

DESARROLLO EPIDÉMICO DE LA ROYA ASIÁTICA DE LA SOYA BAJO LA ACCIÓN DE FUNGICIDAS Y VARIABLES CLIMÁTICAS

EPIDEMIC DEVELOPMENT OF ASIAN SOYBEAN RUST UNDER THE ACTION OF FUNGICIDES AND CLIMATE VARIABLES

Marja L. Fajardo-Franco¹, Remigio A. Guzmán-Plazola^{2*}, Guadalupe González-Baca², Antonio P. Terán-Vargas³, Humberto Vaquera-Huerta⁴ y Martín Aguilar-Tlatelpa¹

¹Universidad Intercultural del Estado de Puebla, Posgrado en Manejo Sustentable de Recursos Naturales, Lipuntahuaca, Huehuetla, Puebla, México. ²Colegio de Postgraduados (COLPOS), Programa de Fitosanidad-Fitopatología, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. ³Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Las Huastecas, Villa Cuauhtémoc, Altamira, Tamaulipas, México. ⁴COLPOS, Programa en Socioeconomía Estadística e Informática, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia (rguzmanp@colpos.mx)

RESUMEN

La roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & Sydow) es una limitante para la producción de soya [*Glycine max* (L.) Merrill] debido a que causa pérdidas de rendimiento de hasta 80 %. En México, son escasos los estudios sobre la influencia de fungicidas en el desarrollo epidémico de la enfermedad, su relación con el clima y el impacto en el rendimiento. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de: a) pyraclostrobin + flutriafol, b) pyraclostrobin + epoxiconazole, y c) epoxiconazole, sobre el desarrollo epidémico de la roya asiática de la soya, así como el impacto de la enfermedad sobre el rendimiento de grano y el efecto de variables climáticas sobre la enfermedad. Se establecieron siete experimentos en un periodo de tres años en Altamira, Tamaulipas, México. Únicamente se detectaron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en la incidencia y en el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) con la aplicación de pyraclostrobin + epoxiconazole, la cual disminuyó los niveles de incidencia de 88 a 96 % y la severidad de 95 a 98 %; además, evitó pérdidas de rendimiento de grano del orden del 11.2 al 25.6 %. La aplicación de pyraclostrobin + flutriafol y de epoxiconazole no causaron diferencias sobre la severidad y el ABCPE de la roya asiática, en comparación con el testigo sin aplicación de fungicidas. Las variables climáticas asociadas con una mayor probabilidad de ocurrencia de la enfermedad fueron el número de horas con temperaturas entre 17.5 y 32.5 ° C, en combinación con el número de horas con humedad foliar en el intervalo de 10 a 15 (escala 0 a 15) y con humedad relativa mayor de 70 %.

Palabras clave: *Phakopsora pachyrhizi*, *Glycine max*, fungicida, incidencia, rendimiento, severidad.

SUMMARY

Soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & Sydow), is a limiting factor for soybean [*Glycine max* (L.) Merrill] production because it causes yield losses of up to 80 %. In Mexico there are few studies on the influence of fungicides on the epidemic development of the disease, its relationship with climate and the impact on yield. The objective of this study was to evaluate the effect of: a) pyraclostrobin + flutriafol, b) pyraclostrobin + epoxiconazole, and c) epoxiconazole on the soybean rust epidemic development as well as the impact of the disease on grain yield and the effect of climatic variables on the disease. Seven experiments were carried out over a three-year period in Altamira, Tamaulipas, Mexico. Significant differences ($P \leq 0.05$) were only detected in the incidence and the area under the disease progression curve (AUDPC) with the application of pyraclostrobin + epoxiconazole, which

decreased the incidence levels by 88 to 96 % and severity by 95 to 98 %; in addition, it prevented losses of grain yield by 11.2 to 25.6 %. The application of pyraclostrobin + flutriafol and epoxiconazole did not cause differences on severity and AUDPC of soybean rust compared to the control without fungicide application. Weather variables associated with a higher probability of rust occurrence were the number of hours with temperatures between 17.5 and 32.5 ° C, in combination with the number of hours with leaf moisture between 10 and 15 (scale 0 to 15) and with relative humidity higher than 70 %.

Index words: *Phakopsora pachyrhizi*, *Glycine max*, fungicide, grain yield, incidence, severity.

INTRODUCCIÓN

La roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & Sydow) es considerada una de las enfermedades más importantes de la soya, ya que puede causar pérdidas de rendimiento de grano hasta del 80 % cuando no se aplican medidas de control (Twizeyimana y Hartman, 2019). Desde la introducción de la roya asiática (RAS) en México en el año 2005, se considera como una amenaza para las casi 63 mil hectáreas de soya que se cultivan cada año en el noreste de México (SIAP, 2019), principalmente en el estado de Tamaulipas, debido a que las variedades regionales, Huasteca (H)200, H300 y H400 son susceptibles a *P. pachyrhizi* (García-Rodríguez *et al.*, 2017). En México, el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) determinó, con base en un análisis de riesgo, que las condiciones ambientales favorables para el ataque de la RAS en el Sur de Tamaulipas (temperaturas entre 18 y 25 ° C, humedad relativa ≥ 65 %) ocurren principalmente en el periodo de octubre y noviembre; por tal motivo, se estableció que las fechas de siembra entre el 15 de junio (día juliano 166) y el 20 de julio (día juliano 201) son las más apropiadas para lograr bajos niveles de la RAS (Terán-Vargas *et al.*, 2007). De acuerdo con evaluaciones preliminares, el INIFAP recomienda la aplicación de

fungicidas del grupo de los triazoles y estrobilurinas a partir de la detección de las primeras pústulas; en particular, la aplicación de pyraclostrobin, flutriafol y epoxiconazole, solos o en mezcla (Terán-Vargas *et al.*, 2007).

En Sudamérica, estos fungicidas siguen utilizándose para el manejo de la RAS, al igual que en México; sin embargo, la información sobre su efecto en el desarrollo de la RAS bajo las condiciones del Sur de Tamaulipas es limitada (Pereira-Prado *et al.*, 2019). Una adecuada elección de fungicidas permite lograr un control eficiente de la enfermedad, particularmente si se conocen los parámetros climáticos que favorecen su progreso. Los objetivos del presente estudio fueron: a) evaluar el efecto de epoxiconazole, pyraclostrobin + flutriafol y pyraclostrobin + epoxiconazole sobre el desarrollo epidémico de la RAS, b) determinar el impacto de la RAS sobre el rendimiento de grano y c) estudiar el efecto de variables climáticas sobre su comportamiento en el sur de Tamaulipas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitios experimentales y material vegetal

La investigación se realizó durante los años 2010, 2012 y 2013 mediante siete experimentos (E) establecidos con las variedades de soya H200, H300 y H400 en el municipio de Altamira, Tamaulipas, México (Cuadro 1). La siembra se efectuó a una densidad de población de 250,000 plantas ha⁻¹, las labores culturales y control de insectos plaga se realizaron conforme a lo recomendado para el cultivo de la soya por el INIFAP (Terán *et al.*, 2007) y SENASICA (2017).

Diseño experimental y tratamientos

Los experimentos se establecieron en parcelas pareadas con cuatro repeticiones, donde cada parcela tratada con fungicida tuvo adjunta una parcela testigo (Thiessen *et al.*, 2017). En los E1 a E3, cada parcela consistió de ocho surcos de 6 m de longitud, separados a 0.8 m entre sí, mientras que la parcela útil consistió en los dos surcos centrales. La aplicación de fungicidas en estos experimentos se realizó con un equipo terrestre presurizado con CO₂ (Modelo T, Bellspray Inc. R&D Sprayers, Opelousas, Louisiana, EUA), con boquillas de cono hueco Tjeet TXVS-6 y un gasto de 200 L de agua ha⁻¹. En los E4 a E7, cada parcela estuvo conformada por 66 surcos separados entre sí cada 0.8 m y con 50 m de longitud. En cada parcela se tuvieron cuatro bloques y en cada bloque se seleccionaron al azar nueve plantas con competencia completa, lo que corresponde a 36 plantas por tratamiento. La aplicación de fungicidas en estos experimentos se realizó con equipo terrestre, mediante boquillas de cono hueco TX-8, a una presión de 413.7 kPa y con un gasto de 200 L de agua ha⁻¹. La elección de los fungicidas, el momento de aplicación y las dosis se basó en las recomendaciones del INIFAP para el manejo de la RAS (Terán-Vargas *et al.*, 2007). Se realizaron hasta cinco aplicaciones de fungicida durante el ciclo de cultivo, desde etapas fenológicas vegetativas hasta las reproductivas.

Variables evaluadas

En cada parcela se realizaron muestreos semanales para detectar los primeros signos del patógeno y para dar seguimiento al desarrollo de la RAS durante el ciclo de cultivo. Cuando se detectaron los primeros signos

Cuadro 1. Experimentos establecidos para evaluar el efecto de fungicidas en el control de la roya asiática de la soya durante los ciclos primavera-verano 2010, 2012 y 2013. Altamira, Tamaulipas, México.

E	Localidad-Año	Variedad	Fecha de siembra [†]	Tratamiento
1	CE. Las Huastecas-2010	H200	271	Pyraclostrobin ^{††} + Flutriafol [‡]
2	CE. Las Huastecas-2010	H300	271	Pyraclostrobin + Flutriafol
3	CE. Las Huastecas-2010	H400	271	Pyraclostrobin + Flutriafol
4	La Resolana-2012	H200	191	Pyraclostrobin + Epoxiconazole ^{§§}
5	CE. Las Huastecas-2012	H400	216	Pyraclostrobin + Epoxiconazole ^{§§}
6	CE. Las Huastecas-2013	H200	200	Pyraclostrobin + Epoxiconazole ^{§§}
7	José Ma. Morelos-2013	H400	180	Epoxiconazole [×]

[†]Día juliano. ^{††}Pyraclostrobin a dosis de 75 g i.a. ha⁻¹ en todos los tratamientos donde interviene, [‡]Flutriafol a dosis de 100 g i.a. ha⁻¹ en todos los tratamientos donde interviene, ^{§§}Epoxiconazole a dosis de 25 g i.a. ha⁻¹, [×]Epoxiconazole a dosis de 62.5 g i.a. ha⁻¹. En cada experimento (E) se agregó un testigo.

del patógeno, la identidad de *P. pachyrhizi* se confirmó mediante la observación de uredosporas bajo un microscopio compuesto (Marca Motic, modelo DMB1-223, Hong Kong, China) y la utilización de las claves de Cummins e Hiratsuka (2003) y Ono *et al.* (1992). También se usaron tiras inmunocromatográficas QuickStix (Enviroligix™) específicas para *P. pachyrhizi*, lo que marcó el inicio al seguimiento del desarrollo de la RAS mediante la estimación de la incidencia (calculada como la proporción de folíolos infectados respecto al total de folíolos presentes en la planta) y la severidad. La severidad por tercios se estimó como el promedio del área foliar dañada, tomando como base el total de folíolos en cada tercio, mientras que la severidad total se estimó como el promedio del área foliar dañada mediante una escala diagramática y tomando como base el total de folíolos en la planta (Godoy *et al.*, 2006). En cada muestreo se registró la etapa fenológica de la soya (Fehr y Caviness, 1981). Adicionalmente, se estimó el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) con base en la severidad (Campbell y Madden, 1990). En cada localidad se registró la temperatura ambiental (T), la humedad relativa (HR), la humedad en la superficie de la hoja (HF, nivel de saturación en escala de 0-15, donde 0 es seca y 15 saturada) y precipitación (P), con intervalos de medición de 5 min, mediante una microestación meteorológica (Watch Dog®, Aurora, Illinois, EUA). Al final del ciclo de cultivo, el grano se cosechó en 2 m lineales de los surcos centrales de cada parcela útil y se midió la humedad mediante un humidímetro John Deere (Modelo SW08120, Moline, Illinois, EUA). El rendimiento se estimó en kg ha⁻¹, para lo cual, el grano se pesó en una balanza Torrey (Modelo LEQ-5/10, Monterrey, Nuevo León, México) y se ajustó a 12 % de humedad.

Análisis estadístico

Para investigar el efecto de tratamientos sobre las variables de respuesta (incidencia, severidad y ABCPE) se utilizó la prueba t de Student para dos poblaciones independientes en cada experimento. Se verificó el supuesto de homogeneidad de varianzas entre tratamientos usando el método Folded F (Steel y Torrie, 1980) para los valores de incidencia, severidad y ABCPE. Cuando las varianzas resultaron homogéneas la comparación de medias se realizó mediante la prueba t de Student con base en el método Pooled; cuando éstas resultaron diferentes, la comparación se hizo con base en el método Satterthwaite. Previo a las pruebas de t, los datos de incidencia y severidad se sometieron a una transformación arco seno. Con los datos de seis experimentos (en uno no hubo enfermedad) en los tres años de evaluación, se realizó un análisis de correlación de Pearson entre las variables de rendimiento, incidencia y ABCPE. Los datos de T, HR, HF y P se analizaron por hora y de ellos se derivaron 113 variables para cada

día de evaluación en cada experimento. Adicionalmente, cada día fue clasificado de forma binaria, para lo cual se asignó un valor de 0 a los días previos a la detección de la RAS y un valor de 1 a partir de su detección. Con las 113 variables climáticas se realizó un análisis para seleccionar las variables que mejor contribuyeron a diferenciar entre los días favorables y no favorables para la ocurrencia de la RAS, mediante el uso de regresión logística, con los métodos de selección Forward, Backward y Stepwise del procedimiento PROC LOGISTIC del programa SAS v.9.3 (SAS Institute, 2011). Se identificó como mejor modelo a aquel que presentó el valor más bajo del Criterio de Información de Akaike (AIC) (Akaike, 1973) y el mayor porcentaje de concordancia en la clasificación de los días favorables para la ocurrencia de la RAS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La RAS no se presentó en el E4, mientras que en los demás experimentos la enfermedad se detectó desde el inicio de la floración (R1) y hasta la formación de semillas (R5).

Efecto de la aplicación de pyraclostrobin + flutriafol en el desarrollo epidémico de la RAS

La comparación de medias entre los tratamientos del E1 indicó que se tuvieron diferencias significativas ($P \leq 0.05$) entre la incidencia final de las parcelas tratadas con pyraclostrobin + flutriafol (8.0 %) y las parcelas sin aplicación de fungicidas (77.8 %); ésto representó una reducción de 89.7 % en la proporción de folíolos enfermos al utilizar la mezcla de fungicidas (Figura 1A). En el E2, las parcelas asperjadas con los fungicidas no presentaron RAS, mientras que en el testigo tuvieron una incidencia final de 5.4 % (Figura 1B). En el E3, la aplicación de pyraclostrobin + flutriafol redujo significativamente ($P \leq 0.05$) la incidencia final de la RAS en las parcelas tratadas con los fungicidas (0.2 %) en comparación con el testigo (61.7 %), lo que representó una disminución de 99.6 % en la enfermedad (Figura 1C). En Argentina se reportó que la aplicación de flutriafol logró una eficacia del 70.0 % en el control de la RAS (Ploper *et al.*, 2015). En los Estados Unidos, Delaney *et al.* (2018) reportaron que la aspersión de pyraclostrobin y flutriafol aplicados solos disminuyeron significativamente los daños ocasionados por la RAS e incrementaron el rendimiento, lo cual se atribuyó a que el pyraclostrobin, al ser un fungicida del grupo de las estrobirulinas, previene la penetración del patógeno en el tejido del hospedante, mientras que el flutriafol, al ser un fungicida del grupo de los triazoles, tiene un efecto preventivo y curativo, lo que le permite inhibir, e incluso detener, el desarrollo de la infección.

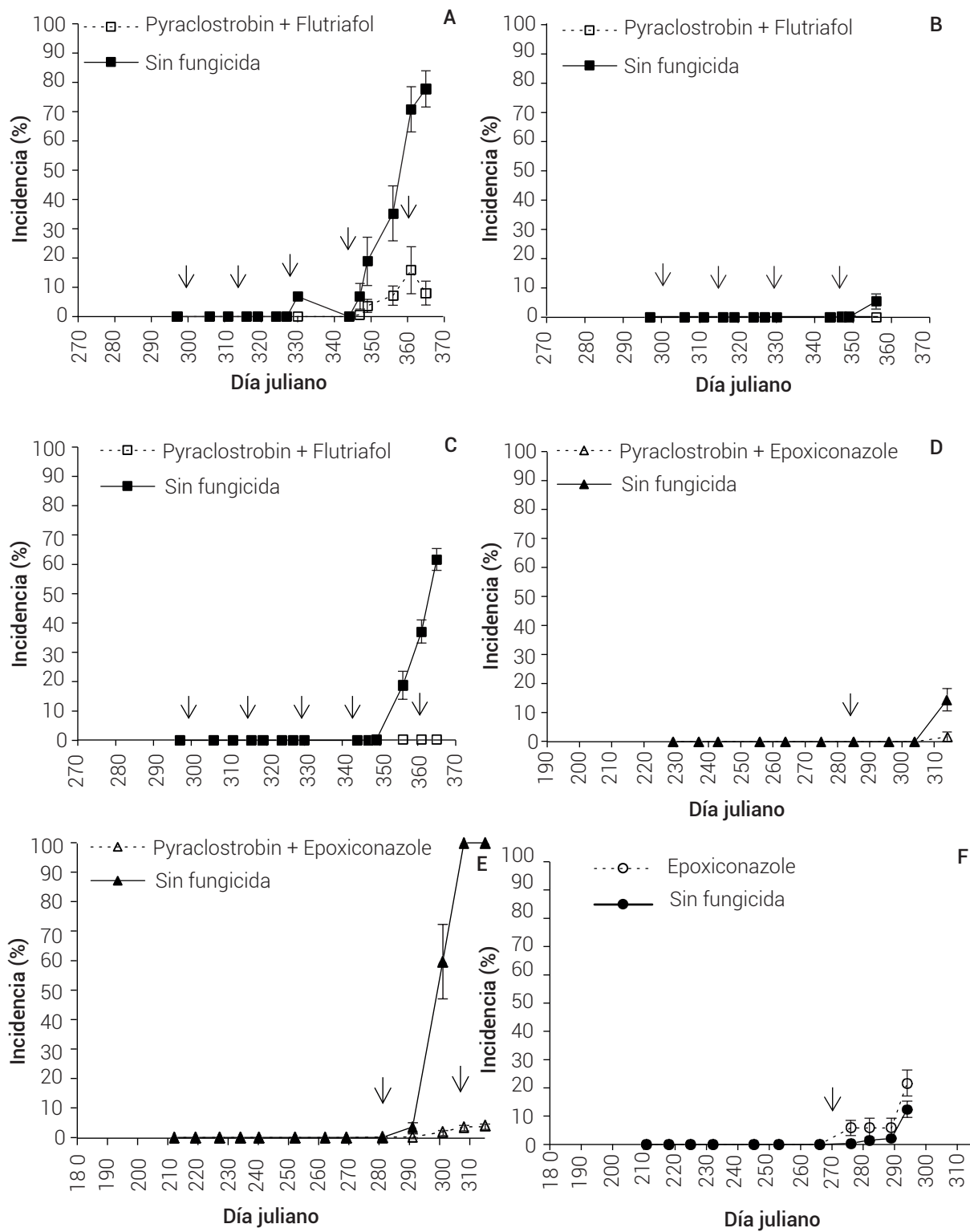


Figura 1. Incidencia de la roya asiática de la soya en parcelas tratadas con y sin fungicidas en Altamira, Tamaulipas. A) Experimento E1, Campo Experimental (CE) Las Huasteca-H200; B) E2, CE Las Huastecas-H300; C) E3, CE Las Huastecas-H400; D) E5, CE. Las Huastecas-H200; E) E6, CE Las Huastecas-H200 y F) E7, José Ma. Morelos-H400. Las flechas verticales indican el día de la aplicación de fungicida. Las barras verticales en cada punto representan el error estándar de la media

Efecto de la aplicación de pyraclostrobin + epoxiconazole en el desarrollo epidémico de la RAS

En el E5 la incidencia final en las parcelas tratadas con la mezcla de pyraclostrobin + epoxiconazole fue de 1.7 %, mientras que en las parcelas testigo fue de 14.5 %; estas diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$), lo que representó una reducción de 88.3 % con respecto a las parcelas testigo (Figura 1D). En el E6, la tendencia fue similar, ya que la aplicación de estos fungicidas logró reducir la enfermedad significativamente ($P \leq 0.05$). Las plantas asperjadas con los fungicidas tuvieron una incidencia final del 3.6 %, mientras que las plantas testigo mostraron una incidencia final del 100 %; estas diferencias representaron una reducción de la incidencia del 96.4 % (Figura 1E). En Argentina, Ploper *et al.* (2015) reportaron que la mezcla de pyraclostrobin + epoxiconazole tuvo una eficacia del 80.5 % en el control de la RAS. Investigaciones en Argentina y Brasil indicaron que la aplicación de pyraclostrobin y epoxiconazole tuvo un alto nivel de efectividad en el control de la RAS, incluso del 100 % (Ploper *et al.*, 2015; Reis *et al.*, 2016). Delaney *et al.* (2018) reportaron que la aplicación de pyraclostrobin logró disminuir el desarrollo de la RAS e indicaron que la aspersión de mezclas de estrobirulinas y triazoles son eficaces contra la germinación de esporas, la penetración del hospedante y la colonización de tejidos.

Efecto de la aplicación de epoxiconazole en el desarrollo epidémico de la RAS

En el E7 las parcelas tratadas con y sin epoxiconazole no mostraron diferencias significativas en la incidencia de RAS (Figura 1F). El uso de fungicidas del grupo de los triazoles, al que pertenece el epoxiconazole, no ha sido efectivo en el control de la RAS en Brasil (Reis *et al.*, 2016). Delaney *et al.* (2018) indicaron que los triazoles, como es el caso del epoxiconazole, inhiben la esporulación, lo que limita el potencial reproductivo del hongo; esta actividad antiesporulante hace que los triazoles sean útiles para el tratamiento inicial de la RAS; sin embargo, los fungicidas que pertenecen a este grupo tienen una actividad limitada una vez que las infecciones comienzan a producir esporas; por tal motivo, son menos efectivos una vez que la RAS se ha establecido en campo. Lo anterior es muy importante, ya que las aplicaciones de fungicidas inefectivos pueden ocasionar daños al ecosistema, aumentan los costos de producción y el riesgo de selección de poblaciones resistentes del patógeno.

Área bajo la curva del progreso de la enfermedad con base en la severidad

El ABCPE en las plantas del testigo en el E1 tuvo un valor de 3.5, mientras que en las parcelas tratadas con pyraclostrobin + flutriafol el valor fue de 0.01. En el E2 el ABCPE fue cercana a cero, tanto en las plantas asperjadas

Cuadro 2. Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) en parcelas de soya tratadas con y sin fungicida. Altamira, Tamaulipas, México. Ciclos primavera-verano 2010, 2012 y 2013.

Experimento-Localidad-Año	Varietal	Tratamiento	ABCPE
E1-CE Las Huastecas-2010	H200	Pyraclostrobin + Flutriafol	0.01
		Sin fungicida	3.5 ns
E2-CE Las Huastecas-2010	H300	Pyraclostrobin + Flutriafol	0
		Sin fungicida	0.01ns
E3-CE Las Huastecas-2010	H400	Pyraclostrobin + Flutriafol	0.9
		Sin fungicida	5.4 ns
E4-La Resolana-2012	H200	Pyraclostrobin + Epoxiconazole	0.0
		Sin fungicida	0.0 ns
E5-CE Las Huastecas-2012	H400	Pyraclostrobin + Epoxiconazole	0.05
		Sin fungicida	2.6*
E6-CE Las Huastecas-2013	H200	Pyraclostrobin + Epoxiconazole	0.8
		Sin fungicida	66.4 *
E7-José María Morelos-2013	H400	Epoxiconazole	0.9 ns
		Sin fungicida	0.2

Para cada localidad, ns: diferencias no significativas, *: diferencias significativas ($P \leq 0.05$) con t de Student.

con la mezcla de fungicidas como en el testigo. En el E3 el ABCPE fue de 5.4 en el testigo y de 0.9 en las parcelas asperjadas. Las diferencias entre los tratamientos de los experimentos establecidos en el 2010 no fueron significativas (Cuadro 2). En el E4 la RAS no se presentó. En el E5 el ABCPE (2.6) fue mayor en las parcelas no asperjadas que en las tratadas con pyraclostrobin + epoxiconazole (0.05); estas diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$). En el E6 la severidad de la RAS fue mayor en comparación con los experimentos anteriores, lo cual pudo estar relacionado con la prevalencia de condiciones meteorológicas propicias para el desarrollo de la RAS. En este experimento, el ABCPE fue de 66.4 en el testigo y de 0.8 en las parcelas asperjadas con la mezcla de pyraclostrobin + epoxiconazole, sin diferencias significativas ($P > 0.05$). Los resultados coinciden con lo reportado por Delaney *et al.* (2018), quienes indicaron que el desarrollo de la RAS en Estados Unidos disminuyó con la aplicación de la mezcla de estrobirulinas con triazoles. En el E7 el ABCPE en parcelas tratadas únicamente con epoxiconazole fue de 0.9 y de 0.2 en el testigo, sin diferencias significativas (Cuadro 2).

A pesar de que la RAS alcanzó niveles epidémicos diferentes entre las variedades H200, H300 y H400 en los ciclos agrícolas evaluados, ninguna de ellas mostró un patrón consistente de tolerancia a la enfermedad, lo que coincide con lo mencionado por García-Rodríguez *et al.* (2017).

Rendimiento de grano

En el E1 las parcelas tratadas con pyraclostrobin + flutriafol rindieron 2036.7 kg ha⁻¹, mientras que las testigo produjeron 1668.5 kg ha⁻¹. En el E2 las parcelas asperjadas con la misma mezcla de fungicidas tuvieron un rendimiento promedio de 1328.9 kg ha⁻¹ y de 1435.2 kg ha⁻¹ el testigo. En el E3 las parcelas tratadas con estos fungicidas tuvieron un rendimiento promedio de 1894.1 kg ha⁻¹ y las parcelas testigo 1534.0 kg ha⁻¹, sin diferencias significativas (Figura 2A). En el E4 las parcelas tratadas con pyraclostrobin + epoxiconazole tuvieron un rendimiento de 1210.0 kg ha⁻¹ y las no tratadas de 1049.0 kg ha⁻¹; similarmente, en el E5 las parcelas tratadas con la mezcla de estos fungicidas tuvieron un rendimiento de 1774.0 kg ha⁻¹ y las testigo alcanzaron un rendimiento de 1320.0 kg ha⁻¹, estas diferencias fueron significativas ($P \leq 0.05$); en este caso, las pérdidas en el rendimiento fueron del 25.6 % (Figura 2B). Los rendimientos de grano obtenidos en los experimentos del 2013 fueron más altos que los observados en los años previos, con valores en el intervalo de 1504 a 2867 kg ha⁻¹; sin embargo, únicamente en las parcelas tratadas con pyraclostrobin + epoxiconazole (2867.6 kg ha⁻¹) se tuvieron diferencias significativas (P

≤ 0.05) con respecto a las no tratadas (2546.3 kg ha⁻¹); las pérdidas del rendimiento fueron de 11.2 %. En el E7, donde sólo se utilizó epoxiconazole, no se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos. En este último experimento, las parcelas tratadas con fungicida tuvieron un rendimiento de 1519.8 kg ha⁻¹, mientras que el testigo alcanzó un rendimiento de 1504 kg ha⁻¹ (Figura 2C). Los incrementos en los rendimientos observados durante el año 2013 con respecto a los años previos pudieron estar asociados con las altas precipitaciones ocurridas durante el ciclo de cultivo, que favorecieron un mejor llenado de grano. La aplicación de pyraclostrobin + epoxiconazole, además de disminuir los niveles de la RAS, logró evitar pérdidas del rendimiento de grano del orden del 11.2 % al 25.6 %, lo cual confirma resultados de la eficacia de estos fungicidas en el control de la enfermedad obtenidos en Argentina (Ploper *et al.*, 2015).

Relación entre variables epidemiológicas y el rendimiento

La incidencia de la enfermedad en los tercios bajo, medio, superior y en toda la planta resultaron altamente correlacionados entre sí ($r > 0.99$; $P < 0.001$). En el caso del ABCPE, en cada tercio y en toda la planta, las correlaciones variaron de 0.8 a 0.99 con $0.05 > P > 0.0009$. La correlación entre las variables de ABCPE y los diferentes indicadores de incidencia sólo resultó significativa en el caso del ABCPE en el tercio medio ($0.71 \geq r > 0.66$, con $P = 0.02$) y el ABCPE total ($0.67 \geq r > 0.62$, con $0.04 > P > 0.02$). La incidencia en los tercios bajo, medio y superior correlacionaron altamente ($r > 0.99$; $P < 0.001$) con la incidencia total, y moderadamente con el ABCPE total ($r > 0.62$; $P < 0.04$), por lo que una muestra de cualquiera de estos tercios, en especial del tercio medio, resulta representativo para evaluar dichas variables; sin embargo, ninguna de las variables de incidencia y severidad resultó buena predictora del rendimiento de grano. Dalla *et al.* (2015) reportaron que, en un estudio realizado en Brasil, el rendimiento correlacionó significativamente con la severidad de la RAS, y los coeficientes de correlación más altos se presentaron cuando se tuvieron condiciones de mayor presión de la enfermedad.

Relación entre variables climáticas y la ocurrencia de la RAS

El análisis de regresión logística indicó que el mayor porcentaje (85 % de concordancia) de aciertos en los días favorables para la ocurrencia de la RAS se obtuvo mediante la selección de variables con el método Forward (Symonds y Moussalli, 2011). Las variables seleccionadas en el modelo estuvieron relacionadas con la temperatura media diaria (TMD) y con la combinación de la temperatura

Cuadro 3. Variables seleccionadas mediante regresión logística para modelar la ocurrencia de la roya asiática de la soya en Altamira, Tamaulipas, México.

Parámetro	GL	Estimador	Error estándar	Chi-cuadrada de Wald	Pr > ChiSq
Intercepto	1	-2.0855	0.9474	4.8451	0.0277
TMD	1	-0.1164	0.0573	4.1337	0.042
NH con T > 17.5 °C ≤ 22.5 °C	1	0.1137	0.038	8.9749	0.0027
NH con T > 27.5 °C ≤ 32.5 °C	1	-0.2619	0.0707	13.7208	0.0002
NH con HF > 0 y ≤ 5	1	0.1727	0.0382	20.4261	<0.0001
NH con HF > 5 y ≤ 10	1	0.2401	0.0658	13.3237	0.0003
NH con T 12.5 °C ≤ 17.5 °C y HF > 10 y ≤ 15	1	0.2749	0.0607	20.5037	<0.0001
NH con T > 17.5 °C ≤ 22.5 °C y HF > 5 y ≤ 10	1	-0.2337	0.1201	3.7862	0.0517
NH con T > 27.5 °C ≤ 32.5 °C y HF > 10 y ≤ 15	1	1.5448	0.5259	8.6295	0.0033
NH con T 12.5 °C ≤ 17.5 °C y P > 0 mm y ≤ 10 mm	1	-1.7492	0.6719	6.7772	0.0092
NH con T 12.5 °C ≤ 17.5 °C y HR ≥ 20 y ≤ 30 %	1	0.3774	0.1623	5.4063	0.0201
NH con T 12.5 °C ≤ 17.5 °C y HR > 80 y ≤ 90 %	1	0.216	0.0808	7.1424	0.0075
NH con T > 27.5 °C ≤ 32.5 °C y HR > 70 y ≤ 80 %	1	0.4154	0.1114	13.9162	0.0002
NH con T > 27.5 °C ≤ 32.5 °C y HR > 80 y ≤ 90 %	1	-0.8869	0.3302	7.2163	0.0072

NH: Número de horas, TMD: temperatura media diaria, T: temperatura ambiental, HR: humedad relativa, HF: humedad foliar, P: precipitación.

ambiental (T) con la humedad en la superficie de la hoja (HF) y la humedad relativa (HR). De acuerdo con el modelo, cuando la TMD se incrementa, la probabilidad de ocurrencia de la RAS disminuye, mientras que a mayor número de horas con T entre 17.5 y 22.5 °C aumenta la probabilidad de ocurrencia de la RAS; sin embargo, cuando se incrementan las horas con T entre 27.5 y 32.5 °C la probabilidad de ocurrencia de la RAS disminuye (Cuadro 3). De acuerdo con el modelo obtenido, a mayor número de horas con T entre 17.5 y 22.5 °C, con HF moderada (saturación entre 5 y 10), la probabilidad de ocurrencia de la RAS disminuye, lo mismo ocurre con T entre 12.5 a 17.5 °C y precipitación de hasta 10 mm, así como con T entre 27.5 y 32.5 °C y HR entre 80 y 90 % (Cuadro 3). Lo anterior puede deberse a que la precipitación es un factor crítico que incide en la distribución de las esporas en el dosel de las plantas, que cuando se asocia con vientos, turbulencia y alta intensidad, dispersa las esporas fuera del dosel, lo que disminuye la probabilidad de germinación e infección de las uredosporas (Del Ponte y Esker, 2008; Dufault *et al.* 2010). Estos resultados coinciden con lo reportado por Pivonia y Yang (2006), Bonde *et al.* (2007) y Ramirez-Cabral *et al.* (2019), quienes asociaron T ≥ 27 °C con la reducción en el número de lesiones, e incluso con la detención total del desarrollo epidémico de la RAS; sin embargo, de acuerdo con los resultados del modelo, cuando se incrementan las horas con T entre 27.5 y 32.5 °C en combinación con HF de moderada a alta (valores entre 10 y 15), existe una mayor probabilidad de ocurrencia de la RAS, lo mismo que

cuando se incrementan los periodos diarios con T entre 12.5 y 17 °C, con HR entre 80 y 90 % (Cuadro 3).

Se ha reportado que la RAS requiere T entre 18 y 25 °C y HR > 75 %; sin embargo, condiciones medias diarias fuera de estos valores permiten el avance de la enfermedad, aunque con bajas tasas de infección (Ploper, 2004). Se ha demostrado que altas temperaturas disminuyen significativamente el porcentaje de germinación de uredosporas, tanto de *P. pachyrhizi* como de otras royas (Isard *et al.*, 2006). La precipitación también es un factor importante en el incremento de la severidad de la enfermedad (Del Ponte *et al.*, 2006), principalmente cuando existen meses con precipitaciones mayores a 150 mm (Ploper, 2004); altas precipitaciones permiten que las esporas existentes en el aire sean transportadas hacia los cultivos de soya o plantas hospedantes como el frijol (*Phaseolus spp.*), garbanzo (*Cicer arietinum*), jícama (*Pachyrhizus erosus*), haba (*Vicia faba*), flamboyán (*Delonix regia*), trébol blanco (*Trifolium repens*), entre otras fabáceas (SENASICA, 2017), lo que resulta en el aumento de reservorios de inóculo; además, la precipitación también genera altos niveles de humedad relativa, lo cual favorece la infección, así como el desarrollo y dispersión de la RAS.

CONCLUSIONES

Durante los tres años de evaluación, la RAS alcanzó niveles de incidencia final entre 0 y 100 %, incluso

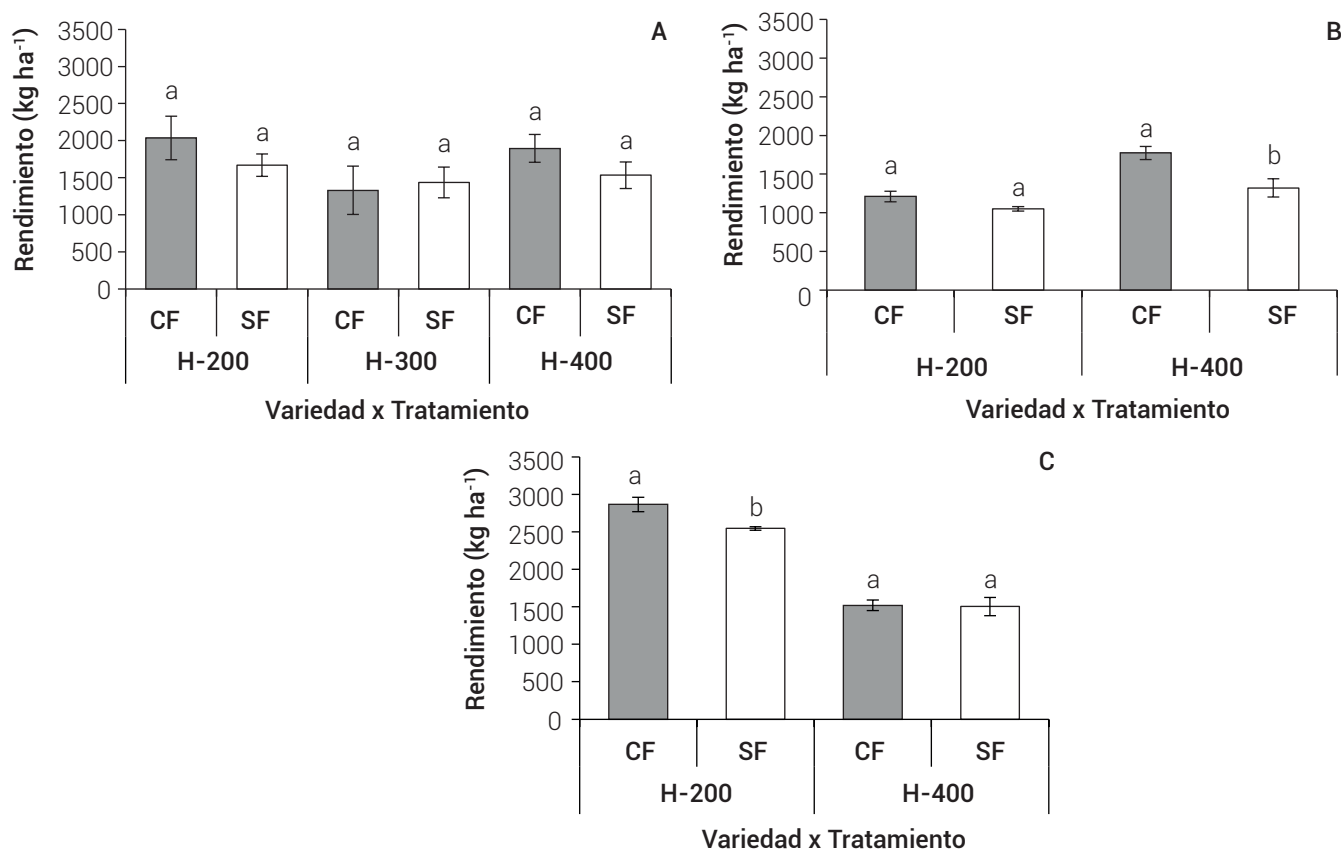


Figura 2. Producción de grano (kg ha^{-1}) en parcelas de soja tratadas con fungicidas (CF) y sin fungicida (SF) para el control de la roya asiática durante el ciclo primavera-verano 2010, 2012 y 2013. A) CE Las Huastecas-2010, con y sin aplicación de pyraclostrobin + flutriafol; B) CE Las Huastecas-2012, con y sin aplicación de pyraclostrobin + epoxiconazole; C) CE Las Huastecas-2013, con y sin aplicación de pyraclostrobin + epoxiconazole, y José Ma. Morelos-2013 con y sin aplicación de epoxiconazole, en Altamira, Tamaulipas, México. Las barras verticales representan el error estándar de la media. Medias con letras iguales en cada variedad son estadísticamente iguales (t -Student, $P \leq 0.05$).

durante el mismo año de evaluación, lo cual se atribuyó a variaciones microclimáticas entre localidades. En todos los experimentos la severidad fue baja ($< 10\%$). La aplicación de pyraclostrobin ($75 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) + epoxiconazole ($25 \text{ g i.a. ha}^{-1}$) disminuye los niveles de incidencia, expresada como porcentaje de folíolos enfermos respecto al total de folíolos, y de severidad, expresada como el porcentaje de área foliar dañada, en el orden del 88 al 96 % y del 95 al 98 %, respectivamente; además, reduce pérdidas del rendimiento de grano del orden del 11.2 al 25.6 %. Las variables asociadas con una mayor probabilidad de ocurrencia de la RAS en el Sur de Tamaulipas son temperaturas entre 17.5 y 32.5 °C en combinación con humedad foliar moderada a alta (con valores de saturación entre 10 y 15, donde 0 corresponde a seco y 15 a saturado) y humedad relativa alta ($> 70\%$).

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, al Colegio de Postgraduados (a través de su Fideicomiso) por el financiamiento otorgado y a los productores de soja por su colaboración.

BIBLIOGRAFÍA

- Akaike H. (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Information Theory. B. N. Petrov and F. Csaki (eds.). Akademia Kiado. Budapest, Hungary. pp:267-281.
- Bonde M. R., D. K. Berner, S. E. Nester and R. D. Frederick (2007) Effects of temperature on urediniospore germination, germ tube growth, and initiation of infection in soybean by *Phakopsora* isolates. *Phytopathology* 97:997-1003, <https://doi.org/10.1094/PHYTO-97-8-0997>
- Campbell C. L. and L. V. Madden (1990) Introduction to Plant Disease Epidemiology. Wiley, New York, USA. 532 p.
- Cummins G. B. and Y. Hiratsuka (2003) Illustrated Genera of Rust Fungi. 3rd edition. APS Press. St. Paul Minnesota, USA. 240 p.

- Dalla L. F., P. K. Ziegelmann, H. N. A. Maia, C. V. Godoy and E. M. Del Ponte (2015) Meta-analysis of the relationship between crop yield and soybean rust severity. *Phytopathology* 105:307-315, <http://doi.org/10.1094/PHYTO-06-14-0157-R>
- Delaney M. A., A. ArchMiller, D. P. Delaney, A. E. Wilson and E. J. Sikora (2018) Effectiveness of fungicide on soybean rust in the southeastern United States: a meta-analysis. *Sustainability* 10:1784, <https://doi.org/10.3390/su10061784>
- Del Ponte E. M., C. V. Godoy, X. Li and X. B. Yang (2006) Predicting severity of Asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. *Phytopathology* 96:797-803, <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0797>
- Del Ponte E. M. and P. D. Esker (2008) Meteorological factors and Asian soybean rust epidemics: a systems approach and implications for risk assessment. *Scientia Agricola* 65:88-97, <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000700014>
- Dufault N. S., S. A. Isard, J. J. Marois and D. L. Wright (2010) The influence of rainfall intensity and soybean plant row spacing on the vertical distribution of wet deposited *Phakopsora pachyrhizi* urediniospores. *Canadian Journal of Plant Pathology* 32:162-169, <https://doi.org/10.1080/07060661.2010.484205>
- Fehr W. R. and C. E. Caviness (1981) Stages of soybean development. Special Report 80. Cooperative Extension Service. Iowa State University. Ames, Iowa, USA. 11 p.
- García-Rodríguez J. C., M. Morishita, M. Kato y N. Yamanaka (2017) Pathogenic characteristics of the Asian soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Mexico. *Revista Mexicana de Fitopatología* 35:338-349, <https://doi.org/10.18781/r.mex.fit.1701-5>
- Godoy C. V., L. J. Koga and M. G. Canteri (2006) Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. *Fitopatologia Brasileira* 31:063-068, <https://doi.org/10.1590/S0100-41582006000100011>
- Isard S. A., N.S. Dufault, M. R. Miles, G. L. Hartman, J. M. Russo, E. D. De Wolf and W. Morel (2006) The effect of solar irradiance on the mortality of *Phakopsora pachyrhizi* urediniospores. *Plant Disease* 90:941-945, <https://doi.org/10.1094/PD-90-0941>
- Ono Y., P. Buriticá and J. F. Hennen (1992) Delimitation of *Phakopsora*, *Physopella* and *Cerotelium* and their species on Leguminosae. *Mycology Research* 96:825-850, [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)81029-0](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)81029-0)
- Pereira-Prado E., C. G. Raetano, M. H. A. D. P. Ferreira, R. C. De Souza, P. R. L. Matos, R. T. Simões, ... and D. T. C. Rezende (2019) Spray volume deposits and fungicide efficacy on soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*). *Australian Journal of Crop Science* 13:1698-1705, <https://doi.org/10.21475/ajcs.19.13.10.p1996>
- Pivonia S. and X. B. Yang (2006) Relating epidemic progress from a general disease model to seasonal appearance time of rusts in the United States: implications for soybean rust. *Phytopathology* 96:400-407, <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0400>
- Ploper L. D. (2004) Principales Conclusiones del Panamerican Soybean Rust Workshop. Publicación Especial No. 24. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. Tucumán, Argentina. 24 p.
- Ploper L. D., V. González, S. Reznikov, L. Hecker, V. De Lisi, D. D. Henríquez, ... y M. R. Devani (2015) Evaluación de la eficiencia de fungicidas para el control de las enfermedades foliares de la soja en Tucumán, R. Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 92:1-15.
- Ramírez-Cabral N. Y. Z., L. Kumar and F. Shabani (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, <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2385-9>
- Reis E. M., T. Zanatta and M. Zanatta (2016) Curative and eradicant action of fungicides to control *Phakopsora pachyrhizi* in soybean plants. *Summa Phytopathologica* 42:295-302, <https://doi.org/10.1590/0100-5405/2180>
- SAS Institute (2011) SAS/STAT® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA. 8621 p.
- SENASICA, Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (2017) Roya asiática de la soja (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow). DGSV-PVEF. Ficha técnica No. 23. Ciudad de México. 24 p.
- SIAP, Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (2019) Anuario estadístico de la producción agrícola. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, SADER. Ciudad de México. <http://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/> (Septiembre 2021).
- Steel R. G. D. and J. H. Torrie (1980) Principles and Procedures of Statistics. MacGraw-Hill Book Company. New York, USA. 481 p.
- Symonds M. R. E. and A. Moussalli (2011) A brief guide to model selection, multimodel inference and model averaging in behavioural ecology using Akaike's information criterion. *Behavioural Ecology and Sociobiology* 65:13-21, <https://doi.org/10.1007/s00265-010-1037-6>
- Terán-Vargas A. P., G. Ascencio L., N. Maldonado M. y J. Ávila V. (2007) La roya asiática de la soja en México. Folleto Técnico No. 22. Campo Experimental Huastecas, INIFAP. Altamira, Tamaulipas, México. 53 p.
- Thiessen L. D., T. M. Neill and W. F. Mahaffee (2017) Timing fungicide application intervals based on airborne *Erysiphe necator* concentrations. *Plant Disease* 101:1246-1252, <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-16-1727-RE>
- Twizeyimana M. and G. L. Hartman (2019) Effect of selected biopesticides in reducing soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) development. *Plant Disease* 103:2460-2466, <https://doi.org/10.1094/PDIS-02-19-0384-RE>