

Sanidad vegetal y medio ambiente: desafíos y perspectivas en la protección ambientalmente respetuosa del rendimiento agrícola¹

Rafael Jiménez Díaz

Académico Correspondiente de la Sección de Ingeniería de la Real Academia de Doctores de España

Excelentísimo Sr. Presidente de la Real Academia de Doctores de España,
Señoras y Señores Académicos,
Señoras y Señores:

Es un honor, y también motivo de legítima satisfacción, tener la oportunidad de presentar este discurso de ingreso como Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España.

Generosamente, esta docta Institución me abre sus puertas para ello, merced a la propuesta formulada por los Excmos. Sres. Dres. Jaime Lamo de Espinosa y Michels de Champourcin y Emilio Llorente Gómez, que sin duda han hecho uso de su amistad y generosidad, para ver en mi historial académico méritos que justifiquen alcanzar un título tan honroso, que escapen a mi valoración.

Deseo expresar mi profundo agradecimiento tanto a los Sres. Doctores Académicos que propusieron mi candidatura, como a aquéllos que con su voto unánimemente la apoyaron en el proceso de elección. En particular, deseo manifestar mi profundo reconocimiento al Dr. Lamo de Espinosa por su generosa presentación, así como por distinguirme con su amistad y confianza.

La elección de un tema para mi discurso de toma de posesión no ha sido tarea fácil para mí. Y soy consciente del riesgo que asumo al centrar mi discurso sobre la relación entre la Sanidad de los Cultivos y el Medio Ambiente, porque al referirse a un campo específico del conocimiento, puede quedar distante del de científicos presentes en este acto que son expertos en otros campos del saber.

¹ Discurso pronunciado por el Dr. Jiménez Díaz en su toma de posesión como Académico Correspondiente de la Real Academia de Doctores de España celebrada el 25-02-2009.

Durante mi vida profesional, la Sanidad de los cultivos agrícolas ha sido mi pasión, y mis principales objetivos han sido comprender ¿cómo? y ¿por qué? se desarrollan enfermedades en las plantas, y contribuir mediante su control eficiente a limitar el perjuicio que sus ataques ocasionan a la producción de alimentos de origen vegetal.

Descubrir que microorganismos similares a los que causan enfermedades a personas y animales, pueden ocasionar enfermedades a las plantas, marcó mi curiosidad por la Ciencia y guio mis pasos hacia la Ingeniería Agronómica, cuando supe que el estudio de dichas enfermedades era materia de esta titulación superior.

De hecho, históricamente han sido los Ingenieros Agrónomos los introductores en España del estudio de las enfermedades de las plantas como materia académica, al tiempo que promotores en la aplicación de las más modernas tecnologías de ingeniería para combatirlas eficientemente.

Al recordar mis vivencias universitarias, reconozco lo afortunado que he sido al encontrarme con el estudio e investigación de las enfermedades de las plantas, no sólo porque me proporcionó la oportunidad de satisfacer mi curiosidad científica, sino también y más importante aún, la fortuna de recibir las enseñanzas y consejos de los que fueron mis maestros.

Por ello, deseo dejar constancia del agradecimiento y aprecio con que los recuerdo, y entre ellos destacar a los Profesores Agustín Alfaro García y Wally Sackston (q.e.p.d.), verdaderos ‘responsables’ de mi incorporación a la investigación fitopatológica. Wally Sackston guio además mis pasos hacia el Departamento de Patología Vegetal de la Universidad de Cornell en el Estado de Nueva York; donde pude profundizar en mi especialización sobre la Fitopatología.

Esta ganancia neta de conocimientos, experiencias y entusiasmo es la que me he esforzado en transmitir a los que un día se consideraron mis discípulos, y hoy son destacados profesionales, compañeros en la investigación fitopatológica y amigos entrañables. También ellos son acreedores de mi agradecimiento, porque soportándome, y compartiendo mi entusiasmo por la ciencia fitopatológica, han hecho posible el avance de ella en España a nivel internacional.

Finalmente, antes de comenzar mi discurso, quiero hacer patente las gracias a mi familia, y especialmente a mi esposa María del Mar, abnegada compañera durante tantos años de duro trabajo y prolongadas ausencias, sin cuyo incondicional apoyo y generosa ayuda nada de lo que he hecho durante mi trayectoria académica habría sido posible.

Mi discurso versará pues sobre la necesidad de armonizar las intervenciones para reducir el impacto de las enfermedades de las plantas, sobre los rendimientos agrícolas y la

economía de los agricultores, con la inquietud social de que dichas acciones puedan comprometer la conservación y mejora del medio ambiente. Confío en ser capaz de transmitir a Uds. con amenidad, los conocimientos que son de mi interés, sin menoscabo del rigor científico que distingue a esta Institución.

1.- INTRODUCCIÓN: LA NATURALEZA DEL PROBLEMA

Las plantas son afectadas por enfermedades que perjudican su fisiología, y resultan de complejas interacciones entre las poblaciones de un agente primario generalmente infeccioso, el patógeno, y de la planta susceptible, moduladas por el ambiente biótico y abiótico en el que aquéllas tienen lugar.

La complejidad y riqueza de tales procesos han suscitado siempre el interés de los estudiosos de la naturaleza del parasitismo, incluyendo sus aspectos bioquímicos, fisiológicos, genéticos, y moleculares; sin embargo, la repercusión de las enfermedades sobre la producción agroalimentaria trasciende dicho interés, porque tienen el potencial de reducir significativamente el rendimiento alcanzable de los cultivos.

En consecuencia, las enfermedades son un componente importante de la producción agrícola y objeto de estudio de una disciplina agronómica, la Fitopatología, una ciencia integradora y aplicada, que trata de su naturaleza, causa, control y aspectos socio-económicos. Sin embargo, a pesar de su indudable significación, la percepción social de la incidencia que tienen las enfermedades sobre el crecimiento vegetal y la producción de alimentos y fibras es todavía insuficiente.

Las pérdidas de cosecha causadas por enfermedades han sido estimadas recientemente por un grupo de científicos de la Univ. De Bonn, en uno de los estudios más completos realizados hasta ahora sobre el tema, que incluyó a los ocho cultivos más relevantes para la alimentación y la industria.

En el periodo 1988-1990, la incidencia de enfermedades sobre dichos cultivos originó globalmente una reducción media anual del 13% de la cosecha alcanzable, a la cual ha de sumarse al menos 10% de pérdidas medias adicionales ocasionadas en el producto cosechado, durante el almacenamiento y transporte. Diez años más tarde, los mismos autores refrendaron dicho nivel de pérdidas, cuando reevaluaron sus estimaciones utilizando datos del periodo 1996-1998.

No obstante lo anterior, el impacto de las enfermedades de las plantas trasciende la reducción de los rendimientos, porque puede repercutir sobre la seguridad alimentaria y la preservación ecológica. De hecho, en numerosas ocasiones en la historia de la agricultura, la devastación causada por enfermedades de diversa naturaleza ha conmocionado a las

sociedades, porque han originado hambrunas en la población, ruina económica de los agricultores, y desastres ecológicos, entre otros efectos.

Por ejemplo, entre 1845 y 1847 los ataques de Mildiu de la patata causados por *Phytophthora infestans*, favorecidos por una sucesión de periodos inusualmente lluviosos y frescos durante el ciclo de cultivo, causaron en Irlanda devastación en los cultivos, miseria en los agricultores, y hambrunas generalizadas en la población, porque el consumo de tubérculos era el componente principal de su dieta. Más de 1 millón de personas murieron de hambre y cerca de 1 millón y medio emigraron a América del Norte.

El Mildiu de la patata fue además una enfermedad determinante para la Biología Vegetal, porque con ella estableció Anton de Bary las bases científicas de la Fitopatología a mediados del siglo XIX, al tiempo que demostraba el origen microbiano de las enfermedades, 30 años antes de que lo hicieran Louis Pasteur y Robert Koch con enfermedades de personas y animales.

Otro ejemplo de innovación fitopatológica en la Biología Vegetal fue la enfermedad del Fuego bacteriano de peral y manzano, con la que Arthur y Burril demostraron a finales del siglo XIX que las bacterias pueden ser patogénicas en plantas. El Fuego bacteriano es notable por la magnitud de las pérdidas que puede ocasionar en la producción de frutales de pepita; pero en particular, es paradigma de enfermedades devastadoras que resultan al introducir especies vegetales exóticas en una nueva zona geográfica (i.e., peral y manzano introducidos en América del Norte por los primeros colonizadores ingleses), donde se encuentran con patógenos endémicos de plantas nativas a los que, inadvertidamente, son muy susceptibles.

Este hecho ilustra adecuadamente los riesgos que desde el punto de vista sanitario puede auspiciar la expansión de la agricultura hacia nuevas áreas, cuando con la introducción de cultivos en ellas se facilitan encuentros entre una especie vegetal y microorganismos nativos que pueden atacarla, con los cuales no han co-evolucionado.

La significación de los re-encuentros entre plantas y patógenos cuando ambos no han evolucionado conjuntamente es también ilustrada por la enfermedad del Chancro del castaño. A principios del siglo XX, la introducción del hongo *Cryphonectria parasitica* en los EE UU, en plantones de *Castanea* spp. importados de países asiáticos, desencadenó una de las epidemias más devastadoras de áreas forestales que se conoce, a su vez paradigma del potencial de impacto negativo de las enfermedades sobre el medio ambiente.

La introducción de *Cryphonectria parasitica* facilitó su encuentro con *Castanea dentata*, un huésped muy susceptible, y dio lugar a la devastación de bosques de castaño americano en una zona de cerca de 4 millones de ha en la franja sureste de los EE UU, con una tasa de expansión de 37 km/año y la muerte de cerca de 3.500 millones de castaños en los 50 años siguientes a la introducción.

El Chancro del castaño es uno de los ejemplos más dramáticos de la devastación que puede causar la introducción de patógenos exóticos en un área geográfica nueva, cuando dichos agentes pueden originar enfermedad en plantas con las cuales no han co-evolucionado y por lo cual son particularmente susceptibles. La magnitud de los potenciales impactos negativos de tales introducciones es justificación suficiente de la necesidad de cuarentenas y servicios de inspección y certificación fitosanitarias.

2.- EL PAPEL DE LA FITOPATOLOGÍA EN LA AGRICULTURA CONTEMPORÁNEA

Eventos como los descritos también han tenido lugar en épocas posteriores, aun cuando comparativamente se ha dispuesto de mejor conocimiento y tecnologías para la producción agrícola.

En 1970, una enfermedad denominada Necrosis sureña de la hoja asoló los cultivos de maíz híbrido en amplias zonas del Centro y Sur de los EE UU, causando pérdidas medias superiores al 50% de la cosecha alcanzable, que se estimaron en más de 1.000 millones de dólares.

El responsable de un desastre de tal magnitud fue un hongo patógeno [*Cochliobolus heterostrophus*] que existía en dichas zonas desde los años 1920s, pero había originado enfermedad de escasa importancia porque hasta entonces se habían utilizado en ellas variedades de maíz con citoplasma normal.

El descubrimiento de que un citoplasma de maíz denominado TMS (acrónimo de 'Texas male sterility') confiere androesterilidad a la planta, mejoró la tecnología de producción de variedades híbridas de maíz y promovió el uso exclusivo de dicho citoplasma para tal fin, de manera que cerca del 85% del maíz cultivado en los EE. UU tenía en aquellos años citoplasma TMS, sobre el cual una nueva raza del hongo denominada raza T expresa específica y distintivamente gran virulencia.

La Necrosis sureña de la hoja del maíz es pues paradigma de la devastación que puede resultar, cuando en áreas extensas de un cultivo genéticamente homogéneo (i.e., maíz híbrido portador de citoplasma TMS) se establece una estirpe del patógeno específicamente adaptada a dicho contenido genético.

Irónicamente, una indudable mejora tecnológica que auspicia la utilización del vigor híbrido en maíz, también satisfizo uno de los principios que determinan ataques severos de enfermedades en los cultivos: la abundancia y homogeneidad genética en la planta susceptible opera a favor de los patógenos mejor adaptados sobre el genotipo predominante

Veinte años más tarde, la mejora de productividad agrícola basada en cambios en tecnologías de cultivo y germoplasma vegetal, ha ido acompañada por el desarrollo de epidemias severas de nuevas enfermedades, y de la re-emergencia de otras que habían dejado de tener repercusión importante sobre las cosechas.

Ejemplo de ellas en los EE UU son la Necrosis de la espiga de cebada y trigo causada por el hongo *Fusarium graminearum* y, de nuevo, el Mildiu de la patata y tomate, que ilustran claramente la fragilidad de la producción agrícola ante las enfermedades, aún en países donde supuestamente se dispone del mejor conocimiento y tecnologías para dicha producción.

Los ataques de Necrosis de la espiga asolaron extensas zonas de cultivos de cebada y trigo de primavera en la franja cerealista de los EE UU, durante el periodo de 1991 a 1995; y en 1993 originaron pérdidas de 45% de la cosecha, con un valor superior a 1.000 millones de dólares en una extensión de 4 millones de ha. en cuatro Estados.

La extrema severidad de dichos ataques fue favorecida por la acumulación sobre el suelo de grandes cantidades de restos de cultivos anteriores afectados, como consecuencia de las prácticas de no-laboreo y monocultivo, así como por ambientes excepcionalmente húmedos durante los meses de Junio y Julio de dicho periodo, en los que la precipitación acumulada duplicó a la media normal acaecida en 30 años anteriores.

En términos generales, los ejemplos que he referido indican con claridad cómo el desarrollo de enfermedades severas en cultivos de plantas está mediado por los cambios que han tenido lugar en los sistemas de producción para el aumento de rendimientos en la agricultura moderna, que a su vez han incrementado la vulnerabilidad de los cultivos a las enfermedades.

De hecho, el desarrollo de enfermedades severas ha ido paralelo al de la intensificación de la producción agrícola, entre cuyas características más relevantes son de destacar:

(i) la escasa diversidad de cultivos y variedades de plantas utilizadas para la alimentación humana; (ii) la escasa diversidad genética existente en ellos; (iii) la intensificación en el uso y agregación geográfica de cultivos y variedades; (iv) la extensión del monocultivo; (v) la reducción del laboreo que incrementa la acumulación y permanencia de restos de cultivos afectados sobre el suelo; y (vi) el libre intercambio internacional de material vegetal y microbiano sin las adecuadas garantías de certificación y contención.

La magnitud de las pérdidas de cosecha, y la amenaza sobre la estabilidad de los rendimientos de los cultivos que he referido anteriormente, han generado inquietud y atraído la atención de estudiosos de la seguridad alimentaria para la población.

En el año 2001, un análisis de las perspectivas globales de disponibilidad de alimentos en el siglo XXI, realizado por el Instituto de Investigación sobre Política Alimentaria Internacional en Washington, estimó que el aumento y reestructuración de la población mundial determinará un incremento de 40% en la demanda global de cereales, raíces y tubérculos en el año 2020 respecto de la de 1993; y que el aumento de superficie cultivada contribuiría en menos del 20% al incremento de producción necesario para satisfacer dicha demanda.

Los autores de dicho análisis concluyeron que la mayor demanda agroalimentaria ha de ser satisfecha por incrementos de los rendimientos, mediante mejoras en el material vegetal y tecnologías de producción, y la protección de los incrementos alcanzados contra la incidencia de enfermedades y otros eventos reductores del rendimiento. Ello constituye un desafío importante para los profesionales de la Fitopatología y confiere vigencia y exigencia de innovación a la Ciencia Fitopatológica, por el papel fundamental que ha de desempeñar en dicha protección.

3.- CAUTELAS SOBRE LAS ESTRATEGIAS PARA EL CONTROL DE ENFERMEDADES DE CULTIVOS

Mientras que la Fitopatología mantiene vigente su razón de ser de reducir o evitar las pérdidas de cosecha que causan las enfermedades, los procedimientos que pueden ser utilizados para alcanzar tal fin deben ser acomodados a las exigencias sociales de salubridad alimentaria y preservación del medio ambiente, que han generado el concepto de Agricultura Sostenible (concebida como un *“sistema integrado de prácticas de producción, que a largo plazo pueda satisfacer las necesidades de alimentos y fibras de la población mediante la utilización eficiente de insumos y tecnologías agrarias, sin comprometer la conservación de los recursos naturales, la calidad del medio ambiente y la competitividad de los productos en los precios y calidades que requiere el comercio internacional”*).

Hasta ahora, y salvo contadas excepciones, las estrategias que han prevalecido para la protección del rendimiento agrícola se han basado en gran parte en la utilización de productos fitosanitarios químicos de síntesis. Sin embargo, la preocupación social por la repercusión que éstos puedan tener sobre la salubridad alimentaria y la calidad y preservación del medio ambiente, han generado cautelas, y producido legislación, para minimizar su utilización en el control de enfermedades.

De hecho, en el año 2006 la Comisión Europea adoptó una estrategia para el uso sostenible de los productos fitosanitarios, con vistas a promover una nueva agricultura productiva y de calidad orientada al mercado, a fin de reducir el impacto de dichos productos sobre la salud humana y el medio ambiente de forma compatible con la protección de las cosechas.

Dicha estrategia consta de dos paquetes legislativos generados mediante un proceso de co-decisión, que fueron sancionados por el Parlamento Europeo el pasado 13 de Enero y están a la espera de decisión por parte del Consejo de Ministros: de una parte, se establecen procesos más estrictos para el registro y autorización de uso de productos fitosanitarios; y de otra, se establece el *Control Integrado y uso de medios no químicos* como estrategia fundamental de lucha contra Enfermedades, Plagas y Malas Hierbas.

La aplicación de los nuevos procedimientos de registro y autorización de productos fitosanitarios ya ha determinado la retirada del mercado de gran número de ellos, y la

reducción a menos de 250 las 917 materias activas hasta ahora disponibles. Es más, el nuevo marco normativo propuesto por el Parlamento Europeo para revisar los procedimientos de registro y autorización de productos fitosanitarios hasta ahora en vigor, podría dar lugar en el año 2011 a la reducción en cerca del 85% de las materia activas disponibles en la actualidad. Esta reducción en la disponibilidad de productos fitosanitarios autorizados está generando honda preocupación en sectores agrícolas cuya producción es frágil ante los ataques de enfermedades y plagas severas, como son muchos de los que afectan a la producción hortofrutícola mediterránea.

En consecuencia, la profesión fitopatológica y la Fitopatología como ciencia tienen un reto significativo ante sí, puesto que las expectativas sociales de que se reduzca el uso de productos fitosanitarios en la producción agrícola, y se promueva la utilización preferente de estrategias no-químicas para el control de enfermedades, deben ser satisfechas sin menoscabo de la provisión necesaria de alimentos de calidad y de la viabilidad de las explotaciones agrícolas.

4.- PERSPECTIVAS EN EL CONTROL DE ENFERMEDADES CON MEDIDAS DE LUCHA AMBIENTALMENTE RESPETUOSAS

El Control Integrado de Enfermedades implica la utilización combinada de todas las medidas de control disponibles, de forma secuencial o simultánea, en acciones previas o posteriores a la siembra o plantación de un cultivo.

Contrariamente a la simplicidad con que es percibido por sectores no especializados; el diseño y puesta en práctica de programas de Control Integrado de Enfermedades son dificultados por la complejidad inherente de los patosistemas vegetales, y la que además le confiere la naturaleza ambiente-dependiente de la producción agrícola.

No obstante, durante las dos últimas décadas han tenido lugar progresos significativos en diversas tecnologías de aplicación al estudio y control de enfermedades de cultivos, que auspician mejoras importantes para la puesta en práctica de programas de control integrado en los próximos años. Ejemplos de dichos avances son las tecnologías de análisis del ADN microbiano, útiles para la caracterización molecular de los agentes patogénicos y de biocontrol; las tecnologías de teledetección, aplicables para la predicción y monitorización espacio-temporal de las epidemias; y la aplicación de la biotecnología para la mejora genética de variedades de plantas resistentes y de agentes de biocontrol.

A diferencia de los entomólogos agrícolas, que basan sus programas de control de plagas en acciones de intervención, los fitopatólogos han de fundamentar el control de enfermedades en medidas de lucha de carácter preventivo, cuya utilización tiene que ser decidida antes de efectuar el establecimiento de los cultivos.

De hecho, los fitopatólogos no han alcanzado todavía la eficiencia de los entomólogos agrícolas en la aplicación de estrategias similares para el manejo integrado de plagas; y ello es debido no sólo a la mencionada complejidad, sino también a que la disponibilidad de conocimientos científico-técnicos y de medidas de lucha aplicables en muchos patosistemas de ellos es todavía insuficiente.

Entre dichas medidas destaca la utilización eficiente de variedades resistentes, que debe ser continuada por el empleo de material vegetal de siembra o plantación certificado libre de patógenos; el tratamiento de dicho material con microorganismos de control biológico, para su protección contra la infección subsiguiente a la siembra o plantación; y la modificación de las prácticas de cultivo para evitar condiciones demasiado favorables para la enfermedad o para el patógeno.

4.1. Utilización eficiente de variedades resistentes

La utilización de variedades de plantas genéticamente manipuladas para mejorar su resistencia es una de las medidas de lucha más práctica, eficiente y ambientalmente respetuosa para el control de enfermedades, y clave para la aplicación de programas de control integrado en la Agricultura Sostenible.

Sin duda, el uso de variedades resistentes a enfermedades se deberá intensificar en los próximos años con la extensión de las nuevas formas de agricultura. Por ello, desde hace unas décadas, fitopatólogos, genetistas, bioquímicos y, recientemente, biólogos moleculares, han dedicado esfuerzos y recursos a la investigación para desentrañar la regulación genética de la resistencia a enfermedades y los mecanismos mediante los cuales opera.

En el curso de su evolución, las plantas han desarrollado mecanismos refinados para reconocer molecularmente los factores que determinan la virulencia de los patógenos, y activar mecanismos defensivos contra la invasión de sus tejidos por ellos, que les han permitido sobrevivir a los ataques de enfermedades.

La resistencia contra los agentes fitopatógenos puede interferir el proceso de infección y reducir al mínimo el desarrollo de enfermedad, proporcionando con ello la mayor protección al cultivo. En la mayoría de los casos, este tipo de resistencia implica la muerte rápida y localizada de las células vegetales invadidas y cercanas al lugar de invasión por el patógeno (i.e., muerte celular hipersensible y programada), a la que está asociada la interrupción del crecimiento del mismo; es operativa solamente contra alguna o algunas de las razas patogénicas del agente causal (es decir, es raza-específica); y se hereda oligogénicamente. Esta resistencia, denominada completa, ha sido la más estudiada y deseada por investigadores y agricultores.

Una de las contribuciones más importantes de la Fitopatología a la Biología Vegetal en el siglo XX ha sido el modelo gen-a-gen propuesto por Harold Flor hace más de 50 años, según el cual los genes que regulan la resistencia raza-específica se corresponden con genes específicos del patógeno que regulan su virulencia. En esta relación, a cada gen en la planta que determina la resistencia, corresponde un gen complementario en el patógeno que determina su incapacidad de causar enfermedad (o avirulencia) en aquella que lo posee.

Esta correspondencia ha favorecido una interpretación molecular predominante del modelo gen-a-gen, según la cual las proteínas codificadas por los genes de resistencia y avirulencia se reconocen específicamente, en una relación análoga a la que caracteriza a receptor y ligando entre antígeno y anticuerpo. En este esquema, pues, los genes de resistencia actuarían como genes de reconocimiento, fruto del cual sería la activación de genes en la planta que codifican la expresión de respuestas defensivas inespecíficas contra el agente invasor.

La co-evolución entre plantas y patógenos que subyace en el sistema gen-a-gen de la resistencia raza-específica, junto con la utilización extensa e intensa de ésta favorecida por la facilidad de su manipulación genética y el nivel de protección que confiere al cultivo, constituyen un talón de Aquiles para las variedades resistentes porque la modificación de un factor de virulencia en el patógeno inutiliza el gen de resistencia correspondiente.

De hecho, la eficiencia de las variedades resistentes para el control de enfermedades es comprometida por la capacidad evolutiva de los patógenos, que da lugar a que en sus poblaciones naturales se establezcan razas o patotipos capaces de superar la resistencia en la planta. Este fenómeno es particularmente significativo con la resistencia regulada por relaciones gen-a-gen, de cuya 'superación' por nuevas razas han sido testigos agrónomos, fitopatólogos y genetistas durante los 100 años transcurridos desde el descubrimiento de la naturaleza genética de la resistencia a patógenos en plantas.

Por ello, la utilización eficiente de variedades resistentes requiere que, independientemente de los procedimientos de genética convencional o biotecnológica que se utilicen para obtenerlas, su desarrollo se base sobre la historia y potencial evolutivo de la población del patógeno, y que el despliegue geográfico de dichas variedades en áreas de cultivos determinadas se realice de acuerdo con el conocimiento de la naturaleza y prevalencia de las razas y patotipos del patógeno que existen en ellas.

Sin embargo, la posibilidad de satisfacer ambas cautelas ha sido dificultada por la falta de metodologías adecuadas para obtener la información necesaria con la facilidad, prontitud y extensión convenientes. Por ejemplo, la información sobre las características y distribución

de razas y patotipos debía ser obtenida mediante costosos muestreos y bioensayos de patogenicidad de las estirpes de los patógenos, en recintos acondicionados adecuadamente.

Los avances en biología molecular han ayudado a superar dichas carencias, mediante protocolos para la identificación y caracterización molecular rápida y exacta de los patógenos, basados en la detección y análisis de su ADN, con los que ahora es posible valorar la estructura de sus poblaciones naturales y con ello utilizar más eficientemente la resistencia disponible en las especies vegetales huésped de ellos.

Por ejemplo, durante los últimos años ha sido posible desarrollar marcadores de ADN específicos de los patotipos defoliante y no-defoliante de *Verticillium dahliae*, el agente causal de la Verticilosis del algodón y olivo, y mediante la utilización de dichos marcadores en investigaciones de naturaleza epidemiológica, a gran escala geográfica, se ha podido caracterizar la prevalencia y distribución de dichos patotipos en Andalucía.

El patotipo defoliante y letal de algodón y olivo fue diagnosticado por vez primera en España en 1983, circunscrito en cultivos de algodón en las Marismas del Guadalquivir, al sur de la provincia de Sevilla.

La inacción entonces con medidas de contención ha dado lugar a la extensión geográfica de dicho patotipo, que es ahora el predominante en olivares de regadío en Andalucía y constituye la principal amenaza sanitaria para el cultivo. A dicha extensión han podido contribuir la dispersión de hojas infectadas que en gran número caen del árbol enfermo, así como la utilización de agua embalsada o de río infestada por el patógeno y/o la utilización de plantones infectados por *V. dahliae* defoliante. La prevalencia del patotipo defoliante hace inútil ahora la resistencia disponible en variedades de olivo, que sólo es operativa contra el patotipo no defoliante predominante hasta ahora.

Otra de las aplicaciones de la biología molecular a la Fitopatología, de interés para el uso eficiente de la resistencia, concierne a la caracterización filogenética de los patógenos y la posibilidad de inferir si su evolución hacia el patogenismo en plantas ha tenido lugar una sola vez en el pasado, y en consecuencia son monofiléticos; o bien mediante eventos múltiples e independientes, y por lo tanto son polifiléticos.

El que un patógeno o sus razas tengan origen polifilético tiene importantes repercusiones sobre el desarrollo y utilización de variedades resistentes, porque no es posible asegurar que variedades seleccionadas como resistentes en un área geográfica, contra poblaciones patogénicas de un determinado origen evolutivo, sean necesariamente resistentes contra poblaciones del patógeno de distinto origen geográfico, en el que la patogenicidad haya podido tener un origen evolutivo diferente.

Por ello, para producir variedades resistentes contra un patógeno polifilético es aconsejable que la selección de genotipos resistentes sea llevada a cabo utilizando estirpes del patógeno representativas de las diferentes clades evolutivas, a fin de asegurar la universalidad y eficiencia de la resistencia desarrollada.

Un caso de particular relevancia a este respecto es el hongo *Fusarium oxysporum*, un complejo de taxo-especies morfológicas de reproducción estrictamente asexual, que hasta ahora se ha concebido como un conjunto de numerosos clones no-patogénicos de plantas, y de unas 150 estirpes fitopatógenas denominadas formas especiales. Estas formas especiales se caracterizan por la capacidad de atacar específicamente a determinadas especies botánicas o géneros de ellas; en la mayoría de los casos mediante la invasión y crecimiento extenso en el interior de los vasos xilemáticos de la planta.

Investigaciones utilizando una colección mundial de estirpes de *Fusarium oxysporum ciceris*, el agente causal de la Fusariosis vascular del garbanzo, demostraron que poblaciones geográficamente diversas del hongo comprenden dos patotipos distinguibles por los síntomas de Amarillez o Marchitez que inducen en la planta, dentro de los cuales es posible diferenciar fenotípica y molecularmente hasta ocho razas patogénicas.

La prevalencia y distribución de dichas razas en España y otros países de la Cuenca Mediterránea ha sido monitorizada mediante marcadores de ADN específicos; de manera que ahora es posible elegir las variedades de garbanzo agrónomicamente mejor adaptadas en un área de cultivo, que además sean portadoras de resistencia efectiva contra la raza o razas del patógeno más prevalentes en ella.

Aunque tan gran diversidad fenotípica y genotípica sugiere polifilia en esta forma especial, el análisis filogenético de las secuencias de cinco genes altamente conservados en hongos filamentosos agrupó a las estirpes estudiadas en un único clade, indicando que *Fusarium oxysporum ciceris* es monofilética.

La interpretación más simple del origen monofilético de este patógeno es que la adquisición de patogenicidad sobre garbanzo debe haberse originado a partir de una pequeña población fundadora de estirpes no-patogénicas, invasoras corticales del sistema radical de la planta, que adquirió la capacidad de causar infección vascular en ella.

La subsiguiente variación de fenotipos de virulencia en las poblaciones derivadas de las estirpes fundadoras debe proceder de la acumulación de mutaciones, que han tenido lugar en áreas de cultivo del huésped geográficamente aisladas. Sin embargo, la evolución de los fenotipos de virulencia sobre variedades resistentes, es un tema no resuelto que ha intrigado a los fitopatólogos durante décadas.

Las características que subyacen en la Fusariosis Vascular del garbanzo y su agente causal; incluyendo su distribución en todas las áreas cultivadoras de esta planta en el mundo, la gran diversidad patogénica de las poblaciones del hongo a pesar de su reproducción asexual estricta, y en particular, la monofilia de éste, hacen del sistema *Fusarium oxysporum ciceris*/garbanzo un modelo ideal para estudiar la evolución de virulencia en las poblaciones de hongos fitopatógenos.

En particular, se había postulado que en una forma especial monofilética de *Fusarium oxysporum*, las razas patogénicas que mantuvieran una estrecha relación filogenética debían derivar unas de otras, en un proceso secuencial de pasos discretos en la adquisición o pérdida de virulencia, en lugar de originarse de manera independiente.

Estudios sobre la filogenia de las razas patogénicas de *Fusarium oxysporum ciceris* en mi laboratorio, utilizando patrones de hibridación del ADN genómico de estirpes de todas las razas del hongo con sondas de ADN repetitivo de éste, han hecho posible contrastar esta hipótesis y demostrar por vez primera que las ocho razas conocidas del mismo son monofiléticas, y han evolucionado unas de otras siguiendo el proceso secuencial y discreto de adquisición o pérdida de virulencia sobre variedades resistentes antes referido.

Así, superponiendo la virulencia específica de las razas del hongo para cada línea de garbanzo resistente (indicadas con letras mayúsculas en la figura), sobre el árbol filogenético de los linajes raciales, inferimos dos escenarios evolutivos posibles, el más simple de los cuales se presenta en la Figura. En ella, las ramificaciones coloreadas indican las razas que se consideran ancestrales en la evolución de las restantes. Este escenario postula que la primera adquisición de virulencia habría dado lugar a la raza 0, la menos virulenta de todas las razas conocidas del hongo, y a partir de ella habrían evolucionado posteriormente las razas más virulentas.

4.2. Utilización de agentes microbianos para el control biológico de enfermedades

Una de las estrategias no químicas más deseadas para la protección ambientalmente respetuosa del rendimiento agrícola promovida por la Comisión Europea, es el tratamiento de la planta con microorganismos no patogénicos conocidos como agentes de biocontrol.

Sin embargo, la aplicación práctica de esta estrategia de control se ha visto limitada por la variabilidad e inconsistencia de los resultados que proporciona, que hace que sea percibida por agricultores e industria con menos confianza que los productos químicos fitosanitarios. Por ello, una de las cautelas más necesarias en la explotación de agentes microbianos para el control de enfermedades, es que para su utilización se consideren los factores ambientales y del patosistema diana que inciden sobre su consistencia y eficiencia.

Comprender la naturaleza de tales factores y reducir o eliminar sus efectos, son todavía desafíos pendientes para los profesionales de la Fitopatología.

Uno de dichos factores más recientemente resaltados es el genotipo de la planta huésped. Por ejemplo, nuestros resultados han demostrado que la eficacia de biocontrol de la Fusariosis vascular del garbanzo puede variar con los cultivares de la planta huésped, de manera que la eficiencia de biocontrol fue siempre superior en la var. PV61 que en 'ICCV4', independientemente del microorganismo aplicado (i.e., *Bacillus subtilis*, *F. oxysporum* no patogénico, *Pseudomonas fluorescens*, y *Trichoderma harzianum*), aunque ambas variedades son igualmente susceptibles a la enfermedad.

Tales resultados, y otros similares obtenidos en diferentes laboratorios, sugieren que en los cultivares de plantas existen genes que juegan un papel importante en el desarrollo de las interacciones entre plantas y microorganismos beneficiosos, independientemente de aquéllos que regulan la reacción de especies cultivadas a sus patógenos.

4.3. Modificación de prácticas de cultivo

Si anteriormente he resaltado la utilidad de las variedades resistentes por si solas para el control ambientalmente respetuoso del rendimiento de los cultivos, es oportuno ahora señalar la importancia que tienen para el uso eficiente de otras medidas de lucha, en el marco de las estrategias de control integrado exigido por las nuevas regulaciones en materia fitosanitaria.

Introducir modificaciones en las prácticas de cultivo, mediante las cuales se pueda reducir la exposición de las plantas a condiciones favorables para el desarrollo de epidemias, puede ser una de las formas más económicamente viable y ambientalmente respetuosa de lucha contra enfermedades.

Sin embargo, la eficiencia de control puede depender considerablemente de las características y componentes de la enfermedad en cuestión, y requerir por ello un conocimiento adecuado de ambos a través de la investigación fitopatológica.

La pertinencia de estas cautelas es ilustrada por los resultados de nuestras investigaciones sobre los efectos de adelantos de la fecha de siembra en la epidemiología y control de la Fusariosis Vascular del garbanzo.

Mediante un sistema experimental modelo en ambiente controlado, y modelos cuantitativos no lineales, hemos desarrollado superficies de respuesta que expresan la complejidad de los efectos combinados de la temperatura del suelo, la virulencia y cantidad de inóculo de razas del hongo causal, y el nivel de susceptibilidad de las variedades de garbanzo, sobre la cantidad de enfermedad que se desarrolla en la planta.

Además, a partir de dichos modelos fue posible desarrollar diagramas de umbrales de riesgo, que ponen de manifiesto que las limitaciones en el desarrollo de la enfermedad debida a niveles subóptimos de un factor son compensadas por niveles elevados de otro factor. Estos diagramas son útiles para estimar el desarrollo potencial de epidemias de la enfermedad en un área geográfica, basado en la temperatura del suelo, la cantidad de inóculo de una raza y la susceptibilidad de la variedad de garbanzo.

Los modelos estiman que la temperatura óptima para la enfermedad es 25°C en el intervalo 22 a 28°C, dependiendo de las combinaciones raza-variedad, al cual se acomodan las temperaturas que prevalecen en Andalucía durante la primavera, cuando tradicionalmente tiene lugar la siembra del cultivo y se desarrollan las epidemias más severas de Fusariosis del garbanzo.

Por ello, de acuerdo con los resultados que acabo de referir, el adelanto de la siembra de garbanzo en Andalucía desde principios de la primavera a principios de invierno extendería el tiempo en que la planta crece a temperaturas desfavorables para la enfermedad y debería contribuir a su control.

Esta hipótesis fue contrastada en 3 años de experimentos en campo, utilizando microparcelas infestadas artificialmente con las razas 0 y 5 del patógeno, marcadamente diferentes en virulencia, y sembradas con variedades de garbanzo de distinta susceptibilidad a ellas.

Los experimentos proporcionaron un total de 108 epidemias, descritas por las curvas de incremento de un índice de enfermedad durante el desarrollo del cultivo, de las cuales son ejemplo las que se presentan en la imagen. Dichas epidemias se caracterizaron mediante cinco variables epidémicas y se compararon mediante análisis factorial de componentes principales. Los resultados fueron concluyentes en que el beneficio neto del adelanto de la siembra, como medida de control de la Fusariosis vascular del garbanzo, es determinado por la virulencia de la raza del patógeno y la susceptibilidad del cultivar utilizado, y sus interacciones.

Así, el adelanto de la siembra de garbanzo a periodos fríos retrasa el comienzo de las epidemias de Fusariosis, ralentiza su desarrollo y reduce la cantidad final de enfermedad en una variedad susceptible si la raza es moderadamente virulenta. Sin embargo; si la raza es altamente virulenta, tales efectos por la misma práctica de cultivo sólo son posibles si se utilizan variedades moderadamente resistentes.

En consecuencia, la utilización eficiente del adelanto de la fecha de siembra del garbanzo para el control de la Fusariosis vascular requiere conocer a priori las razas del patógeno que prevalecen en los lugares de aplicación, así como su virulencia; y además disponer de cultivares de garbanzo con un nivel de resistencia parcial al patógeno. Ambos requisitos pueden ser satisfechos mediante el uso de los protocolos moleculares que he descrito anteriormente para la identificación rápida y precisa de las razas de *F. oxysporum ciceris* que

existen en el suelo, y el empleo de variedades de garbanzo parcialmente resistentes pero agronómica y comercialmente adecuadas, que hemos desarrollado en colaboración con mejoradores genéticos.

4.- CONCLUSIONES

Fitopatología y Agricultura, como otras ciencias y actividades, han de afrontar el desafío que subyace en los cambios rápidos y acentuados que están teniendo lugar, cuya superación con éxito depende en gran medida de innovaciones tecnológicas basadas en el conocimiento más completo de los fenómenos y procesos que caracterizan a ambas.

En lo concerniente a la Fitopatología, he pretendido a lo largo de mi discurso identificar y analizar la naturaleza de algunos de dichos desafíos, a los que ha de hacer frente en su cometido de proteger el rendimiento agrícola satisfaciendo las exigencias sociales de salubridad alimentaria y calidad y preservación del medio ambiente.

La Fitopatología es una ciencia integradora, y por ello ofrece un vasto campo de oportunidades a la investigación en las ciencias básicas sobre las que asienta su progreso. Un ejemplo de ello es el momento de verdadera excitación científica en que se encuentra el estudio de las interacciones entre plantas y patógenos, que está siendo auspiciado por los avances en conocimientos y tecnologías moleculares.

Sin embargo, los abordajes moleculares, celulares, o subcelulares en expansión no van suficientemente acompañados por abordajes multidisciplinares a nivel de sistemas, que son imprescindibles para la puesta en práctica de las estrategias de control integrado.

Este desequilibrio en los procesos de generar conocimiento e innovación científico-técnica para resolver los problemas fitopatológicos ha generado notable inquietud en ambientes profesionales en los EE UU y el Reino Unido, porque con la especialización en la investigación molecular se está produciendo un retroceso claramente perceptible en la base del conocimiento biológico de las enfermedades y de la aplicación fitopatológica práctica para su control.

Además de integradora, la Fitopatología es una ciencia comprometida, porque la tecnología derivada de ella ha de contribuir a la provisión de alimentos a una población en continuo crecimiento, con un escenario de cambio climático que puede determinar pérdida de suelo y ambientes de cultivo. Estas circunstancias, como el mismo origen de los alimentos vegetales que consumimos, son insuficientemente percibidas todavía por una opinión pública cada vez más distanciada de la agricultura, y tendente a la complacencia y el prejuicio, de las que puede ser ejemplo el todavía polarizado debate en torno a las plantas genéticamente modificadas (i.e., transgénicas).

La puesta en práctica de los programas de control integrado para necesarios para satisfacer dicho compromiso, una vez definidos y caracterizados sus componentes individuales e interacciones a través de la investigación científica y técnica, requiere disponer de técnicos agrarios con la profesión fitopatológica necesaria para adoptar y aplicar los nuevos conocimientos y técnicas que resulten de dicha investigación.

De hecho, esta necesidad de profesión fitopatológica subyace ya en el desarrollo y puesta en práctica de varios de los aspectos y acciones incluidos en la Ley de Sanidad Vegetal del año 2002 y en las recientes directivas de la Comisión Europea para el uso sostenible de los productos fitosanitarios.

A la inquietud en ambientes profesionales a que antes he hecho referencia, se une la convicción generalizada de que las enseñanzas fitopatológicas se han visto erosionadas en las estructuras curriculares universitarias, que es correlativa con la reclamación de que se establezcan titulaciones especializadas en Sanidad Vegetal. Tal reclamación viene siendo referida hace años por personalidades internacionalmente relevantes en el mundo de la Fitopatología; y ya ha dado lugar a titulaciones pioneras de Doctor en Sanidad o Medicina Vegetal en varias universidades norteamericanas que no exigen la realización de investigación doctoral.

Desafortunadamente, la falta de profesión fitopatológica no excluye que se puedan poner en práctica acciones para las que dicha profesión es necesaria. En los últimos años, las legítimas exigencias de mercados y consumidores de productos agrícolas, sensibilizados en cuanto a la calidad y salubridad alimentaria, están siendo satisfechas por acciones de certificación, etiquetado, recomendaciones, etc. de carácter y naturaleza fitosanitarias, sin que sea convincente que la práctica de dichas actividades esté respaldada por la especialización profesional en materia de Sanidad Vegetal de los agentes sociales que las llevan a cabo.

En España, las últimas modificaciones curriculares en la Universidad han reducido considerablemente la extensión e intensidad de las enseñanzas fitopatológicas en las ETSIAs, y las carencias que he señalado anteriormente son difícilmente percibidas o asumidas incluso en los ambientes sociales, técnicos y académicos concernidos. Sin embargo, todavía queda una oportunidad para corregir tal deficiencia, si se aprovecha inteligentemente el proceso en curso de adaptación de titulaciones universitarias al Espacio Europeo de Educación Superior.