

# MEJORAMIENTO GENÉTICO MÁS ECOFISIOLOGÍA: GENERANDO ESPACIOS INTERDISCIPLINARIOS PARA LA DISMINUCIÓN DE LA VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO.



Ing. Agr. (PhD) Zohra Bennadji <sup>1</sup>  
Lic. (PhD) Rosario Alonso <sup>6</sup>

Ing. Agr. (PhD) Marina Castro <sup>2</sup>

Ing. Agr. (PhD) Verónica Ciganda <sup>3</sup>

Ing. Agr. (MSc) Carmen Goñi <sup>4</sup>

Ing. Agr. (PhD) Fernando Pérez de Vida <sup>5</sup>

Q.F. (PhD) Daniel Vázquez <sup>2</sup>

Ing. Agr. (PhD) Andrés Berger <sup>2</sup>

Ing. Agr. Deborah Gaso <sup>6</sup>

Ing. Agr. (MSc) Sergio Ceretta <sup>2</sup>

Ing. Agr. Alberto Fassio <sup>2</sup>

Ing. Agr. (MSc) Nestor Saldain <sup>7</sup>

Ing. Agr. (MSc) Álvaro Otero <sup>8</sup>

<sup>1</sup> Mejoramiento Genético Forestal

<sup>2</sup> Ecofisiología de cultivos

<sup>3</sup> Sensoramiento Remoto

<sup>4</sup> Riego y Nutrición de Cítricos

<sup>5</sup> Mejoramiento Genético de Arroz

<sup>6</sup> Contrato dentro del proyecto

<sup>7</sup> Manejo de Arroz

<sup>8</sup> Ecofisiología de Cítricos. Coordinador del Proyecto

## INTRODUCCION

Las evidencias del cambio climático y sus incidencias sobre los sistemas de producción en el Uruguay son temas recurrentes de las agendas políticas y técnicas de los últimos años. Las cadenas de producción vegetal no escapan a esta tendencia, al padecer actualmente limitantes en la sostenibilidad de la productividad interanual, ante el cambio climático sobre los cultivos de secano, arroz y en las plantaciones forestales (*Eucalyptus* y *Pinus*) y de cítricos, entre otros. En efecto, la ocurrencia de eventos climáticos extremos y de brotes sanitarios cada vez más frecuentes ha pautado los escenarios productivos de los últimos años. Sequías o excesos de agua prolongados o alternados, acompañados de olas de calor sin precedentes en el país, originan estreses abióticos y debilitamientos fisiológicos de magnitudes variables en plantaciones de diferentes partes del país y producen una combinación de factores biológicos y ecológicos para la propagación de enfermedades y plagas, y para la reducción de los rendimientos.

La búsqueda de estrategias de disminución de la vulnerabilidad de los sistemas de producción al cambio climático y de su adaptación a largo plazo toma un particular relieve en estos escenarios. La disponibilidad de materiales genéticos (semillas y clones) adaptados a las diferentes zonas ecológicas del país ha sido un factor clave en el manejo sostenible de la productividad de los cultivos en la última década. Constituye también una de las herramientas tecnológicas más apropiadas a la problemática del cambio climático.

Los programas de mejoramiento genético de cultivos, de arroz y forestal desarrollados hasta la fecha en el país por empresas privadas y por el INIA se han basado en criterios de selección de producción (rendimientos por hectárea, incremento medio anual, etc.) y en las características de calidad de sus productos. La inclusión de criterios ecofisiológicos, además de afinar el conocimiento del funcionamiento ecológico de las especies, permitiría potenciar los programas de mejoramiento genético de cara a los escenarios de cambio climático y a los diferentes estreses bióticos y abióticos que podrían conllevar, a través de la identificación de mejores índices de selección y de un mayor y más profundo conocimiento de la interacción genotipo-ambiente.

En el marco del primer llamado de proyectos de investigación financiado por el Fondo Concursable Interno de INIA se inició el proyecto “**Bases fisiológicas para la mitigación de la vulnerabilidad de los sistemas productivos agrícolas ante estreses abióticos causados por el cambio climático en Uruguay**”, en colaboración con Fisiología Vegetal de la Facultad de Agronomía, UdelaR; con el Proyecto Fisiología del Programa de Trigo, Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT); y con el *Citrus Research and Education Center*, (IFAS) *University of Florida*, USA.

Este proyecto apunta a la creación y consolidación de las capacidades y acciones de investigación en ecofisiología dentro de INIA y en asociación con otras instituciones para: (i) mejorar la producción en cantidad y calidad de cara a los escenarios del cambio climático, (ii) producir de manera eficiente y sustentable, (iii) asistir al mejoramiento genético vegetal a través de la identificación de rasgos morfo-fisiológicos relevantes y (iv) proveer un marco conceptual para el desarrollo de modelos fisiológicos y productivos que asistan el mejoramiento genético y el manejo de los cultivos.

Propone una muy fuerte incorporación de la Ecofisiología, para potenciar conocimientos vinculados a áreas de enorme importancia que ya están desarrollándose en el INIA, como los programas de mejoramiento, la agricultura de precisión y la genómica funcional. En particular se puso énfasis en el estudio de estreses hídricos por déficit y por exceso, así como estrés por altas temperaturas o reducción de radiación solar, dándole un énfasis particular en función de las limitantes de cada cadena productiva en particular.

El proyecto reúne catorce investigadores de siete disciplinas/campos de investigación y de cinco rubros de producción. Participan también instituciones nacionales e internacionales con trayectoria en estos temas.

### ALGUNOS CONCEPTOS

De manera simplificada, la **ecofisiología vegetal** puede asimilarse al estudio de la interacción de los vegetales con los diferentes factores de su ambiente, a través de

la descripción de sus respuestas y del análisis de los procesos involucrados. Esta rama de la fisiología vegetal clásica ha experimentado un marcado desarrollo en los últimos años con valiosos aportes tanto teóricos como aplicados a diversas cadenas productivas y sistemas de producción. Los estudios ecofisiológicos abarcan una amplia escala de niveles de organización de las plantas y de sus ecosistemas, abriendo una rica interfase para estudios complementarios con la genética y el mejoramiento genético.

Las variables consideradas son múltiples y abarcan aspectos estructurales, como biomasa aérea de las plantas, área foliar, longitud de raíces, etc., y funcionales, como intercambio de gases ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ), flujo de savia, potencial hídrico en distintos puntos del continuo suelo-planta, etc., tanto a escala de planta individual como de parcela o ecosistema. La evaluación de la magnitud de estas variables permite la medición directa e indirecta y la documentación del grado de la respuesta funcional vegetal a diferentes estreses y de la interacción con la actividad genómica durante el período de estrés y su recuperación.

**Sensoramiento Remoto.** La inclusión de nuevas e innovadoras técnicas de sensoramiento remoto, ya sea a través de sensores e imágenes multispectrales y de imágenes infrarrojo, permite el desarrollo de conocimientos y tecnologías de evaluación del estado fisiológico de los cultivos, relacionándolos directamente con la producción de los mismos y su adaptación a distintas duraciones e intensidades de estrés, en especial el anegamiento y la sequía entre otros.

Por otro lado, el uso de imágenes aéreas permitirá evaluar el comportamiento productivo de un cultivar o varios cultivares teniendo en cuenta la variabilidad espacial generada dentro del propio predio o de un agro-sistema de mayor escala.

**Modelos Biofísicos.** Los modelos de cultivos son desarrollados como un conjunto de algoritmos matemáticos que representan el crecimiento del cultivo y sus interacciones con el ambiente (suelo y atmósfera) como un sistema integrado. A través de la simulación, los modelos de cultivos permiten traducir las condiciones ambientales (temperatura, agua en el suelo, radiación solar incidente, etc.), condiciones de manejo y de coeficientes propios de cada genotipo en salidas (habitualmente rendimiento y producción de materia seca) que cuantifican las respuestas a determinados ambientes productivos.

La incorporación de modelos biofísicos permitirá cuantificar la respuesta de un genotipo frente a distintos escenarios potencialmente estresantes y determinar cuál es “el factor funcional” de mayor relevancia en la tolerancia o susceptibilidad al estrés, permitiendo acortar tiempos e incrementar la eficiencia de los programas de mejoramiento genético.

## COMPONENTE FORESTAL

El componente forestal apunta a la identificación y la incorporación de parámetros fisiológicos a los índices de selección basados hasta ahora en criterios de crecimiento, rendimientos, arquitectura de los árboles y características de la madera. Esta preocupación surge como respuesta a algunas evidencias de efectos del cambio climático registradas en plantaciones forestales (eventos climáticos más pronunciados, mayor incidencia de enfermedades, etc.), poniendo énfasis en la tolerancia/resistencia a la sequía. Los materiales utilizados corresponden a genotipos selectos de diferentes etapas y generaciones de los programas de mejoramiento genético de *Eucalyptus grandis* y *Pinus taeda* de INIA. Por otro lado, apunta a la aplicación de técnicas de sensoramiento remoto (imágenes hiperespectrales o infrarrojas) que permitan evaluar el comportamiento fisiológico de *Eucalyptus*, en especial el desempeño relativo de diferentes genotipos frente a la sequía a escala de plantación comercial.

Una correcta contextualización del componente forestal implica también la ponderación de algunas características biológicas propias de las especies forestales en estudio para un mayor provecho del enfoque multidisciplinario del proyecto (turnos finales variables según el fin de uso: 8-10 años para pulpa; 20-25 años para aserrado, correlación juvenil-adulto, selección temprana y efecto de estreses acumulativos).

## PRINCIPALES ACTIVIDADES

Las actividades programadas en *Eucalyptus* y en *Pinus*



Ensayo de tolerancia a sequía en diferentes clones de *Eucalyptus*.



Evaluación de la fotosíntesis en *Eucalyptus*.

abarcen ensayos en condiciones controladas (invernáculo y cámara de crecimiento con iluminación artificial) con un buen monitoreo de los factores causales del estrés hídrico y ensayos a campo que combinan observaciones a lo largo de cuatros estaciones del comportamiento de material genético (observación del efecto de ciclos naturales de disponibilidad de agua en el campo, ciclo natural de sequía en el campo).

Tres ensayos de *Eucalyptus grandis*, dos en campo y uno en condiciones controladas, están actualmente en ejecución en INIA-Tacuarembó. Los dos ensayos a campo consisten en el seguimiento semanal comparado de algunos parámetros morfológicos y funcionales de cuatro genotipos contrastantes de árboles clonales de 1½ y 11 años. Por otro lado, en condiciones controladas, se evalúa el comportamiento fisiológico de cuatro genotipos de clones contrastantes a distintas intensidades de déficit hídrico.

Los resultados obtenidos hasta la fecha han permitido generar información preliminar sobre procesos ecofisiológicos como, por ejemplo, eficiencia de uso del agua de los clones bajo estudio. No permiten en la etapa actual detectar tendencias de comportamiento de estos materiales genéticos frente al estrés hídrico pero confirman la riqueza desde diferentes perspectivas de los estudios interdisciplinarios de mejoramiento genético y ecofisiología.

Además del seguimiento de estos ensayos, se prevé el trabajo sobre materiales mejorados de huerto semillero de primera y segunda generación de *E. grandis* y sobre material genético de *P. taeda*.

## COMPONENTE CULTIVOS DE SECANO

En el componente cultivos de secano se siguen distintas estrategias para disminuir la variabilidad y/o vulnerabilidad de los cultivos a las condiciones adversas generadas por el cambio climático y/o el avance de cultivos cerealeros y oleaginosos en nuevas áreas agrícolas o sistemas productivos.

Dichas estrategias se pueden agrupar en: 1) El desarrollo de curvas de respuesta de rendimiento y parámetros de calidad ante estrés por altas temperaturas y déficit hídrico en genotipos selectos de trigo sembrados en el país o en fase avanzada del Programa de Mejoramiento de INIA; 2) La identificación de características fisiológicas que confieren tolerancia ante estrés por exceso hídrico en trigo, cebada, soja y sorgo; 3) La identificación de zonas homogéneas de manejo y con condiciones determinantes de estrés similares a escala de chacra en base a sensoramiento remoto; 4) La formulación de modelos de crecimiento de cultivo que permitan identificar características claves en la determinación de tolerancia a estrés y sensibilidad ante cambios en la disponibilidad de recursos.

En el caso de 1 y 2, la información resultante sirve tanto para la identificación de genotipos tolerantes a distintos estreses abióticos, los cuales se pueden usar directamente en la producción, o ser utilizados como parentales en los programas de mejoramiento. Las características fisiológicas que confieren esa tolerancia pueden incorporarse en el proceso de selección de genotipos para obtener materiales más adaptados a las condiciones actuales de crecimiento de los cultivos. En el caso de 3 y 4 los resultados no sólo son funcionales a los programas de mejoramiento (por ejemplo en fenotipado masivo y modelación), sino también a la toma de decisiones a escala predial, abriendo el camino y sentando las bases para nuevas herramientas que asistan en el manejo de los cultivos basadas en el conocimiento sitio-específico de la disponibilidad de recursos, las condiciones predisponentes a estrés, y la proyección de los efectos que éstos tendrán en el rendimiento de los cultivos.

Las actividades que se desarrollan para llevar a cabo los objetivos antes mencionados comprenden:

### a) Estrés por exceso hídrico

Ensayos a campo y en condiciones controladas para el desarrollo de predictores (soja y sorgo) y para evaluar la tolerancia a exceso hídrico en genotipos de soja, sorgo, trigo y cebada.

### b) Estrés por déficit hídrico y altas temperaturas

Ensayos en condiciones controladas para la caracterización de genotipos de trigo y elaboración de curvas de respuesta.

### c) Sensoramiento remoto y determinación de áreas homogéneas de cultivo



Evaluación del estrés por anegamiento en cultivares de trigo y cebada.

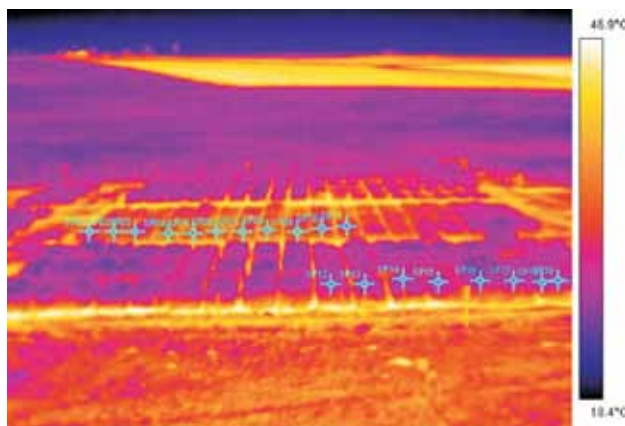


Imagen infrarroja. Temperatura de la canopia de cultivares de trigo y cebada sometidos a anegamiento.



Ensayo de tolerancia a anegamiento en distintos cultivares de trigo y cebada.

Establecimiento de relaciones entre la información obtenida por sensoramiento remoto y las variables biofísicas medidas. Identificación de zonas homogéneas de diferente comportamiento vegetal y productivo.

#### d) Modelación del crecimiento de los cultivos

Adecuación y desarrollo de un modelo de crecimiento para trigo, cebada y soja, y determinación de los principales componentes de la tolerancia a estrés.

Estimación de la variabilidad en rendimiento asociada a cambios en el clima, manejo y disponibilidad de recursos naturales.

### COMPONENTE ARROZ

El actual proyecto permite dar continuidad y profundidad al estudio de aspectos de la ecofisiología del cultivo, iniciados en la década de los 90. Los primeros trabajos se orientaron al entendimiento de las curvas de crecimiento en las principales variedades de alto potencial en uso comercial y en particular, frente a algunos estreses bióticos, al análisis de la información climática relevante para el cultivo y su interacción con la productividad o con componentes del rendimiento y fenología.

Más recientemente el trabajo se ha enfocado en evaluar el impacto de bajas temperaturas en estadios vegetativos y reproductivo en los principales cultivares y diversas líneas experimentales, identificados como los principales estreses abióticos ocurrientes en la zona Este del país, donde se concentra más del 60% del área de siembra nacional.

Asimismo, se ha analizado globalmente la incidencia de variables climáticas en la producción nacional, de lo cual se desprende que los niveles de radiación disponibles a través de los años constituirían una limitante de primer orden en la expresión de altos rendimientos.



Ensayos de reducción de la radiación incidente en el rendimiento de cultivares de arroz

### APORTES DEL ACTUAL PROYECTO

En este marco se propone estudiar: i) la importancia de la arquitectura de la canopia en cultivares de alto potencial (variedades e híbridos), en particular el desarrollo foliar, como modelos a seguir en la selección fenotípica de nuevas líneas experimentales, con el objetivo de incrementar la productividad; ii) la respuesta de los principales cultivares en uso comercial (El Paso 144, INIA Olimar e INIA Tacuarí) en condiciones de restricción de radiación en diferentes estadios relevantes para la formación y concreción del rendimiento.

Los principales objetivos planteados en este trabajo apuntan a: i) identificar características de tipo de planta y canopia (resultado de la comunidad de plantas) asociados a mayores rendimientos y ii) evaluar la importancia de las reservas de carbohidratos no estructurales en los cultivares locales en la expresión del rendimiento y su estabilidad ante condiciones cambiantes de radiación disponible.

### COMPONENTE CITRICOS

En la producción cítrica, así como en otras producciones vegetales, la frecuencia e intensidad de ocurrencia de distintos estreses abióticos (sequía, anegamiento, altas y bajas temperaturas) determina el potencial productivo de los diferentes cultivares en las distintas zonas de producción.

La ocurrencia de estos eventos queda de manifiesto en los montes en producción por el deterioro de las plantas, bajo rendimiento, caída prematura y pequeño tamaño de los frutos, entre otros. En el caso de la producción cítrica, la respuesta vegetal frente a los estreses abióticos puede tener consecuencias productivas adversas que sobrepasen largamente el período en el cual el árbol esté sometido a un estrés en particular.



Efecto de la reducción de la radiación solar en el desarrollo de la planta de arroz.

Desde un punto de vista productivo, el éxito en la plantación estará dado por la correcta elección en la combinación cultivar/portainjerto, determinado por el comportamiento fisiológico de una mayor o menor tolerancia a la sequía, al anegamiento y a los excesos de temperatura. En consecuencia, para la citricultura nacional es importante cuantificar el impacto fisiológico que tienen estos eventos, tanto en las variedades como en los portainjertos más usados.

A tales efectos se han implementado actividades en condiciones de campo y en invernáculo para simular las posibles interacciones que los estreses producen en la fisiología de las plantas, en la variedad y en el portainjerto.

El proyecto se focaliza en la etapa inicial en: i) cuantificar el efecto fisiológico del estrés hídrico por anegamiento en la floración y cuajado del fruto al final del invierno y comienzo de la primavera en condiciones de campo; ii) determinar el efecto de períodos cortos (7-10 días) de altas temperaturas en el cuajado y caída de frutitos, en situaciones con diferente contenido de agua en el suelo en naranjas Navel; iii) estudiar la respuesta fisiológica y metabólica de tres portainjertos y cultivares de cítricos a la temperatura del suelo y a la asfixia radicular en condiciones controladas y iv) estudiar la respuesta fisiológica a la sequía en condiciones controladas.

En la segunda etapa del proyecto se pone énfasis en la implementación y ajuste de técnicas de sensoramiento remoto para detectar y cuantificar la respuesta vegetal frente a estreses particulares de nutrición, sequía y anegamiento, con un importante componente en la distribución espacial de la respuesta vegetal. Estas técnicas permitirán la evaluación rápida de los cultivos, facilitando la delimitación geográfica de distintas zonas de manejo del cultivo a nivel predial.

### RESUMEN

La búsqueda de estrategias de disminución de la vulnerabilidad de los sistemas de producción al cambio climático es una tarea de ámbito multidisciplinario, las cuales tienen que confluír en el desarrollo de tecnologías y/o productos con mayor adaptación a las situaciones agroecológicas cambiantes y que le permitan a los productores desarrollar sistemas productivos más estables.

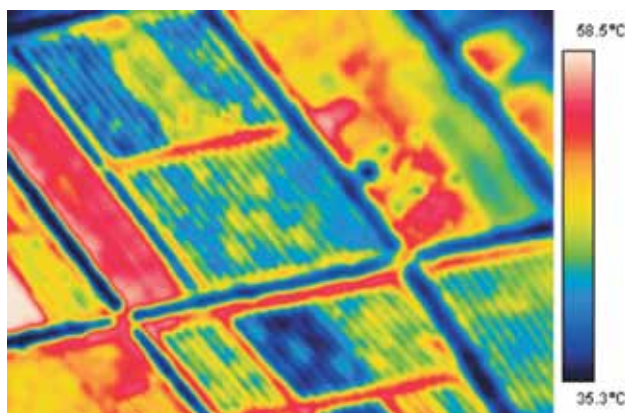
En este sentido, y con especial énfasis en el estudio de la respuesta vegetal a los estreses abióticos más importantes, INIA ha puesto en ejecución este proyecto, íntimamente relacionado a los programas de mejoramiento y manejo de varias cadenas productivas.



Estudio de altas temperaturas en el cuajado del fruto. Instalación de las cubiertas de plástico en el campo, Spring Navel.



Estudios de anegamiento del suelo en plantas de Satsuma.



Temperatura de la copa de árboles cítricos, imagen infrarroja. Efecto de distintos regímenes de riego.