



Organización de las Naciones
Unidas para la Alimentación
y la Agricultura



Convención Internacional
de Protección
Fitosanitaria

Revisión científica del impacto del cambio climático en las plagas de las plantas

**Un desafío mundial en la prevención
y la mitigación de los riesgos de plagas
en la agricultura, la silvicultura y
los ecosistemas**





Revisión científica del impacto del cambio climático en las plagas de las plantas

Un desafío mundial en la prevención y la mitigación de los riesgos de plagas en la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas

Autores de la redacción:

Maria Lodovica Gullino (autora principal, Italia),
Ramón Albajes (España), Ibrahim Al-Jboory (Iraq),
Francislene Angelotti (Brasil), Subrata Chakraborty (Australia),
Karen A. Garrett (Estados Unidos de América),
Brett Phillip Hurley (Sudáfrica), Peter Juroszek (Alemania),
Khaled Makkouk (Líbano), Xubin Pan (China),
Tannecia Stephenson (Jamaica)

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
Roma, 2021

Cita requerida:

Secretaría de la CIPF. 2021. *Revisión científica del impacto del cambio climático en las plagas de las plantas. Un desafío mundial en la prevención y la mitigación de los riesgos de plagas en la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas.* Roma. FAO en nombre de la Secretaría de la CIPF. <https://doi.org/10.4060/cb4769es>

Las denominaciones empleadas en este producto informativo y la forma en que aparecen presentados los datos que contiene no implican, por parte de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), juicio alguno sobre la condición jurídica o nivel de desarrollo de países, territorios, ciudades o zonas, ni sobre sus autoridades, ni respecto de la demarcación de sus fronteras o límites. La mención de empresas o productos de fabricantes en particular, estén o no patentados, no implica que la FAO los apruebe o recomiende de preferencia a otros de naturaleza similar que no se mencionan.

Las opiniones expresadas en este producto informativo son las de su(s) autor(es), y no reflejan necesariamente los puntos de vista o políticas de la FAO.

ISBN 978-92-5-134507-8

© FAO, 2021



Algunos derechos reservados. Esta obra se distribuye bajo licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 3.0 Organizaciones intergubernamentales (CC BY-NC-SA 3.0 IGO; <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/deed.es>).

De acuerdo con las condiciones de la licencia, se permite copiar, redistribuir y adaptar la obra para fines no comerciales, siempre que se cite correctamente, como se indica a continuación. En ningún uso que se haga de esta obra debe darse a entender que la FAO refrenda una organización, productos o servicios específicos. No está permitido utilizar el logotipo de la FAO. En caso de adaptación, debe concederse a la obra resultante la misma licencia o una licencia equivalente de Creative Commons. Si la obra se traduce, debe añadirse el siguiente descargo de responsabilidad junto a la referencia requerida: “La presente traducción no es obra de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). La FAO no se hace responsable del contenido ni de la exactitud de la traducción. La edición original en [idioma] será el texto autorizado”.

Todo litigio que surja en el marco de la licencia y no pueda resolverse de forma amistosa se resolverá a través de mediación y arbitraje según lo dispuesto en el artículo 8 de la licencia, a no ser que se disponga lo contrario en el presente documento. Las reglas de mediación vigentes serán el reglamento de mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules> y todo arbitraje se llevará a cabo de manera conforme al reglamento de arbitraje de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI).

Materiales de terceros. Si se desea reutilizar material contenido en esta obra que sea propiedad de terceros, por ejemplo, cuadros, gráficos o imágenes, corresponde al usuario determinar si se necesita autorización para tal reutilización y obtener la autorización del titular del derecho de autor. El riesgo de que se deriven reclamaciones de la infracción de los derechos de uso de un elemento que sea propiedad de terceros recae exclusivamente sobre el usuario.

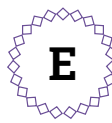
Ventas, derechos y licencias. Los productos informativos de la FAO están disponibles en la página web de la Organización (<http://www.fao.org/publications/es>) y pueden adquirirse dirigiéndose a publications-sales@fao.org. Las solicitudes de uso comercial deben enviarse a través de la siguiente página web: www.fao.org/contact-us/licence-request. Las consultas sobre derechos y licencias deben remitirse a: copyright@fao.org.

El texto de este documento no es una interpretación jurídica oficial de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) o sus documentos conexos, y se produce únicamente con fines de información pública. Para traducir este material, póngase en contacto con ippc@fao.org para obtener información sobre un acuerdo de coedición.

Índice

◆	Prefacio	v
◆	Agradecimientos	vi
◆	Siglas y acrónimos	vii
◆	Resumen ejecutivo	ix
	Introducción	1
	<i>Efectos del cambio climático en la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas</i>	2
	<i>Plagas mundiales que afectan a los cultivos, la silvicultura y los ecosistemas</i>	8
	<i>Vías utilizadas por las plagas</i>	10
	<i>Enfoques utilizados para investigar los efectos del cambio climático en las plagas de las plantas</i>	14
	Efectos del cambio climático en las plagas de las plantas	20
	<i>Simulación del riesgo futuro de plagas</i>	21
	<i>Efectos sobre las especies plaga</i>	22
	<i>Estudios de casos de especies de plagas individuales</i>	24
	Prevención, mitigación y adaptación	36
	<i>Prevención</i>	37
	<i>Desarrollos tecnológicos recientes</i>	41
	<i>Mitigación y adaptación</i>	43
	Conclusiones y recomendaciones	45
	<i>Formulación de políticas y marcos reglamentarios</i>	46
	<i>Investigación necesaria</i>	47
	<i>Cooperación internacional</i>	49
	<i>Creación de capacidades</i>	50
	Bibliografía	52

Prefacio



El cambio climático representa un desafío sin precedentes para la biosfera mundial y para la comunidad global. Es una amenaza inigualable para la biodiversidad del planeta, la salud humana y la economía mundial y también es un desafío excepcional para la sanidad vegetal. El cambio climático afectará a los ecosistemas y a los sistemas de producción agrícola de todo el mundo; influirá en los flujos comerciales internacionales de productos agrícolas, y modificará la infectividad, la gravedad y la distribución de las plagas y enfermedades de las plantas en todo el mundo. En particular, el cambio climático supondrá, un reto extraordinario para la comunidad fitosanitaria internacional y su capacidad para reaccionar de forma científica, decisiva y unificada ante estos desafíos

El Año Internacional de la Sanidad Vegetal (AISV) 2020 ha sido un empeño por mejorar la concienciación pública y política sobre la sanidad vegetal, y para ayudar a los gobiernos y a la comunidad internacional a abordar los desafíos fitosanitarios. El cambio climático constituye un importante desafío para la sanidad vegetal que debe ser abordado. El Comité Directivo Internacional del AISV encomendó una revisión científica del tema y, con el fin de reforzar la base científica de dicha revisión, encargó a un grupo de acreditados científicos de todo el mundo la redacción de la revisión, estableciendo un riguroso sistema de revisión por pares para validar sus conclusiones. Este informe detalla el resultado de la revisión y ha sido preparado por la profesora Maria Lodovica Gullino (Universidad de Turín, Italia), como autora principal, junto con un grupo de diez coautores que representan todas las regiones de la FAO y han aportado su experiencia en patología vegetal, entomología, herbología, climatología y análisis de datos. La revisión se ha desarrollado bajo los auspicios de la Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF).

Con esta revisión científica sobre el impacto del cambio climático en las plagas y, en consecuencia, en la sanidad vegetal, el Comité Directivo Internacional del AISV espera proporcionar los antecedentes científicos necesarios para informar de los debates exitosos sobre la evaluación y gestión de los impactos del cambio climático en los foros fitosanitarios internacionales. El Comité Directivo Internacional del AISV aspira a que esta revisión sirva como impulsor para que la Comisión de Medidas Fitosanitarias de la CIPF discuta y desarrolle políticas internacionales con el fin de mitigar los impactos del cambio climático en la sanidad vegetal. Este examen se considera el primer paso en la realización del punto de la Agenda de Desarrollo del Marco Estratégico 2020-2030 de la CIPF “Evaluación y gestión de los efectos del cambio climático en la sanidad vegetal”. Esperamos sinceramente que esta revisión suscite una respuesta decisiva y unificada de la comunidad internacional a los desafíos que el cambio climático plantea a la sanidad vegetal.

Atentamente,

Ralf Lopian

Presidente del Comité Directivo Internacional del AISV 2020



Agradecimientos

Maria Lodovica Gullino expresa su agradecimiento a los proyectos “Plant and Food Biosecurity” (PLANTFOODSEC, subvención n.º 261752), “Effective Management of Pests and Harmful Alien Species – Integrated Solutions” (EMPHASIS, subvención n.º 634179) y “EU-CHINA Lever for IPM Demonstration” (EUCLID, subvención n.º 633999); Ramón Albajes extiende su agradecimiento también a los proyectos EMPHASIS y EUCLID, todos ellos financiados por la Comisión Europea. Peter Juroszek agradece el proyecto “Potential Medium- and Long-Term Effects of the Projected Climate Change on Plant Diseases and on Fungicide Efficacy in Field Crops in Germany” (SIMKLIMA, concedido a Benno Kleinhenz, subvención n.º FKZ 281B202616), subvencionado por fondos procedentes del Ministerio Federal de Alimentación y Agricultura (BMEL) basados en una decisión del Parlamento de la República Federal de Alemania a través de la Oficina Federal de Agricultura y Alimentación (BLE) en el marco del programa de apoyo a la innovación. Xubin Pan agradece el apoyo del Proyecto de Consultoría de la Academia China de Ingeniería (2019-ZD-4).

Se agradece la competencia y el valioso apoyo técnico de Stefania Antro (Agroinnova, Universidad de Turín). Los autores también desean agradecer el constante apoyo y ayuda recibidos de Viivi Kuvaja (Secretaría de la CIPF, FAO) y las valiosas sugerencias de los revisores a lo largo del proceso.

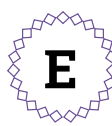
Este informe se ha elaborado con la contribución de expertos seleccionados de la División de Producción y Protección Vegetal, la División Forestal, la División de Tierras y Aguas y la Oficina de Cambio Climático, Biodiversidad y Medio Ambiente de la FAO.

Siglas y acrónimos

- ◆ **ADN** Ácido desoxirribonucleico
- ◆ **AISV** Año Internacional de la Sanidad Vegetal
- ◆ **ARP** Análisis de riesgo de plagas
- ◆ **CGIAR** Grupo Consultivo para la Investigación Agrícola Internacional
- ◆ **CLIMEX** Simulación climática de eventos extremos
- ◆ **CIPF** Convención Internacional de Protección Fitosanitaria
- ◆ **COVID-19** Enfermedad por coronavirus 2019
- ◆ **FACE** Enriquecimiento de CO₂ en aire libre
- ◆ **FAO** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- ◆ **IPCC** Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
- ◆ **NIMF** Normas internacionales para medidas fitosanitarias
- ◆ **ONPF** Organización Nacional de Protección Fitosanitaria
- ◆ **R4T** Raza 4 tropical (de *Fusarium oxysporum*)

- ◆ **C₃** Compuesto de tres carbonos producido por la fotosíntesis
- ◆ **C₄** Compuesto de cuatro carbonos producido por la fotosíntesis
- ◆ **CH₄** Metano
- ◆ **CO₂** Dióxido de carbono
- ◆ **N₂O** Óxido nitroso

Resumen ejecutivo



El cambio climático sigue planteando retos para la vida y los medios de subsistencia en todo el mundo y amplía los problemas a los que ya se enfrenta la humanidad. El objetivo de este informe es exponer los posibles efectos del cambio climático en las plagas de las plantas y, por tanto, en la sanidad vegetal, basándose en un análisis de la literatura científica y de los estudios que han investigado estos aspectos. Una plaga vegetal, en lo sucesivo denominada “plaga”, es cualquier especie, raza o biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales. Los ejemplos históricos y actuales muestran claramente los grandes daños que pueden causar los brotes de plagas. El calentamiento facilita la introducción de organismos no deseados; un solo invierno inusualmente cálido puede ser suficiente para ayudar al establecimiento de plagas invasoras, que de otro modo no podrían establecerse. De hecho, la creciente globalización del mercado de los últimos años, unida al aumento de las temperaturas, ha dado lugar a una situación extremadamente favorable para el desplazamiento y el establecimiento de las plagas, con el consiguiente aumento del riesgo de graves impactos en los bosques y los cultivos.

Los estudios han evaluado los efectos de varios factores atmosféricos y climáticos, como el aumento de la temperatura, el dióxido de carbono y el ozono y los cambios en los patrones de agua o humedad, sobre la distribución, la aparición, la abundancia de las plagas y la gravedad de muchos otros riesgos de plagas que plantean. La mayor parte de la investigación se ha centrado en los sistemas gestionados (por ejemplo, los cultivos agrícolas y hortícolas y los árboles forestales), mientras que los sistemas no gestionados se han dejado más o menos de lado. Se han utilizado muchos enfoques de investigación diferentes, que van desde la realización de experimentos de laboratorio y de campo hasta la realización de estudios de simulación del riesgo futuro de plagas.

La mayoría de los estudios, realizados con cultivos de cereales y hortícolas, indican que, en general, el riesgo de plagas de insectos, patógenos y malas hierbas aumentará en los ecosistemas agrícolas ante los escenarios de cambio climático, especialmente en las zonas árticas, boreales, templadas y subtropicales más frías de la actualidad. Esto también es cierto, en su mayor parte, para los patógenos y las plagas de insectos en la silvicultura. En el caso de los sistemas no gestionados, el reducido número de informes de investigación del que se dispone no permite extraer conclusiones generales.

Es necesario adoptar medidas de prevención, mitigación y adaptación para limitar la propagación internacional de las plagas a través del comercio y los viajes. Estas van desde las medidas fitosanitarias, como el uso de semillas y material de plantación sanos, hasta la adopción de los últimos avances tecnológicos, como los métodos innovadores de administración de plaguicidas. Las opciones de mitigación y adaptación a corto y medio plazo incluyen medidas como el uso de variedades resistentes y la alteración del microclima.

A pesar de la gran cantidad de estudios sobre la biología del cambio climático, todavía existen importantes lagunas en la investigación sobre el impacto del cambio climático en las plagas y, por consiguiente, en la sanidad vegetal. Estas lagunas incluyen el efecto del cambio climático en la eficacia de las estrategias de gestión, en las plagas bajo el suelo y en los sistemas forestales y no gestionados. Se necesita un enfoque multidisciplinar a largo plazo que aborde los problemas tanto de los países en desarrollo como de los industrializados. Es necesario mejorar la cooperación internacional y también invertir en la creación de capacidades, para garantizar sistemas sólidos de análisis de riesgo de plagas, vigilancia y seguimiento.

En conclusión, los datos examinados en este informe indican claramente que, en muchos casos, el cambio climático provocará un aumento de los problemas relacionados con la sanidad vegetal en los ecosistemas gestionados (por ejemplo, la agricultura, la horticultura y la silvicultura), semigestionados (por ejemplo, los parques nacionales) y, presumiblemente, también en los no gestionados. Los cambios climáticos recientes están obligando a ajustar los protocolos de protección de las plantas, pero en el futuro será cada vez más importante realizar nuevos ajustes, si se cumplen las previsiones de cambio climático. Es de suma importancia mantener los servicios de los ecosistemas gestionados y no gestionados y los productos, incluidos los alimentos, en condiciones de cambio climático. La protección preventiva y curativa de las plantas es uno de los componentes clave necesarios para mantener y preservar la seguridad alimentaria actual y futura.

Operaciones de control de la langosta del desierto en el Cuerno de África



Introducción





Efectos del cambio climático en la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas

El objetivo de esta revisión es evaluar los posibles efectos del cambio climático en las plagas de las plantas y, por tanto, en la salud de vegetal. Una plaga vegetal, en lo sucesivo denominada “plaga”, es cualquier especie, raza o biotipo vegetal o animal o agente patógeno dañino para las plantas o productos vegetales, según la definición de la Norma Internacional para Medidas Fitosanitarias n.º 5 (NIMF 5) adoptada por la Comisión de Medidas Fitosanitarias de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF).

El cambio climático se define como un aumento de las temperaturas combinadas de la superficie del aire y del mar, calculadas como promedio en todo el planeta, durante un periodo de 30 años. El calentamiento se expresa en relación con el periodo 1850-1900, que se utiliza como aproximación a las temperaturas preindustriales. El calentamiento con respecto a los niveles preindustriales en comparación con el decenio 2006-2015 se ha evaluado en 0,87 °C. Desde el año 2000, el nivel estimado de calentamiento inducido por el hombre ha sido igual al nivel de calentamiento observado, con un rango probable de $\pm 20\%$ que contabiliza la incertidumbre debida a las contribuciones de la actividad solar y volcánica durante el periodo histórico (IPCC, 2018). Los modelos climáticos proyectan grandes diferencias en las características climáticas regionales entre el momento actual y el calentamiento global de 1,5 °C y entre 1,5 y 2,0 °C. Dichas diferencias incluyen aumentos de la temperatura media en la mayoría de las regiones terrestres y oceánicas, temperaturas extremas en la mayoría de las zonas habitadas, fuertes precipitaciones en varias regiones, y la probabilidad de sequías y déficit de precipitaciones en algunas regiones (*ibid.*).

El cambio climático sigue presentando desafíos para la vida y los medios de subsistencia a nivel mundial (Altizer *et al.*, 2013; IPCC 2018). Los cambios observados incluyen el aumento de las temperaturas terrestres y oceánicas a nivel mundial (Figura 1), la pérdida de capas de hielo y de la cubierta de nieve, el aumento del nivel del mar, el incremento de la acidificación de los océanos, la mayor frecuencia de los fenómenos de calor extremo, la mayor variabilidad de los patrones de precipitación y la mayor frecuencia de los fenómenos de precipitación intensa y de las sequías (Figura 2). Estos cambios se han atribuido al aumento de las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero desde la era preindustrial, debido a la intensificación de las actividades agrícolas e industriales, la combustión de combustibles fósiles y el cambio de uso del suelo (Figuras 3 y 4). Los análisis químicos de los hielos y los sedimentos indican que las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) han alcanzado niveles sin precedentes durante al menos los últimos 800 000 años.

Sus efectos, junto con los de otros factores antropogénicos como la deforestación, son la causa dominante del calentamiento observado desde mediados del siglo xx (IPCC, 2014a, 2014b, 2018; Wuebbles y Hayhoe, 2002). Es importante destacar que es probable que el cambio climático global, especialmente el calentamiento global, continúe. Según el Informe Especial sobre Calentamiento Global de 1,5 °C del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es probable que el calentamiento global alcance un aumento de 1,5 °C entre 2030 y 2052 en comparación con los niveles preindustriales si el

calentamiento sigue aumentando al ritmo actual (IPCC 2018).¹ Los riesgos relacionados con el clima son mayores para un calentamiento global de 1,5 °C en comparación con los riesgos actuales,² pero los riesgos son significativamente más graves si el calentamiento global alcanza 2 °C. Estos riesgos dependen del grado y el ritmo del calentamiento, la ubicación geográfica, los niveles de desarrollo y vulnerabilidad regional y local, y las actividades de adaptación y mitigación realizadas (IPCC, 2018).

Los efectos del cambio climático ya están surgiendo en los sistemas naturales y humanos, incluidos los cambios en la cantidad y calidad del agua y los cambios en las áreas de distribución geográfica, las actividades estacionales, los patrones de migración, la abundancia de especies y las interacciones para muchas especies terrestres, de agua dulce y marinas (IPCC, 2014a, 2019a, 2019b), con impactos más negativos que positivos en los rendimientos de la mayoría de los cultivos (Porter *et al.*, 2019). Hay pruebas de que el cambio climático está afectando a los sistemas biológicos a múltiples escalas, desde los genes hasta los ecosistemas (Garrett *et al.*, 2006; Sutherst *et al.*, 2011). Según Scheffers *et al.* (2016), el cambio climático antropogénico ha deteriorado el 82% de los 94 procesos ecológicos fundamentales reconocidos por los biólogos, desde la diversidad genética hasta la función de los ecosistemas.

Además, los riesgos ya existentes, como la reducida disponibilidad de agua dulce, se amplificarán, y surgirán otros nuevos durante y más allá del siglo xxi. Los impactos futuros incluirán un mayor riesgo de extinción. Por ejemplo, la mayoría de las especies vegetales no pueden cambiar de forma natural su área de distribución geográfica con la suficiente rapidez para seguir el ritmo del cambio climático, y los organismos marinos se verán expuestos a niveles de oxígeno más bajos y a una mayor acidificación, a los que podrían no ser capaces de adaptarse. Un mayor cambio climático también puede amenazar la seguridad alimentaria por su impacto en los cultivos alimentarios y en los piensos de origen vegetal. En el caso del trigo, el arroz y el maíz, los peores impactos se esperan en los trópicos y subtrópicos, y se prevé que el cambio climático afecte negativamente a la producción cuando la temperatura local aumente 2 °C o más por encima de los niveles alcanzados a finales del siglo xx, aunque algunos lugares determinados podrían beneficiarse de este cambio, especialmente en latitudes y altitudes más altas. La producción mundial de alimentos y fibras, la protección de las plantas y la bioseguridad vegetal, que incluyen todas las estrategias para evaluar y gestionar los riesgos que plantean las enfermedades infecciosas, las plagas reguladas por la cuarentena, las especies exóticas invasoras, los organismos vivos modificados y los ecosistemas naturales y gestionados, también se verán afectados negativamente (Gregory *et al.*, 2009; Stack, Fletcher y Gullino, 2013).

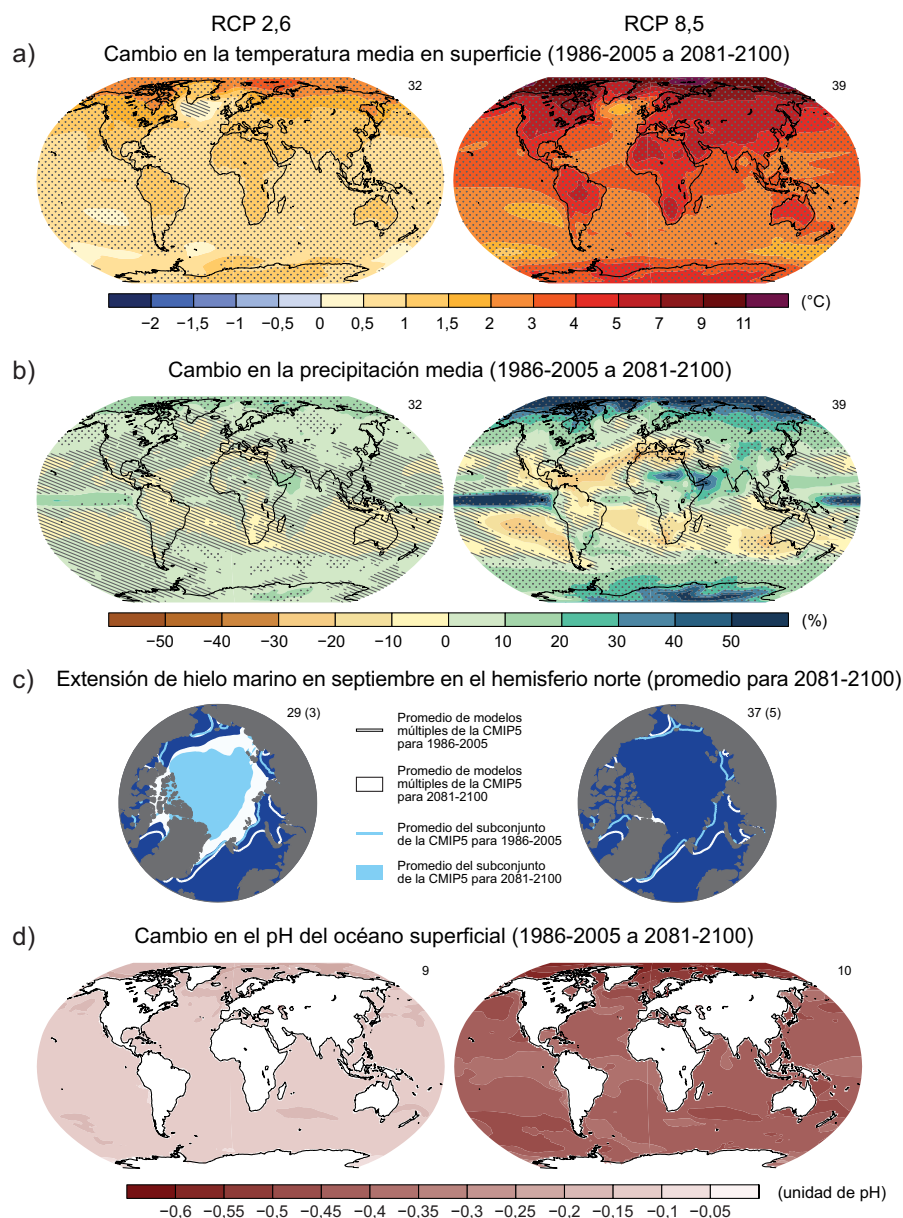
El objetivo de este informe es proporcionar información sobre: i) lo que ha sucedido en las últimas décadas; ii) lo que se espera que suceda en las próximas décadas como resultado del cambio climático, y iii) lo que podemos hacer para mitigar los impactos del cambio climático, y adaptarnos a él a nivel local, regional y mundial.

Está fuera del alcance de este informe abordar las causas del cambio climático o proporcionar un resumen exhaustivo de todos los resultados publicados durante los últimos 30 años. En su lugar, se citan muchos ejemplos de publicaciones para una lectura más profunda.

1 El objetivo del Acuerdo de París (2015) es limitar el calentamiento global muy por debajo de 2 °C, preferiblemente a 1,5 °C, en comparación con los niveles preindustriales.

2 Según el Informe Especial del IPCC sobre el Calentamiento Global de 1,5 °C (IPCC, 2018), las actividades humanas ya han causado aproximadamente 1,0 °C de calentamiento global por encima de los niveles preindustriales.

Figura 1



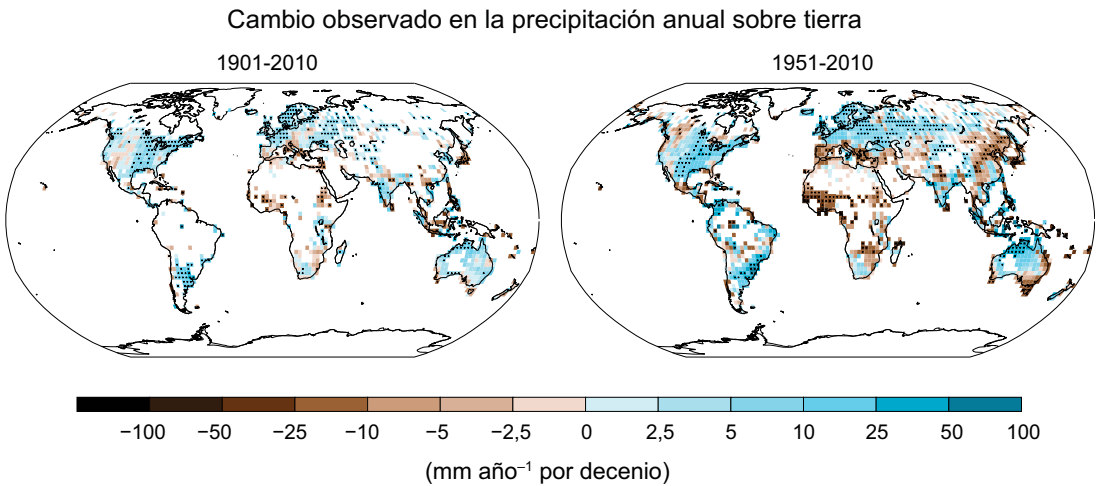
Fuente: IPCC (2013)

La leyenda en versión original e íntegra de la Figura 1, publicada en IPCC (2013), es la siguiente:

Figura RRP.8 | Mapas de resultados medios de modelos múltiples de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) de los escenarios RCP2,6 y RCP8,5, correspondientes al período 2081-2100, relativos a: a) el cambio anual en la temperatura media en superficie; b) el cambio de la media porcentual de la precipitación media anual; c) la extensión de hielo marino en septiembre en el hemisferio norte, y d) el cambio en el pH del océano superficial. Los cambios en los mapas a), b) y d) se muestran en relación con el período 1986-2005. El número de modelos de la CMIP5, utilizados para calcular la media de los modelos múltiples, se muestra en la esquina superior derecha de cada mapa. En los mapas a) y b), las tramas sombreadas indican las regiones donde la media de los modelos múltiples es pequeña en comparación con la variabilidad interna natural (esto es, inferior a una desviación típica de la variabilidad interna natural en medias de 20 años). Las tramas punteadas indican las regiones donde la media de los modelos múltiples es grande en comparación con la variabilidad interna natural (esto es, superior a dos desviaciones típicas de la variabilidad interna natural en medias de 20 años) y donde, por lo menos, el 90% de los modelos concuerdan con el signo del cambio (véase el recuadro 12.1). En la imagen c), las líneas son las medias de los modelos para 1986-2005; las áreas rellenas corresponden al final del siglo. Se indica en blanco la media de los modelos múltiples de la CMIP5, y en celeste la proyección de la extensión media del hielo marino de un subconjunto de modelos (número de modelos indicado entre paréntesis), que reproduce con mayor aproximación el estado medio climatológico y la tendencia registrada entre 1979 y 2012 de la extensión de hielo marino del Ártico. Para más detalles técnicos, véase el material complementario del Resumen técnico. {figuras 6.28, 12.11, 12.22 y 12.29; figuras RT.15, RT.16, RT.17 y RT.20}

Para más información, consulte la fuente original (IPCC, 2013). Reproducido con la amable autorización del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Figura 2



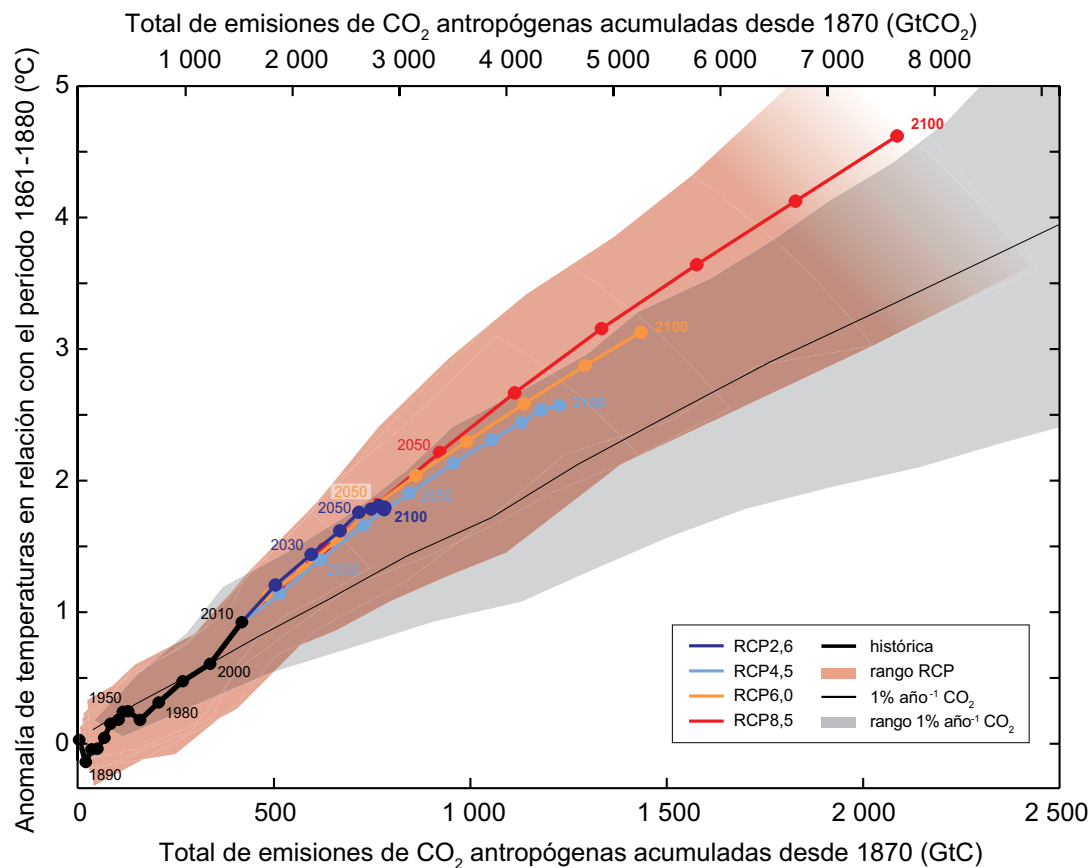
Fuente: IPCC (2013)

La leyenda en versión original e íntegra de la Figura 2, publicada en IPCC (2013), es la siguiente:

Figura RRP.2 | Mapas de los cambios observados en la precipitación, entre 1901 y 2010, y entre 1951 y 2010 (tendencias en la acumulación anual, calculadas de acuerdo con los mismos criterios empleados en la figura RRP.1), de un conjunto de datos. Para más información técnica, véase el material complementario del Resumen técnico. {ETE.1 del RT, figura 2; figura 2.29}

Para más información, consulte la fuente original (IPCC, 2013). Reproducido con la amable autorización del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Figura 3



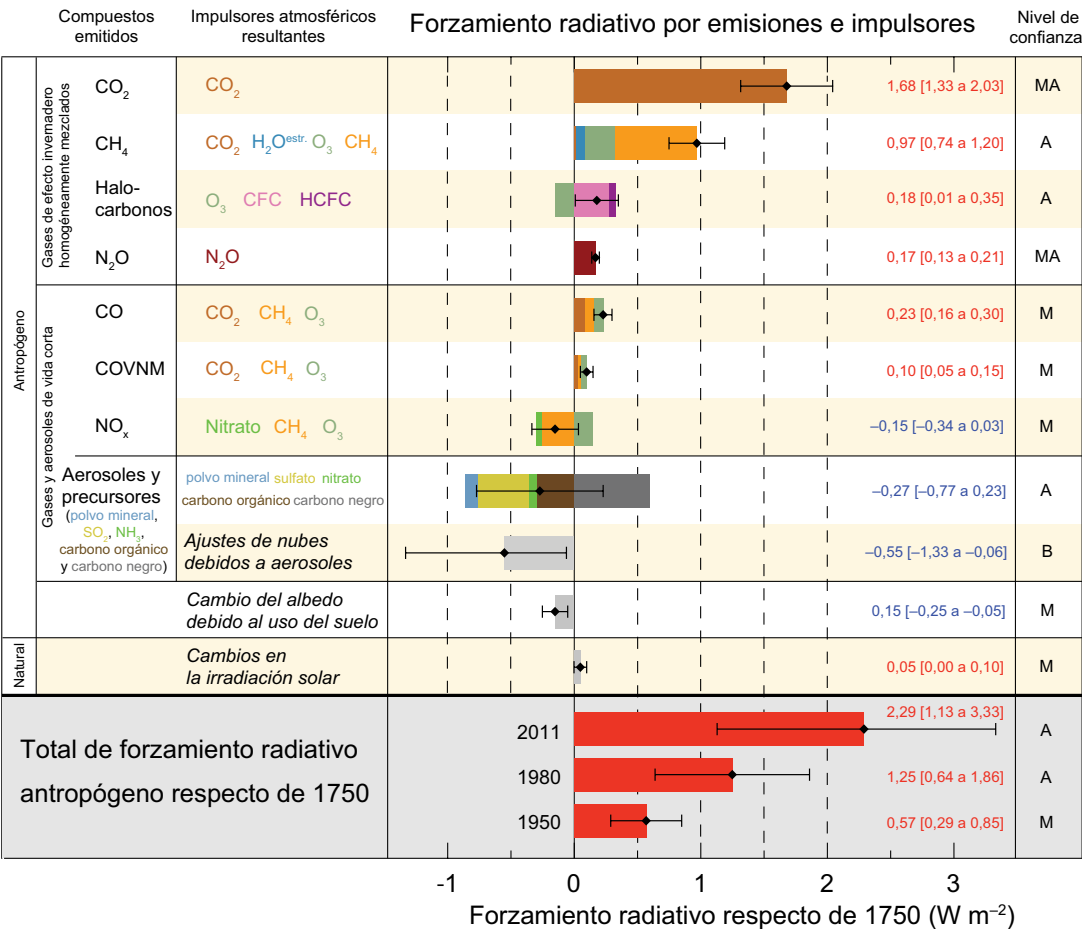
Fuente: IPCC (2013)

La leyenda en versión original e íntegra de la Figura 3, publicada en IPCC (2013), es la siguiente:

Figura RRP.10 | Aumento de la temperatura media global en superficie, como función del total de las emisiones globales acumuladas de CO₂ a partir de diversas líneas de evidencia. Los resultados de modelos múltiples obtenidos de modelos del ciclo climático y del carbono, de acuerdo con un orden jerárquico para cada trayectoria de concentración representativa (RCP) hasta 2100, se muestran con líneas de colores y puntos (medias decenales). En algunos casos, se indica el año correspondiente a la media decenal para mayor claridad (por ejemplo, el año 2050 indica la década 2040-2049). Los resultados de los modelos para el período histórico (1860 a 2010) se indican en negro. El penacho de color muestra la extensión de los modelos múltiples en los cuatro escenarios de RCP y va diluyéndose con los números decrecientes de los modelos en el escenario RCP8,5. La media de los modelos múltiples y el rango simulado por los modelos de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5), obligados a reflejar un aumento de CO₂ del 1% anual (simulaciones de CO₂ del 1% año⁻¹), se muestran mediante la línea negra delgada y el área gris. Para una cantidad específica de emisiones de CO₂ acumuladas, las simulaciones de CO₂ del 1% anual muestran un calentamiento menor que las que se rigen por escenarios de RCP, que incluyen otros forzamientos no generados por el CO₂. Los valores de la temperatura se dan en relación con el período de base 1861-1880, y las emisiones, en relación con 1870. Los promedios decenales se conectan mediante líneas continuas. Para mayores detalles técnicos, véase el material complementario del Resumen técnico. {figura 12.45; ETE.8 del RT, figura 1}

Para más información, consulte la fuente original (IPCC, 2013). Reproducido con la amable autorización del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Figura 4



Fuente: IPCC (2013)

La leyenda en versión original e íntegra de la Figura 4, publicada en IPCC (2013), es la siguiente:

Figura RRP.5 | Estimaciones de forzamiento radiativo en 2011 respecto de 1750, e incertidumbres agregadas de los principales impulsores del cambio climático. Los valores son el forzamiento radiativo medio global¹⁴, dividido de acuerdo con los compuestos emitidos o procesos que resultan en una combinación de impulsores. Las mejores estimaciones del forzamiento radiativo neto se indican mediante rombos negros con los correspondientes intervalos de incertidumbre; los valores numéricos se indican a la derecha de la figura, junto con el nivel de confianza en el forzamiento neto (MA: muy alto, A: alto, M: medio, B: bajo, MB: muy bajo). El forzamiento por albedo, debido al carbono negro sobre la nieve y el hielo, se incluye en la barra de aerosoles de carbono negro. No se muestran los forzamientos pequeños por estelas de condensación (0,05 W m⁻², incluidos los cirrus originados por estelas de condensación) y los hidrofluorocarbonos (HFC), los perfluorocarbonos (PFC) y el hexafluoruro de azufre (SF₆) (total de 0,03 W m⁻²). Los forzamientos radiativos correspondientes a las distintas concentraciones de gases se pueden obtener sumando las barras del mismo color. El forzamiento volcánico no se incluye, ya que su carácter episódico hace difícil la comparación con otros mecanismos de forzamiento. Se proporciona el forzamiento radiativo antropógeno total para tres años diferentes, en relación con 1750. Para más detalles técnicos, incluidos los rangos de incertidumbre asociados a los componentes y procesos individuales, véase el material complementario del Resumen técnico. {8.5; figuras 8.14 a 8.18; figuras RT.6 y RT.7]

Para más información, consulte la fuente original (IPCC, 2013). Reproducido con la amable autorización del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.

Plagas mundiales que afectan a los cultivos, la silvicultura y los ecosistemas

Desde su domesticación, hace unos 10 000 años, los cultivos se han visto amenazados por una multitud de plagas que provocan pérdidas de rendimiento que, a su vez, a menudo conducen al hambre y al malestar social. En promedio, a escala mundial, entre el 10% y el 28% de la producción de cultivos se pierde a causa de las plagas (Savary *et al.*, 2019). Además, se observan otras pérdidas posteriores a la cosecha, con los peores escenarios en los países en desarrollo. Por otra parte, además de las pérdidas, la presencia de micotoxinas (toxinas producidas por hongos) en los alimentos y los piensos puede amenazar gravemente la salud de las personas y el ganado (Magan, Medina y Aldred, 2011; Van Der Fels-Klerx, Liu y Battilani, 2016).

Los ejemplos históricos y actuales muestran claramente los grandes daños que pueden causar los brotes de plagas.

Entre las plagas de insectos, dos ejemplos clásicos demuestran los daños económicos y sociales derivados de la expansión invasora. Uno es la invasión y destrucción de los viñedos europeos por el insecto filoxera (*Daktulosphaira vitifoliae*) durante la segunda mitad del siglo ^{xix}, y el segundo es el escarabajo de la papa o Colorado (*Leptinotarsa decemlineata*) en el siglo ^{xx}, que colonizó rápidamente las parcelas de patatas. Ambas plagas son originarias de los Estados Unidos de América. Más recientemente, varias especies de insectos nativos de Norteamérica, sin registros previos de infestación grave, han surgido como plagas devastadoras de los recursos forestales debido a los cambios en su dinámica de población. Entre ellas se encuentran el minador de las hojas del álamo (*Phyllocnistis populiella*), el minador de las hojas del sauce (*Micrurapteryx salicifoliella*) y la polilla *Nepytia janetae*, que han diezmado millones de hectáreas de bosques de álamo, sauces y abetos desde principios de la década de 1990 (Bebber, Ramotowski y Gurr, 2013). Otras especies autóctonas que se han convertido en plagas son el escarabajo descortezador del pino de montaña y el escarabajo meridional del pino (*Dendroctonus ponderosae* y *Dendroctonus frontalis*, respectivamente) y el escarabajo del abeto (*Dendroctonus rufipennis*), que han ampliado recientemente su distribución, infestando pinos y abetos de importancia comercial (Anderegg, Kane y Anderegg, 2013; Bebber, Ramotowski y Gurr, 2013).

Entre los ejemplos clásicos causados por las enfermedades de los cultivos y los bosques se incluyen la hambruna de la patata irlandesa causada por *Phytophthora infestans* en la década de 1840, el impacto devastador de la roya del cafeto en Ceilán causada por *Hemileia vastatrix* en la década de 1860, y la Gran Hambruna de Bengala en 1943 causada por *Helminthosporium oryzae* (Schumann, 1991). Otro ejemplo importante que no hay que olvidar es la plaga del castaño causada por *Cryphonectria parasitica*, que acabó con el castaño americano (*Castanea dentata*): en los años 50, el 80% de los castaños habían muerto (*ibid*, 1991), afectando gravemente al paisaje de todo un país. La amenaza persiste. Actualmente se están extendiendo nuevas y más virulentas cepas de los hongos de la roya *Puccinia graminis* (Saunders, Pretorius y Hovmøller, 2019) y *Puccinia striiformis* (Liu *et al.*, 2017) y un nuevo linaje invasor de *Phytophthora infestans* ha desplazado rápidamente a otros genotipos del tizón tardío (Cooke *et al.*, 2012). La marchitez repentina de los olivos causada por *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca*, que ha destruido millones de olivos en Puglia (Italia) y también amenaza a otros países europeos y mediterráneos, es un ejemplo de cómo un patógeno puede afectar a un cultivo y también al paisaje de una región (Schneider *et al.*, 2020; Sicard *et al.*, 2018). En California y Oregón, en los Estados Unidos de América, así como en otras zonas,

Phytophthora ramorum, que causa la muerte súbita del roble, representa una amenaza para los ecosistemas forestales (Rizzo, Garbelotto y Hansen, 2005), mientras que otras especies de *Phytophthora* spp., como *P. kernoviae* y *P. agathidicida*, están afectando al emblemático y culturalmente importante kauri en Nueva Zelanda (Scott y Williams, 2014) y *P. pinifolia* está dañando los bosques de pinos en Chile (Duran *et al.*, 2008).

Además de los insectos y los patógenos de las plantas, los nematodos también pueden causar grandes daños a las plantas. Según Williamson y Gleason (2003), los nematodos se encuentran entre los organismos más frecuentes del planeta y afectan a todos los ecosistemas. La mayoría de ellos son de vida libre e inofensivos, ya que consumen, por ejemplo, microorganismos como las bacterias, pero un pequeño número de especies de nematodos son parásitos de plantas, y algunos de estos nematodos parásitos de plantas pueden suponer una grave amenaza para los ecosistemas gestionados y no gestionados. En la agricultura, los grupos de nematodos más importantes desde el punto de vista económico son los endoparásitos sedentarios, incluidos los géneros *Heterodera* y *Globodera* (ambos nematodos del quiste) y *Meloidogyne* (nematodos del nudo de la raíz). En la silvicultura, la enfermedad del marchitamiento del pino, causada por el nematodo del pino (*Bursaphelenchus xylophilus*), es una de las enfermedades invasivas más devastadoras que afectan a los pinos (*Pinus* spp.) con un impacto significativo en los ecosistemas naturales de África, América del Norte, Asia y Europa (CABI, 2021a). Es particularmente devastador en Asia oriental, incluyendo China, Japón y la República de Corea (Ikegami y Jenkins, 2018).

Por último, algunas especies vegetales son por sí mismas plagas. Las malas hierbas o maleza son “plantas no deseadas” en la agricultura, la horticultura, la silvicultura y los ecosistemas no gestionados (Juroszek y von Tiedemann, 2013a; Korres *et al.*, 2016; Wan y Wang, 2019). Así, una maleza es una planta que prevalece en el lugar o el momento equivocado. Esta tiene una serie de propiedades que pueden ser beneficiosas. Algunas especies de malas hierbas pueden prestar servicios útiles al ecosistema, como proporcionar alimento a los polinizadores, como las abejas, y servir de hábitat a muchos organismos beneficiosos, además de cubrir el suelo, reduciendo así su erosión. También pueden ser colonizadoras primarias tras daños o deterioros en el suelo o en el ecosistema (por ejemplo, incendios o desprendimientos), y en la estabilización de las riberas de los ríos y las dunas de arena. Además, algunas son plantas medicinales tradicionales. No obstante, las malas hierbas pueden causar dermatitis de contacto o provocar alergias a través de su polen, y pueden ser tóxicas para el ganado (Ziska, Epstein y Schlesinger, 2009). También pueden tener un impacto negativo donde no son deseadas. Muchas malas hierbas tienen una amplia tolerancia ambiental y un alto nivel de plasticidad fenotípica y potencial evolutivo (Clements y DiTommaso, 2011), lo que les proporciona una capacidad competitiva muy elevada en comparación con las plantas de cultivo, que han sido seleccionadas para ser homogéneas. Las malas hierbas pueden causar grandes pérdidas tanto en la calidad como en la cantidad de los cultivos y otras plantas y hábitats, ya que compiten por los recursos bajo el suelo (por ejemplo, agua y nutrientes) y sobre el suelo (por ejemplo, la luz) (Karkanis *et al.*, 2018; Naidu, 2015; Peters, Breitsameter y Gerowitt, 2014; Ramesh *et al.*, 2017). Un ejemplo de ello es la producción de zanahorias (*Daucus carota*) que, incluso en un huerto doméstico, es imposible sin el control de las malas hierbas, debido a la escasa capacidad competitiva de las plántulas de zanahoria.

Vías utilizadas por las plagas

La propagación de las plagas se produce a través de procesos tanto naturales como antropogénicos, facilitados en gran medida durante las últimas décadas por la globalización de los mercados de plantas y productos vegetales, incluidos los alimentos, el material de siembra y la madera. Los viajes a nivel mundial y el comercio de productos agrícolas han desplazado los cultivos, las malas hierbas, los patógenos y las plagas de insectos fuera de sus entornos nativos, hacia otros nuevos. Los cultivos recién introducidos pueden ampliar la difusión de las plagas, y la introducción de nuevas plagas en un ecosistema completamente nuevo puede causar daños muy graves porque las plagas y los hospedadores pueden no haber coevolucionado juntos. Esta coevolución ha sido especialmente reconocida en el caso de las plantas y sus plagas (Woolhouse *et al.*, 2002) y ha creado un equilibrio estable entre los huéspedes y las plagas dentro de sus ecosistemas endémicos. Por ejemplo, el nematodo de la marchitez del pino (véase el estudio de caso más abajo), que ha coevolucionado con la especie de planta huésped en su zona nativa, en América del Norte, no ocasiona daños graves en esa región. Sin embargo, cuando se introdujo en Asia, causó la muerte de varios millones de árboles de diversas especies de *Pinus*.

Según Anderson *et al.* (2004), la mitad de las enfermedades emergentes de las plantas se propagan a través de los viajes y el comercio mundial, mientras que su propagación por medios naturales, favorecida por los fenómenos meteorológicos, es el segundo factor más importante. Además, también es probable que existan interacciones entre el establecimiento de la plaga y las condiciones climáticas y meteorológicas. Por ejemplo, el calentamiento global puede facilitar el asentamiento de algunas plagas que de otro modo no podrían establecerse (por ejemplo, durante un invierno inusualmente cálido en condiciones climáticas templadas). De hecho, la creciente globalización del mercado de los últimos años, junto con el aumento de las temperaturas, ha dado lugar a una situación extremadamente favorable para el movimiento y el establecimiento de plagas, con el consiguiente incremento del riesgo de graves pérdidas de rendimiento (Deutsch *et al.*, 2018; Savary *et al.*, 2019). Al considerar el posible impacto del cambio climático en la sanidad vegetal y, por tanto, en la distribución de las plantas, es importante comprender no solo qué condiciones permiten que las plagas prosperen, sino también las vías por las que se desplazan de un lugar a otro.

Es preciso además conocer las vías de propagación a la hora de determinar las medidas que deben adoptarse para mitigar los cambios previstos por el riesgo de plagas a causa del cambio climático y adaptarse a ellos. Se han realizado considerables esfuerzos nacionales e internacionales para reducir el riesgo de movimiento internacional de plagas (Meurisse *et al.*, 2019), incluida la publicación y aplicación de las Normas Internacionales para Medidas Fitosanitarias (NIMF), elaboradas bajo los auspicios de la Comisión de Medidas Fitosanitarias y la Secretaría de la CIPF. Estas incluyen orientaciones sobre cómo llevar a cabo el análisis de riesgo de plagas (ARP) para determinar el riesgo de introducción (entrada y establecimiento) y propagación de plagas y para seleccionar qué medidas aplicar para evitar que esto ocurra (NIMF 2, 2019; NIMF 11, 2019; NIMF 21, 2019). Estas medidas fitosanitarias se aplican generalmente con referencia a los riesgos de la vía. Dado que existe el requisito de revisar periódicamente la información que respalda el ARP (NIMF 11, 2019), esto incluye presumiblemente la reevaluación de los riesgos de las vías, o al menos de aquellos que dependen en gran medida de las condiciones climáticas cambiantes, como la manifestación de fenómenos meteorológicos extremos que pueden propagar las plagas cuarentenarias a grandes distancias.

A continuación se ofrece un resumen de los principales tipos de vías de transmisión.

Embalaje de madera

Históricamente, la madera, incluidos los embalajes, ha desempeñado un papel importante en la propagación de plagas vegetales. Entre los ejemplos que muestran la importancia de esta vía está el movimiento de especies de insectos invasores, como el escarabajo de la madera *Anoplophora glabripennis* (Coleoptera: Cerambycidae), en los embalajes durante el comercio internacional (OEPP, 2020a, 2021a). Esta especie es polífaga (es decir, se alimenta de una amplia gama de alimentos), alimentándose de varias especies de los árboles arce (*Acer*), álamo y álamo temblón (*Populus*), sauce (*Salix*) y olmo (*Ulmus*) en bosques y entornos urbanos. Originario de China y de la República de Corea, se ha introducido en los Estados Unidos de América y el Canadá en embalajes de madera infestados, al igual que se ha detectado en varios países europeos. En estos países se están llevando a cabo programas de erradicación, que implican la detección, retirada y destrucción de los árboles infestados. La inspección y el tratamiento cuidadosos de los embalajes de madera maciza, como los palés y la madera de estiba, es un requisito internacional para evitar nuevas infecciones. Los esfuerzos de modelización para predecir la distribución geográfica del escarabajo han demostrado que el cambio climático puede alterar su distribución e impacto (Hu *et al.*, 2009).

El embalaje de madera también se ha indicado como la vía probable de muchas especies de escarabajos de la corteza, como *Ips grandicollis* (Coleoptera: Curculionidae), así como otras plagas forestales graves como el barrenador esmeralda del fresno, *Agrilus planipennis* (Coleoptera: Buprestidae) y la avispa de la madera Sirex, *Sirex noctilio* (Hymenoptera: Siricidae) (Meurisse *et al.*, 2019). Se podido observar además el movimiento del nematodo del marchitamiento del pino, *B. xylophilus* (véase el estudio de caso), o de su insecto vector, a través del material de embalaje de la madera sin tratar (Sousa *et al.*, 2011).

Semillas, material de plantación, suelo y medios de cultivo

La globalización de los mercados de semillas y materiales de siembra es una de las principales causas de la reciente y rápida propagación de los patógenos de las plantas a nuevos huéspedes. Además, algunos de los patógenos y plagas de insectos recién introducidos que son típicos de las zonas cálidas se están extendiendo fácilmente en las regiones templadas, debido al aumento de la temperatura. En general, las semillas son vectores de plagas. Las plantas maduras también son grandes vectores de insectos vivos, como ácaros, pulgones, orugas, minadores de hojas y trips. Por este motivo, Australia, por ejemplo, ha realizado un ARP en las flores cortadas que enumera los principales insectos asociados a ellas.

Sobre todo en el sector de las hortalizas, la reciente propagación de nuevos patógenos en diferentes países está claramente relacionada con el hecho de que, al ser transmitidos por semillas, su difusión se ve favorecida por la globalización del mercado; el efecto del calentamiento global sobre las plantas y sus huéspedes también ha contribuido a esta propagación. Así se ha demostrado, por ejemplo, con *Alternaria* spp., *Fusarium equiseti* y *Myrothecium* spp., que se han podido observar recientemente en lechugas, rúcula silvestre y cultivada, canónigos, albahaca y espinacas (Gilardi, Garibaldi y Gullino, 2018). Los virus del tomate (virus del fruto rugoso marrón del tomate) y los viroides (tubérculo fusiforme de la papa) son ejemplos clásicos, recientes y actuales. El virus del tomate ha surgido en los últimos años y se ha propagado fácilmente por el movimiento de semillas. Muchos de los patógenos que causan graves pérdidas en las hortalizas de hoja, como los mencionados anteriormente, pueden transmitirse por semillas y, por tanto, pasar desapercibidos. Así, incluso niveles bajos de infección de las semillas pueden conducir a la rápida aparición de nuevas enfermedades en zonas geográficas distantes (Gitaitis y Walcott, 2007; Gullino, Gilardi y Garibaldi,

2014a, 2019; Munkvold, 2009). Lamentablemente, esto ocurre con mucha frecuencia, como demuestran muchas introducciones recientes, a pesar de la presencia de normas industriales e internacionales definidas con el fin de reducir este riesgo.

La industria ornamental, debido a su carácter internacional, se ve muy afectada por la introducción de plagas a través de material infectado (Daughtrey y Buitenhuis, 2020). Las plantas ornamentales, ya sean iniciadas a partir de semillas, de esquejes o de sección de caña, pueden albergar fácilmente plagas. Solo las plantas micropropagadas mediante cultivo de tejidos (generalmente plantas de follaje) tienen un riesgo considerablemente reducido de infección por patógenos, siempre que se mantengan limpias, y se evite así la reinfección (Chen y Henny, 2006). Algunas de las plagas de insectos y ácaros más perjudiciales para los cultivos de invernadero se han originado a través de la importación de material vegetal infestado y se han establecido rápidamente debido a las condiciones ambientales especiales de los invernaderos (Albajes *et al.*, 1999; Wang *et al.*, 2015). Las plantas de cafeto ornamentales importadas de Costa Rica e infectadas por *Xylella fastidiosa* subsp. *pauca* están consideradas como el posible transmisor de este destructivo patógeno en Europa (Bergsma-Viami *et al.*, 2015).

La tierra y el sustrato para macetas, a menudo importados, pueden albergar patógenos transmitidos por el suelo (por ejemplo, *Fusarium* spp., nematodos), las larvas de plagas de insectos y las semillas de malas hierbas. Esto ha sido bien documentado en relación con la turba y otros medios utilizados en la industria ornamental y en los viveros. La contaminación de los sustratos de cultivo por patógenos transmitidos por el suelo (por ejemplo, *Fusarium oxysporum*, *Pythium* spp., *Rhizoctonia solani*) da lugar a una desinfestación incompleta y a ataques tempranos de las plantas jóvenes (Garibaldi y Gullino, 1995).

Además del riesgo de plagas que supone el movimiento de semillas, material de plantación, tierra y medios de cultivo descrito anteriormente, en los últimos años ha surgido un nuevo tipo de amenaza, debido al creciente mercado en línea que difunde material de plantación por todo el mundo. El material de plantación comercializado como tal es a menudo de baja calidad y generalmente no está sujeto a control fitosanitario, por lo que representa un nuevo tipo de amenaza. Este aspecto, que no se había abordado hasta ahora, deberá tenerse en cuenta en el futuro.

Transporte, carga y desplazamiento de animales

Los tractores, los coches, los camiones, los trenes, los barcos, los aviones, los contenedores revendidos de equipos agrícolas usados y otros vehículos son medios habituales para el traslado pasivo de plagas. De hecho, los fitopatólogos, entomólogos y expertos en malas hierbas suelen considerar que la velocidad de propagación de las plagas está directamente relacionada con la velocidad de los medios de transporte.

Los organismos vivos también pueden propagar plagas, como las semillas de malas hierbas situadas en la piel o el pelaje de los animales. Por ejemplo, el desplazamiento de rebaños de animales por parte de las comunidades de pastores hacia nuevos territorios en busca de pastos ha propagado semillas de la planta exótica invasora *Parthenium hysterophorus* en África oriental y meridional (McConnachie *et al.*, 2011).

La red mundial de transporte marítimo está ampliamente reconocida como una vía de vectorización de especies invasoras. Una especie de insecto que se sabe que se ha propagado por todo el mundo a través del transporte marítimo, incluido el transporte en barcos y contenedores, es la polilla gitana, *Lymantria dispar*. Esta especie puede introducirse en una nueva zona cuando el puerto tiene un clima adecuado para la supervivencia y el estableci-

miento de la especie. En la actualidad se conocen dos subespecies, con diferentes orígenes geográficos, y se ha estimado la amenaza de distribución global de la subespecie asiática mediante un modelo CLIMEX (Paini *et al.*, 2018).

El heteróptero de la chinche apestosa marrón *Halyomorpha halys* (Hemiptera: Pentatomidae) es otro ejemplo de insecto invasor que viaja principalmente a través del comercio internacional como contaminante de mercancías no reguladas, como maquinaria, contenedores y vehículos, pero también por medio de pasajeros y, en menor medida, a través del movimiento de material vegetal. Es muy polífago y se alimenta de más de 300 especies de plantas huésped, incluyendo cultivos alimentarios, árboles forestales y plantas ornamentales. Esta plaga ha causado graves pérdidas económicas en los cultivos de avellanas en Georgia y en los cultivos frutales en Italia desde su introducción, muy probablemente procedente de América del Norte. Se puede consultar un informe detallado de una evaluación del riesgo de plagas por la introducción y el establecimiento de *H. halys* en Burne (2019).

Pasajeros

Las personas, con sus viajes de ocio o de negocios, son vectores perfectos de plagas, sobre todo en ausencia de controles estrictos en los puntos de entrada. Los viajes de ocio, en particular, se asocian a menudo con personas que traen alimentos, semillas o plantas exóticas, y estas pueden estar infestadas de plagas o ser ellas mismas una plaga. Para contrarrestar esta situación, un número cada vez mayor de países está organizando campañas en los puntos de entrada (aeropuertos y puertos), con el objetivo de concienciar al público sobre la amenaza a la bioseguridad que supone el desplazamiento de vegetales y sus componentes. Muchos países inspeccionan el equipaje y el correo en busca de alimentos y otros materiales de riesgo para la bioseguridad y animan a los pasajeros a su llegada a declarar cualquier tipo de material de riesgo para la bioseguridad. La inspección de los pasajeros y su equipaje se realiza mediante rayos X, perros detectores e inspecciones manuales. Los pasajeros con materiales de riesgo pueden ser multados o incluso se les puede negar la entrada. En este sentido, países como Australia, Nueva Zelanda y Estados Unidos de América (McCullough *et al.*, 2006) tienen un largo historial de control estricto, así como de recopilación y notificación de datos sobre interceptaciones.

Dispersión natural

Hay ejemplos en los que las plagas nativas y no nativas han ampliado significativamente sus áreas de distribución geográfica de forma natural (es decir, sin ayuda del ser humano). Esto suele estar relacionado con cambios importantes en la distribución de los hospedadores o en el clima. De los cambios en el clima, el aumento de las temperaturas en particular es lo que ha facilitado la expansión del área de distribución de las plagas, especialmente en latitudes y altitudes más altas. En Europa, por ejemplo, el aumento de las temperaturas invernales ha incrementado la supervivencia de las larvas y la dispersión nocturna de los adultos de la polilla procesionaria del pino, *Thaumetopoea pityocampa*, permitiendo la expansión hacia el norte de su área de alcance (Battisti *et al.*, 2006). Además, el viento y las tormentas pueden transportar esporas de patógenos a grandes distancias, incluso a través de los continentes. Por ejemplo, se prevé que los cambios en los patrones de los vientos o las tormentas promuevan la futura distribución de la roya del trigo, causada por *Puccinia graminis* (Prank *et al.*, 2019). También la roya del mirto (*Austropuccinia psidii*), detectada por primera vez en Australia en 2010 en la costa central de Nueva Gales del Sur, se está extendiendo y ahora se puede encontrar en una serie de ecosistemas forestales nativos, con impactos de la enfermedad que van desde manchas menores en las hojas hasta el tizón severo de los brotes y el tallo y la muerte de los árboles (Pegg *et al.*, 2017). La distribución de varias plagas, incluida la mosca de la fruta, puede verse afectada por los huracanes en el Caribe, América

Central y el sur de los Estados Unidos de América. Por ejemplo, Flitters (1963) observó que varias especies de insectos emergieron en un número inusualmente grande en Texas tras el paso del huracán “Carla”, lo que sugiere que habían sido transportados allí por el huracán desde lugares distantes.

Enfoques utilizados para investigar los efectos del cambio climático en las plagas de las plantas

En los últimos 30 y 40 años, se han evaluado los efectos de varios factores —aumento de la temperatura, CO₂, ozono o irradiación ultravioleta-B, cambios en los patrones de agua/humedad— sobre la incidencia y la gravedad de las enfermedades de las plantas. Los estudios se han centrado en las plagas que afectan a los cultivos de campo como el trigo, la cebada, el arroz, la soja y la papa (patata) (Bregaglio, Donatelli y Confalonieri, 2013; Evans *et al.*, 2008; Launay *et al.*, 2014; Luck *et al.*, 2011; Mikkelsen, Jørgensen y Lyngkjær, 2014), los cultivos hortícolas (Gullino *et al.*, 2018; Koo, Hong y Yun, 2016), incluidos los cultivos tropicales y de plantación (Ghini, Hamada y Bettiol, 2011), y los árboles forestales (Battisti, 2008; Jactel, Koricheva y Castagneyrol, 2019; Sturrock *et al.*, 2011).

En estos estudios se han utilizado diversos enfoques de investigación, como se resume en el cuadro 1. En algunos casos se trata de experimentos en los que se analizan los efectos de los cambios en uno o varios parámetros meteorológicos. Otros estudios han investigado las especies a lo largo de gradientes latitudinales o de elevación como un indicador de los cambios en el clima a lo largo del tiempo. Además de estos enfoques empíricos, también se han adoptado enfoques “teóricos”, como el metaanálisis de resultados publicados o el análisis de conjuntos de datos a largo plazo. Por último, algunos estudios han recurrido a la opinión de expertos o han generado modelos de simulación para predecir cómo los cambios previstos en el clima o la composición atmosférica alterarán la distribución, la prevalencia, la gravedad y la gestión de las plagas y otros organismos.

Los enfoques experimentales pueden aportar información útil sobre los efectos del cambio climático en las enfermedades y las plagas de las plantas, pero pocos estudios de este tipo han imitado de forma realista un clima cambiante (Chakraborty y Newton, 2011; Ingram, Gregory e Izac, 2008; Loustau *et al.*, 2007; Luck *et al.*, 2011; Pautasso *et al.*, 2012). Los estudios sobre el cambio climático llevados a cabo en sistemas Free Air CO₂ Enrichment (FACE) y en cámaras abiertas han permitido comprender mejor los efectos de diferentes parámetros en el desarrollo de enfermedades de las plantas en varios cultivos (Eastburn, McElrone y Bilgin, 2011) (Figura 5). Estos sistemas también se han utilizado para investigar las malas hierbas (Williams *et al.*, 2007) y los insectos (Delucia *et al.*, 2012). En general, la mayoría de los problemas relacionados con insectos y enfermedades estudiados en sistemas FACE en condiciones de CO₂ elevado se han visto incrementados, como han resumido recientemente Ainsworth y Long (2021).

Los fitotrones —cámaras ambientales construidas para probar el efecto de combinaciones de parámetros ambientales (Gullino *et al.*, 2011; Hakata *et al.*, 2017)— permiten estudiar los efectos de los aumentos a corto plazo del CO₂ y la temperatura en las relaciones entre el huésped y el patógeno (Gullino *et al.*, 2018), para entender cómo pueden evolucionar enfermedades específicas en el futuro (Figura 6). Los resultados de estos estudios pueden utilizarse para desarrollar soluciones prácticas para hacer frente a futuros escenarios, por ejemplo, proporcionando apoyo a la industria de la mejora vegetal. También pueden permitir la investigación de otros efectos más indirectos del cambio climático en las plantas, como

los efectos en la producción de micotoxinas o en las prácticas de gestión de enfermedades (Gilardi *et al.*, 2017; Gullino *et al.*, 2020).

Los enfoques de campo en entornos naturales incluyen la investigación a lo largo de un gradiente de elevación desde sitios de baja a alta elevación (Betz, Srisuka y Puthz, 2020; Garibaldi, Kitzberger y Chaneton, 2011), con los cambios asociados en la temperatura y la humedad del aire, y la investigación en diferentes hábitats a lo largo de un gradiente latitudinal, incluyendo, por ejemplo, condiciones climáticas subtropicales, templadas y semiáridas (Bairstow *et al.*, 2010; Scalone *et al.*, 2016). El primer enfoque tiene la ventaja de que el fotoperiodo es el mismo a lo largo del gradiente elevacional. En el segundo enfoque, es probable que el fotoperiodo varíe a lo largo del gradiente latitudinal. En los trópicos, por ejemplo, los días son más cortos y las noches más largas durante el verano y al revés en invierno, en comparación con las condiciones climáticas templadas. Estas diferencias en el fotoperiodo deben tenerse en cuenta a la hora de interpretar los resultados. No obstante, este tipo de enfoque es útil para identificar patrones en amplios gradientes ambientales y una serie de regiones climáticas en condiciones reales, y tales estudios pueden ayudar a identificar si una determinada especie se limita a un clima específico o se da ampliamente y puede invadir lugares que se están calentando (Juroszek y von Tiedemann, 2013a).

Se han realizado metaanálisis de conjuntos de datos publicados para buscar patrones generales en las respuestas a plagas específicas ante las diferencias en las variables climáticas (Koricheva y Larsson, 1998; Massad y Dyer, 2010; Vilà *et al.*, 2021). Además, se han utilizado conjuntos de datos a largo plazo procedentes de observaciones de campo para estudiar los efectos del cambio climático que son ya patentes debido al calentamiento de las últimas décadas (Altermatt, 2010; Huang y Hao, 2020; Jeger y Pautasso, 2008). Estos conjuntos de datos a largo plazo pueden servir de base adecuada para futuros estudios (Huang y Hao, 2020; Robinet y Roques, 2010) porque pueden ayudar a los investigadores a distinguir los impactos debidos al cambio climático de los debidos a otros factores (Garrett *et al.*, 2016, 2021). Se ha intentado mejorar las estimaciones de los efectos del calentamiento del clima sobre los insectos combinando datos de conjuntos de datos a largo plazo, experimentos a gran escala y modelos informáticos (Diamond, 2018; Grünig *et al.*, 2020; Lehmann *et al.*, 2020). Por ejemplo, un metaanálisis de datos de estudios de laboratorio concluyó que los niveles tróficos superiores (p. ej. depredadores) son más susceptibles al cambio climático que los organismos de orden inferior (plantas o insectos herbívoros) (Fussmann *et al.*, 2014). Esto es relevante a la hora de estudiar el papel cambiante de los enemigos naturales en la dinámica de las plagas de insectos y el control biológico bajo el cambio climático, un tema sobre el que hay muy pocos datos de campo (Thomson MacFadyen y Hoffman, 2010).

Los modelos de simulación pueden utilizarse para proyectar los efectos futuros del cambio climático sobre las plagas (Sutherst, 1991; Sutherst *et al.*, 2011), y para ayudar a determinar las tácticas y estrategias de control de las plagas (Ghini, Hamada y Bettiol, 2008; Hill y Thomson, 2015; Salinari *et al.*, 2007; Shaw y Osborne, 2011). Uno de los enfoques de modelización, por ejemplo, utiliza la “correspondencia climática”, según la cual se estudia una zona geográfica que tiene un clima actual análogo al futuro clima de la zona de interés (para la dinámica de las plagas en este caso), y luego se extrapolan los resultados a un escenario futuro en la zona de interés (Sutherst, Maywald y Russell, 2000). Otros enfoques de modelización pueden basarse en conjuntos de datos a largo plazo sobre los parámetros meteorológicos, el desarrollo de los cultivos y la distribución y prevalencia de las plagas para desarrollar y validar modelos “plaga-cultivo-clima” (Angelotti *et al.*, 2017; Madgwick *et al.*, 2011). Otros ejemplos recientes de estudios de modelización, enumerados en el cuadro 2, tienen en cuenta parámetros como el número de generaciones por año de las plagas de insectos, el momento de la floración de las plantas y la gravedad de las enfermedades relacionadas, y la distribución global de las malas hierbas.

Cuadro 1. Ejemplos de enfoques experimentales y teóricos en la investigación de la biología del cambio climático

TIPO DE ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	DESCRIPCIÓN Y COMENTARIOS	REFERENCIAS SELECCIONADAS
Experimentos en condiciones controladas	Las condiciones controladas no son realistas, pero es más fácil estudiar uno o pocos parámetros ambientales debido a la menor variabilidad y a las menores interacciones.	Gullino <i>et al.</i> , 2018.
Experimentos en la estación, en la granja y en condiciones naturales	Las condiciones de campo son realistas, pero los parámetros ambientales son difíciles de controlar debido a la variabilidad y a las complejas interacciones.	Raderschall <i>et al.</i> , 2021; Torresen <i>et al.</i> , 2020.
Estudios a lo largo de un gradiente de elevación desde sitios de baja a alta elevación	Los efectos de los cambios en la temperatura y las precipitaciones pueden estudiarse en una distancia corta, con la misma duración del día (por ejemplo, se pueden comparar las características de una sola especie).	Betz, Srisuka y Puthz, 2020.
Estudios a lo largo de un gradiente latitudinal	Es posible realizar estudios a lo largo de un gradiente climático, desde el templado hasta el tropical, con cambios a larga distancia en la temperatura y la precipitación, pero la duración del día puede ser diferente en distintos lugares (por ejemplo, se pueden comparar las características de una sola especie, o la biodiversidad de las especies en general, en distintos climas).	Scalone <i>et al.</i> , 2016.
Estudios a lo largo de un gradiente latitudinal	Implica la búsqueda de patrones generales en las respuestas de taxones específicos a las variaciones de los factores climáticos. Debe haber un número suficiente de resultados publicados para sacar conclusiones significativas.	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
Seguimiento de datos, conjuntos de datos a largo plazo de diferentes parámetros	Implica observaciones de campo a largo plazo para estudiar los efectos ya evidentes debido al calentamiento del clima en las últimas décadas. Se necesitan registros meteorológicos a largo plazo y, si están disponibles, otros conjuntos de datos a largo plazo para buscar otras posibles razones de los cambios observados (especialmente en los sistemas gestionados).	Huang y Hao, 2020; Palmer <i>et al.</i> , 2017.
Opinión de los expertos	Se pueden utilizar las experiencias de muchos años y los conocimientos de los expertos. El ciclo de vida completo de una especie de plaga puede considerarse en teoría; pero este enfoque es algo subjetivo.	Karkanis <i>et al.</i> , 2018.
Enfoque de "correspondencia climática"	Se encuentra un clima actual análogo al clima futuro para un área de interés, y se estudia la dinámica de la plaga en ese lugar para obtener una apreciación de la dinámica comparativa (por ejemplo, el modelo de adaptación climática dinámica ClimEx). También pueden utilizarse otras herramientas, como MaxEnt, que compara la idoneidad del hábitat de diferentes lugares para la especie de interés.	Biber-Freudenberger <i>et al.</i> , 2016; Sutherst, Maywald y Russell, 2000.
Enfoque de modelización que utiliza uno o varios escenarios o modelos de cambio climático, o conjuntos completos de escenarios o modelos de cambio climático, para simular el riesgo futuro de plagas	Es posible clasificar los escenarios o modelos utilizados de "conservador" a "peor caso", y esto también es posible dentro de un único modelo de cambio climático si se aplican diferentes escenarios de vías de concentración representativas (RCP) (RCP 2,6, RCP 4,5, RCP 6,0, RCP 8,5). Sin embargo, el uso de un escenario específico de cambio climático en un solo modelo climático ya no se considera adecuado, porque no incorpora la variación que es posible. Por ello, a menudo se utilizan conjuntos completos de escenarios o modelos de cambio climático.	Angelotti <i>et al.</i> , 2017; Launay <i>et al.</i> , 2020.

CLIMEX, modelización climática de fenómenos extremos; RCP, vía de concentración representativa.
 Nota: Las referencias se seleccionaron de forma subjetiva, con preferencia por los estudios posteriores al año 2000.
 Fuente: Modificado según Juroszyk y von Tiedemann, 2013a.

Figura 5A



Figura 5B



Cámaras con la parte superior abierta para estudiar los impactos del aumento de la concentración de CO_2 en el aire en Petrolina, Brasil

Figura 6



Fitotrones utilizados para el crecimiento vegetativo en condiciones controladas. Al simular múltiples factores ambientales, permiten estudiar los efectos del cambio climático en las plantas y sus patógenos.

Cuadro 2. Ejemplos de estudios de simulación de riesgo de plagas en los que se vincularon modelos de plagas con escenarios de cambio climático

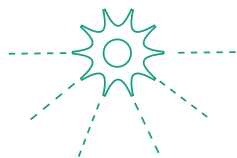
PAÍS O REGIÓN SELECCIONADA	PERÍODO O PERÍODOS DE TIEMPO	CULTIVOS AFECTADOS, ESPECIES DE PLAGAS Y PROYECCIÓN DEL CAMBIO	REFERENCIA SELECCIONADA
INSECTOS			
Suiza	2070–2099	Múltiples cultivos: Se prevé que la chinche marrón (<i>Halyomorpha halys</i>), que tiene una amplia gama de huéspedes potenciales, se expanda a mayores altitudes, produzca más generaciones por año y sea activa más temprano en la primavera.	Stoeckli, Felber y Haye, 2020.
A nivel mundial	2050, 2100	Múltiples cultivos: Se prevé que aumente la superficie apta para el gusano cogollero (<i>Spodoptera frugiperda</i>)	Zacarias, 2020.
A nivel mundial	2050	Tomate: Se estima que varias naciones se enfrentan a un aumento potencial de brotes de araña roja de dos manchas (<i>Tetranychus urticae</i>), mientras que el control biológico por su depredador clave <i>Phytoseiulus persimilis</i> no mejorará.	Litkas <i>et al.</i> , 2019.
Estados Unidos de América, Medio Oeste	2001–2050, 2051–2100	Maíz y soja: Se prevé que la presión de nueve plagas de insectos diferentes aumente en general. Las plagas de insectos se desplazarán hacia el norte, porque las "condiciones climáticas óptimas" estarán más al norte.	Taylor <i>et al.</i> , 2018.
A nivel mundial	2041–2060, 2061–2080	Patata: Se proyecta la expansión del escarabajo de la patata de Colorado (<i>Leptinotarsa decemlineata</i>) hacia las regiones del norte.	Wang <i>et al.</i> , 2017.
África	2041–2060	Múltiples cultivos: Se prevé que la idoneidad del hábitat para <i>Bactrocera dorsalis</i> , <i>Ceratitis cosyra</i> y <i>Tuta absoluta</i> aumente parcialmente en todo el continente.	Biber-Freudenberger <i>et al.</i> , 2016.
Luxemburgo	2021–2050, 2069–2098	Colza: Se prevé que <i>Meligethes aeneus</i> invada los cultivos a principios de año.	Junk, Jonas y Eickermann, 2016.
Escandinavia y partes centrales de Europa	2011–2040, 2071–2100	Árboles forestales, abetos: Se proyecta una mayor frecuencia y duración de los eventos de enjambrazón de finales de verano del escarabajo de la corteza del abeto europeo (<i>Ips typographus</i>). Es posible una segunda generación en el sur de Escandinavia y una tercera en las tierras bajas de Europa central.	Jönsson <i>et al.</i> , 2011.
PATÓGENOS (ENFERMEDADES)			
Francia	2020–2049, 2070–2099	Trigo: Se prevé un aumento del riesgo de roya de la hoja (causada por <i>Puccinia triticae</i>).	Launay <i>et al.</i> , 2020.
Francia	2020–2049, 2070–2099	Albaricoque: Se prevé que el riesgo de tizón de la flor y tizón de la rama (causado por <i>Monilinia laxa</i>) disminuya o aumente, dependiendo del cultivar cultivado (floración temprana o tardía).	Tresson <i>et al.</i> , 2020.
Canadá, Quebec	2041–2070	Soja: Se prevé un aumento del número de generaciones del nematodo del quiste de la soja (<i>Heterodera glycines</i>).	St-Marseille <i>et al.</i> , 2019.
A nivel mundial	2050, 2100	Soja: Se prevé una disminución de la superficie favorable a la roya de la soja (causada por <i>Phakopsora pachyrhizi</i>).	Ramírez-Cabral, Kumar and Shabani, 2019.
Filipinas	2050	Banano: Se prevé que aumente la superficie favorable a la marchitez por <i>Fusarium</i> (causada por <i>Fusarium oxysporum</i>).	Salvacion <i>et al.</i> , 2019.
China, central	2030s, 2050s, 2070s, 2080s	Kiwi: Se prevé un aumento de la superficie favorable al cancro bacteriano (causado por <i>Pseudomonas syringae</i>).	Wang <i>et al.</i> , 2018.
Europa	2070	Pino: Se prevé un aumento del riesgo de la enfermedad del marchitamiento del pino (causada por el nematodo del marchitamiento del pino, <i>Bursaphelenchus xylophilus</i>).	Ikegami y Jenkins, 2018.
Brasil	2011–2040, 2041–2070, 2071–2100	Vid: Se prevé que la superficie favorable al mildiu (causado por <i>Plasmopara viticola</i>) disminuya en todo el Brasil, aunque hay diferencias entre regiones o estados.	Angelotti <i>et al.</i> , 2017.
Italia	2030, 2050, 2080	Vid: Aumento de la importancia del mildiu (<i>Plasmopara viticola</i>), debido a un mayor número de días de primavera con condiciones favorables, con ataques más tempranos y más tratamientos necesarios.	Salinari <i>et al.</i> , 2006.

India	2010–2039, 2040–2069	Arroz: Se prevé que la capacidad de infección del tizón de la hoja (causado por <i>Magnaporthe oryzae</i>) aumente durante la temporada de invierno (diciembre a marzo), mientras que durante la temporada del monzón (julio a octubre) se prevé que permanezca sin cambios o disminuya ligeramente.	Viswanath <i>et al.</i> , 2017.
Alemania, sudoeste	2050, 2100	Remolacha azucarera: Se prevé un aumento del riesgo de mancha foliar por <i>Cercospora</i> (causada por <i>Cercospora beticola</i>).	Kremer <i>et al.</i> , 2016.
MALEZA			
A nivel mundial	2050	Para 32 especies de malas hierbas invasoras, se proyecta que el área adecuada para el crecimiento, en general, disminuya a escala mundial. Sin embargo, en los países europeos, el norte del Brasil, el este de los Estados Unidos de América y el sudeste de Australia, se prevé que la superficie adecuada aumente para la mayoría de estas 32 especies de malas hierbas.	Shabani <i>et al.</i> , 2020.
China	2070–2099	Para seis de un total de ocho especies de malas hierbas invasoras exóticas, se prevé un aumento de la superficie adecuada para su crecimiento.	Wan y Wang, 2019.
A nivel mundial	2041–2060, 2061–2080	Se prevé que el hábitat adecuado de hierba mora espinosa (<i>Solanum rostratum</i>) se amplíe hacia las latitudes circumpolares.	Wan y Wang, 2019.
A nivel mundial	2050	Se prevé un aumento de la superficie adecuada para lantana (<i>Lantana camara</i>), aunque habrá una variación considerable entre continentes.	Qin <i>et al.</i> , 2016.
A nivel mundial	2100	Se prevé que la superficie apta para raygrás rígido (<i>Lolium rigidum</i>) aumente en América del Norte, América del Sur, Europa y Asia, mientras que en África y Oceanía se prevé que disminuya.	Castellanos-Frias. <i>et al.</i> , 2016.
Estados Unidos de América, Colorado	2050	Se prevé que la superficie apta para <i>Bromus tectorum</i> aumente.	West <i>et al.</i> , 2015.
Europa	2010–2030, 2050–2070	Se prevé que la superficie adecuada para ambrosía común (<i>Ambrosia artemisiifolia</i>) se amplíe hacia el norte y que siga limitada por el estrés de la sequía en el sur de Europa.	Storkey <i>et al.</i> , 2014.
Argentina, central	2020–2040	Se proyecta que el rendimiento de pasto Johnson (<i>Sorghum halepense</i>) mejore.	Leguizamon y Acciaresi, 2014.

Nota: Los estudios listados fueron seleccionados subjetivamente, con preferencia por las publicaciones recientes. En la bibliografía se pueden encontrar más cuadros resumen con resultados de simulación: patógenos o enfermedades (por ejemplo, Juroszek y von Tiedemann, 2015; Miedaner y Juroszek, 2021a), plagas de insectos (por ejemplo, Choudhary, Kumari y Fand, 2019), malas hierbas (por ejemplo, Clements, DiTommaso y Hyvönen, 2014).

Efectos del cambio climático en las plagas de las plantas





Esta sección del informe explora los efectos potenciales del cambio climático sobre las plagas y, por tanto, sobre la sanidad vegetal, primero en términos de tendencias generales y luego revisando los efectos sobre una selección de especies individuales o grupos de especies, proporcionados como estudios de caso.

Simulación de futuros riesgos de plagas

Los estudios de simulación para determinar los futuros riesgos de plagas en escenarios de cambio climático han empleado en su mayoría modelos de distribución de especies, modelos de dinámica de poblaciones o híbridos de ambos (cuadro 2). Los factores climáticos considerados en estos estudios incluyen la temperatura, la precipitación y la humedad, pero el CO₂ elevado no suele tenerse en cuenta (Eastburn, McElrone y Bilgin, 2011; Juroszek y von Tiedemann, 2015). Los efectos son probablemente más fáciles de predecir para aquellas especies de plagas que se ven afectadas principalmente por la temperatura. La predicción es, en cambio, más difícil para las plagas cuya reproducción y dispersión están fuertemente relacionadas con la disponibilidad de agua, el viento y el manejo de los cultivos. Esto también es cierto para las plagas que se ven fuertemente afectadas por las interacciones con otros organismos, como los vectores de patógenos (Trebicki y Finlay, 2019), a menos que sus interacciones estén bien estudiadas (Juroszek y von Tiedemann, 2013a) y, por tanto, sean predecibles (véase el estudio de caso de *Xylella fastidiosa*).

El resultado de las simulaciones depende de los materiales y métodos utilizados, incluidos el modelo climático global empleado, los escenarios de emisiones, el modelo climático regional y el modelo específico de la plaga, junto con los parámetros precisos utilizados en la simulación (Miedaner y Juroszek, 2021a). Todos ellos contribuyen al resultado de las proyecciones de riesgo de plagas (Gouache *et al.*, 2013; Juroszek y von Tiedemann, 2013b; Lounay *et al.*, 2020) y deben tenerse en cuenta a la hora de leer e interpretar los resultados de los estudios de simulación, como los enumerados en el cuadro 2. Además, hay que señalar que el efecto del cambio climático sobre el riesgo de plagas puede variar en un país (por ejemplo, tierras bajas vs montañas, norte vs sur, verano vs invierno, estación cálida y húmeda vs fría y seca), como han destacado recientemente Miedaner y Juroszek (2021a).

Según Juroszek y von Tiedemann (2015), en general, el cambio proyectado (aumento o disminución) del riesgo de plagas será más evidente a finales del siglo ^{xxi} que a principios de siglo, si el aumento de la temperatura es el principal impulsor de los resultados. Esto refleja el hecho de que se prevé que el calentamiento global sea mayor a finales que a mediados y principios del siglo ^{xxi} (por ejemplo, 3 °C vs a 2 °C vs 1 °C de aumento de la temperatura global, respectivamente).

Los cambios previstos en el riesgo de plagas varían según la ubicación geográfica (Sidorova y Voronina, 2020). Por ejemplo, en un primer estudio de simulación del riesgo de plagas en el futuro, impulsado por un escenario de cambio climático, se predijo un aumento del riesgo de la enfermedad del añublo del arroz, causada por el hongo *Magnaporthe grisea*, para las regiones frescas y subtropicales productoras de arroz, como el Japón, mientras que en los trópicos húmedos y cálidos, como Filipinas, se predijo que el riesgo de añublo del arroz disminuiría en el futuro (Luo *et al.*, 1995, 1998). En cuanto a las plagas de insectos, las proyecciones de Kocmánková *et al.* (2011) sugieren que el barrenador europeo del maíz (*Ostrinia*

nubilalis) y el escarabajo de la papa o Colorado (*Leptinotarsa decemlineata*) probablemente aumentarán su área de distribución en muchas partes de Europa, colonizarán mayores altitudes y aumentarán su número anual de generaciones, como resultado de un aumento de la temperatura previsto. Por otro lado, el calentamiento del clima puede provocar aumentos de temperatura cercanos al límite superior letal de algunas especies de insectos, especialmente durante el verano en climas templados (Bale y Hayward, 2010; Harvey *et al.*, 2020) y en los trópicos, ya muy cálidos (Deutsch *et al.*, 2008). Esta variación del impacto con la ubicación geográfica significa que las generalizaciones deben tratarse con extrema precaución y los investigadores deben ser muy cuidadosos al extrapolar sus resultados (Juroszek *et al.*, 2020).

Recientemente, Seidl *et al.* (2017) publicaron un análisis exhaustivo y global de los resultados disponibles (más de 1 600 observaciones individuales) y concluyeron que alrededor de dos tercios de todas las observaciones muestran que el riesgo de factores de estrés abióticos (por ejemplo, incendios, sequías) y bióticos (por ejemplo, plagas de insectos, patógenos) aumentará en la silvicultura en todo el mundo. Las condiciones más cálidas y secas favorecen las perturbaciones de los insectos, mientras que las condiciones más cálidas y húmedas favorecen las perturbaciones de los patógenos. Se espera la misma tendencia para muchas enfermedades de los cultivos (por ejemplo, Juroszek y von Tiedemann, 2015), plagas de insectos (por ejemplo, Choudhary, Kumari y Fand, 2019) y malas hierbas (por ejemplo, Clements, DiTommaso y Hyvönen, 2014), con un aumento del riesgo de plagas en la mayoría de los casos. Por lo tanto, se necesitan medidas preventivas, de mitigación y de adaptación en el futuro para reducir los aumentos previstos del riesgo de plagas en la agricultura, la horticultura, la silvicultura, así como en las zonas urbanas y los parques nacionales (Edmonds, 2013; Pautasso, 2013). Actualmente hay un debate abierto entre los movimientos conservacionistas y los servicios fitosanitarios sobre cómo tratar las infestaciones de plagas en los parques nacionales y las áreas protegidas, y si se debe intervenir en ecosistemas actualmente no gestionados.

Efectos sobre las especies plaga

Los efectos del cambio climático sobre las especies plaga son complejos e incluyen efectos directos e indirectos así como sus posibles interacciones. En un lugar determinado, un cambio en el calentamiento y otras condiciones climáticas y atmosféricas puede tener efectos directos o indirectos sobre las plagas de insectos, los patógenos y las malas hierbas. Los posibles efectos directos e indirectos sobre las plagas incluyen: cambios en su distribución geográfica, como la expansión o el retroceso del área de distribución, o el aumento del riesgo de introducción de plagas; cambios en la fenología estacional, como el momento de la actividad primaveral o la sincronización de los eventos del ciclo vital de las plagas con sus plantas hospedadoras y enemigos naturales; y cambios en aspectos de la dinámica de la población, como la hibernación y la supervivencia, las tasas de crecimiento de la población o el número de generaciones de las especies policíclicas (Juroszek y von Tiedemann, 2013a; Richerzhagen *et al.*, 2011).

En general, todas las fases importantes del ciclo vital de las plagas de insectos, los patógenos y las malas hierbas (“supervivencia”, “reproducción” y “dispersión”) están influidas más o menos **directamente** por la temperatura, la humedad, la calidad o cantidad de luz, el viento o cualquier combinación de estos factores. Los procesos fisiológicos de la mayoría de las especies de plagas son especialmente sensibles a



la temperatura (Juroszek *et al.*, 2020). Por ejemplo, los virus de las plantas y sus insectos vectores pueden verse especialmente favorecidos por las altas temperaturas hasta que se alcanza su umbral superior de temperatura (Trebicki, 2020). En un experimento de campo de tres años con maíz bajo condiciones climáticas tropicales, Reynaud *et al.* (2009) mostraron que la incidencia de la enfermedad de las estrías del maíz (causada por el *virus de las estrías del maíz*) y la abundancia de su vector, la chicharrita *Cicadulina mbila*, estaban estrechamente asociadas a la temperatura, aumentando ambas rápidamente por encima de los 24 °C, pero que las temperaturas de 30 °C y superiores podrían ser perjudiciales para la chicharrita y la transmisión del virus relacionado (Juroszek y von Tiedemann, 2013c). Por tanto, cabe esperar que el calentamiento global favorezca a muchos insectos vectores y a los virus que transmiten, al menos dentro de un determinado rango de temperaturas.

Los efectos **indirectos** se producen a través de las plantas hospedadoras o de las adaptaciones a la gestión de los cultivos provocadas por el cambio climático (Juroszek *et al.*, 2020). Las temperaturas medias del aire más cálidas, especialmente a principios de la primavera en condiciones climáticas templadas, pueden dar lugar a que las fases del ciclo de vida en la planta huésped se produzcan antes en la temporada (Racca *et al.*, 2015). Esto puede afectar a los patógenos que infectan al hospedador durante una determinada fase del ciclo vital, por ejemplo, los patógenos del trigo, como las especies de *Fusarium*, que infectan al trigo durante la floración (Madgwick *et al.*, 2011; Miedaner y Juroszek, 2021a). Las adaptaciones de la gestión de los cultivos impulsadas por el cambio climático incluyen la introducción del riego, el cese del laboreo profundo del suelo, el cambio de las fechas de siembra y el cultivo de más de una cosecha al año. La irrigación del maíz en el sureste de África, por ejemplo, ha permitido cultivar el maíz durante todo el año, pero también ha provocado un aumento de las poblaciones de insectos vectores, lo que ha culminado en un aumento de la presión del virus de las estrías del maíz en los cultivos de regadío y, posteriormente, también en los de secano (Shaw y Osborne, 2011).

Las interacciones entre los factores que afectan a las plagas pueden ser complejas. Por ejemplo, los experimentos realizados en condiciones reales de campo en las instalaciones de FACE han demostrado la complejidad de las interacciones entre el crecimiento de las malas hierbas y la temperatura, el agua y el CO₂ bajo condiciones ambientales modificadas (Williams *et al.*, 2007), mientras que otros experimentos han demostrado que el estrés hídrico puede alterar las relaciones competitivas entre las malas hierbas y las plantas de cultivo en cuanto a su respuesta a la concentración elevada de CO₂ (Valerio *et al.*, 2011). En condiciones de buen riego, el crecimiento del cultivo de tomate C₃ (*Lycopersicon esculentum*) se beneficia más del CO₂ elevado en relación con la maleza C₄ *Amaranthus retroflexus*, mientras que bajo estrés hídrico *A. retroflexus* se beneficia más del CO₂ elevado en comparación con el tomate. Experimentos como estos (Valerio *et al.*, 2011; Williams *et al.*, 2007), realizados en condiciones controladas y de campo, sugieren que las respuestas de las plantas al CO₂ elevado no son predecibles en base únicamente al tipo de vía fotosintética (C₃ vs C₄), ya que existen complicadas interacciones con factores como la disponibilidad de agua y la temperatura, entre otros. Estas conclusiones concuerdan con un metaanálisis recientemente publicado (Vilà *et al.*, 2021), realizado especialmente para entender los impactos combinados de las malas hierbas y el cambio climático en los cultivos.

Estudios de casos de especies plagas individuales

Algunas plagas ya han ampliado su zona de acogida o distribución, al menos en parte, debido al cambio climático. A continuación se presentan de manera resumida algunos ejemplos de estas plagas, que han sido seleccionadas en función de su importancia en diferentes zonas geográficas. En la Tabla 3 se enumeran ejemplos de algunos de los efectos que el cambio climático tiene sobre las plagas de las plantas (insectos, patógenos y malas hierbas) en diferentes zonas climáticas.

Insectos

1. Barrenador esmeralda del fresno (*Agrilus planipennis*) (Asia, Europa, América del Norte)

El barrenador esmeralda del fresno, *Agrilus planipennis*, es un escarabajo que se alimenta del floema y que infesta los fresnos (*Fraxinus* spp.) (OEPP, 2021b). Los escarabajos adultos se alimentan del follaje del fresno, pero es la extensa alimentación de las larvas en el floema y el cambium lo que interrumpe la translocación en el árbol, ceñido (es decir, eliminando un anillo de corteza alrededor de toda la circunferencia de la rama del tronco) y provocando su muerte.

Originario del noreste de China, la península de Corea y el este de la Federación Rusa, el barrenador esmeralda del fresno se ha extendido a otras partes de Asia, América del Norte (Canadá y Estados Unidos de América.) (Haack *et al.*, 2002), y Europa (p.ej, las partes occidental y meridional de la Federación Rusa y Ucrania) (CABI, 2021b). Probablemente se introdujo en América del Norte en 2002, por ejemplo a través de material de embalaje de madera, y los estudios dendrológicos indican que llegó al continente aproximadamente una década antes de su detección. La posterior propagación del escarabajo a varias partes de los Estados Unidos de América y el Canadá fue favorecida seguramente por el desplazamiento de viveros, troncos y leña infestados (Herms y McCullough, 2014; Ramsfield *et al.*, 2016).

Los impactos del escarabajo son graves. Aukema *et al.* (2011) lo consideraron el insecto forestal invasor más destructivo y costoso de los Estados Unidos de América, con proyecciones de pérdidas económicas por este insecto hasta 2020 que superan los 12 500 millones de dólares. La invasión de este escarabajo también ha tenido importantes implicaciones para la biodiversidad en las zonas afectadas, ya que los fresnos proporcionan alimento, refugio y hábitat a muchas especies. Además, se ha advertido que la invasión del barrenador esmeralda del fresno y la consiguiente pérdida de árboles tiene posibles implicaciones para la salud humana (Donovan *et al.*, 2013). Las estrategias de gestión se han centrado en la contención, por ejemplo mediante el uso de zonas de cuarentena, y en la reducción de las densidades de población, por ejemplo mediante la introducción de agentes de control biológico. Inicialmente se intentó la erradicación, que posteriormente se abandonó (Herms y McCullough, 2014).

La distribución de los fresnos es la principal limitación del área de distribución del barrenador esmeralda del fresno, pero se cree que el clima también desempeña un papel importante. En su área de distribución nativa, el barrenador esmeralda del fresno solo se da en una fracción del área de distribución del fresno, pero la modelización realizada por Liang y Fei (2014) ha proyectado que el cambio climático daría lugar a una distribución más septentrional del escarabajo en Norteamérica, con el consiguiente riesgo duradero para el fresno en esas zonas. Sin embargo, se espera que la invasión hacia el sur del barrenador esmeralda del fresno en Norteamérica sea limitada en un escenario de cambio climático cálido, ya que



el escarabajo requiere una fuerte estacionalidad con una larga temporada de invierno. La investigación de Duan *et al.* (2020) sobre la supervivencia durante el invierno de varias especies de parasitoides larvarios introducidos del barrenador esmeralda del fresno después de un evento climático extremo (bajas temperaturas invernales) también ha demostrado que los eventos climáticos extremos asociados al cambio climático podrían reducir la eficacia del control biológico del escarabajo.

2. Mosca de la fruta (*Tephritidae*) (mundial)

Los tefrítidos son una familia diversa de insectos, con más de 4 000 especies descritas. La mayoría de las especies se alimentan de plantas y varias de ellas pueden causar importantes daños económicos, especialmente cuando sus larvas se desarrollan en frutas de gran valor comercial. La familia contiene varias especies invasoras, como la *Bactrocera oleae* (Figura 7 y Gutierrez *et al.* 2009), que se alimenta únicamente de olivos (y unos pocos parientes silvestres), la *Bactrocera dorsalis*, que se alimenta de varias docenas de especies de plantas frutales, y la mosca mediterránea de la fruta, *Ceratitis capitata*, que se alimenta de un número moderado de cultivos arbóreos.

Los tefrítidos han podido expandirse geográficamente desde su distribución original para colonizar tanto zonas vecinas como nuevas regiones debido a la expansión del cultivo de sus hospedadores, al comercio internacional y a que el cambio climático ha permitido su supervivencia y reproducción en invierno en hábitats que de otro modo serían inadecuados para la especie. *Bactrocera oleae* está presente en África, Europa y Asia y ha invadido California y México más recientemente (CABI, 2021c). Sin embargo, Godefroid *et al.* (2015) concluyeron que la especie puede establecerse no solo en las regiones templadas de clima mediterráneo, sino también en los climas más fríos de las latitudes septentrionales de Europa, donde los olivos aún no se cultivan.

Bactrocera dorsalis es una plaga que suscita gran preocupación en todo el sudeste asiático y más al oeste hasta Pakistán y al norte hasta el sur de China y Nepal; se ha notificado su presencia en otras zonas, incluida la mayor parte de África, el este de Estados Unidos de América y varias islas del Pacífico (OEPP, 2021c). Debido a su amplio rango de hospedaje, esta plaga está siendo interceptada con frecuencia en los mercados internacionales. Debido a que el rango climático de *B. dorsalis* es principalmente tropical y subtropical y se considera que tiene requerimientos bastante complejos, el riesgo de pérdidas económicas directas por una incursión en zonas templadas es bajo, pero la modificación del clima por el calentamiento global podría permitir un rápido aumento de las poblaciones de moscas en las estaciones templadas, ya que las moscas pasan el invierno protegidas en las frutas almacenadas en lugares protegidos (OEPP, 2021c). Este es también el caso de la *C. capitata*, que está presente en el sur y el centro de Europa, en la mayor parte de África y Cercano Oriente, en América Central y del Sur y en Australia Occidental, pero puede pasar el invierno en regiones más frías como larva, en frutas almacenadas en lugares cálidos. Puede propagarse a través del comercio internacional de naranjas, mandarinas y limones (Fedchock *et al.*, 2006).

3. Picudo rojo de las palmeras (*Rhynchophorus ferrugineus*) (Cercano Oriente, África, Europa)

El picudo rojo de las palmeras, *Rhynchophorus ferrugineus*, es una de las plagas de insectos más perjudiciales para la economía de las palmeras. Originario del sudeste asiático y de Melanesia, las larvas de este picudo se alimentan en el punto de crecimiento apical del árbol, causando grandes daños en el tejido vegetal, debilitando la estructura de la planta y, en muchos casos, provocando la muerte del árbol. En la región del Golfo del Cercano Oriente, las pérdidas anuales debidas a la muerte y eliminación de palmeras gravemente infestadas

por el picudo rojo se han estimado entre 5,2 y 25,9 millones de dólares estadounidenses con un 1% y un 5% de infestación, respectivamente (El-Sabea, Faleiro y Abo-El-Saad, 2009). Otra estimación ha considerado que las pérdidas anuales debidas al picudo rojo son de 15 millones de USD (Al-Ayedh, 2017).

El picudo rojo infesta varias especies de palmeras, entre ellas el cocotero y la palmera datilera (El-Mergawy y Al-Ajlan, 2011; FAO, 2020). Se detectó por primera vez en palmeras datileras en el Cercano Oriente a mediados de la década de 1980, y posteriormente se extendió a otros países del Cercano Oriente, así como también a África y Europa. En 2010 se detectó en California, en los Estados Unidos, donde se declaró erradicada en 2015. Su distribución mundial se ha visto probablemente favorecida por el movimiento de vástagos de palmeras como material de plantación. Las estrategias de gestión incluyen el uso de diversas medidas culturales y fitosanitarias, como la eliminación de los árboles infestados, la aplicación de insecticidas y de nematodos patógenos para los insectos, y el uso de trampas de feromonas (FAO, 2020; Ge *et al.*, 2015).

La distribución del picudo rojo puede ampliarse debido al cambio climático. Ge *et al.* (2015) predijeron que en China el número de zonas altamente favorables a esta plaga aumentaría con el cambio climático, lo que provocaría la expansión del insecto hacia el norte de China. Entre las especies de *Rhynchophorus*, el picudo rojo de las palmeras es la única que ha ampliado significativamente su área de distribución geográfica desde su hogar original en el sur y el sureste de Asia (Wattanapongsiri, 1966). Se ha informado de su presencia en 45 países y los modelos de nicho ecológico predicen que podría ampliar su área de distribución aún más (Fiaboe *et al.*, 2012). El picudo rojo sigue considerándose el mayor desafío para los cultivadores de palmeras en Cercano Oriente y, a pesar de todos los medios de control integrado, sus efectos perjudiciales siguen causando grandes pérdidas económicas.

4. Gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda*) (América, África, Asia)

El gusano cogollero del maíz (*Spodoptera frugiperda*) es una polilla perteneciente a la familia Noctuidae (Figura 7). Tiene un rango de hospedaje de cientos de especies de plantas, infligiendo severos daños en las gramíneas —particularmente el maíz y el sorgo, que son los hospederos preferidos— junto con otros cultivos, como el arroz, el algodón y la soja, preferidos por diferentes cepas de especies. Es nativa de las zonas tropicales y subtropicales de América y durante el verano migra a las regiones americanas templadas del sur y del norte. La plaga se notificó por primera vez en África occidental en 2016 (Goergen *et al.* 2016) y luego en toda el África subsahariana y Egipto en 2019. En 2018, se notificó en la India, extendiéndose rápidamente por todo el sur y el este de Asia, incluyendo China, República de Corea, Japón y Pakistán. También se ha notificado en Bangladesh, Indonesia, Myanmar, Sri Lanka, Tailandia, Filipinas, Vietnam y Yemen (OEPP, 2020a). En 2020, el gusano cogollero se detectó por primera vez en el maíz en Jordania y los Emiratos Árabes Unidos (Secretaría de la CIPF, 2020a; 2020b) y en Israel (OEPP, 2020b). También se ha extendido por el continente australiano (Secretaría de la CIPF, 2021).

El gusano cogollero está adaptado a climas cálidos y no puede entrar en diapausa, y su distribución geográfica depende estrechamente de las condiciones climáticas. Los adultos pueden viajar hasta varios kilómetros en una sola noche y las migraciones estacionales pueden llegar a Canadá desde el sur de los Estados Unidos de América. Ramírez-Cabral, Kumar y Shabani (2017) han destacado la expansión de su área de distribución geográfica en climas más cálidos debido a su adaptabilidad a diferentes ambientes, su alta capacidad de dispersión, la amplia gama de potenciales hospederos y el intenso comercio internacional de productos básicos atacados por las larvas o pupas de la polilla. Estos autores, además, han previsto una reducción o incluso una desaparición parcial de la especie en el hemisferio



sur del continente americano, debido a las condiciones más cálidas y secas que se esperan allí a mediados o finales de este siglo en el norte del subcontinente. En la Unión Europea, algunas zonas cálidas de España, Italia y Grecia podrían ofrecer condiciones climáticas adecuadas para el establecimiento de la especie, principalmente a partir de poblaciones establecidas en el norte de África (Jeger *et al.*, 2018).

5. Langosta del desierto (*Schistocerca gregaria*) (África, Asia occidental y meridional)

La langosta del desierto (*Schistocerca gregaria*) se encuentra principalmente en África, a través de Arabia y Asia occidental, extendiéndose a zonas del sur de Asia (FAO, 2021a). Se ha registrado ocasionalmente en el suroeste de Europa. Forma enjambres y se alimenta vorazmente de cultivos clave como el maíz y el sorgo, pastos y cualquier vegetación verde que se cruce en su camino, afectando así significativamente a los pequeños agricultores y pastores (Kimathi *et al.*, 2020).

La langosta del desierto muestra cambios periódicos en su forma corporal, y puede mutar a lo largo de las generaciones en respuesta a las condiciones ambientales, y pasar de una forma solitaria, altamente fecunda y no migratoria, a una fase gregaria y migratoria en la que puede recorrer largas distancias, extendiéndose finalmente a nuevas zonas. En general, la langosta del desierto se reproduce extensamente en zonas semiáridas, extendiéndose desde el oeste de África, pasando por Cercano Oriente, hasta el suroeste de Asia, amenazando el sustento de la población en más de 65 países. Sin embargo, también existe una subespecie mucho menos conocida, *S. gregaria flaviventris*, que ocupa un área limitada en el sur de África, y debería investigarse el potencial de esta subespecie para suponer una amenaza en el futuro (Meynard *et al.*, 2017).

Se han registrado grandes brotes de langostas del desierto a lo largo de muchos siglos, y la FAO mantiene una base de datos de estudios de seguimiento a largo plazo y a gran escala sobre las zonas afectadas. La identificación de los posibles lugares de cría de la plaga es esencial si se quieren llevar a cabo medidas preventivas rentables y oportunas antes de que la plaga inflija daños significativos (Kimathi *et al.*, 2020). Desde la década de 1960, los brotes han sido menos frecuentes, pero en 2019-2020 se observó una cría de langostas sin precedentes en Eritrea, Somalia y Yemen, debido a las lluvias inusualmente intensas en el Cuerno de África. La estrategia actual para gestionar las nubes de langostas es la fumigación aérea con plaguicidas químicos, que tiene un alto impacto negativo en los seres humanos, el ganado, el medio ambiente y la biodiversidad.

El comportamiento, la ecología y la fisiología de la langosta del desierto cambia en respuesta a algunas condiciones climáticas. Es difícil atribuir un solo evento al cambio climático, pero los cambios climáticos, como el aumento de la temperatura y las precipitaciones sobre las zonas desérticas, y los fuertes vientos asociados a los ciclones tropicales, proporcionan un nuevo entorno favorable para la cría, el desarrollo y la migración de las plagas. Esto sugiere que el calentamiento global ha desempeñado un papel en la creación de las condiciones necesarias para el desarrollo, el brote y la supervivencia de la langosta. Pero el impacto del cambio climático es complejo, por lo que la Comisión de la FAO para la Lucha contra la Langosta del Desierto en el suroeste de Asia (FAO, 2021a) ha destacado la necesidad de la cooperación internacional entre los países afectados para hacer frente a la amenaza de la langosta. El lugar donde volará a continuación depende de la dirección del viento, la velocidad y otros parámetros meteorológicos. En consecuencia, el cambio climático puede tener un impacto en las futuras rutas migratorias de la langosta del desierto. Sin embargo, la predicción del riesgo bajo diferentes escenarios de cambio climático puede necesitar diferenciar entre diferentes subespecies, porque cada una de ellas puede tener diferentes requisitos de nicho.

Cuadro 3. Ejemplos de algunos efectos probables del cambio climático sobre las plagas de las plantas (insectos, patógenos y malas hierbas) en diferentes zonas climáticas

ZONAS CLIMÁTICAS	EFFECTOS PROBABLES DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL RIESGO FUTURO DE PLAGAS (PRINCIPALMENTE EN 2050-2100)	REFERENCIAS
Ártica	Mayor riesgo de plagas en la tundra	Revich, Tokarevich y Parkinson, 2012.
Boreal	Mayor riesgo de plagas de insectos y enfermedades de las plantas en los bosques boreales	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
Templada	Mayor riesgo de plagas de insectos en la agricultura y la silvicultura	Grünig <i>et al.</i> , 2020.
	Mayor riesgo de plagas de insectos y enfermedades de las plantas en los bosques	Seidl <i>et al.</i> , 2017.
	Mayor riesgo de enfermedades en la agricultura y la horticultura (basado principalmente en estudios de Europa occidental)	Juroszek y von Tiedemann, 2015; Miedaner y Juroszek, 2021a.
	Desplazamiento a menudo hacia el polo del riesgo de plagas de insectos y patógenos en diferentes ecosistemas gestionados y no gestionados	Bebber, Ramotowski y Gurr, 2013.
	A menudo, expansión del área de distribución de importantes plagas de insectos en la agricultura y la horticultura	Choudhary, Kumari y Fand, 2019.
	Más riesgo de aumento de las malas hierbas en diferentes ecosistemas gestionados y no gestionados	Clements, DiTommaso y Hyvönen, 2014.
Subtropical	Saturación creciente del riesgo de plagas de insectos en la agricultura y la silvicultura en el sur de Europa	Grünig <i>et al.</i> , 2020.
	Aumento del riesgo de enfermedades en la agricultura y la horticultura	Gullino <i>et al.</i> , 2018.
	A menudo, expansión del área de distribución de importantes plagas de insectos en la agricultura y la horticultura	Choudhary, Kumari y Fand, 2019.
Tropical	Los insectos se enfrentarán a menudo a condiciones de temperatura supraóptimas en el futuro, lo que presumiblemente dará lugar a la disminución del riesgo de plagas de insectos	Deutsch <i>et al.</i> , 2008.
	Más riesgo de enfermedad decreciente en la agricultura y la horticultura (basado en estudios de simulación brasileños); sin embargo, también más riesgo de enfermedad creciente (basado tanto en estudios de simulación como en opiniones de expertos) (por ejemplo, debido a resultados dependientes de la ubicación)	Angelotti <i>et al.</i> , 2017; Ghini <i>et al.</i> , 2011; Juroszek y von Tiedemann, 2015.

Notes: Derivados de referencias (ejemplos) que analizaron o resumieron muchos, o al menos varios, resultados dentro de una disciplina o entre disciplinas. La mayoría de los resultados están relacionados con el hemisferio norte, especialmente la zona templada. Sin embargo, en la India ya se ha observado un aumento de los riesgos de plagas de insectos, pero sin distinguir en qué zonas climáticas (por ejemplo, Rathee y Dalal, 2018).

Figura 7

A



B



Spodoptera frugiperda, gusano cogollero (Lepidoptera: Noctuidae)
a. Espiga de maíz dañada por las larvas; b. larva y daños en el maíz en fase de crecimiento.

Fuente: OEPP (2020b). Cortesía de B.R. Wiseman, USDA/ARS, Tifton (Estados Unidos de América)

Patógenos de las plantas

6. Roya del café (*Hemileia vastatrix*) (África, Asia, América Latina)

La roya del café, causada por *Hemileia vastatrix*, es uno de los principales factores que limitan el rendimiento del café arábigo en todo el mundo. En los últimos años, los brotes tempranos y muy agresivos de la enfermedad han causado graves pérdidas (hasta un 50% y un 60% de pérdidas de rendimiento) en algunos países de América Latina, como Colombia y México.

El clima parece desempeñar un papel en la prevalencia de la enfermedad. Uno de los factores que favoreció la aparición de las epidemias de roya en Centroamérica fue la reducción de la amplitud térmica diaria, disminuyendo el periodo de latencia de la enfermedad (Avelino *et al.*, 2015). La reducción del periodo de latencia favorece el rápido aumento de la población del patógeno. Del mismo modo, el periodo de incubación del patógeno puede reducirse con el calentamiento global. El análisis de Ghini *et al.* (2011) sobre futuros escenarios de cambio climático en el Brasil indicó una tendencia a la reducción del periodo de incubación de *H. vastatrix*, lo que significa que podrían desarrollarse más generaciones de este patógeno dentro de una temporada de cultivo. En consecuencia, el riesgo de epidemias de roya del café podría aumentar en el futuro, a menos que se produzcan cambios en otros factores que mitiguen el riesgo de la enfermedad, como una menor capacidad del patógeno para infectar las plantas de café. Los inviernos más cálidos pueden aumentar la cantidad de inóculo, anticipando la infección del patógeno (Avelino *et al.*, 2015), pero es posible que las temperaturas frías no supongan un problema para el patógeno, teniendo en cuenta que en África el desplazamiento de la producción de café a regiones más frías y de mayor altitud no ha limitado la aparición de la roya del café porque ya estaba extendida (Isarco, 2014) y puede adaptarse a diferentes climas (Avelino *et al.*, 2015). Por lo tanto, la roya del café ha sido, y sigue siendo, uno de los mayores desafíos para la producción mundial de café, y requerirá el desarrollo de nuevas estrategias para garantizar su gestión, sobre todo si el cambio climático afecta a la biología del patógeno en las formas indicadas por estos estudios.

7. Marchitez por *Fusarium* del banano (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*) TR4 (Australia, Mozambique, Colombia, Asia, Cercano Oriente)

El hongo transmitido por el suelo *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense* causa la marchitez por *Fusarium* en el banano. La plantación de 'Cavendish', un cultivar resistente, fue la solución encontrada para la devastación causada por la raza 1 del patógeno (Ploetz, 2005; Stover, 1986). Sin embargo, en 1990 se encontró una nueva cepa de *F. oxysporum*, la raza tropical 4 (TR4), en el este de Asia, partes del sudeste asiático y el norte de Australia, que atacaba a los clones de 'Cavendish' en los trópicos (Ploetz, 2005; Ploetz y Pegg, 2000). Desde 2010, esta raza se ha extendido a países del sur y sureste de Asia (India, República Democrática Popular Lao, Myanmar, Pakistán y Vietnam), Cercano Oriente (Israel, Jordania, Líbano y Omán), África (Mozambique) (Dita *et al.*, 2018) y América del Sur (Colombia) (García-Bastidas *et al.*, 2019). Esta enfermedad es una gran amenaza para los productores de banano 'Cavendish' en todo el mundo, independientemente de si cultivan a gran o pequeña escala (Mostert *et al.*, 2017). Las altas temperaturas, como cuando las temperaturas suben de 24 a 34 °C, y los eventos ambientales extremos, incluidos los ciclones y las tormentas tropicales, pueden aumentar el riesgo de la enfermedad, en particular cuando las plantas de banano 'Cavendish' sufren el anegamiento del suelo (Pegg *et al.*, 2019; Peng, Sivasithamparam y Turner, 1999). Como todavía no hay cultivares de bananos resistentes al TR4 y el control químico del patógeno no es eficaz, las medidas preventivas son la única opción para gestionar el riesgo de la enfermedad de la marchitez



por *Fusarium* (TR4). Estas incluyen, por ejemplo, el uso de material de siembra de banana ‘Cavendish’ libre de la enfermedad, la detección temprana de las plantas enfermas y la destrucción de las plantas enfermas tan pronto como se observen los síntomas de marchitez por *Fusarium* (Pegg *et al.*, 2019).

8. *Xylella fastidiosa* (América, Europa del Sur, Cercano Oriente)

Xylella fastidiosa —una bacteria gramnegativa limitada por el xilema— causa enfermedades en cultivos económicamente importantes, como la vid, los cítricos, el olivo, el almendro, el melocotón y el café, y en plantas ornamentales y forestales (Janse y Obradovic, 2010; Wells *et al.*, 1987). Se informó de su presencia en América del Norte y del Sur y en Asia en la década de 1980 (Cornara *et al.*, 2019). En 2013, se informó de la presencia de *X. fastidiosa* subsp. *pauca* en olivos del sur de Italia, causando graves pérdidas y modificando profundamente el paisaje típico de la zona al destruir olivos centenarios (Saponari *et al.*, 2013). La *X. fastidiosa* es transmitida por numerosas especies de insectos chupadores de savia, incluyendo salivazos y chicharras, principalmente de las familias *Aphrophoridae* y *Cicadellidae* (Almeida *et al.*, 2005; Cornara *et al.*, 2019).

Los modelos de distribución bioclimática de las especies han demostrado que *X. fastidiosa* tiene el potencial de expandirse más allá de su distribución actual y puede llegar a otras zonas de Italia y otros lugares de Europa (Bosso *et al.*, 2016; Godefroid *et al.*, 2018). Hay diferentes subespecies identificadas para esta bacteria, principalmente, *X. fastidiosa* subsp. *multiplex* y *X. fastidiosa* subsp. *pauca*. Según las predicciones de la modelización, la subespecie *multiplex*, y en cierta medida la subespecie *fastidiosa*, representan una amenaza para la mayor parte de Europa, mientras que las zonas climáticamente adecuadas para la subespecie *pauca* se limitan principalmente a los países mediterráneos (Godefroid *et al.*, 2019). Mediante un modelo predictivo de clasificación de riesgos, Frem *et al.* (2020) revelaron recientemente que la cuenca mediterránea, en particular el Líbano, corre el mayor riesgo de establecimiento y propagación de *X. fastidiosa*. Aunque muchos países mediterráneos están actualmente libres de *X. fastidiosa*, en un futuro próximo estarán sujetos a un alto riesgo de entrada y establecimiento de *X. fastidiosa*: Turquía es el país con mayor riesgo, seguido de Grecia, Marruecos y Túnez, que están clasificados en el nivel de riesgo alto. Solo tres países de la región del Cercano Oriente (Bahrein, Libia y Yemen) están sujetos al nivel de riesgo menor en cuanto a la posible entrada, establecimiento y propagación de la bacteria. En particular, el problema no se limita al Mediterráneo. Sobre la base de los síntomas de la enfermedad y de los análisis de laboratorio, se ha encontrado *X. fastidiosa* asociada al chancro de la hoja del almendro y a la enfermedad de Pierce en la vid en varias provincias de la República Islámica de Irán (Amanifar *et al.*, 2014), lo que indica que empezará a extenderse a los países vecinos del Cercano Oriente.

Bosso *et al.* (2016) han predicho que el cambio climático no aumentará aún más el riesgo de *X. fastidiosa* en el futuro en la mayor parte de la región mediterránea, pero la relación que se establece entre “la planta huésped, el vector y la bacteria” también debe tenerse en cuenta a la hora de predecir el riesgo futuro. Afortunadamente, es probable que el rendimiento del vector sufra debido a las condiciones de temperatura supraóptima y humedad subóptima, como han simulado recientemente Godefroid *et al.* (2020).

La gestión de *X. fastidiosa* se basará en el desarrollo de estrategias eficientes para la gestión integrada de plagas, incluyendo mejoras en la detección del patógeno y de los insectos vectores, en las prácticas agrícolas y, por último, pero no menos importante, en tratamientos de cuarentena eficaces para controlar la propagación del patógeno.

9. Oomycetes, incluidas *Phytophthora infestans* y *Plasmopara viticola* (mundial)

El posible desplazamiento de los oomicetos hacia los polos debido al cambio climático supondrá un reto para la protección de las plantas, principalmente en el hemisferio norte (Bebber, Ramotowski y Gurr, 2013). *Phytophthora infestans*, el oomiceto causante del tizón tardío de la patata y el tomate, tiene una gran capacidad de adaptación a las condiciones cambiantes, lo que constituye un factor importante que determina el riesgo de que se produzcan epidemias graves en el futuro. De hecho, varios estudios han sugerido un riesgo creciente de incidencia de *Phytophthora infestans* en varios países (Hannukkala *et al.*, 2007; Pérez *et al.*, 2010; Skelsey *et al.*, 2016; Sparks *et al.*, 2014), lo que requiere el desarrollo de nuevas estrategias para controlar la enfermedad y reducir su impacto en la seguridad alimentaria, como por ejemplo posponer el inicio de la temporada de cultivo de la patata (Skelsey *et al.*, 2016; Wu *et al.*, 2020).

Los estudios realizados en Egipto sobre el impacto del cambio climático en el tizón tardío del tomate y la patata han demostrado cómo el clima invernal más cálido afecta a su incidencia y gestión (Fahim, Hassanein y Mostafa, 2003; Fahim *et al.*, 2011). Estos han indicado que una epidemia de tizón tardío en los tomates que se produzca una o dos semanas antes significaría que se necesitarían de dos a tres pulverizaciones adicionales para lograr un control suficiente de la enfermedad. Por lo tanto, se necesitarían hasta tres pulverizaciones adicionales de fungicidas en cada temporada de cultivo en Egipto durante las próximas décadas (2025-2100). En cuanto al tizón tardío de la patata, causado por el mismo patógeno, la comparación de las condiciones meteorológicas y la aparición de la enfermedad en temporadas de cultivo epidémicas y no epidémicas ha demostrado que las temporadas de invierno húmedas y cálidas promueven las epidemias de tizón tardío de la patata en Egipto. Las condiciones favorables del invierno permiten la acumulación de inóculo del patógeno en los cultivares tempranos en la temporada de crecimiento, lo que lleva a una tendencia a la aparición del tizón en los cultivos de patata plantados más tarde. Por lo tanto, cabe esperar que el cambio climático fomente las epidemias de tizón tardío en el futuro. Sin embargo, es muy necesario seguir evaluando el impacto del cambio climático en las enfermedades de los cultivos en Egipto y otros países de Cercano Oriente (Fahim *et al.*, 2011).

El mildiú de la vid, causado por el oomiceto *Plasmopara viticola*, es otra enfermedad grave, que provoca importantes pérdidas de producción, que van desde el 5% de pérdidas de rendimiento hasta el 30%-40%, en la mayoría de las regiones productoras de uva. En el caso de la producción de vino, el mildiú también afecta a la calidad del mismo. Como muchas de estas regiones tienen un clima templado con temperaturas que no son óptimas para el patógeno, un aumento de la temperatura del aire favorecerá la aparición de la enfermedad. Por lo tanto, los estudios que consideran futuros escenarios de cambio climático han proyectado brotes más tempranos de la enfermedad que requieren más tratamientos para controlarlos (Angelotti *et al.*, 2017; Salinari *et al.*, 2006, 2007). Los estudios a corto plazo realizados en fitotrones también han confirmado un aumento de la gravedad del mildiú de la uva en condiciones de cambio climático simulado (Pugliese, Gullino y Garibaldi, 2010).

10. Hongos productores de micotoxinas (mundial)

En general, se espera que el cambio climático provoque un aumento de la presencia de micotoxinas en los cultivos, pero la complejidad de la flora fúngica asociada a cada cultivo y su interacción con el medio ambiente hace que sea difícil sacar conclusiones sin realizar estudios específicos. No obstante, hay muchos resultados disponibles. Por



ejemplo, el trabajo realizado por Battilani *et al.* (2016) indica que el calentamiento global podría ampliar el límite norte del riesgo de aflatoxinas en el maíz en Europa, y Van der Fels-Klerx, Liu y Battilani (2016) han realizado estimaciones cuantitativas de los impactos del cambio climático en la aparición de micotoxinas. Medina *et al.* (2017) revisaron los impactos del cambio climático en los hongos micotoxigénicos, examinando los impactos de las interacciones triples entre el CO₂ elevado (350-400 vs 650-1200 ppm), los aumentos de temperatura (+2-5 °C) y el estrés por sequía en el crecimiento y producción de micotoxinas por parte de hongos de deterioro clave en cereales y frutos secos, incluyendo especies de *Alternaria*, *Aspergillus*, *Fusarium* y *Penicillium*. El crecimiento de *Aspergillus flavus*, responsable de la producción de aflatoxina B1, no parece verse afectado por los escenarios de cambio climático simulados. Sin embargo, se ha constatado, tanto *in vitro* como *in vivo*, una elevada estimulación de la producción de aflatoxina B1 en el maíz. En cambio, el comportamiento de otras especies de *Aspergillus*, responsables de la contaminación por ocratoxina A de una serie de productos básicos, y de *Fusarium verticillioides*, productor de fumonisinas, indican que algunas especies son más resistentes al cambio climático que otras, especialmente en lo que respecta a la producción de micotoxinas.

Además de los efectos del cambio climático en estos hongos habituales, el cambio climático también podría influir en la producción de micotoxinas de patógenos emergentes, como los aumentos mostrados experimentalmente por Siciliano *et al.* (2017a, 2017b) en las especies *Alternaria* y *Myrothecium*. Asimismo, la aclimatación de los patógenos fúngicos micotoxigénicos a los factores del cambio climático puede dar lugar a un aumento de la enfermedad y quizás de la contaminación por micotoxinas de los cereales básicos, así como de otros cultivos. Por tanto, la gestión de los riesgos de micotoxinas seguirá siendo un gran desafío en el futuro (Juroszek y von Tiedemann, 2013b), ya que el cambio climático podría empeorar la situación (Miedaner y Juroszek, 2021b).

Nematodos

11. Nematodo de la lesión de los cítricos (*Pratylenchus coffeae*) (mundial)

El nematodo de la lesión de los cítricos, *Pratylenchus coffeae*, está ampliamente distribuido en los huertos de cítricos de todo el mundo. Infesta la planta principalmente a través de las raíces alimentadoras, donde las fases móviles de la plaga penetran en el tejido cortical. El tejido vascular permanece intacto hasta que es invadido por otros organismos en una infección secundaria (Duncan, 2009). Se sabe que el nematodo reduce el peso de las raíces de los cítricos hasta la mitad, y la inoculación experimental de árboles jóvenes ha mostrado reducciones del crecimiento que van del 49% al 80%, con una reducción de tres a 20 veces en el número de frutos (O'Bannon y Tomerlin, 1973). Estudios recientes sobre el cambio climático actual en Egipto indican que el aumento de las temperaturas puede agravar los daños causados por el nematodo de la lesión de los cítricos en el sistema radicular de los mismos, ya que la tasa de reproducción del nematodo es mayor cuando las temperaturas del suelo son relativamente altas (26-30 °C) (Abd-Elgawad, 2020). A tales temperaturas, el ciclo de vida se completa en menos de un mes y el patógeno puede alcanzar niveles de densidad tan altos como 10 000 nematodos/g de raíz; el nematodo también puede sobrevivir en las raíces en el suelo durante al menos cuatro meses. Sin embargo, desgraciadamente aún no se dispone de portainjertos comerciales resistentes a este nematodo (Abd-Elgawad, 2020).

12. Nematodo del quiste de la soja (*Heterodera glycines*) (mundial)

El nematodo del quiste de la soja (*Heterodera glycines*) es el patógeno más perjudicial desde el punto de vista económico para la soja (*Glycine max*) en los Estados Unidos de América y el Canadá (Tylka y Marett, 2014). También causa considerables pérdidas de rendimiento en muchos otros países importantes productores de soja, como la Argentina, el Brasil y China. Por lo tanto, su potencial para causar graves pérdidas de rendimiento en todo el mundo es alto.

Es probable que el calentamiento global promueva la expansión hacia el norte (hemisferio norte) y hacia el sur (hemisferio sur) del área de distribución geográfica del nematodo, y que aumente el número de generaciones de nematodos por temporada de cultivo de soja (St. Marseille *et al.*, 2019) hasta que se alcancen condiciones de temperatura supraóptimas para el nematodo.

Para manejar la plaga, las estrategias más importantes son el uso de cultivares resistentes (Shaibu *et al.*, 2020) y la rotación de cultivos (Niblack, 2005). Según Niblack (2005), la rotación incluye al menos tres aspectos diferentes: idealmente, cultivar soja solo una vez cada cinco años en cualquier campo (aunque el beneficio de la rotación de cultivos puede ser menor si hay malezas que pueden actuar como huéspedes alternativos de la plaga); utilizar plantas de cultivo no hospedantes, incluyendo cultivos de cobertura o captura en una amplia rotación de cultivos; y plantar diferentes cultivares de soja resistentes o tolerantes en diferentes años en el mismo campo, con el fin de minimizar el potencial de adaptación de las poblaciones de nematodos.

13. Nematodo del marchitamiento del pino (*Bursaphelenchus xylophilus*) (América del Norte y Asia Oriental)

Según Jones *et al.* (2013), el nematodo del marchitamiento del pino, *B. xylophilus*, es nativo de América del Norte, donde infesta los pinos (especies de *Pinus*) pero no los daña gravemente. Sin embargo, en su entorno no nativo, incluyendo Asia (China, República de Corea, Japón y otros) y Europa (algunas apariciones en Portugal y España), es una plaga grave, que mata a millones de pinos. El nematodo es vectorizado por la fase adulta de los escarabajos *Monochamus*, que vuelan entre los pinos y a grandes distancias. Se espera que la enfermedad del marchitamiento del pino se vea cada vez más favorecida por el calentamiento global porque los escarabajos *Monochamus*, al igual que muchos otros insectos forestales (Seidl *et al.*, 2017), se beneficiarán del aumento de las temperaturas, especialmente en las regiones templadas (Ikegami y Jenkins, 2018). Varias evaluaciones de riesgo realizadas demuestran que con el aumento de las temperaturas en las regiones templadas aumentará la mortalidad de las coníferas.

En la zona mediterránea, que es la más amenazada de Europa, la elevada mortalidad de las coníferas tendría graves consecuencias medioambientales.



Maleza (malas hierbas)

14. Arbusto mariposa (*Buddleja davidii*) (mundial)

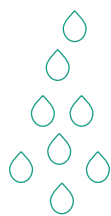
Se prevé que el área de distribución geográfica de la maleza invasora *Buddleja davidii* en Europa, América del Norte y Nueva Zelanda se amplíe a finales del siglo ^{xxi} a medida que se reduzcan las limitaciones de crecimiento debidas al estrés por frío (Kriticos *et al.*, 2011). Por el contrario, se prevé que el área de distribución de esta maleza en África, Asia, América del Sur y Australia se contraiga debido al aumento del estrés térmico. En general, se prevé que la superficie total de tierra con condiciones de crecimiento adecuadas para la maleza disminuya en un 11% de media (8%, 10% o 16%, dependiendo del escenario de cambio climático utilizado). Entre las posibles estrategias de adaptación se encuentra la identificación de las zonas en las que la amenaza de invasión aumenta y disminuye, de modo que los recursos de gestión puedan asignarse adecuadamente para reducir una mayor propagación de la maleza (Kriticos *et al.*, 2011).

15. Hierba de la zarza (*Nassella trichotoma*) (mundial)

En las condiciones climáticas actuales, la hierba *Nassella trichotoma* tiene un considerable potencial de propagación. En el futuro, seguirán existiendo oportunidades de invadir nuevas zonas aptas, pero para finales del siglo ^{XXI} se prevé que la superficie total apta habrá disminuido a nivel mundial entre un 20% y un 27% (dependiendo del escenario de cambio climático que se utilice), sobre todo como resultado de un aumento previsto del estrés térmico (Watt *et al.*, 2011). Entre las posibles estrategias de gestión se encuentran la identificación de las zonas de alto riesgo de invasión, la aplicación de medidas para reducir la dispersión de semillas con ayuda del hombre y la aplicación de medidas de control de las malas hierbas para reducir la dispersión de semillas por el viento (Watt *et al.*, 2011).

Prevención, mitigación y adaptación





Esta sección se centra en la revisión de las medidas que pueden adoptarse para prevenir, mitigar y adaptarse a los posibles efectos del cambio climático en las plagas y, por tanto, en la sanidad vegetal. Dado que existen interdependencias entre los ecosistemas vegetales, se incluye información sobre las especies plaga y otras especies (por ejemplo, beneficiosas o sin efectos económicos conocidos) en la agricultura, la horticultura, la silvicultura y los hábitats no gestionados, por dos razones principales (Juroszek y von Tiedemann, 2013a). En primer lugar, debe establecerse un enfoque interdisciplinario para la gestión de plagas y enfermedades, ya que los conocimientos adquiridos en diferentes disciplinas pueden complementarse entre sí y, por lo tanto, deben intercambiarse y utilizarse entre disciplinas (Jactel *et al.*, 2020; Wilkinson *et al.*, 2011). En segundo lugar, muchas especies de plagas, especialmente las generalistas móviles y las que no se limitan a un determinado hábitat, viven tanto en ecosistemas gestionados como en los no gestionados. Los enfoques interdisciplinarios son particularmente importantes si las especies de plagas cambian su rango de hospedaje al cruzar entre ecosistemas no gestionados y gestionados, lo que resulta en nuevas especies de plagas emergentes en un cultivo o viceversa (Jones, 2016).

Prevención

La forma más eficaz de prevenir y limitar la propagación internacional de las plagas a través del comercio y los movimientos de pasajeros es regular su circulación mediante medidas fitosanitarias, y garantizar la aplicación de las mejores prácticas agrícolas para reducir la incidencia de las plagas a un nivel bajo.

Los aspectos normativos

Según Carvajal-Yepes *et al.* (2019) y Giovani *et al.* (2020), la legislación fitosanitaria de importación es la primera línea de defensa en cualquier prevención de la propagación internacional. El objetivo de un sistema fitosanitario de reglamentación de las importaciones es prevenir o limitar la introducción de plagas reglamentadas con los productos básicos importados y otros artículos y pasajeros reglamentados. Un sistema fitosanitario de reglamentación de las importaciones suele constar de dos componentes: un marco normativo de legislación, reglamentos y procedimientos fitosanitarios; y un servicio oficial, la organización nacional de protección fitosanitaria (ONPF), responsable del funcionamiento o la supervisión del sistema (NIMF 20, 2019). La ONPF tiene una serie de responsabilidades en el funcionamiento de un sistema de reglamentación fitosanitaria de las importaciones, incluyendo ciertas responsabilidades identificadas en el Artículo IV.2 de la CIPF (Secretaría de la CIPF, 1997). En relación con las importaciones, estas incluyen, entre otras, la vigilancia, la inspección, la realización de ARP y la capacitación y desarrollo del personal.

Para que un sistema de regulación fitosanitaria de las importaciones siga siendo eficaz en una situación de cambio climático, será aún más importante contar con una buena capacidad de evaluación de riesgos y emplearla para evaluar posibles escenarios de riesgo, teniendo en cuenta el cambio climático. También será crucial la puesta en marcha de actividades de vigilancia y control que funcionen y estén bien organizadas. Los servicios oficiales tendrán que llevar a cabo encuestas y seguimientos con mayor asiduidad, a fin de detectar con prontitud tanto las nuevas introducciones, (incluidas las que se establecen también a causa

de los parámetros climáticos cambiantes) como los cambios en la situación de la plaga y poder reaccionar con rapidez (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019; Lopian, 2018; Giovani *et al.*, 2020; FANFC/Banco Mundial, 2011).

Análisis de riesgo de plagas

La piedra angular de todo sistema eficaz de reglamentación fitosanitaria de las importaciones es la disponibilidad de un análisis de riesgo de plagas (ARP) en una Organización Nacional de Protección Fitosanitaria (ONPF). El ARP proporciona a la ONPF la justificación de las medidas fitosanitarias para prevenir la introducción de plagas, mediante la evaluación de la evidencia científica que permite determinar si un organismo es una plaga (NIMF 2, 2019). El análisis de riesgo de plagas evalúa la probabilidad de introducción y dispersión de la plaga y la magnitud de sus posibles consecuencias económicas en un área definida, utilizando pruebas biológicas u otras pruebas científicas y económicas. Puede identificar posibles opciones de manejo que puedan reducir el riesgo a un nivel aceptable. Además, puede utilizarse para establecer normas fitosanitarias. El ARP también considera los productos básicos y los riesgos asociados a ellos desde una zona de origen concreta. Se ha elaborado un conjunto de normas específicas de ARP que pueden utilizar los países en diferentes situaciones, bajo los auspicios de la Secretaría de la CIPF³.

Dado que el cambio climático influye en la biología y la epidemiología de las plagas, será necesario intensificar las actividades de ARP a nivel nacional, regional e internacional e incorporar los aspectos del cambio climático en la evaluación de los riesgos fitosanitarios (Lopian, 2018). La introducción y propagación de plagas invasoras graves solo puede evitarse si las ONPF son conscientes de los riesgos, y esta conciencia es principalmente el resultado de un ARP. En este contexto, es importante garantizar que los impactos del cambio climático se reflejen adecuadamente en la metodología y el proceso de ARP para que los evaluadores de riesgos puedan analizar correctamente los riesgos y sugerir medidas de mitigación.

Vigilancia y seguimiento

Una de las actividades más esenciales de las ONPF es la vigilancia y el seguimiento de las plagas, lo que les permite detectar a tiempo las plagas recién introducidas y, en consecuencia, adoptar medidas inmediatas de control y erradicación. Normalmente, cuanto antes se detecte una plaga tras su introducción, mayores serán las posibilidades de que las medidas de erradicación tengan éxito. En consecuencia, uno de los principales componentes de una estrategia para hacer frente a los peligros de la introducción de plagas en un contexto climático cambiante debe ser la vigilancia y el seguimiento (FAO, 2008) para permitir la detección de nuevas introducciones de plagas. Por lo tanto, no es de extrañar que gran parte del trabajo desarrollado bajo los auspicios de la Secretaría de la CIPF se haya centrado en la vigilancia y la detección, incluyendo una NIMF (NIMF 6, 2018) y un manual sobre vigilancia (Secretaría de la CIPF, 2016), junto con un conjunto de protocolos de diagnóstico para detectar e identificar plagas y enfermedades.

3 Pueden consultarse todas las normas internacionales para medidas fitosanitarias adoptadas por la CIPF en <https://www.ippc.int/es/core-activities/standards-setting/ispm/>

La variabilidad climática causada por el cambio climático tendrá efectos considerables en el diseño y la aplicación de programas adecuados de vigilancia y seguimiento llevados a cabo por los servicios oficiales. Según la NIMF 6 (*Vigilancia*), la idoneidad del clima y otras condiciones ecológicas de la zona para la plaga es uno de los factores que pueden determinar los lugares seleccionados para la vigilancia. Sin embargo, todavía hay muchas incógnitas sobre la idoneidad de las condiciones climáticas específicas para cada especie.

Todavía no se conocen bien los efectos del cambio climático en la distribución de las especies, y los efectos del cambio climático en los microclimas y sus especies son actualmente objeto de debate e investigación. Si bien se sugiere que los microclimas pueden funcionar como amortiguadores de la extinción de especies mediante la creación de los llamados “microrefugios” (Suggitt *et al.*, 2018), también se reconoce que los conocimientos que se poseen sobre los efectos del cambio climático en los microclimas y su ecología son aún demasiado insuficientes y que es necesario seguir investigando para estimar con mayor precisión las futuras condiciones climáticas que experimentarán los organismos en los microclimas (Maclean, 2020). Los futuros programas de vigilancia y control deberán tener en cuenta los resultados de estas investigaciones. Las actividades de vigilancia, sin embargo, pueden no limitarse únicamente a las encuestas oficiales. La posibilidad de recurrir a la “ciencia ciudadana” para la detección de las amenazas fitosanitarias emergentes es una herramienta prometedora y debería seguir siendo utilizada.

Cooperación internacional e intercambio de información

El cambio climático desplazará las zonas agroclimáticas (King *et al.*, 2018). Este cambio puede dar lugar a nuevos flujos comerciales, proporcionando productos agrícolas a los países que más sufren su escasez. En los casos en los que la producción de cultivos para especies específicas sufre desplazamientos debido al cambio de las condiciones climáticas, las rutas comerciales para estas especies también se verán modificadas (Lopian, 2018). Además de esto, el IPCC predice que el cambio climático dará lugar a un aumento del comercio agrícola internacional tanto en términos de volumen físico como de valor comercial (IPCC, 2014b).

El desplazamiento de las zonas de producción agrícola, los cambios en los flujos comerciales y el consiguiente aumento de los volúmenes del comercio agrícola internacional, junto con el escaso conocimiento del comportamiento de las plagas en las nuevas condiciones climáticas y de los ecosistemas, dan lugar a una falta de información fiable y científicamente verificable en la que los evaluadores de riesgos y los reguladores puedan basar sus evaluaciones y medidas de mitigación. Esta limitación podría paliarse mediante el establecimiento de una red internacional de intercambio de información fiable dedicada a proporcionar a los servicios oficiales información sobre la aparición de plagas y sus posibles vías de propagación. Sin embargo, aunque la Secretaría de la CIPF tiene un mandato de intercambio de información, las actividades de intercambio de información realizadas son extremadamente limitadas y tienen un carácter más bien pasivo, con la publicación de informes realizados por las partes contratantes. Por lo tanto, aún queda mucho por hacer para mejorar el intercambio internacional de información.

Cuadro 4. Ejemplos de algunas hipótesis sobre la posible influencia del cambio de la composición atmosférica y del clima en determinadas estrategias o herramientas de gestión de las enfermedades de las plantas

ESTRATEGIA DE CONTROL	HERRAMIENTA	EFFECTOS PREVISTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO	POTENCIAL DE ADAPTACIÓN DE LA HERRAMIENTA
Evitación	Barrera de entrada (cuarentena)	Cambio mediado por el clima en la dispersión de patógenos — frecuencia, abundancia, distancia, velocidad	Es probable que se produzca una alteración de eficacia de las prácticas de cuarentena. Se necesitarán nuevas medidas fitosanitarias, incluido el uso de tratamientos estándar internacionales (CIPF).
Preventiva	Rotación de cultivos	Ningún efecto directo; la diversidad de los sistemas de cultivo seguirá siendo importante para reducir el riesgo de enfermedad	Posiblemente se requieran especies de cultivo mejor adaptadas a las condiciones climáticas locales.
Preventiva	Gestión de los residuos vegetales	Posible aumento de la biomasa de los cultivos por el efecto fertilizante del CO ₂ , a menos que las altas temperaturas y la sequía contrarresten el efecto fertilizante	Se necesitan enfoques innovadores para reducir el nivel de inóculo y la colonización saprofita.
Preventiva	Fecha de siembra o plantación	Es probable que sean necesarios ajustes; método sencillo y barato para escapar del estrés biótico y abiótico; sin embargo, también es posible que haya desventajas	Parece ser una herramienta poderosa (mencionada a menudo en la literatura).
Preventiva	Resistencia de la planta huésped	La resistencia dependiente de la temperatura puede ser superada por los patógenos; los cambios en la morfología y fisiología de la planta pueden afectar a la resistencia; la evolución potencialmente acelerada de los patógenos puede erosionar la resistencia a la enfermedad antes de tiempo	Es probable que afecte a la resistencia de la planta huésped (mayor, igual y menor eficacia dependiendo del gen de resistencia (R), la población de patógenos, etc.)
Preventiva	Limpieza de maquinaria y herramientas	Supuestamente sin efectos importantes	Los métodos fitosanitarios seguirán siendo importantes.
Preventiva	Uso de semillas y plántulas sanas	Supuestamente sin efectos importantes	Los métodos preventivos seguirán siendo importantes.
Preventiva	Niveles de insumos (por ejemplo, cantidad de riego)	Es de suponer que el aumento de las temperaturas hará que se rieguen más cultivos y en más regiones	La conservación del agua puede exigir tecnologías eficientes como el riego por goteo, reduciendo así el riesgo de enfermedades foliares.
Preventiva o curativa	Seguimiento sobre el terreno y uso de sistemas de apoyo a la toma de decisiones	Supuestamente sin efectos importantes	El seguimiento en el campo y los sistemas de apoyo a la toma de decisiones seguirán siendo o se harán más importantes.
Preventiva o curativa	Solarización del suelo (cubrir el suelo, normalmente con una lámina de plástico, para atrapar la energía solar con el fin de reducir las plagas en el suelo)	El calentamiento global puede facilitar el uso de esta herramienta (puede ser eficaz en más sistemas y regiones de patógenos de plantas, el calor puede llegar a capas más profundas del suelo, y la duración del periodo de cobertura puede ser más corta)	Eficacia alterada, pero efectos generalmente positivos.
Preventiva o curativa	Antagonistas, agentes de control biológico	Supuestamente, la vulnerabilidad de los agentes de control biológico será mayor debido a la variabilidad del clima	Posible alteración de la eficacia (mayor, igual o menor, dependiendo del producto, el entorno, la gestión, etc.).
Preventiva o curativa	Fungicidas de contacto	Si las precipitaciones son más frecuentes, se pueden realizar más aplicaciones; un crecimiento más rápido o más lento de los cultivos puede acortar o alargar el tiempo entre las aplicaciones	Posible alteración de la eficacia (mayor, igual o menor, dependiendo del producto, el entorno, el manejo, etc.).
Preventiva o curativa	Fungicidas sistémicos	Es necesario conocer mejor el proceso de absorción foliar de los fungicidas sistémicos para hacer predicciones fiables. Sin embargo, es posible que con el aumento de la temperatura la eficacia del fungicida se reduzca, simplemente, porque el crecimiento del patógeno será más fuerte.	Posible alteración de la eficacia (mayor, igual o menor, dependiendo del producto, el ambiente, el manejo, etc.).

Fuente: Modificado a partir de Juroszek y von Tiedemann (2011).

Prácticas preventivas de gestión de plagas

Las mejores prácticas disponibles para la gestión de plagas incluyen, por ejemplo, la producción de semillas y material de siembra limpios, sistemas de alerta temprana, buenas herramientas de diagnóstico y tratamientos eficaces, como los recubrimientos de semillas (Gullino, Gilardi y Garibaldi, 2014b; Gullino y Munkvold, 2014; Munkvold, 2009; Munkvold y Gullino, 2020; Thomas *et al.*, 2017), junto con el muestreo y el seguimiento asociados. Otras prácticas óptimas incluyen el uso de cultivares resistentes cuando estén disponibles, la adopción de prácticas culturales que promuevan la sanidad vegetal, los sistemas de gestión integrada de plagas, la aplicación de medidas higiénicas rigurosas y el uso de productos biológicos de protección de los cultivos. Estas prácticas serán aún más importantes ante las crecientes y cambiantes amenazas de las plagas debido al cambio climático, y es probable que sea necesario realizar algunos ajustes para mantener su eficacia: por ejemplo, la rotación de cultivos puede incluir especies mejor adaptadas a las condiciones climáticas locales y puede ser necesario intensificar el régimen de aplicación de fungicidas (véase el cuadro 4).

Desarrollos tecnológicos recientes

En los siguientes párrafos se destaca un prometedor avance tecnológico —el uso de la nanotecnología— como ejemplo de cómo pueden aprovecharse las nuevas tecnologías para proteger la sanidad vegetal. La nanotecnología proporciona herramientas para la creación de productos innovadores y mejorados para la protección de los cultivos, con el fin de hacer frente al creciente riesgo de plagas, incluido el que se debe al cambio climático. Todavía está en fase de desarrollo y aún no se aplica ampliamente en la práctica. También es posible que no esté fácilmente disponible en los países de bajos ingresos, al menos no inmediatamente, por razones económicas, pero ilustra lo que es potencialmente posible. La mejora de estas herramientas es muy importante y será crucial en el futuro.

Nanofertilizantes y pesticidas

En las últimas dos décadas, los avances en la ciencia a nanoescala han impulsado un nuevo interés e investigación sobre las aplicaciones e implicaciones de la nanotecnología para la agricultura sostenible (Scott, Chen y Cui, 2018). Además del uso fundamental de los nanofertilizantes para la agricultura de precisión (Raliya *et al.*, 2018), se ha sugerido que la nanotecnología puede mejorar potencialmente la eficacia y la seguridad de los pesticidas. Los plaguicidas producidos por la nanotecnología tendrían una gran superficie y serían capaces de una entrega de precisión en respuesta a los desencadenantes ambientales como la temperatura, el pH, la humedad, las enzimas y la luz (Bingna *et al.*, 2018), además de ser solubles en agua, lo que minimizaría los residuos ambientales (Zhao *et al.*, 2018). Los primeros experimentos con nanopartículas sólidas compuestas por óxidos metálicos, azufre y sílice demostraron tener éxito en el control de una serie de plagas (Goswami *et al.*, 2010).

Más recientemente, las aplicaciones nanotecnológicas en el ámbito agrícola suelen consistir en la encapsulación de herbicidas, fungicidas o insecticidas conocidos en nanotransportadores sintéticos compuestos por arcillas, sílice, lignina o polímeros naturales, como el alginato, el quitosano y la etilcelulosa (Diyanat *et al.*, 2019). La policaprolactona se ha utilizado como nanotransportador para el herbicida pretilacloro (Diyanat

et al., 2019), los herbicidas de triazina (ametrina, atrazina, simazina) (Grillo *et al.*, 2012), y el pesticida avermectina (Su *et al.*, 2020). La policaprolactona se ha hecho popular porque se degrada de forma natural en el medio ambiente, es barata de producir y no depende de la producción de plástico de petróleo (Sabry y Ragaei, 2018).

Los nanoplaguicidas se han probado con mucho éxito para el control del nematodo del pino, y la avermectina nanoencapsulada ha demostrado tener una toxicidad superior para el sistema gastrointestinal del nematodo, un mayor rendimiento de liberación sostenida y una estabilidad fotolítica mejorada en comparación con una entrega tradicional de avermectina (Su *et al.*, 2020). También se ha descubierto que la atrazina nanoencapsulada reduce los efectos ambientales nocivos de este herbicida, sin afectar negativamente a la tasa de mortalidad de las plántulas de *Bidens pilosa* (Preisler *et al.*, 2020). La atrazina nanoencapsulada en este último estudio tuvo efectos inhibidores a 200 g/ha que fueron equivalentes a los del herbicida no encapsulado a 2 000 g/ha, lo que representa una reducción de diez veces la concentración del herbicida. Además, en el caso de las plantas de mostaza, se ha comprobado que la atrazina encapsulada con policaprolactona a una dilución diez veces mayor es tan eficaz como la atrazina no diluida y no encapsulada (Oliveira *et al.*, 2015).

Mejora del cultivo para la resistencia

Otra oportunidad para el uso de la nanotecnología en la agricultura es como método de entrega para la transferencia de ADN en las plantas para promover la resistencia a las plagas (Rai e Ingle, 2012; Sabry y Ragaei, 2018), reduciendo así el uso de pesticidas químicos potencialmente dañinos para el medio ambiente. Se ha sugerido que las nanopartículas podrían usarse para entrega de cargas útiles de edición genómica basadas en nucleasas como método de ingeniería genética de plantas. Este método superaría los desafíos de los métodos actuales de transferencia de genes (como la pistola de genes y el ultrasonido) causados por la barrera física de una pared celular vegetal rígida y de múltiples capas que ha hecho que el progreso de la ingeniería genética de las plantas se retrase con respecto al progreso en los sistemas animales (Cunningham *et al.*, 2018). Algunas técnicas para introducir el ADN en células animales pueden adaptarse a las plantas en condiciones controladas (Chang *et al.*, 2013; Torney *et al.*, 2007).

Intercambio de información

Para complementar el desarrollo de tecnologías avanzadas como las descritas anteriormente, también existen iniciativas para promover el intercambio de datos e información. La iniciativa MyPestGuide en Australia, por ejemplo, incorpora la notificación de malezas, guías de campo para la identificación de plagas y herramientas de gestión de decisiones en una plataforma compartida (Wright *et al.*, 2018). Un marco global para el intercambio de datos podría ayudar a los esfuerzos para hacer frente a las plagas de rápida propagación y potencialmente de alto impacto (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019).

Mitigación y adaptación

Salvo contadas excepciones (por ejemplo, Gouache *et al.*, 2011), las simulaciones de riesgo de plagas no han incluido las opciones que los agricultores y ganaderos podrían adoptar para mitigar o adaptarse a un mayor riesgo de plagas en el futuro. Esto es cierto para la agricultura (Juroszek y von Tiedemann, 2015) y la silvicultura (Bentz y Jönsson, 2015). No obstante, en la agricultura hay una serie de opciones potenciales de mitigación y adaptación a corto plazo que deberían ser consideradas, no solo por los agricultores y ganaderos, sino también para incluirlas en los modelos de simulación a fin de apoyar la toma de decisiones futuras. Un mayor desarrollo de las herramientas necesarias para la gestión adaptativa de las plagas aumentará la probabilidad de éxito de las estrategias de adaptación en el futuro (Macfayden, McDonald y Hill, 2018).

La mayoría de los científicos consideran que la mejora de la resistencia de las plantas huésped (y la competitividad de las plantas de cultivo frente a las malas hierbas) y los ajustes en la aplicación de plaguicidas son las dos formas más eficaces de adaptar la protección de los cultivos a las futuras condiciones climáticas (revisado por Juroszek y von Tiedemann, 2015). Otras opciones son los ajustes en el momento de la siembra, una mayor rotación de cultivos, la mejora de la previsión de plagas, el ajuste de las prácticas agronómicas, como el riego y la fertilización, y la prestación de asesoramiento específico (Juroszek y von Tiedemann, 2015). Curiosamente, otras herramientas potenciales de adaptación en la protección de cultivos, como la modificación del microclima mediante la alteración de la densidad de siembra, no se discuten en absoluto en la literatura relacionada con las simulaciones de riesgo de plagas.

En la silvicultura y la agricultura, también puede ser necesario adoptar estrategias climáticamente inteligentes para la gestión de plagas (Heeb, Jenner y Cook, 2019; Lipper *et al.*, 2014). En general, la gestión integrada de plagas incluye una amplia gama de medidas directas e indirectas de gestión fitosanitaria (Heeb, Jenner y Cock, 2019; Juroszek y von Tiedemann, 2011). Entre ellas se encuentran la cuarentena (bioseguridad), otras medidas fitosanitarias (por ejemplo, semillas y plántulas sanas), un seguimiento cuidadoso y un calendario óptimo de las intervenciones necesarias (Heeb, Jenner y Cook, 2019; Strand, 2000) o el control biológico (Eigenbrode, Davis y Crowder, 2015).

En el contexto de la adaptación de los sistemas de cultivo al cambio climático, la mejora de la resistencia a las enfermedades es una de las opciones más atractivas (Miedaner y Juroszek, 2021a, 2021b). Las variedades con tolerancia a la sequía, a las altas temperaturas y a las plagas son cruciales para la seguridad alimentaria en cultivos básicos como el maíz y las judías, así como para los cultivos comerciales de exportación, como el café y la soja. A veces, las nuevas variedades permiten ajustar los sistemas de cultivo para moderar el riesgo de plagas asociado a los probables cambios. Por ejemplo, la disponibilidad de nuevas variedades de trigo permite que los cultivos de trigo en el centro de Queensland (Australia) se planten tres o cuatro semanas antes (Howden, Gifford y Meinke, 2010). También en el caso del cacao se sugiere una selección multicriterio en el desarrollo de nuevas variedades, en el contexto del cambio climático (Cilas y Bastide, 2020). Aunque la mejora de los cultivos, y especialmente la de los árboles, tiene un largo retraso en la respuesta a los nuevos retos, los modelos de los efectos del cambio climático en el riesgo de plagas pueden ayudar a elaborar estrategias antes de que surjan nuevos problemas. La identificación, conservación y uso de variedades antiguas también puede ser útil.

En la silvicultura, la adaptación para responder a los posibles efectos del cambio climático es más probable que implique medidas preventivas, como la eliminación de árboles infestados para evitar una mayor propagación de las plagas, debido a las dificultades para gestionar eficazmente los árboles adultos de gran altura (Bonello *et al.*, 2020; Liebhold y Kean, 2019). Otra importante opción de adaptación preventiva es la explotación de la diversidad genética, la elección de especies de árboles adecuadas, o de clones o cultivares resistentes o tolerantes a las plagas, si están disponibles, cuando se plantan nuevos bosques (Bonello *et al.*, 2020).

La elección de las estrategias de adaptación dependerá de muchos factores. El coste es un factor, y Srivastava, Kumar y Aggarwal (2010) concluyen que deberían explorarse más estrategias de adaptación de bajo coste, como el cambio de la fecha de siembra y la elección del cultivar, para reducir la vulnerabilidad de la producción de cultivos al cambio climático. Sin embargo, la viabilidad de cambiar las fechas de siembra o cosecha depende de la posible penalización del rendimiento y del lugar donde se cultiva, de las preferencias de los agricultores y los consumidores en cuanto a los cultivares y de la situación del mercado (Wolfe *et al.*, 2008). También pueden ser necesarias opciones de adaptación más costosas (Juroszek y von Tiedemann, 2011). Esto puede implicar, por ejemplo, el desarrollo de métodos más potentes para gestionar los patógenos en los residuos de los cultivos, que podrían combinarse con métodos ya bien establecidos, como la rotación de cultivos, para evitar la colonización saprofita de los residuos de los cultivos por parte de los patógenos y disminuir el arrastre de inóculo entre temporadas de cultivo (Melloy *et al.*, 2010). Los métodos “antiguos”, como el volteo del suelo, también pueden ser un método eficaz para gestionar los residuos de los cultivos enfermos (Miedaner y Juroszek, 2021b), aunque la agricultura de conservación podría ser más adecuada en zonas propensas a la sequía. Arar el suelo también supone un mayor consumo de combustible y, por tanto, más emisiones de CO₂ determinantes para el clima, en comparación con el laboreo mínimo.

Por último, teniendo en cuenta la planificación estratégica, es importante decidir dónde se van a producir cultivos agrícolas perennes como las palmeras datileras (Shabani y Kumar, 2013). Con el conocimiento de dónde podrían aparecer en el futuro enfermedades económicamente importantes de dichos cultivos, se podrían identificar lugares de bajo riesgo para evitar o minimizar el impacto futuro de estas enfermedades (Shabani y Kumar, 2013). Esto se aplica también a la silvicultura, donde la planificación es especialmente importante para evitar o minimizar el futuro aumento de los riesgos de plagas, como se ha explicado anteriormente. En el caso de los cultivos anuales, como la colza, se ha sugerido el desplazamiento de las zonas de cultivo como una de las adaptaciones en el peor de los casos (Butterworth *et al.*, 2010). De hecho, en Egipto, el cultivo de la faba se ha trasladado del centro del país a la región más fría del delta del Nilo, en el norte, para escapar de los efectos perjudiciales de las enfermedades víricas, posiblemente causadas —al menos en parte— por el calentamiento global.

Todas las opciones señaladas anteriormente pueden contribuir a que los agricultores y ganaderos puedan mitigar el riesgo creciente de plagas y adaptarse a este. En general, sin embargo, será importante favorecer y aplicar aquellas tecnologías y prácticas que puedan contribuir simultáneamente a aumentar la productividad y reducir la vulnerabilidad a los cambios provocados por las emisiones de CO₂, N₂O y CH₄.

Resultados y recomendaciones





En las últimas décadas se ha producido una explosión en el volumen de investigación sobre la biología del cambio climático, lo que ha dado lugar a muchas publicaciones cada año, especialmente en los últimos diez años (por ejemplo, Björkman y Niemelä, 2015; Juroszek *et al.*, 2020; Peterson, Menon y Li, 2010). La mayoría de los estudios (resumidos en el cuadro 5) indican que, en general, el riesgo de plagas de insectos, patógenos y malezas aumentará en los ecosistemas agrícolas en los escenarios de cambio climático (Choudhary, Kumari y Fand, 2019; Clements, DiTommaso y Hyvönen, 2014; Juroszek *et al.*, 2020), especialmente en las regiones árticas, boreales, templadas y subtropicales más frías de la actualidad. Las pruebas sugieren que todos los climas se verán afectados, pero que la naturaleza y el alcance del impacto variarán en función de la capacidad de adaptación y evolución de los sistemas de producción y los ecosistemas naturales. Esto también es cierto en su mayor parte para los patógenos y las plagas de insectos en la silvicultura. (Seidl *et al.*, 2017).

Heeb, Jenner y Cook (2019) han esbozado recientemente estrategias climáticamente inteligentes para controlar las plagas. Estas y otras medidas fitosanitarias preventivas y curativas serán necesarias para que los países se adapten a un nuevo escenario climático (Almekinders *et al.*, 2019; Erikson y Griffin, 2014; Thomas-Sharma *et al.*, 2016). Pero también habrá que tener en cuenta las disposiciones reglamentarias, las necesidades de investigación, la cooperación internacional y la creación de capacidades, y en esta sección del informe se esbozan recomendaciones sobre estos aspectos.

Formulación de políticas y marcos reglamentarios

Ajuste del análisis de riesgo de plagas con respecto al cambio climático

El análisis de riesgo de plagas proporciona la justificación científica de todas las medidas fitosanitarias, incluidas las elaboradas bajo los auspicios de la Secretaría de la CIPF. Se sugiere que las NIMF pertinentes para el ARP se evalúen con respecto a su idoneidad a la hora de abordar cuestiones relacionadas con el cambio climático. Es necesario intensificar las actividades de análisis del riesgo de plagas a nivel nacional, regional e internacional e incluir los aspectos del cambio climático en la evaluación del riesgo de plagas.

Vigilancia y seguimiento adecuados al cambio climático

La vigilancia y el seguimiento son herramientas importantes para detectar la introducción de nuevas plagas o para controlar su situación. Se considera oportuno hacer una evaluación de las NIMF y las orientaciones sobre estos temas elaboradas bajo los auspicios de la Secretaría de la CIPF a fin de determinar si es necesario llevar a cabo una revisión de las mismas en función de los efectos del cambio climático. Deberían intensificarse las actividades nacionales, regionales e internacionales de vigilancia y seguimiento de las amenazas fitosanitarias. Se sugiere que se tenga en consideración la elaboración de modelos de programas de vigilancia multilaterales, especialmente para los países en desarrollo, con el fin de demostrar cómo pueden establecerse dichos programas para hacer frente a las amenazas fitosanitarias.

Intercambio activo de información y presentación de informes

El intercambio internacional de información sobre los flujos comerciales, las apariciones de plagas y las intercepciones de plagas es extremadamente importante para compensar la escasez de información generada por la investigación científica con respecto a los impactos del cambio climático en la sanidad vegetal. También es fundamental que se comparta la información sobre los cambios en la distribución de las plagas, el área de distribución de los hospedadores y la adaptabilidad de las plagas y las plantas hospedadoras. Es necesario mejorar el sistema de notificación de la CIPF, que combina la notificación oficial de las partes contratantes con otra información disponible y publicada.

Investigación necesaria

En el cuadro 6 se enumeran las principales lagunas de investigación relacionadas con el cambio climático y las plagas. Los organismos de financiación y las organizaciones que llevan a cabo la investigación deberían considerar estas lagunas de investigación, siempre que sea posible, para incluirlas en sus programas de investigación. En particular, en la mayoría de las zonas geográficas hay que prestar una mayor atención al mantenimiento de programas de investigación amplios y multidisciplinarios. Los programas de investigación deben cubrir las necesidades tanto de los países industrializados como de los países en desarrollo. Será necesario un compromiso financiero a largo plazo para captar los efectos actuales y futuros del cambio climático y el riesgo de plagas relacionado, incluyendo la comprobación de métodos para minimizar el riesgo. Por esta razón, deberán seleccionarse algunos “puntos calientes” (zonas de producción sensibles al clima) para la realización de actividades de investigación y desarrollo a largo plazo (“Sitios de demostración del cambio climático para el análisis del riesgo de plagas y el ensayo de métodos de reducción del riesgo de plagas”, CCDS-PRA-PRRM).

Además, la inversión de los gobiernos nacionales debe dirigirse a reforzar los sistemas y estructuras nacionales de vigilancia, como los laboratorios de diagnóstico, para poder contrarrestar rápidamente las posibles invasiones biológicas. También deberían crearse unidades de ARP que funcionen bien, para poder prevenirlas.

A continuación se destacan algunas cuestiones específicas.

Estudios sobre el efecto del cambio climático en los productos fitosanitarios y en las estrategias de gestión

Son muchas las lagunas en la investigación que hay que cubrir en este campo. Es posible, por ejemplo, que las plagas se vuelvan resistentes a los productos fitosanitarios si el uso de dichos productos se hace más frecuente en respuesta al aumento de la prevalencia de las plagas debido al cambio climático. Sin embargo, es necesario investigar esto. Además, el efecto directo del cambio climático sobre la eficacia de las estrategias de gestión adoptadas, en particular sobre las medidas de control químico o biológico, no se ha estudiado lo suficiente hasta ahora (Gillardi *et al.*, 2017, Gullino *et al.*, 2020) y debería investigarse mucho más ampliamente (cuadro 6). Ya se dispone de los resultados de algunos experimentos, que sugieren, por ejemplo, que el calentamiento global puede aumentar el riesgo de aparición de malas hierbas resistentes a los herbicidas debido a una mayor desintoxicación del herbicida por parte de la hierba en función de la temperatura (Matzrafi *et al.*, 2016). La mayor parte de las investigaciones relacionadas con los posibles efectos del cambio climático sobre las plagas se han centrado de forma desproporcionada en las plagas que se encuentran por encima del suelo y no en las subterráneas, a pesar de la importancia de estas últimas en los procesos subterráneos y su influencia en la salud del suelo (Chakraborty, Pangga y Roper, 2012; Pritchard, 2011).

Cuadro 5. Ejemplos de artículos de revisión recientes centrados en el cambio climático y el riesgo futuro de plagas para los ecosistemas vegetales en la agricultura, la horticultura, la silvicultura y los hábitats naturales no gestionados

GRUPO DE PLAGAS	REFERENCIAS (ORDEN CRONOLÓGICO DENTRO DE CADA GRUPO)
Insectos	Choudhary, Kumari y Fand, 2019; Jactel, Koricheva y Castagnérol, 2019; Kellermann y van Heerwaarden, 2019; Moriyama y Numata, 2019; Yadav, Stow y Dudaniec, 2019; Borkataki <i>et al.</i> , 2020; Debelo, 2020; Frank, 2020; Lehmann <i>et al.</i> , 2020; Marshall, Gotthard y Williams, 2020
Patógenos	Paraschivu <i>et al.</i> , 2019; Paterson y Lima, 2019; Sharma, Hooda y Goswami, 2019; Singh, Shukla y Singh, 2019; Castillo <i>et al.</i> , 2020; Garrett <i>et al.</i> (2020a); Hunjan y Lore, 2020; Juroszek <i>et al.</i> 2020; Kumar y Khurana, 2020; Mahmood <i>et al.</i> , 2020; Misra <i>et al.</i> , 2020; Perrone <i>et al.</i> , 2020; Priyanka <i>et al.</i> , 2020; Roth <i>et al.</i> , 2020; Trebicki, 2020
Maleza	Billore, 2019; Manisankar y Ramesh, 2019; Ziska, Blumenthal y Franks, 2019; Karaca y Dursun, 2020; Rutledge y Chauhan, 2020; Sun <i>et al.</i> , 2020
Combinaciones de grupos de plagas	Heeb, Jenner y Cock, 2019; Santini y Battisti, 2019; Trebicki y Finlay, 2019; Bajwa <i>et al.</i> , 2020; Bonello <i>et al.</i> , 2020; Jabran, Florentine y Chauhan, 2020; Jactel <i>et al.</i> , 2020

Notas: Los ejemplos enumerados fueron seleccionados subjetivamente, fueron todos publicados desde 2019 hasta septiembre de 2020 en revistas y libros, e incluyen minirevisiones. Los artículos de revisión sobre el mismo tema, publicados desde 1988 hasta 2011, se recopilan en Juroszek y von Tiedemann (2013a).

Cuadro 6. Ejemplos de lagunas en la investigación sobre el cambio climático en relación con las plagas de las plantas

BRECHA DE INVESTIGACIÓN (PROPUESTA DE INVESTIGACIÓN)	REFERENCIA SELECCIONADA
Oportunidades potenciales relacionadas con la protección de los cultivos menos exploradas	Sutherst <i>et al.</i> , 2007.
Especies subterráneas menos investigadas que las superficiales	Pritchard, 2011.
Especies tropicales menos estudiadas que las especies de regiones subtropicales y templadas	Ghini, Bettiol y Hamada, 2011.
Plagas en sistemas no gestionados menos investigadas que en sistemas gestionados	Anderson <i>et al.</i> , 2004.
La investigación se limita a unas pocas especies de plagas especialmente importantes; muchas otras están menos estudiadas o no se estudian en absoluto, por ejemplo, las bacterias y los virus se investigan mucho menos que los hongos patógenos de la superficie	Frank, 2020; Jones, 2016.
Se necesitan muchos más experimentos de campo multifactoriales que consideren las interacciones de la temperatura, el agua y el CO ₂ (simulación de las futuras condiciones del mundo real, por ejemplo, utilizando enfoques de enriquecimiento de CO ₂ en aire libre)	Tenllado y Canto, 2020; Vilà <i>et al.</i> , 2021.
Interacciones bióticas entre niveles tróficos poco conocidas, incluido el potencial de adaptación de las especies	Van der Putten, Macel and Visser, 2010.
Se necesita un resumen exhaustivo de los resultados anteriores en la agricultura y la horticultura	Juroszek <i>et al.</i> , 2020.
Se necesita una evaluación de los métodos actuales de protección de las plantas en función de los escenarios de cambio climático	Delcour, Spanoghe y Uyttendaele, 2015.
Se necesitan conjuntos de datos a largo plazo para discriminar los posibles efectos del cambio climático en las plagas y enfermedades de los factores de confusión, como los cambios en la gestión	Garrett <i>et al.</i> , 2016, 2021.
Las simulaciones del riesgo futuro de plagas deberían vincularse más a menudo a los modelos de cultivos para informar de las posibles pérdidas de rendimiento; también deberían incluirse en las ejecuciones de los modelos posibles medidas de adaptación y mitigación cuando sea posible	Juroszek y von Tiedemann, 2015.
Se necesita mucha más investigación sobre adaptación y mitigación para minimizar los riesgos crecientes	Hoffmann <i>et al.</i> , 2019.
Se necesitan marcos para adaptar los sistemas de apoyo a la toma de decisiones a nuevas distribuciones de frecuencia de las condiciones meteorológicas, e incluso a escenarios completamente nuevos	Garrett <i>et al.</i> , 2020a.

Notas: Las referencias enumeradas se seleccionaron de forma subjetiva; sin embargo, se prefirieron las publicaciones posteriores a 2010 para demostrar que las lagunas de investigación siguen siendo frecuentes. En general, cada ejemplo se aplica igualmente a plagas de insectos, patógenos y malezas. Modificado según Juroszek y von Tiedemann (2013a) y Juroszek *et al.* (2020).

Estudios sobre los efectos del cambio climático en los enemigos naturales

El impacto del cambio climático sobre los enemigos naturales y los antagonistas y el consiguiente efecto de esto sobre el control de plagas aún no se conoce bien (Eigenbrode, Davis y Crowder, 2015). En el caso de los insectos plaga de la uva, ya se ha sugerido que la futura gestión de plagas deberá basarse en un sólido conjunto de datos de campo recogidos tanto para las plagas como para los antagonistas en condiciones de cambio climático (Reineke y Thiéry, 2016). Una mejor comprensión del impacto del cambio climático en los procesos ecológicos, especialmente a nivel comunitario, permitirá incorporar principios generales a las prácticas de gestión (Macfayden, McDonald y Hill, 2018).

Silvicultura y ecosistemas no gestionados

Las plagas se han investigado mucho más en la agricultura en comparación con los entornos forestales (Ormsby y Brenton-Rule, 2017), y la investigación relacionada con los ecosistemas no gestionados es escasa (Harvell *et al.*, 2002). Esto pone de manifiesto la necesidad de una *colaboración multidisciplinar*, la coordinación y el intercambio de conocimientos en la investigación de la biología del cambio climático para reunir a los científicos que trabajan en diferentes biota dentro del mismo ecosistema, por ejemplo, patólogos de plantas y entomólogos (Jactel *et al.*, 2020), y a aquellos que trabajan en diferentes ecosistemas y sectores, como la agricultura, la silvicultura y los ecosistemas no gestionados (por ejemplo, los enfoques “Salud Circular” y “Una Salud”).

Cooperación internacional

La cooperación internacional es fundamental para que los países consigan adaptar las estrategias de gestión de plagas al cambio climático. De hecho, la gestión eficaz de un agricultor o un país afecta al éxito de los demás, ya que las plagas no respetan las fronteras. La cooperación internacional puede ser global o regional. Un nuevo sistema de vigilancia mundial propuesto para las enfermedades de los cultivos, por ejemplo, integrará redes de diagnóstico, redes de gestión de datos, redes de evaluación de riesgos y redes de comunicación (Carvajal-Yepes *et al.*, 2019).

El establecimiento de un mecanismo para la coordinación de la investigación fitosanitaria mundial, como se sugiere en el Marco Estratégico 2020-2030 de la CIPF (FAO, 2021b), podría aumentar la colaboración científica, mejorar la coordinación de los esfuerzos, optimizar el uso de los recursos y facilitar la alineación de los objetivos. De este modo, no solo podría contribuir al avance de la ciencia, sino también a reforzar los fundamentos científicos de los esfuerzos internacionales para evaluar y gestionar el impacto del cambio climático en la sanidad vegetal, contribuyendo así a proteger la agricultura, el medio ambiente y las actividades comerciales de las plagas.

A nivel regional, el análisis de escenarios de posibles respuestas al cambio climático puede ayudar a fundamentar las estrategias de adaptación de la gestión regional de las enfermedades (Garrett *et al.*, 2018). Sin embargo, aunque muchas organizaciones nacionales y regionales de protección fitosanitaria trabajan para monitorear y contener los brotes de plagas de los cultivos, muchos países no intercambian información de manera eficiente, lo que retrasa las respuestas coordinadas para prevenir el establecimiento y la propagación de enfermedades. Por ello, el apoyo a la creación de capacidades en estos países debería ser un componente esencial de la cooperación internacional. Con el apoyo de organizaciones internacionales, los foros mundiales para el intercambio de información podrían ser de gran

utilidad. La experiencia adquirida actualmente en la organización de reuniones en línea a lo largo de la pandemia COVID-19, ayudará a fomentar los contactos e interacciones a larga distancia, con un importante ahorro de tiempo y dinero.

Creación de capacidades

Aunque la COVID-19 ha perturbado la mayoría de los aspectos de la vida, incluidos los sistemas alimentarios y educativos, también ha mostrado el potencial de los nuevos programas compartidos para el desarrollo de capacidades, ya que la enseñanza se ha trasladado a Internet. Abordar las desigualdades en el acceso a Internet contribuirá a apoyar estas nuevas oportunidades de creación de capacidades en línea.

Son varias las formas según las cuales los países pueden desarrollar su capacidad para hacer frente y adaptarse al cambio climático. Los siguientes ejemplos sirven para destacar algunas de las posibilidades.

El Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (GCAI) —una asociación mundial de investigación sobre seguridad alimentaria— está formando un nuevo “GCAI único” para el año 2022, con el objetivo de desplegar las innovaciones científicas para los sistemas alimentarios, de la tierra y del agua más rápidamente, a mayor escala y a menor coste. Puede ser aconsejable mantener la gestión de plagas como un componente clave de la nueva estrategia de “Un solo GCAI” para reforzar la capacidad de adaptación a nivel mundial y especialmente en los programas nacionales que aún están creando su capacidad para abordar estos problemas. Esto puede incluir enfoques de adaptación “sin arrepentimientos”, como el fortalecimiento general de los sistemas y su capacidad para responder a los nuevos desafíos del cambio climático (Heltberg, Siegel y Jorgensen, 2009). La idea que subyace a este tipo de enfoques es que muchas mejoras de los sistemas serán valiosas tanto si se dan o no los actuales escenarios específicos de cambio climático. Dado que las nuevas introducciones de plagas suelen tener al menos el mismo impacto que los efectos del cambio climático, es sencillo diseñar mejoras sin arrepentimiento en los sistemas de gestión de plagas. Puede haber límites a las opciones sin arrepentimiento (Dilling *et al.*, 2015), pero hay mucho espacio para mejorar los sistemas de gestión de plagas y enfermedades en las explotaciones y en la gestión regional. Una evaluación de la capacidad fitosanitaria de la CIPF puede utilizarse para evaluar la preparación de un país para responder a los desafíos de las enfermedades de las plantas (Day, Quinlan y Ogotu, 2006; Secretaría de la CIPF, 2012). Este es otro ejemplo de un posible enfoque sin arrepentimientos, ya que la mejora de la capacidad tendrá beneficios independientemente de que los escenarios de cambio climático se desarrollen como se espera, y probablemente también dará lugar a mejoras en la relación coste-beneficio.

Desarrollar la capacidad de adaptación al cambio significa también encontrar formas de gestionar el riesgo financiero. Esto puede lograrse a veces, al menos en parte, a través de los seguros de cosechas, que son una opción atractiva para proteger los medios de vida de los agricultores bajo las tensiones del cambio climático. Sin embargo, no protege necesariamente la productividad y puede incentivar la continuidad de la producción de determinados cultivos en regiones en las que estos ya no se adaptan al nuevo entorno (Falco *et al.*, 2014).

Los elementos de altruismo efectivo (“proporcionar beneficios a la sociedad”) —por los que se invertiría una parte del esfuerzo en evaluar los peores escenarios para los efectos de las plagas y cómo pueden abordarse— también pueden resultar útiles para ayudar a los países a adaptarse al cambio climático (Garrett *et al.*, 2020b).

En conclusión, los datos examinados en este informe indican claramente que, en muchos casos, el cambio climático provocará un aumento de problemas relacionados con la salud fitosanitaria en los ecosistemas gestionados (por ejemplo, la agricultura, la horticultura y la silvicultura), semigestionados (por ejemplo, los parques nacionales) y, probablemente, también en los no gestionados. Los ajustes en las políticas fitosanitarias y las estrategias de protección de las plantas ya son necesarios hoy día a causa de los recientes cambios climáticos y serán aún más cruciales en el futuro, suponiendo que se cumplan los escenarios de cambio climático previstos. La gestión climáticamente inteligente de las plagas, que implica la aplicación de enfoques holísticos en las explotaciones agrícolas y en los paisajes, se basa principalmente en los métodos de gestión existentes seleccionados, con el fin de poder mejorar la mitigación y reforzar la resiliencia. Mantener los servicios de los ecosistemas gestionados y no gestionados y los productos, incluidos los alimentos, en condiciones de cambio climático tiene una importancia primordial, y las medidas preventivas y curativas de protección fitosanitaria son componentes clave para el mantenimiento de la seguridad alimentaria actual y futura.

Bibliografía

- Abd-Elgawad, M.M.M.** 2020. Managing nematodes in Egyptian citrus orchards. *Bulletin of the National Research Centre*, 44: 41 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00298-9>
- Ainsworth, E.A., y Long, S.P.** 2021. 30 years of free-air carbon enrichment (FACE): What have we learned about future crop productivity and its potential for adaptation? *Global Change Biology*, 27: 27-49.
- Al-Ayedh, H.Y.** 2017. *The current state of the art research and technologies on RPW management*. Paper presented at the "Scientific Consultation and High-Level Meeting on Red Palm Weevil Management", 29-31 de marzo de 2017, Roma, FAO.
- Albajes, R., Gullino, M.L., van Lenteren, J.C. y Elad, Y., eds.** 1999. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*. Dordrecht, The Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Almeida, R.P.P., Blua, M.J., Lopes, J.R.S. y Purcell, A.H.** 2005. Vector transmission of *Xylella fastidiosa*: Applying fundamental knowledge to generate disease management strategies. *Annals of the Entomological Society of America*, 98: 775-786.
- Almekinders, C.J., Walsh, S., Jacobsen, K.S., Andrade-Piedra, J.L., McEwan, M.A., de Haan, S., Kumar, L. y Staver, C.** 2019. Why interventions in the seed systems of roots, tubers and bananas crops do not reach their full potential. *Food Security*, 11: Seguridad alimentaria 23-42.
- Altermatt, F.** 2010. Climatic warming increases voltinism in European butterflies and moths. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 277: 1281-1287.
- Altizer, S., Ostfeld, R.S., Johnson, P.T.J., Kutz, S. y Harvell, C.D.** 2013. Climate change and infectious diseases: From evidence to a predictive framework. *Science*, 341: 514-519.
- Amanifar, N., Taghavi, M., Izadpanah, K. y Babaei, G.** 2014. Isolation and pathogenicity of *Xylella fastidiosa* from grapevine and almond in Iran. *Phytopathologia Mediterranea*, 53(2): 318-327.
- Anderegg, W.R.L., Kane, J.M. y Anderegg, L.D.L.** 2013. Consequences of widespread tree mortality triggered by drought and temperature stress. *Nature Climate Change*, 3: 30-36.
- Anderson, P.K., Cunningham, A.A., Patel, N.G., Morales, F.J., Epstein, P.R. y Daszak, P.** 2004. Emerging infectious diseases of plants: Pathogen pollution, climate change and agrotechnology drivers. *Trends in Ecology and Evolution*, 19: 535-544.
- Angelotti, F., Hamada, E., Magalhaes, E.E., Ghini, R., Garrido, L.D.R. y Junior, M.J.P.** 2017. Climate change and the occurrence of downy mildew in Brazilian grapevines. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira, Brasília*, 52: 426-434.
- Aukema, J.E., Leung, B., Kovacs, K., Chivers, C., Britton, K.O., Englin, J., Frankel, S.J. et al.** 2011. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. *PLoS ONE* 6(9): e24587 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024587>
- Avelino, J., Cristancho, M., Georgiou, S., Imbach, P., Aguilar, L., Bornemann, G., Läderach, P., Anzueto, F., Hruska, A.J. y Morales, C.** 2015. The coffee rust crises in Colombia and Central America (2008-2013): Impacts, plausible causes, and proposed solutions. *Food Security*, 7: 303-321.
- Bairstow, K.A., Clarke, K.L., McGeoch, M.A. y Andrew, N.R.** 2010. Leaf miner and plant galler species richness on Acacia: Relative importance of plant traits and climate. *Oecologia*, 163: 437-448
- Bajwa, A.A., Farooq, M., Al-Sadi, A.M., Nawaz, A., Jabran, K. y Siddique, K.H.M.** 2020. Impact of climate change on biology and management of wheat pests. *Crop Protection*, 137: 105304 [en línea]. [Acceso: 31 de marzo de 2021]. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105304>

- Bale, J.S., y Hayward, S.A.L. 2010. Insect overwintering in a changing climate. *The Journal of Experimental Biology*, 213: 980-994.
- Battilani, P., Toscano, P., van der Fels-Klerx, H.J., Moretti, A., Camardo Leggieri, M., Brera, C., Rortais, A. et al. 2016. Aflatoxin B1 contamination in maize in Europe increases due to climate change. *Scientific Reports*, 6: 24328 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1038/srep24328>
- Battisti, A. 2008. Forests and climate change; lessons from insects. *iForest – Biogeosciences and Forestry*, 1: 1-5 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3832/ifor0210-0010001>
- Battisti, A., Stastny, M., Buffo, E. y Larsson, S. 2006. A rapid altitudinal range expansion in the pine processionary moth produced by the 2003 climatic anomaly. *Global Change Biology*, 12: 662-667.
- Bebber, D.P., Ramotowski, M.A.T. y Gurr, S.J. 2013. Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Climate Change*, 3: 985-988.
- Bentz, B.J., y Jönsson, A.M. 2015. Modeling bark beetle responses to climate change. En F.E. Vega y R.W. Hofstetter, eds. *Bark beetles – biology and ecology of native and invasive species*, págs. 533-553. Cambridge MA, Academic Press, Elsevier.
- Bergsma-Viami, M., van de Bilt, J.L.J., Tjou-Tam-Sin, N.N.A., van de Vossenbergh, B.T.L.H. Y Westenberg, M. 2015. *Xylella fastidiosa* in *Coffea arabica* ornamental plants imported from Costa Rica and Honduras in The Netherlands. *Journal of Plant Pathology*, 97: 395.
- Betz, O., Srisuka, W. y Puthz, V. 2020. Elevational gradients of species richness, community structure, and niche occupation of tropical roove beetles (Coleoptera: Staphylinidae: Steninae) across mountain slopes in Northern Thailand. *Evolutionary Ecology*, 34: 193-216.
- Biber-Freudenberger, L., Ziemacki, J., Tonnang, H.E.Z. y Borgemeister, C. 2016. Future risks of pest species under changing climatic conditions. *PLoS ONE*, 11: e0153237 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0153237>
- Billore, S.D. 2019. Weeds in soybean vis-à-vis other crops – a review. *Soybean Research*, 17: 1-21.
- Bingna, H., Feifei, C., Yue, S., Kun, Q., Yan, W., Changjiao, S., Xiang, Z. et al. 2018. Advances in targeted pesticides with environmentally responsive controlled release by nanotechnology. *Nanomaterials (Basel, Switzerland)*, 8(2): 102 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3390/nano8020102>
- Björkman, C., y Niemelä, P. 2015. *Climate change and insect pests*. Wallingford, Reino Unido, CABI.
- Bonello, P., Campbell, F.T., Cipollini, D., Conrad, A.O., Farinas, C., Gandhi, K.J.K., Hain, F.P. et al. 2020. Invasive tree pests devastate ecosystems – a proposed new response framework. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3: 2 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2020.00002>
- Borkataki, S., Reddy, M.D., Nanda, S.P. y Taye, R.R. 2020. Climate change and its possible impact on the existence of insect pests. *Ecology, Environment and Conservation*, 26: S271-S277.
- Bosso, L., Russo, D., Febbraro, M.D., Cristinzio, G. y Zoina, A. 2016. Potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Italy: A maximum entropy model. *Phytopathologia Mediterranea*, 55: 62-72.
- Bregaglio, S., Donatelli, M. y Confalonieri, R. 2013. Fungal infections of rice, wheat, and grape in Europe in 2030-2050. *Agronomy for Sustainable Development*, 33: 767-776.
- Burne, A.R. 2019. Pest risk assessment: *Halyomorpha halys* (Brown marmorated stink bug). Versión 1, junio de 2019. Ministry for Primary Industries, Nueva Zelanda.
- Butterworth, M.H., Semenov, M.A., Barnes, A., Moran, D., West, J.S. y Fitt, B.D.L. 2010. North-south divide: Contrasting impacts of climate change on crop yields in Scotland and England. *Journal of the Royal Society Interface*, 7: 123-130.

- CABI.** 2021a. *Bursaphelenchus xylophilus* (pinewilt nematode) datasheet. In: *Invasive Species Compendium* [en línea]. Wallingford, Reino Unido, CABI. [Acceso: 16 de marzo de 2021]. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/10448#todistribution>
- CABI.** 2021b. *Agrilus planipennis* (emerald ash borer) datasheet. In: *Invasive Species Compendium* [en línea]. Wallingford, Reino Unido, CABI. [Acceso: 19 de marzo de 2021]. <https://www.cabi.org/isc/datasheet/3780#todistribution>
- CABI.** 2021c. *Bactrocera oleae* (olive fruit fly) datasheet. In: *Invasive Species Compendium* [en línea]. Wallingford, Reino Unido, CABI. [Acceso: 19 de marzo de 2021].
- Carvajal-Yepes, M., Cardwell, K., Nelson, A., Garrett, K.A., Giovani, B., Saunders, D., Kamoun, S. et al.** 2019. A global surveillance system for crop diseases. *Science*, 364: 1237-1239.
- Castellanos-Frias, D., de Leon, D.G., Bastida, F. y Gonzalez-Andujar, J.L.** 2016. Predicting global geographical distribution of *Lolium rigidum* (rigid ryegrass) under climate change. *The Journal of Agricultural Science*, 154: 755-764.
- Castillo, N.E.T., Melchior-Martinez, E.M., Sierra, J.S.O., Ramirez-Mendoza, R.A., Parra-Saldivar, R. y Iqbal, H.M.N.** 2020. Impact of climate change and early development of coffee rust – an overview of control strategies to preserve organic cultivars in Mexico. *Science of the Total Environment*, 738: 140225.
- Chakraborty, S., y Newton, A.C.** 2011. Climate change, plant diseases and food security: An overview. *Plant Pathology*, 60: 2-14.
- Chakraborty, S., Pangga, I.B. y Roper, M.M.** 2012. Climate change and multitrophic interactions in soil: The primacy of plants and functional domains. *Global Change Biology*, 18: 2111-2125.
- Chang, F.P., Kuang, L.Y., Huang, C.A., Jane, W.N., Hung, Y., Hsing, Y.I. y Mou, C.Y.** 2013. A simple plant gene delivery system using mesoporous silica nanoparticles as carriers. *Journal of Materials Chemistry B: Materials for Biology and Medicine*, 1(39): 5279-5287 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1039/c3tb20529k>
- Chen, J., y Henny, R.J.** 2006. Somaclonal variation: An important source for cultivar development of floriculture crops. En J.A. Teixeira da Silva, ed. *Floriculture, ornamental and plant biotechnology, Volume II*, págs. 244-253. London, Global Science Books.
- Choudhary, J.S., Kumari, M. y Fand, B.B.** 2019. Linking insect pest models with climate change scenarios to project against future risks of agricultural insect pests. *CAB Reviews*, 14: 055 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://www.cabi.org/cabreviews/review/20193460085>
- Cilas, C., y Bastide, P.** 2020. Challenges to cocoa production in the face of climate change and spread of pests and diseases. *Agronomy*, 10: 1232 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3390/agronomy10091232>
- Clements, D.R., y DiTommaso, A.** 2011. Climate change and weed adaptation: Can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted? *Weed Research*, 51: 227-240.
- Clements, D.R., DiTommaso, A. y Hyvönen, T.** 2014. Ecology and management of weeds in a changing climate. En B.S. Chauhan y G. Mahajan, eds. *Recent advances in weed management*, págs. 13-37. New York, USA, Springer Science + Business Media.
- Cooke, D.E.L., Cano, L.M., Raffaele, S., Bain, R.A., Cooke, L.R., Etherington, G.J., Deahl, K.L. et al.** 2012. Genome analyses of an aggressive and invasive lineage of the Irish potato famine pathogen. *PLoS Pathogens* 8(10): e1002940 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.ppat.1002940>
- Cornara, D., Morente, M., Markheiser, A., Bodino, N., Tsai, C.-W., Fereres, A., Redak, R.A., Perring, T.M. y Lopes, J.R.S.** 2019. An overview on the worldwide vectors of *Xylella fastidiosa*. *Entomologia Generalis*, 39(3-4): 157-181.
- Cunningham, F.J., Goh, N.S., Demirer, G.S., Matos, J.L. y Landry, M.P.** 2018. Nanoparticle-mediated delivery towards advancing plant genetic engineering. *Trends in Biotechnology*, 36(9): 882-897.

- Daughtrey, M., y Buitenhuis, R.** 2020. Integrated pest and disease management in greenhouse ornamentals. En M.L. Gullino, R. Albajes y P.C. Nicot, eds. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*, págs. 625-679. Dordrecht, The Netherlands, Springer Nature.
- Day, R., Quinlan, M. y Ogotu, W.** 2006. *Analysis of the application of the phytosanitary capacity evaluation tool*. Report to the Secretariat of the International Plant Protection Convention.
- Debelo, D.G.** 2020. Predictions of climate change impacts on agricultural insect pests vis-à-vis food crop productivity: A critical review. *Ethiopian Journal of Science and Sustainable Development*, 7: 18-26.
- Delcour, I., Spanoghe, P. y Uyttendaele, M.** 2015. Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Research International*, 68: 7-15.
- Delucia, E.H., Nabity, P.D., Zavala, J.A. y Berenbaum, M.R.** 2012. Climate change: Resetting plant-insect interactions. *Plant Physiology*, 160: 1677-1685.
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Huey, R.B., Shelton, K.S., Ghalambor, C.K., Haak, D.C. y Martin, P.R.** 2008. Impacts of climate warming on terrestrial ectotherms across latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 105: 6668-6672.
- Deutsch, C.A., Tewksbury, J.J., Tigchelaar, M., Battisti, D.S., Merrill, S.C., Huey, R.B. y Naylor, R.L.** 2018. Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science*, 361: 915919.
- Diamond, S.E.** 2018. Contemporary climate-driven range shifts: Putting evolution back on the table. *Functional Ecology*, 32: 1652-1665.
- Dilling, L., Daly, M.E., Travis, W.R., Wilhelmi, O.V. y Klein, R.A.** 2015. The dynamics of vulnerability: Why adapting to climate variability will not always prepare us for climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 6: 413-425.
- Dita, M., Barquero, M., Heck, D., Mizubuti, E.S.G. y Staver, C.P.** 2018. Fusarium wilt of banana: Current knowledge on epidemiology and research needs toward sustainable disease management. *Frontiers in Plant Science*, 9: 1468 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01468>
- Diyanat, M., Saeidian, H., Baziar, S. y Mirjafary, Z.** 2019. Preparation and characterization of polycaprolactone nanocapsules containing pretilachlor as a herbicide nanocarrier. *Environmental Science and Pollution Research International*, 26(21): 21579-21588 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05257-0>
- Donovan, G.H., Butry, D.T., Michael, Y.L., Prestemon, J.P., Liebhold, A.M., Demetrios Gatzolis, D. y Mao, M.Y.** 2013. The relationship between trees and human health: Evidence from the spread of the emerald ash borer. *American Journal of Preventive Medicine*, 44(2): 139-145.
- Duan, J.J., Bauer, L.S., Van Driesche, R., Schmude, J.M., Petrice, T., Chandler, J.L. y Elkinton, J.** 2020. Effects of extreme low winter temperatures on the overwintering survival of the introduced larval parasitoids *Spathius galinae* and *Tetrastichus planipennisi*: Implications for biological control of emerald ash borer in North America. *Journal of Economic Entomology*, 113: 1145-1151.
- Duncan, L.W.** 2009. Managing nematodes in citrus orchards. En A. Ciancio y K.G. Mukerji, eds. *Integrated management of fruit crops and forest nematodes*, págs. 135-173. Dordrecht, The Netherlands, Springer Science+Business Media B.V.
- Duran, A., Gryzenhout, M., Slippers, B., Ahumada, R., Rotella, A., Flores, F., Wingfield, B.D. y Wingfield, M.J.** 2008. *Phytophthora pinifolia* sp. nov. associated with a serious needle disease of Pinus radiata in Chile. *Plant Pathology*, 57: 715-727.
- Eastburn, D.M., McElrone, A.J. y Bilgin, D.D.** 2011. Influence of atmospheric and climate change on plant-pathogen interactions. *Plant Pathology*, 60: 54-69.
- Edmonds, R.L.** 2013. General strategies of forest disease management. En P. Gonthier y G. Nicolotti, eds. *Infectious forest diseases*, págs. 29-49. Wallingford, Reino Unido y Boston, EE.UU., CABI.

- Eigenbrode, S.D., Davis, T.S. y Crowder, D.W.** 2015. Climate change and biological control in agricultural systems: Principles and examples from North America. En C. Björkman y P. Niemelä, eds. *Climate change and insect pests*, págs. 119-135. Wallingford, Reino Unido, CABI.
- El-Mergawy, R.A.A.M., y Al-Ajlan, A.M.** 2011. Red palm weevil, *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier): Economic importance, biology, biogeography, and integrated pest management. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 1: 1-23.
- El-Sabea, A.M., Faleiro, J. y Abo-El-Saad, M.M.** 2009. The threat of red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* to date plantations of the Gulf region in the Middle-East: An economic perspective. *Outlooks on Pest Management*, 20(3): 131-134.
- Erikson, L., y Griffin, R.** 2014. The international regulatory framework. En G. Gordh y S. McKirdy, eds. *The handbook of plant biosecurity*, págs. 27-44. Dordrecht, Países Bajos, Springer Science+Business Media.
- Evans, N., Baierl, A., Semenov, M.A., Gladders, P. y Fitt, B.D.L.** 2008. Range and increase of a plant disease increased by global warming. *Journal of the Royal Society Interface*, 5: 625-631.
- Fahim, M.A., Hassanein, M.K. y Mostafa, M.H.** 2003. Relationships between climatic conditions and potato late blight epidemic in Egypt during winter seasons 1999-2001. *Applied Ecology and Environmental Research*, 1(1-2): 159-172.
- Fahim, M.A., Hassanein, M.K., Abou Hadid, A.F. y Kadah, M.S.** 2011. Impacts of climate change on the widespread and epidemics of some tomato diseases during the last decade in Egypt. *Acta Horticulturae*, 914: 317-320.
- Falco, S.D., Adinolfi, F., Bozzola, M. y Capitanio, F.** 2014. Crop insurance as a strategy for adapting to climate change. *Journal of Agricultural Economics*, 65: 485-504.
- FANFC/Banco Mundial.** 2011. *El cambio climático y el comercio: La relación con las normas sanitarias y fitosanitarias*. Documento elaborado conjuntamente por el Banco Mundial, Grupo de investigaciones sobre el desarrollo, comercio e integración internacional (DECTI) y por el Fondo para la Aplicación de Normas y el Fomento del Comercio (FANFC). 26 págs. Ginebra, OMC, (disponible en: https://www.standardsfacility.org/sites/default/files/STDF_Climate_Change_SP_0.pdf).
- FAO.** 2008. *Climate-related transboundary pests and diseases. Technical background document from the Expert consultation held on 25 to 27 February 2008*. Roma, FAO, 59 págs. (disponible en: <http://www.fao.org/3/a-ai785e.pdf>).
- FAO.** 2020. *Red palm weevil: Guidelines on management practices*. Roma, FAO, ix + 86 págs. (disponible en: <https://doi.org/10.4060/ca7703en>).
- FAO.** 2021a. *Desert locust upsurge – progress report on the response in Southwest Asia (May-December 2020)*. Roma, FAO, 18 págs. (disponible en: <http://www.fao.org/3/cb2358en/cb2358en.pdf>).
- FAO.** 2021b. *Strategic framework for the International Plant Protection Convention (IPPC) 2020-2030. Protecting global plant resources and facilitating safe trade*. Roma. Publicado por la FAO en nombre de la Secretaría de la CIPF. 40 págs. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- Fedchock, C., Gould, W.P., Hennessey, M.K., Mennig, X. y Sosa, E.** 2006. *Trip Report – Spanish lemon site visit: September 23-30, 2006*. Riverdale, EE.UU., Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de América (USDA), Servicio de Inspección Sanitaria de Animales y Plantas (APHIS).
- Fiaboe, K.K.M., Peterson, A.T., Kairo M.T.K. y Roda, A.L.** 2012. Predicting the potential worldwide distribution of the red palm weevil *Rhynchophorus ferrugineus* (Olivier) (Coleoptera: Curculionidae) using ecological niche modeling. *Florida Entomologist*, 95: 559-673.
- Flitters, N.E.** 1963. Observations on the effect of hurricane “Carla” on insect activity. *International Journal of Biometeorology*, 6: 85-92.
- Frank, S.D.** 2020. Review of the direct and indirect effects of warming and drought on scale insect pests of forest systems. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, cpaa033 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa033>

- Frem, M., Chapman, D., Fucilli, V., Choueiri, E., Moujabber, M.E., Notte, P.L. y Nigro, F.** 2020. *Xylella fastidiosa* invasion of new countries in Europe, the Middle East and North Africa: Ranking the potential exposure scenarios. *NeoBiota*, 59: 77-97 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3897/neobiota.59.53208>
- Fussmann, K.E., Schwarzmüller, F., Brose, U., Jousset, A. y Rall, B.C.** 2014. Ecological stability in response to warming. *Nature Climate Change*, 4: 206-210.
- García-Bastidas, F.A., Quintero-Vargas, Ayala-Vasquez, M., Schermer, T, Seidl, M.F., Santos-Paiva, M., Noguera A.M.** et al. 2019. First report of Fusarium wilt tropical race 4 in Cavendish bananas caused by *Fusarium odoratissimum* in Colombia. *Plant Disease*. [en línea] [Acceso: 31 de marzo de 2020]. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-19-1922-PDN>
- Garibaldi, A., y Gullino, M.L.** 1995. Focus on critical issues in soil and substrate disinfestation towards the year 2000. *Acta Horticulturae*, 382: 21-36.
- Garibaldi, L., Kitzberger, T. y Chaneton, E.J.** 2011. Environmental and genetic control of insect abundance and herbivory along a forest elevational gradient. *Oecologia*, 167: 117-129.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R.I., Andersen, K.F., Choudhury, R.A., Dantes, W., Fayette, J., Fulton, J.C., Poudel, R. y Staub, C.G.** 2020a. Adapting disease management systems under global change. En J.B. Ristaino y A. Records, eds. *Emerging plant diseases and global food security*, págs. 1-13. St. Paul, EE.UU, APS Press.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R., Andersen, K.F., Brawner, J., Choudhury, R., Delaquis, E., Fayette, J., Poudel, R., Purves, D. y Rothschild, J.** 2020b. Effective altruism as an ethical lens on research priorities. *Phytopathology*, 110: 708-722.
- Garrett, K.A., Dendy, S.P., Frank, E.E., Rouse, M.N. y Travers, S.E.** 2006. Climate change effects on plant disease: Genomes to ecosystems. *Annual Review of Phytopathology*, 44: 489-509.
- Garrett, K.A., Nita, M., De Wolf, E.D., Esker, P.D., Gomez-Montano, L. y Sparks, A.H.** 2016. Plant pathogens as indicators of climate change. En T.M. Letcher, ed. *Climate change: Observed impacts on planet Earth*, 2nd ed., págs. 325-338. Amsterdam, The Netherlands, Elsevier.
- Garrett, K.A., Alcalá-Briseño, R.I., Andersen, K.F., Buddenhagen, C.E., Choudhury, R.A., Fulton, J.C., Hernandez Nopsa, J.F., Poudel, R. y Xing, Y.** 2018. Network analysis: A systems framework to address grand challenges in plant pathology. *Annual Review of Phytopathology*, 56: 559-580.
- Garrett, K.A., Nita, M., De Wolf, E.D., Esker, P.D., Gomez-Montano, L. y Sparks, A.H.** 2021. Plant pathogens as indicators of climate change. En T.M. Letcher, ed. *Climate change: Observed impacts on planet Earth*, 3.a ed., págs. 499-513. Amsterdam, Países Bajos, Elsevier.
- Ge X., He, S., Wang, T., Yan, W. y Zong, S.** 2015. Potential distribution predicted for *Rhynchophorus ferrugineus* in China under different climate warming scenarios. *PLoS ONE* 10(10): e0141111 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0141111>
- Ghini, R., Bettiol, W. y Hamada, E.** 2011. Diseases in tropical plantation crops as affected by climate changes: Current knowledge and perspectives. *Plant Pathology*, 60: 122-132.
- Ghini, R., Hamada, E. y Bettiol, W.** 2008. Climate change and plant diseases. *Scientia Agrícola*, 65: 98-107.
- Ghini, R., Hamada, E. y Bettiol, W.** 2011. *Impactos das mudanças climáticas sobre doenças de importantes culturas no Brasil*. Brasília, DF., Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente.
- Ghini, R., Hamada, E., Pedro Júnior, M.J. y Gonçalves, R.R.V.** 2011. Incubation period of *Hemileia vastatrix* in coffee plants in Brazil simulated under climate change. *Summa Phytopathologica*, 37: 85-93.
- Gilardi, G., Garibaldi, A. y Gullino, M.L.** 2018. Emerging pathogens as a consequence of globalization and climate change: Leafy vegetables as a case study. *Phytopathologia Mediterranea*, 57: 146-152.

- Gilardi, G., Gisi, U., Garibaldi, A. y Gullino, M.L.** 2017. Effect of elevated atmospheric CO₂ and temperature on the chemical and biological control of powdery mildew of zucchini and the Phoma leaf spot of leaf beet. *European Journal Plant Pathology*, 148: 229-236.
- Giovani, B., Blümel, S., Lopian, R., Teulon, D., Bloem, S., Galeano Martínez, C., Beltrán, Montoya, C. et al.** 2020. Science diplomacy for plant health. *Nature Plants* 6, 902-905.
- Gitaitis, R., y Walcott, R.** 2007. The epidemiology and management of seedborne bacterial diseases. *Annual Review of Phytopathology*, 45: 371-397.
- Godefroid, M., Cruaud, A., Rossi, J.P. y Rasplus, J.Y.** 2015. Assessing the risk of invasion by tephritid fruit flies: Intraspecific divergence matters. *PLoS ONE*, 10: e0135209 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135209>
- Godefroid, M., Cruaud, A., Streito, J.C., Rasplus, J.Y. y Rossi, J.P.** 2018. Climate change and the potential distribution of *Xylella fastidiosa* in Europe. *bioRxiv*, hal-02791548f [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://hal.inrae.fr/hal-02791548/document>
- Godefroid, M., Cruaud, A., Streito, J.C., Rasplus, J.Y. y Rossi, J.P.** 2019. *Xylella fastidiosa*: Climate suitability of European continent. *Scientific Reports*, 9: 8844 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45365-y>
- Godefroid, M., Morente, M., Schartel, T., Cornara, D., Purcell, A., Gallego, D., Moreno, A., Pereira, J.A. y Fereres, A.** 2020. The risk of *Xylella fastidiosa* outbreaks will decrease in the Mediterranean olive-producing regions. *bioRxiv* [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1101/2020.07.16.206474>
- Goergen, G., Kumar, P.L., Sankung, S.B., Togola, A. y Tamò, M.** 2016. First report of outbreaks of the fall armyworm *Spodoptera frugiperda* (J E Smith) (Lepidoptera, Noctuidae), a new alien invasive pest in West and Central Africa. *PLoS ONE* 11(10): e0165632. [en línea]. [Acceso: 15 de marzo de 2021]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0165632>
- Goswami, A., Roy, I., Sengupta, S. y Debnath, N.** 2010. Novel applications of solid and liquid formulations of nanoparticles against insect pests and pathogens. *Thin solid films*, 519(3): 1252-1257.
- Gouache, D., Bensadoun, A., Brun, F., Page, C., Makowski, D. y Wallach, D.** 2013. Modelling climate change impact on *Septoria tritici* blotch (STB) in France: Accounting for climate model and disease uncertainty. *Agricultural and Forest Meteorology*, 170: 242-252.
- Gouache, D., Roche, R., Pieri, P. y Bancal, M.O.** 2011. Evolution of some pathosystems on wheat and vines. En N. Brisson y F. Levrault, eds. *The green book of the CLIMATOR project (2007-2010): Climate change, agriculture, and forests in France – simulations of the impacts on the main species*, Section B5 Health, The Topics, págs. 113-126. France, Agency for the Environment and Energy Management (ADEME).
- Gregory, P.J., Johnson, S.N., Newton, A.C. y Ingram, J.S.I.** 2009. Integrating pests and pathogens into the climate change/food security debate. *Journal of Experimental Botany*, 60: 2827-2838.
- Grillo, R., Dos Santos, N.Z.P., Maruyama, C.R., Rosa, A.H., de Lima, R. y Fraceto, L.F.** 2012. Poly(ε-caprolactone) nanocapsules as carrier systems for herbicides: Physico-chemical characterization and genotoxicity evaluation. *Journal of hazardous materials*, 231-232: 1-9.
- Grünig, M., Mazzi, D., Calanca, P., Karger, D.N. y Pellissier, L.** 2020. Crop and forest pest metawebs shift towards increased linkage and suitability overlap under climate change. *Communications Biology*, 3: 233 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-0962-9>
- Gullino, M.L. y Munkvold, G., eds.** 2014. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*. Dordrecht, The Netherlands, Springer. 136 págs.

- Gullino, M.L., Gilardi, G. y Garibaldi, A.** 2014a. Seed-borne pathogens of leafy vegetable crops. En M.L. Gullino y G. Munkvold, eds. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*, págs. 47-53. Dordrecht, Países Bajos, Springer.
- Gullino, M.L., Gilardi, G. y Garibaldi, A.** 2014b. Chemical and non-chemical seed dressing for leafy vegetable crops. En M.L. Gullino y G. Munkvold, eds. *Global perspectives on the health of seeds and plant propagation material*, págs. 125-136. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Gullino, M.L., Gilardi, G. y Garibaldi, A.** 2019. Ready-to-eat salad crops: a plant pathogen's heaven. *Plant Disease* 103: 2153-2170.
- Gullino, M.L., Pugliese, M., Gilardi, G. y Garibaldi, A.** 2018. Effect of increased CO₂ and temperature on plant diseases: A critical appraisal of results obtained in studies carried out under controlled environment facilities. *Journal of Plant Pathology*, 100: 371-389.
- Gullino, M.L., Pugliese, M., Paravicini, A., Casulli, E., Rettori, A., Sanna, M. y Garibaldi, A.** 2011. New phytotron for studying the effect of climate change on plant pathogens. *Journal of Agricultural Engineering*, 1: 1-11.
- Gullino, M.L., Tabone, G., Gilardi, G. y Garibaldi, A.** 2020. Effects of elevated atmospheric CO₂ and temperature on the management of powdery mildew of zucchini. *Journal of Phytopathology*, 168: 405-415.
- Gutierrez, A.P., Ponti, L. y Cossu, Q.A.** 2009. Effects of climate warming on Olive and olive fly (*Bactrocera oleae* (Gmelin)) in California and Italy. *Climatic Change*, 95: 195-217.
- Haack, R.A., Jendek, E., Liu, H.P., Marchant, K.R., Petrice, T.R., Poland, T.M. y Ye, H.** 2002. The emerald ash borer: A new exotic pest in North America. *Newsletter of the Michigan Entomological Society*, 47: 1-5.
- Hakata, M., Wada, H., Masumoto-Kubo, C., Tanaka, R., Sato, H. y Morita, S.** 2017. Development of a new heat tolerance assay system for rice spikelet sterility. *Plant Methods*, 13(1): 34 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1186/s13007-017-0185-3>
- Hannukkala, A.O., Kaukoranta, T., Lehtinen, A. y Rahkonen, A.** 2007. Late-blight epidemics on potato in Finland, 1933-2002: Increased and earlier occurrence of epidemics associated with climate change and lack of rotation. *Plant Pathology*, 56: 167-176.
- Harvell, C.D., Mitchell, C.E., Ward, J.R., Altizer, S., Dobson, A.P., Ostfeld, R.S. y Samuel, M.D.** 2002. Climate warming and disease risk for terrestrial and marine biota. *Science*, 296: 2158-2162.
- Harvey, J.A., Heinen, R., Gols, R. y Thakur, M.P.** 2020. Climate change-mediated temperature extremes and insects: From outbreaks to breakdowns. *Global Change Biology*, 26: 6685-6701.
- Heeb, L., Jenner, E. y Cock, M.J.W.** 2019. Climate-smart pest management: Building resilience of farms and landscapes to changing pest threats. *Journal of Pest Science*, 92: 951-969.
- Heltberg, R., Siegel, P.B. y Jorgensen, S.L.** 2009. Addressing human vulnerability to climate change: Toward a 'no-regrets' approach. *Global Environmental Change*, 19: 89-99.
- Heraud, J.** 2018. Blue River Technology. *Resource*, 25(6): 12-12.
- Herms, D.A., y McCullough, D.G.** 2014. Emerald ash borer invasion of North America: History, biology, ecology, impacts, and management. *Annual Review of Entomology*, 59: 13-30.
- Hill, M.P., y Thomson, L.J.** 2015. Species distribution modelling in predicting response to climate change. En C. Björkman y P. Niemelä, eds. *Climate change and insect pests*, págs 16-37. Wallingford, Reino Unido, CABI.
- Hoffmann, A.A., Rymer, P.D., Byrne, M., Ruthrof, K.X., Whinam, J., McGeoch, M., Bergstrom, D.M. et al.** 2019. Impacts of recent climate change on terrestrial flora and fauna: Some emerging Australian examples. *Austral Ecology*, 44: 3-27.

- Howden, S.M., Gifford, R.G. y Meinke, H.** 2010. Grains. En C. Stokes y M. Howden, eds. *Adapting agriculture to climate change: Preparing Australian agriculture for the future*, págs. 21-40. Melbourne, Australia, CSIRO.
- Hu, J., Angeli, S., Schuetz, S, Luo, Y. y Hajek, A.E.** 2009. Ecology and management of exotic and endemic Asian longhorned beetle *Anoplophora glabripennis*. *Agricultural and Forest Entomology*, 11: 359-375.
- Huang, J., y Hao, H.** 2020. Effects of climate change and crop planting on the abundance of cotton bollworm, *Helicoverpa armigera* (Hübner) (Lepidoptera: Noctuidae). *Ecology and Evolution*, 10: 1324-1338.
- Hunjan, M.S., y Lore, J.S.** 2020. Climate change: Impact on plant pathogens, diseases, and their management. En K. Jabran, S. Florentine y B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, págs. 85–100. Springer International Publishing.
- Ikegami, M., y Jenkins, T.A.R.** 2018. Estimate global risks of a forest disease under current and future climates using distribution model and simple thermal model – pine wilt disease as a model case. *Forest Ecology and Management*, 409: 343-352.
- Ingram, J.S.I., Gregory, P.J. y Izac, A.-M.** 2008. The role of agronomic research in climate change and food security policy. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 126(1-2): 4-12.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).** 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [T.F. Stocker, D. Qin, D., G.-K. Plattner, M.B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, EE.UU., 1535 págs.
- IPCC.** 2014a. *Climate change 2014: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (R.K. Pachauri y L.A. Meyer coords.). Ginebra, Suiza, IPCC. 151 págs. (disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/AR5_SYR_FINAL_Front_matters.pdf).
- IPCC.** 2014b. Summary for policymakers. En: *Climate Change, 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea y L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, EE.UU., págs. 32. (disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar5_wgII_spm_en.pdf).
- IPCC.** 2018. *Global warming of 1.5 °C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5 °C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty.* (V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani et al., eds.) Geneva, Switzerland, IPCC. 630 págs.
- IPCC.** 2019a. *Special Report on Climate Change and Land* [en línea]. [Acceso: 19 de marzo de 2021]. <https://www.ipcc.ch/srccl/>
- IPCC.** 2019b. *Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate* [en línea]. [Acceso: 19 de marzo de 2021]. <https://www.ipcc.ch/srocc/>
- Iscaro, J.** 2014. The impact of climate change on coffee production in Colombia and Ethiopia. *Global Majority E-Journal*, 5: 33-43.
- Jabran, K., Florentine, S. y Chauhan, B.S.** 2020. Impacts of climate change on weeds, insect pests, plant diseases and crop yields: Synthesis. En K. Jabran, S. Florentine y B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, págs. 189-196. Springer International Publishing.
- Jactel, H, Koricheva, J. y Castagneyrol, B.** 2019. Responses of forest insect pests to climate change: Not so simple. *Current Opinion in Insect Science*, 35: 103-108.
- Jactel, H., Desprez-Loustau, M.L., Battisti, A., Brockerhoff, E., Santini, A., Stenlid, A., Björkman, C. et al.** 2020. Pathologists and entomologists must join forces against forest pest and pathogen invasions. *NeoBiota*, 58: 107-127.

- Janse, J.D., y Obradovic, A. 2010. *Xylella fastidiosa*: Its biology, diagnosis, control and risks. *Journal of Plant Pathology*, 92: 35-48.
- Jeger, M., Bragard, C., Caffier, D., Candresse, T., Chatzivassiliou, E., Dehne-Schmutz, K., Gilioli, G. et al. 2018. Pest risk assessment of *Spodoptera frugiperda* for the European Union. *EFSA Journal*, 16(8): 5351 [en línea]. [Acceso: 6 de abril de 2021]. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2018.5351>.
- Jeger, M.J., y Pautasso, M. 2008. Plant disease and global change – the importance of long-term data sets. *New Phytologist*, 177: 8-11.
- Jones, J.T., Haegeman, A., Danchin, E.G.J., Gaur, H.S., Helder, J., Jones, M.G.K., Kikuchi, T. et al. 2013. Top 10 plant-parasitic nematodes in molecular plant pathology. *Molecular Plant Pathology*, 14: 946-961.
- Jones, R.A.C. 2016. Future scenarios for plant virus pathogens as climate change progresses. *Advances in Virus Research*, 95: 87-147.
- Jönsson A.M., Harding S., Krokene P., Lange H., Lindelöw Å., Økland B. y Ravn H.P. y Schroeder, M. 2011. Modelling the potential impact of global warming on *Ipstypographus* voltinism and reproductive diapause. *Climatic Change*, 109, 606-718.
- Junk, J., Jonas, M. y Eickermann, M. 2016. Assessing meteorological key factors influencing crop invasion by pollen beetle (*Meligethes aeneus* F.) – past observations and future perspectives. *Meteorologische Zeitschrift*, 25: 357-364.
- Juroszek, P., y von Tiedemann, A. 2011. Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. *Plant Pathology*, 60: 100-112.
- Juroszek, P., y von Tiedemann, A. 2013a. Plant pathogens, insect pests and weeds in a changing global climate: A review of approaches, challenges, research gaps, key studies and concepts. *The Journal of Agricultural Science*, 151: 163-188.
- Juroszek, P., y von Tiedemann, A. 2013b. Climatic changes and potential future risks through wheat diseases. *European Journal of Plant Pathology*, 136: 21-33.
- Juroszek, P., y von Tiedemann, A. 2013c. Climatic changes and the potential future importance of maize diseases: A short review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 120: 49-56.
- Juroszek, P., y von Tiedemann, A. 2015. Linking plant disease models to climate change scenarios to project future risks of crop diseases: A review. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122: 3-15.
- Juroszek, P., Racca, P., Link, S., Farhumand, J. y Kleinhenz, B. 2020. Overview on the review articles published during the past 30 years relating to the potential climate change effects on plant pathogens and crop disease risks. *Plant Pathology*, 69: 179-193.
- Karaca, M., y Dursun, S.S. 2020. Possible effects of climate change on weeds in agriculture. *Selcuk Journal of Agriculture and Food Sciences*, 34: 111-117.
- Karkanis, A., Ntatsi, G., Alemardan, A., Petropoulos, S. y Bilalis, D. 2018. Interference of weeds in vegetable crop cultivation, in the changing climate of Southern Europe with emphasis on drought and elevated temperatures: A review. *The Journal of Agricultural Science*, 156: 1175-1185.
- Kellermann, V., y van Heerwaarden, B. 2019. Terrestrial insects and climate change: Adaptive responses in key traits. *Physiological Entomology*, 44: 99-115.
- Kimathi, E., Tonnang, H.E.Z., Subramanian, S., Cressman, K., Abdel-Rahman, E.M., Tesfayohannes, M., Niassy, S., Torto B. et al. 2020. Prediction of breeding regions for the desert locust *Schistocerca gregaria* in East Africa. *Scientific Reports* 10: 11937 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-68895-2>

- King, M., Altdorff, D., Li, P., Galagedara L., Holden, J. y Unc, A. 2018. Northward shift of the agricultural climate zone under 21st-century global climate change. *Scientific Reports* 8: 7904 [en línea]. [Acceso: 31 de marzo de 2021]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26321-8>
- Kocmánková, E., Trnka, M., Eitzinger, J., Dubrovský, M., Štěpánek, P., Semerádová, D., Balek, J. *et al.* 2011. Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests at high spatial resolution: A novel approach. *The Journal of Agricultural Science*, 149: 185-195.
- Koo, T.H., Hong, S.J. y Yun, S.C. 2016. Changes in the aggressiveness and fecundity of hot pepper anthracnose pathogen (*Colletotrichum acutatum*) under elevated CO₂ and temperature over 100 infection cycles. *The Plant Pathology Journal*, 32: 260-265.
- Koricheva, J., y Larsson, S. 1998. Insect performance on experimentally stressed woody plants: A meta-analysis. *Annual Review Entomology*, 43: 195-216.
- Korres, N.E., Norsworthy, J.K., Tehranchian, P., Gitsopoulos, T.K., Loka, D.A., Oosterhuis, D.M., Gealy, D.R. *et al.* 2016. Cultivars to face climate change effects on crops and weeds: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 36: 12 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1007/s13593-016-03505>
- Kremer, P., Schlüter, J., Racca, P., Fuchs, H.J. y Lang, C. 2016. Possible impact of climate change on the occurrence and the epidemic development of cercospora leaf spot disease (*Cercospora beticola* sacc.) in sugar beets for Rhineland-Palatinate and the southern part of Hesse. *Climatic Change*, 137: 481-494.
- Kriticos, D.J., Watt, M.S., Potter, K.J.B., Mannig, L.K., Alexander, N.S. y Tallent-Halsell, N. 2011. Managing invasive weeds under climate change: Considering the current and potential future distribution of *Buddleja davidii*. *Weed Research*, 51: 85-96.
- Kumar, N., y Khurana, S.M.P. 2020. Invasion of major fungal diseases in crop plants and forest trees due to recent climate fluctuations. En A. Raj, M.K. Jhariya, D.K. Yadav y A. Banerjee, eds. *Climate Change and Agroforestry Systems: Adaptation and Mitigation Strategies*, Chapter 8, págs. 209-236. Burlington, Canada, Apple Academic Press.
- Launay, M., Caubel, J., Bourgeois, G., Huard, F., de Cortazar-Atauri, I.G., Bancal, M.O. y Brisson N. 2014. Climatic indicators for crop infection risk: Application to climate impacts on five major foliar fungal diseases in Northern France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 197: 147158.
- Launay, M., Zurfluh, O., Huard, F., Buis, F., Bourgeois, G., Caubel, J., Huber, L. y Bancal, M.O. 2020. Robustness of crop disease response to climate change signal under modelling uncertainties. *Agricultural Systems*, 178: 102733.
- Leguizamón, E.S., y Acciaresi, H.A. 2014. Climate change and the potential spread of *Sorghum halepense* in the central area of Argentina based on growth, biomass allocation and eco-physiological traits. *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, 26: 101-113.
- Lehmann, P., Ammunet, T., Barton, M., Battisti, A., Eigenbrode, S.D., Jepsen, J.U., Kalinkat, G. *et al.* 2020. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 18: 141-150.
- Liang, L., y Fei, S. 2014. Divergence of the potential invasion range of emerald ash borer and its host distribution in North America under climate change. *Climatic Change*, 122: 735-746.
- Liebhold, A.M., y Kean, J.M. 2019. Eradication and containment of non-native forest insects: Successes and failures. *Journal of Pest Science*, 92: 83-91.
- Lipper, L., Thornton, P., Campbell, B.M., Baedeker, T., Braimoh, A., Bwalya, M., Caron, P., Cattaneo, A., Garrity, D. y Henry, K. 2014. Climate-smart agriculture for food security. *Nature Climate Change*, 4: 1068-1072.
- Litkas, V.D., Migeon, A., Navajas, M., Tixier, M.S. y Stavrinides, M.C. 2019. Impacts of climate change on tomato, a notorious pest and its natural enemy: Small scale agriculture at higher risk. *Environmental Research Letters*, 14: 084041 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab3313>

- Liu, T., Wan, A., Liu, D. y Chen, X.** 2017. Changes of races and virulence genes in *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici*, the wheat stripe rust pathogen, in the United States from 1968 to 2009. *Plant Disease*, 101: 1522-1532.
- Lopian, R.** 2018. *Climate change, sanitary and phytosanitary measures and agricultural trade. The state of agricultural commodity markets (SOCO) 2018: Background paper*. Roma, FAO. 48 págs. (disponible en: <http://www.fao.org/3/CA2351EN/ca2351en.pdf>).
- Loustau, D., Ogee J., Dufrene, E., Deque, M., Duponey, J.I., Badeau, V., Viovy, N. et al.** 2007. Impacts of climate change on temperate forests and interaction with management. En P.H. Freer-Smith, M.S.J. Broadmeadow y J.M. Lynch, eds. *Forestry and climate change*, págs. 243-250. Wallingford, Reino Unido, CABI.
- Luck, I., Spackman, M., Freeman, A., Trebicki, P., Griffiths, W., Finlay, K. y Chakraborty S.** 2011. Climate change and diseases of food crops. *Plant Pathology*, 60: 113-121.
- Luo, Y., TeBeest, D.O., Teng, P.S. y Fabellar, N.G.** 1995. Simulation studies on risk analysis of rice blast epidemics associated with global climate change in several Asian countries. *Journal of Biogeography*, 22: 673-678.
- Luo, Y., Teng, P.S., Fabellar, N.G. y TeBeest, D.O.** 1998. The effects of global temperature change on rice leaf blast epidemics: a simulation study in three agroecological zones. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 68: 187-196.
- Macfayden, S., McDonald, G. y Hill, M. P.** 2018. From species distributions to climate change adaptation: Knowledge gaps in managing invertebrate pests in broad-acre grain crops. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 253: 208-219.
- Maclean, I.M.D.** 2020. Predicting future climate at high spatial and temporal resolution. *Global Change Biology*, 26(2): 1003-1011.
- Madgwick, J.W., West, J.S., White, R.P., Semenov, M.A., Townsend, J.A., Turner, J.A. y Fitt, B.D.L.** 2011. Impacts of climate change on wheat anthesis and fusarium ear blight in the UK. *European Journal of Plant Pathology*, 130: 117-131.
- Magan, N., Medina, A. y Aldred, D.** 2011. Possible climate-change effects on mycotoxin contamination of food crops pre-and postharvest. *Plant Pathology*, 60: 150-163.
- Manisankar, G., y Ramesh, T.** 2019. Response of weeds under elevated CO₂ and temperature: A review. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, SP2: 427-431.
- Marshall, K.E., Gotthard, K. y Williams, C.M.** 2020. Evolutionary impacts of winter climate change on insects. *Current Opinion in Insect Science*, 41: 54-62.
- Massad, T.J., y Dyer, L.A.** 2010. A meta-analysis of the effects of global environmental change on plant-herbivore interactions. *Arthropod-Plant Interactions*, 4: 181-188.
- Matzrafi, M., Seiwert, B., Reemtsma, T., Rubin, B. y Peleg, Z.** 2016. Climate change increases the risk of herbicide-resistant weeds due to enhanced detoxification. *Planta*, 244: 1217-1227.
- McConnachie, A.J., Strathie, L.W., Mersie, W., Gebrehiwot, L., Zewdie, K., Abdurehim, A., Abrha, B., Araya, T., Asaregew, F., Assefa, F., Gebre-Tsadiq, R., Nigatu, L., Tadesse, B. y Tana, T.** 2011. Current and potential geographical distribution of the invasive plant *Parthenium hysterophorus* (Asteraceae) in eastern and southern Africa. *Weed Research*, 51: 71-84.
- McCullough, D.G., Work, T.T., Cavey, J.F., Liebhold, A.M. y Marshall, D.** 2006. Interceptions of nonindigenous plant pests at US ports of entry and border crossings over a 17-year period. *Biological Invasions* 8: 611-630.
- Medina, A., Akbar, A., Baazeem, A., Rodriguez, A. y Managan, N.** 2017. Climate change, food security and mycotoxins. Do we know enough? *Fungal Biology Reviews*, 31(3): 143-154.
- Mehmood, M.Z., Afzal, O., Aslam, M.A., Riaz, H., Raza, M.A., Ahmed, S., Qadir, G. et al.** 2020. Disease modeling as a tool to assess the impacts of climate variability on plant diseases and health. En M. Ahmed, ed. *Systems modeling*, págs. 327-351. Singapore, Springer Nature Singapore.

- Melloy, P., Hollaway, G., Luck, J., Norton, R., Aitken, E. y Chakraborty, S. 2010. Production and fitness of *Fusarium pseudograminearum* inoculum at elevated carbon dioxide in FACE. *Global Change Biology*, 16: 3363-3373.
- Meurisse, N., Rassati, D., Hurley, B.P., Brockerhoff, E.G. y Haack, R.A. 2019. Common pathways by which non-native forest insects move internationally and domestically. *Journal of Pest Science*, 92: 13-27.
- Meynard, C.N., Gay, P.E., Lecoq, M., Foucart, A., Piou, C. y Chapuis, M.P. 2017. Climate-driven geographic distribution of the desert locust during recession periods: Subspecies' niche differentiation and relative risks under scenarios of climate change. *Global Change Biology*, 23: 4739-4749.
- Miedaner, T., y Juroszek, P. 2021a. Climate change will influence disease resistance breeding in wheat in Northwestern Europe. *Theoretical and Applied Genetics [en línea]*. [Acceso: 13 de marzo de 2021]. <https://doi.org/10.1007/s00122-021-03807-0>
- Miedaner, T., y Juroszek, P. 2021b. Global warming and increasing maize cultivation demand comprehensive efforts in disease and insect resistance breeding in north-western Europe. *Plant Pathology [en línea]*. [Acceso: 26 de febrero de 2021]. <https://doi.org/10.1111/ppa.13365>.
- Mikkelsen, B.L., Jørgensen, R.B. y Lyngkjær, M.F. 2014. Complex interplay of future climate levels of CO₂, ozone, and temperature on susceptibility to fungal diseases in barley. *Plant Pathology*, 64: 319-327.
- Misra, A.K., Yadav, S.B., Mishra, S.K. y Tripathi, M.K. 2020. Impact of meteorological variables and climate change on plant diseases. En P. Kumar, A.K. Tiwari, M. Kamle, Z. Abbas y P. Singh, eds. *Plant pathogens – detection and management for sustainable agriculture*, págs. 313-327. Oakville, Ontario, Canada, Apple Academic Press.
- Moriyama, M., y Numata, H. 2019. Ecophysiological responses to climate change in cicadas. *Physiological Entomology*, 44: 65-76.
- Mostert, D., Molina, A.B., Daniells, J., Fourie, G., Hermanto, C., Chao, C.P., Fabregar, E. et al. 2017. The distribution and host range of the banana Fusarium wilt fungus *Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*, in Asia. *PLoS ONE*, 12: e0181630 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0181630>
- Munkvold, G.P. 2009. Seed pathology progress in the academia and industry. *Annual Review of Phytopathology*, 47: 285-311.
- Munkvold, G.P., y Gullino, M.L. 2020. Seed and propagative material. En M.L. Gullino, R. Albajes y P.C. Nicot, eds. *Integrated pest and disease management in greenhouse crops*, págs. 331-354. Dordrecht, The Netherlands, Springer Nature.
- Naidu, V.S.G.R. 2015. Climate change, crop-weed balance, and the future of weed management. *Indian Journal of Weed Science*, 47: 288-295.
- Niblack, T.L. 2005 Soybean cyst nematode management reconsidered. *Plant Disease*, 89: 10201026.
- NIMF 5. 2018. *Glosario de términos fitosanitarios*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO.
- NIMF 6. 2018. *Vigilancia*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO.
- NIMF 2. 2019. *Marco para el análisis de riesgo de plagas*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO.
- NIMF 11. 2019. *Análisis de riesgo de plagas para plagas cuarentenarias*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO.
- NIMF 20. 2019. *Directrices sobre un sistema fitosanitario de reglamentación de importaciones*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO.
- NIMF 21. 2019. *Análisis de riesgo de plagas para plagas no cuarentenarias reglamentadas*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO.
- O'Bannon, J.H., y Tomerlin, A.T. 1973. Citrus tree decline caused by *Pratylenchus coffeae*. *Journal of Nematology*, 5: 311-316.
- OEPP (Organización Europea y Mediterránea de Protección de las Plantas). 2020a. A1 list of pests recommended for regulation as quarantine pests, version 2020-09. En *European and Mediterranean Plant Protection Organization [en línea]*. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. https://www.eppo.int/ACTIVITIES/plant_quarantine/A1_list

- OEPP.** 2020b. First report of *Spodoptera frugiperda* in Israel. EPPO Reporting Service No. 08-2020: 2020/161. En *EPPO Global Database* [en línea], París. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://gd.eppo.int/reporting/article-6839>
- OEPP.** 2021a. *Anoplophora glabripennis*. EPPO datasheets on pests recommended for regulation. En *EPPO Global Database* [en línea]. [Acceso: 20 de febrero de 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/ANOLGL/datasheet>
- OEPP.** 2021b. *Agrilus planipennis*. EPPO datasheet as updated January 2021. En: *EPPO Global Database* [en línea]. [Acceso: 20 de febrero de 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/AGRLPL/datasheet>
- OEPP.** 2021c. Current global distribution of *Bactrocera dorsalis* (DACUDO) as registered in January 2021 and reporting service articles. En *EPPO Global Database* [en línea]. [Acceso: 20 de mayo de 2021]. <https://gd.eppo.int/taxon/DACUDO/distribution> and <https://gd.eppo.int/taxon/DACUDO/reporting>
- Oliveira, H., Stolf-Moreira, R., Martinez, C., Grillo, R., Jesus, M. y Fraceto, L.** 2015. Nanoencapsulation enhances the post-emergence herbicidal activity of atrazine against mustard plants. *PLoS ONE*, 10(7): e0132971 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132971>
- Ormsby, M., y Brenton-Rule, E.** 2017. A review of global instruments to combat invasive alien species in forestry. *Biological Invasions*, 19: 3355-3364.
- Paini, D.R., Mwebaze, P., Kuhnert, P.M y Kriticos, D.J.** 2018. Global establishment threat from a major forest pest via international shipping: *Lymantria dispar*. *Scientific Reports*, 8: 13723 [en línea]. [Acceso: 12 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31871-y>
- Palmer, G., Platts, P.J., Brereton, T., Chapman, J.W., Dytham, C., Fox, R., Pearce-Higgins, J.W., Roy, D.B., Hill, J.K. y Thomas, C.D.** 2017. Climate change, climatic variation, and extreme biological responses. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 372: 20160144.
- Paraschivu, M., Cotuna, O., Paraschivu, M. y Olaru, L.** 2019. Effects of interaction between abiotic stress and pathogens in cereals in the context of climate change: An overview. *Annals of the University of Craiova*, XLIX: 413-424.
- Paterson, R.R.M., y Lima, N.** 2019. Ecology and biotechnology of thermophilic fungi on crops under global warming. En S.M. Tiquia-Arashiro y M. Grube, eds. *Fungi in extreme environments: Ecological role and biotechnological significance*, págs. 81-96. Springer International Publishing.
- Pautasso, M.** 2013. responding to diseases caused by exotic tree pathogens. En P. Gonthier and G. Nicolotti, eds. *infectious forest diseases*, págs. 29-49. Wallingford, Reino Unido y Boston, EE.UU., CABI.
- Pautasso, M., Doring, T.F., Garbelotto, M., Pellis, L. y Jeger, M.J.** 2012. Impacts of climate change on plant diseases – opinions and trends. *European Journal of Plant Pathology*, 133: 295-313.
- Pegg, G., Taylor, T., Entwistle, P., Guymer, G., Giblin, F. y Carnegie, A.** 2017. Impact of *Austropuccinia psidii* (myrtle rust) on Myrtaceae-rich wet sclerophyll forests in south east Queensland. *PLoS ONE* 12(11): e0188058 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188058>
- Pegg, K.G., Coates, L.M., O'Neill, W.T. y Turner, D.W.** 2019. The epidemiology of Fusarium wilt of banana. *Frontiers in Plant Science*, 10: 1395 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.01395>
- Peng, H.X.X., Sivasithamparam, K. y Turner, D.W.W.** 1999. Chlamydospore germination and Fusarium wilt of banana plantlets in suppressive and conducive soils are affected by physical and chemical factors. *Soil Biology and Biochemistry*, 31: 1363-1374.
- Perez, C., Nicklin, C., Dangles, O., Vanek, S., Sherwood, S., Halloy, S., Garrett, K.A. y Forbes, G.** 2010. Climate change in the high Andes: Implications and adaptation strategies for small-scale farmers. *International Journal of Environmental, Cultural, Economic and Social Sustainability*, 6: 71-88.
- Perrone, G., Ferrara, M., Medina, A., Pascale, M. y Magan, N.** 2020. Toxigenic fungi and mycotoxins in a climate change scenario: Ecology, genomics, distribution, prediction, and prevention of the risk. *Microorganisms*, 8: 1496 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3390/microorganisms8101496>

- Peters, K., Breitsameter, L. y Gerowitt, B.** 2014. Impact of climate change on weeds in agriculture: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38: 707-721.
- Peterson, A.T, Menon, S. y Li, X.** 2010. Recent advances in the climate change biology literature: Describing the whole elephant. *WIREs Climate Change*, 1: 548-555.
- Ploetz, R.C.** 2005. Panama disease, an old nemesis rears its ugly head: Part 1 – The beginnings of the banana export trades. *Plant Health Progress*, 6(1) [en línea]. <https://doi.org/10.1094/PHP-2005-1221-01-RV>
- Ploetz, R.C., y Pegg, K.G.** 2000. Fungal diseases of root, corm and pseudostem. En D.R. Jones, ed. *Diseases of banana abacá and enset*, págs. 143-172. Wallingford, Reino Unido, CABI.
- Porter, J.R., Challinor, A.J., Henriksen, C.B., Howden, S.M., Martre, P. y Smith, P.** 2019. IPCC, agriculture, and food – a case of shifting cultivation and history. *Global Change Biology*, 25(8): 2518-2529.
- Prank, M., Kenaley, S.C., Bergstrom, G.C., Acevedo, M. y Mahowald, N.M.** 2019. Climate change impacts the spread of wheat stem rust, a significant crop disease. *Environmental Research Letters*, 14: 124053 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab57de>
- Preisler, A.C., Pereira, A.E., Campos, E.V., Dalazen, G., Fraceto, L.F. y Oliveira, H.C.** 2020. Atrazine nanoencapsulation improves pre-emergence herbicidal activity against *Bidens pilosa* without enhancing long-term residual effect on *Glycine max*. *Pest Management Science*, 76(1): 141-149.
- Pritchard, S.G.** 2011. Soil organisms and global climate change. *Plant Pathology*, 60: 82-99.
- Priyanka, A.K.M., Varma, S., Kumar, V. y Sharma, R.S.** 2020. Impact of climate change on plant diseases and management strategies: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8: 2968-2973.
- Pugliese, M., Gullino, M.L. y Garibaldi, A.** 2010. Effects of elevated CO₂ and temperature on interactions of grapevine and powdery mildew: First results under phytotron conditions. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 117: 9-14.
- Qin, Z., Zhang, J.E., Di Tommaso, A., Wang, R.I. y Liang, K.M.** 2016. Predicting the potential distribution of *Lantana camara* L. under RCP scenarios using ISI-MIP models. *Climatic Change*, 134: 193-208.
- Racca, P., Kakau, J., Kleinhenz, B. y Kuhn, C.** 2015. Impact of climate change on the phenological development of winter wheat, sugar beet and winter oilseed rape in Lower Saxony, Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 122: 16-27.
- Raderschall, C.A., Vico, G., Lundin, O., Taylor, A.R. y Bommarco, R.** 2021. Water stress and insect herbivory interactively reduce crop yield while the insect pollination benefit is conserved. *Global Change Biology*, 27: 71-83.
- Rai, M., y Ingle, A.** 2012. Role of nanotechnology in agriculture with special reference to management of insect pests. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94 (2): 287-293 [en línea]. [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-3969-4>
- Raliya, R., Saharan, V., Dimkpa, C. y Biswas, P.** 2018. Nanofertilizer for precision and sustainable agriculture: Current state and future perspectives. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6487-6503.
- Ramesh, K., Matloob, A., Aslam, F., Florentine, S.K. y Chauhan, B.S.** 2017. Weeds in a changing climate: Vulnerabilities, consequences, and implications for future weed management. *Frontiers in Plant Science*, 8: 95 [en línea]. [Acceso: 28 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00095>
- Ramirez-Cabral, N.Y.Z., Kumar, L. y Shabani, F.** 2017. Future climate scenarios project a decrease in the risk of fall armyworm outbreaks. *The Journal of Agricultural Science*, 155(8): 1219-1238.
- Ramirez-Cabral, N.Y.Z., Kumar, L. y Shabani, F.** 2019. Suitable areas of *Phakopsora pachyrhizi*, *Spodoptera exigua*, and their host plant *Phaseolus vulgaris* are projected to reduce and shift due to climate change. *Theoretical and Applied Climatology*, 135: 409-424.

- Ramsfield, T.D., Bentz, B.J., Faccoli, M., Jactel, H. y Brockerhoff, E.G. 2016. Forest health in a changing world: Effects of globalization and climate change on forest insect and pathogen impacts. *Forestry*, 89: 245-252.
- Rathee, M., y Dalal, P. 2018. Emerging insect pests in Indian agriculture. *Indian Journal of Entomology*, 80: 267-281.
- Reineke, A., y Thiéry, D. 2016. Grapevine insect pests and their natural enemies in the age of global warming. *Journal of Pest Science*, 89: 313-328.
- Revich, B., Tokarevich, N. y Parkinson, A.J. 2012. Climate change and zoonotic infections in the Russian Arctic. *International Journal of Circumpolar Health*, 71: 18792 [en línea[en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3402/ijch.v71i0.18792>
- Reynaud, B., Delatte, H., Peterschmitt, M. y Fargette, D. 2009. Effects of temperature increase on the epidemiology of three major vector-borne viruses. *European Journal of Plant Pathology*, 123: 269-280.
- Richerzhagen, D., Racca, P., Zeuner, T., Kuhn, C., Falke, K., Kleinhenz, B. y Hau, B. 2011. Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of Cercospora leaf spot in Lower Saxony. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 118: 168-177.
- Rizzo, D., Garbelotto, M. y Hansen, E. M. 2005. *Phytophthora ramorum*: Integrative research and management of an emerging pathogen in California and Oregon forests. *Annual Review of Phytopathology*, 43: 309-335.
- Robinet, C., y Roques, A. 2010. Direct impacts of recent climate warming on insect populations. *Integrative Zoology*, 5: 132-142.
- Roth, M.G., Webster, R.W., Mueller, D.S., Chilvers, M.I., Faske, T.R., Mathew, F.M., Bradley, C.A., Damicone, J.P., Kabbage, M. y Smith, D.L. 2020. Integrated management of important soybean pathogens of the United States in changing climate. *Journal of Integrated Pest Management*, 11: 17 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1093/jipm/pmaa013>
- Ruttledge, A., y Chauhan, B.S. 2020. Climate change and weeds of cropping systems. En K. Jabran, S. Florentine y B.S. Chauhan, eds. *Crop protection under changing climate*, págs. 57-84. Springer International Publishing.
- Sabry, K., y Ragaei, M. 2018. Nanotechnology and their applications in insect's pest control. En K.A. Abd-Elsalam & R. Prasad, eds. *Nanobiotechnology applications in plant protection*, págs. 1-28. Cham, Springer International Publishing AG. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-91161-8>.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rettori, A., Rossi, V., Tubiello, F.N., Spanna, F., Rosenzweig, C. y Gullino, M.L. 2006. Downy mildew (*Plasmopara viticola*) epidemics on grapevine under climate change. *Global Change Biology*, 12: 1299-1307.
- Salinari, F., Giosuè, S., Rossi, V., Tubiello, F.N., Rosenzweig, C. y Gullino, M.L. 2007. Downy mildew outbreaks on grapevine under climate change: Elaboration and application of an empirical-statistical model. *EPPO Bulletin*, 37: 317-326.
- Salvacion, A.R., Cumagun, C.J.R., Pangga, I.B., Magcale-Macandog D.B., Cruz, P.C.S., Saludes, R.B., Solpot, T.C. y Aguilar, E.A. 2019. Banana suitability and Fusarium wilt distribution in the Philippines under climate change. *Spatial Information Research*, 27: 339-349.
- Santini, A., y Battisti, A. 2019. Complex insect-pathogen interactions in tree pandemics. *Frontiers in Physiology*, 10: 550 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3389/fphys.2019.00550>
- Saponari, M., Boscia, D., Nigro, F. y Martelli, G.P. 2013. Identification of DNA sequences related to *Xylella fastidiosa* in oleander, almond and olive trees exhibiting leaf scorch symptoms in Apulia (Southern Italy). *Journal of Plant Pathology*, 95(3): 668.
- Saunders, D.G.O., Pretorius, Z.A. y Hovmøller, M.S. 2019. Tackling the re-emergence of wheat stem rust in Western Europe. *Communications Biology*, 2: 51 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0294-9>

- Savary, S., Willocquet, L., Pethybridge, S.J., Esker, P., McRoberts, N. y Nelson, A. 2019. The global burden of pathogens and pests on major food crops. *Nature Ecology & Evolution*, 3: 430-439.
- Scalone, R., Lemke, A., Stefanic, E., Kolseth, A.K., Rasic, S. y Andersson, L. 2016. Phenological variation in *Ambrosia artemisiifolia* L. facilitates near future establishment at northern latitudes. *PLoS ONE*, 11: e0166510 [en línea]. [Acceso: 31 de marzo de 2021]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166510>
- Scheffers, B.R., De Meester, L., Bridge, T.C.L., Hoffmann, A.A., Pandolfi, J.M., Corlett, R.T., Butchart, S.H.M. *et al.* 2016. The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354 (6313): aaf7671.
- Schneider, K., van der Werf, W., Cendoya, M., Mourits, M., Navas-Cortes J.A., Vicent, A. y Lansink, A.O. 2020. Impact of *Xylella fastidiosa* subspecies *pauc*a in European olives. *PNAS*, 117: 9250-9259.
- Schumann, G.L. 1991. *Plant diseases: Their biology and social impact*. St Paul, USA, APS Press.
- Scott, N.R., Chen, H. y Cui, H. 2018. Nanotechnology applications and implications of agrochemicals toward sustainable agriculture and food systems. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6451-6456.
- Scott, P., y Williams, N. 2014. Phytophthora diseases in New Zealand forests. *NZ Journal of Forestry*, 59: 14-21.
- Secretaría de la CIPF. 1997. *Convención Internacional de Protección Fitosanitaria*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO (disponible en inglés: https://assets.ippc.int/static/media/files/publication/en/2019/02/1329129099_ippc_2011-12-01_reformatted.pdf).
- Secretaría de la CIPF. 2012. *Estrategia de la CIPF de creación de capacidad fitosanitaria nacional*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO, 27 págs., (disponible en inglés: <https://assets.ippc.int/static/media/files/publication/en/2016/01/IPPCCapacityDevelopmentStrategy-en.pdf>)
- Secretaría de la CIPF. 2016. *Vigilancia Fitosanitaria - Guía para comprender los principales requerimientos de los programas de vigilancia para las organizaciones nacionales de protección fitosanitaria*. Roma, Secretaría de la CIPF, FAO (disponible en: <http://www.fao.org/3/ca3764es/CA3764ES.pdf>)
- Secretaría de la CIPF. 2020a. The first detection of *Spodoptera frugiperda*, fall armyworm (FAW), in United Arab Emirates. Pest report, 10 May 2020. En: *Convención Internacional de Protección Fitosanitaria* [en línea]. Roma, FAO. <https://www.ippc.int/es/countries/united-arab-emirates/pestreports/2020/05/the-first-detection-of-fall-armywormfam-spodoptera-frugiperda-in-united-arab-emirates/>
- Secretaría de la CIPF. 2020b. Report of first detection of *Spodoptera frugiperda*, fall armyworm (FAW) in Jordan. Pest report, 27 September 2020. En: *Convención Internacional de Protección Fitosanitaria* [en línea]. Roma, FAO. <https://www.ippc.int/es/countries/jordan/pestreports/2020/09/report-of-first-detection-of-spodoptera-frugiperda-fall-armyworm-faw-in-jordan-1/>
- Secretaría de la CIPF. 2021. *Spodoptera frugiperda* (fall armyworm) detections Australia. Pest report, 5 May 2021. En: *Convención Internacional de Protección Fitosanitaria* [en línea]. Roma, FAO. [Acceso: 20 de mayo de 2021]. <https://www.ippc.int/es/countries/australia/pestreports/2021/05/spodoptera-frugiperda-fall-armyworm-detections-australia/>
- Seidl, R., Thom, D., Kautz, M., Martin-Benito, D., Peltoniemi, M., Vacchiano G., Wild, J. *et al.* 2017. Forest disturbances under climate change. *Nature Climate Change*, 7: 395-402.
- Shabani, F., y Kumar, L. 2013. Risk levels of invasive *Fusarium oxysporum* f. sp. in areas suitable for date palm (*Phoenix dactylifera*) cultivation under various climate change projections. *PLoS ONE*, 8: e83404 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083404>
- Shabani, F., Ahmadi, M., Kumar, L., Soljouy-Fad, S., Tehrany, M.S., Shabani, F., Kalantar, B. y Esmaeili, A. 2020. Invasive weed species' threats to global biodiversity: Future scenarios of changes in the number of invasive species in a changing climate. *Ecological Indicators*, 116: 106436 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106436>

- Shaibu, A.S., Li, B., Zhang, S. y Sun, J.** 2020. Soybean cyst nematode-resistance: Gene identification and breeding strategies. *The Crop Journal*, 8(6): 892-904 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1016/j.cj.2020.03.001>
- Sharma, S., Hooda, K.S. y Goswami, P.** 2019. Scenario of plant diseases under changing climate. *Journal of Pharmacognosy and Phytochemistry*, 8: 2490-2495.
- Shaw, M.W., y Osborne, T.M.** 2011. Geographic distribution of plant pathogens in response to climate change. *Plant Pathology*, 60: 31-43.
- Sicard, A., Zeilinger, A.R., Vanhove, M., Scharrel, T.E., Beal, D.J., Daugherty, M.P. y Almeida, R.P.P.** 2018. *Xylella fastidiosa*: Insights into an emerging plant pathogen. *Annual Review of Phytopathology*, 56: 181-202.
- Siciliano, I., Berta, F., Bosio, P., Gullino, M.L. y Garibaldi, A.** 2017a. Effect of different temperatures and CO₂ levels on *Alternaria* toxins produced on cultivated rocket, cabbage, and cauliflower. *World Mycotoxin Journal*, 10: 63-71.
- Siciliano, I., Bosio, P., Gilardi, G., Gullino, M.L. y Garibaldi, A.** 2017b. Verrucaric acid and roridin E produced on spinach by *Myrothecium verrucaria* under different temperatures and CO₂ levels. *Mycotoxin Research*, 33: 139-146.
- Sidorova, I., y Voronina, E.** 2020. Terrestrial fungi and global climate change. En J. Marxsen, ed. *Climate change and microbial ecology: Current research and future trends*, 2a ed., cap. 5., Poole, Reino Unido, Caister Academic Press. (disponible en: <https://doi.org/10.21775/9781913652579.05>).
- Singh, V.K., Shukla, A.K. y Singh, A.K.** 2019. Impact of climate change on plant-microbe interactions under agroecosystems. En K.K. Choudhary, A. Kumari y A.K. Singh, eds. *Climate change and agricultural ecosystems*, págs. 153-179. Cambridge, Reino Unido, Woodhead Publishing, Elsevier.
- Skelsey, P., Cooke, D.E.L., Lynott, J.S. y Lees, A.K.** 2016. Crop connectivity under climate change: Future environmental and geographic risks of potato late blight in Scotland. *Global Change Biology*, 22: 3724-3738.
- Sousa, E., Naves, P., Bonifácio, L., Henriques, J., Inácio, M.L. y Evans, H.** 2011. Survival of *Bursaphelenchus xylophilus* and *Monochamus galloprovincialis* in pine branches and wood packaging material. *EPPO Bulletin*, 41: 203-207.
- Sparks, A.H., Forbes, G.A., Hijmans, R.J. y Garrett, K.A.** 2014. Climate change may have limited effect on global risk of potato late blight. *Global Change Biology*, 20: 3621-3631.
- Srivastava, A., Kumar, S.N. y Aggarwal, P.K.** 2010. Assessment of vulnerability of sorghum to climate change in India. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 138: 160-169.
- St. Marseille, A.F.G., Bourgeois, G., Brodeur, J. y Mimee, B.** 2019. Simulating the impacts of climate change on soybean cyst nematode and the distribution of soybean. *Agricultural and Forest Meteorology*, 264: 178-187.
- Stack, J.P., Fletcher, J. y Gullino, M.L.** 2013. Climate change and plant biosecurity: A new world disorder? En B. Bodo, C. Burnley, I. Comandicea, A. Maas y R. Roffey, eds. *Global environmental change: New drivers for resistance, crime and terrorism?*, págs. 161-182. Baden-Baden, Alemania, Nomos.
- Stoeckli, S., Felber, R. y Haye, T.** 2020. Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International Journal of Biometeorology*, 64: 2019-2032 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-01992-z>
- Storkey, J., Stratonovitch, P., Chapman, D. y Vidotto, F.** 2014. A process-based approach to predicting the effect of climate change on the distribution of an invasive allergenic plant in Europe. *PLoS ONE*, 9: e88156 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0088156>
- Stover, R.H.** 1986. Disease management strategies and the survival of the banana industry. *Annual Review of Phytopathology*, 24: 83-91.
- Strand, J.F.** 2000. Some agrometeorological aspects of pest and disease management for the 21st century. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103: 73-82.

- Sturrock, R.N., Frankel, S.J., Brown, A.V., Hennon, P.E., Kliejunas, J.T. y Lewis, K.J.** 2011. Climate change and forest diseases. *Plant Pathology*, 60: 133-149.
- Su, C., Ji, Y., Gao, S., Cao, S., Xu, X., Zhou, C. y Liu, Y.** 2020. Fluorescence-labeled abamectin nanopesticide for comprehensive control of pinewood nematode and *Monochamus alternatus* hope. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(44): 16555-16564 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05771>
- Suggitt, A.J., Wilson, R.J., Isaac, N.J., Beale, C.M., Auffret, A.G., August, T., Maclean, I.M.D. et al.** 2018. Extinction risk from climate change is reduced by microclimatic buffering. *Nature Climate Change*, 8(8): 713-717.
- Sun, Y., Ding, J., Siemann, E. y Keller, S.R.** 2020. Biocontrol of invasive weeds under climate change: Progress, challenges, and management implications. *Current Opinion in Insect Science*, 38: 72-78.
- Sutherst, R.W.** 1991. Pest risk analysis and the greenhouse effect. *Review of Agricultural Entomology*, 79: 1177-1187.
- Sutherst, R.W., Baker, R.H.A., Coakley, S.M., Harrington, R., Kriticos, D.J. y Scherm, H.** 2007. Pest under global change – meeting your future landlords? En J.G. Canadell, D.E. Pataki & L.F. Pitelka, eds. *Terrestrial ecosystems in a changing world*. Berlin, Springer, págs. 211-226.
- Sutherst, R.W., Constable, F., Finlay, K.J., Harrington, R., Luck, J. y Zalucki, M.P.** 2011. Adapting to crop pest and pathogen risks under a changing climate. *WIREs Climate Change*, 2: 220-237.
- Sutherst, R.W., Maywald, G.F. y Russell, B.L.** 2000. Estimating vulnerability under global change: Modular modelling of pests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 82(1-3): 303-319.
- Taylor, R.A.J., Herms, D.A., Cardina, J. y Moore, R.H.** 2018. Climate change and pest management: Unanticipated consequences of trophic dislocation. *Agronomy*, 8(1): 7 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.3390/agronomy8010007>
- Tenllado, F., y Canto, T.** 2020. Effects of a changing environment on the defences of plants to viruses. *Current Opinion in Virology*, 42: 40-46.
- Thomas J.E., Wood, T.A., Gullino, M.L. y Ortu, G.** 2017. Diagnostic tools for plant biosecurity. En M.L. Gullino, J. Stack, J. Fletcher & J. Mumford, eds. *Practical tools for plant and food biosecurity*, págs. 209-226. Dordrecht, The Netherlands, Springer.
- Thomas-Sharma, S., Abdurahman, A., Ali, S., Andrade-Piedra, J., Bao, S., Charkowski, A., Crook, D. et al.** 2016. Seed degeneration in potato: The need for an integrated seed health strategy to mitigate the problem in developing countries. *Plant Pathology*, 65: 3-16.
- Thomson, L.J., MacFadyen, S. y Hoffmann, A.A.** 2010. Predicting the effects of climate change on natural enemies of agricultural pests. *Biological Control*, 52: 296-306.
- Torney, F., Trewyn, B.G., Lin, V.S.-Y. y Wang, K.** 2007. Mesoporous silica nanoparticles deliver DNA and chemicals into plants. *Nature Nanotechnology*, 2(5): 295-300.
- Torresen, K.S., Fykse, H., Rafoss, T. y Gerowitt, B.** 2020. Autumn growth of three perennial weeds at high latitude benefits from climate change. *Global Change Biology*, 26: 2561-2572.
- Trebicki, P.** 2020. Climate change and plant virus epidemiology. *Virus Research*, 286: 198059. <https://doi.org/10.1016/j.virusres.2020.198059>
- Trebicki, P. y Finlay, K.** 2019. Pests and diseases under climate change; its threat to food security. En S.S. Yadav, R.J. Redden, J.L. Hatfield, A.W. Ebert & D. Hunter, eds. *Food security and climate change*, págs. 229-249. New York, John Wiley & Sons Inc.
- Tresson, P., Brun, L., de Cortazar-Atauri, I.G., Audergon, J.M., Buléon, S., Chenevotot, H., Combe, F. et al.** 2020. Future development of apricot blossom blight under climate change in Southern France. *European Journal of Agronomy*, 112: 125960.

- Tylka, G.L. y Marett, C.C. 2014. Distribution of the soybean cyst nematode, *Heterodera glycines*, in the United States and Canada: 1954 to 2014. *Plant Health Progress*, 15: 85-87.
- Valerio, M., Tomecek, M.B., Lovelli, S. y Ziska, L.H. 2011. Quantifying the effect of drought on carbon dioxide-induced changes in competition between a C₃ crop and a C₄ weed (*Amaranthus retroflexus*). *Weed Research*, 51: 591-600.
- Van der Fels-Klerx, H.J., Liu, C. y Battilani, P. 2016. Modelling climate change impacts on mycotoxin contamination. *World Mycotoxin Journal*, 9: 717-726.
- Van der Putten, W.H., Macel, M. y Visser, M.E. 2010. Predicting species distribution and abundance responses to climate change: Why it is essential to include biotic interactions across trophic levels. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 365: 2025-2034.
- Vilà, M., Beaury, E.M., Blumenthal, D.M., Bradley, B.A., Early, R., Laginhas, B.B., Trillo, A., Dukes, J.S., Sorte, C.J.B. y Ibáñez, I. 2021. Understanding the combined impacts of weeds and climate change on crops. *Environmental Research Letters*, 16: 034043.
- Viswanath, K., Sinha, P., Kumar, S.N., Sharma, T., Saxena, S., Panjwani, S., Pathak, H. y Shukla, S.M. 2017. Simulation of leaf blast infection in tropical rice agro-ecology under climate change scenario. *Climatic Change*, 142: 155-167.
- Wan, J.Z. y Wang, C.J. 2019. Contribution of environmental factors toward distribution of ten most dangerous weed species globally. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17: 14835-14846.
- Wang, C., Hawthorne, D., Qin, Y., Pan, X., Li, Z. y Zhu, S. 2017. Impact of climate and host availability on future distribution of Colorado potato beetle. *Scientific Reports*, 7: 4489 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04607-7>
- Wang, C., Zhang, X., Pan, X., Li, Z. y Zhu, S. 2015. Greenhouses: Hotspots in the invasive network for alien species. *Biodiversity and Conservation*, 24: 1825-1829.
- Wang, R., Li, Q., He, S., Liu, Y., Wang, M. y Jiang, G. 2018. Modeling and mapping the current and future distribution of *Pseudomonas syringae* pv. *actinidiae* under climate change in China. *PLoS ONE*, 13: e0192153 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0192153>
- Watt, M.S., Kriticos, D.J., Lamoureaux, S.L. y Bourdot, G.W. 2011. Climate change and the potential global distribution of serrated tussock (*Nassella trichotoma*). *Weed Science*, 59: 538-545.
- Wattanapongsiri, A. 1966. A revision of the genera *Rhynchophorus* and *Dynamis* (Coleoptera: Curculionidae). Department of Agriculture Science Bulletin. Bangkok, Department of Agriculture Science.
- Wells, J.M., Raju, B.C., Hung, H.Y., Weisburg, W.G., Mandelco-Paul, L. y Brenner, D.J. 1987. *Xylella fastidiosa* gen. nov., sp. nov.: Gram-negative, xylem-limited, fastidious plant bacteria related to *Xanthomonas* spp. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 37(2): 136-143.
- West, A.M., Kumar, S., Wakie, T., Brown, C.S., Stohlgren, J., Laituri, M. y Bromberg, J. 2015. Using high-resolution future climate scenarios to forecast *Bromus tectorum* invasion in Rocky Mountain National Park. *PLoS ONE*, 10: e0117893 [en línea]. [Acceso: 29 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0117893>
- Wilkinson, K., Grant, W.P., Green, L.E., Hunter, S., Jeger, M.J., Lowe, P., Medley, G.F. et al. 2011. Infectious diseases of animals and plants: An interdisciplinary approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 366: 1933-1942.
- Williams, A.L., Wills, K.E., Janes, J.K., Van der Schoor, J.K., Newton, P.C.D. y Hovenden, M.J. 2007. Warming and free-air CO₂ enrichment alter demographics in four co-occurring grassland species. *New Phytologist*, 176: 365-374.
- Williamson, V.M. y Gleason, C.A. 2003. Plant-nematode interactions. *Current Opinion in Plant Biology*, 6: 327-333.

- Wolfe, D.W., Ziska, L., Petzoldt, C., Seaman, A., Chase, L. y Hayhoe, K.** 2008. Projected change in climate thresholds in the Northeastern U.S.: Implications for crops, pests, livestock, and farmers. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 13: 555-575.
- Woolhouse, M.E.J., Webster, J.P., Domingo, E., Charlesworth, B. y Levin, B.R.** 2002. Biological and biomedical implications of the co-evolution of pathogens and their hosts. *Nature Genetics*, 32 (4): 569-577.
- Wright, D., Hammond, N., Thomas, G., MacLeod, B. y Abbott, L.K.** 2018. The provision of pest and disease information using Information Communication Tools (ICT); an Australian example. *Crop Protection*, 103: 20-29.
- Wu, E., Wang, Y.-P., Yahuza, L., He, M.-H., Sun, D.-L., Huang, Y.-M., Liu, Y.-C., Yang, L.N., Zhu, W. y Zhan, J.** 2020. Rapid adaptation of the Irish potato famine pathogen *Phytophthora infestans* to changing temperature. *Evolutionary Applications*, 13(4): 768-780.
- Wuebbles, D.J. y Hayhoe, K.** 2002. Atmospheric methane and global change. *Earth-Science Reviews*, 57: 177-210.
- Yadav, S., Stow, A.J. y Dudaniec, R.** 2019. Detection of environmental and morphological adaptation despite high landscape genetic connectivity in a pest grasshopper (*Phaulacridium vittatum*). *Molecular Ecology*, 28: 3395-3412.
- Zacarias, D.A.** 2020. Global bioclimatic suitability for the fall armyworm, *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae), and potential co-occurrence with major host crops under climate change scenarios. *Climatic Change*, 161: 555-566.
- Zhao, X., Cui, H., Wang, Y., Sun, C., Cui, B. y Zeng, Z.** 2018. Development strategies and prospects of nano-based smart pesticide formulation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(26): 6504-651.
- Ziska, L.H., Blumenthal, D.M. y Franks, S.J.** 2019. Understanding the nexus of rising CO₂, climate change, and evolution in weed biology. *Invasive Plant Science and Management*, 12: 79-88.
- Ziska, L.H., Epstein, P.R. y Schlesinger, W.H.** 2009. Rising CO₂, climate change, and public health: Exploring the links to plant biology. *Environmental Health Perspectives*, 117: 155-158.



CIPF

La Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF) es un acuerdo fitosanitario internacional que tiene como objetivo proteger los recursos vegetales del mundo y facilitar un comercio seguro.

La visión de la CIPF es que todos los países tengan la capacidad de aplicar medidas armonizadas para prevenir la introducción y dispersión de plagas y minimizar el impacto de las plagas en la seguridad alimentaria, el comercio, el crecimiento económico y el medio ambiente.

La organización

- ◆ Hay más de 180 partes contratantes de la CIPF.
- ◆ Cada parte contratante cuenta con una organización nacional de protección fitosanitaria (ONPF) y un punto de contacto oficial de la CIPF.
- ◆ Se han establecido 10 organizaciones regionales de protección fitosanitarias (ORPF) para coordinar las ONPF en varias regiones del mundo.
- ◆ La Secretaría de la CIPF tiene enlaces con las organizaciones internacionales pertinentes que contribuyen a la creación de capacidad regional y nacional.
- ◆ La Secretaría de la CIPF es patrocinada por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).



Secretaría de la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria
ippc@fao.org | www.ippc.int

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
y la Agricultura
Roma, Italia



ISBN 978-92-5-134507-8



9

7 8 9 2 5 1 3 4 5 0 7 8

CB4769ES/1/06.21