas y genéticas del rendimiento bajo dichos ambientes permitirá identificar características promisorias, que sirvan para realizar selección indirecta (ya sea fisiológica o asistida por marcadores) orientada a sostener las ganancias genéticas de RG y la estabilidad del mismo bajo dichos ambientes.

La temperatura impacta en la adaptación de los cultivos y su RG al regular el desarrollo de las plantas y de esta forma la duración del ciclo y el posicionamiento bajo diferente oferta de recursos ambientales de las etapas críticas para la generación del RG. Así, por ejemplo, el incremento de temperatura media durante fin de invierno y principio de primavera (asociado al aumento de las temperaturas máximas diarias y mínimas nocturnas en ca. 2 °C) registrado en el norte de la Región Pampeana en Argentina entre 1970 y 2000, redujo el potencial ambiental para generar RG en trigo (Magrin et al. 2009). Los escenarios climáticos regionales proyectan incrementos de 2 - 3 °C para el 2080 en dicha región (Nuñez et al. 2009), los cuales reducirían entre 12 y 20% más el potencial ambiental. Una parte importante de las reducciones en el RG, asociadas al incremento de la temperatura, está determinada por reducciones en la duración del ciclo del cultivo, que disminuyen su capacidad de capturar radiación (García et al. 2015, 2016). Conocer la respuesta de diferentes cultivares de trigo y soja a cambios en la fecha de siembra en diferentes localidades de la región, así como la variabilidad de variantes alélicas para otros factores ambientales que regulan la duración del ciclo (eg., genes de vernalización *Vrn-1* y fotoperiodo *Ppd-1* en trigo) ayudará a generar cultivares y prácticas de manejo que (i) contrabalanceen este efecto de acortamiento de los ciclos con el incremento térmico y (ii) eviten la coincidencia de los períodos más vulnerables del ciclo con estreses bióticos y abióticos predecibles (ver objetivos específicos AB1 y AB2).

El cultivo de trigo en todas las regiones trigueras del Cono Sur explora temperaturas cada vez más elevadas a medida que el ciclo progresa, siendo mayor la probabilidad de experimentar golpes de calor a partir de floración y durante llenado de grano (temperatura >27 °C en antesis Semenov 2009, y >30 °C llenado de grano Wardlaw et al. 2002).

El incremento de la temperatura diaria máxima durante cortos períodos del día por encima de 30-33 °C durante el llenado de grano puede reducir hasta un 20% el peso de granos (Hawker y Jenner 1993, Stone y Nicolas 1995, García et al. 2016) y afectar la calidad industrial, al obtener masas más débiles que las esperadas por cambios en la relación gluteninas/gliadinas (Stone y Nicolas 1995, Castro et al. 2007, Alzueta et al. 2016).

En soja, la probabilidad de estrés térmico durante las etapas reproductivas en la región está asociada con ciertas combinaciones de fecha de siembra y grupo de madurez que ubican el período crítico de fijación de vainas en ambientes con buena radiación solar pero alta demanda hídrica y temperatura (Sinclair et al. 1992, Vega y Salas 2012). Temperaturas mayores de los 26 °C resultaron nocivas para el crecimiento reproductivo (Baker et al. 1989, Boote et al. 1997, Molino 2011), disminuyendo la duración del llenado y el peso de granos (Ergo et al. 2014) y provocando alteraciones fisiológicas como grano verde (Cencig 2013). Gibson y Mullen (1996a, b) encontraron que un régimen térmico de 35 °C durante el día y entre 20 °C y 30 °C durante la noche aplicado desde comienzo de floración a comienzo de llenado de granos provocó disminuciones del RG cercanas al 16%. Asimismo, en ambientes controlados, mostraron reducciones en el RG (por afectar el número de granos) del orden del 35% con temperaturas medias diarias de 27,5 °C con respecto al control de 17,5 °C (Heinemann et al. 2006). Martineau et al. (1979) indicaron que la medición de la pérdida de electrolitos en hojas, como un potencial indicador de termo-tolerancia, podría ser una metodología utilizada para seleccionar genotipos por tolerancia a calor. Por otro lado, la temperatura es el principal factor ambiental que afecta la composición de ácidos grasos del aceite, pudiendo utilizarse como predictor del porcentaje de ácido oleico (Izquierdo et al. 2009, Zuil et al. 2012).

Incrementos en la temperatura generan aumentos en la relación oleico/linoleico en soja (Izquierdo et al. 2009, Zuil et al. 2012), desconociéndose el efecto de temperaturas estresantes durante el llenado de granos sobre dicha relación. El incremento proyectado de la temperatura media asociado a una mayor frecuencia de días con temperaturas supra-óptimas (Rusticucci y Barrucand 2004, Magrin et al. 2005, Pellegrino et al. 2008, Travasso et al. 2009) incrementará la probabilidad de estrés térmico en ambos cultivos. Por ello es importante obtener no sólo cultivares de mayor potencial de RG sino también de mayor tolerancia a estrés térmico, que permitan mejorar la estabilidad del RG y su calidad (Fischer 2011, Asseng et al. 2011, Powell et al. 2012).

El presente proyecto pretende cuantificar el riesgo de golpe de calor en la región (objetivo específico AB1) y estudiar las características fisiológicas que puedan explicar un mejor comportamiento de los cultivares frente a dicho estrés (objetivo específico AB3).

Un aspecto generalmente asociado al aumento de la temperatura es la ocurrencia de déficits hídricos (DH) de diferente intensidad y duración a lo largo del ciclo de los cultivos. El DH durante el período reproductivo de los cultivos es una de las principales causas de caída en productividad y variabilidad interanual en el Cono Sur.

En la región pampeana de Argentina la probabilidad de DH alrededor de floración en trigo oscila entre 20 y 30% en el norte, entre 40 y 60% en el sur, suroeste y oeste, y es mayor a 60% en el noroeste de la región (www.ora.gob.ar). En Chile, por ejemplo, el 40% del área triguera es clasificada como mediterránea, i.e. 80% de las precipitaciones se concentra entre marzo y agosto, y los cultivos no alcanzan su máximo potencial productivo ya que en el período post antesis se establece un DH severo. El impacto de un DH sobre el RG dependerá del momento exacto del ciclo en el cual ocurre y de la magnitud del estrés establecido. Así, por ejemplo, se han reportado caídas de 13 a 45% en el RG de trigo con estreses en pre-antesis (Hoffman et al. 2011), y entre 13% y 35-58% con estrés hídrico moderado y severo, respectivamente, durante antesis y llenado de grano (Perez et al. 2009, Castro y Vazquez 2010).

En germoplasma de trigo adaptado a la región Cono Sur se ha identificado variabilidad genética en la respuesta a estrés hídrico a partir de antesis (Castro et al. en prensa), el cual será utilizado en los experimentos del presente proyecto. El cultivo de soja no escapa al efecto del DH. En el sur de Brasil se estima que ocurren eventos de DH durante el primavera- verano en el 70% de los años (Pellegrino et al. 2008).

En Argentina, limitantes hídricas durante febrero y marzo disminuyen el rendimiento (Calviño y Sadras 1999) y la estrategia de manejo basada en el atraso de la fecha de siembra es limitada por la caída del valor de fotoperíodo y la radiación solar que impactan negativamente en el rendimiento (Sinclair et al. 1992, Calviño et al. 2003a, b). Los cultivos de soja de 1era en la región pampeana presentan probabilidad de DH durante la etapa reproductiva entre 20-30% en la zona norte incrementándose a 40-60% en el sur y suroeste de la región; mientras que en soja de segunda (siembra luego del trigo), la probabilidad es cercana a 20% en toda la región. En el Noroeste de Argentina el DH se incrementa notablemente a 40-60% (www.ora.gob.ar).

En Uruguay, el DH durante las etapas reproductivas de soja es el principal factor limitante del RG y causante de la gran variabilidad interanual de los mismos, la cual es sensiblemente mayor a la del resto de los países de la región (Giménez y García Petillo 2011). En aquellas regiones donde los escenarios futuros proyectan incremento de temperatura media, y por ende de la evapotranspiración, con escaso incremento en la precipitación, la probabilidad de DH para los cultivos se incrementará principalmente durante primavera y verano, momento de ocurrencia de los períodos críticos de generación de RG (Pellegrino et al. 2008, Magrin et al. 2009, Costa et al. 2013). La utilización de cultivares con mayor tolerancia al DH permitirá mejorar y estabilizar los RG futuros en la región. La tolerancia al DH desde el punto de vista agronómico se define como la habilidad de un genotipo para producir RG aceptable bajo condiciones hídricas limitantes (Tardieu 2005), tolerancia que será mayor cuanto menor sea la reducción en el RG (Hall 1984). Numerosas características fisiológicas han sido propuestas como subyacentes a mecanismos que aumentan la productividad en ambientes con alta frecuencia de déficits hídricos. A nivel de cultivo, Passioura (1996) propuso interpretar el RG como el producto del agua transpirada durante el ciclo del cultivo (T), la eficiencia en el uso del agua para producir biomasa (EUA) y la proporción de la biomasa que se particiona a granos (índice de cosecha, IC). En situaciones de campo no es simple diferenciar el agua transpirada por el cultivo de aquella evapotranspirada (evaporación directa del suelo

sumada a la transpirada por el cultivo), por ello a veces la T es reemplazada por el consumo de agua o evapotranspiración del cultivo (ETC) y se determina la eficiencia con la cual ETC se convierte en biomasa (EUAB,ETC). Respecto al consumo de agua por los cultivos, se conocen algunas diferencias entre especies (e incluso entre algunos genotipos de la misma especie) en lo que hace a la capacidad de extraer agua en profundidad. Así, por ejemplo, trabajando sobre Haplustoles énticos sin discontinuidades texturales importantes en profundidad, Dardanelli et al. (1997) describieron el consumo hídrico hasta más de 2 m en trigo y soja, destacando el mayor consumo registrado entre 1 y 2 m de profundidad por cultivos de soja de grupo de madurez elevado (GM VII) respecto al trigo o soja de grupo de madurez menor (GM V).

Una parte importante de las diferencias era atribuible al ciclo de los cultivos (más extracción en profundidad a mayor ciclo), y otras podrían deberse a diferente capacidad de profundización de las raíces entre especies y dentro de cada especie.

En trigo, por ejemplo, se ha encontrado variabilidad entre cultivares en profundidad de raíces (Siddique et al. 1990, Mian et al. 1994, Miralles et al. 1997, Lopes y Reynolds 2010) la cual estuvo asociada a diferencias en temperatura de canopeo durante el llenado de grano (Lopes y Reynolds 2010). Parte de esta diferencia en profundidad de raíces puede deberse al ángulo vertical de las mismas. Existe una relación entre el ángulo vertical y el número de las raíces seminales en trigo con un sistema más compacto y mayor número de raíces en profundidad en la planta adulta (Nakamoto y Oyanagi 1994, Manschadi et al. 2008). Para obtener genotipos con mayor posibilidad de extraer agua en el suelo en profundidad, se pueden usar estas características de raíces seminales como método rápido de selección (Richard et al. 2015). En soja, la eficiencia transpiratoria (inversa de la EUA) pareciera ser un carácter promisorio, puesto que se logró recientemente generar genotipos con mayor estabilidad de RG ante deficiencias hídricas durante el período reproductivo utilizando este rasgo secundario¹ como carácter de selección (Prieto Angueira 2013). La discriminación de isótopos del carbono ($\Delta^{13}C$) se puede utilizar como una herramienta para la detección de genotipos con mayor eficiencia transpiratoria (Rebetzke et al. 2002) y como criterio de selección de RG bajo DH (Araus et al. 2003). El enriquecimiento de isótopos de oxígeno medido en materia vegetal ($\Delta^{18}O$) combinado con la discriminación isotópica permitiría la caracterización de genotipos con respuesta contrastante a DH (Munjonji et al. 2016). Por otro lado, la tolerancia de la fijación biológica de nitrógeno al déficit hídrico ha sido identificada mediante simulaciones como un rasgo prometedor para ser incluido en cultivares tolerantes a DH tanto en Estados Unidos como en Argentina (Salado Navarro y Rodríguez 2009, Sinclair et al. 2010, Battisti et al. 2015). El presente proyecto pretende identificar las características fisiológicas que mejor expliquen la tolerancia al déficit hídrico en condiciones de campo y controladas (objetivo específico AB3), y (i) evaluar probabilísticamente los beneficios de cada atributo en las condiciones ambientales de la región, tanto actuales como proyectadas al mediano plazo, mediante el uso de modelos de simulación de cultivos combinados con series de datos climáticos (objetivo específico AB3), y (ii) determinar las posibles bases genéticas de las mismas (objetivos específicos AB5).

Aunque menos atendidas que las pérdidas por DH, las pérdidas por excesos hídricos son importantes en la región bajo estudio, y se espera que la frecuencia de anegamientos también aumente como consecuencia del cambio climático (IPCC 2014), particularmente en algunas zonas y años (eg. fase El Niño en el Cono Sur). La magnitud del daño producido por un evento de anegamiento (al igual que el de otros tipos de estrés) depende del estado de desarrollo del cultivo. En trigo, el período de pre floración fue identificado como el más sensible a condiciones de anegamiento en términos de pérdida de RG, determinándose para la región pampeana Argentina una probabilidad de 25% de ocurrencia de anegamiento durante dicho período (de San Celedonio et al. 2014). Extender dichas estimaciones al resto región, a través del uso de modelos de simulación, sería de gran utilidad para la evaluación del riesgo y proveería una herramienta útil para la toma de decisiones de manejo (ver objetivo específico AB1). En soja, la probabilidad de anegamiento durante la etapa reproductiva es cercana al 10% en la Región Pampeana de Argentina (www.ora.gob.ar), siendo más elevada en el sudeste de Brasil donde se cultiva en áreas bajas en rotación con arroz producido bajo inundación. Dado que el aumento de las precipitaciones asociado al cambio climático incrementará la frecuencia de eventos de anegamiento, el presente proyecto cuantificará la probabilidad de anegamiento durante el período de mayor sensibilidad del

cultivo de trigo en distintas áreas de la región a través del uso de modelos de simulación (objetivo específico AB1).

Finalmente, corresponde destacar que rara vez los estreses abióticos ocurren en forma individual en las condiciones de campo, siendo más frecuente que actúen en forma simultánea o secuencial, provocando una mayor penalización del RG (Sadras 2005).

La incidencia de estreses abióticos (e.g. hídrico y térmico) regulan la productividad en términos de biomasa producida (Molino 2011), rendimiento y la calidad de grano (Wilson 2004, Carrera et al. 2009, 2011a, b, 2015). Por ejemplo, en condiciones combinadas de estrés térmico e hídrico, la tasa de fijación de vainas en soja fue 38% inferior en condiciones de alta temperatura combinada con secano con respecto a los controles regados (Molino 2011). El estrés térmico en fructificación redujo el número de granos en esta especie en ambas condiciones hídricas, aunque en distinta magnitud (17% riego; 42% secano). En consecuencia, la alta temperatura con secano redujo la partición reproductiva (15%; $p < 0,05$) y el RG fue consistentemente afectado (45% inferior a los controles regados, Molino 2011). El estrés hídrico y las altas temperaturas durante el llenado de granos influyen en la calidad industrial de soja (Weilenmann de Tau y Suárez 1998, Carrera et al. 2009, 2011a, b, 2015). La relación proteína/aceite aumentó de 1,5 a 2,3 cuando los granos provenían de un ambiente sin estrés en comparación con un ambiente con severo estrés hídrico y altas temperaturas (Dornbos y Mullen, 1992). Según Thomas et al. (2003), el contenido de aceite del grano fue máximo a una temperatura día/noche de 32/22 °C y decreció con temperaturas mayores. Dada la complejidad de los procesos involucrados, la mayoría de los estudios se concentran en un solo factor. Por ello en el presente proyecto no sólo se estudiará el impacto de cada estrés por separado sino en conjunto bajo condición de campo en redes de ensayos multi-ambientales (objetivo específico AB3) en trigo y soja.

2. Plataforma de fenotipado

Un aspecto crítico para la inclusión de rasgos fisiológicos determinantes del RG en programas de mejoramiento genético vegetal es la dificultad asociada a su correcta cuantificación en un número grande de parcelas (Austin 1993, Passioura 2012). Por otra parte, el avance de la biotecnología y la disminución sustancial de los costos para la obtención de información genética precisa han aumentado la brecha entre el conocimiento del genotipo y el fenotipo (Mifflin 2000). Consecuentemente, en la actualidad, la medición del fenotipo (o fenotipado) se ha vuelto la principal restricción para un conocimiento acabado de los efectos génicos y para un mayor avance en el mejoramiento de los cultivos. Esto es más notable en el caso de caracteres complejos, tales como la respuesta a estreses bióticos y abióticos, para los cuales se requiere evaluar el fenotipo en múltiples ambientes y bajo muy variadas manipulaciones. En este contexto, es de vital importancia el trabajo conjunto a nivel regional, generando plataformas que permitan la experimentación y evaluación de los materiales en un rango amplio de ambientes, complementando las tecnologías y experticia disponibles en cada una de las instituciones. En este proyecto se propone la utilización de plataformas existentes y el desarrollo de nuevas plataformas de fenotipado que permitan, aplicando nuevas tecnologías (vehículos aéreos no tripulados, sensores multi espectrales, análisis de imágenes), lograr una caracterización amplia y precisa del fenotipo de los materiales de interés, en un amplio rango de condiciones ambientales (objetivo específico AB4).

Objetivo general de este proyecto es:

(i) Caracterizar germoplasma utilizado en la región en su comportamiento frente a estreses bióticos (enfermedades) y abióticos (hídrico y térmico, en forma individual o combinado), (ii) identificar las bases fisiológicas y genéticas que permiten mantener el rendimiento frente a dichos estreses, y (iii) desarrollar una plataforma de fenotipado a campo validada a nivel regional.

De esta forma se proveerá en el corto-mediano plazo de herramientas de aplicabilidad real en los programas de mejoramiento para desarrollar germoplasma adaptado a dichas limitantes, asociado a estrategias de manejo que ayuden a sostener el RG, sin reducir la calidad de los cultivos, mejorando así la producción de ambas especies en un marco de sustentabilidad ambiental.

Objetivos específicos:

Utilizando germoplasma adaptado a la región, los objetivos específicos de este proyecto son:

En relación a las limitantes bióticas (B):

(B1) Caracterizar fenotípicamente el comportamiento de diferentes cultivares de trigo a Piricularia (Pyricularia grisea), Roya de la hoja (Puccinia triticina), Roya amarilla (Puccinia striiformis), Fusariosis de la espiga (Fusarium - spp.) y Septoriosis (Zymoseptoria tritici).

(B2) Desarrollar un ensayo biológico para la validación funcional de los genes del hongo biótrofo Phakopsora pachyrhizi basado en tecnologías iRNA (RNA interferencia), silenciamiento génico inducido por virus (virus induced gene silencing, VIGS), aplicación ectópica de RNA doble cadena (dsRNA ectopic application) y tecnologías TraitUP, de forma de avanzar en el desarrollo, mediante transformación genética, de plantas de soja que

En relación a las limitantes abióticas (AB):

(AB1) Determinar las respuestas fenológicas de cultivares de trigo y soja a cambios en la fecha de siembra y generar modelos de simulación para estimar fenología y cuantificar riesgo de estrés hídrico (déficit y anegamiento), y probabilidad de temperaturas extremas (heladas y golpe de calor) según la combinación de sitio, fecha de siembra y cultivar elegido.

(AB2) Caracterización genotípica de genes mayores que regulan la fenología (genes de vernalización -Vrn-1 - y fotoperiodo -Ppd-1) en cultivares de trigo.

(AB3) Determinar las características fisiológicas que mejor explican en condiciones de campo la respuesta a déficit hídrico y/o térmico (golpe de calor) en cultivares de trigo y soja.

(AB4) Generar una plataforma de fenotipado a campo en trigo y soja, asociado al objetivo AB3.

(AB5) Identificar regiones genómicas (QTLs) de características fisiológicas y de adaptación y/o genes con expresión diferencial asociados a la tolerancia a déficit hídrico en trigo y soja

ACTIVIDADES

La propuesta involucra:

1) a1: Vivero sanitario en trigo (objetivo B1)

Durante el próximo ciclo experimental se continuará con viveros de observación de enfermedades en INIA Chile, INIA Uruguay, INTA Argentina e IPTA Paraguay, cubriendo todas las enfermedades del año previo. La justificación de su inclusión obedece principalmente a la importancia de poder intercambiar germoplasma y evaluarlo en diferentes ambientes. El año pasado ello quedó reflejado en la aparición de las nuevas razas de roya amarillas. Sin embargo, se realizarán sólo durante el primer ciclo experimental y serán más pequeños que el año anterior, involucrando un bajo presupuesto. Cada institución cubrirá los costos que excedan a los asignados en esta propuesta para poder evaluar todas las enfermedades.

2) a2: Validación funcional de genes de P. Pachyrizi (objetivo B2)

Esta actividad continúa la a6. Análisis comparativo del transcriptoma de P Pachyrizi. La actividad se encuentra muy avanzada y dada su relevancia consideramos importante su inclusión. Se asignó presupuesto durante el primer ciclo experimental, y se desarrolla en EMBRAPA, Brasil.

3) a3: Ensayos fenológicos en trigo y soja/a4 Generación de modelo de simulación (objetivo AB1)

Se continúa durante el primer ciclo experimental con estos ensayos en INIA Chile, INIA Uruguay, INTA Argentina, IPTA Paraguay y FA-UBA Argentina. De esta forma se obtendrá la información suficiente para genera/validar los modelos de simulación de fenología en trigo y soja, que serán desarrollados en la FA-UBA Argentina durante el segundo ciclo.

4) a4-Generación de una plataforma regional de fenotipado a campo en trigo y soja mediante imágenes aéreas (objetivo AB4)

Un aspecto crítico en programas de mejoramiento genético vegetal es la dificultad asociada a la medición del fenotipo en un número grande de parcelas. Esto es más notable en el caso de caracteres complejos, tales como la respuesta a estreses bióticos y abióticos, para los cuales se requiere evaluar el fenotipo en múltiples ambientes y bajo muy variadas manipulaciones. En este contexto, es de vital importancia el trabajo conjunto a nivel regional, generando plataformas que permitan la experimentación y evaluación de los materiales en un rango amplio de ambientes, complementando las tecnologías y experticia disponibles en cada una de las instituciones.

Mediante esta actividad se propone el desarrollo de una nueva plataforma regional de fenotipado a campo en trigo y soja (y otras especies) mediante imágenes aéreas, basada en nuevas tecnologías (vehículos aéreos no tripulados, procesamiento de imágenes), a fin de lograr una caracterización amplia y precisa del fenotipo de los materiales de interés, en un amplio rango de condiciones ambientales. Entre las variables fenotípicas factibles de determinar mediante esta plataforma se incluyen la densidad/cantidad de plantas por parcela, área foliar/porcentaje de cobertura del canopy, altura de plantas, fenología, e índices de vegetación que permiten estimar el estado nutricional de las plantas, así como cuantificar la variabilidad espacial dentro de cada experimento a fin de mejorar la evaluación de parcelas individuales.

La plataforma estará constituida por siete (7) nodos (3 en Argentina, 1 en Brasil, 1 en Chile, 1 en Paraguay y 1 en Uruguay) a los cuales se equipará con los dispositivos necesarios para la captura automatizada de imágenes aéreas y para el procesamiento de las mismas. Los nodos serán las mismas localidades donde se realizarán los experimentos a campo correspondientes a las demás actividades del proyecto. Uno de los nodos (Balcarce, Argentina) actuará como "nodo central", y estará encargado de coordinar acciones y protocolos de análisis de las imágenes obtenidas, con el fin de hacer más eficiente el proceso, unificar la obtención de datos y facilitar la comparación entre localidades.

Cada nodo estará compuesto por un vehículo aéreo no tripulado y sus accesorios (cámara de alta resolución, equipamiento de control, software de procesamiento, etc.), basados en tecnologías de código abierto (tanto hardware como software) ya en uso actualmente en Balcarce, Argentina (UNMDP-INTA). Este tipo de tecnologías abiertas permite fácilmente su adaptación a usos y contextos específicos, facilita la colaboración y la transferencia de la tecnología (como en el caso de esta red), y promueve la adopción local y la soberanía tecnológica.

Esta actividad incluye la realización en cada país de una capacitación teórico-práctica de una semana de duración. Cada grupo local será capacitado para el armado, reparación y modificación del equipamiento, y para la captura de imágenes aéreas y realización de mediciones en los experimentos a campo. Cada nodo contará luego no sólo con un vehículo aéreo en funcionamiento, sino también con componentes y materiales extra que podrán servir de repuestos para el equipo, para realizar modificaciones o adaptaciones, o para capacitar a otras personas y difundir la tecnología.

La actividad contará con una etapa inicial durante la cual se realizará una adaptación, actualización, puesta a punto y documentación detallada del modelo actualmente en uso en Balcarce, Argentina, de modo de contar con una versión 'reproducibile' (en base a los lineamientos del hardware abierto). Durante esta etapa se diseñarán asimismo las capacitaciones, en base a la experiencia previa de talleres de construcción de drones de código abierto realizados en Chile y Argentina durante 2017 (en el marco del proyecto "Vuela" - <http://osf.io/fscn4>).

Cronograma:

- Etapa inicial: marzo-julio 2018

- Equipamiento de nodos y capacitaciones: agosto-octubre 2018

- Puesta en marcha y pruebas de la plataforma: noviembre-diciembre 2018

5) a5. Corrida de marcadores moleculares (objetivo AB2)

Se realizarán las determinaciones moleculares para los genes Ppd-1 y Vrn-1, involucrados en el control de la respuesta a fotoperiodo y vernalización, en germoplasma de INIA Chile e INIA Uruguay. Las determinaciones se realizarán en el laboratorio de Biotecnología de INTA Marcos

Juárez. Esta actividad no involucra mucho presupuesto y resalta las ventajas de trabajar en forma conjunta, permitiendo mejorar la caracterización del germoplasma a nivel regional.

6) a6. Experimentos con manipulación del estrés hídrico (objetivo AB3).

Se utilizará una población genotipada de trigo, la cual se elegirá en base a la respuesta a estrés hídrico de sus padres. Dicha población será sembrada en Vallenar (Atacama, INIA Chile) y en San Juan (INTA, Argentina), dos localidades donde el aporte de agua de lluvia es muy bajo razón por la cual la generación del estrés hídrico es factible.

RESULTADOS ESPERADOS DEL PROYECTO

En relación a los objetivos asociados a limitantes bióticas los resultados y productos esperados son:

(B1) Líneas avanzadas de los programas de mejoramiento de los países intervinientes caracterizadas por su comportamiento a Piricularia (*Pyricularia grisea*), Roya de la hoja (*Puccinia triticina*), Roya amarilla (*Puccinia striiformis*), Fusariosis de la espiga (*Fusarium* - spp.) y Septoriosis (*Zymoseptoria tritici*) en los diferentes viveros establecidos. Esta información es fundamental para diseñar los bloques de cruzamiento de los diferentes programas de mejoramiento con el objetivo de ampliar la base de resistencia del germoplasma para las principales enfermedades a nivel regional.

(B2) Se espera desarrollar un ensayo basado en la tecnología iRNA para la validación funcional de genes candidatos esenciales y efectores de *P pachyrhizi*. También se espera convalidar la prueba de concepto que el silenciamiento de genes seleccionados de *P pachyrhizi* es una estrategia válida para evitar la infección fúngica en soja, permitiendo avanzar en el desarrollo de soja transgénica que exprese constructos "hairpin" de RNA basados en la secuencia de genes esenciales/efectores de *P pachyrhizi*.

En relación a los objetivos asociados a limitantes abióticas los resultados y productos esperados son:

(AB1) Cuantificación por modelización del riesgo de anegamiento y probabilidad de heladas (trigo) y déficit hídrico y golpe de calor en trigo y soja para la región bajo estudio según la combinación de sitio, fecha de siembra y cultivar. El producto consiste en un entorno web (carcasa simplificada del modelo) para asistir a la toma de decisión sobre fechas de siembra y cultivares de manera zonificada, con acceso gratuito para asesores y productores.

(AB2) Caracterización genotípica de cultivares de trigo de los programas de INIA Uy e INIA Ch considerando variantes alélicas presentes en genes de vernalización –*Vrn-1* - y fotoperíodo –*Ppd-1*. El producto consiste en 96 cultivares caracterizados para variantes alélicas de dichos genes que permitirán a los mejoradores elegir con mayor certeza los parentales en sus cruzamientos para determinar ciclo de cultivo.

(AB3) Identificación y ranking de rasgos ecofisiológicos con variabilidad genotípica en la respuesta a campo al déficit hídrico y/o estrés térmico, promisorios para ser incluidos en la selección de cultivares orientados a ambientes con estas restricciones. Los productos a obtener son (i) rasgos y/o sus proxis identificados y su impacto cuantificado para diferentes escenarios objetivos, (ii) protocolos de fenotipado a campo de rasgos de interés, de aplicación en selección temprana y/o tardía, y (iii) cultivares de trigo y soja caracterizados por su respuesta a campo frente a dichos estreses, que servirían como insumo a los programas de mejoramiento

(AB4) Establecimiento de una plataforma de fenotipado a campo validada a nivel regional

(AB5) Identificación de regiones genómicas (QTLs) y/o genes asociados a la tolerancia a déficit hídrico en trigo y soja, pasibles de ser utilizados en el futuro para realizar MAS.

PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO (en dólares americanos)

CATEGORIA DE GASTOS	PROYECTO			
	TOTAL	2018	2019	2020
01. Consultores y Especialistas	0	0	0	0
02. Bienes y Servicios	62.131	26.558	27.318	8.255
03. Materiales e Insumos	69.066	34.261	23.592	11.213
04. Viajes y Viáticos	22.880	8.730	11.977	2.173
05. Capacitación	550	150	400	0
06. Diseminación y Manejo del Conocimiento	610	50	60	500
08. Imprevistos	234	122	113	0
Total Actividades	155.471	69.870	63.459	22.141
07. Gastos Administrativos	8.656	3.567	3.691	1.398
Sub Total Proyecto	164.127	73.437	67.150	23.539
Viáticos internacionales - PROCISUR	11.873	10.860	1.013	0
TOTAL PROYECTO POR INSTITUCION	176.000	84.297	68.163	23.539
taller/reunión intermedia - PROCISUR	8.950		8.950	
taller/reunión final - PROCISUR	8.950			8.950
<u>TOTAL PROYECTO</u>	193.900	84.297	77.113	32.489