

VIDA RURAL

SUPLEMENTO | 1 abril de 2017 | AÑO XXIV | 5/2017

www.vidarural.es

Especial

NUEVA AGRICULTURA

Luis López Bellido. Catedrático Emérito. Universidad de Córdoba.

tecbo[®]m

Inscrito en el
Registro Oficial
de **Productos**
Fitosanitarios
N° ES00125

¡Insecticida natural contra mosca blanca!



- *Elevada eficacia.*
- *Cero residuos fitosanitarios.*
- *Cero resistencias.*
- *Cero plazo de seguridad.*
- *Apto para agricultura ecológica e integrada.*
- *Efecto potenciador, mojante y limpiador.*



grupo ● ●
agrotecnología[®]
naturalmente eficaz
www.agrotecnologia.net





Agricultura y cambio climático

Por JAIME LAMO DE ESPINOSA

Hace algo más de un año Luis López Bellido, catedrático y hombre de gran prestigio agrario, presentó su libro "Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono" (2015), que era una revisión sobre el cambio climático y la agricultura y los principales efectos que interactúan entre ambos, elaborada a partir de una recopilación de las principales publicaciones científicas actuales sobre la materia. Tuve la oportunidad de leerlo y comprendí enseguida la importancia del mismo para los lectores de **Vida Rural**. Por eso le pedí que fuera desgranando, poco a poco, su pensamiento para aprender de todos de sus consejos. Eso ha hecho durante varios números y hoy **Vida Rural** se enorgullece de ofrecer a sus lectores un suplemento con todos esos artículos.

En ellos se expone la situación actual del conocimiento sobre la compleja interacción entre el cambio climático y la agricultura. Se analizan las estrategias, tanto para su adaptación ante un posible nuevo escenario como del importante papel que puede desempeñar esta actividad económica en la mitigación de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero.

Su lectura nos llevará a la introducción sobre determinados conceptos básicos, como son los gases de efecto invernadero y el cambio climático, exponiéndose las incertidumbres y controversias que existen en la actualidad en relación al calentamiento global, sus efectos y estrategias de actuación. Luego se aborda la estrecha interrelación entre la agricultura y clima, y como ésta debe gestionarse frente al cambio climático y contribuir a atenuar sus efectos globales a través de estrategias de adaptación y mitigación, respectivamente.

Así, podremos deleitarnos en sus apartados: Influencia de la agricultura en el cambio climático, Impacto del cambio climático en la agricultura, Influencia del cambio climático en los suelos agrícolas, Estrategias de adaptación de los cultivos al cambio climático, El papel de la agricultura en las estrategias de mitigación del cambio climático, Regadío y cambio climático, Biodiversidad, recursos genéticos y cambio climático, Mejora genética, biotecnología y cambio climático, Efecto del cambio climático en las plagas y enfermedades y Efecto del cambio climático en las malas hierbas y los herbicidas. Todo un extenso panorama donde aprender.

López-Bellido sostiene que el cambio climático global es un hecho científicamente constatado, aunque sus efectos sobre los ecosistemas y las diferentes actividades humanas son aún inciertos a escala regional y local; lo cual está creando fuertes controversias tanto a nivel científico como en la opinión pública. Pero tras la reunión en París de la COP21 esta cuestión ya es indiscutible. Tanto más cuanto el Papa en su encíclica *Laudato Sí* ha incidido en el tema con extraordinaria autoridad. Resulta también evidente que, al menos en parte, la acción humana es responsable de esta alteración del clima, producida por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero.

La agricultura debe desempeñar un papel primordial en todas las políticas ambientales y de lucha contra el cambio climático. No es la causa del problema, forma parte de la solución. Y es más, lo peor que le podría pasar al cambio climático es que desapareciera la agricultura.

La agricultura tiene la peculiaridad de verse fuertemente afectada por el cambio climático debido a que es una actividad que depende en gran medida de las condiciones ambientales. Sin embargo, presenta otra singularidad: es el único sector, junto al forestal, que a través de la fotosíntesis puede secuestrar dióxido de carbono de la atmósfera y retenerlo en formas más o menos estables (biomasa y materia orgánica del suelo). Por este motivo, la agricultura debe desempeñar un papel primordial en todas las políticas ambientales y de lucha contra el cambio climático. No es la agricultura la causa del problema, forma parte de la solución. Y es más, lo peor que le podría pasar al cambio climático es que desapareciera la agricultura. Bienvenidas las páginas de López Bellido. Seguro que todos aprenderemos mucho con ellas. ■

EDITA:



PRESIDENTE: Eugenio Occhialini.
VICEPRESIDENTE: José M.ª Hernández.
DIRECTOR: Jon Zubia.

© EUMEDIA, S.A. REDACCIÓN, ADMINISTRACIÓN
Y PUBLICIDAD:
CLAUDIO COELLO, 16, 1.ª Dcha. - 28001 MADRID
TELEFOS.: 91 426 44 30/91 578 05 34.
TELEFAX: 91 575 32 97. - www.vidarural.es

VIDA RURAL

DIRECTOR:

Jaime Lamo de Espinosa. Dr. Ingeniero Agrónomo y Economista.
Catedrático ETSIA (UPM).

COMITÉ TÉCNICO-CIENTÍFICO:

Jaume Almacellas Gort, jefe del Laboratorio de Sanidad Vegetal de Cataluña.

Francisco José Arenas Arenas, técnico especialista titular en IFAPA Las Torres-Tomejil. Coordinador Red de Transferencia y Formación en Citricultura.
Pilar Barreiro Eiorza, catedrática en Ingeniería Agroforestal en ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.

Enrique García Escudero, jefe del Servicio de Investigación y Desarrollo Tecnológico Agroalimentario de La Rioja.

Francisco Javier García Ramos, profesor titular en Ingeniería Agroforestal de la Escuela Politécnica Superior de Huesca.

Jacinto Gil Sierra, catedrático en Ingeniería Agroforestal de la ETSI Agrónomos, Universidad Politécnica de Madrid.

Javier Hidalgo Moya, técnico especialista titular en IFAPA Alameda del Obispo y Coordinador de la Red Transforma Olivar.

Ignasi Iglesias Castellarnau, responsable de innovación varietal del IRTA.
Rafael Jimenez Díaz, catedrático de Patología Vegetal, ETSIAM.

Universidad de Córdoba.

Luis López Bellido, catedrático de Producción Vegetal, ETSIAM.
Universidad de Córdoba.

Jaume Lloveras Vilamanyà, catedrático de la Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària. Universidad de Lleida.

Santiago Planas de Martí, investigador del Centro Agrotecnio. GI Agricultura de Precisión. Universidad de Lleida.

Manuel Ruiz Torres, responsable del Departamento de Entomología en Laboratorio de Producción y Sanidad Vegetal en Jaén.

Victorino Vega Macías, técnico especialista en olivicultura en el IFAPA.
Miguel Urrestarazu Gavilán, profesor titular de Producción Vegetal en la Universidad de Almería.

Jesús Yuste Bombín, doctor ingeniero agrónomo. Investigador en viticultura. ITACYL. Valladolid.

REDACCIÓN:

redaccion@eumedia.es

Subdirector: **Luis Mosquera.**

Coordinación técnica: **Elena Mármod.**

Coordinación periodística: **Aranca Martínez.**

Redactores: **Alfredo López, Carmen Sánchez.**

DISEÑO GRÁFICO Y MAQUETACIÓN:

Marina G. Angulo.

DEPARTAMENTO PUBLICIDAD:

publicidad@eumedia.es

Alberto Velasco, Alberto Rabasco, Cristina Cano.

DELEGACIONES COMERCIALES:

Cataluña: **Sergio Munill.**

Teléf.: 93 246 68 84. Fax: 93 246 68 84.

DPTO. ADMINISTRACIÓN Y SUSCRIPCIONES:

Concha Barra (administración), **Mariano Mero** (informática y suscripciones).

Mercedes Sendarrublas y Verónica Casas (suscripciones).

suscripciones@eumedia.es

ISSN: 1133-8938. Depósito Legal: M-3390-1994

IMPRESIÓN: NUEVA IMPRENTA.

EUMEDIA, S.A., no se identifica necesariamente con las opiniones recogidas en los artículos firmados.
© Reservados todos los derechos fotográficos y literarios.



Vida Rural es miembro de Eurofarm, Asociación de las revistas agrarias más importantes de Europa.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta publicación solo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la ley. Dirijase a CEDRO (Centro Español de Derechos Reprográficos, www.cedro.org) si necesita fotocopiar o escanear algún fragmento de la misma.

SUMARIO

NUEVA AGRICULTURA



Por **LUIS LÓPEZ BELLIDO.** Catedrático Emérito. Universidad de Córdoba.

6

Influencia de la agricultura en el cambio climático

12

Impacto del cambio climático en la agricultura

16

Influencia del cambio climático en los suelos agrícolas

21

Estrategias de adaptación de los cultivos al cambio climático

26

El papel de la agricultura en las estrategias de mitigación del cambio climático

32

Regadío y cambio climático

37

Biodiversidad, recursos genéticos y cambio climático

41

Mejora genética, biotecnología y cambio climático

47

Efecto del cambio climático en las plagas y enfermedades

53

Efecto del cambio climático en las malas hierbas y los herbicidas

NUEVA SERIE 6 RCSHIFT. TRANSMISIÓN DE VANGUARDIA CON LA MAYOR COMODIDAD.



Serie 6 Agrotron. Introduciendo su nueva transmisión totalmente robotizada.

Para muchas de las aplicaciones agrícolas, el manejo del tractor y la comodidad del cambio de marchas son de vital importancia. Con la nueva Serie 6 RCshift (seis modelos que abarcan desde 156 CV hasta 226 CV), DEUTZ-FAHR ha redefinido el confort de la transmisión en esta gama de potencia. La nueva caja de cambios totalmente automática RCshift ofrece la misma comodidad de cambio de marchas que un coche de alta gama. Es posible elegir entre tres modos de conducción: manual, semiautomático para el trabajo en campo o completamente automático para trabajos de transporte. Además, es posible alcanzar una velocidad máxima de 50 km/h a régimen ultraeconómico de motor (1.480 rpm). El nuevo motor Deutz 6.1 Fase 4 es extremadamente eficiente. Tanto el nuevo eje delantero suspendido como el nuevo y único sistema de frenos DEUTZ-FAHR garantizan la conducción más segura. Cuando se trata de comodidad en cabina, es posible elegir entre la cabina MaxiVision o MaxiVision 2. Si quiere trabajar un paso por delante tanto en velocidad como en comodidad contacte hoy mismo con su concesionario DEUTZ-FAHR.

Para más información visite deutz-fahr.com

DEUTZ-FAHR es una marca de  SDF



Influencia de la agricultura en el cambio climático



La agricultura ha sido siempre un sector estratégico para la economía de un país, cualquiera que sea su nivel de desarrollo. No obstante, en las últimas décadas ha sido objeto de duras críticas por diversos sectores sociales, como si su actividad fuese algo nocivo, siendo para muchos uno de los principales responsables del incremento de los niveles de gases de efecto invernadero (GEI). Sin embargo, gracias a la fijación de CO₂ de los cultivos a través de la fotosíntesis se producen alimentos y otros productos agrícolas esenciales. La sociedad actual parece haber olvidado que a la agricultura corresponde directamente proporcionar a los habitantes del mundo el alimento y la energía para que puedan realizar su actividad diaria, además de otros muchos productos, como tejidos, fármacos, etc.

El descubrimiento de la agricultura hace unos 10.000 años introdujo a la humanidad por un camino que iba a transformar la naturaleza. La agricultura y otras innovaciones empezaron a espolear el desarrollo de grandes civilizaciones que, a su vez, produjeron un impacto cada vez mayor sobre el medio ambiente. Gracias a estas innovaciones aumentó enormemente la producción de alimentos y los niveles demográficos. Con ello llegó el primer deterioro medioambiental serio debido a la intervención humana. Por primera vez, el impacto humano se producía a gran escala: la tala de bosques para desbrozar tierras de

labranza y pastizales, la erosión de las faldas de las colinas donde la deforestación y el pastoreo excesivo desestabilizaron los suelos. Mucho antes de que comenzara la era industrial, a finales del siglo XVIII, los seres humanos nos habíamos convertido en una fuerza capaz de transformar la configuración del paisaje y en un factor activo en el funcionamiento del sistema climático (López-Bellido 2015).

Las tierras agrícolas ocupan el 37% de la superficie terrestre del planeta. La mayor parte de esta área se dedica a pastos (69%), ocupando las tierras de cultivo el 28%. En las últimas cuatro décadas, las tierras de cultivo han aumentado casi 500 millones de ha procedentes de otros usos de la tierra. Durante este período, anualmente un promedio de 6 millones de ha de tierras forestales y 7 millones de ha de otras tierras se convirtieron en agrícolas; y este cambio se produjo en gran parte de los países en desarrollo. La cantidad de tierras de cultivo a escala mundial ha aumentado en un 8% desde la década de 1960, a su actual nivel en torno a 1.400 millones de ha. Este incremento ha sido el resultado neto de una disminución del 5% en los países desarrollados y un aumento del 22% de las tierras de cultivo en los países en desarrollo. Esta tendencia parece que continuará en el futuro. Smith *et al.* (2007) estiman que 500 millones de ha adicionales se convertirán en agrícolas durante el período 1997-2020, sobre todo en América Latina y África subsahariana. La presión demográfica, el cambio tecnológico, las políticas agrícolas, el crecimiento económico y



la disminución de la relación coste/precio han sido los principales factores de los cambios que se han producido durante las últimas décadas en el sector de la agricultura. Esto ha supuesto globalmente un fuerte aumento del ritmo de producción y demanda en un mundo más poblado, incrementándose el promedio mundial de calorías per cápita diario, aunque con notables excepciones regionales. Sin embargo, este crecimiento ha sido a costa de una mayor presión sobre el medio ambiente y el agotamiento de los recursos naturales, mientras que no ha tenido éxito en la solución de los problemas de la seguridad alimentaria y

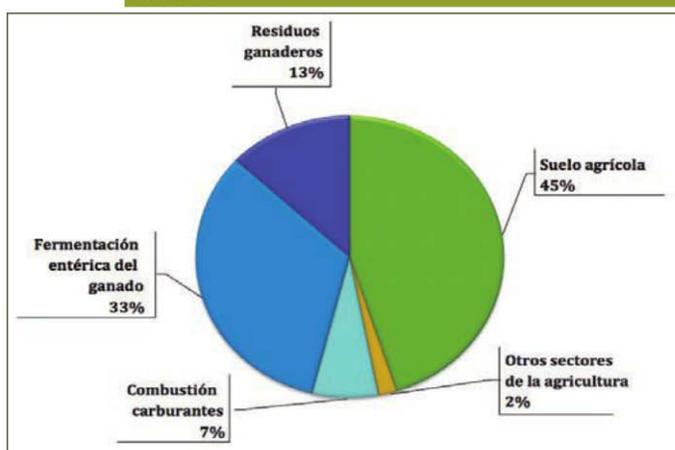
la desnutrición infantil sufrida en los países pobres (López-Bellido, 2015).

Emisiones de GEI

La agricultura libera a la atmósfera grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Se estima que ésta genera del 10-12% de las emisiones antropogénicas de los GEI. Tales emisiones están dominadas por los flujos de N₂O y CH₄, con una menor contribución del CO₂. La **figura 1** muestra la contribución de los distintos sectores de la agricultura a las emisiones de GEI.

Según Wolfe (2013), las emisiones anuales de N₂O y CH₄ de la agricultura mundial representan alrededor del 60% y 50% del total global de las emisiones antropogénicas de estos dos gases invernadero, respectivamente. En relación al CO₂, los flujos anuales entre la atmósfera, la vegetación y las tierras agrícolas son muy elevados, considerándose un flujo neto equilibrado, aproximadamente, con unas emisiones netas de CO₂ procedentes del suelo, que representan alrededor del 1% de las emisiones antropogénicas. El CO₂, en comparación con los otros GEI, interviene de forma cíclica en

FIG 1. Contribución de la agricultura a las emisiones de GEI.

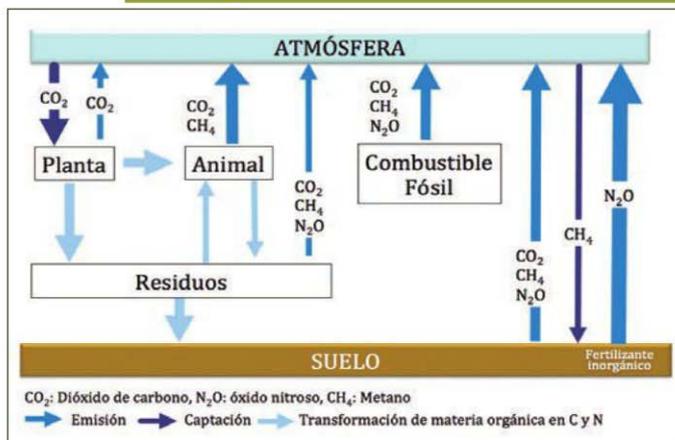


cantidades más grandes a través de los sistemas de cultivos agrícolas. La emisión neta de CO₂ es pequeña, en comparación con su ciclo total, en la agricultura y se debe al uso de la energía en las explotaciones y a la fabricación y el transporte de los inputs agrícolas, en su mayoría.

La agricultura intensiva ha sido

responsable del descenso de materia orgánica en las tierras agrícolas, y de la consiguiente liberación de C orgánico a la atmósfera en forma de CO₂. El CO₂ es el de mayor incremento de los GEI. Las plantas fijan el CO₂ atmosférico vía fotosíntesis y respiran para devolver parte de él a la atmósfera. Cuando la biomasa de las plantas es recolectada, quemada o retornada al suelo, mucho del C de la materia vegetal es oxidado y liberado en forma de CO₂ a la atmósfera como consecuencia de la descomposición y respiración de los microorganismos del suelo o la combustión directa (**figura 2**). Las emisiones de CH₄ por la agricultura se deben fundamentalmente a la digestión fermentativa de los rumiantes; siendo otras fuentes de relevancia la degradación anaerobia de residuos orgánicos del suelo, los estiércoles almacenados, el arroz cultivado bajo condiciones de inundación y la combustión de la biomasa. El CH₄ puede ser producido por bacterias metanógenas bajo condiciones anaeróbicas del suelo y consumido a través de oxidación por microorganismos metanótrofos bajo condiciones aerobias del suelo. Los suelos agrícolas de secano representan

FIG 2. Rutas de fuentes y sumideros de GEI asociados con la agricultura.



un sumidero neto de CH₄ debido a sus condiciones oxidativas predominantes. En la agricultura de regadío, períodos prolongados de inundación (encharcamiento), asociados con un incremento de la temperatura, tendrán mayor potencial para incrementar las emisiones de CH₄, particularmente



cuando existe gran cantidad de residuos de cultivo. Por tanto, el uso de estrategias para un adecuado manejo del agua que permitan temporalmente condiciones oxidantes del suelo son esenciales para minimizar las emisiones de CH₄. Los métodos para reducir las emisiones del ganado, la fuente principal de CH₄, incluyen: la mejora genética, los cambios en la formulación de la alimentación animal y la mejora del manejo del estiércol.

Las emisiones de N₂O generadas por los suelos son el subproducto del proceso biológico natural de desnitrificación (conversión de NO₃⁻ a N₂). Los factores más importantes que afectan a las emisiones de N₂O de los suelos son de carácter ambiental y de manejo de cultivo. Entre los más importantes de los primeros estarían las condiciones climáticas (temperatura y precipitación), el contenido de C orgánico del suelo, su textura y estructura (relación macroporos/microporos y su consiguiente influencia en la retención de humedad y difusión del O₂), la abundancia de nitratos, el pH del suelo, los ciclos de congelación y descongelación y la abundancia y la actividad de los microorganismos.

En general se puede producir un incremento potencial de las emisiones de N₂O procedente de los suelos a medida que la temperatura se incrementa en el intervalo de 5 a 25°C; sin embargo la tasa de emisión se reduce cuando el contenido de humedad del suelo, expresado en porcentaje de poros con agua, se reduce en el rango de 60 al 40%. Por debajo del 40% y con valores superiores a 90% la tasa relativa de emisiones de N₂O es despreciable, maximizándose entre el 60 y 70%. Bajo las condiciones de la agricultura de secano la influencia dependerá de la respuesta relativa a la temperatura y de la tasa de secado del suelo. Ello sugiere que

en las regiones frías y secas, las emisiones de N_2O pueden ser menores que en las zonas húmedas tropicales y subtropicales. Sin embargo, bajo las condiciones de riego, donde no existen limitaciones en el contenido de agua, las temperaturas más altas asociadas con un cambio climático proyectado podrían aumentar las emisiones de N_2O a menos que los niveles de N inorgánico del suelo sean estrechamente controlados (Baldock *et al.* 2012).

Las emisiones de N_2O se incrementan cuando el N disponible en el suelo excede a los requerimientos del cultivo, especialmente bajo condiciones de humedad, existiendo algunos estudios que demuestran que el suministro de N vía inclusión de leguminosas en la rotación de cultivo las reduce (Cowie *et al.* 2012).

Muchas de las prácticas de manejo de los cultivos pueden influir en las emisiones de GEI, bien directamente afectando a la disponibilidad de nitratos o indirectamente mediante la modificación del microclima del suelo y los ciclos de C y N. Existen pocos estudios de larga duración que comparen los sistemas de cultivo en relación con las emisiones de GEI. Muchos trabajos han medido sólo emisiones periódicas, en vez de usar una base anual. El margen de incertidumbre de las emisiones de N_2O , especialmente en las estimaciones a gran escala, puede llegar a ser del $\pm 50\%$.

Aunque la mayoría de las investigaciones se han centrado en las emisiones netas de N_2O , existen numerosos estudios sobre los flujos netos negativos de N_2O (flujos de la atmósfera a la tierra). Ello indica que los factores que regulan el balance suelo-atmósfera de N_2O no son todavía bien conocidos y requieren más investigación. Los futuros resultados podrían proporcionar una información valiosa para el manejo y la biología de los suelos que mejorarán las condiciones



favorables para el consumo neto de N_2O (Snyder *et al.* 2009).

Previsiones futuras

Cabe esperar que las emisiones anuales de GEI procedentes de la agricultura aumenten en las próximas décadas debido a la demanda creciente de alimentos y a los cambios en la dieta. Sin embargo, las prácticas de manejo mejoradas y las tecnologías emergentes podrían permitir una reducción de las emisiones por unidad de alimento producida. Las futuras tendencias en el sector de la agricultura tendrán implicaciones en las emisiones o remociones de GEI. Smith *et al.* (2007) las han resumido en los siguientes escenarios:

1) Se espera que el crecimiento en la productividad de la tierra continúe, aunque a un ritmo decreciente debido a la saturación de los avances tecnológicos y a un mayor uso de las tierras marginales, menos productivas. El uso de estas tierras marginales podrá aumentar el riesgo de erosión y la degradación del suelo; sin embargo los efectos de la erosión del suelo en las emisiones de CO_2 son muy inciertos.

2) Las nuevas mejoras en la productividad requerirán un uso creciente del riego y los fertilizantes, con la consecuencia de un aumento de la demanda de energía. También el riego y

la fertilización nitrogenada pueden causar un aumento de las emisiones de GEI.

3) La producción industrial, cada vez más común, de carne de vacuno, pollo y de cerdo, implica un aumento de la producción de estiércol con el consiguiente incremento de las emisiones de GEI. Esto es más evidente en regiones en desarrollo como Asia meridional y oriental y América Latina.

4) Los cambios en las políticas agrarias y los patrones regionales de producción y demanda están provocando un incremento del comercio internacional de productos agrícolas. Con ello se espera que aumenten las emisiones de CO_2 , debido a un mayor uso de la energía para el transporte.

Según las proyecciones actuales, la población mundial podría acercarse a los 9.000 millones en 2050. Debido a estos aumentos y a los cambios en los patrones de consumo, algunos análisis estiman que la producción de cereales tendrá que duplicarse en las próximas décadas. El logro de estos aumentos en la producción de alimentos requerirá un mayor uso de fertilizantes nitrogenados, lo que dará lugar a posibles incrementos en las emisiones de N_2O , a menos que se utilicen técnicas de fertilización más eficientes. Asimismo el aumento de la demanda de alimentos de origen animal podría presumiblemente también incrementar el CH_4 de la fermentación entérica.

CUADRO I. ESTRATEGIAS DE MITIGACIÓN AGRONÓMICA PARA LOS TRES PRINCIPALES GASES DE EFECTO INVERNADERO (GEI) (ADAPTADO DE WOLFE, 2013).

GEI	Principales fuentes de emisiones	Acciones para la mitigación
Óxido nitroso	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones de N fertilizante excesivas o a destiempo. • Suelos húmedos y estiércoles. 	<ul style="list-style-type: none"> • Aplicaciones fraccionadas de fertilizantes, optimización de la época y cantidad aplicada según los análisis de suelos. • Uso de leguminosas (fijación biológica del N) en las rotaciones. • Uso de cultivos de cobertura de invierno para limpiar y almacenar N en la zona radicular. • Mejorar el manejo del estiércol (por ejemplo mantenerlo cubierto y seco) o usar los estiércoles como fuente de energía en digestores anaeróbicos. • Mejorar el drenaje del suelo.
Metano	<ul style="list-style-type: none"> • Cultivo de arroz inundado. • Fermentación entérica del ganado rumiante. • Estiércoles húmedos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Drenar los campos de arroz de forma intermitente o emplear diferentes opciones de producción de secano con riego donde sea factible. • Incorporar materiales orgánicos durante el período seco de la producción de arroz. • Desarrollar nuevas estrategias de alimentación animal y enmiendas de los piensos para reducir las emisiones de CH₄ por el ganado. • Uso de cubiertas o tanques de almacenamiento de estiércoles y almacenaje a baja temperatura.
Dióxido de carbono	<ul style="list-style-type: none"> • Deforestación y quema de residuos. • Descomposición de la materia orgánica del suelo. • Uso de combustibles fósiles y electricidad para el transporte y los edificios. • Uso de combustibles fósiles en la fabricación de inputs agrícolas de alto consumo energético, como los fertilizantes nitrogenados sintéticos, pesticidas y herbicidas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Reducir o minimizar las prácticas agrícolas de roza y quema. • Reducir el laboreo del suelo (ralentiza la descomposición de la materia orgánica y reduce el uso de combustibles para los tractores). • Conservar e incorporar los residuos del cultivo. • Incrementar los residuos de cultivo mediante el incremento de los rendimientos y la biomasa, uso de cultivos de cobertura de invierno de alta biomasa y rotaciones de cultivo. • Uso de fuentes de fertilizantes ricas en C, compost o biochar. • Mejora del uso eficiente de la energía en la explotación mediante el diseño y aislamiento de los edificios; equipos y vehículos energéticamente eficientes. • Minimizar el uso de inputs agrícolas de alto coste energético (por ejemplo uso de fertilizantes orgánicos más que sintéticos). • Uso de fuentes de energía alternativa, tales como cultivos energéticos, digestión anaeróbica o pirólisis de los estiércoles y residuos de la explotación, energía solar y eólica.

No obstante, a pesar de todo lo dicho anteriormente, la agricultura tiene un importante papel que desempeñar frente al cambio climático, mitigando sus causas y adaptándose a su inevitable impacto. La agricultura puede contribuir a la mitigación minimizando las emisiones de GEI, secuestrando C atmosférico y produciendo biocombustible sostenible. El objetivo global de la respuesta al cambio climático es garantizar la seguridad alimentaria y otras actividades humanas esenciales, a la vez que se protegen los ecosistemas y sus servicios vitales. El sector agrícola tiene un reto significativo: incrementar la producción global con el propósito de proporcionar seguridad alimentaria a 9.000 millones de personas para mediados del siglo XXI, mientras protege también el medio ambiente y mejora la función global de los ecosistemas.

Existen numerosas opciones de manejo para la mitigación de los GEI emitidos por la agricultura; entre ellas están la

reducción de la deforestación y la quema de residuos de los cultivos, la mejora de la eficiencia en el uso de la energía y la reducción de los inputs que requieren un elevado consumo para producirlos, tales como los fertilizantes de N sintético. Otras soluciones clave incluyen la reducción del laboreo, la mejora de la eficiencia en el uso del N fertilizante y el manejo del estiércol y de los abonos orgánicos, la mejora del manejo del agua, los cultivos de cobertura de invierno y la inclusión de las leguminosas y los cultivos perennes en los esquemas de la rotación.

El **cuadro I** resume las opciones más relevantes para la mitigación de las emisiones de N₂O, CH₄ y CO₂. Muchas de estas opciones implican un incremento del secuestro de C por el suelo, lo cual no sólo juega un importante papel en la mitigación del cambio climático, sino que también mejora la salud del suelo, la productividad de los cultivos y la capacidad de adaptación al cambio climático. Los sistemas de producción de

maíz, trigo y arroz son los de mayor importancia, debido a que en conjunto representan alrededor del 50% del consumo de todo el N fertilizante producido a escala mundial; por ello hay un especial interés por mejorar la eficiencia de su uso en estos cultivos. ■

BIBLIOGRAFÍA

Baldock JA, Wheeler I, McKenzie N, McBratney A. 2012. Soil and climate change: potential impacts on carbon stocks and greenhouse gas emissions, and future research for Australian agriculture. *Crop & Pasture*, 63: 269-283.

Cowie A, Eckard R, Eady S. 2012. Greenhouse gas accounting for inventory, emissions trading and life cycle assessment in the land-based sector: a review. *Crop & Pasture Science*, 63: 284-296.

López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.

Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenko V, Schneider U, Towprayoon S. 2007. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118: 6-28.

Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 133: 247-266.

Wolfe DW. 2013. Contribution to climate change solutions from the agronomy perspective. En "Handbook of climate change and agroecosystems" (D. Hillel y C. Rosenzweig, eds.). American Society of Agronomy. Imperial College Press. Londres. pp 11-29.

La agricultura responsable y sostenible, clave para asegurar la competitividad del sector y la seguridad alimentaria

La capacidad de alimentar a la creciente población mundial frente a la crisis climática dependerá de la capacidad para incrementar la producción agrícola y ganadera, manteniendo la salud de los suelos. Hacer frente a esta realidad depende de todos (gobiernos, empresas, también de la población en general). Para MAPFRE, contribuir a este fin no es algo ajeno a su espíritu ni a su esencia, pues no olvidemos que la compañía nació en 1933 como una mutua de seguros agrarios.



Por **SARA FERNÁNDEZ QUINTANO.**

Jefe de Departamento de Medio Ambiente de MAPFRE.

El entorno rural sigue siendo un área de oportunidades tanto para la actividad aseguradora como para la mitigación del cambio climático al considerarse, los suelos agrícolas y forestales, herramientas clave para la acumulación y fijación de carbono. La agricultura responsable y sostenible debe evitar la degradación del suelo y mejorar la biodiversidad de la tierra, además de identificar el valor social y medioambiental, ser económicamente viable y mejorar la calidad de vida de la sociedad.

La creciente sensibilización de la sociedad ante desastres ecológicos como el sucedido en la mina de Aznalcóllar, en Sevilla en 1998, cuyo coste de reparación superó los 75 millones de euros, se ha traducido en nuevas obligaciones de carácter medioambiental. De esta manera, la ley se articula con el fin de “quien contamina paga y repara”, y constituye la herramienta para identificar y contener los riesgos ante escenarios accidentales y potenciales, así como para definir una garantía financiera que asegure la reparación del medio natural.

MAPFRE, como compañía socialmente responsable, contribuye eficazmente a mejorar la competitividad del tejido empre-

sarial, potenciando la eco-innovación, entendida ésta como la búsqueda activa de estrategias, que permiten a las empresas españolas ser pioneras en un mercado y en una sociedad cuyas inquietudes ambientales y sociales crecen día a día. MAPFRE también participa de este espíritu, que se hace patente a través de los compromisos adheridos por la compañía en la lucha contra el cambio climático, la preservación de la biodiversidad y la responsabilidad medioambiental. Los compromisos se ponen de manifiesto, entre otras acciones, a través de la creación de productos y servicios aseguradores de carácter ambiental, que amparan la responsabilidad de nuestros asegurados por los daños que puedan causar con su actividad. Asimismo, se han desarrollado productos aseguradores enfocados al fomento de la movilidad sostenible, como por ejemplo la póliza ecológica de automóviles.

Además, existen otros productos específicos para explotaciones agropecuarias y forestales que utilizan las TIC (drones, satélites, GPS, etc.), centrales solares, fotovoltaicas, parques eólicos y plantas de cogeneración, todos ellos relacionados con el fomento de las energías renovables, la eficiencia y el ahorro energético.



Impacto del cambio climático en la agricultura



Los impactos ambientales sobre la agricultura debido al incremento de la concentración de CO₂ y de otros gases de efecto invernadero (GEI) son muy debatidos. Además de la integridad del medio ambiente, existe una preocupación importante respecto al impacto potencial del cambio climático sobre la capacidad de los sistemas agrícolas, que incluyen los recursos de suelo y agua para suministrar alimentos a hombres y animales, producir fibra y combustibles y el mantenimiento de los servicios que proporcionan los ecosistemas. Muchos estudios sostienen que los cambios en el clima están ya afectando a la sostenibilidad de los sistemas agrícolas y alterando la producción.

Los cambios ambientales más implicados en la agricultura son: la temperatura, la precipitación y la concentración de CO₂ atmosférico. La investigación sobre el impacto del cambio climático en la agricultura frecuentemente se realiza de dos formas. Por un lado, estudios dirigidos principalmente a analizar los efectos directos para una región climática determinada en un cultivo específico, sobre todo los referidos a los outputs agrícolas, tales como el rendimiento y la calidad. Por otro, se intenta encontrar algunos principios generales de respuesta (Newton *et al.* 2007). Existen variaciones entre cultivos en su respuesta a los cambios de CO₂, temperatura y precipitación, que junto a las diferencias regionales en la previsión del clima, crean una situación en la cual evaluar la respuesta puede ser más complicada. El reto es entender las relaciones de los parámetros del cambio climático (interacciones entre temperatura, CO₂ y precipitación) y sus efectos sobre el crecimiento y desarrollo de las plantas, y al igual que sobre los estrés bióticos producidos por malas hierbas, plagas y enfermedades (Hatfield *et al.* 2011).

Según la Sociedad Americana de Agronomía (ASA, CSSA, SSSA, 2011), los principales efectos del clima sobre los cultivos son:

- Las altas temperaturas y las olas de calor que afectan al crecimiento y

desarrollo de los cultivos, incluyendo su potencial de rendimiento. Una variable crítica es el número de días que un cultivo está expuesto a temperaturas que exceden los umbrales específicos durante los estados críticos de crecimiento (por ejemplo, floración, polinización, fructificación o llenado del grano), reduciendo los rendimientos y calidad de la producción.

- Los cambios en los modelos de precipitación que alteran el suministro de agua para los cultivos. Se prevé que el cambio climático desestabilice los regímenes de lluvia preexistentes en muchas regiones, produciéndose cambios en la duración e intensidad de los episodios de inundación y períodos de sequía. Esto es probable que incremente la extensión e intensidad de la erosión, encharcamiento y períodos de sequía, con efectos negativos en los rendimientos.

- El incremento de las concentraciones de CO₂ atmosférico, que estimula frecuentemente el crecimiento de las plantas, puede tener un efecto positivo en algunos cultivos, siendo un factor dependiente de la especie. La fotosíntesis, el crecimiento y el rendimiento de las plantas C3, tal como el trigo y el arroz, tienden a beneficiarse más del elevado CO₂ que las plantas C4 como el maíz (figura 1). Una concentración alta de CO₂ en la atmósfera también incrementa la eficiencia en el uso del agua por los cultivos. Esto es debido a que con concentraciones superiores de CO₂ en la atmósfera, las hojas pueden obtener el CO₂ necesario para la

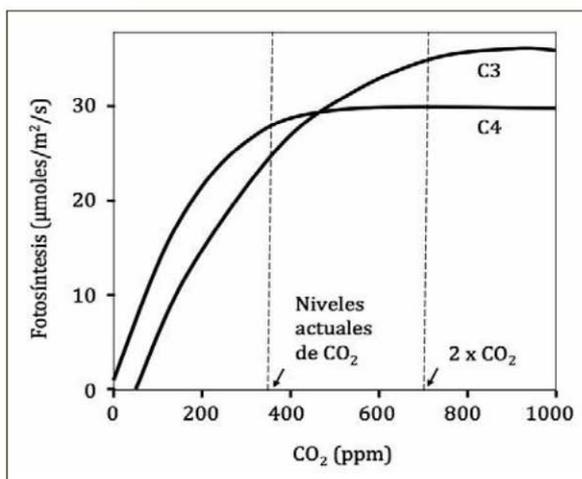


fotosíntesis con los estomas menos abiertos. Por lo tanto, se pierde menos agua por cada molécula de CO₂ asimilada. Sin embargo, pocos estudios

han intentado cuantificar este beneficio en condiciones de campo. Un estudio realizado en soja con los niveles de CO₂ esperados para 2050 mostró un aumento de la eficiencia en el uso del agua del 12,5% de promedio en cuatro años. Un aumento similar de la eficiencia en el uso del agua en el maíz haría descender la demanda de agua en el año 2050 en 112 mm (Ort y Long, 2014).

- Los cambios en las temperaturas, precipitación y CO₂ interaccionarán con otros estreses ambientales, tales como el ozono (O₃), los cuales tienden a reducir la productividad de los cultivos. Los impactos del cambio climático sobre la agricultura, a medio y largo plazo, son con frecuencia difíciles de analizar separadamente de las influencias no climáticas relacionadas con la gestión de los recursos. Sin embargo, hay una evidencia creciente que procesos tales como las variaciones fenológicas, las modificaciones de duración de la

FIG 1. Efecto de la concentración de CO₂ atmosférico en la fotosíntesis por unidad de área foliar de plantas C3 y C4. (Adaptado de Wolfe y Erickson, 1993)



estación de crecimiento y los cambios de cultivo pueden estar relacionados con el cambio climático. Existe también un aumento de las catástrofes debido a la frecuencia cada vez mayor de algunos eventos extremos, los cuales pueden ser atribuidos al cambio climático.

Los impactos potenciales positivos del cambio climático sobre la agricultura están generalmente relacionados con estaciones de crecimiento más largas, nuevas oportunidades de cultivo e incremento de la fotosíntesis y la fertilización de CO₂. Estos posibles beneficios se contraponen con los impactos potencialmente negativos, que incluyen el incremento de la demanda hídrica y de los períodos de déficit hídrico, un mayor requerimiento de pesticidas, mayores daños en los cultivos y menos oportunidades de cultivo en algunas regiones. En general, los cambios en los niveles del CO₂

Es necesario mejorar drásticamente la forma en la que gestionamos los recursos de la agricultura. Mientras que el impacto del cambio climático será positivo en algunas áreas del mundo, en otras áreas los efectos serán adversos y será necesario mejorar las prácticas de manejo del suelo y el agua.

atmosférico y el incremento de las temperaturas están cambiando la calidad y composición de los cultivos y también la proporción entre las plagas y

enfermedades nativas y las foráneas. Asimismo, el incremento en la concentración de O₃ troposférico relacionada con el cambio climático puede tener impactos negativos significativos sobre la agricultura, principalmente en las latitudes medias del norte (IPCC, 2007).

Aunque el impacto económico del cambio climático sobre la agricultura es muy difícil de determinar, debido a los efectos que tienen las políticas y los mercados y el continuo desarrollo tecnológico en las técnicas agrícolas, hay evidencias de una mayor vulnerabilidad económica de los sistemas agrícolas. Las técnicas de manejo en los agrosistemas pueden contrarrestar los efectos del cambio climático, aunque también pueden exacerbar sus efectos. Por consiguiente, dichas acciones de manejo jugarán en el futuro un importante papel en las medidas a tomar para la adaptación al cambio climático.

En consecuencia, es necesario mejorar drásticamente la forma en la que gestionamos los recursos de la agricultura. Mientras que el impacto del cambio climático será positivo en algunas áreas del mundo, tales como aquellas que pueden ganar una mayor estación de crecimiento y que además poseen suficientes recursos hídricos; en otras áreas los efectos serán adversos y será necesario mejorar las prácticas de manejo del suelo y el agua (López-Bellido, 2015).

Estudios realizados

El impacto real del cambio y la variabilidad climática, que son observados en la diversidad de los sistemas agrícolas, son en



CUADRO I. SENSIBILIDAD DEL TRIGO Y LA CEBADA A LOS CAMBIOS CLIMÁTICOS (ADAPTADO DE LEWIS Y WITHAM, 2012).

Variable	Sensibilidad
Temperatura	En las latitudes más altas, las temperaturas más cálidas incrementan la longitud de la estación de crecimiento y el área de tierras adecuadas para los cultivos. En las áreas donde las temperaturas son próximas a la máxima fisiológica para los cultivos, tal como las regiones estacionalmente áridas y tropicales, las temperaturas más altas dan lugar al incremento del estrés térmico en los cultivos y a la pérdida de agua por evaporación, provocando un impacto negativo en el rendimiento.
Temperatura extrema	Hay una temperatura umbral clave por encima de la cual es alterada la fisiología del cultivo, y períodos cortos de intenso calor pueden destruir los cultivos. Es crítica la época de temperaturas extremas respecto a la estación de crecimiento. Para el trigo, temperaturas por encima de 35°C durante la floración tienen severos efectos sobre la reducción del rendimiento. El crecimiento de las plántulas de la cebada es inhibido a temperatura por encima de 32°C y puede ocurrir la mortalidad por encima de 35°C. El crecimiento del grano es también restringido con temperaturas por encima de los 35°C.
Precipitación y disponibilidad hídrica	La seguridad del suministro de agua es esencial para el rendimiento de los cultivos. Históricamente muchas de las mayores reducciones en la productividad de los cultivos han sido atribuidas a eventos anómalamente bajos de precipitación. Una disminución en el número de días lluviosos causa estrés hídrico y conduce a reducciones del rendimiento, mientras un mayor número de días de lluvia en áreas secas dan lugar a un incremento del rendimiento.
Lluvias fuertes e inundaciones	Eventos persistentes de lluvias, que ocasionan inundaciones, pueden aniquilar cultivos enteros. Lluvias persistentes hacia el final de la estación de crecimiento, que ocasionan infecciones de enfermedades fúngicas en la espiga, han sido relacionadas con una más baja calidad del grano. Las inundaciones pueden retrasar las operaciones de cultivo e impedir la recolección.
Tormentas/alto impacto climático	Tormentas severas (incluidas oleadas de tormentas) pueden causar daños directos, potencialmente devastadores, a los cultivos.
Otros	Los cultivos de plantas C3 (trigo, cebada, avena y arroz) pueden tener ventaja con las crecientes concentraciones de CO ₂ atmosférico al incrementar la absorción de CO ₂ y mejorar la fotosíntesis, lo cual produce un incremento del rendimiento. Los cultivos de plantas C4 (maíz, sorgo, mijo, caña de azúcar) no se benefician del aumento de la concentración de CO ₂ atmosférico. La contribución de temperatura, precipitación y humedad afecta a la propagación de las plagas y enfermedades, que a su vez afectan a los cultivos. Los cambios del clima y su ocurrencia influyen en las diferentes plagas y enfermedades de forma distinta.

gran manera dependientes de las características de la explotación (tamaño, intensidad de cultivo y uso de la tierra); todo lo cual influye en el manejo y en la adaptación. Para entender con mayor precisión dicho impacto y adaptación, su evaluación debería considerar la respuesta a diferentes niveles de organización. Puesto que los diferentes tipos de explotaciones se adaptan de forma distinta, una mayor diversidad en los tipos de explotación reduce el impacto de la variabilidad climática a nivel regional, aunque ciertos tipos de explotaciones pueden ser todavía bastante vulnerables (López-Bellido, 2015).

Un reciente estudio realizado en Europa (Olesen *et al.* 2011), muestra en la última década tendencias evidentes en

el incremento de las temperaturas y diferentes patrones de precipitación, con un incremento generalizado de estos últimos en el norte de Europa y una disminución en algunas zonas del sur y este del continente. También en muchos países, en años recientes, se ha observado una tendencia hacia el estancamiento de los rendimientos de los cereales y a un incremento de su variabilidad. Los impactos del cambio climático esperados en la agricultura, tanto positivos como negativos, serán tan grandes en los países del norte de Europa como en los del Mediterráneo; lo cual permitirá mayores posibilidades de adaptación efectiva para mantener los actuales rendimientos a nivel global. No obstante, si se consideran todos los efectos del cambio climático y las posibilidades de adaptación, los

impactos serán netamente negativos en amplias regiones de Europa. Las temperaturas frías y la corta estación de crecimiento son las principales limitaciones en la agricultura del norte de Europa; mientras que las altas temperaturas y los períodos persistentes de sequía durante el verano limitan la producción de los cultivos en el sur de Europa. Hay una clara tendencia en el incremento de las temperaturas que afectan a la producción y a la elección de cultivos en toda Europa; con un incremento frecuente de sequías que inciden negativamente en los rendimientos de los cultivos en el sur y el centro. También hay indicios de un incremento de la variabilidad del rendimiento ligada a la alta frecuencia de olas de calor, así como a las sequías o los persistentes períodos húmedos. El **cuadro I** muestra la sensibilidad de los cultivos de trigo y cebada a los cambios climáticos citados. ■

BIBLIOGRAFÍA

- ASA, CSSA, SSSA. 211. Position Statement on climate change. Working Group American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, W. USA.
- Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D. 2011. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103: 351-365.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: the physical science basic. Intergovernmental Panel on climate Change. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK. 996 pp.
- Lewis, L., Witham. 2012. Agricultural commodities and climate change. *Climate Policy*, 12: 53-61.
- López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.
- Newton PCD, Carran RA, Edwards GR, Niklaus PA. 2007. Introduction. En "Agroecosystems in a changing climate" (PCD Newton, RA Carran, GR Edwards, PA Niklaus, eds.). Taylor & Francis. New York. pp 1-8.
- Olesen JE, Trnka M, Kersebaum KC, Skjelvag AO, Seguin B, Peltonen-Sainio P, Rossi F, Kosyra J, Micale F. 2011. Impact and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy*, 34: 96-112.
- Ort DR, Long SP. 2014. Limits on yield in the Corn Belt. *Science*, 344: 484-485.
- Wolfe DW, Erickson JD. 1993. Carbon dioxide effects on plants: un certainties and implication for modelling crop response to climate change. En "Agricultural Dimensions of Global Climate Change" (HN Kaiser, TE Drennen, eds.). St. Lucie Press. Florida. pp 153-178.



Influencia del cambio climático en los suelos agrícolas

Su relación con la calidad y el carbono del suelo y su productividad

El cambio climático presenta un gran reto para el manejo sostenible del suelo. Los suelos agrícolas son importantes sumideros de carbono, con un gran potencial para mitigar el cambio climático. También la biodiversidad del suelo juega un papel importante en los ciclos de C del mismo. El mejor entendimiento y manejo de los suelos representa un gran potencial para lograr su conservación e importantes beneficios: mitigar el cambio climático, evitar su degradación, mejorar la retención de agua e incrementar la productividad.

La influencia de los procesos biológicos del suelo en el consumo de gases de efecto invernadero (GEI) atmosférico y en las emisiones procedentes de los mismos se muestra en las **figuras 1 y 2**, respectivamente.

Según la Sociedad Americana de Agronomía (ASA, CSSA, SSSA, 2011), los principales efectos del clima en los suelos son:

- Las altas temperaturas que alteran el ciclo de nutrientes y del C y modifican el hábitat biótico del suelo, que a su vez afectan la diversidad de las especies y su abundancia.

- Los fuertes aguaceros que incrementan la erosión del suelo. Además, el aumento de la precipitación puede dar lugar al encharcamiento de los suelos, limitando el suministro de O_2 a las raíces de los cultivos e incrementando las emisiones de óxido nitroso (N_2O) y metano (CH_4). La alteración de la lluvia, a través del incremento o disminución de la precipitación, afecta a la química y biología del suelo.

- La capacidad de retención de agua por el suelo, que puede ser afectada por las crecientes temperaturas y por una reducción de la materia orgánica del mismo, debido al cambio climático y a los

cambios de manejo de la tierra. El mantenimiento de la capacidad de retención de agua es importante para reducir los impactos de la intensa lluvia y de las sequías, las cuales se prevé lleguen a ser más frecuentes y severas.

- Las temporadas prolongadas de calor y sequía entre períodos lluviosos pueden causar desecación y salinización del suelo, las cuales pueden, en conjunto, reducir los rendimientos de los cultivos.

- El incremento de la temperatura y la disminución de la humedad tienden a acelerar la descomposición del material orgánico de los suelos, dando lugar a una reducción de las reservas de C

orgánico del mismo y al incremento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera. Numerosos estudios científicos han evaluado las consecuencias esperadas del cambio climático en relación con la calidad y el C del suelo y su productividad. Dado que una de las consecuencias anticipadas del cambio y la variabilidad climática es un incremento de la erosión potencial del suelo, será necesaria la aplicación de un manejo racional y de prácticas de conservación que mantengan su productividad y los niveles de fertilidad. Está bien establecido que la erosión disminuye la productividad del suelo a través de diversos factores que se ven seriamente afectados; por ejemplo: incremento de las pérdidas de C orgánico del suelo y otros nutrientes esenciales que contribuyen a la reducción de los niveles de fertilidad del mismo; más baja capacidad de retención del agua; rotura de los agregados y calidad del suelo más baja; e impacto negativo sobre las propiedades químicas, microbiológicas y físicas del suelo (Delgado *et al.* 2013).

Cómo reducir las emisiones de CO₂

La mitigación de las emisiones de GEI a través de las prácticas de manejo del suelo implicaría fundamentalmente la reducción de las emisiones de CO₂ y N₂O. Los flujos de CO₂ se ven afectados por los cambios en la temperatura del suelo y el manejo del laboreo. A partir de la mayor concentración de CO₂ atmosférico existe un mayor potencial para incrementar el crecimiento de la planta y el aporte de residuos de cultivo al suelo, que a su vez podrían secuestrar más CO₂. Sin embargo, hay un efecto de compensación en el crecimiento de las plantas causado por las temperaturas más cálidas, las cuales incrementarán la tasa de uso de agua por el cultivo; y cuando se une a la precipitación variable

FIG 1. Procesos biológicos del suelo que influyen en el consumo de gases de efecto invernadero atmosférico por el suelo (Adaptado de Baldock *et al.* 2012).

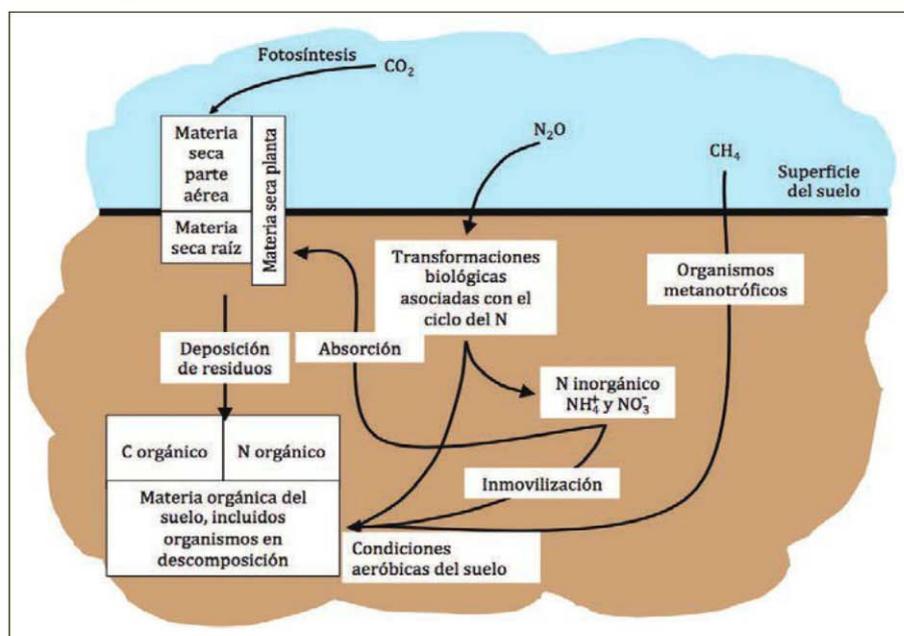
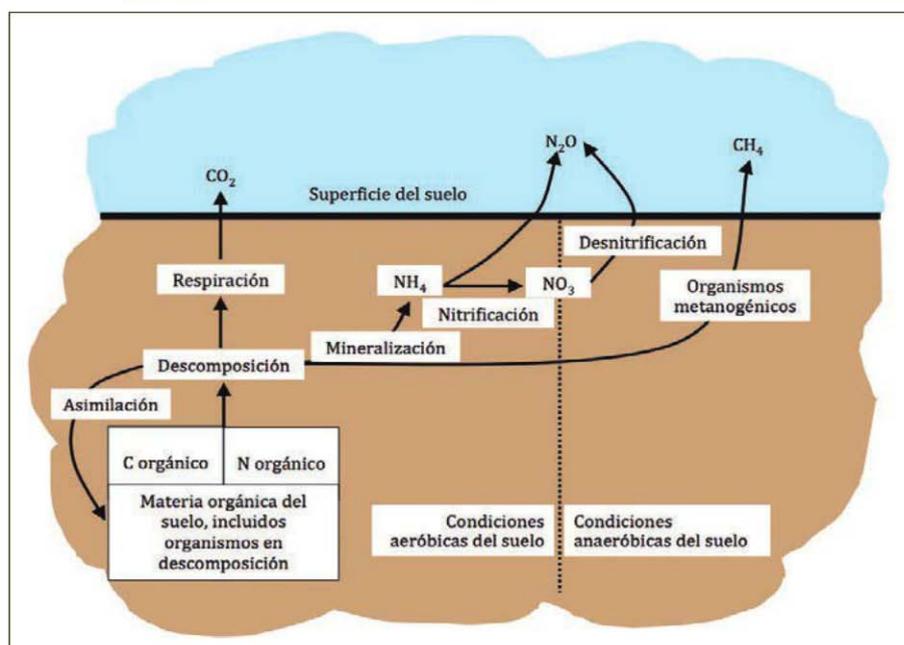


FIG 2. Procesos biológicos del suelo que influyen en las emisiones de gases de efecto invernadero procedentes del suelo a la atmósfera (Adaptado de Baldock *et al.* 2012)



y el consiguiente incremento de la variación de la disponibilidad de agua en el suelo, se crea una respuesta negativa sobre la tasa de material vegetal añadido al suelo y una positiva sobre la tasa de descomposición. El resultado final es un incremento neto de las emisiones de CO₂. Se ha observado de forma consistente que la adopción de un sistema de laboreo reducido mantiene mejor los residuos del cultivo, los cuales reducirán las emisiones de CO₂ del suelo (López-Bellido, 2015).

Cómo reducir las emisiones de N₂O

El N₂O es una de las más importantes vías de emisión de gases procedentes de los suelos agrícolas. Un hecho consistente es que el incremento de la dosis de aplicación de N por encima del óptimo para el crecimiento de la planta o el rendimiento contribuye a incrementar las emisiones de N₂O (Hatfield *et al.* 2012). Las prácticas que incrementan el uso eficiente del N, especialmente si estas son acompañadas por la reducción de la dosis de N, son una excelente herramienta para ayudar a reducir las emisiones de N₂O. Al ser el N un elemento móvil y dinámico, éste puede ser transportado fuera del área de aplicación por escorrentía superficial con la erosión y puede también ser lavado por el agua y/o perdido vía volatilización amoniacal (figura 3). Prácticas tales como las aplicaciones fraccionadas, los análisis de suelos para considerar el N del suelo disponible inicialmente, los inhibidores de la nitrificación, los fertilizantes de liberación controlada, el uso de cultivos de cobertura, contabilizar en el ciclo de N los residuos de cultivo previos de leguminosas y tener en cuenta los niveles de N en el agua de riego, son ejemplos de prácticas que pueden contribuir a la reducción de inputs de N y en consecuencia

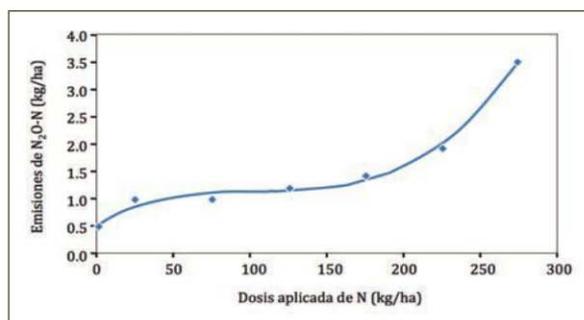
“Para reducir las emisiones del N₂O se debe ajustar la dosis de aplicación de N a las necesidades de los cultivos, mejorar la época y localización del mismo, evitar las aplicaciones excesivas, usar fertilizantes que incrementen la eficiencia y reduzcan las emisiones de N₂O y beneficiarse, cuando sea posible, de la fijación biológica del N.”

incrementar su uso eficiente. Estas prácticas también pueden contribuir al uso de las dosis de N más bajas y reducir las emisiones de N₂O directas e indirectas, a la vez que se mantiene la productividad (Snyder *et al.* 2009 y Delgado *et al.* 2013). Las vías importantes de pérdidas de N

(lavado, desnitrificación, escorrentía y volatilización del NH₄⁺), aunque pueden ser minimizadas por la implementación de buenas prácticas de conservación y manejo, están también relacionadas con el ciclo hidrológico, la temperatura y el cambio climático. Las altas temperaturas y los eventos de alta precipitación pueden incrementar las pérdidas de N al ambiente. Algunos estudios han revelado que la incorporación del N fertilizante incrementa las emisiones de N₂O, aunque la profundidad de incorporación (superficial frente profunda) parece afectar la tasa de emisiones de N₂O. Se hace necesario conocer con nuevas investigaciones cómo reducir las emisiones de N₂O por incorporación o utilizando nuevos tipos de fertilizante. Por otro lado, la comparación de las aplicaciones de N en primavera con las realizadas en otoño muestran una más alta eficiencia de uso del N en primavera, pero también un mayor flujo de emisiones de N₂O (Delgado *et al.* 2013). La alta densidad aparente asociada con algunos tipos de suelos o debida a la compactación producida por los aperos de laboreo y otros equipos agrícolas, tales como remolques, cosechadoras y tractores, puede provocar la reducción de la aireación bajo condiciones de humedad del suelo, dando lugar a

mayores emisiones de N₂O. Según Snyder *et al.* (2009), una ligera compactación del suelo, puede aumentar las emisiones de N₂O hasta en un 20%, mientras que una compactación severa puede duplicar dichas emisiones. Cuando se evita esta compactación y se preserva al mismo tiempo la superficie cubierta por los residuos de la cosecha, se reduce

FIG 3. Emisiones de N₂O según la dosis de N fertilizante aplicada (Adaptado de Snyder *et al.* 2009)



el riesgo de desnitrificación y de emisiones N_2O . En especial, la compactación de los suelos arcillosos tiene un mayor efecto negativo que los suelos arenosos.



Algunos de los efectos negativos de la compactación también pueden estar relacionados con la reducción de crecimiento de las raíces de los cultivos y los procesos microbianos de la zona de la raíz. En síntesis, las técnicas agronómicas específicas para reducir las emisiones del N_2O incluyen: (1) ajustar la dosis de aplicación de N a las necesidades de los cultivos; (2) mejorar la época y localización de la aportación de N al suelo; (3) evitar las aplicaciones excesivas de N; (4) usar fertilizantes que incrementen la eficiencia y reduzcan las emisiones de N_2O ; y (5) beneficiarse, cuando sea posible, de la fijación biológica del N.

Fertilizantes de eficiencia mejorada

Hace más de una década se pusieron de manifiesto los avances en los fertilizantes de liberación controlada, que podrían ser un medio eficaz para mejorar la sincronización entre la disponibilidad de N en el suelo y la demanda de absorción de éste por los cultivos. En los últimos años ha surgido un interés creciente en el uso de este tipo de fertilizantes denominados fertilizantes de eficiencia mejorada (*enhanced efficiency fertilizers*) por su potencial para reducir el impacto ambiental. Éstos son productos cuyas características permiten una mayor absorción por la planta y reducir el potencial de pérdidas de nutrientes en el medio ambiente, en comparación con los fertilizantes de referencia convencionales. Estos fertilizantes nitrogenados incluyen

inhibidores de la nitrificación y de la ureasa, fertilizantes sin recubrimiento de lenta disponibilidad y fertilizantes nitrogenados recubiertos.

Numerosos estudios se han realizado en fechas recientes, especialmente en EE.UU., para conocer los efectos de estos fertilizantes de eficiencia mejorada sobre las emisiones de N_2O y el rendimiento agronómico de los cultivos. Hatfield y Venterea (2014) han analizado los resultados de un estudio multilocalización en EE.UU., durante el período 2008-2011, en los cultivos de maíz, algodón y trigo. Las conclusiones más relevantes fueron las siguientes:

1. La aplicación de este tipo de fertilizantes, como método para reducir las emisiones de N_2O , depende de las condiciones ambientales. En general afectan a la tasa de emisiones de N_2O de los suelos, en especial durante el período inmediatamente después de la aplicación del fertilizante, y de manera más marcada en los sistemas de producción de regadío.
2. Los eventos episódicos de lluvia durante la estación de crecimiento pueden dar lugar al aumento de las emisiones de N_2O cuando se aplican los fertilizantes de eficiencia mejorada, lo cual puede limitar su eficiencia en climas húmedos con el aumento de las precipitaciones.
3. En todos los cultivos, la utilización de

los fertilizantes de eficiencia mejorada incrementó el uso eficiente del N por el cultivo, demostrando que éstos tienen una respuesta positiva tanto agronómica como ambiental. No obstante, los resultados mostraron, en general, un efecto inconsistente en la producción agrícola al compararlos con los fertilizantes convencionales.

4. En el futuro habría que evaluar la aplicación de dosis más bajas de N con fertilizantes de eficiencia mejorada con el fin de alcanzar los mismos rendimientos de grano y las consiguientes menores pérdidas de N en comparación con los fertilizantes convencionales.

5. Asimismo, también es necesario un análisis económico adicional para conocer las variaciones en los costes de los diferentes tipos de fertilizantes de



eficiencia mejorada y los productos de referencia, junto con los rendimientos resultantes y los costes adicionales asociados con las aplicaciones fraccionadas de los fertilizantes convencionales.

Dell *et al.* (2014), en un estudio durante un período de cuatro años secos, constataron que la utilización en maíz de fertilizantes nitrogenados de mejor eficiencia (urea recubierta con polímeros, urea tratada con inhibidores de la nitrificación, entre otros), no produjeron diferencias consistentes entre las tasas

de emisión de N_2O , siendo similares las emisiones de N_2O acumuladas en la estación de crecimiento y el rendimiento de grano para todas las fuentes de N. Concluyeron que los períodos secos prolongados limitan el potencial de desnitrificación y las emisiones totales de N_2O en condiciones de campo; por lo cual los fertilizantes de eficiencia mejorada no parecen ser un medio eficaz para reducir las emisiones de N_2O en un sistema de secano, al menos cuando la lluvia es escasa.



Cambios en la biodiversidad del suelo

Algunas investigaciones (Dwivedi *et al.* 2013) han predicho que los cambios en el clima podrían modificar rápidamente la distribución de las especies; algunas expandiéndose hacia nuevas áreas más favorables y otras reduciéndose a pequeñas localizaciones debido al incremento de las condiciones adversas. La diversidad del suelo excede a la biodiversidad de los sistemas que están por encima del mismo; lo cual es crucial para la sostenibilidad de los agrosistemas. Ésta consiste en la macrofauna (lombrices de tierra, etc.), mesofauna (microartrópodos, tales como arañas y colémbolos), microfauna (nematodos y protozoos) y microflora (bacterias y hongos). Los organismos del suelo realizan un número de funciones vitales tales como son:

- La descomposición y degradación de los residuos vegetales y el ciclo de nutrientes, convirtiendo el N atmosférico

en formas orgánicas (inmovilización) y remineralizando el N orgánico, que lleva a la formación de N gaseoso.

- La supresión de patógenos del suelo a través de antagonistas.
- La regulación del microclima y los procesos hidrológicos locales.
- La síntesis de enzimas, vitaminas, hormonas, quelantes vitales y aleloquímicos que regulan poblaciones y procesos.
- La alteración de la estructura del suelo y otras características

físicas, químicas y biológicas.

Además de los efectos sobre la desertificación del suelo, el modelo de uso de la tierra y la contaminación del suelo alteran la biodiversidad de éste. Cambios en la biodiversidad del suelo son observados a través de los efectos sobre los organismos del suelo, como resultado de los cambios en la temperatura y la precipitación, y a través de los cambios climáticos inducidos (aumento del CO_2 atmosférico y calentamiento), que afectan la productividad de los cultivos y la composición de especies. Las evidencias acumuladas hasta ahora revelan que los componentes bióticos del suelo son vulnerables al cambio climático. Por ejemplo, la dimensión del efecto positivo de la elevada concentración atmosférica de CO_2 en la abundancia de los componentes bióticos del suelo parece disminuir con el tiempo, mientras que el efecto negativo del calentamiento y el positivo de la precipitación se acrecientan con el tiempo. La mayoría de los estudios concluyen que los efectos del cambio climático y las interacciones entre ellos pueden causar cambios en la

abundancia de bacterias y hongos, teniendo la precipitación un mayor efecto sobre las especies que componen la fauna del suelo.

La composición microbiana del suelo está principalmente relacionada con la diversidad de plantas, asumiendo que las diferentes especies de plantas pueden albergar distintas poblaciones microbianas rizosféricas, más bien que alterar los flujos de C del suelo inducidos por la elevada concentración atmosférica de CO_2 que lleva a un aumento de la fotosíntesis. Existen suficientes evidencias que muestran que la transferencia de C a través de las raíces de las plantas al suelo juega un papel básico en la regulación de la respuesta de los ecosistemas al cambio climático y su mitigación (Qafoku, 2015). ■

BIBLIOGRAFÍA

- ASA, CSSA, SSSA. 211. Position Statement on climate change. Working Group American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, W. USA.
- Baldock JA, Wheeler I, Mckenzie N, McBratney A. 2012. Soil and climate change: potential impacts on carbon stocks and greenhouse gas emissions, and future research for Australian agriculture. *Crop & Pasture*, 63: 269-283.
- Delgado JA, Nearing MA, Rice ChW. 2013. Conservation practices for climate change adaptation. *Advances in Agronomy*, 212: 47-115.
- Dell CJ, Han K, Bryant RB, Schmidt JP. 2014. Nitrous oxide emissions with enhanced efficiency nitrogen fertilizer in a rainfed system. *Agronomy Journal*, 106: 723-731.
- Dwivedi S, Sahrawat K, Upadhyaya H, Ortiz R. 2013. Food, nutrition and agrobiodiversity under global climate change. *Advances in Agronomy*, 120: 1-128
- FAO. 2008. Climate change and biodiversity for food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 11pp.
- Hatfield JL, Parkin TB, Sauer TJ, Prueger JH. 2012. Mitigation opportunities from land management practices in a warming world: increasing potential sinks. En "Managing Agricultural Greenhouse Gases" (MA Liebig, AJ Franzuebbers, RF Follet, eds.), Elsevier, Academic Press. pp 487-504.
- Hatfield JL, Venterea RT. 2014. Enhanced efficiency fertilizers: a multi-site comparison of the effects on nitrous oxide emissions and agronomic performance. *Agronomy Journal*, 106: 679-680.
- López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.
- Qafoku, NP. 2015. Climate-change effects on soils: accelerated weathering, soil carbon, and elemental cycling. *Advances in Agronomy*, 131: 111-172.
- Snyder CS, Bruulsema TW, Jensen TL, Fixen PE. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 133: 247-266.

Estrategias de adaptación de los cultivos al cambio climático

Respuesta de los cultivos a las nuevas condiciones ambientales



Para incrementar la seguridad alimentaria frente al reto del cambio climático se requerirá que los sistemas agrícolas sean contemplados desde una perspectiva holística, con el fin de entender las implicaciones que representan las interacciones de los cambios de temperatura, CO₂ y precipitación sobre los procesos de crecimiento y desarrollo de los cultivos. Una mayor diversidad de especies y variedades, un uso eficiente del agua, prácticas de conservación del suelo y un mejor uso de los fertilizantes y los fitosanitarios, se encuentran entre las estrategias actualmente disponibles.

Los impactos de las altas temperaturas sobre la reducción de los rendimientos de los cultivos pueden producir serias consecuencias en términos de estabilidad de la producción, especialmente sobre los procesos de la polinización y formación del grano. Estos efectos pueden no ser compensados por la beneficiosa estimulación del crecimiento debido a la consecuencia directa del incremento de los niveles de CO₂. Tales cambios, junto con el incremento de la variabilidad de la precipitación, plantean el reto de buscar la solución para que los sistemas de cultivo puedan ser más resistentes al estrés. La conexión entre la respuesta fisiológica y las características genéticas suministra la clave para crear sistemas de cultivo más resistentes que puedan enfrentarse al cambio climático. La evaluación de la interacción de la genética con el medio ambiente, especialmente en el escenario potencial del cambio climático, requerirá un entendimiento de cómo estas variables interactúan durante el ciclo de crecimiento de los cultivos (Hatfield *et al.*, 2011). El objetivo fundamental es producir rendimientos más altos con emisiones reducidas de gases de efecto invernadero (GEI) por unidad de producción y conservar y enriquecer el contenido de materia orgánica del suelo, promover un uso eficiente del agua y conservar la integridad de los ecosistemas. Este objetivo puede ser alcanzado a través de un manejo agronómico avanzado

CUADRO I. CONJUNTO DE ACTUACIONES DE ADAPTACIÓN FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO (ADAPTADO DE FOLLETT, 2012).

Actuación	Valor para la adaptación al cambio climático	Medidas para incrementar la flexibilidad
Tierra	Extensión de las tierras de cultivo en diversos climas.	Fomentar un uso flexible de la tierra, diversificación y adaptación.
Agua	El agua ya puede limitar la agricultura en algunas regiones y es crucial para la adaptación.	Estimular el uso prudente del agua. Elevar el valor del cultivo producido por volumen de agua consumida.
Energía	El suministro de energía segura es esencial para muchas adaptaciones al nuevo clima. energía solar y otras fuentes de energía.	Mejorar la eficiencia energética de la producción de alimentos. Explorar nuevos combustibles biológicos,
Infraestructura física	Facilitar los flujos de inputs, comercio y mercados.	Mantener y mejorar el suministro de inputs y las infraestructuras de distribución de las exportaciones para responder a las señales del mercado.
Diversidad genética	Fuente de genes para adaptar los cultivos y la ganadería a los nuevos climas.	Reunir, preservar y caracterizar los genes de plantas y animales. Dirigir la investigación hacia los cultivos y ganadería alternativa.
Investigación	Fuente de conocimiento y tecnología de adaptación.	Ampliar la investigación sobre estrategias de adaptación. Mejorar la agricultura sostenible y alternativa y los sistemas alimentarios.
Información	Suministrar la información necesaria para realizar el seguimiento climático.	Mejorar los sistemas nacionales e internacionales de intercambio de información sobre el cambio climático y como adaptarse a él.
Recursos humanos	Proporcionar un conjunto de competencias que permitan a los agricultores e investigadores adaptarse al cambio climático.	Lograr que las habilidades de adaptación sean el sello de calidad (la clave) de los recursos humanos de la agricultura.
Instituciones políticas	Determinar las políticas y las normas que faciliten la eliminación de aquellas que impiden la adaptación.	Armonizar los objetivos agrícolas y las políticas.
Mercados mundiales	Permitir que el comercio facilite los intercambios de la producción agrícola y enviar señales de precios que eventualmente ajusten la producción a los nuevos climas.	Promover un mercado más libre y evitar el proteccionismo.

destinado a la intensificación y producción agrícola sostenible, y a la focalización de programas de mejora basados en una mejor comprensión de la genética y la fisiología de los cultivos (López-Bellido, 2015).

Estrategias disponibles

Según la Sociedad Americana de Agronomía (ASA, CSSA, SSSA, 2011), entre las estrategias actualmente disponibles para la adaptación de la agricultura al cambio climático figuran:

- Incrementar la diversidad de cultivos, incluyendo la ampliación de la gama de variedades de un mismo cultivo y del rango de especies cultivadas; lo cual puede ser una forma efectiva para moderar los efectos de la variabilidad del clima y los eventos extremos asociados con el cambio climático.

- Utilizar riego por goteo y otros tipos de riego que puedan ayudar a manejar los suministros limitados de agua más eficientemente, a medida que los regímenes hidrológicos se hacen cada vez más inestables y los períodos de sequía más severos.
- El manejo integrado de plagas como un medio de ayudar a los sistemas agrícolas a responder frente a los cambios de comportamiento de las mismas como resultado del cambio climático.
- El manejo del suelo, tal como el laboreo reducido y el manejo de residuos, que puede ser utilizado para conservar el agua, reducir la erosión e incrementar la productividad.

Mejora del manejo del N

Según Delgado *et al.* (2013), bajo las condiciones de cambio climático habría

que dar más énfasis a las estrategias de mejora del manejo del N. La modificación de los ciclos de C y N vistos de forma conjunta en los suelos bajo el incremento de CO₂, junto con el régimen variable de agua en el suelo, alterará la habilidad de la planta para utilizar el N y en consecuencia afectará a los modelos de extracción de N. Una mayor comprensión de la conexión entre los ciclos de C y N bajo el cambio climático mejorará nuestras capacidades de manejo.

Nuevas especies y nuevas variedades

La adaptación de los cultivos anuales al cambio climático global será un proceso continuo de evaluación, selección y ensayos de especies y variedades en ambientes variados y en un amplio rango de condiciones climáticas. Se requerirá además información sobre la susceptibilidad de dicho material a plagas y enfermedades. En función de la rapidez con que el cambio del clima tenga lugar, necesitarán ser identificadas y ensayadas un rango de cultivos y especies adecuadas de cultivo bajo condiciones anticipadas de temperatura y humedad contra potenciales plagas y enfermedades (**cuadro I**).

Prácticas de conservación del suelo

Según Rosenzweig y Hillel (2013), la agricultura está cambiando a un nuevo paradigma que abarca un enfoque de sostenibilidad y servicios ambientales. Este nuevo modelo está representado por un amplio conjunto de prácticas, descritas a veces como “agricultura de conservación.” El potencial para este prototipo de nueva sostenibilidad y servicios ambientales debería ser más ampliamente explorado e investigado, y deberían ser establecidas y mejoradas

redes de apoyo para que los agricultores adopten estas prácticas en respuesta a las necesidades del cambio climático.

Las prácticas de conservación serán claves y deben ser usadas como estrategia para la adaptación a los impactos del cambio climático sobre el recurso del suelo. Entre las estrategias claves figuran el uso del laboreo de conservación, las rotaciones de cultivo y el manejo de los residuos de cultivo (incluido el uso de cultivos de cobertura, donde sean viables), el manejo del pastoreo intensivo del ganado, la mejora del manejo de los sistemas de riego y el uso de tecnologías de agricultura de precisión. Muchas otras prácticas de conservación también tienen la capacidad de reducir parcialmente o en su totalidad el potencial de aceleración de las tasas de erosión del suelo, que pueden ocurrir bajo un cambio en el clima que inducirá más lluvia total, con eventos de lluvia de intensidad más alta, o cambios a climas más secos que potencialmente provocarán tasas más altas de erosión por el viento. Una práctica importante de adaptación será considerar los cambios espaciales proyectados en el ciclo hidrológico, tales como regiones más húmedas y más secas, y períodos de sequía. Esto podría ayudar en el desarrollo de políticas de conservación del suelo y el agua que consideren los efectos temporales y espaciales derivados del cambio climático a escala regional. Estas políticas deberían también considerar prácticas de conservación que contribuyan a incrementar la capacidad de retención de agua en el perfil del suelo, mejora de las prácticas de drenaje y el desarrollo de nuevas variedades de cultivo y sistemas de cultivo más resistentes a la sequía (Delgado *et al.*, 2013).

Con oportunas y apropiadas inversiones proactivas en investigación en el sector de la agricultura, se dispondrá de las herramientas necesarias para afrontar los retos estratégicos de adaptación y tomar ventaja en algunas de las oportunidades que ofrece el cambio climático.

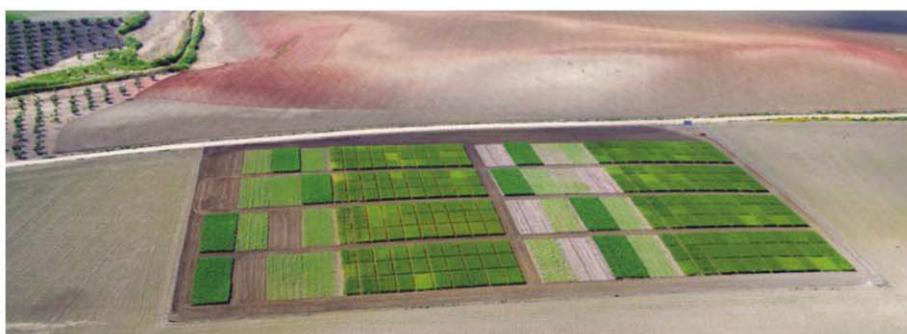
Restricciones para una adaptación exitosa

Las soluciones agronómicas a muchos de los más probables impactos del cambio climático son razonablemente bien conocidas. El reto frecuentemente no es que las técnicas no estén

disponibles, sino que falta la capacidad para adaptarlas; lo cual está frecuentemente ligado con la disponibilidad de capital. Por esto los agricultores más pobres y los países en desarrollo son particularmente vulnerables. Sin embargo, estudios realizados en Europa han documentado que la disponibilidad de capital y el acceso a la información no necesariamente se traduce en adaptaciones exitosas (**cuadro II**). Wolfe (2013) ha sintetizado las restricciones para la adaptación de la agricultura al cambio climático en los siguientes tipos:

- Limitaciones físicas y ecológicas (regiones o cultivos vulnerables a los efectos del cambio climático que dificultan la habilidad adaptativa).
- Limitaciones tecnológicas (no disponibilidad de las variedades adecuadas o de las tecnologías de riego).
- Barreras financieras (de agricultores individuales, regiones o países: falta de capital para las inversiones de





flexible y adaptado a la variabilidad y al cambio climático.

Con oportunas y apropiadas inversiones proactivas en investigación en el sector de la agricultura, se dispondrá de las herramientas necesarias para afrontar los retos estratégicos de adaptación y tomar ventaja en algunas de las oportunidades que ofrece el cambio climático. También los responsables de las políticas tendrán la información necesaria para facilitar la adaptación y minimizar desigualdades en los impactos y costes de adaptación.

Asimismo, los agricultores podrán contribuir significativamente a la mitigación de los GEI al tener acceso a las nuevas herramientas e incentivos. Wolfe (2013) ha propuesto las siguientes prioridades de investigación:

- Estrategias de adaptación para el

adaptación y ayudas para los agricultores).

- Barreras informativas y de conocimiento (falta de acceso a la información sobre la adaptación, subestimación de los riesgos debido a la falta de acción).
- Barreras sociales y culturales (limitan la respuesta adaptativa).

Prioridades de investigación

Son necesarias mayores inversiones, mantenidas a largo plazo, en investigación para desarrollar nuevas tecnologías, herramientas de decisión e información y estrategias efectivas de comunicación para transformar la agricultura en un sistema que sea más

CUADRO II. ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN AGRONÓMICA Y BENEFICIOS, COSTES Y LIMITACIONES ASOCIADAS (ADAPTADO DE WOLFE, 2013).

Adaptación	Beneficios	Coste relativo	Limitaciones/riesgos
Cambio/diversificar fecha de siembra.	- Aprovechar estaciones de crecimiento más largas, incluyendo posibles dobles cultivos. - Evitar períodos secos, húmedos y cálidos.	Bajo	- Competencia para entrar en el mercado en nuevas épocas de recolección. - Dificultad de predecir eventos de tiempo adversos.
Nuevos/más diversificación de cultivos y variedades.	- Explorar nuevos cultivos y mercados para estaciones de crecimiento más largas. - Utilización de variedades y cultivos tolerantes a los nuevos estrés.	Bajo a moderado	- Competencia para entrar en nuevos mercados. - Nuevos equipos de campo, infraestructuras y transporte, requeridos por los nuevos cultivos. - Cultivos y variedades tolerantes al estrés no disponibles o no aceptados en el mercado.
Mejora de la monitorización de las poblaciones de plagas, enfermedades y malas hierbas y sus cambios de distribución.	- Mejor preparación para nuevas plagas, enfermedades y malas hierbas.	Bajo a moderado	- Bajos gastos en campo, pero requiere costosas redes regionales para ser efectivo.
Control químico y no químico de plagas, enfermedades y malas hierbas.	- Control de nuevas plagas y malas hierbas reduciendo al mínimo la contaminación química del medio ambiente.	Bajo a moderado	- Fitosanitarios no disponibles, no autorizados o costosos. - Métodos no químicos no disponibles y que requieren tiempo para su desarrollo.
Sistemas de riego.	- Mantener el rendimiento y la calidad durante los períodos secos.	Moderado a alto	- Costosa infraestructura. - Necesidad de un adecuado suministro de agua.
Protección de los daños por inundación.	- Mantener el rendimiento y la calidad durante los períodos húmedos.	Bajo a alto	- Sistemas de siembra intensivos propensos a la sequía en períodos secos. - Sistemas de tubos de drenaje costosos. - Parcelas mejor drenadas o con menos propensión a la inundación no disponibles.
Protección contra daños de heladas y olas de frío.	- Minimizar los daños a los cultivos debido a las temperaturas variables de invierno y primavera.	Moderado a alto	- Incluso con pronóstico, los sistemas de aspersión antiheladas no siempre son efectivos.

CUADRO III. PRINCIPALES LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN PARA LA ADAPTACIÓN DE LA AGRICULTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO (ADAPTADO DE ASA, CSSA, SSSA, 2011).

Objetivos	Líneas
Garantizar la seguridad alimentaria en un clima en proceso de cambio	<ul style="list-style-type: none"> - Acometer una investigación integrada en genética, fisiología de cultivos y de manejo suelo-nutrientes-agua-cultivos para mejorar los rendimientos agrícolas y la calidad ambiental. - Conservar activamente los recursos genéticos con el fin de salvaguardar este material para el futuro desarrollo de variedades mejoradas.
Entender los efectos del elevado CO ₂ y la variabilidad climática sobre los suelos y los cultivos	<ul style="list-style-type: none"> - Progresar en el entendimiento de los impactos potenciales de los estrés abióticos (incremento CO₂, temperatura variable, y modelos de precipitación erráticos), sobre los factores biológicos en los agrosistemas y ecosistemas naturales. - Caracterizar las interacciones entre plantas, microorganismos y suelos que afecten a la resistencia y adaptabilidad de los agrosistemas. - Evaluar las prácticas agronómicas basadas en la optimización, tanto del secuestro de C por el suelo como el uso eficiente del N.
Dióxido de carbono (CO ₂)	<ul style="list-style-type: none"> - Cuantificar el secuestro de C resultante de las diferentes prácticas de manejo y evaluar y documentar otros servicios beneficiosos, tales como cambios en la calidad del suelo, productividad, erosión y calidad del agua y del aire. - Llevar a cabo estudios de campo de larga duración que mejoren el conocimiento de los procesos y desarrollar modelos que aseguren las prácticas de secuestro de C estable en el suelo a largo plazo.
Metano (CH ₄)	<ul style="list-style-type: none"> - Investigar vías para reducir las emisiones de CH₄ procedentes de la fermentación entérica. - Desarrollar métodos para el manejo del estiércol del ganado que reduzcan las emisiones de CH₄.
Óxido nitroso (N ₂ O)	<ul style="list-style-type: none"> - Analizar el potencial para la reducción del uso del N fertilizante sin que impacte negativamente en la producción y calidad de los cultivos, como una estrategia de mitigación del cambio climático; a través de estudios sobre el manejo de cultivos de cobertura, residuos y procesos microbianos y físicos, que regulen el ciclo del N del suelo y su disponibilidad.
Mejorar las opciones de adaptación	<ul style="list-style-type: none"> - Desarrollar cultivos resistentes a la sequía y/o calor que hayan sido testados por su estabilidad de rendimiento cuando son sometidos a períodos dilatados de escasez de agua. - Organizar redes de ensayos globales a largo plazo y bases de datos utilizando protocolos estándar, para llevar a cabo programas de mejora de adaptación y evaluar el comportamiento del material genético existente y nuevo, bajo toda la gama de condiciones de manejo y agroclimáticas. - Establecer programas continuados de ensayos de campo para rastrear el cambio climático, resistencia a nuevas enfermedades y plagas y cambios en la distribución de polinizadores, con el propósito de abordar la adaptación de los cultivos. Tales ensayos deberían extenderse más allá de las áreas tradicionales de los cultivos con el fin de anticiparse a la implantación de estos y sus sistemas de producción bajo las nuevas condiciones ambientales. - Construir modelos de simulación conjuntos, climáticos y de cultivos, para mejor caracterizar la incertidumbre de los futuros impactos de la agricultura y las proyecciones de adaptación.



control de malas hierbas, plagas y enfermedades, tales como la mejora de la monitorización regional y la comunicación de su manejo integrado en relación al rango de cambio y llegadas migratorias de las mismas; mejora en tiempo real de los sistemas basados en el clima para su control; desarrollo de opciones no químicas para nuevas plagas y enfermedades; y desarrollo de planes de acción de respuesta rápida para el control de especies invasivas.

- Mejora de los sistemas de manejo del agua y tecnologías de programación del riego.
- Desarrollo de mejores herramientas de decisión para determinar el tiempo óptimo y la magnitud de las inversiones

en la estrategia de adaptación al cambio climático, con el fin de mantener/maximizar los beneficios a través de múltiples horizontes de planificación. Esto requerirá, frente a las incertidumbres del clima, modelos de predicción de lluvia, frecuencia de eventos extremos y variabilidad temporal y espacial del clima. Igualmente se requerirá la cuantificación de los costes y beneficios de la adaptación a nivel de explotación.

- Mejora de los esfuerzos de mitigación en el sector agrícola. Serán necesarias mejores herramientas para monitorizar, contabilizar y manejar la energía, C, N y los GEI asociados.
- Explorar el potencial de la agricultura de conservación más plenamente, apoyando redes de agricultores que adopten dichas prácticas.

También, la Sociedad Americana de Agronomía ha propuesto de forma muy pormenorizada las principales líneas de investigación para la adaptación de la agricultura al cambio climático, como se muestra en el cuadro III. ■

BIBLIOGRAFÍA

ASA, CSSA, SSSA. 211. Position Statement on climate change. Working Group American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America. Madison, W. USA.

Delgado JA, Nearing MA, Rice CW. 2013. Conservation practices for climate change adaptation. *Advances in Agronomy*, 212: 47-115.

Follett RF. 2012. Beyond mitigation: adaptation of agricultural strategies to overcome projected climate change. En "Managing Agricultural Greenhouse Gases" (MA Liebig, AJ Franzluebbers, RF Follett, eds.). Elsevier, Academic Press. pp 505-523.

Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D. 2011. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103: 351-365.

López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.

Rosenzweig C, Hillel D. 2013. Agricultural Solutions for climate change at global and regional scale. En "Handbook of climate change and agroecosystems" (D Hillel, C Rosenzweig, eds.). Joint publication with the American Society of Agronomy, Crop Science Society of American, and Soil Science Society of America. Imperial College Press, London. pp 281-292.

Wolfe DW. 2013. Contribution to climate change solutions from the agronomy perspective. En "Handbook of climate change and agroecosystems" (D. Hillel y C. Rosenzweig, eds.). American Society of Agronomy. Imperial College Press. Londres. pp 11-29.

El papel de la agricultura en las estrategias de mitigación del cambio climático

El éxito dependerá del tipo de suelo, de los cultivos elegidos y de cada región determinada

La adaptación de la agricultura del futuro al cambio climático estará basada también en la mejora de las actuales estrategias de mitigación. La mejora de las prácticas puede reducir la emisión neta de gases de efecto invernadero (GEI); sin embargo, la efectividad de las prácticas agrícolas usadas dependerá del clima, del tipo de suelo y del sistema agrícola. La mayor oportunidad de mitigación deriva de la mejora del secuestro de C orgánico por el suelo, seguida por la reducción de las emisiones de GEI.



El mantenimiento y posible incremento de las cantidades de C orgánico secuestrado por el suelo puede ser crítico para la futura adaptación al cambio climático. Las tecnologías y prácticas más relevantes para la mitigación de las emisiones de GEI procedentes del sector agrícola, según Delgado *et al.* (2013), incluyen:

(1) Mejora de los cultivos y el manejo de las tierras de pastos para incrementar

el almacenamiento de C del suelo.

(2) Restauración de tierras degradadas.

(3) Mejora de las técnicas de cultivo del arroz.

(4) Mejora del ganado y manejo del estiércol para reducir las emisiones de metano (CH₄).

(5) Mejora de las técnicas de aplicación del N fertilizante para reducir las emisiones de óxido nitroso (N₂O).

(6) Cultivos energéticos para reemplazar el uso de combustibles fósiles.

(7) Mejora de la eficiencia energética de las operaciones agrícolas.

El éxito de las estrategias de adaptación y mitigación al cambio climático, en las diferentes escalas y dimensiones de los impactos, dependerá de los cultivos y de la región. Cabe esperar que estos impactos sobre la producción agrícola en los diferentes continentes sean distintos, y por tanto requieran estrategias adaptativas personalizadas (Tripathi *et al.* 2016).

La mitigación y la adaptación al cambio climático por la agricultura deberán producirse e interactuar simultáneamente. No obstante, las medidas de mitigación y adaptación impulsadas por la agricultura pueden tener tanto consecuencias positivas como negativas. Entre las primeras figuran el mantenimiento de residuos en el suelo que mejoren la capacidad de retención de agua y el secuestro de C. Entre las segundas destacan la fuerte dependencia de la energía procedente de la biomasa y el aumento del uso de fertilizantes nitrogenados que incrementará las emisiones de N₂O. Los flujos de GEI de la agricultura son complejos y heterogéneos, pero la gestión activa de los sistemas agrícolas ofrece posibilidades de mitigación. Muchas de estas oportunidades de mitigación utilizan las tecnologías actuales y se pueden implementar de inmediato, como ha sido mostrado por López-Bellido (2016) ["Influencia de la agricultura en el cambio climático," Vida Rural 407, cuadro I].

Oportunidades para la mitigación de GEI

De forma global, Smith *et al.* (2008) han establecido las oportunidades para la mitigación de GEI en la agricultura en tres grandes categorías basadas en el mecanismo subyacente:

- Reducción de las emisiones. La agricultura libera a la atmósfera cantidades significativas de CO₂, CH₄ y N₂O. Los flujos de estos gases se pueden reducir mediante la gestión más eficiente de los flujos de C y N en los ecosistemas agrícolas. Por ejemplo, las prácticas que suministran N de manera más eficiente a los cultivos a menudo



reducen la emisión de N₂O; y el manejo del ganado para hacer un uso más eficaz de la alimentación animal a menudo disminuye la cantidad de CH₄ producido. Las estrategias más eficientes en la reducción de las emisiones dependen de las condiciones locales y, por tanto, varían de una región a otra.

- Incrementar la remoción de C atmosférico. Los ecosistemas agrícolas tienen grandes reservas de C, sobre todo en forma de materia orgánica del suelo. Aunque históricamente estos sistemas han ido perdiendo grandes cantidades de C orgánico, algunas de estas pérdidas se pueden recuperar a través de un mejor manejo, retirando de esta manera el CO₂ atmosférico. Cualquier práctica que aumente la entrada fotosintética de C o retrase el retorno de C almacenado a través de la respiración o la quema de residuos vegetales aumentará el C almacenado, produciendo un secuestro neto de C y constituyéndose el suelo como sumidero de C. Muchos estudios en el mundo han demostrado que cantidades significativas de C se pueden almacenar de esta manera, a través de una serie de prácticas adaptadas a las condiciones locales. Cantidades significativas de C también se pueden almacenar en la biomasa de los sistemas agroforestales u otras plantaciones perennes en tierras agrícolas.

- Evitar (o desplazar) las emisiones.

Los cultivos y sus residuos vegetales se pueden utilizar como una fuente de combustible, bien sea directamente o después de su conversión a combustibles como el bioetanol o biodiésel. Estas materias primas bioenergéticas también liberan CO₂ durante la combustión, pero ahora el C es de origen atmosférico reciente (a través de la fotosíntesis), en lugar de proceder de C fósil. El beneficio neto de estas materias primas bioenergéticas en la emisión de C a la atmósfera es equivalente a las emisiones derivadas de la energía fósil desplazadas, menos las emisiones de la producción, el transporte y el procesamiento. Las emisiones de GEI, especialmente el CO₂, también se pueden evitar por prácticas de manejo agrícola que eviten el cultivo de nuevas tierras que actualmente son de bosque, pastizales u otra vegetación no agrícola.

Un mayor desarrollo tecnológico

Existe mucho margen para el desarrollo tecnológico en el sector de la agricultura que conlleve a la reducción de las emisiones de GEI. Por ejemplo, el aumento de la eficiencia de los cultivos y de la producción animal reducirán las emisiones por unidad de producción. Estos incrementos se llevarán a cabo a través de la mejora de las técnicas de manejo de la explotación. Por lo tanto, un mejor manejo (uso de cultivos modificados genéticamente, los cultivares mejorados, los sistemas de recomendación de fertilizantes, la agricultura de precisión, la mejora de las razas animales, los aditivos alimentarios y los factores de crecimiento animal, la mejora de la fertilidad de los animales, los cultivos bioenergéticos, la digestión anaeróbica de los purines y de los sistemas de captura de CH₄, etc.) depende, en cierta medida, de la

evolución tecnológica. La mejora tecnológica puede tener efectos muy significativos y podría potencialmente contrarrestar los efectos negativos del cambio climático sobre las reservas de C en las tierras de cultivo y pastizales; lo cual sugiere que será un factor clave en la mitigación de los GEI en el futuro. De todos modos, el problema principal, como ya se ha citado, es la transferencia de tecnología, la difusión y la implementación. Otras estrategias todavía requieren más investigación para permitir que los sistemas puedan operar de forma viable, como por ejemplo los cultivos bioenergéticos. Por último, hay muchas nuevas estrategias en las primeras etapas de desarrollo, y existe todavía un papel importante para la investigación y el desarrollo en este área (Smith *et al.*, 2007).

Asimismo, el reciclaje de los subproductos agrícolas, como residuos de cultivos y estiércol, y la producción de cultivos energéticos mitigarán directamente las emisiones de GEI derivadas de los combustibles fósiles. Se ha estimado que un 10-15% de las tierras cultivables podrían ser utilizadas para producir cultivos energéticos. Sin embargo, aún existen barreras significativas en las tecnologías y la economía para la utilización de residuos agrícolas y en la conversión de los cultivos energéticos en combustibles comerciales. El desarrollo de tecnologías innovadoras es un factor crítico para desarrollar el potencial de los residuos agrícolas y de los cultivos energéticos. Las inversiones gubernamentales para el desarrollo de estas tecnologías y las ayudas para el uso de estas formas de energía son esenciales (López-Bellido, 2015).

Perspectivas a largo plazo

De igual forma, las perspectivas a largo plazo para la mitigación de GEI por el



ganado son buenas. Las continuas mejoras en las razas de animales hacen prever una reducción de las emisiones de GEI por kg de producto animal. En este mismo sentido, la mejora de la eficiencia de la producción debida a los cambios estructurales o a una mejor aplicación de las tecnologías existentes se asocia generalmente con emisiones reducidas. También nuevas tecnologías pueden surgir para reducir las emisiones provenientes del ganado, como los probióticos, inhibidores de metano, etc. Un reciente estudio ha demostrado la eficacia de la molécula 3-nitrooxypropanol como un inhibidor específico, que reduce persistentemente la producción de metano por los rumiantes de forma significativa, cuando es añadido a muy bajas concentraciones a los piensos; sin efectos significativos sobre la producción de leche y carne (Duin *et al.* 2016). Sin embargo, el aumento de la demanda mundial de productos de origen animal podría significar que mientras que las emisiones por kg de producto disminuyen aumenten las emisiones totales (Smith *et al.* 2007). Estos últimos autores sostienen que la mitigación de las emisiones de GEI asociadas a las diversas actividades agrícolas y el secuestro de C por el suelo podría lograrse a través de mejores prácticas de manejo hasta cierto punto.

Éstas, no sólo son esenciales para mitigar las emisiones de GEI, sino también para otras facetas de la protección del medio ambiente, como el aire y la gestión de la calidad del agua. No obstante, existen muchas incertidumbres debido a la escasez de datos y el conocimiento incompleto de sus efectos. Por otro lado, antes de que las opciones para

mitigar las emisiones de GEI de los sectores de la agricultura puedan ser recomendadas como medidas, sus aspectos socioeconómicos tienen que ser convenientemente evaluados. El **cuadro I** presenta una síntesis de las opciones positivas y negativas de mitigación en la agricultura, considerando principalmente los aspectos ambientales.

Prácticas agronómicas recomendadas

Las tierras de cultivo, que a menudo son manejadas intensivamente, ofrecen muchas oportunidades para implantar prácticas que reduzcan las emisiones netas de GEI. Entre las prácticas de mitigación en la gestión de las tierras de cultivo se incluyen, según Smith *et al.* (2008), las siguientes categorías:

- **Agronomía.** La mejora de las prácticas agronómicas que aumentan los rendimientos y generan mayores entradas de residuos de C puede conducir a un mayor almacenamiento de C en el suelo. Ejemplos de este tipo de prácticas son: el uso de variedades mejoradas de cultivos, ampliar la rotación de cultivos y el uso de cultivos perennes que acumulen más C bajo el suelo, evitar o reducir el uso del barbecho desnudo (sin sembrar). La adición de más nutrientes, cuando el suelo es deficiente

también puede promover ganancias de C del suelo, aunque los beneficios del uso de N fertilizante pueden ser compensados por el aumento de las emisiones de N₂O procedentes de los suelos y de las emisiones de CO₂ procedentes de la fabricación de fertilizantes. Las emisiones también pueden reducirse mediante la adopción de sistemas de cultivo menos intensivos, lo que reduce la dependencia de los plaguicidas y otros inputs (y por lo tanto el coste de GEI en su producción). Un ejemplo importante es el uso de las rotaciones con cultivos de leguminosas, lo que reduce la dependencia de inputs de N, aunque el N derivado de las leguminosas puede ser también una fuente de N₂O. Otro grupo de prácticas agronómicas son las que proporcionan una cubierta vegetal temporal entre los

cultivos agrícolas, la cual incorpora C a los suelos a la vez que puede extraer el N no utilizado por el cultivo anterior aún disponible, reduciendo así las emisiones de N₂O.

- Manejo de nutrientes. El N aplicado como fertilizante y los estiércoles no siempre se utilizan de manera eficiente por los cultivos. La mejora de esta eficiencia puede reducir las emisiones de N₂O generadas por los microorganismos del suelo, en gran parte derivadas de los excedentes de N, y puede reducir indirectamente las emisiones de CO₂ procedentes de la fabricación de los fertilizantes nitrogenados. Las prácticas que mejoran la eficiencia de uso de N, como ya ha sido mencionado, incluyen: el ajuste de la dosis de aplicación sobre la base de la estimación precisa de las necesidades de los cultivos (por ejemplo,

agricultura de precisión); utilización de fertilizantes de liberación lenta o inhibidores de la nitrificación (que frenan los procesos microbianos que conducen a la formación de N₂O); evitar el desfase de tiempo entre la aplicación del N y su absorción por la planta (sincronización); localizar el N con más precisión en el suelo para hacerlo más accesible a las raíces de los cultivos; evitar el exceso de aplicaciones de N y eliminar las aplicaciones de N cuando sea posible.

- Laboreo/manejo de residuos. Los avances en los métodos de control de malas hierbas y en la maquinaria agrícola permiten actualmente que en muchos cultivos se practique el laboreo mínimo (laboreo reducido) o el no laboreo (siembra directa). Estas prácticas se están utilizando cada vez más en todo el mundo. Dado que la alteración del

CUADRO I. RESUMEN DE LOS POSIBLES EFECTOS POSITIVOS (BENEFICIOSOS) Y NEGATIVOS (PERJUICIOS) DE LAS OPCIONES DE MITIGACIÓN EN LA AGRICULTURA (Adaptado de Smith, et al. 2007)

Medida	Ejemplos	Seguridad alimentaria (productividad)	Calidad del agua	Conservación del agua	Calidad del suelo	Calidad del aire	Biodiversidad	Conservación de energía	Estética/valor recreativo
Manejo de cultivos	Agronomía	+	+/-	+/-	+	+/-	+/-	-	+/-
	Manejo de nutrientes	+/-	+		+	+		+	
	Laboreo/manejo de residuos	+	+/-	+	+		+	+	
	Manejo del agua (riego, drenaje)	+	+/-	+/-	+/-			-	
	Agrosilvicultura	+/-	+/-	-			+	+	
	Retirada y cambio de uso de tierras	-	+	+	+	+	+	+	+
Manejo del pastoreo/mejora de pastos	Intensidad de pastoreo	+/-			+		+		+
	Incremento de la productividad (p.ej. fertilización)	+	+/-						
	Manejo de nutrientes	+	+/-	+	+		+	-	+/-
	Manejo del fuego	+	+			-	+/-		+/-
	Introducción de especies (incluidas leguminosas)	+			+			+	
Manejo de suelos orgánicos	Evitar el drenaje/restaurar humedales	-			+		+	+	+
Restauración de tierras degradadas	Control de erosión, enmiendas orgánicas y de nutrientes	+	+		+		+		+
Manejo del ganado	Mejora de las prácticas de alimentación	+			+/-				
	Agentes específicos y aditivos dietéticos	+							
	Cambios de estructura y manejo a largo plazo y mejora animal	+							
Manejo de estiércol y biosólidos	Mejora del almacenamiento y manejo	+	+/-		+	+/-			
	Digestión anaeróbica					+		+	
	Uso más eficiente como fuente de nutrientes	+	+		+	+		+	
Bioenergía	Cultivos energéticos, sólidos, líquidos, biogás, residuos	-					-	+	

'+' Un efecto positivo (beneficio); '-' Un efecto negativo (perjuicio)

suelo por el laboreo convencional tiende a estimular las pérdidas de C del mismo mediante el aumento de la descomposición y la erosión, la reducción del laboreo o la agricultura sin laboreo a menudo conlleva a un aumento de C en el suelo, aunque no siempre. Adoptar un laboreo reducido o no laboreo también puede afectar a las emisiones de N₂O, pero los efectos netos son inconsistentes y no están bien cuantificados globalmente. El efecto de la reducción del laboreo sobre las emisiones de N₂O puede depender de las condiciones del

suelo y del clima: en algunas áreas el laboreo reducido promueve las emisiones de N₂O mientras que en otras pueden reducir las emisiones o no tienen influencia medible. Por último, los sistemas agrícolas que retienen residuos del cultivo también tienden a aumentar el C del suelo, ya que tales residuos son los precursores de la materia orgánica, el principal depósito de C en el suelo.

- Agrosilvicultura. La agrosilvicultura es la producción de ganado o de cultivos alimentarios en tierras donde también crecen árboles, ya sea para obtener

madera, leña u otros productos forestales. La biomasa de C por encima del suelo suele ser normalmente más alta que la de la tierra equivalente sin árboles. Las plantaciones de árboles también pueden aumentar el secuestro de C por el suelo, aunque sus efectos sobre las emisiones de N₂O y CH₄ no son bien conocidos. También Smith *et al.* (2008) han establecido para las diferentes zonas climáticas el potencial de mitigación de CO₂ y N₂O y de los GEI totales de las diferentes prácticas de cultivo. El **cuadro II** muestra dicho potencial para la zona climática templada-seca, que puede asimilarse al clima mediterráneo, expresado en toneladas equivalentes de CO₂ (CO₂-eq) por ha y año. Se entiende por CO₂-eq al potencial de calentamiento global de los principales GEI, considerando que en el N₂O y CH₄ dicho potencial es aproximadamente 310 y 21 veces mayor, respectivamente, que el del CO₂. ■

CUADRO II. POTENCIAL DE MITIGACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) Y ÓXIDO NITROSO (N₂O) DE LAS DIFERENTES PRÁCTICAS DE CULTIVO EN EL CLIMA MEDITERRÁNEO (Adaptado de Smith *et al.* 2008)

Prácticas de cultivo	CO ₂ (t CO ₂ /ha/año)		N ₂ O (t CO ₂ -eq/ha/año)		GEI totales (t CO ₂ -eq/ha/año)	
	Media	Rango	Media	Rango	Media	Rango
Agronómicas (1)	0,29	0,07 - 0,51	0,10	0,00 - 0,20	0,39	0,07 - 0,71
Manejo de nutrientes (2)	0,26	-0,22 - 0,73	0,07	0,01 - 0,32	0,33	-0,21 - 1,05
Laboreo y manejo de residuos (3)	0,15	-0,48 - 0,77	0,02	-0,04 - 0,09	0,17	-0,52 - 0,86
Manejo del agua (4)	1,14	-0,55 - 2,82	0,00	0,00 - 0,00	1,14	-0,55 - 2,82
Retirada de tierras y cambio de uso de la tierra (5)	1,61	-0,07 - 3,30	2,30	0,00 - 4,60	3,93	-0,07 - 7,90
Agrosilvicultura (6)	0,15	-0,48 - 0,77	0,02	-0,04 - 0,09	0,17	-0,52 - 0,86
Restauración de tierras degradadas (7)	3,45	-0,37 - 7,26	0,00	0,00 - 0,00	3,53	-0,33 - 7,40
Aplicación de estiércol y biosólidos (8)	1,54	-3,19 - 6,27	0,00	-0,17 - 1,30	1,54	-3,36 - 7,57

(1) Incluyen: (a) las prácticas agronómicas mejoradas que incrementen los rendimientos generando mayores residuos de C que conlleven a un incremento del almacenamiento de C en el suelo (uso de variedades mejoradas, rotaciones de cultivo, cultivos perennes, evitación del barbecho desnudo); (b) adopción de sistemas de cultivo menos intensivos que reduzcan la dependencia de los pesticidas y otros inputs (por ej., uso de rotaciones con leguminosas, aunque éstas pueden ser una fuente de N₂O); (c) coberturas vegetales temporales entre cultivos.

(2) Mejora de la eficiencia en el uso del N: ajustar la dosis de aplicación a las necesidades de los cultivos (por ej. agricultura de precisión); uso de formas de fertilizantes de liberación lenta o inhibidores de la nitrificación; evitar desfase entre la aplicación del N y la extracción por el cultivo; localizar el N en el suelo para hacerlo más accesible a las raíces de los cultivos; evitar los excesos de aplicaciones de N o eliminar las aplicaciones de N cuando sea posible.

(3) Uso del no laboreo o del laboreo reducido; mantener los residuos del cultivo y evitar quemarlos.

(4) Uso eficiente del riego; ahorro energético; evitar la excesiva humedad del suelo y el alto uso de N; utilización del drenaje en las tierras de las regiones húmedas y pantanosas.

(5) La conversión de las tierras de cultivo a otros usos, como las cubiertas vegetales naturales, que incrementen el almacenamiento de C (por ej. convertir las tierras de cultivos arables en pastos) conlleva a una ganancia de C del suelo debido a la menor perturbación del mismo y a una reducida remoción de C en los productos cosechados. En comparación con las tierras cultivadas, los pastos también pueden reducir las emisiones de N₂O al ser los inputs de N más bajos. En general esta es una opción en tierras agrícolas con excedentes o en cultivos con una productividad marginal.

(6) Se refiere a la producción de ganado o cultivos en tierras donde también crecen árboles ya sea para producción de madera, leña u otros productos arbóreos. El almacenamiento de C en la biomasa aérea es normalmente mayor que la equivalente en el uso de tierras sin árboles. También las plantaciones de árboles pueden incrementar el secuestro de C.

(7) Prácticas que puedan al menos parcialmente, restaurar la reserva de C, incluyen: revegetación (por ej. siembra de gramíneas); enmiendas de nutrientes para mejorar la fertilidad; aplicación de substratos orgánicos tales como estiércol, biosólidos y compost; laboreo reducido y retención de los residuos de cultivo; y conservación del agua.

(8) Los estiércoles pueden liberar cantidades significativas de N₂O y CH₄ durante el almacenamiento, aunque existen algunas prácticas de manejo que pueden disminuir dichas emisiones. También los estiércoles liberan GEI, especialmente N₂O después de su aplicación al suelo, aunque ya se han mencionado algunas prácticas para reducir estas emisiones.

BIBLIOGRAFÍA

Delgado JA, Nearing MA, Rice ChW. 2013. Conservation practices for climate change adaptation. *Advances in Agronomy*, 212: 47-115.

Duin EC, Wagner T, Shima S, Prakash D, Cronin B, Yáñez-Ruiz DR, Duval S, Rumbell R, Stemmler RT, Thauer RK, Kindermann M. 2016. Mode of action uncovered for the specific reduction of methane emissions from ruminants by the small molecule 3-nitrooxypropanol. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. doi:10.1073/pnas.1600298113.

López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.

López-Bellido L. 2016. Influencia de la agricultura en el cambio climático. *Vida Rural*, 407, 22-26.

Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenkov V, Schneider U, Towprayoon S. 2007. Policy and technological constraints to implementation of greenhouse gas mitigation options in agriculture. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 118: 6-28.

Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenkov V, Schneider U, Towprayoon S, Wattenbach M, Smith J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 363:789-813.

Tripathi A, Tripathi D.K, Chauhan D.K, Kumar N, Singh G.S. 2016. Paradigms of climate change impacts on some major food sources of the world: a review on current knowledge and future prospects. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 216: 356-373.

El principio de una buena cosecha.



SAKATA®

Nuestra vida está llena de semillas, según lo que sembramos, recogemos.
Sakata trabaja desde hace más de 100 años para que puedas tener las mejores semillas.
El resultado también depende de ti.

LA SEMILLA ES EL PRINCIPIO

www.sakata-vegetables.eu



El agua es un factor clave en la adaptación de la agricultura al cambio climático

La producción agrícola depende críticamente de cómo las variables climáticas tales como la precipitación y las temperaturas varían a lo largo de una región y en el tiempo. Los efectos del cambio climático en la agricultura se producen a través de las necesidades de agua de los cultivos, la disponibilidad y calidad del agua y otros factores, los cuales se ven afectados tanto por el cambio gradual a largo plazo como por los eventos extremos, a través de un rango de escalas, que van desde la local a la regional y continental. Las interacciones entre el cambio climático, el agua y la agricultura son numerosas, complejas y específicas para cada región.

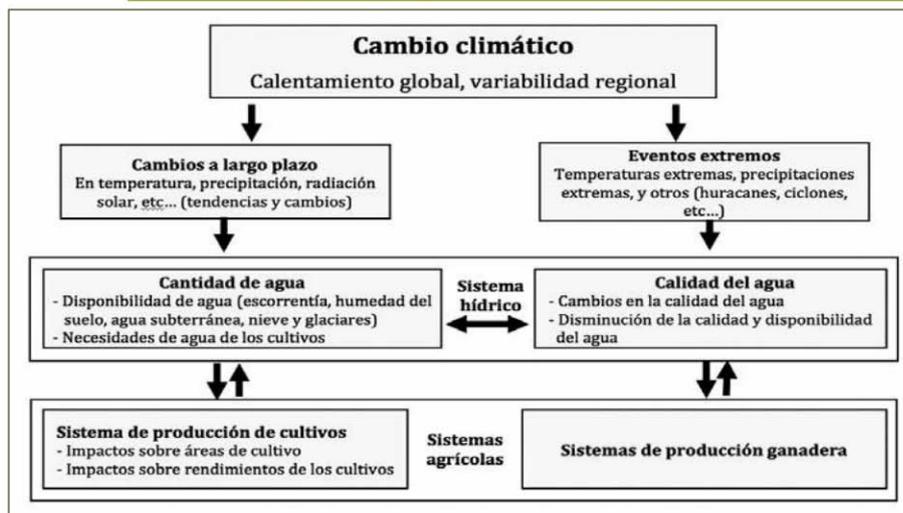
El cambio climático puede afectar a los recursos hídricos a través de varias dimensiones simultáneamente: cambios en la cantidad y en los modelos de tiempo de precipitación, impactos sobre la calidad del agua a través de cambios en la escorrentía, caudal de los ríos, retención y por tanto carga de nutrientes, y a través de eventos extremos como inundaciones y sequías (OECD, 2014). La agricultura consume alrededor del 70% de agua dulce del mundo. Gran parte del agua de riego proviene de reservas subterráneas, sin embargo el

agua es un recurso cada vez más escaso. En muchas áreas donde el cambio climático puede dar lugar a sequías más frecuentes, la menor lluvia creará una necesidad aún mayor del riego. Los agricultores de todo el mundo tendrán que encontrar la forma de aumentar su suministro de agua o reducir su uso, si el mundo ha de lograr su objetivo de una mayor seguridad alimentaria. El mundo se enfrenta a una crisis de agua grave. Cuando se lanzaron en el año 2002 los primeros satélites de monitorización de agua, se conoció la disminución de las reservas de agua subterráneas en todo el mundo. Algunos estudios demuestran importantes pérdidas de agua en algunas regiones de la India, en las cuencas de los ríos Tigris y Éufrates, que comparten Turquía, Siria, Irak o Irán Occidental, y en el Valle Central de California (Bourzac, 2013). La falta de disponibilidad de agua para la producción agrícola, los proyectos energéticos, otras formas de consumo antropogénico de agua y el uso ecológico, representan actualmente un grave problema en muchas partes del mundo y se espera que ello se incremente con el aumento de la población, mayor demanda de alimentos (especialmente carne), el incremento de las temperaturas y el cambio de los modelos de precipitación. La disponibilidad de agua dulce es de suma importancia para casi todos los impactos socioeconómicos y ambientales derivados del cambio climático, con implicaciones para su sostenibilidad (figura 1).

Como han indicado Turrall *et al.* (2011), las perspectivas del regadío como una solución continuada al déficit hídrico no son muy claras, por las siguientes razones:

(1) El impacto de la disminución de los recursos hídricos disponibles sobre las reservas existentes para riego.

FIG 1. Principales relaciones entre el cambio climático, el ciclo del agua y los sistemas agrícolas (adaptado de OECD, 2014).



- (2) El amplio desarrollo de recursos hídricos existentes en las zonas con grandes áreas de regadío, con la consiguiente escasez de agua adicional para asignar a la agricultura.
- (3) El impacto del incremento de la variabilidad hidrológica sobre la capacidad de almacenamiento de agua y los costes financieros y ambientales subsiguientes.
- (4) El incremento de las demandas hídricas de los cultivos como resultado del aumento de la temperatura.
- (5) El incremento del riesgo de salinidad en asociación con el riego en los climas secos.
- (6) Las limitaciones a la expansión de la superficie de regadío debido a: la idoneidad de los suelos y tierras, la disponibilidad de agua y acceso a la misma, la invasión de las tierras existentes y potenciales por el desarrollo urbano, la elevación del nivel del mar y el aumento de la extensión de zonas propensas a las inundaciones.
- (7) Los costes.

- (8) El posible beneficio marginal en comparación con la mejora de la agricultura de secano.

Cinco niveles de acción

Debido a que la gestión del agua agrícola involucra bienes públicos, externalidades y manejo de riesgos, la adaptación privada al cambio climático no es igual a la adaptación colectiva. Según la OECD (2014), una estrategia coherente para gestionar el agua para la agricultura debe tener en cuenta los cinco niveles de acción siguientes:

- En la explotación: adaptación de las prácticas de manejo del agua y los sistemas de cultivo y ganado.
- Nivel de cuenca: adaptación de las políticas de suministro y demanda de agua para la agricultura y por otros usuarios (urbanos e industriales) y usos (ecosistemas).
- Gestión de riesgos: adaptación de los sistemas de gestión de riesgos contra sequías e inundaciones.
- Políticas y mercados agrícolas: adaptación al cambio climático de las

políticas agrícolas existentes y los mercados.

- Interacciones entre mitigación y adaptación del manejo del agua en la agricultura.

Los resultados de la aplicación de modelos hidrológicos para diferentes cultivos, comparando la oferta y demanda de agua, han mostrado preocupantes impactos climáticos directos en las pérdidas de producción de maíz, soja, trigo y arroz. Las limitaciones de agua dulce en algunas regiones intensamente regadas podrían requerir la reversión de 20-60 millones de hectáreas de tierras de cultivo de regadío a secano (oeste de EE.UU, sur y oeste de China y Asia central). La abundancia de agua dulce en otras regiones (norte/este de EE.UU, partes de América del Sur; mayor parte de Europa y Asia sudoriental) podría ayudar a mejorar estas pérdidas, aunque sería necesaria una inversión sustancial en infraestructuras de riego para utilizar el abastecimiento del agua excedente (Elliot *et al.* 2014).

Aumentar la eficiencia del uso del agua

El riego es de suma importancia para aumentar la productividad de las tierras agrícolas existentes, y el consumo proyectado por hectárea de riego es pues un output importante en los modelos globales de cultivos. El riego es también, con mucho, el mayor componente de la demanda antrópica de agua dulce y constituye una parte esencial del ciclo hidrológico global, y por lo tanto de las simulaciones del modelo hidrológico global. Tanto en las regiones en las que se prevé puedan sufrir limitaciones de agua y en las que se prevé puedan tener potencial de ampliar el riego, siempre se podrán beneficiar de la reducción de las

CUADRO I. EVOLUCIÓN DE LA DOSIS DE APLICACIÓN DE RIEGO EN LOS PAÍSES OECD 1990-2010 (ADAPTADO OECD, 2013).

País	Dosis de riego aplicada (m ³ /ha)			Media anual (% de variación por año)	
	1990-1992	1998-2000	2008-2010	1990-1992 a 1998-2000	1998-2000 a 2008-2010
Nueva Zelanda	-	3.400	4.300	-	2,1
Corea	14.300	17.600	18.200	2,7	0,7
Japón	20.600	21.500	21.600	0,4	0,1
Italia	-	7.700	7.600	-	-0,1
España	7.000	6.500	6.300	-1,0	-0,4
Israel	5.200	6.600	6.200	3,0	-0,6
Grecia	6.300	6.100	5.800	-0,3	-0,7
Turquía	7.900	11.400	10.300	4,6	-0,9
EEUU	9.100	8.400	7.700	-0,8	-1,7
Méjico	11.400	12.200	10.700	1,8	-1,7
Francia	3.300	3.100	2.600	-0,6	-2,3
Chile	-	18.100	15.200	-	-2,4
Portugal	10.400	10.400	7.300	0,0	-3,8
Australia	8.700	4.900	3.600	-13,2	-4,0
Dinamarca	900	700	400	-5,1	-7,5

pérdidas de agua en el transporte y en la aplicación, y también del riego deficitario más perfeccionado para aumentar la eficiencia global de su uso (**cuadro I**). Dependiendo de las condiciones locales, el aumento de la capacidad de riego y la eficiencia deben ser completadas por esfuerzos para aumentar la eficiencia del uso del agua y la conservación del suelo en los sistemas de secano, los cuales tienen una capacidad demostrada para mejorar el rendimiento de cultivos sin explotar aún más los recursos de agua dulce en los ríos y acuíferos. En definitiva, se precisan más esfuerzos para aumentar la productividad, incluidos otros medios de intensificación, ahorro de agua y el cambio de uso de la tierra y de la cubierta vegetal, para cerrar lo que se prevé que sea una brecha creciente entre la producción agrícola en las actuales tierras de cultivo bajo el cambio climático y el aumento de la demanda de productos básicos de la agricultura. La mitigación climática efectiva también debe ser una de las medidas más importantes para mantener la

productividad actual en secano y regadío (López-Bellido, 2015). Las zonas del mundo con una larga historia de escasez de agua podrían servir de modelo. En Israel, por ejemplo, el uso innovador del agua en la agricultura es una cuestión de supervivencia. La mayor parte de las tierras de cultivo del país son semiáridas con una precipitación media anual de unos 500 mm. No existe más opción para la agricultura que adoptar las nuevas tecnologías. Hoy día, Israel tiene una tecnología de riego ampliamente reconocida y es un importante fabricante de material de riego por goteo.

Riego por goteo

Son bien conocidas las notables diferencias que existen entre los distintos sistemas de riego. El riego por surcos a lo sumo tiene una eficacia del 60% en su uso por la transpiración y el crecimiento de las plantas, perdiéndose el resto por procesos de evaporación o infiltración profunda en el suelo. El riego por aspersión tiene una eficacia algo mayor, en torno al 75%. La manera de regar con

una eficacia del 90% es el riego localizado, que utiliza un tubo de plástico para aplicar el agua gota a gota en la base de la planta de una manera regulada. El riego por goteo casi continuo mejora la eficiencia de la absorción de agua por las raíces de las plantas, en comparación con la aplicación de la misma cantidad total de agua de forma periódica o diaria. El riego por goteo es apropiado para cultivos de alto valor, tales como árboles frutales, cultivos de hortalizas, algodón, etc., aunque es un sistema demasiado caro para su utilización en cultivos básicos como cereales y otros. Sin embargo, es una tecnología de ahorro de agua cada vez con un coste menor, fácil de instalar, mantener y utilizar, y que permite a los agricultores confiar en ella para asegurarse el abastecimiento de agua a los cultivos.

Uso de redes de sensores

El Departamento de Agricultura de EE.UU está estudiando el uso de redes de sensores para monitorizar el estrés de los cultivos y la humedad del suelo a nivel local en tiempo real, con el fin de que el agua se pueda suministrar con mayor precisión cuándo y dónde sea necesaria. Sensores infrarrojos de temperatura instalados en los equipos de riego monitorizan la temperatura de las plantas a lo largo del día. Si las plantas tienen la misma temperatura que el aire o más fría sus necesidades hídricas están cubiertas; pero si las plantas están más calientes que el aire, especialmente a primeras horas de la mañana, el cultivo está bajo estrés y necesitará aporte de agua. Tales estudios, utilizando monitores de temperatura, han ahorrado 500 m³ de agua por hectárea anuales, tanto en algodón como en sorgo, sin afectar al rendimiento. Se espera que en próximos años el uso de estos sensores integrados se generalice en muchas explotaciones.

La utilización de sensores en los sistemas de riego, tractores y otros equipos recopilarían datos sobre los cultivos, las precipitaciones locales, la humedad del suelo y otros factores. Esta información local será integrada con los datos de los servicios meteorológicos y de satélites de monitorización de agua. Con esta tecnología los agricultores serán capaces de controlar los datos detalladamente y recibir señales de alerta ante cualquier eventualidad, ayudándoles a optimizar los inputs (agua, fertilización, etc.). El resultado más importante de toda esta tecnología será simple: la conservación del agua (Bourzac, 2013).

Aprovechamiento del agua de mar

La necesidad de fuentes de agua que requiere la agricultura también pueden ser satisfecha aprovechando el agua del mar. Afortunadamente, vivimos en un planeta en el cual el 71% de su

superficie está cubierta de agua y prácticamente ninguna de ella es utilizada actualmente para la agricultura. El aprovechamiento del agua de mar es la única opción disponible en muchas regiones, es el caso de Oriente Medio, norte de África, región Mediterránea, Australia, etc. Actualmente, la desalación produce 75 millones de m³ de agua al día, que se utiliza principalmente para consumo humano y para uso industrial. Las tecnologías de desalación más antiguas que trabajan esencialmente por agua hirviendo, requieren 20-25 kW/h para producir 1.000 litros de agua desalada. Estas sólo son prácticas en zonas ricas en petróleo, pero pobres en agua, tal como Arabia Saudí. Las últimas tecnologías, que utilizan membranas de filtración, requieren sólo 3-4 kW/h por cada 1.000 litros, y se está trabajando para reducir aún más los costes. Por otro lado, la energía necesaria para bombear

y presurizar el agua durante el proceso alcanza más de 40% del coste de la desalinización. En la actualidad, las membranas de desalinización están mejorando, y se acoplan al proceso las fuentes de energía renovables, tales como plantas de energía termosolar, para hacer más atractiva la desalinización para la agricultura. Se estima que en función de la salinidad inicial del agua, la energía mínima requerida para la desalinización es alrededor de 1 kW/h por cada 1.000 litros (Bourzac, 2013). La desalinización elimina las sales de sodio y cloruro que impiden el crecimiento de las plantas, aunque éstos no son los únicos iones que se eliminan. El agua desalinizada también carece de Mg, Ca y sulfatos y el reemplazamiento de éstos



requiere la fertilización adicional. Se han encontrado altos niveles de boro, que naturalmente están presentes en el agua del mar y que son retenidos en el agua desalada, los cuales pueden reducir los rendimientos de algunos cultivos en las regiones áridas. Tales consecuencias imprevistas están descubriéndose a medida que se utiliza más agua desalada. No obstante, la tecnología de la desalación deberá ser utilizada en el futuro porque los suministros de agua subterránea son finitos y la sequía es cada vez más común en muchas zonas agrícolas. Por otro lado, habrá que seguir utilizando las opciones ya disponibles como las tecnologías que aumentan la eficiencia de riego, el mejor control del uso del agua, y la búsqueda de nuevas fuentes de agua dulce. En definitiva, todas las soluciones son válidas para paliar la escasez de agua para la agricultura. En cada caso habrá que aplicar la más adecuada, tanto desde el punto de vista económico como ambiental.

Influencia en el secuestro de C y en las emisiones de GEI

Alrededor del 18% de las tierras de cultivo del mundo son de regadío. La ampliación de la superficie de regadío o el uso de medidas de riego más eficaces puede mejorar el almacenamiento de C en los suelos gracias al aumento de los rendimientos y los retornos de residuos. Sin embargo, algunas de estas ganancias pueden ser compensadas por el CO₂ de la energía utilizada para suministrar el agua o de las emisiones de N₂O debido a la mayor humedad de los suelos y a la aportación de mayores dosis de N fertilizante; aunque este último efecto no ha sido ampliamente evaluado. El drenaje de las tierras agrícolas en las regiones húmedas puede promover la productividad (y por tanto el C del suelo), y quizás también

La tecnología de la desalación deberá ser utilizada en el futuro porque los suministros de agua subterránea son finitos y la sequía es cada vez más común en muchas zonas agrícolas.

suprimir las emisiones de N₂O mediante la mejora de la aireación. Sin embargo, cualquier pérdida de N a través del drenaje, podría ser asociada a la pérdida como N₂O (Smith *et al.* 2008).

Aunque es ampliamente aceptado que la mayor reserva de C terrestre se encuentra en el suelo, la información sobre el secuestro de C por los suelos de regadío es limitada.

El riego puede afectar a los procesos de formación del suelo de formas diferentes: la humidificación de suelos por el riego y los cultivos puede aumentar la materia orgánica de los mismos mediante la incorporación de los residuos de la cosecha, la biomasa radicular y las aplicaciones de fertilizantes orgánicos. Por el contrario, el laboreo puede agotar el contenido de materia orgánica de la capa superficial del suelo a través de la oxidación y la actividad microbiana. La tasa de descomposición de la materia orgánica aumenta con el incremento de la temperatura, aunque el riego puede jugar un importante papel en la reducción de la temperatura del suelo en dilatados períodos durante el año. Paralelamente, el riego es más necesario en las condiciones áridas y semiáridas donde las temperaturas son ya altas. Diferentes estudios han reportado tanto pérdidas como ganancias de C en el suelo con la

implantación del regadío. La textura, la permeabilidad y la estructura del suelo juegan un papel importante en el almacenamiento de C, existiendo una fuerte correlación entre la fracción de arcilla y el contenido de C a lo largo del perfil del suelo (Turrall, *et al.* 2011). Los suelos cultivados de arroz en tierras húmedas emiten cantidades significativas de CH₄. Las emisiones durante la estación de crecimiento se pueden reducir con diferentes prácticas. Por ejemplo, el drenaje del arroz inundado una o varias veces durante el período vegetativo reduce eficazmente las emisiones de CH₄, aunque este beneficio puede ser parcialmente contrarrestado por mayores emisiones de N₂O; y la práctica puede verse limitada por el suministro de agua. Cultivares de arroz con bajas tasas de exudación podrían ofrecer una opción importante de mitigación de CH₄. Fuera de la estación de cultivo, las emisiones de CH₄ pueden reducirse mediante una mejor gestión del agua, especialmente al mantener el suelo lo más seco posible y evitando el encharcamiento. ■

BIBLIOGRAFÍA

Bourzac K. 2013. Water: the flow of technology. *Nature*, 501: 4-6

Elliott J, Deryng D, Müller C, Frieler K, Konzmann M, Gerten D, Glotter M, Flörke M, Wada Y, Best N, Eisner S, Fekete BM, Folberth CH, Foster I, Gosling SN, Haddeland I, Khabarov N, Ludwig F, Masaki Y, Olin S, Rosenzweig C, Ruane AC, Satoh Y, Schmid E, Stacke T, Tang Q, Wisser D. 2014. Constraints and potentials of future irrigation water availability on agricultural production under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111: 3239-3244.

López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.

OECD. 2013. Compendium of Agri-environmental Indicator- OECD Publishing. <http://dx.doi.org/10.1787/9789264181151>.

OECD. 2014. Climate change, water and agriculture. Organization for Economic Co-operation and Development. Paris. 99 pp.

Smith P, Martino D, Cai Z, Gwary D, Janzen H, Kumar P, McCarl B, Ogle S, O'Mara F, Rice C, Scholes B, Sirotenko O, Howden M, McAllister T, Pan G, Romanenko V, Schneider U, Towprayoon S, Wattenbach M, Smith J. 2008. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 363:789-813.

Turrall H, Burke J, Faurès JM. 2011. Climate change, water and food security. *FAO Water Reports* 36. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 174 pp.

Biodiversidad, recursos genéticos y cambio climático

Beneficios de la biodiversidad para la agricultura y acciones futuras para su conservación

La biodiversidad desempeña un papel crucial en la agricultura y su pérdida podría conducir a pérdidas significativas en la diversidad genética dentro de las especies más importantes para la alimentación. La biodiversidad agrícola no se ha integrado adecuadamente en las estrategias de adaptación

de la agricultura al cambio climático, lo que crea un desafío para el futuro. Para realizar un análisis es necesario comprender el alcance y la distribución de la biodiversidad en la agricultura y su vulnerabilidad y combinar esta información con la disponible en los modelos de cambio climático. En este artículo se sugieren una serie de acciones futuras en relación con la biodiversidad y el cambio climático.



El cambio climático puede representar una seria amenaza para la adaptación de las especies y para los servicios de los ecosistemas a la agricultura, esenciales para la producción de alimentos. Se prevé que los aumentos de la temperatura y las concentraciones atmosféricas de CO₂ induzcan grandes cambios en la estructura y función de los ecosistemas, las interacciones ecológicas y la distribución geográfica de las especies; con consecuencias predominantemente negativas para la biodiversidad, los ecosistemas y los bienes y servicios derivados para el hombre, por ejemplo el suministro de agua y alimentos (FAO, 2008).

La agrobiodiversidad (tanto de plantas como de la biota del suelo) es crucial para hacer frente al cambio climático. La evidencia acumulada revela que hay una inminente amenaza para la biodiversidad debido al calentamiento global, ya que los organismos tienen que adaptarse al cambio ambiental para jugar eficazmente su papel en su respectivo agrosistema. Los parientes silvestres de las especies de plantas cultivadas corren un riesgo añadido debido a la erosión genética y a la pérdida de biodiversidad. Éstos necesitan ser preservados *in situ* en áreas protegidas para asegurar la evolución de nuevas variantes genéticas, las cuales pueden contribuir a dirigir nuevos avances para la producción

agrícola y la calidad de los cultivos (Dwivedi *et al.* 2013).

Amenazas a la biodiversidad

El cambio climático plantea amenazas a la biodiversidad que son también importantes para la seguridad alimentaria. La biodiversidad desempeña un papel crucial en la agricultura. La biodiversidad agrícola proporciona una serie de beneficios dentro de los agrosistemas; los cuales incluyen beneficios asociados con la producción y la productividad, la función del agroecosistema y el bienestar humano (**cuadro I**). La pérdida de biodiversidad afectará a la agricultura, y podría conducir a pérdidas significativas en la diversidad genética dentro de las especies más importantes para la alimentación. La biodiversidad agrícola no se ha integrado adecuadamente en las estrategias de adaptación de la agricultura al cambio climático, lo que crea un desafío para el futuro. La mejora de los servicios de los agrosistemas a través del uso de la biodiversidad agrícola será crucial, ya que contribuye a la adaptación, la mitigación y la resistencia al cambio climático. Analizar si el cambio climático puede constituir una amenaza para la biodiversidad en el futuro requiere comprender el alcance y la distribución de la biodiversidad en la agricultura y su vulnerabilidad, y patrones de adaptación. La combinación de esta información, con la disponible en los modelos de cambio climático, será un requisito básico para informar de las estrategias más adecuadas para su adaptación y conservación (López-Bellido, 2015).

Acciones futuras

La FAO (2008) ha sugerido un conjunto de acciones futuras en relación con la biodiversidad y el cambio climático:

CUADRO I. BENEFICIOS DE LA BIODIVERSIDAD PARA LA AGRICULTURA A TRAVÉS DE LOS SERVICIOS DE LOS ECOSISTEMAS. (ADAPTADO DE FAO, 2008).

Suministro	Regulación	Apoyo	Cultural
<ul style="list-style-type: none"> - Alimentos y nutrientes. - Combustibles. - Piensos. - Medicinas. - Fibras y tejidos. - Material para la industria. - Material genético para la mejora de variedades y sus rendimientos. - Resistencia a plagas y enfermedades. 	<ul style="list-style-type: none"> - Regulación de plagas y enfermedades. - Control de erosión. - Regulación del clima. - Regulación de riesgos naturales (sequías, inundaciones y fuego). - Polinización. 	<ul style="list-style-type: none"> - Formación del suelo. - Protección del suelo. - Ciclo de nutrientes. - Ciclo del agua. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bosques reservados como fuentes de alimento y agua. - Variedad de formas de vida agrícola. - Reservorios de material genético. - Reservorios de polinizadores.

El mantenimiento y el uso de una amplia gama de diversidad genética en un momento de cambio climático será de un valor esencial para la agricultura. El uso sostenible de los recursos genéticos será la base para muchas de las estrategias de adaptación necesarias en la alimentación y la agricultura.

- Mejorar los inventarios nacionales sobre diversidad biológica, que incluyan información espacial relevante que evalúe las amenazas causadas por el cambio climático a las especies, poblaciones o genotipos de interés para la agricultura.
- Mejorar el conocimiento sobre los procesos genéticos, tales como el flujo de genes, introgresión, poblaciones locales y

- extinciones, que permitan o socaven la adaptación de las especies al cambio climático.
- Llevar a cabo un modelo predictivo de la distribución futura de los recursos genéticos para la agricultura bajo diferentes escenarios de cambio climático, con el fin de mejorar las estrategias nacionales.





- Desarrollar planes de monitorización de la biodiversidad para analizar los cambios debidos al clima en sistemas agrícolas específicos; con el objetivo de mejorar la información sobre las estrategias de adaptación.
- Fortalecer la caracterización y evaluación de los recursos genéticos para la agricultura como base fundamental para permitir su uso sostenible.
- Desarrollar o fortalecer los sistemas de información sobre los recursos genéticos, incluidos los sistemas de alerta temprana.

Un mayor conocimiento de los ecosistemas

Mejorar el conocimiento de los servicios que prestan los agrosistemas a través de la diversidad biológica agrícola y de cómo pueden verse afectados por el cambio climático, será un elemento clave en el desarrollo de las respuestas agrícolas sostenibles. Tales respuestas deben ser dinámicas, dados los complejos cambios que se producen a diferentes escalas. La capacidad de adaptación mediante la gestión de la biodiversidad en los sistemas agrícolas requiere:

- Identificar qué ecosistemas agrícolas, componentes o propiedades de la biodiversidad agrícola son más o menos sensibles a la variabilidad climática.
- Poner en marcha un seguimiento a largo plazo de la biodiversidad agrícola funcional en los sistemas de producción,



e identificar los indicadores clave de esta biodiversidad para facilitar dicho seguimiento.

- Promover la difusión de conocimientos, tecnologías y herramientas para mejorar adecuadamente las prácticas de gestión relacionadas con la diversidad biológica agrícola y los servicios de los ecosistemas.

Un uso sostenible de los recursos genéticos

Los recursos genéticos constituyen la materia viva que las comunidades locales, los mejoradores y los investigadores utilizan para adaptarse a las nuevas necesidades socioeconómicas y los retos ecológicos. El mantenimiento y el uso de una amplia gama de diversidad genética en un momento de cambio climático será de un valor esencial para la agricultura. El uso sostenible de los recursos genéticos será la base para muchas de las estrategias de adaptación necesarias en la alimentación y la agricultura. Con el fin de adaptarse al cambio climático, las plantas y animales importantes para la seguridad alimentaria tendrán que adecuarse a los cambios abióticos, como el calor, la sequía, las inundaciones y la salinidad. También el cambio climático traerá nuevas plagas y enfermedades, que requerirán nuevas resistencias de los cultivos y variedades. La diversidad genética que se encuentra

actualmente infrautilizada puede ser más atractiva para la agricultura como consecuencia del cambio climático (**cuadro II**).

La actual falta de caracterización y evaluación de los recursos genéticos para la alimentación y la agricultura será un obstáculo en el desarrollo de mecanismos de adaptación al cambio climático. La

evaluación es actualmente un cuello de botella importante en todos los tipos de recursos genéticos. Mejorar los sistemas de información sobre los recursos genéticos y la difusión de información relevante para los usuarios será una prioridad importante para el futuro.

Reunir y proteger el germoplasma

Existe una necesidad continua de reunir y proteger estratégicamente el germoplasma y descubrir nuevas fuentes de variación, que permitirán el desarrollo de nuevas variedades de cultivos adaptadas al clima adverso y su variabilidad. El material silvestre próximo a los cultivos ha contribuido a introducir muchas características agronómicas beneficiosas en forma de modernos cultivares. Dicho material continuará suministrando variación genética útil para la adaptación al cambio climático y haciendo también posible el mantenimiento de la potencialidad genética de los cultivos. Promover su conservación en explotaciones agrícolas puede permitir que los genes evolucionen y respondan a los nuevos ambientes, lo cual podría ser de gran ayuda para capturar nuevas variantes genéticas que ayudarían a mitigar los impactos del cambio climático (Dwivedi *et al.* 2013).

Conservación *ex situ* e *in situ*

El cambio climático es probable que

cause una pérdida significativa de la diversidad genética que es fundamental para la sostenibilidad agrícola. La conservación *ex situ* e *in situ* necesitarán más apoyo para garantizar la disponibilidad de los recursos genéticos. La conservación *in situ* en explotaciones agrícolas será necesaria para garantizar la evolución dinámica de la diversidad genética hacia las condiciones cambiantes. Sin embargo, habrá regiones en las que el ritmo de cambio causado por el cambio climático puede ser mayor que la capacidad natural de ciertas especies y poblaciones para su adaptación. Entonces será necesario intervenir para evitar la erosión genética acelerada, en particular a través de la conservación *ex situ*. La conservación *ex situ* debe considerarse como una estrategia complementaria a la conservación *in situ* y no sustituirla. El desafío está en cómo desarrollar un enfoque global integrado para que su conservación y uso resulte rentable, y que al mismo tiempo proteja la diversidad en el futuro ante el posible cambio climático.

La cooperación internacional, clave de la estrategia

Con el cambio climático, los países dependerán cada vez más de los recursos genéticos de otros países y regiones para adaptar su agricultura. La pérdida de diversidad genética en un determinado lugar puede tener efectos negativos tanto a nivel local como a nivel mundial, ya que características importantes para la adaptación al cambio climático pueden ser perdidas irreversiblemente. La interdependencia entre los países en relación a los recursos genéticos para la agricultura aumentará, igual que la necesidad de mejorar los mecanismos de intercambio de los mismos. En los países en desarrollo, la falta de recursos humanos y financieros impedirá la respuesta al cambio climático a través de la conservación y el uso sostenible de los recursos genéticos. La cooperación internacional, por lo tanto, será un elemento clave de la estrategia de conservación a largo plazo para enfrentarse al cambio climático en este campo. En este sentido, la FAO (2008)

recomienda las acciones futuras siguientes:

- Analizar los efectos del cambio climático, en particular en los centros de origen y diversificación de los recursos genéticos, con el fin de informar sobre las estrategias de conservación a escala nacional.
- Mejorar los métodos de supervisión de los recursos genéticos que están administrados *in situ* para profundizar en la comprensión de las amenazas y de la vulnerabilidad debidas al cambio climático.
- Promover la recogida y la conservación *ex situ* de los recursos genéticos más amenazados por el cambio climático y potencialmente más útiles en la adaptación.
- Desarrollar programas y estrategias sólidas para el uso sostenible de los recursos genéticos, para que los agricultores y ganaderos puedan disponer de una amplia gama de diversidad genética para adaptarse al cambio climático.
- Integrar las dimensiones del cambio climático en las políticas y programas internacionales para la conservación y el uso sostenible de los recursos genéticos, y la distribución justa y equitativa de los beneficios derivados de su utilización.
- Fortalecer la cooperación internacional para crear capacidad en los países en desarrollo que permita la conservación y el uso sostenible de los recursos genéticos con el fin de responder al cambio climático. ■

CUADRO II. UTILIZACIÓN DE LA DIVERSIDAD GENÉTICA PARA LA ADAPTACIÓN DE LOS CULTIVOS AL CAMBIO CLIMÁTICO (ADAPTADO DE FAO, 2008).

Adaptación	Ejemplos de características y prácticas de manejo
Nuevos estrés abióticos	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptación de variedades de cultivos para permitir nuevas épocas de siembra o recolección. - Mejora de los cultivos para incrementar la eficiencia en el uso del agua, la tolerancia al estrés por calor o el uso de nutrientes. - Uso de especies infrautilizadas o variedades adaptadas a ambientes severos. - Manejo basado en el cultivo de poblaciones con una amplia diversidad genética de plantas para permitir la capacidad de adaptación.
Nuevos estrés bióticos	<ul style="list-style-type: none"> - Utilización de cultivares resistentes a enfermedades, multilíneas o mezclas compuestas por los agricultores para fortalecer la capacidad de adaptación y resistencia de los cultivos. - Utilización de estrategias de diversificación para incrementar el número de especies y la diversidad genética de los cultivos y reducir la vulnerabilidad.
Eventos climáticos extremos	<ul style="list-style-type: none"> - Mejora de la especies forestales boreales para controlar la época primaveral de crecimiento y evitar los daños de heladas tardías. - Utilización de la diversidad genética de las especies forestales tolerantes al fuego. - Comunidad de variedades locales adaptadas para soportar eventos climáticos extremos.

BIBLIOGRAFÍA

- Dwivedi S, Sahrawat K, Upadhyaya H, Ortiz R. 2013. Food, nutrition and agrobiodiversity under global climate change. *Advances in Agronomy*, 120: 1-128
- FAO. 2008. Climate change and biodiversity for food and agriculture. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Roma. 11pp.
- López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.

Mejora genética, biotecnología y cambio climático

Es necesaria la combinación de diversos métodos para paliar los efectos del cambio climático

Para alimentar alrededor de 9.000 millones de personas a mediados del siglo XXI, la producción de alimentos de alta calidad debe incrementarse con inputs reducidos. La mejora genética de los cultivos debe por esta razón enfocarse en aquellas características que mejoren su calidad nutricional, proporcionen mayores cantidades de nutrientes, incrementen la eficiencia en el uso del agua y aquellas otras características que mejoren la adaptación a los estreses abióticos y bióticos con el objetivo de incrementar el rendimiento. Sin embargo, hay que tener en cuenta que la mejora genética es un proceso largo, por lo que la preparación para adaptarse al cambio climático requiere planificación (Dwivedi *et al.* 2013).



Nuevos cultivares necesitarán ser continuamente desarrollados para ayudar a resistir los extremos climáticos y mantener o incluso aumentar la productividad en un escenario de incremento de la diversidad climática. El cambio climático, como también ya se ha citado, está alterando la disponibilidad de recursos y cambiando las condiciones ambientales, cruciales para su

comportamiento. Éstos responden a dichos cambios a través de las variaciones inducidas ambientalmente en el fenotipo (plasticidad fenotípica). El entendimiento de estas respuestas es crucial para predecir y manejar los efectos del cambio climático sobre las especies nativas, así como en las plantas cultivadas. La evidencia de los datos sugiere que la mejora de la plasticidad fenotípica, en otras

características diferentes al rendimiento, permitirá aumentar potencialmente la capacidad de adaptación a un ambiente cada vez más imprevisible.

Retos de la mejora genética

La moderna mejora genética de plantas utiliza una gran variedad de tecnologías para identificar los controles genéticos de características simples y complejas, con el aumento de la capacidad para acelerar la incorporación de la variación genética adaptativa en el germoplasma parental y en los cultivares de muchas especies comercializadas. La mejora genética para la adaptación a los nuevos ambientes climáticos es un reto. Los principales programas de mejora genética ya reconocen que el cambio climático es un riesgo potencial para la producción, e incluso una oportunidad de mercado. En la mejora genética de plantas, el principal peligro, y la principal oportunidad, es si el cambio climático conduce a condiciones, más variables de producción entre las que podrían figurar la secuencia de estaciones de condiciones extremas, particularmente si estas comprenden eventos de altas temperaturas que podrían tener consecuencias catastróficas (Chapman *et al.* 2012). La mejora genética de plantas en el futuro tendrá que enfrentarse con características más complejas

CUADRO I. EJEMPLOS DE RESPUESTA DE ADAPTACIÓN AL INCREMENTO DE LAS TEMPERATURAS MEDIAS Y EXTREMAS. (Adaptado de Chapman *et al.* 2012).

Característica	Afectada por	Objetivo	Escala de adaptación
Desarrollo fenológico para optimizar la época de floración y otros eventos	- Respuesta a la temperatura	- Respuesta más lenta (o más rápida) a las altas temperaturas	Planta/cultivo
	- Respuesta al fotoperíodo y vernalización	- Modificar el tiempo de desarrollo independiente de la temperatura	Planta/cultivo
	- Respuesta a la temperatura, fotoperíodo y vernalización	- Sincronizar las fases del cultivo a las condiciones climáticas (p.ej. floración temprana da lugar a condiciones más frías para el llenado del grano). Manipular el uso del agua entre pre y post floración	Planta/cultivo
Respuesta, escape y tolerancia de altas temperaturas en órganos vegetativos	- Proteínas activas de choque térmico	- Proteger la integridad de la enzima en general y el aparato fotosintético en particular	Molecular
	- Control estomático de la transpiración	- Refrigerar la transpiración	Molecular
	- Respiración reducida (especialmente durante la noche)	- Impacto más bajo de las altas temperaturas sobre el crecimiento neto	Molecular
	- Incremento de la parte radicular	- Mantener el suministro de agua y la cubierta más fría	Órgano
	- Incremento de la cera epicuticular del enrollamiento de la hoja (ubicuo o activo en respuesta al estrés)	- Reducir la carga térmica	Órgano
Adaptaciones reproductivas	- Permanencia verde (senescencia reducida)	- Más crecimiento (tasa/duración) durante el llenado del grano	Órgano/planta
	- Mantenimiento del desarrollo del ovario, viabilidad del polen y fecundación	- Mantenimiento del número de granos	Órgano/planta
Calidad de producto	- Crecimiento del pedúnculo	- Normal extrusión de la inflorescencia (mantiene la espiga más fría, facilita la recolección)	Órgano
	- Incremento de la removilización de reservas	- Mantenimiento del crecimiento del grano	Órgano/planta
	- Capacidad de respuesta enzimática a la temperatura	- Mantener un perfil óptimo de la composición de proteínas/grasas/azúcar/ almidón	Molecular

controladas por series de genes que interactúan y redes de regulación génica como las implicadas en la reacción de defensa contra plagas y enfermedades. Los estreses abióticos causados por la sequía y las altas temperaturas influyen e interactúan con estas redes. Una vez más, la distinción entre las formas de vida del patógeno serán importantes. Históricamente, ha habido un éxito limitado en la mejora genética de la resistencia a las enfermedades transmitidas por el suelo, donde el nivel de complejidad se incrementa más en el complejo heterogéneo del ambiente del suelo. Los efectos del cambio climático sobre la biología y química del suelo son difíciles de predecir. Como en el pasado, una prioridad esencial, en el contexto del cambio del clima, deberá ser la mejora

para la resistencia o tolerancia a los efectos de las plagas y enfermedades existentes y nuevas. Por lo tanto, la investigación sobre la potencial incidencia e intensidad de los estreses bióticos y la oportunidad de soluciones genéticas, es una prioridad esencial (Chapman *et al.* 2012).

Principales efectos abióticos del cambio climático

Los factores relacionados con la mejora genética para adaptar a los cinco efectos principales abióticos del cambio climático (calor, sequía, encharcamiento, salinidad y elevado CO₂) son más difíciles de analizar y varían con las especies y el área de producción, con impactos tanto en el rendimiento y la calidad del

producto. Aunque existe una alta probabilidad de incremento en el futuro en la concentración de CO₂ y las temperaturas, hay incertidumbre sobre la dirección y magnitud de los cambios de lluvia. En consecuencia, las oportunidades más claras para las ganancias genéticas para los estreses abióticos son el desarrollo de una mejor adaptación a las altas temperaturas (p. ej. control de la duración de los estados fenológicos y tolerancia al estrés) y para las especies C3 en la explotación de los efectos (relativamente pequeños) de la fertilización del elevado CO₂. Para las especies más cultivadas de plantas, queda por demostrar cuánta variación genética existe para estas características y qué valor puede ser liberado vía variedades comerciales. Para los

principales cultivos de cereales es necesario documentar mejor las oportunidades que existen de variación genética en la fenología, tolerancia a la temperatura y respuesta al CO₂ elevado para contribuir a la mejora del rendimiento, especialmente en las regiones donde las previsiones indican que las temperaturas se incrementan. Para las especies C3, tal como el trigo, arroz, algodón y oleaginosas, las perspectivas de ligeros incrementos en la eficiencia en el uso del agua debido a las condiciones de CO₂ elevado se espera compensen parcialmente algunos de los impactos de la temperatura que resulten en un acortamiento de la longitud de la estación de crecimiento. Sin embargo, este efecto no está bien cuantificado para algunas especies de cultivo y no es tan

beneficioso para las especies C4, tal como el sorgo y el maíz. Son necesarios métodos eficientes para valorar la variación genética en la respuesta al crecimiento con CO₂ elevado (Chapman *et al.* 2012).

Sin embargo, no está claro si los investigadores pueden seguir consiguiendo aumentos de los rendimientos como en las últimas décadas, o si tales mejoras son adecuadas para los cambios que se avecinan. Las altas temperaturas y la sequía causan un mayor impacto durante las fases de floración y reproducción. Muchos cultivos han desarrollado mecanismos para acelerar la floración antes de que llegue la estación seca. Los mejoradores han explotado esta característica para generar variedades

Topcon X Family Consoles

En precisión más opciones
son mejores decisiones



- Aumenta la eficiencia y reduce los costes
- Fácil de aprender y manejar
- Vistas configurables por el usuario
- Fácil actualización

La familia Topcon de consolas para guiado con pantalla a color, táctil, multi-íconos, aportan un rendimiento superior e innovador, además de gran facilidad de uso, para cualquier aplicación que busca utilizar la agricultura de precisión para mejorar la productividad y reducir los costes de operación. La amplia variedad de características, funciones y precios le permiten seleccionar la opción de visualización que mejor se adapten a sus necesidades de hoy y actualizarlas fácilmente para que crezcan al ritmo de sus progresos en materia de agricultura de precisión.

 **TOPCON**

topconpositioning.com



Los factores relacionados con la mejora genética para adaptar a los cinco efectos principales abióticos del cambio climático (calor, sequía, encharcamiento, salinidad y elevado CO₂) son más difíciles de analizar y varían con las especies y el área de producción, con impactos tanto en el rendimiento como en la calidad del producto.

precoces de cultivos a través de cruzamientos tradicionales. En Australia, el ajuste de la época de floración ha sido el factor más importante para la mejora del rendimiento del trigo (Eisenstein, 2013).

Tolerancia al aumento de la temperatura y de la sequía

En las especies de cereales, un mejor entendimiento del control genético del desarrollo y el tiempo de floración será esencial para ayudar a los programas de mejora para proporcionar nuevas combinaciones de genes en las variedades existentes. Muchos de los genes que controlan el tiempo de floración a través de la respuesta a la vernalización y el fotoperiodo han sido

identificados en especies modelo y varias especies de cultivo, pero el control genético de respuesta a temperatura *per se* no es bien entendido. En la actualidad, también es lenta la selección de genotipos para la tolerancia a las altas temperaturas, ya sea en la fase vegetativa o reproductiva del crecimiento. La mejora genética para estas características requiere invertir en el desarrollo de la selección fenotípica de alto rendimiento, que permita la observación de la temperatura de la cubierta y de la espiga, y del impacto de las altas temperaturas sobre la función de la hoja y los procesos asociados con el desarrollo del ovario, variabilidad del polen y el cuajado y llenado del grano (**cuadro I**) (Chapman *et al.* 2012).

Debido a que gran parte de los progenitores ancestros de la mayoría de los cultivos se desarrollaron en condiciones periódicamente secas, deben existir genes de tolerancia a la sequía en la mayoría de las colecciones de germoplasma. No todos estos importantes genes han persistido en los cultivares modernos, debido a que la agricultura se ha concentrado en la mejora de variedades adaptadas a los entornos favorables y de respuesta al riego. La necesidad de incorporar genes de tolerancia a la sequía resulta acuciante a la vista de las probabilidades cada vez más frecuentes de sequías severas. La agricultura debe producir más cultivos por volumen de agua y desarrollar estrategias para compartir los recursos hídricos en la interfase rural-urbana, donde el agua se puede comprar y ser desviada a usos no agrícolas (Lauer *et al.* 2012). En relación con la adaptación de los cultivos a la sequía y las altas temperaturas, Lauer *et al.* (2012) han planteado diferentes objetivos referidos a la mejora genética:

- (1) Creación de equipos de investigación integrados por mejoradores, genetistas, fisiólogos y agrónomos, que aborden el estudio de la tolerancia al estrés abiótico en su más amplio sentido con el propósito de producir variedades tolerantes y económicamente viables.
- (2) Desarrollar redes de áreas propensas al estrés abiótico y métodos eficaces de detección precoz, que identifiquen genotipos tolerantes a la sequía y a las altas temperaturas.
- (3) Determinar los recursos genéticos económicamente importantes en relación a estos estreses abióticos en las colecciones de germoplasma y en los programas de mejora aplicados.
- (4) Establecer cuáles son los mecanismos fisiológicos mediante los cuales los genes de tolerancia al estrés

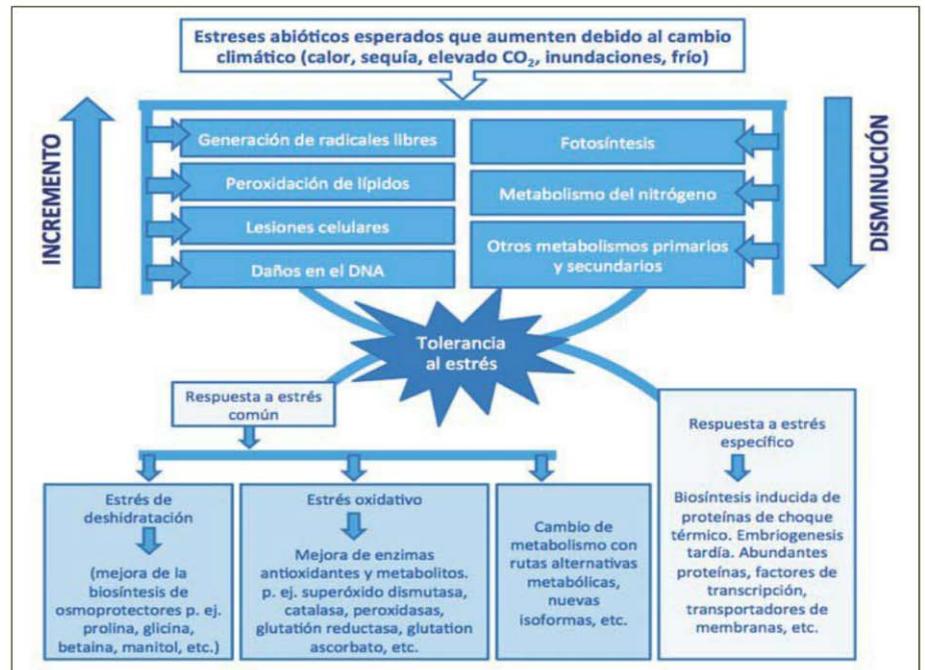
interactúan unos con otros y con el medio ambiente para conferir tolerancia al mismo.

- (5) Determinar cuáles son los mecanismos fisiológicos y genéticos por los que la temperatura reduce la viabilidad del polen y el cuajado de frutos y semillas, y si la tolerancia genética al estrés de temperatura puede ser lograda.
- (6) Explotar la variación en la morfología y profundidad de las raíces y/o la funcionalidad de las raíces, hojas y tallos para mitigar los efectos de los estreses abióticos.

Del laboratorio al campo, el problema de la transferencia

Aunque los genetistas han logrado un progreso constante en la manipulación de las plantas en condiciones controladas de laboratorio; en relación con el uso del agua, estas mejoras raramente se han traducido en beneficios en el campo. Por ello, muchos fisiólogos vegetales están adoptando otros enfoques para conocer mejor el comportamiento de las plantas respecto a sus necesidades hídricas. Las plantas también sobreviven a condiciones secas mediante el uso de procesos de escape y de tolerancia, modelando su capacidad para captar más agua del medio ambiente y mantener una actividad vigorosa cuando su disponibilidad es limitada. Algunas de estas estrategias son más eficaces que otras; implicando un sistema de raíces más profundo o reduciendo la pérdida de agua por evaporación mediante un mayor desarrollo foliar que sombree mejor el suelo. Sin embargo, las condiciones de sequía varían drásticamente de una región a otra, por lo que no bastaría una sola característica que confiera resistencia ideal a la sequía para todas las zonas. Bajo las condiciones de secano en zonas semiáridas, las lluvias son la clave para el rendimiento de los

FIG 1. Mecanismos naturales de las plantas para defenderse de los estreses abióticos (adaptado de Baudhd et al. 2015).



cereales, altamente vulnerables a la sequía. Nuevas variedades de trigo han sido obtenidas en Australia con mayor eficiencia en el uso de agua, lo que permite maximizar la producción de grano con reducido aporte hídrico. En contrapartida, estos cultivares tienden a ser de pequeño porte y de baja productividad en condiciones más favorables (López Bellido, 2015).

Uso de la biotecnología, una herramienta esencial

Las perspectivas del cambio climático, causada por el aumento de los constituyentes atmosféricos, puede suministrar motivos para el uso de la biotecnología. Las tecnologías de mejora genética basadas en la biotecnología (selección asistida por marcadores y la modificación genética) serán esenciales para acelerar la ganancia genética, pero

su aplicación requiere una inversión adicional en el entendimiento, caracterización genética y el fenotipo de las complejas características adaptativas para las condiciones de cambio climático. Puede haber oportunidad para optimizar la fotosíntesis y la respuesta de la conductancia estomática a los altos niveles de CO₂ atmosféricos. Las técnicas biotecnológicas pueden ofrecer el potencial para crear una adaptación efectiva a las circunstancias del cambio climático. Sin embargo, el enfoque más reciente de la creación de organismos genéticamente modificados ha progresado poco hasta ahora en la vía de la mejora de la resistencia a la sequía (Eisenstein, 2013).

Contribución a la seguridad alimentaria

Una cuestión que frecuentemente es suscitada es si la ingeniería genética

puede contribuir a la seguridad alimentaria, así como a la mejora de la nutrición humana y de la agricultura bajo un cambio climático. Como resultado del mismo, existe un incremento en la frecuencia de eventos extremos que probablemente reduzcan el rendimiento de los cultivos, afectando todas las dimensiones de la producción del cultivo. Muchos de los mecanismos de tolerancia a los estreses abióticos en las plantas son complejos debido a la implicación de múltiples rutas metabólicas (figura 1). Por tanto, la manipulación de estos caracteres a través de la mejora genética convencional supone un gran reto. La transformación genética de plantas es una alternativa eficiente a este problema. La transformación genética de plantas con regulación de genes, por ejemplo, factores de transcripción, es un método prometedor para la ingeniería genética debido a que muchas de las rutas en las cuales las plantas pueden adaptarse al frío, sequía, estrés oxidativo y temperatura extrema es a través del control transcripcional (Sainger *et al.* 2015).

Precauciones necesarias

Varias precauciones han de ser tenidas en cuenta. Los organismos genéticamente modificados pueden no ser capaces de hacer frente a todos los efectos de la dinámica del cambio climático que ocurren en las regiones agrícolas. Por ejemplo, severas inundaciones pueden continuar siendo perjudiciales para la producción del cultivo, independientemente de los recursos genéticos. La diseminación de nuevas y severas plagas de los cultivos pueden ser tan rápida como para originar grandes daños antes del desarrollo de cultivos modificados apropiados. Finalmente, se requiere mucha

investigación y ensayos con cultivos genéticamente modificados (GM). En cualquier caso, los potenciales posibles beneficios o los daños son más claramente entendidos (Hillel y Rosenzweig, 2005).

La ingeniería genética y los GEI

Finalmente, la opciones de mejora genética podrían también ser desarrolladas en relación con la habilidad



de los cultivos para secuestrar carbono (C), producción de biocombustibles, reducción de las emisiones de metano de las plantaciones de arroz y los sistemas de ganado rumiante, y el manejo de las emisiones de óxido nitroso derivadas de la fertilización nitrogenada (Hillel y Rosenzweig, 2005). La ingeniería genética ya ha contribuido a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) como resultado del menor uso de combustible y almacenamiento adicional de C en el suelo derivado del laboreo reducido con cultivos GM. El incremento de la productividad de los cultivos GM ha reducido la presión para la conversión de tierras no agrícolas en tierras de cultivo, lo cual es una principal contribución al incremento de GEI en la atmósfera. Esto indica que ellos puede jugar un gran papel tanto en la mitigación como en la

adaptación al cambio climático (Sainger *et al.* 2015).

El importante papel del manejo agronómico

Aunque existe una tendencia a centrarse en la genética, ya que hay gran cantidad de factores atractivos para la creación de nuevas variedades prometedoras; sin embargo la evidencia es que la agronomía (modificación del ambiente) también tiene realmente un papel importante (por ejemplo, la tendencia hacia un menor laboreo, lo cual ayuda a conservar la humedad del suelo). Eisenstein (2013) señala que un adecuado manejo del suelo y del agua han hecho mucho más para conservar la productividad agrícola en los climas áridos de Australia que cualquier tipo de mejora genética en las variedades cultivadas. En definitiva, estamos ante un sistema muy complejo que requiere un enfoque en métodos basados en la combinación de la agronomía, la mejora y la biotecnología. ■

BIBLIOGRAFÍA

- Baudh K., Sainger M., Kumar S., Sainger P.A., Jaiwal P.K., Singh R.P. 2015. Biotechnological approaches to mitigate effects of extreme climatic factor on plant productivity. En "Genetic manipulation in plants for mitigation of climate change" (P.K. Jaiwal, R.P. Singh, O.P. Dhankher, Eds.). Springer, India, 187-203.
- Chapman S.C., Chakraborty S., Dreecer M.F., Howden S.M. 2012. Plant adaptation to climate change-opportunities and priorities in breeding. *Crops & Pasture Science*, 63: 251-268.
- Dwivedi S., Sahrawat K., Upadhyaya H., Ortiz R. 2013. Food, nutrition and agrobiodiversity under global climate change. *Advances in Agronomy*, 120: 1-128
- Eisenstein M. 2013. Plant breeding: discovery in a dry spell. *Nature*, 501: 7-9.
- Hillel, D., Rosenzweig, C. 2005. The role of biodiversity in Agronomy. *Advances in Agronomy*, 88: 1-34.
- Lauer JG, Bijl CG, Grusak MA, Baenziger PS, Boote K, Lingle S, Carter T, Kaeppeler S, Boerma R., Eizenga G, Carter P, Goodman M, Nafziger E, Kidwell K, Mitchell R, Edgerton MD, Quesenberry K, Willcox MC. 2012. Grand challenges for crop science. *CSA News*, June 4-12.
- López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.
- Sainger, M., Sainger P.A., Chaudhary, D., Jaiwal, R., Singh R.P., Dhankher O.P., Jaiwal P.K. 2015. GM crops for developing World in the era of climate change: for increase of farmer's income, poverty alleviation, nutrition and health. En "Genetic manipulation in plants for mitigation of climate change" (P.K. Jaiwal, R.P. Singh, O.P. Dhankher, Eds.). Springer, India, 223-241.

Influencia del cambio climático en las plagas y enfermedades de los cultivos

Las variaciones en la dinámica de las plagas y enfermedades harán más extremos los daños



La incertidumbre generada por el cambio climático añade otro factor de complejidad a la gestión de las plagas y enfermedades. El impacto de muchos patógenos sobre el rendimiento y la calidad de los cultivos se puede ampliar si éstos sufren estrés abiótico como la sequía y el calor, en especial los que afectan al sistema radicular y al sistema de transporte interno de las plantas (Chapman *et al.*, 2012).

El rendimiento de los cultivos depende del clima durante la estación de crecimiento, el cual también condiciona la incidencia de las enfermedades y las plagas que lo afectan y la capacidad de resistencia de la planta huésped. La variación y el cambio climático están ya influyendo en la distribución y virulencia de las plagas y enfermedades, aunque las interacciones entre los cultivos, plagas y enfermedades son complejas y escasamente entendidas en este contexto. Si bien hay poca información sobre el impacto del cambio climático en las enfermedades y plagas

de los cultivos; sus efectos (los cuales dependen de los cambios en la distribución y fenología del huésped) serán percibidos por su difusión geográfica, las pérdidas que causen a los cultivos, y las opciones de protección y control que se dispongan (Dwivedi *et al.* 2013).

Las variaciones en la dinámica de las plagas y enfermedades bajo la acción del cambio climático harán más extremos los daños sobre los cultivos. La expansión de una amplia gama de plagas y enfermedades y las potenciales condiciones más favorables crearán una

situación en la cual la capacidad de adaptación de los sistemas de cultivo tendrán que tener en cuenta las interacciones entre éstos y los cambios fisiológicos producidos en los cultivos (Hatfield *et al.* 2011). Las plagas de insectos pueden incrementarse bajo la sequía, mientras que los hongos se verán beneficiados por el incremento de la lluvia o debido a los cambios en la temperatura. La caracterización dinámica de las interacciones entre los cambios en las variables climáticas y sus efectos sobre las enfermedades y las plagas, permitirá valorar sus potenciales impactos sobre los cultivos, los árboles y los pastos, y desarrollar opciones para su control. La temperatura parece ser el factor más importante que afecta a la ecología, epidemiología y distribución de los insectos; mientras que las enfermedades son altamente sensibles a la humedad y la lluvia, así como a la temperatura (López-Bellido, 2015). Con el aumento de las temperaturas, algunas áreas de cultivo se desplazarán hacia latitudes más altas (a lo largo de gradientes altitudinales), y las plagas y enfermedades migrarán con sus anfitriones. Si los cultivos sufren un estrés adicional (tipo de suelo, topografía, etc.), éste modificará aún más la importancia relativa de plagas y enfermedades que afectan a un cultivo y a la naturaleza y alcance

de los daños. Habrá ganadores y perdedores y el ciclo de vida de las plagas y enfermedades influirá en su supervivencia y su impacto. Los cambios en otros eventos extremos, tales como los huracanes, favorecerán la invasión transcontinental de patógenos fúngicos (Chapman *et al.*, 2012).

Efectos del cambio climático sobre las enfermedades

Aunque pocos estudios han examinado los efectos del cambio climático sobre las

enfermedades de las plantas, y los que han sido realizados no han sido capaces de suministrar proyecciones de escenarios futuros, hay suficientes datos para indicar que el cambio climático afectará a las tasas de desarrollo y supervivencia, modificará la susceptibilidad del huésped y resultará en cambios en los efectos de las enfermedades sobre los cultivos. Sin embargo, cualquier intento de generalización es un reto debido a que los efectos del cambio climático diferirán en los patosistemas y la región geográfica. No solo en las condiciones de infección

CUADRO I. INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA RELACIÓN ENTRE LAS ENFERMEDADES Y LOS CULTIVOS (adaptado de Ziska y Runion, 2007; Elad y Pertot, 2013 y elaboración propia).

Enfermedad	Cultivo	Evento climático	Modo de adaptación
Roya del trigo (<i>Puccinia striiformis</i> f.sp. <i>tritici</i>)	Trigo	Temperatura	Aparición de nuevas razas del patógeno más agresivas y adaptadas a las temperaturas más cálidas, respecto a los viejos patotipos. Estas diferencias han podido contribuir a la mayor severidad de epidemias recientes en algunas regiones y a la expansión del rango geográfico de la roya.
Fusariosis de la espiga (<i>Fusarium graminearum</i>)	Trigo	Temperatura, humedad relativa, lluvia	La concentración de micotoxinas producidas en el grano por la Fusariosis de la espiga (un grave problema de seguridad alimentaria asociado con el cambio climático) generalmente se incrementa con el número de días de lluvia y los días con alta humedad relativa, pero disminuye con las bajas y altas temperaturas.
Fallada o Añublo (<i>Pyricularia oryzae</i>)	Arroz	[CO ₂]	El enriquecimiento atmosférico de CO ₂ incrementa el ahijado y el rendimiento del cultivo del arroz. Sin embargo, el cultivo en presencia de un elevado nivel de CO ₂ es más susceptible al hongo, debido a la menor concentración de silicio en las hojas, que pueden contribuir a incrementar la susceptibilidad de la planta a la enfermedad. Es conocido que el silicio incrementa la resistencia al patógeno de las plantas de arroz.
Cercospora (<i>Cercospora beticola</i>)	Remolacha azucarera	Temperatura	El incremento de la temperatura en las últimas décadas en Centroeuroa, ha ocasionado el desplazamiento de las enfermedades hacia el norte e intensificado el nivel de daños. Aparición de la enfermedad anticipada.
Pie negro (<i>Phoma lingam</i>)	Colza	Temperatura	Incremento de la severidad y adelanto del ciclo y del rango geográfico de distribución asociado al aumento de las temperaturas, especialmente durante el invierno (en el centro y norte de Europa).
Mildiu de la patata (<i>Phytophthora infestans</i>)	Patata	Temperatura	Condiciones cálidas y húmedas adelantan y aumentan la incidencia de la enfermedad. También las temperaturas más cálidas pueden hacer variar la ocurrencia de la enfermedad a regiones más frías.
Oídio del tomate (<i>Oidium neolycopersici</i>)	Tomate	Temperatura	La temperatura afecta a la severidad de la enfermedad. La variación de 22 a 24°C incrementó la severidad el doble y la variación de 26 a 28°C la redujo.
Botritis (<i>Botrytis cinerea</i>)	Polifaga	Temperatura, humedad relativa	Cuando se utiliza el control biológico con <i>Trichoderma harzianum</i> su actuación es más pronunciada a altas temperaturas y niveles de humedad relativa más bajos. El cambio climático es probable que afecte a la supresión microbiana de algunas enfermedades.
Virosis	Polifaga	Temperatura	Las altas temperaturas acortan el ciclo de vida de los pulgones y de la mosca blanca (<i>Trialeurodes vaporariorum</i> y <i>Bemisia tabaci</i>) como vectores de virosis, incrementando su número de generaciones anuales y su potencial de transmisión. Los otoños e inviernos más cálidos también aumentan el riesgo de transmisión de virosis por los insectos en los cereales de invierno. Existe un mayor riesgo de infecciones de virosis en las latitudes más altas por el incremento de las poblaciones de vectores invernantes.
Podredumbre de la raíz (<i>Phytophthora</i> spp.)	Forestal	Temperatura y lluvia	El incremento de las temperaturas medias invernales y el cambio en la precipitación desde verano al invierno y la tendencia a lluvia más abundante en Europa Central ha favorecido la infección de varias especies de <i>Phytophthora</i> spp causante de la podredumbre de raíces en los árboles forestales y de la región.

CUADRO II (Parte 1). INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA RELACIÓN ENTRE LAS PLAGAS Y LOS CULTIVOS (adaptado de Ziska y Runion, 2007; Maxmen, 2013; Sharma, 2013; Zavala y Gog, 2015 y elaboración propia).

Enfermedad	Cultivo	Evento climático	Modo de adaptación
Pulgones (general)	Polífaga	Estrés hídrico [CO ₂]	Las poblaciones prosperan durante períodos cortos de sequía por la mayor concentración de nutrientes en la planta. Cuando la sequía sucede durante períodos prolongados, las poblaciones decrecen debido a la caída de presión de fluido dentro del floema de las plantas. Sin embargo, la relación entre las poblaciones y la sequía no es consistente, hay variaciones negativas y positivas. Los pulgones, al alimentarse del floema, aparentemente deberían ser menos sensibles a los cambios inducidos por la [CO ₂] en la calidad de la hoja, ya que evitan la mayoría de los metabolitos secundarios derivados de la plantas.
Pulgones de los cereales (<i>Rhopalosiphum padi</i>)	Cereales	Temperatura	El incremento de 2°C de temperatura reducirá el número de generaciones
Pulgón negro (<i>Aphis fabae</i>)	Polífaga	Estrés hídrico	Tasas de reproducción de las poblaciones más bajas
Pulgón amarillo (<i>Melanaphis sacchari</i>)	Caña de azúcar Sorgo	Estrés hídrico	Mayores daños en el cultivo que cuando es de regadío
Pulgón verde (<i>Myzus persicae</i>)	Polífaga	[CO ₂]	Incremento de la densidad de población
Pulgón de la patata (<i>Aulacorthum solani</i>)	Leguminosas Hortalizas	[CO ₂]	Incremento de la tasa diaria de producción de ninfas.
Heliiothis (<i>Helicoverpa armigera</i>)	Polífaga	Temperatura	Desplazamiento hacia latitudes más altas (norte de Europa y Norteamérica) en el futuro. Fuerte influencia de la temperatura en la viabilidad y el período de incubación de los huevos (se puede predecir la eclosión de los huevos sobre la base de grados-día). Infestación más temprana e incremento de los daños.
Oruga del maíz (<i>Helicoverpa zea</i>)	Polífaga	Inundación	Impacto negativo sobre las pupas del insecto en un sistema de cultivo de maíz. La inundación también tiene un impacto negativo sobre los insectos de suelo o efectos indirectos sobre patógenos y predadores. Infestaciones más tempranas e incremento de los daños.
Taladro del maíz (<i>Ostrinia nubilalis</i>)	Maíz	Temperatura Precipitación intensa	El incremento de 1 a 3°C de temperatura podría causar un desplazamiento de hasta 220 km hacia el norte de Europa en el potencial de distribución de la plaga. Ocurre una generación adicional en casi todas las regiones donde actualmente está presente. La precipitación intensa supone un impedimento a la ocurrencia y éxito de la oviposición por los adultos.
Mosca de la col (<i>Delia radicum</i>)	Crucíferas	Temperatura	El incremento de la temperatura media diaria de 3°C anticipa un mes antes su actividad. Cuando el incremento de las temperaturas es de 5-10°C aumenta el número de generaciones (4 anuales en vez de las 2-3 anuales).
Cicádidos (<i>Cicada</i> spp)	Polífaga	Temperatura	Requieren varios años para completar su ciclo de vida. Sin embargo, reaccionan a las variaciones de la temperatura durante el curso de su historia de vida. Con un incremento de 2°C de temperatura, estos insectos pueden tener de 1 a 5 ciclos de vida adicionales por estación.

óptimas, sino también en la especificidad del huésped y los mecanismos de infección de la planta pueden ser afectados por los cambios en el clima (Elad y Pertot, 2013).

La producción de biomasa, como ya se ha referido, puede incrementarse como resultado del aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera. Por lo tanto, habrá más tejidos que pueden ser infectados por patógenos. Además, los patógenos dependientes del azúcar (por ejemplo las royas y los oídios), pueden incrementarse como consecuencia de un aumento del contenido de carbohidratos en los tejidos aéreos. Por otra parte, la alta densidad de la cubierta foliar y el tamaño de las plantas pueden promover el

crecimiento, esporulación y difusión de hongos que infectan las hojas, tales como las royas y el oídio, los cuales requieren alta humedad ambiental para su desarrollo. Por estas razones, Dwivedi, *et al.* (2013) han reseñado que numerosas enfermedades pueden incrementar su severidad en ambientes enriquecidos de CO₂.

Efectos del cambio climático sobre las plagas

Al igual que ocurre con las enfermedades fúngicas, en las plagas de insectos y nematodos los cambios en las condiciones climáticas pueden causar que algunas de ellas se extiendan a nuevas

áreas o se retraigan de las áreas donde representan actualmente una seria amenaza para la producción de los cultivos. También pueden aparecer biotipos más virulentos bajo las nuevas condiciones ambientales. Las evidencias actuales sugieren que las plagas de insectos responden evolutivamente ante el calentamiento a través de cambios en la fenología y la distribución. El crecimiento de los cultivos en un ambiente de elevado CO₂ generalmente incrementa la relación C/N de los tejidos de las plantas y reducen la calidad nutricional. Esto puede provocar que los insectos incrementen su ingesta de tejidos para compensar su más bajo contenido de N. Otro efecto del cambio climático puede ser la aparición

CUADRO II (Parte 2). INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA RELACIÓN ENTRE LAS PLAGAS Y LOS CULTIVOS (adaptado de Ziska y Runion, 2007; Maxmen, 2013; Sharma, 2013; Zavala y Gog, 2015 y elaboración propia).

Enfermedad	Cultivo	Evento climático	Modo de adaptación
Gusano gris del tabaco (<i>Spodoptera litura</i>)	Polífaga	Disturbancias atmosféricas	Especie migratoria que puede ser capaz de explotar nuevas oportunidades, desplazándose rápidamente a nuevas áreas como resultado del cambio climático.
Barrenador manchado del maíz (<i>Chilo partellus</i>)	Sorgo Maíz	Estrés hídrico	Mayores daños en el cultivo con estrés hídrico que bajo riego. Sin embargo, el estrés de humedad puede alterar la reacción de la planta al daño de los insectos que pueden conducir tanto a un incremento o disminución de los mismos. Genotipos de sorgo con niveles moderados de resistencia a la plaga exhiben una reacción susceptible baja estrés de sequía.
Mosquito del trigo (<i>Mayetiola destructor</i>)	Trigo	Cambio climático (general)	La plaga ha cruzado el Mediterráneo, desde el norte de África, a España, Portugal y sur de España.
Procesionaria del pino (<i>Thaumetopoea pityocampa</i>)	Forestal	Temperatura	Se ha desplazado en los últimos años a elevaciones más altas como consecuencia del incremento de la temperatura y ha encontrado un nuevo huésped (<i>Pinus silvestris</i> var. <i>nevadensis</i>). En los años más cálidos de desfoliación provocada por este insecto se ha incrementado del 5-25% por encima de los 1.700 metros.
Polilla de la patata (<i>Phthorimaea operculella</i>)	Patata y otras hortalizas	Temperatura Sequía	Ataques más severos en los años más cálidos y secos. Las patatas que crecen en las montañas peruanas a una altitud de alrededor de 3.800 m, suelen escapar de los ataques de esta plaga debido a las noches frías. El calentamiento global puede generar que la polilla se mueva hacia altitudes mayores. Riesgo en las regiones de Bolivia, Ecuador y Perú.
Polilla del racimo de la vid (<i>Lobesia botrana</i>)	Vid	Temperatura	Reducción del daño debido al adelanto de la cosecha, en contraposición a las generaciones tardías de la larva. Las variedades vinícolas de maduración tardía estarán más expuestas a los daños, por el aumento del número de generaciones del insecto y el incremento de su tasa de crecimiento y del metabolismo.
Escarabajo de la patata (<i>Leptinotarsa decemlineata</i>)	Patata	[CO ₂]	Incremento de las tasas de alimentación, pero crecimiento más bajo y mayor mortalidad del insecto asociados con los cambios inducidos en la [CO ₂] en la calidad de la hoja; específicamente en la menor concentración de N. En general, las tasas más altas de la relación C:N asociadas con el incremento de la [CO ₂] pueden resultar en incrementos compensatorios en las tasas de consumo foliar por los insectos.
Ácaros	Polífaga	[CO ₂]	Efectos positivos en la infestación de los ácaros, asociados con un incremento en la concentración no estructurales. No obstante, el aumento de la epidermis o el espesor de la hoja puede reducir la infestación.

de insectos en regiones donde no están actualmente establecidos. La potencial elevación global de las temperaturas supondrá que las plagas que están confinadas en las zonas tropicales podrán propagarse a las partes más frías del mundo (Dwivedi *et al.* 2013). Por otro lado, la sequía tiende a elevar la temperatura. A medida que la temperatura aumenta, los insectos aceleran su metabolismo, comen aún más, incrementan sus apareamientos y elevan sus poblaciones. Asimismo la sequía hace que las plantas sean más nutritivas a las plagas, puesto que la falta de agua en sus tejidos concentra los aminoácidos. Algunos estudios sugieren que determinados insectos herbívoros prefieren específicamente a plantas bajo estrés hídrico. Sin embargo, la relación entre las poblaciones de insectos y la sequía no es tan evidente. La razón puede atribuirse a que durante un tiempo los insectos pueden responder positivamente a las condiciones secas; sin embargo

posteriormente estos sufren un deterioro al igual que las plantas de las que se alimentan. Por ejemplo, los pulgones prosperan durante períodos cortos de sequía debido a que los nutrientes de la planta son más concentrados; pero esta situación cesa cuando se prolonga debido a una caída de presión del fluido dentro del floema de las plantas provocado por el estrés hídrico. También los depredadores de las plagas se ven afectados por la sequía en este mismo sentido (Maxmen, 2013). Con el cambio climático se espera que las plagas expandan su rango y puedan encontrar nuevos y más vulnerables huéspedes. Dado que las temperaturas afectan directamente a muchos atributos de la biología de los insectos, la respuesta de las poblaciones pueden variar drásticamente en respuesta a climas anticipadamente más cálidos. Con el incremento en el rango y las poblaciones de las plagas el uso de pesticidas puede incrementarse y habrá un efecto en

casca en los ecosistemas y la salud. Los investigadores han demostrado que el incremento de la temperatura puede afectar potencialmente a la supervivencia de los insectos, su desarrollo, su distribución geográfica y el tamaño de las poblaciones. Muchos investigadores creen que los insectos como ectodermos (regulan su temperatura a partir de la temperatura ambiental, siendo su capacidad de generar calor metabólico insignificante) serán más sensibles a los cambios en la temperatura que a los cambios en todos los demás factores ambientales. Se ha estimado que con un aumento de la temperatura de 2°C los insectos pueden experimentar de uno a cinco ciclos de vida adicionales por estación. La mortalidad más baja de los insectos en invierno debido a las temperaturas más cálidas en esta estación podría ser un importante factor en el incremento de su población. Se ha mostrado que la diversidad de especies de insectos y la intensidad de su

alimentación han aumentado históricamente al aumentar la temperatura (Jat *et al*, 2016). El cambio climático provocará importantes cambios en la diversidad de artrópodos, la distribución geográfica de las plagas de insectos, la dinámica de sus poblaciones, las interacciones herbívoro-planta, la actividad y abundancia de enemigos naturales, las especies en extinción y la eficacia de las tecnologías de protección de cultivos para el manejo de las plagas. La distribución de las plagas y sus enemigos naturales también serán influenciadas por los cambios en los modelos de cultivos provocados por el cambio climático. Varias especies de insectos actualmente confinadas en las regiones tropicales pueden trasladarse a las regiones templadas, resultando en mayores daños a cereales, leguminosas, hortalizas, frutales y árboles forestales. También el cambio climático, reducirá la efectividad de la resistencia de las plantas huésped de las plantas transgénicas, de los enemigos naturales y de los biopesticidas y los insecticidas sintéticos para el manejo de las plagas, como se analizará más adelante. En consecuencia, las relaciones económicas entre los costes y beneficios de las medidas de control de plagas se espera también cambien. Por esta razón, hay una necesidad de generar información sobre los probables efectos del cambio climático en las plagas para desarrollar tecnologías eficaces que sean efectivas y económicas en el futuro (Sharma, 2013). El cambio climático, como ya se ha dicho, tiene importantes impactos sobre la interacción plantas-insectos, y existen lagunas en el entendimiento actual de la respuesta a los herbívoros. Últimamente nuevos datos empíricos han comenzado a dar luz a los mecanismos de los efectos del elevado CO₂ en las interacciones



planta-insecto. La investigación ha mostrado que la asignación de recursos a los aleloquímicos está interconectada entre la fotosíntesis, la regulación genética y la señalización hormonal. Recientes enfoques moleculares han revelado que el daño de los insectos es percibido por las plantas y la señal es amplificada por la participación de elementos reguladores modulados por el ácido jasmónico y el

La producción de biomasa puede incrementarse como resultado del aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera, habiendo más tejidos que pueden ser infectados por patógenos. Además, los patógenos dependientes del azúcar (por ejemplo las royas y los oídios), pueden incrementarse como consecuencia de un aumento del contenido de carbohidratos en los tejidos aéreos.

etileno, los cuales inducen respuesta de las plantas para incrementar las defensas químicas frente a los herbívoros. El elevado CO₂ inhibe las rutas del ácido jasmónico y del etileno e incrementa la susceptibilidad de las plantas al ataque de los herbívoros, decreciendo tanto las defensas químicas constitutivas e inducibles frente a ciertos insectos. A la inversa, la atmósfera enriquecida de CO₂ incrementa el ácido salicílico, el cual incrementa otras rutas de defensa química que no están reguladas por el ácido jasmónico (Zavala y Goy, 2015).

Efectos del cambio climático sobre los enemigos naturales

Cuantificar el efecto del cambio climático sobre la eficacia de los enemigos naturales deberá ser una preocupación importante en los futuros programas del manejo de las plagas. Las interacciones tritróficas entre plantas, herbívoros y parasitoides son el resultado de un largo proceso de coevolución, lo cual es específico para cada ambiente particular. La relación entre las plagas de insectos y sus enemigos naturales cambiará como resultado del cambio climático, teniendo como consecuencia tanto aumentos como reducciones en el estatus de las especies individuales de plagas (Sharma, 2013). La biodiversidad juega un papel importante en la abundancia relativa de plagas de insectos y sus enemigos naturales, siendo necesario incrementar la diversidad funcional en los agroecosistemas

vulnerables al cambio climático para mejorar el sistema de resistencia y disminuir el grado de las pérdidas causadas por las plagas. Los cambios en los modelos de cultivo como resultado del cambio climático afectarán drásticamente el balance entre las plagas de insectos y sus enemigos naturales. La diversidad del sistema puede ser explotada para mejorar la resistencia de los agroecosistemas, mejorar la utilización de los recursos y estabilizar los rendimientos. Los cambios en la temperatura alterarán el modelo y la sincronización de la actividad

diurna de los diferentes grupos de insectos, y las variaciones en las interacciones interespecíficas podrían también alterar la eficacia de los enemigos naturales (patógenos, parásitos y predadores). Los parasitoides dependen de su insecto huésped para desarrollarse, y la exposición de cualquiera de los insectos a los parasitoides a temperaturas estresantes inducirá efectos letales o subletales en los mismos. La temperatura no solo afecta a la tasa de desarrollo de los insectos sino que también tiene un profundo efecto sobre la fecundidad y la proporción de sexos de los parasitoides. Debido a que el cambio climático afecta diferentemente a los insectos huésped y sus parasitoides, ello puede conducir a un cambio en el rango de distribución de las diferentes especies, resultando en un reordenamiento de las comunidades de insectos, incluyendo los parasitoides. El cambio climático también alterará las interacciones del predator-presa y el parasitoide-huésped e incluso alterar el balance entre las plagas de insectos, enemigos naturales y plantas huésped debido a las alteraciones en su sincronización.

El cambio climático y la eficacia de los pesticidas

La rápida disipación de los residuos insecticidas debido al incremento de las temperaturas y de la precipitación requerirá aplicaciones más frecuentes. Un clima cálido y húmedo incrementará los costes de la protección de los cultivos, debido al uso más frecuente de pesticidas. Cambios en los factores climáticos, tales como las temperaturas, humedad relativa, CO₂, pH, lluvia y propiedades del suelo han mostrado efectos diversos sobre la eficacia de los pesticidas sintéticos. La temperatura presenta un efecto positivo sobre los organoclorados, organofosforados y

carbamatos (aunque existen algunas excepciones), pero manifiesta un efecto negativo sobre los piretroides sintéticos (Sharma, 2013).

La lluvia reduce la toxicidad de los insecticidas, sin embargo los efectos varían con la intensidad y cantidad de la misma, la formulación y los adyuvantes utilizados. El CO₂, pH y la luz solar también han evidenciado una influencia variable en la toxicidad de los insecticidas. Los biopesticidas, tales como los productos naturales de las plantas, los virus entomopatógenos, los hongos, las bacterias y los nematodos, también son altamente sensibles al cambio climático. Un incremento de la temperatura y de la radiación ultravioleta y una disminución de la humedad relativa pueden hacer que muchos de estos controles tácticos sean menos efectivos por pérdidas de su actividad biológica, especialmente las temperaturas muy altas y muy bajas humedades. Sin embargo, cambios en la temperatura, humedad relativa, CO₂ y radiación ultravioleta han mostrado efectos diferenciales sobre los biopesticidas.

Efectos del cambio climático en los cultivos transgénicos

Los factores ambientales tales como la humedad y la fertilidad del suelo y la temperatura tienen una fuerte influencia en la expresión de las proteínas tóxicas del *Bacillus thuringiensis* (Bt) incluidas en las plantas transgénicas. Las posibles causas en los fallos de control de insectos en los cultivos transgénicos pueden ser una producción inadecuada de la proteína tóxica, el efecto del ambiente sobre la expresión transgénica, las poblaciones de insectos resistentes a Bt y el desarrollo de resistencia debida a un manejo inadecuado. Los algodones genéticamente modificados con genes Bt bajo un nivel elevado de CO₂, tienen un

contenido de N más bajo y una relación C/N más alta, compuestos defensivos de carbono, taninos condensados y gosisol. Lo cual resulta en una disminución significativa en la expresión de la toxina Bt y tiene una influencia considerable sobre la efectividad de los cultivos transgénicos para el manejo de las plagas. Una disminución de la humedad relativa del 90% al 70% y un incremento en las temperaturas máximas y mínimas de 25 a 35°C y 9 a 18°C, respectivamente, incrementan la eficacia del algodón transgénico contra la larva de *Heliothis armigera*. Sin embargo, hay una disminución significativa en la actividad biológica una vez que la mínima y máxima temperatura son >22°C y >38°C, respectivamente. Es por ello importante entender los efectos del cambio climático en la eficacia de las plantas transgénicas para el manejo de las plagas (Sharma, 2013). ■

BIBLIOGRAFÍA

- Chapman, H.C. 2013. Climate change effects on insects. Implications for crop protection and food security. En "Combating climate change. An agricultural perspectives" (M.S. Kang, S.S. Banga, eds.) CRC Press, Boca Raton. 231-236.
- Dwivedi, S., Sahrawat K., Upadhyaya H., Ortiz R. 2013. Food, nutrition and agrobiodiversity under global climate change. *Advances in Agronomy*, 120: 1-128.
- Elad, Y., Pertot, I. 2013. Climate change impact on plant pathogens and plant diseases. En "Combating climate change. An agricultural perspectives" (M.S. Kang, S.S. Banga, eds.) CRC Press, Boca Raton. 183-211.
- Hatfield JL, Boote KJ, Kimball BA, Ziska LH, Izaurralde RC, Ort D, Thomson AM, Wolfe D. 2011. Climate impacts on agriculture: implications for crop production. *Agronomy Journal*, 103: 351-365.
- Jat M.L., Dagar J.C., Sapkota T.B., Singh Y., Govaerts B., Ridaura S.L., Saharawat Y.S., Sharma R.K., Tatarwal J.P., Jat R.K., Hobbs H., Stirling C. 2016. Climate Change and Agriculture: Adaptation Strategies and Mitigation Opportunities for Food Security in South Asia and Latin America. *Advances in Agronomy*, 137, 127-235.
- López-Bellido L. 2015. Agricultura, Cambio Climático y Secuestro de Carbono. Ed. CreateSpace Independent Publishing Platform - Amazon. 276 pp.
- Maxmen A. 2013. Crop pests: under attack. *Nature*, 501: 15-17.
- Sharman, S.C., Chakraborty, S., Drecker, M.F., Howden, S.M. 2012. Plant adaptation to climate change-opportunities and priorities in breeding. *Crops & Pasture Science*, 63: 251-268.
- Zavala, J.A., Gog, L. 2015. Impact of anthropogenic carbon dioxide emissions on plant-insect interactions. En "Genetic manipulation in plants for mitigation of climate change" (P.K. Jaiwal, R.P. Singh, O.P. Dhankher, eds.) Springer, New Delhi. 205-221.
- Ziska, L.H., Runion, G.B. 2007. Future weed, pest and disease problems for plants. En "Agroecosystems in a changing climate" (P.G.D. Newton, P.A. Niklaus, eds.) Taylor & Francis, Boca Raton. 261-287.

Malas hierbas, herbicidas y cambio climático

Es esencial diseñar estudios de campo que simulen el futuro para predecir sus efectos

El entendimiento de los efectos del cambio climático sobre el crecimiento de las malas hierbas y la actividad de los herbicidas es importante para optimizar su aplicación en el control efectivo de las malas hierbas en el futuro. En este artículo se detallan los efectos que tiene el cambio climático en la fisiología y crecimiento de las malas hierbas y en la eficacia de los herbicidas.



Entre las limitaciones biológicas que existen en la agricultura, las malas hierbas representan una restricción significativa para alcanzar el potencial de rendimiento de los cultivos. Las malas hierbas no solo pueden competir directamente con los cultivos por los recursos físicos, tales como la luz, sino que también comprometen la calidad de los mismos mediante la contaminación, y actúan

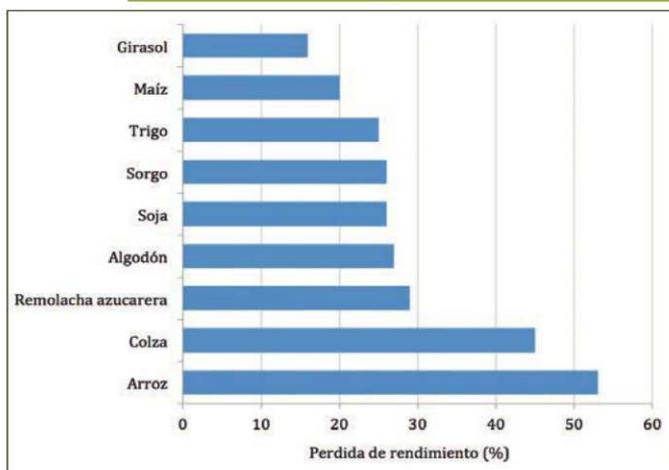
como un reservorio biológico para las plagas de insectos y las enfermedades (Ziska, 2016)

La interferencia de las malas hierbas en el contexto del cambio climático puede aumentar el riesgo de pérdidas de rendimiento de los cultivos. A pesar de los avances tecnológicos alcanzados en el control de las malas hierbas, los cultivos sufren grandes pérdidas debido a la competencia de las malas hierbas.

En general, éstas causan el mayor potencial de pérdidas (34%), siendo menos importantes las provocadas por las plagas y enfermedades (18 y 16% respectivamente) (**figura 1**). La competitividad, adaptación y tolerancia al estrés son las características que aseguran a las especies de malas hierbas su supervivencia en una variedad de condiciones ambientales (Korres *et al.*, 2016). El cambio climático

es probable que afecte al crecimiento tanto de los cultivos como de las malas hierbas, beneficiando a veces a los primeros y otras a las segundas. Diferentes factores ambientales, tales como la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar influyen en el estatus fisiológico de las plantas y su susceptibilidad a los herbicidas. Las interacciones entre estos factores complica aún más la precisa determinación de sus efectos sobre la actuación de los herbicidas. Además, los cambios en el clima global debido al aumento de la concentración de CO₂ y sus efectos asociados sobre la temperatura y la precipitación pueden tener un impacto significativo sobre el crecimiento de las plantas y la actuación de los herbicidas. El entendimiento de los efectos del cambio climático sobre el crecimiento de

FIG 1. Estimación de las pérdidas de rendimiento causadas por las malas hierbas en diferentes cultivos de EE.UU. (adaptado de Varanasi et al., 2016).



las malas hierbas y la actividad de los herbicidas es importante para optimizar su aplicación en el control efectivo de las malas hierbas en el futuro (Varanasi et al., 2016).

Efectos en la fisiología y el crecimiento de las malas hierbas

El CO₂ atmosférico, la temperatura, el agua y la disponibilidad de nutrientes son importantes variables abióticas que afectan directamente al crecimiento y la fisiología de las malas hierbas. Éstas responden rápidamente a la variación de los recursos y tienen una mayor probabilidad para

adaptarse y prosperar en diferentes tipos de hábitat, debido a su mayor diversidad genética y plasticidad fisiológica en comparación con los cultivos. Al igual que éstos, las malas hierbas con rutas fotosintéticas C₃ ó C₄ muestran diferencias en su respuesta al cambio climático. Los efectos del elevado CO₂ y el aumento de las temperaturas en algunas de las principales malas hierbas C₃ y C₄, se resumen en el **cuadro I**. Las malas hierbas con rutas fotosintéticas C₃ y C₄ difieren en su respuesta a la concentración elevada de CO₂ debido a las diferencias fisiológicas en la bioquímica fotosintética. El CO₂ es la única fuente de carbono para las plantas y el incremento de su concentración afecta directamente a los procesos fisiológicos, tales como la fotosíntesis y la conductancia estomática. Muchas malas hierbas C₃ han mostrado un incremento del crecimiento significativo, con una sustancial disminución en los rendimientos de los cultivos competidores, como consecuencia del incremento de CO₂. Ziska (2000) ha reportado un 65% de incremento en la biomasa de una mala

CUADRO I. EFECTOS DEL ELEVADO CO₂ Y TEMPERATURA SOBRE LAS PRINCIPALES MALAS HIERBAS TIPO C₃ Y C₄ (Adaptado de Varanasi et al., 2016).

Ruta fotosintética	Diferencias fisiológicas	Principales malas hierbas		Parámetros de cambio climático	
		Especie	Nombre común	Elevado CO ₂	Aumento de la temperatura
Tipo C ₃	Cloroplastos presentes sólo en las células del mesofilo	<i>Avena fatua</i> <i>Chenopodium álbum</i> <i>Cirsium arvense</i> <i>Abutilon theophraste</i>	Avena loca Cenizo Cardo Abutilón	Alta estimulación de la fotosíntesis y crecimiento	Incremento de la fotorrespiración y disminución de la fotosíntesis neta
	CO ₂ fijado por Rubisco carboxilasa	<i>Lolium multiflorum</i> <i>Poligonum convolvulus</i>	Raigrás italiano Polígono trepador		
	Alta fotorrespiración	<i>Convolvulus arvensis</i>	Corregüela		
	Temperatura óptima 15-25°C	<i>Xanthium strumarium</i> <i>Elytrigia repens</i> <i>Bromus tectorum</i>	Cadillo Gramma Arabueyes		
Tipo C ₄	Cloroplastos presentes en el mesofilo y en las células de la vaina	<i>Kochia scoparia</i> <i>Sorghum halapense</i> <i>Sorghum bicolor</i> <i>Eleusine indica</i>	Kochia Cañota Sorgo Gramma	Baja estimulación de la fotosíntesis y del crecimiento	Estimulación de la fotosíntesis y el crecimiento a altos niveles de CO ₂
	CO ₂ fijado por fosfoenolpiruvato carboxilasa	<i>Echinochloa crus-galli</i> <i>Digitaria sanguinalis</i>	Cola de caballo Pata de gallina		
	Baja fotorrespiración	<i>Amaranthus retroflexus</i>	Amaranto		
	Temperatura óptima 30-40°C	<i>Cynodon dactylon</i> <i>Cyperus rotundus</i> <i>Amaranthus palmeri</i>	Gramma común Juncia Bledo		

hierba C₃ (*Chenopodium album*) con una análoga reducción en el rendimiento de la soja, por la elevación del 39% de la concentración del CO₂. Por el contrario, *Amaranthus retroflexus*, una mala hierba C₄, no mostró ningún cambio en la biomasa con la elevación del CO₂, decreciendo la pérdida de rendimiento de la soja del 45% al 30% en competencia con esta mala hierba (Varanasi *et al.*, 2016).

La respuesta del grado de estimulación fotosintética y del crecimiento varía entre las plantas C₃ y C₄ a medida que la temperatura se incrementa. En las

de las temperaturas, debido a su amplio *pool* de genes en comparación con los cultivos, los cuales les permiten adaptarse a condiciones ambientales diversas. Las malas hierbas con rápida dispersión y establecimiento serán capaces de propagarse en nuevos territorios y pueden alterar la composición y la integridad de los ecosistemas. Cuando los inviernos se hacen más cálidos en las latitudes más altas son más propicios para el crecimiento de las plantas, y las temperaturas más altas en las bajas latitudes las hacen menos habitables. Se

cambios en los modelos de precipitación y la disponibilidad hídrica no sólo alteran el tamaño de la planta sino también afectarán la producción de semillas y su dispersión. Bajo prolongadas condiciones de sequía la composición de las especies de malas hierbas cambiarán dando lugar a una modificación en la vegetación.

Efecto en la competencia cultivo-malas hierbas

En comparación con los cultivos, las malas hierbas tienen características más variables puesto que ellas no han sido sometidas al mismo grado de selección para características específicas favorables (por ejemplo, ausencia de dormancia en la semilla, crecimiento uniforme, altos rendimientos, etc.). Por lo tanto, las malas hierbas tienden a exhibir mayor potencial de capacidad para adaptarse al estrés que los cultivos. La alta diversidad genética entre las plantas de las malas hierbas les permiten alcanzar una mayor aptitud competitiva frente a los cultivos como consecuencia del cambio climático. Las principales categorías bajo las cuales el cambio climático afectará a las poblaciones de malas hierbas incluyen la abundancia y diversidad de especies, el rango geográfico y la fenología (Korres *et al.*, 2016).

Las tasas fotosintéticas más altas a niveles elevados de CO₂ en los cultivos C₃ (arroz, trigo, soja, etc.) significan que ellos responderán más favorablemente a los niveles más altos de CO₂ que las malas hierbas C₄ (*Amaranthus palmeri*, *A. rudis*, *Kochia scoparia*, etc.). En contraste, las malas hierbas C₃ (*Chenopodium album*, *Abutilon theophrasti*, *Ambrosia artemisiifolia* y *A. trifida*) responderán más favorablemente al crecimiento de los niveles de CO₂ y ofrecen una mayor competencia a los

Las tasas fotosintéticas más altas a niveles elevados de CO₂ en los cultivos C₃ (arroz, trigo, soja, etc.) significan que ellos responderán más favorablemente a los niveles más altos de CO₂ que las malas hierbas C₄. En contraste, las malas hierbas C₃ responderán más favorablemente al crecimiento de los niveles de CO₂ y ofrecen una mayor competencia a los cultivos C₄ (maíz, sorgo, caña de azúcar, etc.).

plantas C₃, las temperaturas por encima de 25°C incrementan la fotorrespiración e inhiben la asimilación de CO₂. A la inversa, el incremento de la temperatura tiene poco efecto en la asimilación de CO₂ por las plantas C₄ debido a que se mantienen bajas tasas de fotorrespiración a todas las temperaturas. Consecuentemente, las especies C₄ están mejor adaptadas al estrés por el calor y pueden mostrar estimulación de las regiones meristemáticas, rápido crecimiento de la biomasa aérea y proliferación de las raíces a altas temperaturas, que frecuentemente inhiben el crecimiento en las especies C₃.

Las malas hierbas pueden tener un mayor rango de respuesta al incremento

espera que muchas malas hierbas expandan su rango geográfico y causen mayores pérdidas a los cultivos, los pastizales y a la productividad forestal. Los efectos del elevado CO₂ y las altas temperaturas en el potencial de migración de las malas hierbas han sido ampliamente documentados (Varanasi *et al.*, 2016).

La humedad es un factor clave requerido para la germinación y establecimiento de las semillas de las malas hierbas. El cambio climático puede afectar la frecuencia e intensidad de la lluvia y tener como resultado eventos extremos, tales como las inundaciones y la sequía; consecuentemente, las malas hierbas adaptadas a estas condiciones tendrán una ventaja competitiva más alta. Los

CUADRO II. EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EFICACIA DE LAS DIFERENTES MATERIAS ACTIVAS HERBICIDAS (adaptado de Varanasi *et al.*, 2016 y elaboración propia)

Modo de acción	Familia química	Materias activas	Impacto del cambio climático
Reguladores de crecimiento	Ácido benzoico Ácido carboxílico Ácido fenoxiacético Semicarbazona	Dicamba Clorpiralida Fluroxipir Picloran 2,4D, MCPA Diflufenzopir	El estrés ambiental puede tener efectos variables sobre los herbicidas reguladores del crecimiento y por lo general depende de la especie.
Inhibidores de la síntesis de aminoácidos	Imidazolinonas Sulfonilureas Triazolpirimidinas Ninguna aceptada Ácido fósforico	Imazamox Imazapic Imazetapir Imazametabenz Nicosulfuron Tifensulfuron Tribenuron Clorosulfuron Metsulfuron Flumetsulan Cloransulan glifosato Glufosinato	Los cambios en las condiciones ambientales que afectan a la producción de carbohidratos a través de la fotosíntesis o la absorción de nitrógeno del suelo pueden alterar la producción de aminoácidos en las plantas y subsecuentemente afectar a la eficacia de los herbicidas que inhiben la síntesis de aminoácidos. Por ejemplo, el CO ₂ elevado puede incrementar el contenido de almidón con la consiguiente reducción en el contenido de proteínas por gramo de tejido. Menos proteínas pueden conducir a menos demanda de síntesis de aminoácidos, lo cual en cambio puede alterar la eficacia de los inhibidores de aminoácidos.
Inhibidores de la fotosíntesis	Triazinas Triazinonas Benzotiadiazoles Nitrilos Ureas Fenilcarbamatos	Atrazina Simazina Metribuzin Benzotiazol Bromoxinil Linuron Diuron Desmedifam	Elevadas concentraciones de CO ₂ y temperatura alteran la actividad fotosintética en las plantas y puede subsecuentemente afectar la acción de los herbicidas que interfieren con la fotosíntesis. En contraste, la eficacia de más inhibidores fotosintéticos han mostrado un incremento consistente con el aumento de la temperatura, intensidad de luz o humedad del suelo.
Inhibidores de la síntesis de lípidos	Arlifoxifenoxipropionato Ciclohexanodionas Fenilpirazoles	Fenoxaprop Fluazifop Quizalofop Diclofop clodinafop Cletodim Setoxidim Pinoxaden	Los factores climáticos influyen en la eficacia de los inhibidores de la síntesis de lípidos mediante su impacto sobre los procesos fisicoquímicos que afectan a la absorción, translocación y metabolismo del herbicida. Los efectos del aumento del CO ₂ sobre los inhibidores de la síntesis de lípidos son específicos de la especie.
Inhibidores del crecimiento de las plántulas	Dinitroanilinas Tiocarbamatos Cloroacetamidas Oxiacetamidas Pirazoles	Pendimetalina Trifluralina Etalfluralina Triallato EPTC Butilato Alacloro Acetocloro Metalacloro Dimetenamida Flufenacet Piroxasulfone	Dado que estos herbicidas son incorporados al suelo, su eficacia es afectada significativamente por las propiedades del mismo, tales como la humedad, temperatura, materia orgánica y tipo de suelo. Generalmente, las condiciones secas del suelo disminuyen la actividad de estos herbicidas de preemergencia debido a la adsorción del herbicida; sin embargo la intensa precipitación después de la aplicación puede resultar en lixiviación, lo cual depende del tipo de suelo. En general el lavado del herbicida es alto en los suelos arenosos en comparación con los suelos arcillosos debido a su baja capacidad de adsorción.
Disruptores de la membrana celular	Difenil éteres Aril triazimonas N-fenil ftalimida Pirimidinedionas Bipiridilos	Acifluorfen Fomesafen Lactofen Sulfentrazona Carfentrazona Fluatiacet Flumiclorac flumioxacin Saflufenacil Paraquat Diquat	Estos herbicidas son activados por la luz y generan síntomas rápidamente bajo condiciones luminosas y soleadas. En algunas materias activas también influye la humedad del suelo junto a la intensidad luminosa, que al ser mayor induce la absorción herbicida cuando el contenido de humedad es de capacidad de campo. Ocurre lo contrario bajo condiciones de estrés de sequía. También la temperatura en la eficacia de algunos herbicidas de este grupo, que aumenta con el incremento de la temperatura. Debido a que este grupo de herbicidas son de contacto las altas temperaturas generalmente favorecen su penetración debido a la reducida viscosidad de la cera epicuticular de las hojas, que resulta en un incremento de la difusión del herbicida.
Inhibidores de pigmentos	Isoxazolidinonas Isoxazoles Pirazole Pirazolones Tiketones	Clomazona Isoxaflutole Pirasulfotole Topramezone Mesotrione Tembotrione	La investigación sobre los efectos del estrés ambiental en la actividad de los herbicidas inhibidores de pigmentos es limitada. Los efectos de la temperatura y humedad relativa sobre la actividad foliar son en gran parte específicos de cada especie. Las temperaturas más altas incrementan la absorción y translocación del herbicida. Igualmente ocurre en algunas especies con la humedad relativa alta. Esto puede atribuirse al incremento de la hidratación de la cutícula, que mejora la penetración y eficacia de los herbicidas solubles en agua.

cultivos C₄ (maíz, sorgo, caña de azúcar, etc.). La evidencia sugiere que las malas hierbas C₃ de hoja ancha están preferentemente adaptadas a niveles elevados de CO₂.

Según Varanasi *et al.* (2016), se han efectuado muchos estudios para evaluar los efectos interactivos de la sequía y los niveles de incremento de CO₂ sobre la competencia cultivo-mala hierba. En condiciones altas de la relación CO₂/sequía las malas hierbas C₄ podrían desbancar a los cultivos C₃. Asimismo, el elevado CO₂ puede presentar diversas implicaciones en la dinámica de los nutrientes entre los cultivos y las malas hierbas. Por todo ello, el cambio climático podría influir en los resultados de la competencia cultivo-malas hierbas de formas diferentes, lo que requiere específicas estrategias de manejo de las malas hierbas, más flexibles y adaptables a los futuros escenarios climáticos.

Manejo de las malas hierbas y eficacia de los herbicidas

Debido a que el manejo de las malas hierbas es necesario para maximizar la producción global de los cultivos, se utilizan numerosas estrategias de control, mecánicas, biológicas y químicas, para mantener las poblaciones de malas hierbas a niveles económicos aceptables. Tales estrategias varían grandemente según el cultivo, los recursos naturales, el medio ambiente, los sistemas de cultivo, etc. En los países desarrollados, es el control químico de las malas hierbas vía la aplicación de herbicidas el más empleado debido a la aplicación uniforme, alta eficacia y los costes reducidos; asociado con la mecanización y el tiempo. En los últimos años, el uso de herbicidas para el control de las malas hierbas se ha incrementado también en las regiones en vías de desarrollo, donde la seguridad alimentaria es de suma

importancia; en parte debido al potencial de los herbicidas para mejorar el rendimiento de los cultivos como el ahorro de mano de obra y energía (Ziska, 2016).

No obstante, el enfoque del manejo de las malas hierbas está cambiando hacia estrategias integradas para reducir el impacto del uso de los herbicidas en el medio ambiente y el desarrollo de malas hierbas resistentes a los herbicidas. Sin embargo, los herbicidas continúan siendo el principal medio de control de las malas hierbas debido a su facilidad de aplicación y rentabilidad. Dada la importancia del uso de los herbicidas en la producción sostenible de los cultivos, ello es esencial para entender si el cambio climático afectará a la eficacia de los herbicidas para el control de malas hierbas en el futuro. Varios estudios se han centrado en el impacto del cambio climático sobre la productividad de los cultivos, pero se ha puesto menos atención en el impacto del manejo de malas hierbas, particularmente en la eficacia de los herbicidas y sus efectos subsecuentes sobre el desarrollo de malas hierbas resistentes a los mismos. Cambios en la susceptibilidad herbicida debido al estrés ambiental podrían tener serias consecuencias para la competencia cultivo-malas hierbas y pueden contribuir en el futuro a altas pérdidas de producción (Varanasi *et al.*, 2016).

Uno de los aspectos fundamentales de la eficacia de los herbicidas está relacionado con la variación del ambiente físico existente durante la aplicación. Existe un número de cambios climáticos que es probable afecten este aspecto de la actuación de los herbicidas. Temperaturas más cálidas o un incremento en las condiciones climáticas extremas (por ejemplo la precipitación) podrían reducir el necesario acceso al campo para la aplicación herbicida. El



cambio climático al inducir inconsistencias en la lluvia, viento, humedad relativa del suelo o temperatura del aire, podría reducir la cobertura de la pulverización o el tiempo de retención de las materias activas después de la aplicación, dependiendo, en parte, de las técnicas de aplicación innovadoras. El incremento en la precipitación (bien como únicos eventos extremos o promedios más altos) podría diluir el herbicida después de la aplicación así como exacerbar el lavado y la potencial contaminación de las aguas subterráneas. Condiciones de más viento podrían también incrementar el riesgo de deriva. Asimismo, las altas temperaturas podrían incrementar la absorción y traslocación de los herbicidas aplicados por vía foliar, aumentando la eficacia, pero también incrementando la volatilidad y la descomposición microbiana. La alta humedad también puede reducir el secado de las gotas después de la aplicación e incrementar la absorción del herbicida. En general, el aumento de la variación ambiental potenciada por el cambio climático podría influir en el

tiempo de liberación, la cobertura de la pulverización, la volatilización, el movimiento y los daños accidentales asociados con la aplicación de los herbicidas (Ziska, 2016).

Factores ambientales que afectan a la actividad de los herbicidas

Para entender el impacto del cambio climático sobre la eficacia de los herbicidas, es importante conocer cómo las condiciones ambientales afectan a su funcionamiento. El éxito del uso de los herbicidas depende de las condiciones ambientales antes, durante y después de su aplicación. El medio ambiente influye no sólo en el crecimiento y la

fisiología de las plantas, sino también en el herbicida y en la interacción entre ambos. En este sentido hay que considerar los efectos de los factores ambientales tales como la luz, CO₂, temperatura, humedad del suelo, humedad relativa, lluvia y viento sobre la acción herbicida en las plantas. Estos factores pueden afectar su eficacia directamente, alterando la penetración y traslocación de los mismos, dentro de la planta o indirectamente cambiando el crecimiento y las características fisiológicas de las plantas. Mientras que los herbicidas aplicados por vía foliar están influenciados por muchos factores ambientales, los herbicidas aplicados al suelo están influenciados principalmente por la humedad del suelo y la temperatura (Varanasi *et al.*, 2016).

Impacto del cambio climático en la eficacia de las materias activas

Los herbicidas se agrupan según sus diferentes modos de acción. La acción herbicida generalmente depende de una función metabólica en la planta que es

esencial para el crecimiento y desarrollo normal de la misma. En consecuencia, cualquier cambio en las condiciones climáticas que afecta las rutas metabólicas en las plantas afecta adversamente la actuación del herbicida. Además, el cambio climático puede afectar a las propiedades de los herbicidas y alterar los procesos físico-químicos a través de los cuales el herbicida es absorbido y translocado en la planta. Los herbicidas tienen diferentes modos de acción, y diferentes propiedades físico-químicas, que implican que el efecto del cambio climático puede variar entre las diferentes materias activas herbicidas. Por ello, es importante entender el impacto del cambio climático en los mecanismos fisiológicos y bioquímicos subyacentes que determinan la eficacia herbicida de cada modo de acción. La información de cómo el cambio climático influye en las distintas materias activas herbicidas es de gran utilidad no sólo para identificar su potencial modo de acción que son menos afectados por el cambio climático, sino también en evaluar las lagunas de investigación en el conocimiento actual y sugerir áreas potenciales que necesitan ser enfocadas en el futuro para establecer actuales estrategias de control de las malas hierbas de cara al cambio climático global (**cuadro II**).

Implicaciones para la investigación futura

Según Ziska (2016), cada vez es más claro que el cambio climático y la creciente concentración de CO₂ están probablemente exacerbando las poblaciones de malas hierbas, alterando la demografía malas hierbas-cultivos y la influencia global de los daños de las malas hierbas.

Los factores del cambio climático global tienen serias implicaciones no sólo para

el crecimiento de los cultivos y su productividad sino también en el comportamiento de los herbicidas y la efectividad del manejo químico de las malas hierbas. El constante aumento de la concentración de CO₂ atmosférico y sus efectos potenciales en otras variables climáticas, tal como la temperatura, precipitación, humedad relativa y radiación, pueden tener importantes consecuencias para el control sostenible de las malas hierbas y la producción de cultivos. Los estudios sugieren que cualquier impacto positivo puede ser anulado por respuestas más altas de las malas hierbas. Las malas hierbas tienden a mostrar mejores mecanismos de supervivencia bajo el cambio climático debido a su mayor variación genética interespecífica y plasticidad fisiológica. Además, las propiedades de los herbicidas son significativamente influenciadas por las condiciones ambientales antes, durante y después de su aplicación. Las actuales estrategias del manejo de las malas hierbas que dependen en gran medida del uso de herbicidas pueden tener efectos alterados sobre el crecimiento agresivo de las malas hierbas en las condiciones climáticas futuras.

Esto justifica la acción inmediata en términos de amplia investigación en los efectos potenciales de las variables del cambio climático sobre las diferentes materias activas herbicidas. En particular, es necesario desarrollar experimentos con múltiples variables climáticas para estudiar los efectos interactivos del cambio climático sobre el control de las malas hierbas. Muchas investigaciones han sido enfocadas sobre experimentos de un solo factor, que tienen poco valor predictivo en la realidad, debido a que la respuesta de las plantas interactuando con los factores del clima difiere grandemente

de la respuesta de un solo factor. Existen trabajos que sugieren que el impacto del cambio climático varía no sólo con el modo de acción de los herbicidas sino también entre herbicidas que pertenecen al mismo modo de acción, por lo que hacer suposiciones generalizadas para cada uno de ellos es difícil. Es necesaria una extensiva investigación sobre el impacto de los factores climáticos y sus interacciones sobre los herbicidas comúnmente usados, para entender las implicaciones en el manejo de las malas hierbas en los escenarios del futuro climático.

Se ha llevado a cabo una limitada investigación para predecir los efectos del cambio climático global sobre el manejo de malas hierbas bajo condiciones de campo. Por este motivo es esencial diseñar estudios de campo de larga duración con condiciones experimentales que simulen el clima futuro para predecir los efectos del cambio climático global con más precisión. La información generada a través de tales estudios ayudará a identificar las medidas potenciales del control de malas hierbas que necesitan ser adoptadas para hacer frente a los retos emergentes del crecimiento agresivo de las malas hierbas y el posible incremento de la resistencia a los herbicidas bajo el cambio climático (Varanasi *et al.*, 2016 y Ziska, 2016). ■

BIBLIOGRAFÍA

Korres, N.E., Norsworthy, J.K., Tehanchian, P., Gitsopoulos, T.K., Loka, D.A., Oosterhuis, D.M., Gealy, D.R., Moss, S.R., Burgos, N.R., Miller, M.R., Palhano, M. 2016. Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: a review. *Agronomy Sustainable Development*, 36 (12).

Varanasi, A., Prasad, P.V.V., Jugulam, M. 2016. Impact of climate change factors on weeds and herbicide efficacy. *Advances in Agronomy*, 135: 107-146.

Ziska, L.H. 2000. The impact of elevated CO₂ on yield loss from a C3 and C4 weed in field-growth soybean. *Global Change Biology*, 6: 899-905.

Ziska, L.H. 2016. The role of climate change and increasing atmospheric dioxide on weed management: herbicide efficacy. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 231: 304-309.