

AVANCES EN LA PREVENCIÓN DEL ESTRÉS TÉRMICO EN PLANTAS *y cómo combatirlo*

En este artículo daremos unas breves pinceladas del efecto del estrés térmico en los cultivos, señalaremos estudios clave en la comprensión de los mecanismos de las plantas frente al mismo y expondremos posibles estrategias para incrementar la resiliencia de los cultivos al aumento de temperatura global.

ROCÍO PRIETO, BRAN LÓPEZ, SARA PARADA, JOSÉ A. ABELENDA, PATRICIA FERNÁNDEZ-CALVO
Misión Biológica de Galicia, sede Santiago de Compostela. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)

En el año 1938, Guy Callendar desató un tornado científico al acuñar por primera vez el término "calentamiento global" y teorizar sobre su origen antropogénico (Callendar, 1938). Sus hipótesis, inicialmente controvertidas y rebatidas, han sido aceptadas ampliamente y sus predicciones han demostrado ser ciertas, aunque excesivamente optimistas. Además de hablar del retroceso de los glaciares, Callendar ya mencionó el efecto del calentamiento global sobre las cosechas. Ochenta años después de este trabajo pionero, sabemos que el incremento de la temperatura global es un hecho constatado y que su efecto en la agricultura global es una realidad a la que se enfrentan productores y consumidores.

El cambio climático viene acompañado, entre otros factores, de un incremento de la temperatura global cuyo efecto en los cultivos es drástico. Por una parte, el calor impacta directamente en los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas afectando a procesos tan fundamentales como la fotosíntesis, el tiempo de floración, la viabilidad del polen, la maduración de

los frutos, etc. Además, la temperatura tiene un efecto secundario sobre las defensas vegetales ya que promueve la emergencia, expansión y redistribución de patógenos y plagas al mismo tiempo que debilita el sistema inmune de los cultivos. En conjunto, estos efectos directos e indirectos del calor promueven una bajada de productividad de las cosechas y anticipan un escenario en el que urge la adopción de medidas que garanticen la sustentabilidad de los sistemas agrícolas globales a través de todas las herramientas y tecnologías a nuestro alcance.

El cambio climático y el impacto global en la agricultura

La agricultura, pilar fundamental de la seguridad alimentaria global, se encuentra hoy en una encrucijada sin precedentes. El cambio climático, con su incremento sostenido de temperaturas y la alteración de patrones meteorológicos, está ejerciendo una presión inmensa sobre nuestros cultivos (US EPA, 2022; van Es, 2020). Por una parte, las olas de calor, las sequías prolongadas y la alteración de los ciclos estacionales reducen la cantidad

y la calidad de los productos agrícolas (Fahad *et al.*, 2017). Por otra, favorecen la emergencia, expansión y redistribución de pestes y enfermedades vegetales al tiempo que debilitan las defensas naturales de los cultivos, haciéndolos más vulnerables y menos productivos (Deutsch *et al.*, 2018; Savary *et al.*, 2019). Frente a este panorama, y ante la necesidad de proporcionar alimento a una población humana en expansión, la investigación y la innovación agrícola emergen como herramientas indispensables para diseñar los cultivos climáticamente adaptados a las condiciones ambientales presentes y futuras.

- Efectos directos del estrés térmico: incremento de temperatura y productividad

La NASA, a través de sus modelos y observaciones, ha documentado un incremento constante de las temperaturas superficiales, con proyecciones que anticipan cambios drásticos en el rendimiento de cultivos (Jaegermeyer & SubbaRao, 2022). Los efectos del estrés térmico en los cultivos son muy diversos y de gran impacto, y van desde la reducción de la tasa fotosintética que

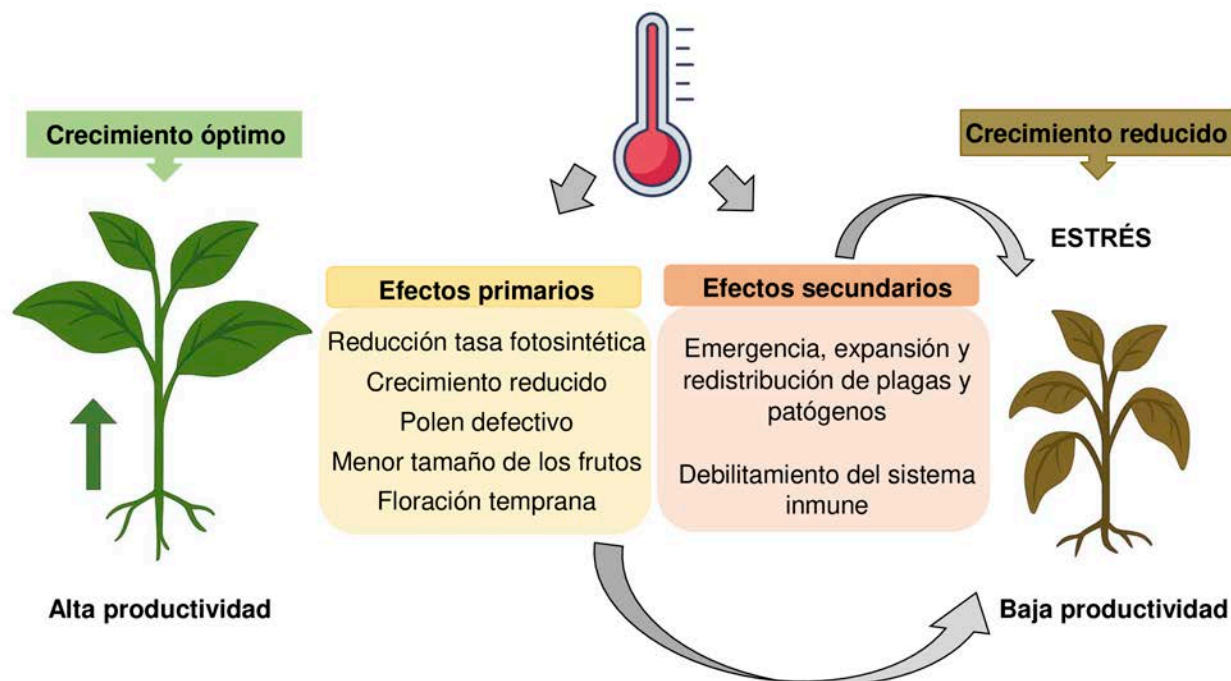


FIGURA 1
LA DOBLE AMENAZA DEL ESTRÉS TÉRMICO EN PLANTAS.

El cambio climático viene acompañado, entre otros factores, de un incremento de la temperatura global cuyo efecto en los cultivos es drástico. Por una parte, el calor impacta directamente en los procesos de crecimiento y desarrollo de las plantas afectando a procesos tan fundamentales como la fotosíntesis, el tiempo de floración, la viabilidad del polen, la maduración de los frutos, etc. Además, la temperatura tiene un efecto secundario sobre las defensas vegetales ya que promueve la emergencia, expansión y redistribución de patógenos y plagas al mismo tiempo que debilita el sistema inmune de los cultivos. En conjunto, estos efectos directos e indirectos del calor promueven una bajada de productividad de las cosechas y anticipan un escenario en el que urge la adopción de medidas que garanticen la sustentabilidad de los sistemas agrícolas globales a través de todas las herramientas y tecnologías a nuestro alcance.

limita la biomasa, hasta la modificación del llenado del grano que genera semillas defectuosas y de baja calidad nutricional (Calixto, 2025; Distéfano *et al.*, 2025). En consecuencia, se estima que el rendimiento medio mundial del maíz podría disminuir en un 24% hacia finales de siglo (Jägermeyr *et al.*, 2021). En el caso del trigo, cereal mejor adaptado a climas templados, podría darse un incremento inicial de la productividad del 17% que se estabilizaría o mermaría a mediados de siglo debido al efecto combinado de varios factores ambientales (Ritchie, 2024). En conjunto, se predice una bajada neta de la productividad de los cereales a medida que sube el mercurio.

La producción de grano/fruto, tanto en cereales como en otras especies de interés agroforestal, está altamen-

te condicionada por las condiciones ambientales que se producen en el momento de la floración (Amano *et al.*, 2010). En este sentido, una de las consecuencias más visibles y mejor documentadas del estrés por temperatura es el adelanto de la floración en las plantas. Büntgen y colaboradores analizaron más de 400.000 registros de floración en el Reino Unido entre 1753 y 2019, concluyendo que, desde mediados de los años 80, muchas especies adelantan su floración en promedio casi un mes (Büntgen *et al.*, 2022). Esta alteración tan drástica del tiempo de floración está directamente relacionada con el incremento de las temperaturas máximas en invierno y primavera. El desajuste fenológico que provoca puede romper el delicado equilibrio entre las plantas y sus polinizadores, desencadenando una

cascada de efectos secundarios en la reproducción, alimentación y supervivencia de insectos, aves y mamíferos, afectando a toda la cadena trófica. Pero, el impacto del calor va más allá de la fenología. Estudios recientes revelan que el calor extremo altera la composición bioquímica de las semillas de cereales como el trigo, el arroz y el maíz (Kumar *et al.*, 2023). Bajo condiciones de estrés térmico, estas plantas producen granos con menos almidón, proteínas desequilibradas, aceites menos saludables y una reducción en vitaminas y antioxidantes. Esto se debe a que el calor interfiere con enzimas clave para la síntesis de nutrientes y acelera el llenado del grano, acortando el tiempo que la planta tiene para acumular los compuestos esenciales. Estos efectos, que varían según

el cultivo y el momento del estrés, tienen implicaciones directas en la seguridad nutricional global.

- Efectos indirectos: más allá de la productividad

El incremento de temperatura global además está intensificando la emergencia, dispersión y redistribución de plagas y enfermedades vegetales (FAO and Plant Protection Convention, 2021). A medida que las temperaturas globales aumentan, los insectos herbívoros y chupadores consumen más alimento y en algunos casos se reproducen más rápido, pasando de uno a varios ciclos anuales. Asimismo, las enfermedades causadas por patógenos bacterianos y fúngicos alcanzan un mayor radio de acción y los episodios son cada vez más frecuentes (Savary *et al.*, 2019). En este contexto, plagas y enfermedades someten a los cultivos a un estrés sin precedentes que provocará pérdidas de rendimiento cada vez mayores en cultivos esenciales, especialmente en regiones templadas como Europa, China y Estados Unidos. En estas zonas ya se habla de un “tsunami” silencioso de pérdidas provocadas por patógenos y plagas, y de un cuello de botella de cultivos agroforestales (Savary *et al.*, 2019; Wessely *et al.*, 2024). Por ello urge la identificación de nuevas variedades y/o especies climáticamente adaptadas para el futuro inmediato, de nuevos compuestos con actividad bioprotectora que fortalezcan la defensa vegetal y de sistemas de predicción y anticipación ante los brotes de enfermedades y plagas.

Además, el efecto del estrés térmico en los cultivos tiene otra dimensión muy preocupante, ya que induce el debilitamiento del sistema inmune de las plantas. Recientemente se ha demostrado que el calor interfiere con la capacidad de las plantas para defenderse porque inactiva la producción de la fitohormona ácido salicílico (SA), responsable de disparar las defensas vegetales frente a bacterias y virus (Kim *et al.*, 2022). En un mundo con olas de calor cada vez

más frecuentes e intensas, este fenómeno podría traducirse en cosechas más vulnerables y en la aparición de nuevas epidemias vegetales. Sin embargo, la pincelada optimista es que los autores de este trabajo han conseguido identificar un interruptor molecular, el gen CBP60g, cuyos niveles pueden alterarse en los cultivos para mantener una inmunidad robusta incluso a altas temperaturas. Este hallazgo, así como otros avances que se han producido en el ámbito de la biología molecular y bioquímica de plantas, serán cruciales para diseñar los cultivos del futuro más resilientes al cambio global.

La tecnología al rescate

La combinación de los factores directos e indirectos asociados al incremento de temperatura global representa un desafío doble para las cosechas y para muchas regiones del mundo, en las que el acceso a y el desarrollo de nuevas técnicas agrícolas es deficitario. A continuación, detallamos una serie de avances tecnológicos que a nuestro entender serán claves para adaptar la agricultura del siglo XXI al escenario del cambio climático y que cimentarán las prácticas agrícolas del futuro.

- Tecnologías extrínsecas: mejorar la productividad desde el entorno

La monitorización del medio y de las cosechas, así como el uso de herramientas que permitan optimizar las condiciones ambientales de las parcelas de cultivo son piezas claves para mitigar las pérdidas de productividad inducidas por calor. En este sentido, los programas de *previsión y prevención* constituyen dos pilares básicos para incrementar la resiliencia de los cultivos al incremento de temperatura. Por un lado, las *predicciones meteorológicas* a largo plazo son una herramienta de primer orden para adecuar los cultivos al entorno climático y aplicar los tratamientos oportunos en el momento y espacio adecuados. También permiten optimizar los programas de *riego automático y fertirrigación*, claves para

el manejo adecuado de las cosechas. Por otra parte, poner a disposición del agricultor métodos de medición y cuantificación de la situación fisiológica real de la planta, por ejemplo, *estaciones de medición ambiental miniaturizadas, cámaras espectrales o térmicas, y/o sensores moleculares de estrés*, puede ser clave a la hora de tomar las decisiones oportunas que eviten bajadas en productividad. Además, el uso de “biologicals”, compuestos de origen natural con actividad bioprotectora o bioestimulante que permitan bien aliviar el estrés o bien promover el crecimiento, está ganando momentum en el mercado (Rai *et al.*, 2021). Así una gran parte de las empresas biotecnológicas nacionales e internacionales están expandiendo su portfolio de compuestos bioactivos a pesar de la dificultades y lentitud de los sistemas regulatorios del entorno europeo. Estos “biologicals” no sólo mejoran la resiliencia de los cultivos frente a estrés, sino que además permiten reducir los insumos químicos altamente contaminantes que durante décadas se han usado en la agricultura intensiva alineándose con las políticas del pacto verde europeo. La combinación de todos estos elementos (previsión meteorológica, adecuación y tratamientos del cultivo y seguimiento en tiempo real de las condiciones fisiológicas de la planta) pueden someterse a automatismos y árboles de decisión, apoyados por los recientes desarrollos de la *inteligencia artificial*, otra herramienta clave para la agricultura del futuro (Feng *et al.*, 2024). En conjunto todas estas tecnologías redundarán en un beneficio de la productividad con un coste de implementación relativamente bajo para los agricultores.

- Tecnologías intrínsecas: Adaptar los cultivos a un entorno cambiante

La respuesta de los cultivos ante el estrés puede modificarse también a través de estrategias intrínsecas relacionadas con un conocimiento exhaustivo de las rutas molecula-

res, bioquímicas y genéticas que operan en las células vegetales. A continuación, se explican una serie de aproximaciones y avances clave para incrementar la resiliencia de los cultivos al incremento global de temperatura.

La *mejora clásica de cultivos* es la opción tradicional de obtención de variedades resistentes (Anand *et al.*, 2023). En ella, se lleva a cabo la introgresión de los genes de interés de una variedad donadora tolerante en una variedad comercial de élite. Las nuevas técnicas de secuenciación masiva aplicadas a variedades tradicionales y/o especies silvestres permiten, mediante lo que denominamos mejora molecular, expandir el abanico de posibilidades de la mejora clásica, al mismo tiempo que aceleran el proceso de selección de caracteres.

La mejora clásica está limitada por la capacidad de la especie donante y receptora de cruzarse. Esta limitación puede aliviarse parcialmente con técnicas de mutagénesis inducida y de producción de híbridos somáticos. A pesar de seguir siendo la metodología de preferencia, sobre todo en Europa, la mejora clásica es poco versátil a la hora de generar nuevas variedades climáticamente adaptadas debido a su carácter multigénico que puede arrastrar características indeseables en las cosechas mejoradas. Además, es una técnica lenta con ciclos de cruzamientos de 8 a 12 años. Por otra parte, los programas de mejora clásica requieren recursos ingentes y, por lo tanto, solamente están al alcance de empresas e instituciones dedicadas a este fin.

Transgénesis: la aproximación trans-

génica implica la introducción mediante técnicas de biología molecular de material genético exógeno de un organismo donante a otro organismo receptor proporcionándole el carácter deseado (Ricroch *et al.*, 2022). El material puede ser de la misma especie o simplemente de una variedad diferente. Debido a que en general existe un conocimiento previo del proceso que se quiere alterar y al ser una unidad mínima de material genético la que se transfiere, no se alteran las características fundamentales de la variedad de élite receptora. El proceso sigue siendo lento ya que los requerimientos de bioseguridad exigidos son muy altos, mayores que los de la mejora clásica. Por ello el éxito industrial de esta aproximación se ha visto limitado en el mercado de manera que, sólo se han comerciali-

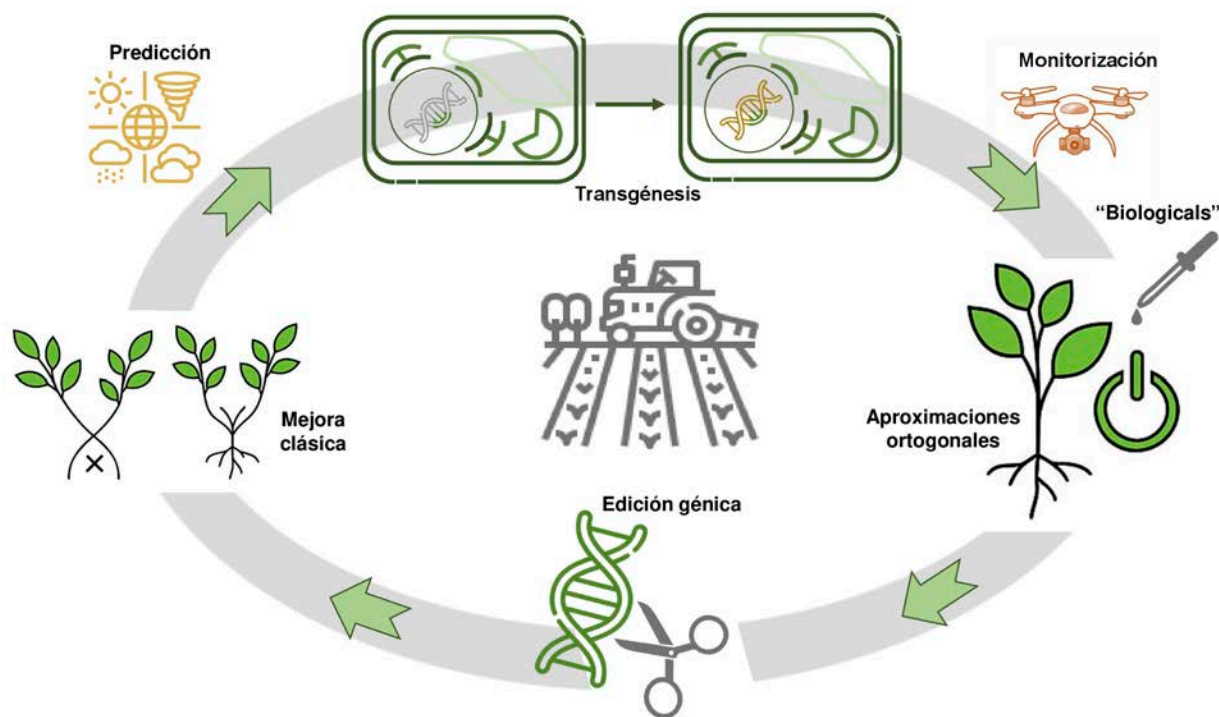


FIGURA 2
ESTRATEGIAS AVANZADAS PARA MEJORAR LA RESILIENCIA DE LOS CULTIVOS AL CALOR.

La combinación de estrategias extrínsecas, como las predicciones meteorológicas a largo plazo y la monitorización del estado fisiológico de los cultivos con cámaras espectrales, drones, etc., con todo el abanico de tecnologías intrínsecas que emanan de la genética, biología molecular y bioquímica de plantas, a su vez complementadas con el uso de nuevos compuestos bioactivos, "biologicals" será fundamental para diseñar cultivos climáticamente adaptados que configuren la agricultura del futuro. En este sentido, se habla de un shift disruptivo hacia una agricultura donde los usos tradicionales y las tecnologías de vanguardia se entremezclen para mejorar de manera decidida los sistemas agrícolas para que sean más productivos, sostenibles y contribuyan a la trazabilidad y seguridad alimentaria global.

zados transgénicos generados a partir de cinco cultivos: maíz, soja, caña de azúcar, patata y trigo. El cultivo de maíz transgénico MON87460, tolerante a estreses abióticos, es el que tiene mayor distribución global. Este maíz porta un gen bacteriano de *Bacillus subtilis* responsable de mantener la estabilidad celular en condiciones de sequía y calor.

La cisgénesis, variante de la transgénesis, consiste en que la planta receptora adquiere un gen de otra especie, ambas compatibles para el cruzamiento, y permite la transferencia de genes específicos sin la necesidad de largos períodos de selección repetidos (Schouten *et al.*, 2006). Puesto que, el material compartido y el cruzamiento son compatibles se ha propuesto como una alternativa merecedora de una regulación administrativa más laxa que la transgénesis. A pesar de esto, su éxito en el mercado sigue siendo anecdótico.

Edición genética y genómica: la aparición de la tecnología CRISPR Cas9 ha supuesto una gran revolución abriendo las puertas a una edición genética a la carta de los cultivos en un marco temporal realista (Tuncel *et al.*, 2025). Aquí, las nucleasas bacterianas de tipo Cas9 son capaces de generar inserciones y/o deleciones, así como cambios de bases puntuales en regiones discretas y localizadas del ADN hacia donde las lleva un ARN guía. En general, este tipo de edición requiere un conocimiento previo de las razones últimas y mínimas responsables de la tolerancia, es decir un conocimiento exhaustivo del gen y su entorno cromosómico, que no siempre se tiene. En todo caso, su ventaja principal es que permite trabajar directamente en la variedad comercial de élite, reduciendo a la mitad los tiempos de la mejora clásica, ciclos de 4 a 6 años. Además, los avances prácticamente diarios en generación y puesta a punto de editores genéticos ofrecen infinitas posibilidades de edición. Por otra parte, el desarrollo de sistema de edición que no requieren integración en el genoma diana y que, por lo tanto, no pueden considerarse

Los avances prácticamente diarios en generación y puesta a punto de editores genéticos ofrecen infinitas posibilidades de edición

aproximaciones transgénicas, dotan a esta tecnología de una versatilidad y rapidez sin parangón para generar variedades climáticamente resilientes (Ndudzo *et al.*, 2024; Saini *et al.*, 2023).

Por último, las *aproximaciones ortogonales* ofrecen la posibilidad de activar la respuesta de la planta de

una manera puntual, restringida en espacio y tiempo optimizando el balance de recursos sin que exista una penalización en la productividad. En este tipo de técnicas un elemento exógeno totalmente artificial se usa como disparador de la tolerancia únicamente a demanda del agricultor, cuando este lo considera necesario. Así, por ejemplo, se puede introducir un elemento de respuesta a un químico simple o un herbicida que active la respuesta de tolerancia cuando la planta es tratada con el químico de elección. Esta tecnología se ha ensayado exitosamente en respuesta a sequía con la modificación ortóloga de los pares receptor-ligando para la fitohormona ácido abscísico (ABA) (Vaidya *et al.*, 2019). En combinación con la edición genética se pueden crear circuitos de respuesta al estrés inexistentes inicialmente en la planta y que ayuden a la misma a disparar una respuesta necesaria ante un estrés ambiental.

La combinación de estrategias extrínsecas, como las predicciones meteorológicas a largo plazo y la monitorización del estado fisiológico de los cultivos con cámaras espectrales, drones, etc., con todo el abanico de tecnologías intrínsecas que emanan de la genética, biología molecular y bioquímica de plantas, a su vez complementadas con el uso de nuevos compuestos bioactivos, “biologicals” será fundamental para diseñar cultivos climáticamente adaptados que configuren la agricultura del futuro. En este sentido, se habla de un cambio disruptivo hacia una agricultura donde los usos tradicionales y las tecnologías de vanguardia se entremezclen para mejorar de manera decidida los sistemas agrícolas para que sean más productivos, sostenibles y contribuyan a la trazabilidad y seguridad alimentaria global (Panel for the Future of Science and Technology, 2021).

Bibliografía

Queda a disposición del lector interesado en el correo electrónico: redaccion@editorialagricola.com

UN FUTURO AGRÍCOLA RESILIENTE

El cambio climático exige una respuesta urgente y multifacética en el sector agrícola. Los avances en la prevención y el combate del estrés térmico en plantas, desde la comprensión profunda de sus mecanismos moleculares hasta el desarrollo de nuevas herramientas (bio)-tecnológicas, nos ofrecen un camino prometedor hacia una agricultura más resiliente y sostenible. Es el momento de construir la agricultura del futuro, moderna y disruptiva. En ella han de combinarse manejos clásicos con técnicas de vanguardia para garantizar la productividad de las cosechas y la seguridad alimentaria en un planeta amenazado por el calentamiento global y el cambio climático.



POR EXCESO O POR DEFECTO

Greenstim®



ES PERFECTO

Equilibra el balance hídrico de las plantas en condiciones de sequía, heladas y salinidad.



COMERCIAL QUÍMICA MASSÓ, S.A.
C/ Viladomat, 321, 5ª planta - 08029 Barcelona
Tel.: 934 952 500 - E-Mail: masso@cqmasso.com

Más Massó Agro en:



www.massoagro.com