



# **COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

---

**INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS  
AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE FITOSANIDAD**

**FITOPATOLOGÍA**

**IMPACTO DE LA ROYA ASIÁTICA DE LA SOYA  
(*Phakopsora pachyrhizi*), SU RELACIÓN CON EL CLIMA Y  
PATRÓN DE REFLECTIVIDAD EN LA REGIÓN HUASTECA**

MARJA LIZA FAJARDO FRANCO

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

**MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO**

2015

La presente tesis titulada: **Impacto de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*), su relación con el clima y patrón de reflectividad en la región Huasteca**, realizada por la alumna: **Marja Liza Fajardo Franco**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS  
FITOSANIDAD  
FITOPATOLOGÍA

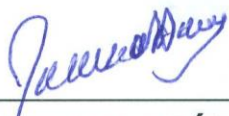
**CONSEJO PARTICULAR**

CONSEJERO



**DR. REMIGIO ANASTACIO GUZMÁN PLAZOLA**

ASESOR:



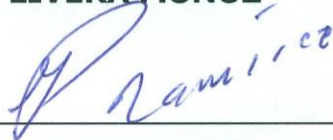
**DR. ANTONIO PALEMÓN TERÁN VARGAS**

ASESOR:



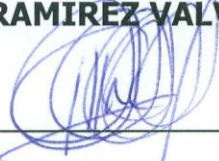
**DR. MANUEL LIVERA MUÑOZ**

ASESOR:



**DR. GUSTAVO RAMIREZ VALVERDE**

ASESOR:



**DR. MATEO ARMANDO CADENA HINOJOSA**

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Enero de 2015.

# IMPACTO DE LA ROYA ASIÁTICA DE LA SOYA (*Phakopsora pachyrhizi*), SU RELACIÓN CON EL CLIMA Y PATRÓN DE REFLECTIVIDAD EN LA REGIÓN HUASTECA

Marja Liza Fajardo Franco  
Colegio de Postgraduados, 2015.

## RESUMEN GENERAL

La región Huasteca es la principal zona productora de soya en México; su producción es amenazada desde que en 2005 la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) fue detectada por primera vez. A partir de entonces esta enfermedad se ha detectado ciclo tras ciclo. Actualmente se desconocen las condiciones climáticas que favorecen su ocurrencia, así como en el efecto de la enfermedad en el rendimiento bajo las condiciones del sur de Tamaulipas. Aunque la aplicación de fungicidas ha sido recomendado por el INIFAP, su uso no es generalizado en el manejo del cultivo realizado por los productores regionales. Por tal motivo, durante 2012 y 2013, se evaluó el efecto de la aplicación de pyraclostrobin más epoxiconazol y epoxiconazol solo en el control de la enfermedad, así como el efecto de la enfermedad en el rendimiento. Paralelamente se evaluó la ocurrencia de la roya asiática de la soya y su relación con el microclima en la región Huasteca, el desarrollo de la enfermedad y su relación con la reflectividad del cultivo. La enfermedad fue controlada únicamente con la aplicación de pyraclostrobin más epoxiconazol. El análisis del microclima permitió determinar periodos favorables para la ocurrencia de la roya asiática, aunque ésta ocurrió con un periodo latente extendido. La reflectividad varió significativamente de acuerdo a los niveles de severidad ocasionados por la roya asiática, a mayor enfermedad la reflectividad fue menor. La reflectividad en las bandas 760, 810 y 830 nm tuvieron una correlación negativa con la severidad.

**Palabras clave:** *Phakopsora pachyrhizi*, microclima, rendimiento, reflectividad, severidad.

# IMPACT OF ASIAN SOYBEAN RUST (*Phakopsora pachyrhizi*) AND ITS RELATIONSHIP WITH CLIMATE AND REFLECTIVITY PATTERN IN THE HUASTECA REGION

Marja Liza Fajardo Franco  
Colegio de Postgraduados, 2015.

## GENERAL ABSTRACT

The Huasteca Region is the main producing area of soybeans in Mexico; its production is threatened by soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) since it was first detected in 2005. Since then the disease has been detected in all cropping cycles. Weather conditions that favor its occurrence in southern Tamaulipas are unknown, as well as the effect of the disease on grain yield. During 2012 and 2013, the effect of pyraclostrobin plus epoxiconazole, and epoxiconazole alone on disease development was evaluated as well as the effect of disease on grain yield. Simultaneously, disease occurrence and its relation with the microclimate in the Huasteca Region was assessed, as well as the correlation between disease severity and reflectivity of the crop. Disease was significantly reduced with the application of pyraclostrobin plus epoxiconazole but not epoxiconazole alone. Discriminant analysis allowed to determine microclimate favorable periods for the occurrence of soybean rust. The reflectivity varied significantly according to the severity levels caused by the soybean rust. Reflectivity at bands 760, 810 and 830 nm had a negative correlation with severity.

**Keywords:** *Phakopsora pachyrhizi*, microclimate, yield, reflectivity, severity.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por permitirme alcanzar este meta.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por la beca otorgada durante la duración de mis estudios de doctorado.

Al Fideicomiso de administración e inversión No. 167304 por el financiamiento para la realización del presente trabajo de investigación.

Al Colegio de Postgraduados y al Programa de Fitosanidad-Fitopatología por brindándome la oportunidad de recibir las enseñanzas y experiencias de profesores invaluable.

Al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) C.E. Las Huastecas, en especial al Dr. Antonio Palemón Terán Vargas, por todo el apoyo brindado durante mi estancia en Tamaulipas. A Don Gallegos, Dulce, Victorino y Jesús, mi agradecimiento por su esfuerzo e interés en la realización de la fase de campo del presente trabajo, así como a los productores de Altamira, Tamaulipas.

Al Dr. Remigio A. Guzmán Plazola por su paciencia y apoyo durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados.

A mis asesores: Dr. Manuel Livera Muñoz, Dr. Gustavo Ramírez Valverde y al Dr. Mateo Armando Cadena Hinojosa por su disposición, apoyo y sugerencias para la realización y culminación del presente trabajo.

Y a todas aquellas personas que me brindaron su apoyo para alcanzar esta meta.

A todos ustedes ¡Muchas gracias!

## **DEDICATORIA**

A mi familia, especialmente a mi mamá y a mis tías Ana y Eva quienes con su apoyo me alentaron para alcanzar una meta más.

A mis hermosos hijos Liza y Martin, quienes son mi motivo de superación.

*“Los que confían en Dios siempre tendrán nuevas fuerzas. Podrán volar como las águilas, podrán caminar sin cansarse y correr sin fatigarse.”*

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL .....	1
1. Planteamiento del problema .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Hipótesis .....	2
2. Revisión de literatura.....	3
2.1 Introducción.....	3
2.2 Ciclo de vida de <i>Phakopsora pachyrhizi</i> .....	3
2.3 Síntomas y signos .....	4
2.4 Distribución geográfica .....	4
2.5 Epidemiología .....	5
2.6 Pérdidas en el rendimiento de grano .....	7
2.7 Manejo de la enfermedad.....	7
3. Literatura citada .....	11
CAPITULO I. DESARROLLO EPIDÉMICO DE LA ROYA ASIÁTICA DE LA SOYA Y SU EFECTO EN EL RENDIMIENTO DE GRANO EN LA REGIÓN HUASTECA .....	16
RESUMEN .....	16
ABSTRACT .....	17
1.1 Introducción.....	17
1.2 Materiales y métodos .....	19
1.2.1 Año 2012. ....	19
1.2.2 Año 2013. ....	24
1.3 Resultados y discusión .....	25
1.3.1 Incidencia. ....	25
1.3.2. Área bajo la curva del progreso de la severidad.....	31
1.3.3 Peso seco de la parte aérea.....	32
1.3.4. Rendimiento de grano. ....	36
1.3.5. Correlación entre variables. ....	36
1.4. Discusión .....	37
1.5 Conclusiones.....	40
1.6 Literatura citada .....	41

CAPITULO 2. OCURRENCIA DE LA ROYA ASIÁTICA DE LA SOYA Y SU RELACIÓN CON EL MICROCLIMA EN EL SUR DE TAMAULIPAS .....	45
RESUMEN .....	45
ABSTRACT .....	45
2.1 Introducción .....	46
2.2 Materiales y métodos .....	47
2.2.1 Seguimiento del microclima .....	47
2.2.3 Modelo genérico de infección .....	50
2.2.4 Modelo linear discriminante .....	51
2.3 Resultados.....	52
2.3.1 Predicción del modelo genérico de infección .....	52
2.3.2 Modelo linear discriminante. ....	67
2.4 Discusión .....	71
2.5 Conclusiones.....	74
2.6 Literatura citada .....	75
CAPITULO 3. EFECTO DE LA ROYA ASIÁTICA EN EL ESPECTRO DE REFLECTIVIDAD DEL CULTIVO DE SOYA. ....	77
RESUMEN .....	77
ABSTRACT .....	78
3.1 Introducción .....	78
3.2 Materiales y métodos .....	79
3.2.1 Año 2012 .....	80
3.2.2 Año 2013 .....	81
3.3 Resultados.....	83
3.3.1 Año 2012 .....	83
3.3.2 Año 2013 .....	86
3.4 Discusión .....	99
3.5 Conclusiones.....	100
3.6 Literatura citada .....	100
CONCLUSIONES GENERALES .....	103



## ÍNDICE DE FIGURAS

**Figura 1.1** Síntomas y signos asociados a *Phakopsora pachyrhizi* en plantas de soya y detección de la enfermedad. a) Clorosis y pústulas errumpentes. b) Tira inmunocromatográfica con resultado positivo a roya asiática. c) Uredosporas sésiles, ovoides a elipsoidales, con parafisos cilíndricos a clavados. .... 21

**Figura 1.2** Evaluación del desarrollo epidémico de *Phakopsora pachyrhizi* en plantas de soya cultivadas en Altamira, Tamaulipas y del rendimiento de grano durante el ciclo Primavera-Verano 2012. a) División en tercios del dosel vegetal para la evaluación de la incidencia y severidad de la roya asiática de la soya. TI=Tercio inferior, TM=Tercio medio, TS=Tercio superior. Modificado de Urosa y Ascencio, 1993. b) Escala diagramática para la evaluación de la severidad de la roya asiática (Godoy et al., 2006). c)-e) Evaluación del rendimiento de grano, f) Determinación del contenido de humedad del grano. .... 23

**Figura 1.3** Incidencia de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) de la soya en el tercio medio (a), superior (b) y total (c) del follaje de plantas tratadas con y sin fungicidas en la localidad 2 (Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP), variedad H400; de Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2012. Las flechas verticales indican el día de la aplicación de fungicida. Cada punto es el promedio de cuatro repeticiones. En cada bloque se evaluaron nueve plantas con competencia completa. Las barras verticales en cada punto representan el error estándar de la media. .... 27

**Figura 1.4** Incidencia de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) de la soya en el tercio medio y superior del follaje de plantas tratadas con y sin fungicida, en tres localidades (a y b, L3=INIFAP, variedad H200; c y d, L4=Esteros, variedad H300; e y f, L5=José Ma. Morelos, variedad H400) de Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2013. Las flechas verticales indican el día de la aplicación de fungicida. Cada punto es el promedio de cuatro bloques. En cada bloque se evaluaron nueve plantas con competencia completa. Las barras verticales en cada punto representan el error estándar de la media. .... 29

**Figura 1.5** Incidencia total de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) de la soya, tratada con y sin fungicida, en tres localidades (a y b, L3=INIFAP, variedad H200; c y d, L4=Esteros, variedad H300; e y f, L5=José Ma. Morelos, variedad H400) de Altamira Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2013. Las flechas verticales indican el día de la aplicación de fungicida. Cada punto es el promedio de cuatro bloques. En cada bloque se evaluaron nueve plantas con competencia completa. Las barras verticales en cada punto representan el error estándar de la media..... 30

**Figura 1.6** Peso seco de la parte aérea de plantas de soya, tratadas con y sin fungicida, en dos localidades (L1= Resolana, variedad H200; L2= INIFAP, variedad H400), durante el año de 2012 (a y b) y tres localidades (L3=INIFAP, variedad H200; L4=Esteros, variedad H300; L5=José Ma. Morelos, variedad H400) durante año 2013 (c,d y e), en Altamira, Tamaulipas. Las líneas sigmoidales describen las predicciones del modelo de crecimiento logístico que mejor se ajusta a los datos de cada tratamiento en cada campo de cultivo. Las flechas verticales continuas indican el día de la aplicación de fungicida, y las discontinuas la detección de la roya. DJ= Día juliano, EF=Etapa fenológica..... 35

**Figura 1.7** (a) Rendimiento de grano en plantas de soya tratadas con y sin fungicida, en dos localidades con y sin pyraclostrobin + epoxiconazol durante el año 2012 (L1= Resolana, variedad H200; L2= INIFAP, variedad H400). (b) Una localidad con y sin pyraclostrobin + epoxiconazol (L3=INIFAP, variedad H200), y dos localidades con y sin epoxiconazole durante el año 2013 (L4=Esteros, variedad H300; L5=José Ma. Morelos, variedad H400) (b), en Altamira, Tamaulipas. Las barras verticales representan el error estándar de la media. Cada barra es el promedio de cuatro repeticiones. En cada repetición se evaluaron tres surcos de 2 m de largo, con plantas en competencia completa. Valores con la misma letra dentro de cada experimento son estadísticamente iguales (t-Student,  $\alpha = 0.05$ )..... 37

**Figura 2.1** Seguimiento del microclima en parcelas establecidas con soya en el sur de Tamaulipas. a - b) Instalación de las microestaciones WatchDog durante el ciclo 2012 y

2013; c) Sensor de humedad foliar; d - e) Registro de las variables temperatura del aire, humedad foliar, humedad relativa y precipitación mediante un micrologger colocada en cada predio. f) Descarga de la información registrada en cada micrologger. .... 49

**Figura 2.2** Clasificación diaria del microclima (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Cedros, b) Cervantes, c) Felipe, d) C.E. Las Huastecas y e) José Ma. Morelos. Escala 0-4. La flecha indica el día de la detección de la enfermedad. La línea obscura indica el periodo favorable para la infección..... 61

**Figura 2.3** Clasificación diaria del microclima (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Tres de Mayo, b) Gertrudis, c) C.E. Las Huastecas (lote 2), d) Margaritas, e) Mata del Abra. Escala 0-4. La línea obscura indica el periodo favorable para la infección. .... 62

**Figura 2.4** Clasificación diaria del microclima (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Resolana y b) Venado. Escala 0-4. La línea obscura indica el periodo favorable para la infección..... 63

**Figura 2.5** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2013 en predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) El 30, b) Cervantes, c) Felipe, d) C.E. Las Huastecas, e) José Ma. Morelos y f) Tres de Mayo. Escala de 0-4. La flecha indica el día

de la detección de la enfermedad. La línea obscura indica el periodo favorable para la infección. .... 65

**Figura 2.6** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2013 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) C.E. Las Huastecas (lote 2), b) Mata del Abra, c) Estrella. Escala 0-4. La flecha indica el día de la detección de la enfermedad. .... 66

**Figura 2.7** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Cedros, b) Cervantes, c) Felipe, d) C.E. Las Huastecas y e) José Ma. Morelos. La flecha indica el día de la detección de la enfermedad. F= favorable, NF=no favorable. .... 68

**Figura 2.8** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Tres de Mayo, b) Gertrudis, c) C.E. Las Huastecas, d) Margaritas, e) Mata del Abra. F= favorable, NF=no favorable. .... 69

**Figura 2.9** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Resolana y b) Venado. F= favorable, NF=no favorable. .... 70

**Figura 2.10** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante

durante el ciclo primavera-verano 2013 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) El 30, b) Cervantes, c) Felipe, d) C.E. Las Huastecas, e) José Ma. Morelos y f) Tres de Mayo. F= favorable, NF=no favorable. .... 72

**Figura 2.11** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2013 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) C.E. Las Huastecas, b) Mata del Abra, c) Estrella. F= favorable, NF=no favorable..... 73

**Figura 3.1** Severidad de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en plantas tratadas con pyraclostrobin más epoxiconazol establecidas durante el ciclo Primavera-Verano 2012 en el Sur de Tamaulipas. .... 84

**Figura 3.2** Severidad de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en parcelas de observación establecidas durante el ciclo Primavera-Verano 2012 en el Sur de Tamaulipas. a) Cedros, b) Cervantes, c) Felipe y d) José Ma. Morelos. .... 85

**Figura 3.3** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (pyraclostrobin más epoxiconazol) cultivadas en el C.E. Las Huastecas, Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2012. DJ= día juliano..... 87

**Figura 3.4** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (pyraclostrobin más epoxiconazol) cultivadas en el rancho La Resolana en Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2012. La enfermedad no fue detectada. DJ= día juliano. .... 88

**Figura 3.5** Espectro de reflectividad en parcelas de observación, sin control de la enfermedad y que resultaron positivas a roya asiática durante el ciclo Primavera-Verano de 2012, en Altamira, Tamaulipas. a) Cedros, b) Cervantes, c) Felipe, d) José María Morelos. Cada línea representa un día juliano diferente. .... 89

**Figura 3.6** Espectro de reflectividad en parcelas, de observación, sin medidas de control de la roya asiática, donde no ocurrió la enfermedad, durante el ciclo Primavera-Verano de 2012, en Altamira, Tamaulipas. a) Gertrudis, b) C.E. Las Huastecas (lote 2), c) Margaritas, d) Tres de Mayo, e) Venado. .... 90

**Figura 3.7** Severidad en plantas tratadas y no tratadas con fungicida establecidas en Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2013. a) C.E. Las Huastecas, b) Esteros y c) José Ma. Morelos..... 92

**Figura 3.8** Severidad de la roya asiática sin control de la enfermedad en parcelas cultivadas en Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano de 2013 a) El 30 b) C.E Las Huastecas (lote 2), c) Tres de Mayo, d) Mata del Abra, e) Resolana. .... 93

**Figura 3.9** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (pyraclostrobin más epoxiconazol) cultivadas en el C.E. Las Huastecas, Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2013. Detección de la roya asiática de soya (*Phakopsora pachyrhizi*) = DJ 281. .... 94

**Figura 3.10** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (epoxiconazol) cultivadas en Esteros, Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2013. Detección de la roya asiática de soya (*Phakopsora pachyrhizi*) = DJ 290..... 95

**Figura 3.11** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (epoxiconazol) cultivadas en José Ma. Morelos, Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2013. Detección de la roya asiática de soya (*Phakopsora pachyrhizi*) = DJ 277. .... 96

**Figura 3.12** Reflectividad en parcelas de observación sin control de la enfermedad cultivadas en a) El 30, b) Cervantes, c) Felipe, d) Gertrudis, durante el ciclo primavera-verano 2013. .... 97

**Figura 3.13** Reflectividad en parcelas de observación sin control de la enfermedad cultivadas en a) C.E. Las Huastecas (lote 2), b) Tres de Mayo, c) La Estrella, d) Mata del Abra, e) Resolana durante el ciclo primavera-verano 2013. .... 98

## ÍNDICE DE CUADROS

**Cuadro 1.** Ocurrencia de la roya asiática de la soya en México de 2007 a 2011. .... 5

**Cuadro 2.** Características de los modelos matemáticos usados para el análisis de riesgo y predicción de riesgo de la roya asiática de la soya. .... 10

**Cuadro 1.1** Área bajo la curva del progreso de la severidad (ABCPS) de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) en plantas de soya, tratadas con y sin fungicidas, en el Campo Experimental las Huastecas (L2, variedad H400) de Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano de 2012..... 31

**Cuadro 1.2** Área bajo la curva del progreso de la severidad (ABCPS) de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) en plantas de soya, tratadas con y sin fungicida, en tres localidades (L3=INIFAP; L4=Esteros; L5=José Ma. Morelos) de Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2013..... 33

**Cuadro 2.1** Localización y datos generales de las parcelas evaluadas para la ocurrencia de la roya asiática de la soya en los ciclos Primavera-Verano de 2012 y 2013 en el sur de Tamaulipas..... 48

**Cuadro 2.2** Variables derivadas utilizadas en el análisis discriminante. .... 53

<b>Cuadro 2.3</b> Variables seleccionadas mediante análisis discriminante. ....	58
<b>Cuadro 2.4</b> Parámetros de la función lineal discriminante. ....	59
<b>Cuadro 2.5</b> Porcentaje de acierto en la clasificación de días favorables y no favorables para la ocurrencia de la roya asiática de la soya.....	60
<b>Cuadro 3.1</b> Localización y datos generales de las parcelas experimentales evaluadas en los ciclos Primavera-Verano de 2012 y 2013 en el sur de Tamaulipas.....	82
<b>Cuadro 3.2</b> Parcelas de observación, sin aplicación de fungicidas.....	83



## INTRODUCCIÓN GENERAL

### 1. Planteamiento del problema

La roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & P. Sydow) es una enfermedad potencialmente devastadora para el cultivo de soya (*Glycine max* (L.) Merrill), ya que puede ocasionar pérdidas de rendimiento moderadas a severas (mayores de 80 %) dependiendo de la susceptibilidad, la etapa fenológica y la severidad con la que ataca al cultivo (Bromfield, 1984; Li *et al.*, 2010). Por más de veinte siglos este patógeno se localizó solo en el continente Asiático, hasta que comenzó a expandirse rápidamente en los años 90's (Miles *et al.*, 2003). En el continente Americano se le reportó por primera vez en Argentina en 2001, posteriormente en Paraguay y Brasil en 2002 (Yorinori *et al.*, 2005), en los Estados Unidos en noviembre de 2004 (Schneider *et al.*, 2005) y en México en el 2005 en la región Huasteca en plantaciones comerciales de soya (Cárcamo-Rodríguez *et al.*, 2006; Terán-Vargas *et al.*, 2007). Esta región es la principal zona productora de soya en México ya que contribuye con el 66% de la producción nacional, mientras que 22.5% es producida en la región de Tapachula, Chiapas (Terán-Vargas *et al.*, 2007). La Huasteca comprende el sur de Tamaulipas, norte de Veracruz y oriente de San Luis Potosí

Desde la aparición de esta enfermedad se tuvieron pérdidas de rendimiento no solo en campos de soya en los estados de San Luis Potosí y Tamaulipas, sino también en jícama (*Pachyrhizus erosus* (L.)) en el estado de Veracruz. Nuestro equipo de investigación ha confirmado su presencia en el Sur de Tamaulipas no solo en la temporada de cultivo de la soya (Julio – Noviembre), sino también fuera de esta, en otras plantas hospederas, las cuales son un reservorio de inóculo que al tener las condiciones favorables, propician su desarrollo epidémico ciclo tras ciclo. En febrero de 2012 fue detectada en un lote de frijol negro variedad Jamapa, asociado con maíz y jícama en Altamira, Tamaulipas (Cárcamo-Rodríguez *et al.*, 2013). Actualmente se encuentra distribuida en la vertiente del Golfo de México (Veracruz, Campeche y Yucatán), en la Costa del Pacífico (Sinaloa, Nayarit, Guerrero y Chiapas) y en la región centro de México (Guanajuato) (Hernández-Hernández *et al.*, 2014), por lo que de continuar su dispersión en el

territorio mexicano 1,831,309 ha de frijol, 178,532 ha de soya y 6,939 ha de jícama con un valor de producción de 14,816,334 miles de pesos están en riesgo (SIAP, 2014).

Debido a la importancia de este hongo en la presente investigación se plantearon los siguientes objetivos:

## 1.2 Objetivos

- Evaluar la incidencia y severidad de la roya de la soya, causada por *Phakopsora pachyrhizi* y estimar las pérdidas de rendimiento debidas a la enfermedad.
- Determinar el efecto del microclima en la ocurrencia de la roya asiática de la soya en la región Huasteca de Tamaulipas.
- Analizar variaciones bajo condiciones de campo en el patrón de reflectividad en diferentes bandas del espectro visible y del infrarrojo en plantas sin enfermedad o con diferentes niveles de severidad de la roya asiática de la soya.

## 1.3 Hipótesis

La roya, causada por *Phakopsora pachyrhizi*, afecta significativamente el rendimiento de la soya en la Huasteca Tamaulipeca.

La variabilidad microclimática es la principal causa de variaciones en la ocurrencia de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) y del efecto de esta enfermedad en el rendimiento de grano.

La severidad de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) afecta el patrón de reflectividad en el cultivo de soya.

## 2. Revisión de literatura

### 2.1 Introducción

En el cultivo de la soya (*Glycine max* (L.) Merril) pueden presentarse dos tipos de roya ocasionadas por patógenos pertenecientes al género *Phakopsora*. La primera es conocida como la roya americana (*P. meibomiae* (Arthur) Arthur) y no ocasiona pérdidas severas en el rendimiento de grano (Miles *et al.*, 2003; Goellner *et al.*, 2010). La segunda es conocida como la roya asiática de la soya (*P. pachyrhizi* Sydow & P. Sydow) la cual es más agresiva y devastadora para el cultivo y ocasiona pérdidas económicas significativas. Su clasificación taxonómica es la siguiente (Goellner *et al.*, 2010):

Dominio: Eukaryota

Reino: Fungi

Phylum: Basidiomycota

Clase: Urediniomycetes

Orden: Uredinales

Familia: Phakopsoraceae

Género: *Phakopsora*

Especie: *pachyrhizi* Syd. & P. Syd

Esta especie infecta por lo menos 31 especies en 17 géneros de leguminosas bajo condiciones de campo, dentro de los que destacan leguminosas de importancia económica y alimenticia y 60 especies pertenecientes a otros géneros donde se ha observado la enfermedad bajo condiciones de laboratorio (Goellner *et al.*, 2010).

### 2.2 Ciclo de vida de *Phakopsora pachyrhizi*

La uredospora es la forma asexual de *P. pachyrhizi*, este estado reproductivo es conocido como el causante de la infección en las plantas hospedantes. Las uredosporas son producidas en la uredia y se liberan con ayuda del viento a través de una apertura circular llamada ostiolo. La penetración de la lámina foliar se realiza directamente sin

utilizar las aberturas estomáticas; comienza con la formación del cono apresorial, lo que provoca el colapso, desorganización y signos de muerte de la célula epidermal (Koch *et al.*, 1983; Keogh *et al.*, 1980). La infección continúa con el crecimiento de la hifa a través de la célula epidermal y alcanza los espacios intercelulares, hasta formar un tabique que la separa de la hifa primaria, la cual posteriormente se ramifica en hifas secundarias y finalmente, las células madre del haustorio se diferencian cerca de las células del mesófilo (Koch *et al.*, 1983). La formación del primer haustorio ocurre a las 24-48 h después del contacto inicial entre uredosporas y el hospedante susceptible. A partir de entonces, se produce la colonización intensa de los tejidos del mesófilo y los espacios intercelulares de las hojas se llenan con el micelio del hongo. El ciclo primario de la enfermedad se completa cuando se desarrollan uredias y uredosporas (Koch *et al.*, 1983), lo cual ocurre después de cinco a ocho días de la infección inicial de las hojas, lo que propicia un nuevo ciclo del hongo en la misma planta y en el mismo ciclo de cultivo. La uredia puede producir esporas durante varias semanas, originando una epidemia policíclica, en donde a partir del inóculo inicial se produce inóculo secundario (Miles *et al.*, 2003).

### **2.3 Síntomas y signos**

Los síntomas iniciales de la roya asiática se presentan en el haz de las hojas inferiores como pequeñas lesiones irregulares de aproximadamente 1 mm de diámetro de color café-amarillento a café-rojizo u oscuro, restringidas por las nervaduras, las cuales crecen provocando un amarillamiento generalizado en la planta y defoliación prematura. Los signos se localizan en el envés de la lámina foliar y pueden ser fácilmente visibles con una lupa de 30X (Ploper, 2004; Goellner *et al.*, 2010).

### **2.4 Distribución geográfica**

La roya asiática de la soya se encuentra actualmente distribuida en Asia tropical y subtropical, en Oceanía, África y América (Li *et al.*, 2010; Sikora *et al.*, 2014). En 2001 fue detectada por primera vez en el continente Americano en Paraguay y en tan solo tres

años se dispersó en Sudamérica. En 2003 fue reportada en Brasil, en 2004 en Estados Unidos de América y en 2005 en México (Li *et al.*, 2010). A partir de este año, las detecciones se han incrementado y el patógeno se ha dispersado a otras regiones, de tal manera que actualmente está distribuido no solo en la región Huasteca y Sureste de México (Cuadro 1), sino también en la región Pacífico en Sinaloa, Nayarit, y en la región centro en Guanajuato, afectando además de soya y jícama plantaciones de frijol (Hernández-Hernández *et al.*, 2014).

**Cuadro 1.** Ocurrencia de la roya asiática de la soya en México de 2007 a 2011.

Año	Estado	Hospedero	Número de detecciones
2007*	Tamaulipas	Soya	2
	Veracruz	Soya y jícama	8
2008	Tamaulipas	Soya y jícama	31
	Veracruz	Soya y jícama	59
	San Luis Potosí	Soya	30
	Yucatán	Soya	5
	Chiapas	Soya y jícama	3
2009	Tamaulipas	Soya y jícama	10
	Veracruz	Jícama	17
	Chiapas	Soya	3
2010	Tamaulipas	Soya y jícama	77
	Veracruz	Soya y jícama	49
	San Luis Potosí	Soya	13
2011**	Tamaulipas	Soya	4
	Veracruz	Jícama	14

FUENTE: SENASICA, 2011. \*A partir de noviembre \*\*Hasta febrero.

## 2.5 Epidemiología

La roya asiática puede presentarse en cualquier etapa de desarrollo de la soya sin embargo, el desarrollo epidémico de la enfermedad es multifactorial. Para que ocurra intervienen factores ambientales como la temperatura, la duración de la humedad en la

hoja, la radiación, la nubosidad y la precipitación (Del Ponte *et al.*, 2006b; Isard *et al.*, 2006), factores relacionados con el hospedante como la edad de la planta, la edad de la hoja, el estado fenológico, y la geometría del cultivo; así como aspectos propios del patógeno como la edad de las uredosporas, densidad de esporas, edad y localización de la uredia, edad de la lesión, tamaño de la lesión, periodo latente, producción de esporas, periodo infeccioso y eficiencia en la infección (Pivonia y Yang, 2006). De estas variables, las relacionadas con el microclima son determinantes en el ciclo de infección del patógeno, las esporas pueden germinar con un mínimo de 6 h de humedad y temperaturas entre 8 y 36°C con condiciones óptimas entre 15 y 28°C y 10 a 12 h de humedad en la hoja (Melching *et al.*, 1989; Ploper, 2004). La penetración puede ocurrir 6 h después de la deposición de la espora en la superficie de la hoja, con temperaturas entre 20 y 25°C, con un rango diurno de 11 a 12 °C y humedad relativa óptima de 85% (Levy, 2005). El desarrollo de la enfermedad requiere temperaturas entre 18 a 25°C y humedad relativa alta (>75 %), condiciones medias diarias fuera de este rango provocan bajas tasas de infección o que el avance de la enfermedad sea lento (Ploper, 2004). Temperaturas < 15°C o ≥ 27 °C, reducen el número de lesiones y pueden detener totalmente el desarrollo epidémico (Kochman, 1979; Yang, 2004; Pivonia y Yang, 2006; Bonde *et al.*, 2007). Es importante destacar que en el sur de Tamaulipas la enfermedad se ha observado con valores entre 11 - 28°C y humedad relativa ≥ 65%. (Terán-Vargas *et al.*, 2007). En el 2010 nuestro equipo de trabajo detectó la presencia de esta enfermedad en plantas voluntarias en el Mante, Tamaulipas y en siembras comerciales en Río Bravo, en ambos casos con temperaturas mayores a 35 °C durante el día. Otras variables climáticas importantes son la precipitación y la nubosidad, ya que la severidad de la roya asiática está positivamente correlacionada con el número de días con lluvia durante el llenado de vaina (Tschanz, 1982; Hartman, 1995). Las epidemias más severas en Brasil y Sudáfrica estuvieron asociadas con la ocurrencia de más de 15 días nublados en dos meses durante la estación de crecimiento, mientras que con menos de 10 d la enfermedad no fue severa (Días *et al.*, 2006). El periodo latente está muy relacionado con la temperatura, debido a que su duración se acorta conforme la temperatura media diaria se incrementa, de este modo a 12°C tiene una duración de 14 días, a 15.4 °C de 13 días y a 28°C de 6 d (Pivonia y Yang, 2006), aunque en un experimento conducido

por Kochman (1979), el periodo latente estuvo en el rango de a 9 días a 22°C, mientras que con una temperatura de 27°C, el período se extendió a 11 días. Durante la fase exponencial de la epidemia, se ha reportado que la tasa de incremento de la enfermedad ( $\rho$ ) puede estar en el rango de 1.14 a 1.32 esporas lesión<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> (Pivonia y Yang, 2006).

## **2.6 Pérdidas en el rendimiento de grano**

El nivel de pérdidas en el rendimiento de grano depende de la etapa de desarrollo en que ocurra el ataque y de las condiciones ambientales que influyen en el desarrollo y severidad de la enfermedad. Una defoliación temprana afecta principalmente el número de vainas por planta, granos por vaina y el tamaño de las semillas (Bromfield, 1984). Cuando la infección es severa ocasiona aborto de flores, defoliación, caída de vainas y reducción del área verde que se correlaciona directamente con componentes del rendimiento como el peso de la semilla, número de semillas por vaina y el llenado de vaina (Del Ponte *et al.*, 2006b; Kawuki *et al.*, 2003). Las pérdidas registradas en Asia, Sudamérica y África han alcanzado valores entre 40 y 80 %, aunque existen reportes de hasta el 100 % cuando no se han aplicado medidas de control eficientes (Garcés-Fiallos y Forcellini, 2011; Sikora *et al.*, 2014).

## **2.7 Manejo de la enfermedad**

A nivel mundial las investigaciones se han enfocado principalmente en el estudio de la aplicación de fungicidas para la prevención y control químico de la roya asiática debido a que la mayoría de los cultivares comerciales de soya son susceptibles a la enfermedad. Las primeras investigaciones realizadas en el continente Asiático indicaron que el mancozeb y el benzimidazole lograban reducir la intensidad de la enfermedad pero era necesario realizar de tres a cinco aplicaciones para ser efectivos. Posteriormente, diversos ensayos introdujeron fungicidas del grupo de los triazoles (tebuconazole, tetraconazole, propiconazole) y del grupo de las estrobilurinas (azoxistrobin y pyroclostrobin), los cuales mostraron ser eficientes (Miles *et al.*, 2004; Mueller *et al.*, 2009). Por ejemplo, en la India se logró reducir la intensidad de la

enfermedad hasta en un 60 % en comparación con el testigo y fueron necesarias únicamente dos aplicaciones de un triazol, mientras que el mancozeb sólo logró reducir la enfermedad hasta un 15 %. En experimentos realizados en Brasil desde el 2003 al 2007 se probaron más de 71 fungicidas solos o en mezclas pertenecientes al grupo de los triazoles y estrobirulinas y la enfermedad fue mejor controlada cuando se utilizó la mezcla de fungicidas, en especial cuando se utilizó cyproconazole (Scherin *et al.*, 2009). En México la aplicación de azoxystrobin + propiconazole o epoxiconazol + pyraclostrobin ha sido efectiva en el control de la roya asiática. (Terán-Vargas *et al.*, 2010; Fajardo-Franco *et al.*, 2013; Fajardo-Franco *et al.*, 2014).

El modelaje y predicción de la dispersión y aparición de la roya asiática es otro aspecto que ha cobrado importancia en el manejo de la enfermedad, ya que esto es crítico para determinar su potencial de destrucción y los momentos óptimos de aplicación de fungicidas. Los modelos relacionados con la roya asiática de la soya pueden clasificarse en dos grupos: de simulación y modelos empíricos. Los modelos de simulación están basados en conceptos derivados de un patosistema y ayudan a comprender la estructura y comportamiento de un sistema biológico. Los modelos empíricos son construidos mediante relaciones estadísticas entre variables evaluadas experimentalmente. Los modelos de simulación de la roya asiática de la soya pueden separarse en dos grupo: epidemiológicos y aerobiológicos. Los modelos epidemiológicos simulan el proceso biológico del ciclo de la enfermedad para estimar el desarrollo epidémico considerando la disponibilidad del inóculo local (Del Ponte *et al.*, 2006a). El primer modelo de este tipo en soya fue desarrollado en los 80's y se llamó SOYRUST, este modelo simula el incremento diario de la severidad de la enfermedad en dos variedades de soya; posteriormente fue relacionado con el modelo SOYGRO para simular el efecto de la enfermedad en el rendimiento. Otro modelo desarrollado en los 80's fue CLIMEX, el cual permite predecir la probabilidad de sobrevivencia de *P. pachyrhizi* en diferentes localidades mediante variables climáticas como temperatura, humedad relativa y precipitación (Pivonia y Yang, 2004; Isard *et al.*, 2006; Del Ponte *et al.*, 2006a). Por otra parte, los modelos aerobiológicos se fundamentan en el estudio de los procesos biológicos involucrados en el movimiento de microorganismos en la atmósfera de una región geográfica a otra; en este grupo se encuentra el modelo



HYSPLIT el cual predice el riesgo de ocurrencia de la roya asiática de la soya. Del Ponte *et al.* (2006a) sintetizaron las principales características de los modelos utilizados en la predicción y análisis de riesgo de la enfermedad (Cuadro 2).

Otros investigadores han enfocado sus estudios en la búsqueda de resistencia y en la generación de nuevas variedades de soya. Para tal efecto se han evaluaron líneas de soya con resultados favorables para la incorporación de genes de resistencia (Twizeyimana *et al.*, 2007, 2008). En Estados Unidos y en Asia se logró identificar cuatro diferentes genes dominantes (Rpp1- PI 200492, Rpp2- PI 230970, Rpp3-PI 462312 y Rpp4- PI 459025) que confieren resistencia a la roya de la soya. En Brasil se evaluaron estos genotipos en condiciones de campo durante la campaña 2002/03; los resultados demostraron que solamente los genes Rpp2 y Rpp4 confirieron resistencia para la raza de roya que prevalece en ese país. Sin embargo, estos cuatro genes son un recurso de resistencia limitada y que no es durable para la roya de la soya debido a la habilidad de *P. pachyrhizi* para superar esta condición (Hartman *et al.*, 2005). Por ejemplo, PI 200492 (cultivar Komata, Rpp1) fue identificado como resistente durante evaluaciones realizadas durante 1961 a 1963 (Bromfield, 1984). En 1966, algunas lesiones susceptibles fueron encontradas en plantas de esta línea en campos experimentales. Similarmente, PI 230970 (Rpp2) fue identificado como resistente en evaluaciones de campo desde 1971 a 1973, pero en 1978, se encontraron en condiciones de campo en plantas susceptibles (Hartman *et al.*, 2005). Actualmente no se comercializan variedades resistentes a la enfermedad. En consecuencia, las estrategias más utilizadas para el manejo de roya asiática en los principales países productores de soya son el uso agroquímicos y la predicción del tiempo de aparición.

**Cuadro 2.** Características de los modelos matemáticos usados para el análisis de riesgo y predicción de riesgo de la roya asiática de la soya.

Enfoque del modelo	Tipo de modelo <sup>1</sup> / Uso <sup>2</sup>	Componentes epidémicos	Estimación principal	Nombre del modelo o referencia
Mecanístico	S - PR, AR	Potencial epidémico y de pérdidas	Progreso de la severidad de la enfermedad (%)	SOYRUST, Yang <i>et al.</i> (1991)
Analítico	S - AR	Potencial de establecimiento	Número de unidades infecciosas diarias	Pivonia y Yang (2006)
CLIMEX <sup>6</sup>	S - AR	Potencial de sobrevivencia	Estrés de la enfermedad - Índice libre (0-1)	Pivonia y Yang (2004)
HYSPLIT <sup>4</sup>	S - AR, PR	Potencial de entrada	Concentración y dispersión de esporas	Pan <i>et al.</i> (2005)
HYSPLIT	S - AR	Potencial de entrada	Índice de disponibilidad de esporas (0-7)	Kim <i>et al.</i> (2005)
HYSPLIT	S - RP	Potencial de entrada y de establecimiento	Riesgo cualitativo de la enfermedad, dispersión de esporas	NAPDFC <sup>5</sup> (2005)
Proceso aerobiológico	S- AR, RP	Potencial epidémicos, entrada y establecimiento	Desarrollo de la enfermedad y dispersión de esporas	SRAPS <sup>3</sup> , Isard <i>et al.</i> (2005)
Regresión no lineal	E - RP	Potencial de infección	Valores diarios de probabilidad de infección (0-4)	Modelo climático; Reis <i>et al.</i> (2004)
Regresión no lineal	E - RP	Potencial de infección	Eficiencia de infección diaria (0-100)	Canteri <i>et al.</i> (2004)
Redes neuronales	E - RP	Potencial epidémico	Severidad diaria de la enfermedad (%)	Batchelor <i>et al.</i> (1997)
Lógica difusa + regresión no lineal	E - AR, PR	Potencial epidémico	Progreso de la severidad de la enfermedad (%) y tasa de infección aparente	FLAIR <sup>7</sup> ; Kim <i>et al.</i> (2005)
Regresión lineal	E - AR, PR	Potencial epidémico	Severidad final o máxima de la enfermedad (%)	Del Ponte <i>et al.</i> (2006)

1. S = Simulación, E = Empírico

2. AR = Análisis de riesgo, PR = Predicción de riesgo

3. Soybean Rust Aerobiology Prediction System

4. NOAA ARL HYSPLIT\_4

5. North American Plant Disease Forecast Center

6. CLIMEX computer model (Southerst & Maywald, 1985).

7. Fuzzy Logic Apparent Infection Rate

FUENTE: Del Ponte *et al.*, 2006a.

### 3. Literatura citada

- 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.
- Bromfield, K.R. 1984. Soybean Rust., MN: American Phytopathological Society. No. 11. American Phytopathological Society. St. Paul, MN.
- Cárcamo-Rodríguez, A., J. Aguilar-Ríos, y J. R. Hernández. 2006. First report of Asia soybean rust caused by *Phakopsora pachyrhizi* from Mexico. *Plant Disease* 90:1260.
- Cárcamo-Rodríguez, A., A. R. Solano-Báez, E. Maldonado-Cruz, y P. García-Zalazar. 2013. Primer reporte de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en frijol negro en Altamira, Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 31:S96.
- Días. A. P. S., B. Yang, and X. Li. 2006. Analysis of cloud effects on the development of Asian soybean rust in Brazil and South Africa. *Proceedings of the 2006 National Soybean Rust Symposium*. St. Louis Missouri, USA.
- Del Ponte, E. M., C.V. Godoy, M. G. Canteri, E.M. Reis, and X. B. Yang. 2006a. Models and applications for risk assessment and prediction of Asian soybean rust epidemics. *Fitopatologia Brasileira* 31:533-544.
- Del Ponte, E. M., C. V. Godoy, X. Li, and X. B. Yang. 2006b. Predicting severity of Asian soybean rust epidemics with empirical rainfall models. *Phytopathology* 96:797-803.
- Fajardo-Franco M. L., R.A. Guzmán-Plazola, y A.P. Terán-Vargas. 2013. Ocurrencia de la roya asiática de la soya, su relación con el microclima y efecto en el rendimiento. *Revista Mexicana de Fitopatología* 31:S96.
- Fajardo-Franco M. L., R.A. Guzmán-Plazola, y A.P. Terán-Vargas. 2014. Desarrollo epidémico de la roya asiática de la soya y su efecto en el rendimiento en el Sur de Tamaulipas. 2014. *Revista Mexicana de Fitopatología* 32:S41.
- Garcés-Fiallos, F.R., and C.A. Forcelini. 2011. Control químico de la roya asiática de la soya en el Planalto Medio, RS., Brasil. *Agronomía Mesoamericana* 22:387-395.

- Goellner, K., M. Loehrer, C. Langenbach, U. Conrath, E. Koch, and U. Schaffrath. 2010. *Phakopsora pachyrhizi*, the causal agent of Asian soybean rust. *Molecular Plant Pathology* 11:169-177.
- Hartman, G. L. 1995. Highlights of soybean rust research at the Asian vegetable Research and Development Center. In: Proceedings of the Soybean Rust Workshop, Sinclair, J. B. and Hartman, G. L. (eds.). Urbana IL. College of Agricultural, consumer and Environmental Sciences National Soybean Research Laboratory. pp 19-28.
- Hartman, G.L., M.R. Miles, and R.D. Frederick. 2005. Breeding for resistance to soybean rust. *Plant Disease* 89:664–666.
- Hernández-Hernández, M. R., A. Cárcamo-Rodríguez, y E. Luna-Martínez. 2014. Primer reporte de la fase sexual de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 32:S58.
- 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.
- Kawuki, R. S., E. Adipala. and P. Tukamuhabwa. 2003. Yield Loss Associated with Soya Bean Rust (*Phakopsora pachyrhizi* Syd.) in Uganda. *Journal of Phytopathology* 151:7-12.
- Keogh, R.C., B.J. Deverall, and S. Mcleod. 1980. Comparison of histological and physiological responses to *Phakopsora pachyrhizi* in resistant and susceptible soybean. *Transactions of the British Mycological Society* 74:329-333.
- Koch, E., F. Ebrahimnesbat, and H.H. Hoppe. 1983. Light and electron-microscopic studies on the development of soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi* Syd) in susceptible soybean leaves. *Phytopathologische Zeitschrift* 106:302-320.
- Kochman, J. K. 1979. The effect of temperature on development of soybean rust. *Australian Journal of Agricultural Research* 30:273-277.
- Levy, C. 2005. Epidemiology and chemical control of soybean rust in Southern Africa. *Plant Disease* 89:669-674.

- Li, X., P.D. Esker, Z. Pan, A. P. Dias, L. Xue, and X.B. Yang. 2010. The Uniqueness of the Soybean Rust Pathosystem: An Improved Understanding of the Risk in Different Regions of the World. *Plant Disease* 94:796-806.
- Melching, J. S., W. M. Dowler, D. L. Koogler, and M. H. Royer. 1989. Effects of duration, frequency, and temperature of leaf wetness periods on soybean rust. *Plant Disease* 73:117-112.
- Miles, M. R., R. D. Frederickand, G. L. Hartman. 2003. Soybean rust: Is the U. S. soybean crop at risk? APSnet feature. Online publication. American Phytopathological Society, St. Paul, MN.
- Miles, M. R., C. Levy, and G. L. Hartman. 2004. Summary of The USDA Fungicide Efficacy Trials To Control Soybean Rust In Zimbabwe 2003-2004. *Integrated Pest Management Reviews*. Available: <http://www.ipmcenters.org/NewsAlerts/soybeanrust/>
- Mueller, T. A., M. R. Miles, W. Morel, J. J. Marois, D. L. Wright, R. C. Kemerait, C. Levy, and G. L. Hartman. 2009. Effect of fungicide and timing of application on soybean rust severity and yield. *Plant Disease* 93:243-248.
- Pivonia, S., and X. B. Yang. 2004. Assessment of the potencial year-round establishment of soybean rust throughout the word. *Plant Disease* 88:523-529.
- 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.
- Ploper, D. L. 2004. La roya de la soja. In: Principales conclusiones del Panamerican Soybean Rust Workshop. Ploper, L. D. (ed.) Publicación especial No 24, Tucumán, Argentina, abril 2004. Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres". 24 p.
- Scherm, H., , R. S. C. Christiano, P. D. Esker, E. M. Del Ponte, and C. V. Godoy. 2009. Quantitative review of fungicide efficacy trials for managing soybean rust in Brazil. *Crop Protection* 28:774-782.
- Schneider, R.W., C. A. Hollier, H. K. Whitam, M. E. Palm, J. M. McKemy, , J. R. Hernández, L. Levy, and R. DeVries-Paterson. 2005. First report of soybean rust

- caused by *Phakopsora pachyrhizi* in the continental United States. Plant Disease 89:774
- SIAP. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. 2014. Disponible en: <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>. (Revisión noviembre de 2014)
- Sikora, E. J., T.W. Allen, K. A. Wise, G. Bergstrom, C. A. Bradley, J. Bond, D. Brown-Rytlewski, M. Chilvers, J. Damicone, E. DeWolf, A. Dorrance, N. Dufault, P. Esker, T. R. Faske, L. Giesler, N. Goldberg, J. Golod, I. R. G. Gómez, C. Grau, A. Grybauskas, G. Franc, R. Hammerschmidt, G. L. Hartman, R. A. Henn, D. Hershman, C. Hollier, T. Isakeit, S. Isard, B. Jacobsen, D. Jardine, R. Kemerait, S. Koenning, M. Langham, D. Malvick, S. Markell, J.J. Marois, S. Monfort, D. Mueller, J. Mueller, R. Mulrooney, M. Newman, L. Osborne, G. B. Padgett, B. E. Ruden, J. Rupe, R. Schneider, H. Schwartz, G. Shaner, S. Singh, E. Stromberg, L. Sweets, A. Tenuta, S. Vaiciunas, X. B. Yang, H. Young-Kelly, and J. Zidek. 2014. A Coordinated Effort to Manage Soybean Rust in North America: A Success Story in Soybean Disease Monitoring. Plant Disease 98:864-875.
- Terán-Vargas, A. P., G. L. Ascencio, M. N. Maldonado y J. V. Ávila. 2007. La roya asiática de la soya en México. Folleto Técnico No. 22. Campo Experimental Sur de Tamaulipas, CIRNE-INIFAP. Altamira, Tam., México. 53 p.
- Terán-Vargas, A. P., P. Vega-Aquino, y J. Zambrano-Gutiérrez. 2010. Efecto de Quilt (azoxystrobin+propiconazole) sobre el vigor y rendimiento de la soya. Memorias XII Congreso Internacional / XXXVII Nacional de Fitopatología. Mérida, Yucatán, México. Resumen.
- Tschanz, A. T. 1982. Soybean rust epidemiology. Final report. Asian Vegetable Research and Development Center, Shanhua, Tainan, Taiwan. 157 p.
- Twizeyimana, M., P. S. Ojiambo, T. Ikotun, C. Paul, G.L. Hartman, and R. Bandyopadhyay. 2007. Comparison of field, greenhouse, and detached-leaf evaluations of soybean germplasm for resistance to *Phakopsora pachyrhizi*. Plant Disease 91:1161-1169.
- Twizeyimana, M., P. S. Ojiambo, T. Ikotun, J. L. Ladipo, G. L. Hartman, and R. Bandyopadhyay. 2008. Evaluation of soybean germplasm for resistance to soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Nigeria. Plant Disease 92:947-952.

- Yang, X. B. 2004. Epidemiología y bases para el manejo de la roya de la soya. Epidemiología de la roya de la soja. In: Principales conclusiones del Panamerican Soybean Rust Workshop. Ploper, L.D. (ed.) Publicación especial No.24, Tucumán, Argentina. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. 24 p.
- Yorinori, J. T., W. M. Paiva, R. D. Frederick, L. M. Costamilan, P. F. Bertagnolli, G. E. Hartman, C. V. Godoy, and J. Jr. Nunes. 2005. Epidemics of soybeans rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in Brazil and Paraguay. Plant Disease 89:675-677.

## CAPITULO I. DESARROLLO EPIDÉMICO DE LA ROYA ASIÁTICA DE LA SOYA Y SU EFECTO EN EL RENDIMIENTO DE GRANO EN LA REGIÓN HUASTECA

### RESUMEN

La región Huasteca concentra la mayor producción de soya en México. Cuando la roya asiática fue detectada por primera vez en esta región en 2005, se asumió que ocurrirían severas pérdidas en la producción de grano tanto en ese año como en posteriores. Por lo tanto, se implementaron fechas de siembras tempranas y la aplicación de fungicidas como medidas de manejo; sin embargo, no existían estudios cuantitativos del comportamiento del patógeno en esta región. Durante dos años, parcelas tratadas con fungicidas y parcelas testigo fueron establecidas con cultivares regionales en fechas de siembra tempranas y tardías. La enfermedad fue detectada en estados fenológicos reproductivos afectando el tercio bajo y medio del follaje principalmente. Los niveles de enfermedad final fueron bajos a moderados con pérdidas en el rendimiento de grano menores de 26 %. Las aspersiones con pyraclostrobin más epoxiconazol redujeron significativamente los niveles de enfermedad. En contraste, las aplicaciones únicamente con epoxiconazol no tuvieron impacto significativo en el control de la roya asiática. Los resultados de este estudio sugieren que ataques severos de la enfermedad pueden ocurrir en esta región en plantaciones tempranas, si las condiciones microclimáticas son favorables.

**Palabras clave:** *Phakopsora pachyrhizi*, incidencia, severidad, control químico.



## ABSTRACT

The Huasteca Region concentrate most of soybean production in Mexico. When soybean rust (SBR) was first detected in this region in 2005, it was assumed that heavy losses in grain production could occur. Therefore, early planting dates and fungicide sprayings were implemented. During two years, plots treated with fungicides and untreated controls were set up with regional cultivars in early and late planting dates. The disease was detected in reproductive stages affecting the lower and middle third of foliage. Final levels of disease were low to moderate with losses in grain yield below 26 %. Spraying of pyraclostrobin plus epoxiconazole significantly reduced disease levels. In contrast, sprayings of epoxiconazole alone had no significant impact on disease control. The results of this study suggest that severe attacks of SBR may occur in this region in early plantings, if microclimate becomes favorable.

**Keywords:** *Phakopsora pachyrhizi*, incidence, severity, chemical control.

### 1.1 Introducción

La roya asiática causada por el hongo *Phakopsora pachyrhizi* Syd & P. Syd fue detectada por primera vez en México en Octubre de 2005, en cultivos comerciales de soya de la región Huasteca, estados de Tamaulipas y San Luis Potosí (Cárcamo-Rodríguez *et al.*, 2006), donde se cultiva 66% de la soya en el país (Terán-Vargas *et al.*, 2007). La llegada de este patógeno representa una amenaza para las 178,532 ha de soya que se cultivan en México, con una producción anual de 239,248 ton de grano (SIAP, 2014), ya que se ha reportado que el patógeno puede causar pérdidas de hasta 100% cuando no se aplican medidas de control, dependiendo de la severidad y de la etapa de desarrollo en que ataque al cultivo (Bromfield, 1984; Kawuki *et al.*, 2003; Sinha y Reyes, 2009, Sikora *et al.*, 2014).

En México se cultivan principalmente tres variedades de soya (H-200, H-300 y H-400), pero en su generación no se consideraron caracteres de resistencia contra *P. pachyrhizi* (Maldonado *et al.*, 2009; Maldonado y Ascencio, 2010; Maldonado *et al.*, 2010). En observaciones de campo preliminares hemos detectado que estos genotipos

son infectados por el patógeno, pero no se ha determinado su grado de susceptibilidad a la enfermedad. Adicionalmente, hasta el momento no se han reportado datos de estudios cuantitativos sobre el desarrollo epidémico de la enfermedad en México, ni su impacto en el rendimiento de la soya, o el efecto de la aplicación de fungicidas, a excepción de reportes preliminares de nuestro equipo de trabajo (Terán-Vargas *et al.*, 2007; Terán-Vargas *et al.*, 2010; González-Baca *et al.*, 2011; Fajardo-Franco *et al.*, 2013).

En un análisis de riesgo realizado por el Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) (Terán-Vargas *et al.*, 2007) se determinó, con base en datos climáticos históricos, que las condiciones ambientales más favorables para el ataque de la roya asiática de la soya en el Sur de Tamaulipas ocurren principalmente durante los meses de octubre y noviembre. Se estimó además que los meses de junio a septiembre tienen condiciones menos favorables para el desarrollo de la enfermedad. Con base en esto se determinó que fechas de siembra entre el 15 de junio y el 20 de julio son las más apropiadas para lograr bajos niveles de incidencia y severidad. Se recomendó también como medida preventiva la aplicación de fungicidas del grupo de los triazoles y estrobilurinas a partir de la detección de las primeras pústulas. Adicionalmente se recomendó cancelar el ciclo de cultivo de otoño-invierno para reducir la posibilidad de daños severos y la acumulación de reservorios grandes de inóculo del patógeno que pudiesen impactar cultivos del ciclo de primavera-verano, el más importante y generalizado en todo el país. Casi todas estas recomendaciones han sido adoptadas en la región, aunque la aplicación de fungicidas no es una práctica generalizada. El INIFAP ha recomendado la aplicación de mezclas de 75 g i.a. ha<sup>-1</sup> de pyraclostrobin (Metil{2-[1-(4-clorofenil)pirazol-3-ilo ximetil]fenil}(metoxi)carbamato) con 100 g de i.a. ha<sup>-1</sup> de flutriafol ((RS)-2,4'-difluoro- $\alpha$ -(1H-1,2,4-triazol-1-ilmetil) benzhidril alcohol), o 75 g i.a. ha<sup>-1</sup> de pyraclostrobin más 25 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (2RS,3SR)-1-(3-(2-Clorofenil)-2,3-epoxy-2-(4-fluorofenil)-propil)-1H-1.2.4-triazol;), pero algunos agricultores utilizan solo epoxiconazol o no aplican fungicidas. Sin embargo, hasta el momento no se han reportado resultados de estudios formales sobre el efecto de fungicidas en el control de la enfermedad, ni información sobre el desarrollo epidémico de la roya en siembras dentro y fuera del período recomendado, ni sobre la

susceptibilidad de los genotipos de soya comúnmente cultivados en la región, con excepción de los estudios preliminares reportados por González-Baca (2011). En el presente trabajo se reportan resultados sobre el comportamiento de la enfermedad y efectos sobre el rendimiento de soya en el Sur de Tamaulipas, en diferentes fechas de siembra, durante dos años de evaluación, en experimentos con y sin aplicación de fungicidas.

## **1.2 Materiales y métodos**

Se establecieron cinco experimentos durante dos años en el municipio de Altamira, Tamaulipas, México.

### **1.2.1 Año 2012.**

El primer experimento (L1) se estableció con la variedad H-200, el 9 de julio (DJ 191), en las coordenadas N 22° 34.545', W 98° 0.117', en un lote comercial del Rancho La Resolana. Se evaluó el efecto de la aplicación del fungicida Opera® que contiene pyraclostrobin (66 g i.a. ha<sup>-1</sup>) más epoxiconazol (25 g i.a. ha<sup>-1</sup>), con respecto a testigos no tratados. Para tal efecto se programaron aspersiones cada 20-25 días (d) a partir de la etapa R5, o antes si aparecían las primeras pústulas de roya. De acuerdo con estos criterios, sólo se realizó una aplicación el DJ 279, con el fin de prevenir el ataque de roya durante la etapa de llenado de grano.

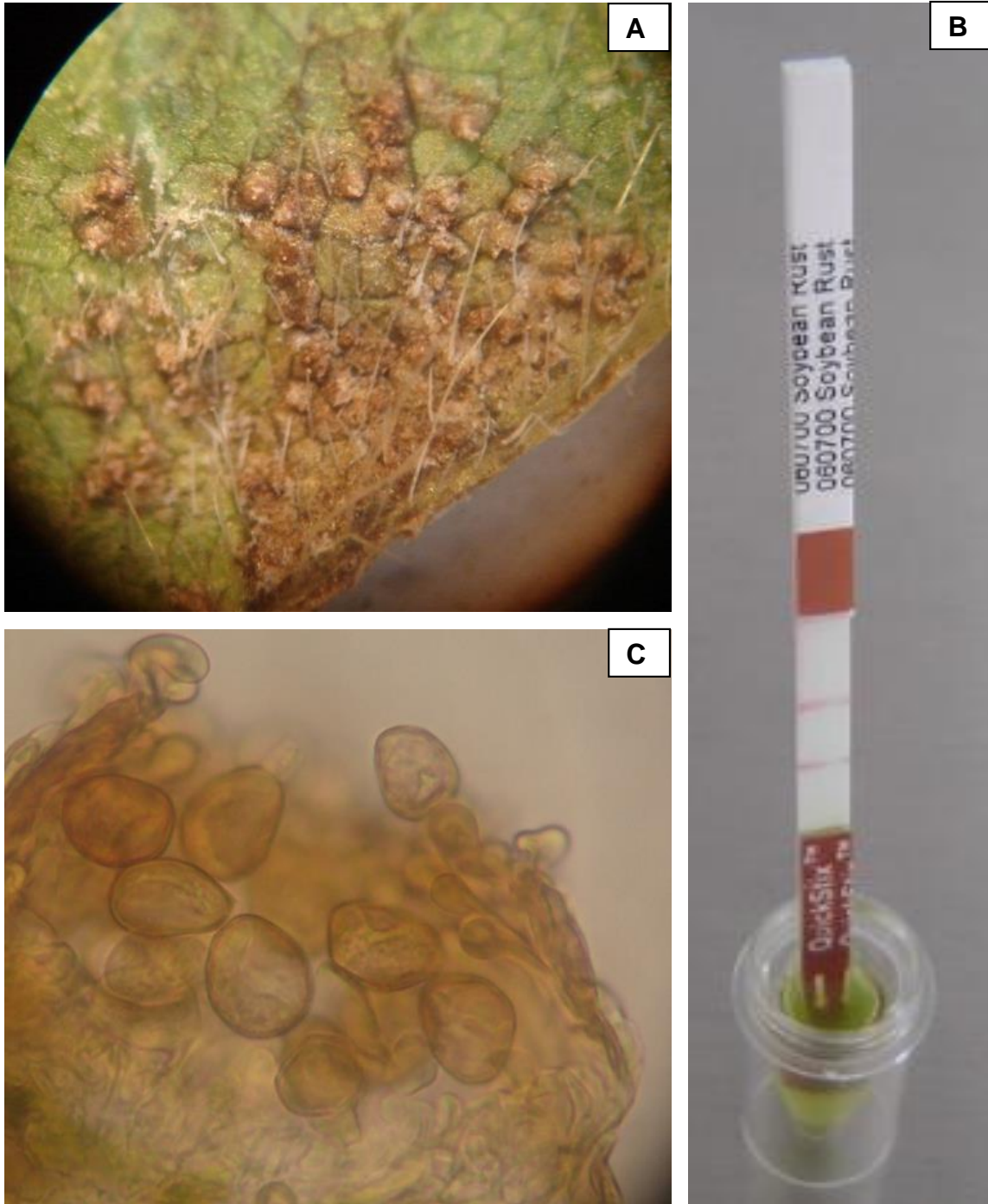
El segundo experimento (L2) fue establecido el 3 de agosto (DJ 216), en otra localidad del C.E. Las Huastecas, INIFAP, ubicada en las coordenadas N 22° 34.087', W 98° 9.999'. En esta localidad se sembró la variedad de soya H-400 y se comparó el efecto de la aplicación de 75 g i.a. ha<sup>-1</sup> de pyraclostrobin (Headline®, de BASF) más 25 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (Opus®, de BASF) contra un testigo. Conforme a los criterios de aplicación antes mencionados, se realizó una sola aspersion el DJ 286.

La aplicación 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<sup>-1</sup>. Se establecieron cuatro pares de parcelas con y sin fungicida, en franjas de 66 surcos, para facilitar la aspersión. La parcela útil en cada tratamiento fue de 64 surcos con una longitud de 50 m, separados entre sí cada 0.76 m. En ambos experimentos, la densidad de plantación, labores culturales, control de plagas se realizaron con base en lo recomendado por el INIFAP para el cultivo de la soya. La elección de los fungicidas y las dosis utilizadas, son las recomendadas actualmente por este instituto para el manejo de la roya asiática en la región Huasteca.

Con la ayuda de una lupa de 40X se detectaron los primeros signos del patógeno. La identidad de *P. pachyrhizi* fue confirmada mediante un microscopio compuesto (Marca Motic, modelo DMB1-223) y el uso de las claves de Cummins e Hiratsuka (2003) y Ono *et al.*, (1992) y confirmada con tiras inmunocromatográficas QuickStix (Enviroligix<sup>TM</sup>) específicas para *P. pachyrhizi* (Figura 1.1a-c).

La incidencia y severidad de la roya asiática se evaluó en el tercio bajo, medio y superior de las plantas de soya cada 5-13 d, a partir de la etapa V1, en la L1, y V2, en la L2 (Figura 1.2a). En cada evaluación se tomaron al azar, dentro de cada parcela útil, tres muestras de tres plantas con competencia completa. La incidencia se estimó considerando el número de folios afectados en cada tercio con respecto al total de estos en esa sección de la planta. Adicionalmente, se estimó la incidencia total como la proporción de foliolos con síntomas con respecto al total presente en la planta.

La severidad de la roya en cada tercio de la planta se evaluó mediante la escala propuesta por Godoy *et al.*, (2006), considerando el promedio del porcentaje de área foliar dañada tomando como base el total de foliolos en cada sección (Figura 1.2b). La severidad total por planta se estimó como el promedio del área foliar dañada, tomando como base el total de foliolos en la planta. Con los datos de incidencia y severidad se estimó el área bajo a curva del progreso de la severidad (ABCPS) (Campbell y Madden, 1990).



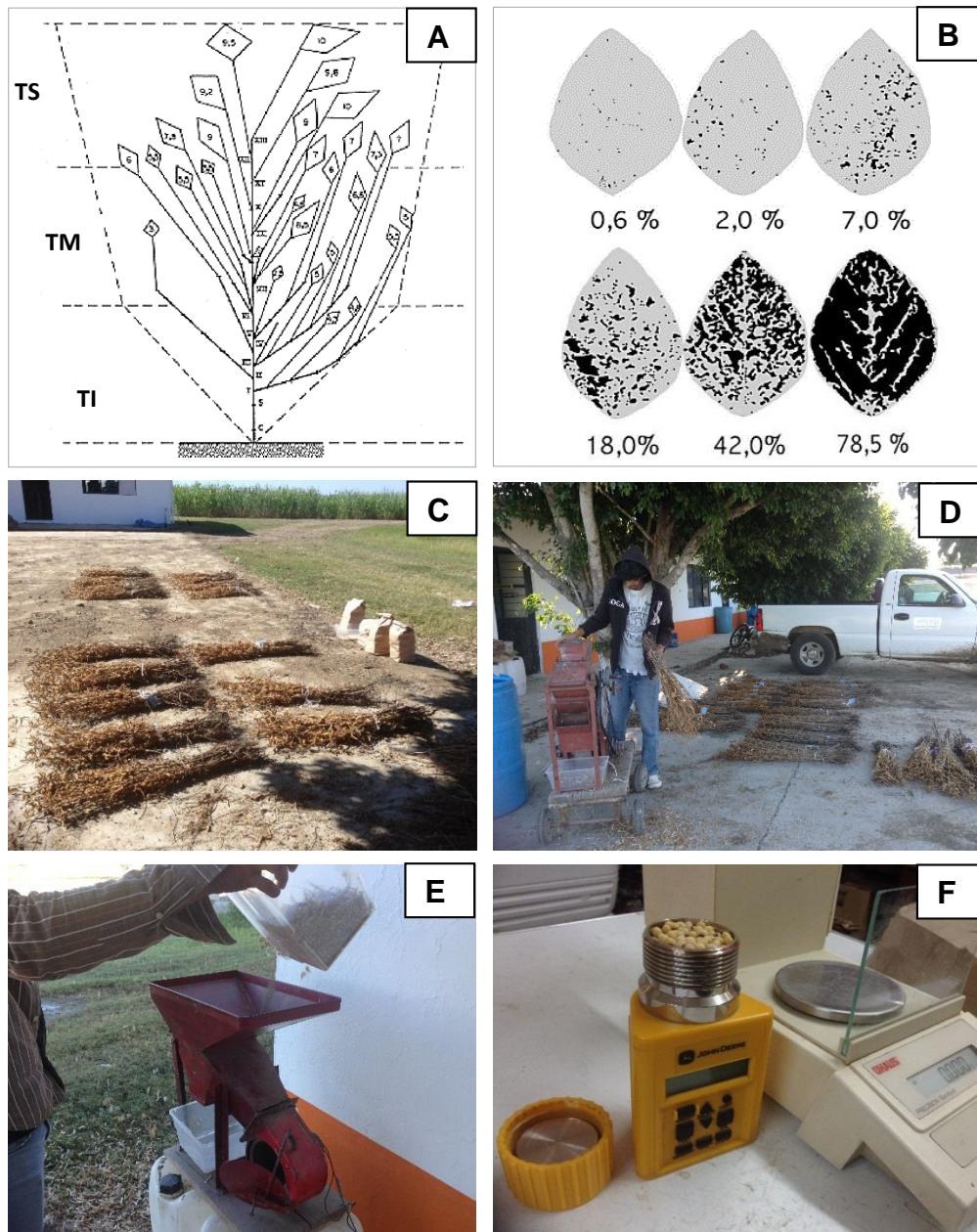
**Figura 1.1** Síntomas y signos asociados a *Phakopsora pachyrhizi* en plantas de soja y detección de la enfermedad. a) Clorosis y pústulas errumpentes. b) Tira inmunocromatográfica con resultado positivo a roya asiática. c) Uredosporas sésiles, ovoides a elipsoidales, con parafisos cilíndricos a clavados.

Cada dato reportado es el promedio de cuatro repeticiones de nueve plantas cada una. En cada muestreo se registró la etapa fenológica y cada muestra se colocó en una estufa a 80 °C durante 72 h para determinar el peso seco de la planta (Fehr y Caviness, 1981). Se evaluó la bondad de ajuste de esta última variable a los modelos exponencial, monomolecular y logístico en cada tratamiento.

Con los parámetros estimados se graficó el modelo que mejor describió la acumulación de materia seca. Las tasas intrínsecas de acumulación ( $r$ ) y los valores de producción máxima de materia seca ( $Y_{max}$ ) entre los tratamientos de cada experimento fueron comparados mediante la prueba  $t$  de Student.

Cuando las plantas llegaron a la etapa fenológica R8 se evaluó el rendimiento de grano. Para tal efecto se cosecharon las plantas de 3 surcos de 2 m de largo por unidad experimental (Figura 1.2 c – e). Se estimó el contenido de humedad del grano mediante un medidor Marca John Deere modelo SW08120; se pesó con una balanza marca OHAUS, modelo TS400D, con una precisión de 0.01 g (Figura 2f) y se calculó el rendimiento en  $kg\ ha^{-1}$  a un 12 % de humedad. Cada dato de rendimiento es el promedio de cuatro repeticiones.

Se evaluó la homogeneidad de varianzas entre tratamientos con base en el método Folded F (Steel y Torrie, 1997). Cuando las varianzas resultaron estadísticamente iguales se compararon los promedios de tratamientos mediante la prueba  $t$  de Student con base en el método Pooled; cuando resultaron diferentes la comparación se hizo con base en el método Satterthwaite (Satterthwaite, 1946). El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el programa SAS v.9.3 (Statistical Analysis System, SAS Institute, Cary North Carolina).



**Figura 1.2** Evaluación del desarrollo epidémico de *Phakopsora pachyrhizi* en plantas de soja cultivadas en Altamira, Tamaulipas y del rendimiento de grano durante el ciclo Primavera-Verano 2012. a) División en tercios del dosel vegetal para la evaluación de la incidencia y severidad de la roya asiática de la soja. TI=Tercio inferior, TM=Tercio medio, TS=Tercio superior. Modificado de Urosa y Ascencio, 1993. b) Escala diagramática para la evaluación de la severidad de la roya asiática (Godoy *et al.*, 2006). c-e) Evaluación del rendimiento de grano, f) Determinación del contenido de humedad del grano.

### 1.2.2 Año 2013.

El tercer experimento (L3) se estableció en el C.E. Las Huastecas del INIFAP, en las coordenadas N 22° 34.078', W 98° 10.461'. La siembra se realizó el 19 de julio (DJ 200) utilizando la variedad H-200. Se comparó el efecto de la aplicación de 75 g i.a. ha<sup>-1</sup> de pyraclostrobin (Headline®, BASF) más 25 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (Opus®, BASF) contra un testigo.

El cuarto experimento (L4) se estableció en el Ejido Esteros, en las coordenadas N 22° 30.976', W 98° 07.879', el 18 de julio (DJ 199), con la variedad H-300. En esta localidad se comparó el efecto de la aplicación de 62.5 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (Opus®, BASF).

El quinto experimento (L5) se estableció en el Ejido José María Morelos, en las coordenadas N 22° 31.504', W 98° 5.247'. La siembra se realizó el 29 de junio (DJ 180), con la variedad H-400. Se comparó el efecto de la aplicación de 62.5 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (Rubric®, Cheminova), contra un testigo.

Las diferencias entre las dosis y combinaciones de fungicidas evaluadas en los experimentos establecidos en los terrenos del INIFAP con respecto a las dos localidades antes mencionadas se deben a que en estos últimos se siguió el procedimiento de control de la roya considerado apropiado por los productores en cada localidad.

Las aplicaciones de fungicidas en los experimentos 3 a 5 se realizaron en la etapa fenológica R5 (inicio de formación de semilla), los DJ 281 y 308 en la L3; DJ 270 en la L4; y DJ 274 en la L5). La densidad de plantación, labores culturales, control de plagas, variables evaluadas y metodologías de análisis de datos en los tres experimentos del año 2013 se realizaron de la misma manera descrita para los experimentos llevados a cabo en el 2012.

Con los datos de los cinco experimentos en los dos años de evaluación se realizó un análisis de correlación lineal (Pearson y Spearman), entre las variables de rendimiento, incidencia y ABCPS. Los cálculos se realizaron mediante el programa SAS v.9.3 (Statistical Analysis System, SAS Institute, Cary North Carolina).



## **1.3 Resultados y discusión**

### **1.3.1 Incidencia.**

#### **1.3.1.1 Año 2012.**

En los dos sitios experimentales de este año, de acuerdo con los criterios de aplicación, sólo fue necesaria una aspersion preventiva de fungicidas (etapa fenológica R5), pero la enfermedad se presentó únicamente en el experimento 2 (L2), que se sembró en la fecha de siembra más tardía de las localidades bajo evaluación en este año (3 de agosto, DJ 216).

La roya afectó a las plantas tratadas y no tratadas con fungicidas. Las primeras pústulas se observaron durante la etapa fenológica R7, en el DJ 314; 28 d después de la aplicación del fungicida. La enfermedad se detectó únicamente en el tercio medio y superior del follaje, debido a la ocurrencia de defoliación en el tercio inferior a partir de la etapa V8.

La incidencia final en el tercio medio de las plantas tratadas con pyraclostrobin más epoxiconazole fue de 0.9 %, mientras que en las plantas sin fungicida fue de 13.2 % (Figura 1.3 a). En el tercio superior de las plantas no tratadas con fungicida la incidencia final fue de 16.9%, mientras que en las tratadas llegó a 2.4 % (Figura 1.3 b). La incidencia total en las plantas tratadas con fungicida en esta localidad fue de 1.7 % mientras que en las no tratadas la enfermedad alcanzó 16.9 % (Figura 1.3 d). Las diferencias entre tratamientos fueron significativas ( $P < 0.05$ ) y altamente significativas ( $P < 0.01$ ).

#### **1.3.1.2 Año 2013.**

En este año la roya se presentó en la etapa fenológica R5 en las tres localidades bajo estudio (Figura 1.4).

La primera detección ocurrió en la L5 (DJ 276), posteriormente se detectó en la L4 (DJ 289) y tres días después en la L3 (DJ 291) principalmente en el tercio bajo y con niveles de incidencia inferiores al 6.5 %, pero con niveles de incidencia final de hasta 100% en las plantas testigo.

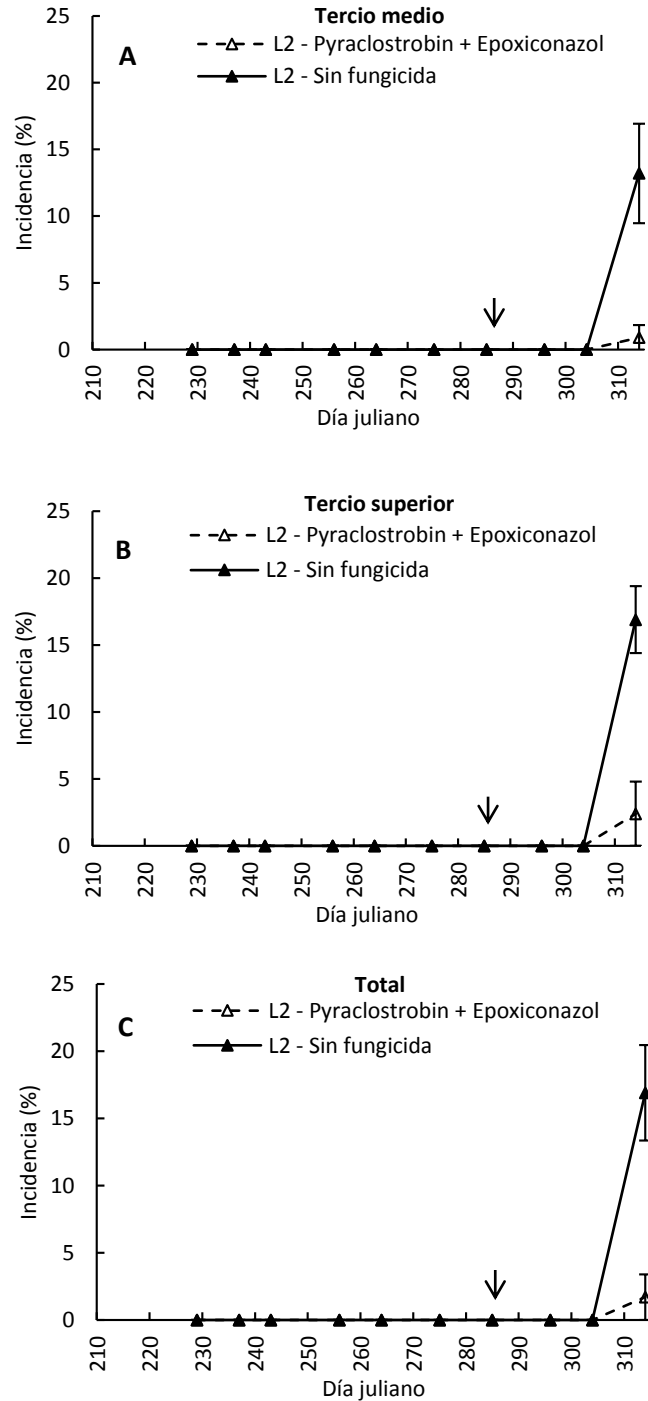
Al igual que en el año 2012, la enfermedad solamente se desarrolló en el tercio medio y superior del follaje debido a la defoliación ocurrida en el tercio bajo desde la etapa V8.

**Localidad 3.** En el experimento del C.E. Las Huastecas del INIFAP (L3) la roya asiática se detectó el DJ 281 en la parte media del follaje; el mismo día en que se realizó la primera aplicación de fungicida.

Las diferencias en incidencia en este tercio entre las plantas tratadas y no tratadas con fungicida fueron altamente significativas desde el DJ 301 hasta el término de las evaluaciones (DJ 315) (Figura 1.4 a).

La incidencia final en este tercio en plantas sin control de la roya fue de 100 %, mientras que en las tratadas con pyraclostrobin más epoxiconazol fue de 5.1 %. En el tercio superior de las plantas, la roya se observó por primera vez 10 d después (DJ 291) de la detección en el tercio medio. La incidencia final en este tercio en las plantas con fungicida fue de 0.2 % y de 100 % en las plantas no tratadas (Figura 1.4 b).

Las diferencias entre tratamientos en ambos tercios fueron significativas el DJ 301 y altamente significativas desde el DJ 308 hasta el final de las evaluaciones. La incidencia total al final del ciclo en esta localidad fue de 100 % en las plantas sin control de la enfermedad y de 3.6 % en las plantas tratadas con pyraclostrobin más epoxiconazol (Figura 1.5 a). Las diferencias entre los tratamientos fueron altamente significativas.

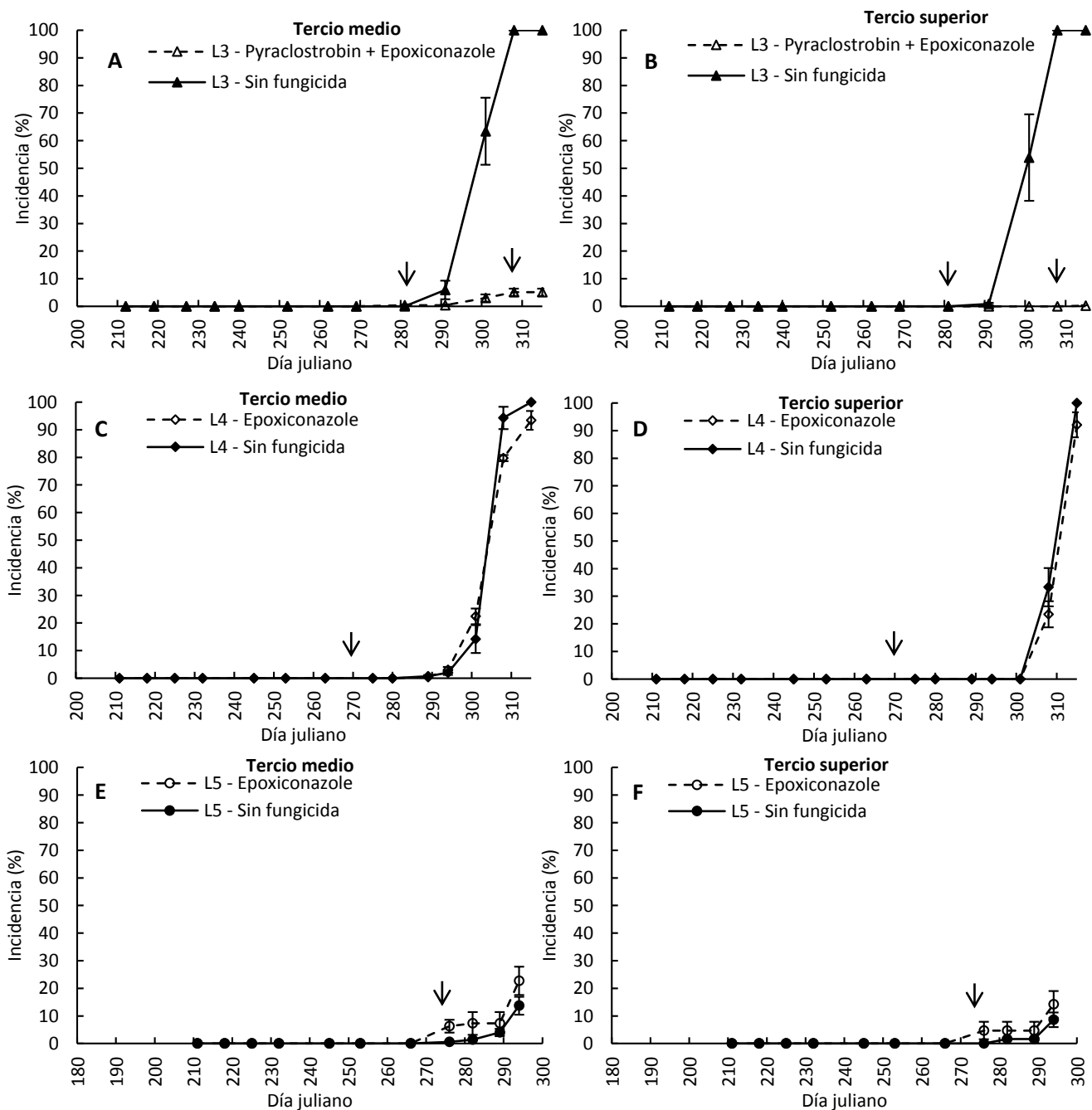


**Figura 1.3** Incidencia de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) de la soya en el tercio medio (a), superior (b) y total (c) del follaje de plantas tratadas con y sin fungicidas en la localidad 2 (Campo Experimental Las Huastecas-INIFAP), variedad H400; de Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2012. Las flechas verticales indican el día de la aplicación de fungicida. Cada punto es el promedio de cuatro repeticiones. En cada bloque se evaluaron nueve plantas con competencia completa. Las barras verticales en cada punto representan el error estándar de la media.

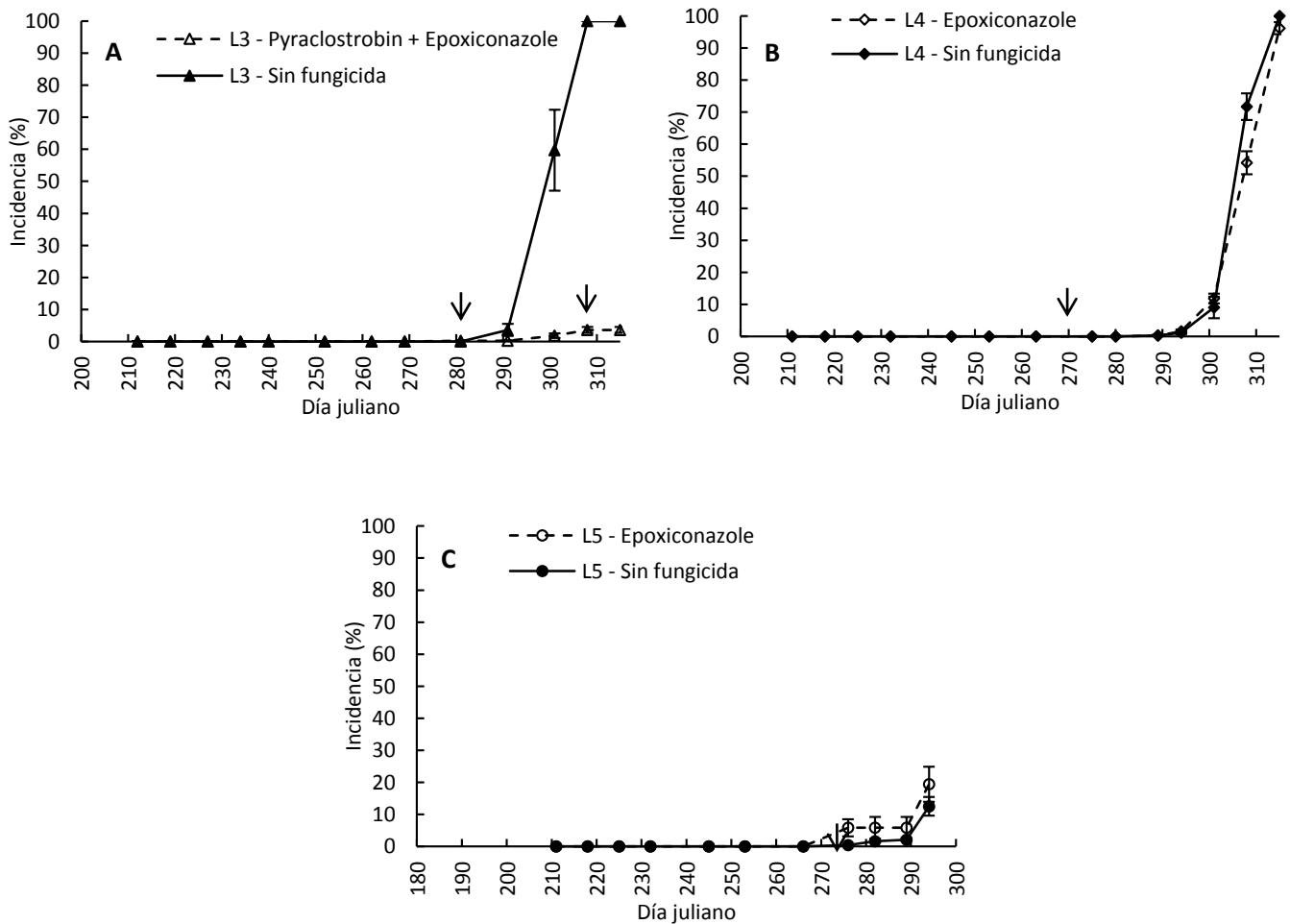
**Localidad 4.** En la L4 (Esteros) la enfermedad se detectó por primera vez el DJ 289, en el tercio medio de las plantas, 19 d después de la aplicación de epoxiconazol, pero las diferencias entre tratamientos en la incidencia de la enfermedad en este tercio solo fueron significativas a partir del DJ 308, aunque en la última evaluación (DJ 315) las medias fueron estadísticamente iguales y la incidencia final en las plantas asperjadas con fungicida fue de 93.4 %, mientras que en la plantas no tratadas fue de 100 % (Fig. 1.4 c). En el tercio superior la enfermedad se detectó 19 d después de que fue observada en el tercio medio (DJ 308) pero no hubo diferencias significativas entre tratamientos en ninguna fecha de evaluación. La incidencia final en este tercio fue de 92.1 % en las plantas asperjadas y de 100 % en las no asperjadas (Figura 1.4 d). La incidencia total final en esta localidad llegó a 96.2 % en las plantas tratadas con epoxiconazol y a 100 % en las plantas sin fungicida. El desarrollo de la roya fue similar en ambos tratamientos y no ocurrieron diferencias significativas entre ellos, a excepción del DJ 308 ( $0.05 \geq P > 0.01$ ; Figura 1.5 b).

**Localidad 5.** En la L5 (José Ma. Morelos) la enfermedad se detectó en el tercio medio y superior el DJ 276, 2 días después de la aplicación de epoxiconazol. En esta localidad el desarrollo epidémico de la roya asiática fue más lento en comparación con las otras dos localidades.

La incidencia final en el tercio medio fue de 22.7 % en las plantas tratadas con fungicida y de 13.7 % en las no tratadas (Figura 1.4 e). En el tercio superior el valor de esta variable fue de 14.2 % en las plantas asperjadas y de 8.6 % en las no asperjadas (Figura 1.4 f), sin embargo las pruebas de hipótesis no indicaron diferencias estadísticamente significativas. La incidencia total final en las plantas tratadas con epoxiconazol fue de 19.4 % y de 12.5 % en plantas sin fungicida (Figura 1.5 c), estas diferencias tampoco fueron significativas.



**Figura 1.4** Incidencia de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) de la soya en el tercio medio y superior del follaje de plantas tratadas con y sin fungicida, en tres localidades (a y b, L3=INIFAP, variedad H200; c y d, L4=Esteros, variedad H300; e y f, L5=José Ma. Morelos, variedad H400) de Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2013. Las flechas verticales indican el día de la aplicación de fungicida. Cada punto es el promedio de cuatro bloques. En cada bloque se evaluaron nueve plantas con competencia completa. Las barras verticales en cada punto representan el error estándar de la media.



**Figura 1.5** Incidencia total de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) de la soya, tratada con y sin fungicida, en tres localidades (a y b, L3=INIFAP, variedad H200; c y d, L4=Esteros, variedad H300; e y f, L5=José Ma. Morelos, variedad H400) de Altamira Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2013. Las flechas verticales indican el día de la aplicación de fungicida. Cada punto es el promedio de cuatro bloques. En cada bloque se evaluaron nueve plantas con competencia completa. Las barras verticales en cada punto representan el error estándar de la media.

### 1.3.2. Área bajo la curva del progreso de la severidad.

#### 1.3.2.1. Año 2012.

**Localidad 2.** El Área bajo la curva del progreso de la severidad (ABCPS) en el tercio medio fue mayor en plantas sin aplicación de fungicida (1.5) que en las asperjadas con estos productos (0.03). En el tercio superior esta variable alcanzó un valor de 2.9 en las plantas testigo y de 0.1 en las tratadas con fungicida. Únicamente en este tercio las diferencias fueron altamente significativas. El ABCPS total (2.6) también fue mayor en plantas no asperjadas que en las tratadas con fungicida (0.05). Las diferencias resultaron altamente significativas y significativas sólo para las dos últimas variables (Cuadro 1.1).

**Cuadro 1.1** Área bajo la curva del progreso de la severidad (ABCPS) de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) en plantas de soya, tratadas con y sin fungicidas, en el Campo Experimental las Huastecas (L2, variedad H400) de Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano de 2012.

Tercio del follaje y total	Tratamiento	ABCPS
Medio	Pyraclostrobin más Epoxiconazol	0.03
	Sin fungicida	1.5 ns
Superior	Pyraclostrobin más Epoxiconazol	0.1
	Sin fungicida	2.9 **
Total	Pyraclostrobin más Epoxiconazol	0.05
	Sin fungicida	2.6 *

Cada valor es el promedio de cuatro bloques. En cada bloque se evaluaron nueve plantas con competencia completa. Para cada localidad, ns, \* ó \*\* indican diferencias no significativas, significativas ( $P \leq 0.05$  y  $P > 0.01$ ) o altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ), respectivamente en la prueba t de Student.

#### 1.3.2.2. Año 2013.

**Localidad 3.** El ABCPS en el tercio medio y superior también fue mayor en las plantas testigo (80.2 y 44.1) que en las asperjadas con la mezcla de fungicidas (0.9 y 0.01). El ABCPS total fue de 66.4 en las plantas testigo y de 0.8 en las aplicadas con fungicida.

Las diferencias entre tratamientos en el tercio medio y en toda la planta fueron significativas, y únicamente en el tercio superior resultaron altamente significativas (Cuadro 1.2).

**Localidad 4.** El ABCPS en el tercio medio fue de 20.4 en las plantas tratadas con epoxiconazol y de 24.4 en las no asperjadas con epoxiconazol. En el tercio superior las plantas tratadas tuvieron un valor de 3.8 y las no asperjadas de 4.2. El ABCPS total fue de 13.1 en las plantas asperjadas y 18.8 en los testigos. Las diferencias entre los tratamientos en todos los casos resultaron no significativas. (Cuadro 1.2).

**Localidad 5.** En esta localidad, el ABCPS en el tercio medio en plantas tratadas con epoxiconazole fue de 1.3 y en las testigo de 0.5. En el tercio superior las asperjadas tuvieron un valor de 0.8 y las no asperjadas de 0.3. El ABCPS total en plantas tratadas fue de 0.9 y de 0.2 en las testigo. En todos los casos no existieron diferencias significativas entre tratamientos (Cuadro 1.2).

### **1.3.3 Peso seco de la parte aérea.**

En los experimentos 1 a 5, la acumulación de biomasa aérea tuvo un comportamiento sigmoideal tanto en las plantas asperjadas con fungicidas como en los testigos. En todos los casos la dinámica se ajustó al modelo logístico. El valor máximo de biomasa ( $Y_{max}$ ) ocurrió en la etapa fenológica R7 (Figura 1.6).

#### **1.3.3.1 Año 2012.**

**Localidad 1.** El modelo logístico que mejor describió la acumulación de materia seca en este experimento tuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.97 para las plantas tratadas con fungicida, con una  $Y_{max}$  de 18.2 g/planta ( $g\ pl^{-1}$ ) y una tasa intrínseca de acumulación ( $r$ ) de 0.064 gramos por gramo por día ( $g\ g^{-1}\ d^{-1}$ ) (Figura 1.6 a).



**Cuadro 1.2** Área bajo la curva del progreso de la severidad (ABCPS) de la roya asiática (*Phakopsora pachyrhizi*) en plantas de soya, tratadas con y sin fungicida, en tres localidades (L3=INIFAP; L4=Esteros; L5=José Ma. Morelos) de Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2013.

Localidad - Variedad	Tercio del follaje y total	Tratamiento	ABCPS
L3 – H200	Medio	Pyraclostrobin más Epoxiconazol	0.9
		Sin fungicida	80.2*
	Superior	Pyraclostrobin más Epoxiconazol	0.01
		Sin fungicida	44.1**
	Total	Pyraclostrobin más Epoxiconazol	0.8
		Sin fungicida	66.4 *
L4 – H300	Medio	Epoxiconazol	20.4
		Sin fungicida	24.4 ns
	Superior	Epoxiconazol	3.8
		Sin fungicida	4.2 ns
	Total	Epoxiconazol	13.1
		Sin fungicida	18.8 ns
L5 – H400	Medio	Epoxiconazol	1.3 ns
		Sin fungicida	0.5
	Superior	Epoxiconazol	0.8 ns
		Sin fungicida	0.3
	Total	Epoxiconazol	0.9 ns
		Sin fungicida	0.2

Cada valor es el promedio de cuatro repeticiones. En cada repetición se evaluaron nueve plantas con competencia completa. Para cada localidad, ns, \* ó \*\* indican diferencias no significativas, significativas ( $P \leq 0.05$  y  $P > 0.01$ ) o altamente significativas ( $P \leq 0.01$ ), respectivamente en la prueba T de Student.

En las plantas no tratadas la  $Y_{max}$  fue de 12.9 g pl<sup>-1</sup>, con una  $r = 0.068$  y  $R^2 = 0.94$ . En ambos casos  $r$  resultó estadísticamente diferente de cero ( $P < 0.0001$ ). Las diferencias en el parámetro  $r$  de ambos tratamientos no resultaron significativas, mientras que para la  $Y_{max}$  fueron altamente significativas.

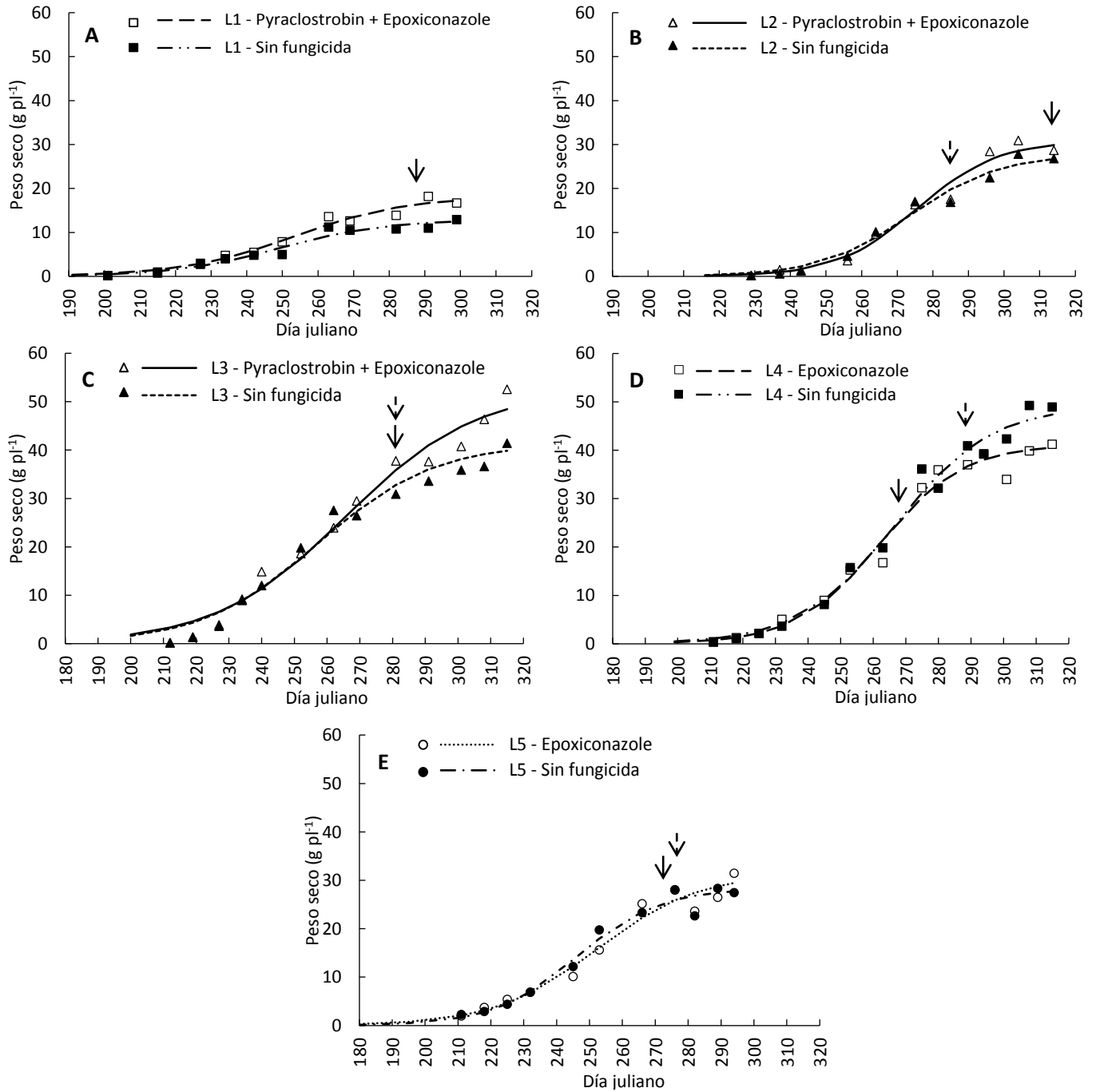
**Localidad 2.** En esta localidad, las plantas tratadas alcanzaron una producción máxima de materia seca ( $Y_{max}$ ) de 30.9 g pl<sup>-1</sup>, mientras que las no tratadas tuvieron una  $Y_{max}$  promedio de 27.8 g pl<sup>-1</sup>. En ambos casos la dinámica se ajustó a un modelo logístico con  $R^2=0.97$  y tasa intrínseca de incremento ( $r$ ) de 0.088 y 0.079 g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente, con  $r$  estadísticamente diferente de cero ( $P < 0.0001$ ) en ambos casos. Sin embargo ninguna diferencia entre tratamientos en los parámetros  $r$  y  $Y_{max}$  de cada modelo resultó significativa (Figura 1.6 b).

### 1.3.3.2 Año 2013.

**Localidad 3.** En este experimento los modelos para las plantas con y sin fungicida tuvieron un coeficiente  $R^2= 0.97$ . En las plantas con fungicida la  $Y_{max}$  y la tasa intrínseca de incremento fue de 52.6 g planta<sup>-1</sup> y 0.05 g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, mientras que en las no tratadas fue de 41.4 g pl<sup>-1</sup> y 0.056 g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup>, respectivamente, con  $r$  estadísticamente diferente de cero en ambos casos ( $P < 0.0001$ ). Las diferencias entre tratamientos fueron significativas para el parámetro  $r$  y altamente significativas para el parámetro  $Y_{max}$  (Figura 1.6 c).

**Localidad 4.** En esta localidad el coeficiente de determinación del modelo logístico fue de 0.99 y de 0.98, para las plantas con y sin fungicida respectivamente, con una  $Y_{max}$  de 41.2 g pl<sup>-1</sup> y  $r= 0.078$  g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para las tratadas y de 49.2 g pl<sup>-1</sup> y  $r = 0.068$  g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para las no tratadas, respectivamente, con  $r$  estadísticamente diferente de cero en ambos casos ( $P < 0.0001$ ). Las diferencias entre tratamientos para los parámetros  $r$  y  $Y_{max}$  no fueron significativas (Figura 1.6 d).

**Localidad 5.** En este experimento el coeficiente de determinación del modelo logístico fue de 0.96 y de 0.97, para las plantas con y sin fungicida, con una  $Y_{max}$  de 31.5 g pl<sup>-1</sup> y  $r= 0.064$  g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para tratadas y de 28.3 g planta<sup>-1</sup> y  $r = 0.079$  g g<sup>-1</sup> d<sup>-1</sup> para las no tratadas, respectivamente, con  $r$  estadísticamente diferente de cero en ambos casos ( $P < 0.0001$ ). Las diferencias entre tratamientos para los parámetros  $r$  y  $Y_{max}$  no fueron significativas (Figura 1.6 e).



**Figura 1.6** Peso seco de la parte aérea de plantas de soja, tratadas con y sin fungicida, en dos localidades (L1= Resolana, variedad H200; L2= INIFAP, variedad H400), durante el año de 2012 (a y b) y tres localidades (L3=INIFAP, variedad H200; L4=Esteros, variedad H300; L5=José Ma. Morelos, variedad H400) durante año 2013 (c,d y e), en Altamira, Tamaulipas. Las líneas sigmoidales describen las predicciones del modelo de crecimiento logístico que mejor se ajusta a los datos de cada tratamiento en cada campo de cultivo. Las flechas verticales continuas indican el día de la aplicación de fungicida, y las discontinuas la detección de la roya. DJ= Día juliano, EF=Etapa fenológica.

### **1.3.4. Rendimiento de grano.**

#### **1.3.4.1. Año 2012**

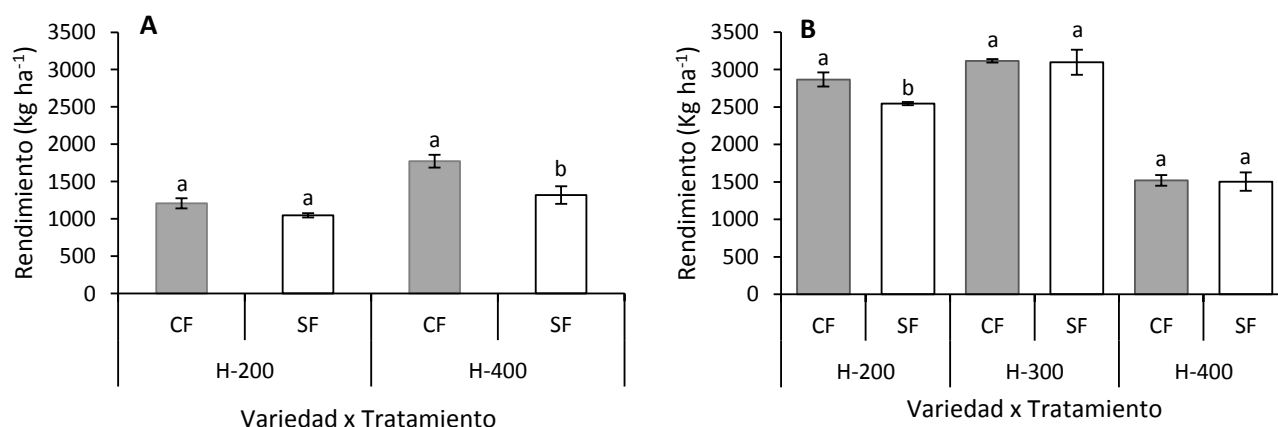
En el 2012 se observó que las plantas tratadas con fungicida en ambas localidades tendieron a un mayor rendimiento de grano que las no tratadas, pero en la localidad 1 estas diferencias no fueron significativas; las plantas tratadas con pyraclostrobin más epoxiconazol tuvieron un rendimiento de 1210.0 kg ha<sup>-1</sup> y las no tratadas de 1049.0 kg ha<sup>-1</sup>. En el caso de la localidad 2 el rendimiento de grano en las plantas tratadas (1774.0 kg ha<sup>-1</sup>) y en las no tratadas (1320.0 kg ha<sup>-1</sup>) sí resultó estadísticamente diferente (Figura 1.7 a), con pérdidas en el rendimiento de grano del orden del 25.6 %.

#### **1.3.4.2. Año 2013**

Los rendimientos obtenidos en este año fueron más altos que los obtenidos en todos los años previos, con valores en el rango de 1504 kg ha<sup>-1</sup> a 3117 kg ha<sup>-1</sup>; los promedios más bajos ocurrieron en la L5. Sin embargo, únicamente en la L3 las diferencias entre las parcelas tratadas con pyraclostrobin más epoxiconazol (2867.6 kg ha<sup>-1</sup>) y las no tratadas (2546.3 kg ha<sup>-1</sup>) resultaron significativas para el rendimiento de grano, donde las pérdidas del rendimiento fueron de 11.2 %. En las demás localidades las diferencias entre tratamientos entre las parcelas tratadas (L4 = 3117 kg ha<sup>-1</sup>; L5 = 1519.8 kg ha<sup>-1</sup>), y las no tratadas con fungicidas (L4 = 3097 kg ha<sup>-1</sup>; L5 = 1504 kg ha<sup>-1</sup>) no fueron significativas (Figura 1.7 b).

### **1.3.5. Correlación entre variables.**

La incidencia de la enfermedad en los tercios medio, superior y en toda la planta resultaron altamente correlacionados entre sí ( $r > 0.99$ ;  $P < 0.001$ ). En el caso del ABCPS en cada tercio y en toda planta las correlaciones variaron de 0.97 a 0.99 con  $P < 0.005$ . No se detectaron correlaciones significativas entre el rendimiento de grano, la severidad y la incidencia. Adicionalmente se observó una tendencia general a una reducción gradual del rendimiento de grano conforme se demoró la fecha de siembra.



**Figura 1.7** (a) Rendimiento de grano en plantas de soya tratadas con y sin fungicida, en dos localidades con y sin pyraclostrobin + epoxiconazol durante el año 2012 (L1= Resolana, variedad H200; L2= INIFAP, variedad H400). (b) Una localidad con y sin pyraclostrobin + epoxiconazol (L3=INIFAP, variedad H200), y dos localidades con y sin epoxiconazole durante el año 2013 (L4=Esteros, variedad H300; L5=José Ma. Morelos, variedad H400) (b), en Altamira, Tamaulipas. Las barras verticales representan el error estándar de la media. Cada barra es el promedio de cuatro repeticiones. En cada repetición se evaluaron tres surcos de 2 m de largo, con plantas en competencia completa. Valores con la misma letra dentro de cada experimento son estadísticamente iguales (t-Student,  $\alpha = 0.05$ ).

#### 1.4. Discusión

Este trabajo documenta resultados de estudios epidemiológicos sobre el efecto de *P. pachyrhizi* en el cultivo de la soya en México; específicamente en la región Huasteca, ubicada en el Sur de Tamaulipas considerada representativa de toda el área productora del estado. En esta región la fecha de siembra de la soya ha sido restringida al ciclo primavera-verano, desde el 15 de junio (DJ 166) al 20 de julio (201 DJ). Esta decisión está basada en un análisis de riesgo realizado por el INIFAP en el que se estimó que de octubre a noviembre ocurren condiciones climáticas propicias para el desarrollo de la enfermedad (Terán-Vargas *et al.*, 2007). Sin embargo, en nuestros experimentos sembrados en fechas tardías no ocurrió una alta intensidad de enfermedad y en un experimento sembrado dentro de la fecha autorizada ocurrió una reducción significativa en la producción de grano, lo cual indica que existe un riesgo latente de daños severos por *P. pachyrhizi* dentro del ciclo regular de cultivo. No obstante, la enfermedad ocurrió

con baja intensidad en la mayoría de los casos, o no fue detectable, independientemente de la fecha de siembra, lo cual explica la ausencia de impactos negativos en el rendimiento en cuatro de cinco experimentos.

En el experimento tardío del año 2012, con efectos negativos en el rendimiento, la precipitación total en el ciclo de cultivo (457 mm) y la temperatura promedio del mes más frío (23 °C) estuvieron cercanos a los valores normales (593.2 mm y 25 °C) para la región Huasteca, mientras que solo en uno de tres experimentos sembrados en el año 2013, dentro del tiempo autorizado, la enfermedad afectó el rendimiento, no obstante que los niveles de precipitación excedieron el promedio normal (736.1) y la temperatura del mes más frío fue más baja (21.6 °C). En los otros dos experimentos, no fue posible determinar el porcentaje de pérdidas en el rendimiento debido a la baja eficacia del epoxiconazol en el control del patógeno, ya que el desarrollo epidémico de la enfermedad entre las parcelas asperjadas con este fungicida y los testigos fue similar. Este año se caracterizó por la ocurrencia de meteoros en las costas de Tamaulipas que ocasionaron altas precipitaciones, acumulación de humedad residual en el suelo, formación de cuerpos de agua y presencia de nubosidad en la región durante el ciclo de cultivo, lo que probablemente redujo la penetración de la luz solar y favoreció la ocurrencia de niveles de incidencia y severidad más altos que en años previos, así como a una mayor duración del ciclo del cultivo. Variaciones en las condiciones climáticas, particularmente patrones diarios de temperatura y humedad, en los niveles de inóculo y en la radiación solar, entre ciclos de cultivo y localidades pudieron afectar la dinámica de la roya (Mueller y Buck, 2003; Isard *et al.*, 2006). La alta dependencia del patógeno del microclima ha sido documentada por diversos investigadores (Pivonia *et al.*, 2006; Bonde *et al.*, 2007, 2012; Narváez *et al.*, 2010, Sikora *et al.*, 2014). Se ha demostrado que altas temperaturas y la exposición a la radiación solar con altas intensidades luminosas, disminuyen significativamente el porcentaje de germinación de urediosporas tanto de *P. pachyrhizi* como de otras royas (Mueller y Buck, 2003; Isard *et al.*, 2006; Dias, 2007). La precipitación también es un factor importante en el incremento de los niveles de la enfermedad (Ponte *et al.*, 2006), principalmente cuando existen meses con precipitaciones mayores a 150 mm (Ploper, 2004); además, altas precipitaciones permiten que las esporas existentes en el aire sean transportadas hacia los cultivos o

plantas hospedantes, lo que resulta en la acumulación de altos reservorios de inóculo. En nuestros experimentos del año 2013, los meses de agosto y septiembre fueron caracterizados por valores de precipitación que superaron los 150 mm, pero la enfermedad se presentó hasta el mes de octubre, la incidencia final fue alta, con severidades bajas a moderadas en todos los experimentos; probablemente el desarrollo de la enfermedad fue limitado por algún otro factor microclimático, como la ocurrencia de temperaturas superiores a 28 °C durante el día, consideradas temperaturas desfavorables para el óptimo desarrollo de la enfermedad (Ploper, 2004).

Aunque en nuestras evaluaciones no se presentaron ataques severos de la roya asiática, existe la posibilidad de que ocurran cambios en el patrón climático de la región o adaptación del patógeno a las condiciones climáticas prevalentes en la región a través de los años (Bonde *et al.*, 2007).

En nuestros resultados, la incidencia y ABCPS a nivel de tercios estuvieron altamente correlacionados con los valores totales de estas variables, por lo que una muestra de cualquiera de estos tercios, en especial el tercio medio resulta representativo para evaluar dichas variables. Sin embargo, ninguna de las variables de incidencia y severidad resultaron buenos predictores del rendimiento de grano.

Los niveles epidémicos alcanzados en cada variedad durante los años 2012 y 2013 no mostraron un patrón consistente de tolerancia a la enfermedad, lo que sugiere que las diferencias de un año a otro se debieron a variaciones microclimáticas y a un efecto de la fecha de siembra.

Por otra parte, nuestros resultados confirman que las recomendaciones del INIFAP para el control químico de la roya asiática mediante la aplicación de pyraclostrobin más epoxiconazol reducen significativamente los niveles de enfermedad, aunque no se logró eliminar al patógeno en ninguno de los casos. La aplicación de pyraclostrobin más epoxiconazol fue la mejor opción, ya que además de disminuir los niveles de incidencia y de severidad logró aumentar el peso seco por planta y 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 roya asiática obtenidos en Brasil (Scherm *et al.*, 2009; Garcés-Fiallos y Forcelini, 2011). En contraste, el manejo realizado por los productores utilizando únicamente epoxiconazol no tuvo impacto

significativo en el control de la enfermedad. El uso de otros fungicidas del grupo de los triazoles aplicados solos no ha sido efectivo en el control de la roya asiática (Garcés-Fiallos y Forcelini, 2011; Ploper, 2004). Esto es muy importante, ya que las aplicaciones innecesarias de fungicidas aumentan el impacto ambiental y los costos de producción, así como el riesgo de selección de poblaciones resistentes del patógeno (Garcés-Fiallos y Forcelini, 2011), un tema que no ha sido estudiado en la región.

Los incrementos en los rendimientos observados durante el año 2013 respecto al año 2012, pudieron estar asociado con las altas precipitaciones ocurridas durante el ciclo de cultivo, que favorecieron un mejor llenado de grano.

Hasta el momento no se conocen con certeza cuáles son las fuentes de inóculo primario del patógeno en el estado y las implicaciones de la ocurrencia del hongo en cultivos de frijol y jícama en Tamaulipas (Cárcamo-Rodríguez *et al.*, 2013). Adicionalmente, la detección reciente de teliosporas del patógeno en Guanajuato (Hernández-Hernández *et al.*, 2014), implica un mayor riesgo de generación de genotipos resistentes a los fungicidas actualmente en uso, particularmente si se realizan aspersiones innecesarias. Por otra parte, estudios sobre la variabilidad genética y patogénica de *P. pachyrhizi* son trabajos de alta relevancia, pendientes aún de ser realizados en México.

## **1.5 Conclusiones**

El comportamiento de la roya asiática en la región Huasteca no mostró un patrón consistente de un año a otro, probablemente por variaciones microclimáticas generadas por fenómenos meteorológicos que afectaron esta región. Las fechas de siembra tempranas fueron adecuadas para evadir las condiciones climáticas propicias para la enfermedad, pero aún en siembras tempranas existe el riesgo de que la enfermedad pueda ocurrir si se presentan cambios en el patrón regional del clima. El rendimiento de grano no fue afectado severamente, las pérdidas fueron bajas debido a que las fechas de siembra evadieron la ocurrencia de la roya asiática en etapas fenológicas tempranas del cultivo. Únicamente, la aplicación de pyraclostrobin más epoxiconazol logró controlar el desarrollo epidémico de la enfermedad, por lo que es recomendable su uso para el manejo de la roya asiática en el Sur de Tamaulipas.



## 1.6 Literatura citada

- 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.
- Bonde, M. R., S. E. Nester, and D. K. Berner. 2012. Effects of daily temperature highs on development of *Phakopsora pachyrhizi* on soybean. *Phytopathology* 102:761-768.
- Bromfield, K. R. 1984. Soybean Rust, Monograph 11. American Phytopathological Society, St. Paul, MN.
- Campbell, C.L., L. V. Madden. 1990. Introduction to Plant Disease Epidemiology. Wiley, New York.
- Cárcamo-Rodríguez, A., J. Aguilar-Ríos, y J. R. Hernández. 2006. First report of Asia soybean rust caused by *Phakopsora pachyrhizi* from Mexico. *Plant Disease* 90:1260.
- Cárcamo-Rodríguez, A., A. R. Solano-Báez, E. Maldonado-Cruz, y P. García-Zalazar. 2013. Primer reporte de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en frijol negro en Altamira, Tamaulipas, México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 31:S96.
- Cummins, G. B., and Y. Hiratsuka. 2003. Illustrated Genera of Rust Fungi. 3rd Edition. APS Press. St. Paul Minnesota, USA. 240p.
- 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.
- Dias, A. P. S. 2007. Epidemiological studies of shading effects on Asian soybean rust. Ph.D. thesis. Iowa State University, Ames.
- Fajardo-Franco M. L., R.A. Guzmán-Plazola, y A.P. Terán-Vargas. 2013. Ocurrencia de la roya asiática de la soya, su relación con el microclima y efecto en el rendimiento. *Revista Mexicana de Fitopatología* 31:S96.
- Fehr W. R., and C. E. Caviness. 1981. Stages of soybean development. Cooperative Extension Service. Iowa State University. Ames Iowa 50011. Special Report 80. 11p.

- Garcés-Fiallos, F.R., and C.A. Forcelini. 2011. Control químico de la roya asiática de la soya en el Planalto Medio, RS., Brasil. *Agronomía Mesoamericana* 22:387-395.
- Godoy, C. V., L. J. Koga, and M. G. Canteri. 2006. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. *Fitopatologia Brasileira* 31:063-068.
- González-Baca, G., R. A. Guzmán-Plazola, A. P. Terán-Vargas, y J. S. Sandoval-Islas. 2011. Efecto epidémico sobre enfermedades de fin de ciclo y rendimiento de variedades de soya en la Región Huasteca, Tamaulipas, en diferentes fechas de siembra. *In: XIII Congreso Internacional / XXXVIII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Fitopatología.*
- Hernández-Hernández, M. R., A. Cárcamo-Rodríguez, y E. Luna-Martínez. 2014. Primer reporte de la fase sexual de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 32:S58.
- 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.
- Kawuki, R. S., E. Adipala. and P. Tukamuhabwa. 2003. Yield Loss Associated with Soya Bean Rust (*Phakopsora pachyrhizi* Syd.) in Uganda. *Journal of Phytopathology* 151:7-12.
- Li, X., P.D. Esker, Z. Pan, A. P. Dias, L. Xue, and X.B. Yang. 2010. The Uniqueness of the Soybean Rust Pathosystem: An Improved Understanding of the Risk in Different Regions of the World. *Plant Disease* 94:796-806.
- Maldonado-Moreno, N., G. Ascencio-Luciano, y H. R. Gill-Langarica. 2009. Huasteca 300, nueva variedad de soya para el sur del estado de Tamaulipas. *Agricultura Técnica en México* 35:475-479.
- Maldonado-Moreno, N., y G. Ascencio-Luciano. 2010. Huasteca 200, variedad de soya de baja sensibilidad al fotoperiodo corto para el trópico de México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:707-714.
- Maldonado-Moreno, N., G. Ascencio-Luciano, y H. R. Gill-Langarica. 2010. Huasteca 400, nueva variedad de soya para el sur de Tamaulipas, Oriente de San Luis Potosí y norte de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 1:687-692.

- Mueller, D. S., and J. W. Buck. 2003. Effects of light, temperature, and leaf wetness duration on daylily rust. *Plant Disease* 87:442-445.
- Narváez, D. F., W. M. Jurick, J. J. Marois, and D. L. Wright. 2010. Effects of surface wetness periods on development of soybean rust under field conditions. *Plant Dis.* 94:258-264.
- Ono, Y., P. Buritica, and J. F. Hennen. 1992. Delimitation of *Phakopsora*, *Physopella* and *Cerotelium* and their species on Leguminosae. *Mycology Research* 96:825-850.
- 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.
- Ploper, L. D. 2004. Principales Conclusiones del Panamerican Soybean Rust Workshop. Publicación Especial No.24, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. 24 p.
- Satterthwaite, F.E. 1946. An approximate distribution of estimates of variance components. *Biometrics Bulletin*, 2, 110-114.
- Scherm, H., R. S. C. Christiano, P. D. Esker, E. M. Del Ponte, and C. V. Godoy. 2009. Quantitative review of fungicide efficacy trials for managing soybean rust in Brazil. *Crop Protection* 28:774-782.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2014. Cierre de la producción agrícola por cultivo. [www.siap.gob.mx](http://www.siap.gob.mx) (Noviembre 2014).
- Sikora, E. J., T.W. Allen, K. A. Wise, G. Bergstrom, C. A. Bradley, J. Bond, D. Brown-Rytlewski, M. Chilvers, J. Damicone, E. DeWolf, A. Dorrance, N. Dufault, P. Esker, T. R. Faske, L. Giesler, N. Goldberg, J. Golod, I. R. G. Gómez, C. Grau, A. Grybauskas, G. Franc, R. Hammerschmidt, G. L. Hartman, R. A. Henn, D. Hershman, C. Hollier, T. Isakeit, S. Isard, B. Jacobsen, D. Jardine, R. Kemerait, S. Koenning, M. Langham, D. Malvick, S. Markell, J.J. Marois, S. Monfort, D. Mueller, J. Mueller, R. Mulrooney, M. Newman, L. Osborne, G. B. Padgett, B. E. Ruden, J. Rupe, R. Schneider, H. Schwartz, G. Shaner, S. Singh, E. Stromberg, L. Sweets, A. Tenuta, S. Vaiciunas, X. B. Yang, H. Young-Kelly, and J. Zidek. 2014. A Coordinated Effort to Manage Soybean Rust in North America: A Success Story in Soybean Disease Monitoring. *Plant Disease* 98:864-875.

- Sinha, A., and H. Reyes. 2009. Evaluation of Fungicides for the management of Asian soybean rust. *In: Review. A compilation of CARDI research papers.* 8:14-21.
- Steel, R. G. D., J. H., Torrie, and D. A. Dickey. 1997. Principles and procedures of statistics a biometric approach. 3rd ed. McGraw-Hill Series in probability and statistics. 666 p.
- Terán-Vargas, A. P., G. L. Ascencio, M. N. Maldonado y J. V. Ávila. 2007. La roya asiática de la soya en México. Folleto Técnico No. 22. Campo Experimental Sur de Tamaulipas, CIRNE-INIFAP. Altamira, Tam., México. 53 p.
- Terán-Vargas, A. P., P. Vega-Aquino, y J. Zambrano-Gutiérrez. 2010. Efecto de Quilt (azoxystrobin+propiconazole) sobre el vigor y rendimiento de la soya. Memorias XII Congreso Internacional / XXXVII Nacional de Fitopatología. Mérida, Yucatán, México.
- Urosa, R. A., J. Ascencio. 1993. Arquitectura y caracterización fisiológica de la cobertura de plantas de soya *Glycine max* L. Merr. var Júpiter en condiciones de campo. *Agronomía Tropical.* 43: 145-172.

## **CAPITULO 2. OCURRENCIA DE LA ROYA ASIÁTICA DE LA SOYA Y SU RELACIÓN CON EL MICROCLIMA EN EL SUR DE TAMAULIPAS**

### **RESUMEN**

El Sur de Tamaulipas es la principal zona productora de soya en México. A partir de la detección de la roya asiática de la soya en 2005 la enfermedad ha sido observada en el ciclo de cultivo de Primavera-Verano, lo que implica un riesgo latente para la producción de esta leguminosa. Actualmente no se han desarrollado modelos de riesgo de ocurrencia de la roya asiática para esta región y se desconoce el momento en que pueda ocurrir. Con datos climáticos de 21 experimentos establecidos en el Sur de Tamaulipas durante los ciclos Primavera - Verano 2012 y 2013, se estimó la probabilidad de infección diaria con el modelo genérico de infección de NAPPFASST desarrollado por Magarey en 2005. Se propone también un nuevo modelo de riesgo para la identificación de días favorables o no favorables para la ocurrencia de la roya asiática, basado en una función lineal discriminante. Los resultados del modelo genérico de infección fueron acertados en la mayoría de los casos (90.5 %). El modelo discriminante, predijo la ocurrencia de enfermedad en 17 de 21 casos.

**Palabras claves:** Infección, modelo de riesgo, modelo lineal discriminante.

### **ABSTRACT**

Southern Tamaulipas is the major soybean producing area in Mexico. Since the detection of soybean rust in 2005 the disease has been observed during the summer-cropping cycle. No disease risk models have been developed for soybean rust in Southern Tamaulipas. Based on climate data from 21 experiments established in southern Tamaulipas during Spring - Summer cropping cycles of 2012 and 2013, daily infection risk was estimated using the generic infection model of NAPPFASST (Magarey, 2005). A linear discriminant model also was proposed for predicting favorable or not favorable days for occurrence of soybean rust. The generic infection model was successful in most cases (90.5 %). The linear discriminant model predicted disease in 17 out of 21 cases.

**Keywords:** Infection model, linear discriminant model.

## 2.1 Introducción

La roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi* Sydow & P. Sydow) fue detectada por primera vez en el Sur de Tamaulipas en el 2005. Esta región es considerada la principal zona productora de la leguminosa en México (Terán-Vargas *et al.*, 2007). A partir de entonces ha sido detectada en el cultivo de soya, lo que pone en riesgo su producción, ya que las pérdidas reportadas en otras regiones del mundo son mayores al 80% (Garcés-Fiallos y Forcelini, 2011; Sikora *et al.*, 2014).

En un intento para identificar condiciones favorables para la ocurrencia y desarrollo de la roya asiática en el Sur de Tamaulipas, en 2007 investigadores del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) determinaron con base en datos climáticos históricos de temperatura que el periodo menos favorable para la ocurrencia de la roya asiática de la soya en el Sur de Tamaulipas es a partir de junio a septiembre y que a partir de octubre las condiciones ambientales son más favorables para su desarrollo (Terán-Vargas *et al.*, 2007). Sin embargo, debido a que el patógeno puede ocurrir en un amplio rango y combinación de condiciones ambientales y a que en esta región se ha detectado sobreviviendo en plantas hospederas fuera del ciclo de cultivo, el riesgo de pérdidas severas en el rendimiento es latente (Cárcamo-Rodríguez *et al.*, 2013).

La escasa información sobre el efecto del microclima en la ocurrencia de la roya asiática en el Sur de Tamaulipas hace necesario identificar los principales factores climáticos involucrados en el desarrollo de la enfermedad con datos de campo para esta región. En este trabajo se evaluaron las condiciones microclimáticas del cultivo en 21 campos de cultivo y se evaluó la capacidad predictiva del modelo genérico de infección de NAPPFAS (Plant Pest Forecasting System) desarrollado por Magarey *et al.* (2005) y de un modelo lineal discriminante generado a partir de datos de campo en el Sur de Tamaulipas.

## 2.2 Materiales y métodos

### 2.2.1 Seguimiento del microclima

Durante dos años fueron evaluados 21 campos de cultivo, en 11 localidades, establecidos durante el ciclo Primavera – Verano en el Sur de Tamaulipas. En 2012 se establecieron 12 parcelas de 1 ha cada una, con las variedades utilizadas regionalmente, las cuales son consideradas susceptibles a la roya asiática de la soya (Cuadro 2.1). En la parte central de cada parcela se colocó una microestación meteorológica automatizada Watch Dog de Spectrum Technologies® conectada a un micrologger. Las variables registradas fueron temperatura del aire, humedad foliar y humedad relativa, a intervalos de 5 minutos, y precipitación. Al inicio del cultivo, cada estación fue ubicada inmediatamente arriba del dosel vegetal y conforme el cultivo incrementó su follaje, se mantuvo al interior de este en la parte media del este (Figura 2.1). En todos los experimentos, la densidad de siembra, labores culturales y control de plagas se realizaron con base en lo recomendado por el INIFAP. En ninguno de los predios se realizó control químico contra la enfermedad, para propiciar la infección natural de *P. pachyrhizi*. En cada evaluación se tomaron al azar nueve muestras de tres plantas con competencia completa (Figura 2.1). Los primeros signos del patógeno se detectaron con la ayuda de una lupa de 40X. Los hallazgos fueron confirmados mediante un microscopio compuesto (Marca Motic, modelo DMB1-223) y las claves de Cummins e Hiratsuka (2003) y Ono *et al.*, (1992), así como mediante tiras inmunocromatográficas QuickStix (Envirologix™) específicas para este patógeno. Se registró la fecha de detección positiva a roya asiática.

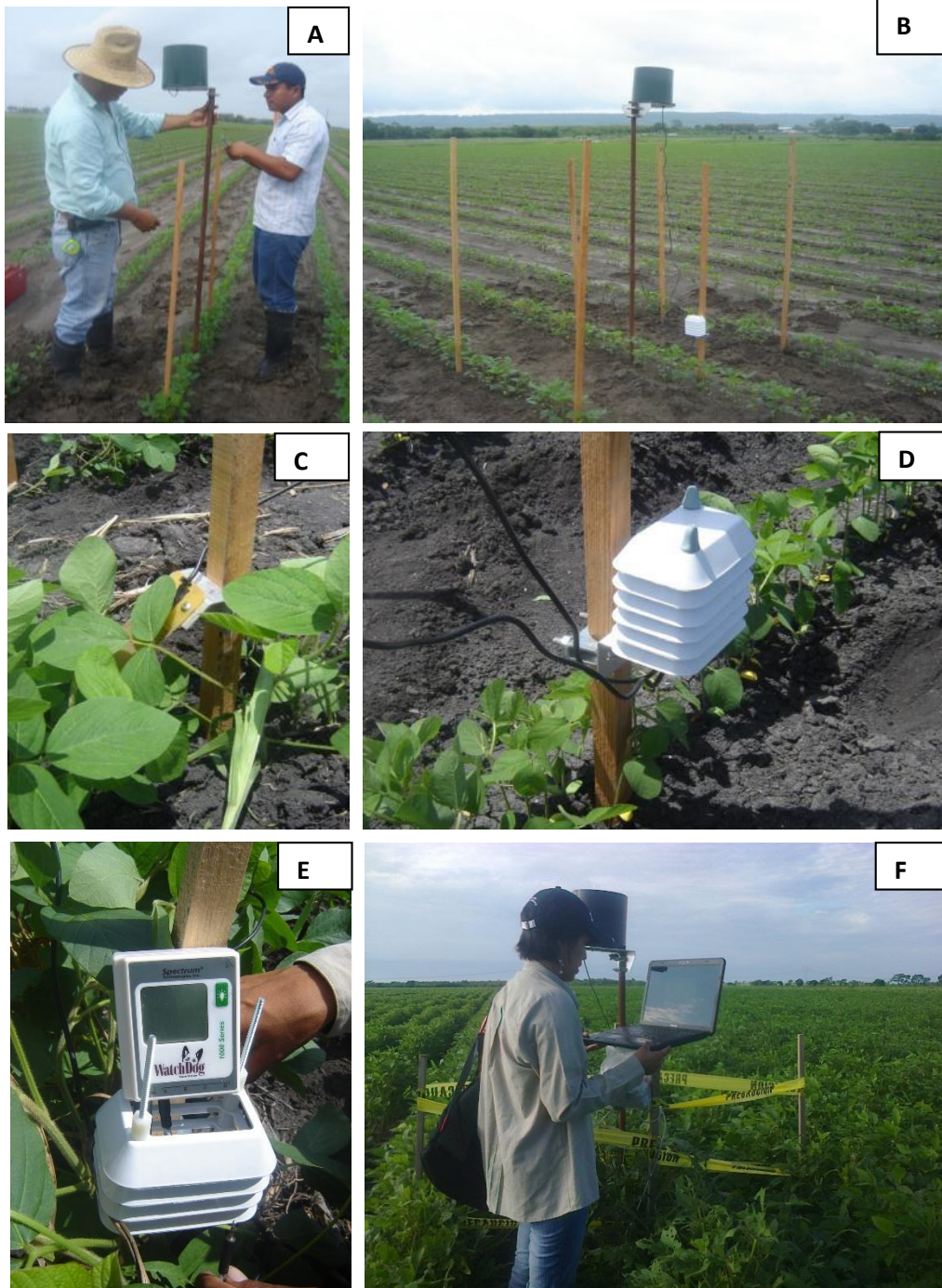
En 2013 se establecieron nueve parcelas ubicadas en los mismos predios establecidos en el 2012, cuando esto no fue posible se establecieron en un predio cercano. La evaluación del microclima y de la ocurrencia de la enfermedad se realizó de la misma manera descrita para los experimentos llevados a cabo en el 2012 (Cuadro 2.1).

**Cuadro 2.1** Localización y datos generales de las parcelas evaluadas para la ocurrencia de la roya asiática de la soya en los ciclos Primavera-Verano de 2012 y 2013 en el sur de Tamaulipas.

Predio	Fecha de siembra (DJ)	Coordenadas		Variedad	Positivo a roya (DJ)
<b>2012</b>					
Cedros	190	N 22°31.174'	W 98°10.147'	H200	296
Cervantes	186	N 22°26.744'	W 98°03.693'	H400	296
Felipe	206	N 22°32.896'	W 98°14.141'	H200	304
C.E. Las Huastecas	216	N 22°34.087'	W 98°09.999'	H400	314
José María Morelos	185	N 22°31.508'	W 98°05.253'	H400	272
Tres de Mayo	176	N 22° 24.976'	W 98° 02.90 '	H400	ND
Gertrudis	210	N 22°37.507'	W 98°12.463'	H400	ND
C.E. Las Huastecas (lote 2)	182	N 22°34.292'	W 98° 10.262'	H200	ND
Margaritas	179	N 22°35.795'	W 98°03.069'	H400	ND
Mata de Labra	188	N 22°27.417'	W 98°07.365'	H100	ND
Resolana	191	N22°34.545'	W 98°00.117'	H200	ND
Venado	191	N 22°37.219'	W 97°57.978'	H300	ND
<b>2013</b>					
El 30	180	N 22° 30.668	W 98° 09.968	H200	275
Cervantes	178	N 22° 26.789	W 98° 03.724	H 400	275
San Felipe	178	N 22° 32.914	W 98° 14.057	H 400	280
C.E. Las Huastecas	200	N 22° 34.078	W 98° 10.461	H 200	281
José María Morelos	179	N 22° 31.504	W 98° 05.247	H 400	276
Tres de Mayo	176	N 22° 24.940	W 98° 02.911	H 400	289
C.E. Las Huastecas	176	N 22° 34.283	W 98° 10.269	H 200	282
Mata del Abra	178	N 22° 27.414	W 98° 07.354	H 400	289
La Estrella	199	N 22° 37.313	W 97° 57.972	H 400	289

DJ= Día juliano ND=no detectada.





**Figura 2.1** Seguimiento del microclima en parcelas establecidas con soya en el sur de Tamaulipas. a - b) Instalación de las microestaciones WatchDog durante el ciclo 2012 y 2013; c) Sensor de humedad foliar; d - e) Registro de las variables temperatura del aire, humedad foliar, humedad relativa y precipitación mediante un micrologger colocada en cada predio. f) Descarga de la información registrada en cada micrologger.

### 2.2.3 Modelo genérico de infección

El modelo genérico de infección está basado en la duración de la humedad de la hoja y la temperatura. Es genérico en el sentido de que fue desarrollado para describir cualquier patosistema cuando se proporcionan los parámetros apropiados. Este modelo asume condiciones de concentraciones de inóculo ilimitadas e incorpora una función para el requerimiento de la duración de la humedad denotada como  $W(T)$ , y de la temperatura ( $T$ ). Los límites de  $W(T)$  son ajustados en  $W_{\max}$  y  $W_{\min}$ .

Otros parámetros en el modelo son  $T_{\min}$ ,  $T_{\text{opt}}$  y  $T_{\max}$ , los cuales denotan la temperatura mínima, óptima y máxima para la infección, respectivamente. Para patógenos que requieren alta humedad relativa, la humedad puede ser definida como el número de horas con humedades relativas mayores al umbral. El modelo utiliza la función de respuesta de la temperatura propuesta por Yin *et al.* (1995):

$$f(T) = \left( \frac{T_{\max} - T}{T_{\max} - T_{\text{opt}}} \right) \left( \frac{T - T_{\min}}{T_{\text{opt}} - T_{\min}} \right)^{(T_{\text{opt}} - T_{\min}) / (T_{\max} - T_{\text{opt}})}$$

La probabilidad toma valores de 0 a 1, así,  $f(T)=0$  cuando  $T=T_{\min}$  y  $T=T_{\max}$ , y  $f(T)=1$ , cuando  $T=T_{\text{opt}}$ .

El modelo genérico de infección completo incorpora la función para el requerimiento de la duración de la humedad y la función de respuesta a las temperaturas descritas anteriormente, y es definido como:

$$I = W f(T) / W_{\min} \geq W / W_{\max}$$

Donde  $I$ =Riesgo de infección en escala de 0 a 4.

Con los datos de las 21 parcelas de observación se evaluó el modelo genérico de infección de NAPPFAST propuesto por Magarey *et al.* (2005). Los valores de los parámetros introducidos al modelo fueron los reportados como adecuados para favorecer la infección por *P. pachyrhizi*. (Magarey *et al.*, 2005):

$T_{\min}$ : 10 °C

$T_{\max}$ : 28 °C

$T_{\text{opt}}$ : 23 °C

$W_{\min}$ : 6 horas

$W_{\max}$ : 24 horas

Se propuso la siguiente clasificación de la escala de probabilidad:

Días con valor 0 : No favorable

Día con valor  $>0$  y  $< 1$  : Poco favorable

Día con valor igual a 1 y  $< 2$  : Moderadamente favorable

Día con valor igual a 2 y  $< 3$  : Favorable

Día con valor igual a 3 y  $\leq 4$  : Muy Favorable

Al menos tres días consecutivos con probabilidades  $\geq 1$  (moderadamente favorable a muy favorable) fueron considerados propicios para el proceso de infección de *P. pachyrhizi*. Y al menos un día con probabilidad  $\geq 1$  (muy favorable).

Los cálculos se hicieron en Excel 2013 mediante el modelo genérico de infección disponible en <http://www.nappfast.org/>.

#### **2.2.4 Modelo linear discriminante**

Con las variables de temperatura, humedad relativa, humedad foliar y precipitación se obtuvieron 169 variables para cada día de evaluación (Cuadro 2). Los datos de campo fueron preclasificados como favorables cuando tuvieron al menos seis horas continuas de humedad foliar y temperaturas entre 15 y 28 °C sin que se

presentaran temperaturas  $\geq 32$  °C, según lo reportado en la literatura como condiciones favorables para el proceso de infección del patógeno (Twizeyimana y Hartman, 2010; Bonde *et al.*, 2012; Del Ponte *et al.*, 2006). A partir de esas 169 variables se seleccionaron las que mejor contribuyeron a diferenciar entre días favorables y no favorables para la ocurrencia de la roya asiática de la soya en la región Huasteca y se calculó una función lineal discriminante.

El modelo asume lo siguiente:

- El inóculo es ilimitado bajo condiciones de campo.
- Los cultivares regionales son susceptibles a la enfermedad.
- Las mediciones obtenidas con los sensores a nivel del dosel vegetal son representativas del microclima de todo el campo de cultivo.

El proceso de selección de variables indicó que las variables reportadas en el cuadro 2.3 contribuyeron mejor a discriminar entre días favorables y no favorables para la ocurrencia de la roya asiática de la soya. Con estas variables se calcularon las funciones lineales discriminantes y se determinaron los porcentajes de acierto en la clasificación de días favorables y no favorables de la enfermedad (Cuadro 2.4). El porcentaje de clasificaciones correctas para los días considerados no favorables fue de 97.8 y de 75.7 para los días considerados favorables (Cuadro 2.5).

## **2.3 Resultados**

Durante 2012, la enfermedad fue detectada en cinco de 12 predios, las detecciones ocurrieron cuando el cultivo se encontró en etapas reproductivas. Durante 2013 la enfermedad fue detectada en todos los predios en etapas reproductivas.

### **2.3.1 Predicción del modelo genérico de infección**

#### **2.3.1.1 Año 2012**

El riesgo de infección en el predio Cedros fue  $\leq 1$  al inicio del ciclo de cultivo, con un periodo no favorable del DJ 240 al 252, a partir de entonces se presentó un alto nivel de riesgo el DJ 267, con un valor  $>3$ ; los 4 días subsecuentes también fueron favorables.

**Cuadro 2.2** Variables derivadas utilizadas en el análisis discriminante.

Variable	Descripción
HFM	Humedad foliar media diaria
TM	Temperatura media diaria
HRM	Humedad relativa media diaria
HFMIN	Humedad foliar mínima diaria
TMIN	Temperatura mínima diaria
HRMIN	Humedad relativa mínima diaria
PMAX	Precipitación máxima diaria
HFMAX	Humedad foliar máxima diaria
TMAX	Temperatura máxima diaria
HRMAX	Humedad relativa máxima diaria
RP	Rango de precipitación diario
RHF	Rango de humedad foliar diario
RT	Rango de temperatura diario
RHR	Rango de humedad relativa diario
PAD	Precipitación acumulada diaria
PA0	Número de horas sin lluvia al día
PA10	Número de horas con con precipitaciones $>0$ mm y $\leq 10$ mm
PA20	Número de horas con con precipitaciones $>10$ mm y $\leq 20$ mm
PA30	Número de horas con con precipitaciones $>20$ mm y $\leq 30$ mm
PA40	Número de horas con con precipitaciones $>30$ mm y $\leq 40$ mm
PA50	Número de horas con con precipitaciones $>40$ mm y $\leq 50$ mm
PA60	Número de horas con con precipitaciones $>50$ mm y $\leq 60$ mm
PA70	Número de horas con con precipitaciones $>60$ mm y $\leq 70$ mm
EVENTOS	Número de eventos con lluvia al día
T15	Número de horas con temperaturas de $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$
T20	Número de horas con temperaturas de $> 17.5^{\circ}\text{C} \leq 22.5^{\circ}\text{C}$
T25	Número de horas con temperaturas de $> 22.5^{\circ}\text{C} \leq 27.5^{\circ}\text{C}$
T30	Número de horas con temperaturas de $> 27.5^{\circ}\text{C} \leq 32.5^{\circ}\text{C}$
T35	Número de horas con temperaturas de $> 32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$
T40	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$
T45	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$
HF0	Número de horas sin humedad en la hoja
HF2_5	Número de horas con humedad foliar $> 0$ y $\leq 5$
HF7_5	Número de horas con humedad foliar $> 5$ y $\leq 10$
HF12_5	Número de horas con humedad foliar $> 10$ y $\leq 15$

**Cuadro 2.2** *Continuación*

Variable	Descripción
HR25	Número de horas con humedad relativa $\geq 20$ y $\leq 30$
HR35	Número de horas con humedad relativa $> 30$ y $\leq 40$
HR45	Número de horas con humedad relativa $> 40$ y $\leq 50$
HR55	Número de horas con humedad relativa $> 50$ y $\leq 60$
HR65	Número de horas con humedad relativa $> 60$ y $\leq 70$
HR75	Número de horas con humedad relativa $> 70$ y $\leq 80$
HR85	Número de horas con humedad relativa $> 80$ y $\leq 90$
HR95	Número de horas con humedad relativa $> 90$ y $\leq 100$
T15HF2_5	Número de horas con temperaturas $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 0$ y $\leq 5$
T15HF7_5	Número de horas con temperaturas $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 5$ y $\leq 10$
T15HF12_5	Número de horas con temperaturas $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 10$ y $\leq 15$
T20HF2_5	Número de horas con temperaturas $>17.5^{\circ}\text{C} \leq 22.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 0$ y $\leq 5$
T20HF7_5	Número de horas con temperaturas $>17.5^{\circ}\text{C} \leq 22.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 5$ y $\leq 10$
T20HF12_5	Número de horas con temperaturas $>17.5^{\circ}\text{C} \leq 22.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 10$ y $\leq 15$
T25HF2_5	Número de horas con temperaturas $>22.5^{\circ}\text{C} \leq 27.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 0$ y $\leq 5$
T25HF7_5	Número de horas con temperaturas $>22.5^{\circ}\text{C} \leq 27.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 5$ y $\leq 10$
T25HF12_5	Número de horas con temperaturas $>22.5^{\circ}\text{C} \leq 27.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 10$ y $\leq 15$
T30HF2_5	Número de horas con temperaturas $>27.5^{\circ}\text{C} \leq 32.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 0$ y $\leq 5$
T30HF7_5	Número de horas con temperaturas $>27.5^{\circ}\text{C} \leq 32.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 5$ y $\leq 10$
T30HF12_5	Número de horas con temperaturas $>27.5^{\circ}\text{C} \leq 32.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 10$ y $\leq 15$
T35HF2_5	Número de horas con temperaturas $>32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 0$ y $\leq 5$
T35HF7_5	Número de horas con temperaturas $>32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 5$ y $\leq 10$
T35HF12_5	Número de horas con temperaturas $>32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 10$ y $\leq 15$
T40HF2_5	Número de horas con temperaturas $>37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 0$ y $\leq 5$
T40HF7_5	Número de horas con temperaturas $>37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 5$ y $\leq 10$
T40HF12_5	Número de horas con temperaturas $>37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 10$ y $\leq 15$
T45HF2_5	Número de horas con temperaturas $>42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 0$ y $\leq 5$
T45HF7_5	Número de horas con temperaturas $>42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 5$ y $\leq 10$
T45HF12_5	Número de horas con temperaturas $>42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad foliar $> 10$ y $\leq 15$
T15PA10	Número de horas con temperaturas de $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones $>0$ mm y $\leq 10$ mm
T15PA20	Número de horas con temperaturas de $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones $>10$ mm y $\leq 20$ mm
T15PA30	Número de horas con temperaturas de $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones $>20$ mm y $\leq 30$ mm
T15PA40	Número de horas con temperaturas de $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones $>30$ mm y $\leq 40$ mm
T15PA50	Número de horas con temperaturas de $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones $>40$ mm y $\leq 50$ mm
T15PA60	Número de horas con temperaturas de $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones $>50$ mm y $\leq 60$ mm
T15PA70	Número de horas con temperaturas de $12.5^{\circ}\text{C} \leq 17.5^{\circ}\text{C}$ y precipitaciones $>60$ mm y $\leq 70$ mm







**Cuadro 2.2 Continuación**

Variable	Descripción
T35HR35	Número de horas con temperaturas de $> 32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 30$ y $\leq 40$
T35HR45	Número de horas con temperaturas de $> 32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 40$ y $\leq 50$
T35HR55	Número de horas con temperaturas de $> 32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 50$ y $\leq 60$
T35HR65	Número de horas con temperaturas de $> 32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 60$ y $\leq 70$
T35HR75	Número de horas con temperaturas de $> 32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 70$ y $\leq 80$
T35HR85	Número de horas con temperaturas de $> 32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 80$ y $\leq 90$
T35HR95	Número de horas con temperaturas de $> 32.5^{\circ}\text{C} \leq 37.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 90$ y $\leq 100$
T40HR25	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $\geq 20$ y $\leq 30$
T40HR35	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 30$ y $\leq 40$
T40HR45	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 40$ y $\leq 50$
T40HR55	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 50$ y $\leq 60$
T40HR65	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 60$ y $\leq 70$
T40HR75	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 70$ y $\leq 80$
T40HR85	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 80$ y $\leq 90$
T40HR95	Número de horas con temperaturas de $> 37.5^{\circ}\text{C} \leq 42.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 90$ y $\leq 100$
T45HR25	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $\geq 20$ y $\leq 30$
T45HR35	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 30$ y $\leq 40$
T45HR45	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 40$ y $\leq 50$
T45HR55	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 50$ y $\leq 60$
T45HR65	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 60$ y $\leq 70$
T45HR75	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 70$ y $\leq 80$
T45HR85	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 80$ y $\leq 90$
T45HR95	Número de horas con temperaturas de $> 42.5^{\circ}\text{C} \leq 47.5^{\circ}\text{C}$ y humedad relativa $> 90$ y $\leq 100$

para el patógeno. Posteriormente el nivel de riesgo disminuyó con valores  $< 1.58$ . El periodo probable de infección según el modelo fue del DJ 267 al 272, lo que corresponde a 24 días previos de la detección de síntomas. Ningún periodo favorable se detectó posteriormente (Figura 2.2 a).

En el predio Cervantes, el riesgo de infección fue  $\leq 1$  al inicio del ciclo de cultivo y hasta el DJ 256. En los subsecuentes días se incrementó pero sin alcanzar un alto nivel, hasta el DJ 265 al 267 donde tres días consecutivos tuvieron un valor  $> 1$ , considerado favorable para el inicio de la infección, 24 días previos a la detección a nivel de campo de la enfermedad. Ningún periodo favorable se detectó posteriormente (Figura 2.2b).

**Cuadro 2.3** Variables seleccionadas mediante análisis discriminante.

Variable	R- cuadrado parcial	Valor- F	Pr > F
Humedad foliar media diaria	0.0104	16.75	<.0001
Temperatura máxima diaria	0.0759	131.54	<.0001
Humedad relativa máxima diaria	0.0134	21.79	<.0001
Rango de humedad foliar	0.0163	26.59	<.0001
Número de horas con precipitación igual a 0 mm	0.0102	16.46	<.0001
Número de horas con precipitación >0 mm y ≤ 10 mm	0.0151	24.56	<.0001
Número de horas con temperatura de > 17.5°C ≤ 22.5°C	0.0034	5.53	0.0189
Número de horas con temperaturas de > 32.5°C ≤ 37.5°C	0.0076	12.28	0.0005
Número de horas con temperaturas de > 37.5°C ≤ 42.5°C	0.0289	47.73	<.0001
Número de horas con humedad foliar media diaria > 10 y ≤ 15	0.0058	9.27	0.0024
Número de horas con humedad relativa > 60 y ≤ 70	0.0026	4.2	0.0405
Número de horas con humedad relativa > 70 y ≤ 80	0.0109	17.61	<.0001
Número de horas con humedad relativa > 80 y ≤ 90	0.0141	22.92	<.0001
Número de horas con temperaturas >22.5°C ≤ 27.5°C y humedad foliar > 5 y ≤ 10	0.0137	22.27	<.0001
Número de horas con temperaturas >32.5°C ≤ 37.5°C y humedad foliar > 0 y ≤ 5	0.0087	14.05	0.0002
Número de horas con temperaturas >32.5°C ≤ 37.5°C y humedad foliar > 5 y ≤ 10	0.0035	5.57	0.0183
Número de horas con temperaturas de > 17.5°C ≤ 22.5°C y precipitación acumulada de 30 mm.	0.0038	6.11	0.0135
Número de horas con temperaturas de > 22.5°C ≤ 27.5°C y precipitación acumulada de 30 mm.	0.0077	12.39	0.0004
Número de horas con temperaturas de > 17.5°C ≤ 22.5°C y humedad relativa > 60 y ≤ 70	0.0069	11.06	0.0009
Número de horas con temperaturas de > 22.5°C ≤ 27.5°C y humedad relativa > 80 y ≤ 90	0.0046	7.33	0.0069
Número de horas con temperaturas de > 32.5°C ≤ 37.5°C y humedad relativa > 80 y ≤ 90	0.0056	9.00	0.0027

En el predio Felipe, el riesgo de infección fue bajo (<1) hasta el DJ 255, con un periodo favorable para la infección a partir del DJ 256 al 259, lo que corresponde a 43 días previos a la detección de síntomas. Ningún periodo favorable se detectó posteriormente (Figura 2.2 c). En el predio establecido en el C.E. Las Huastecas, se observaron dos periodos favorables para la infección de *P. pachyrhizi*. El primero fue a partir del DJ 262 al 266, es decir 48 días previos a la detección de pústulas; y el segundo a partir del DJ 305 al 314 (Figura 2.2 d).

**Cuadro 2.4** Parámetros de la función lineal discriminante.

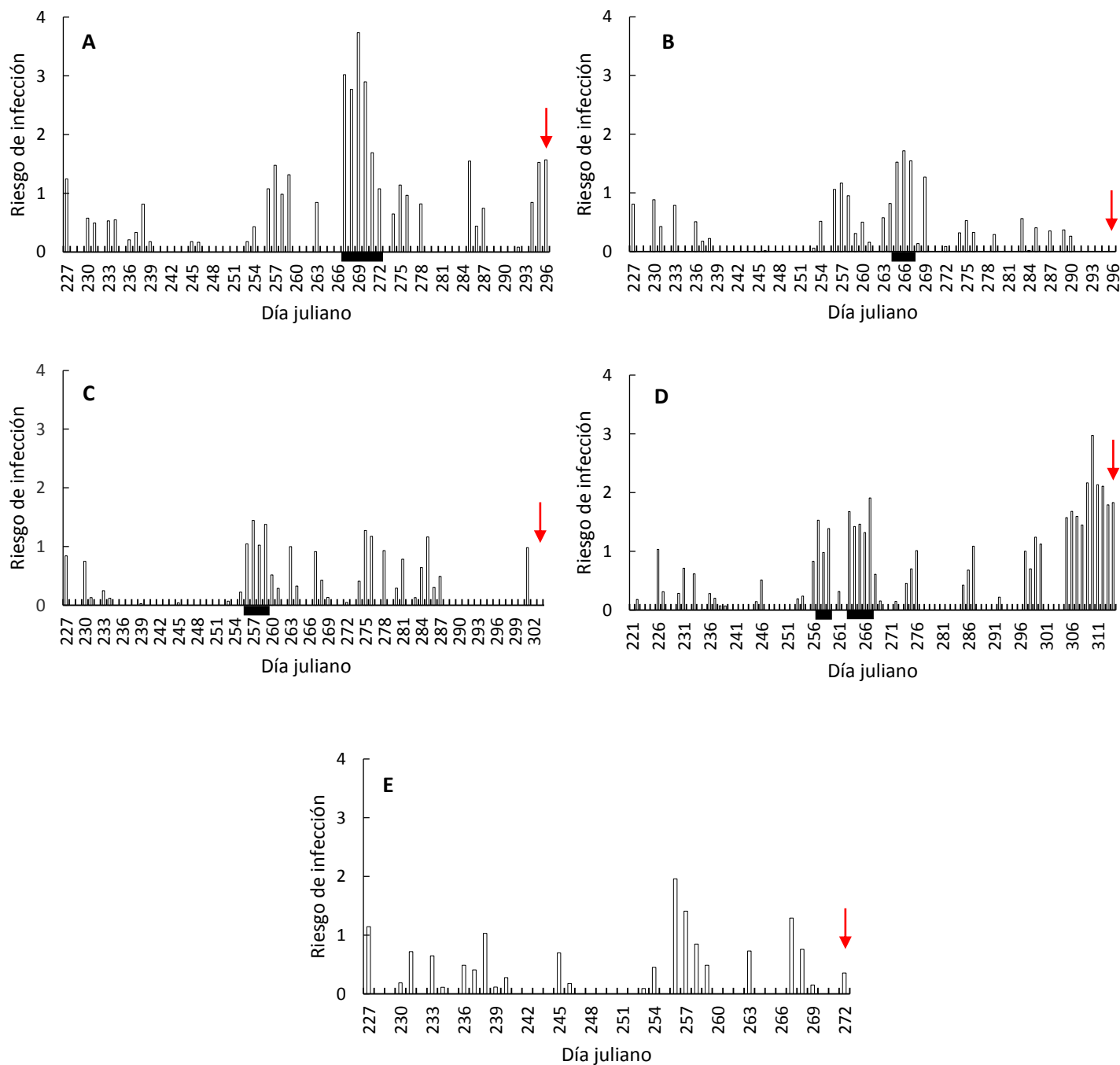
Variable	No favorable	Favorable
Constante	-2753	-2711
Humedad foliar media diaria	7.98384	8.66783
Temperatura máxima diaria	9.99772	9.05069
Humedad relativa máxima diaria	43.93359	43.55895
Rango de humedad foliar	-0.82179	-0.94054
Número de horas con precipitación igual a 0 mm	40.61327	41.28737
Número de horas con precipitación >0 mm y ≤ 10 mm	49.84388	50.73223
Número de horas con temperatura de > 17.5°C ≤ 22.5°C	0.70844	0.62687
Número de horas con temperaturas de > 32.5°C ≤ 37.5°C	-8.97761	-8.70878
Número de horas con temperaturas de > 37.5°C ≤ 42.5°C	-11.07875	-9.83074
Número de horas con humedad foliar media diaria > 10 y ≤ 15	-3.76071	-3.51119
Número de horas con humedad relativa > 60 y ≤ 70	-1.35063	-1.49148
Número de horas con humedad relativa > 70 y ≤ 80	2.42307	2.14743
Número de horas con humedad relativa > 80 y ≤ 90	-14.06373	-13.7906
Número de horas con temperaturas >22.5°C ≤ 27.5°C y humedad foliar > 5 y ≤ 10	0.50057	0.17499
Número de horas con temperaturas >32.5°C ≤ 37.5°C y humedad foliar > 0 y ≤ 5	-0.00998	-0.68948
Número de horas con temperaturas >32.5°C ≤ 37.5°C y humedad foliar > 5 y ≤ 10	0.15557	-1.07081
Número de horas con temperaturas de > 17.5°C ≤ 22.5°C y precipitación acumulada de 30 mm.	45.39526	38.65658
Número de horas con temperaturas de > 22.5°C ≤ 27.5°C y precipitación acumulada de 30 mm.	82.03209	84.5452
Número de horas con temperaturas de > 17.5°C ≤ 22.5°C y humedad relativa > 60 y ≤ 70	98.87582	97.87627
Número de horas con temperaturas de > 22.5°C ≤ 27.5°C y humedad relativa > 80 y ≤ 90	6.38159	6.61635
Número de horas con temperaturas de > 32.5°C ≤ 37.5°C y humedad relativa > 80 y ≤ 90	7.70823	6.22837

**Cuadro 2.5** Porcentaje de acierto en la clasificación de días favorables y no favorables para la ocurrencia de la roya asiática de la soya.

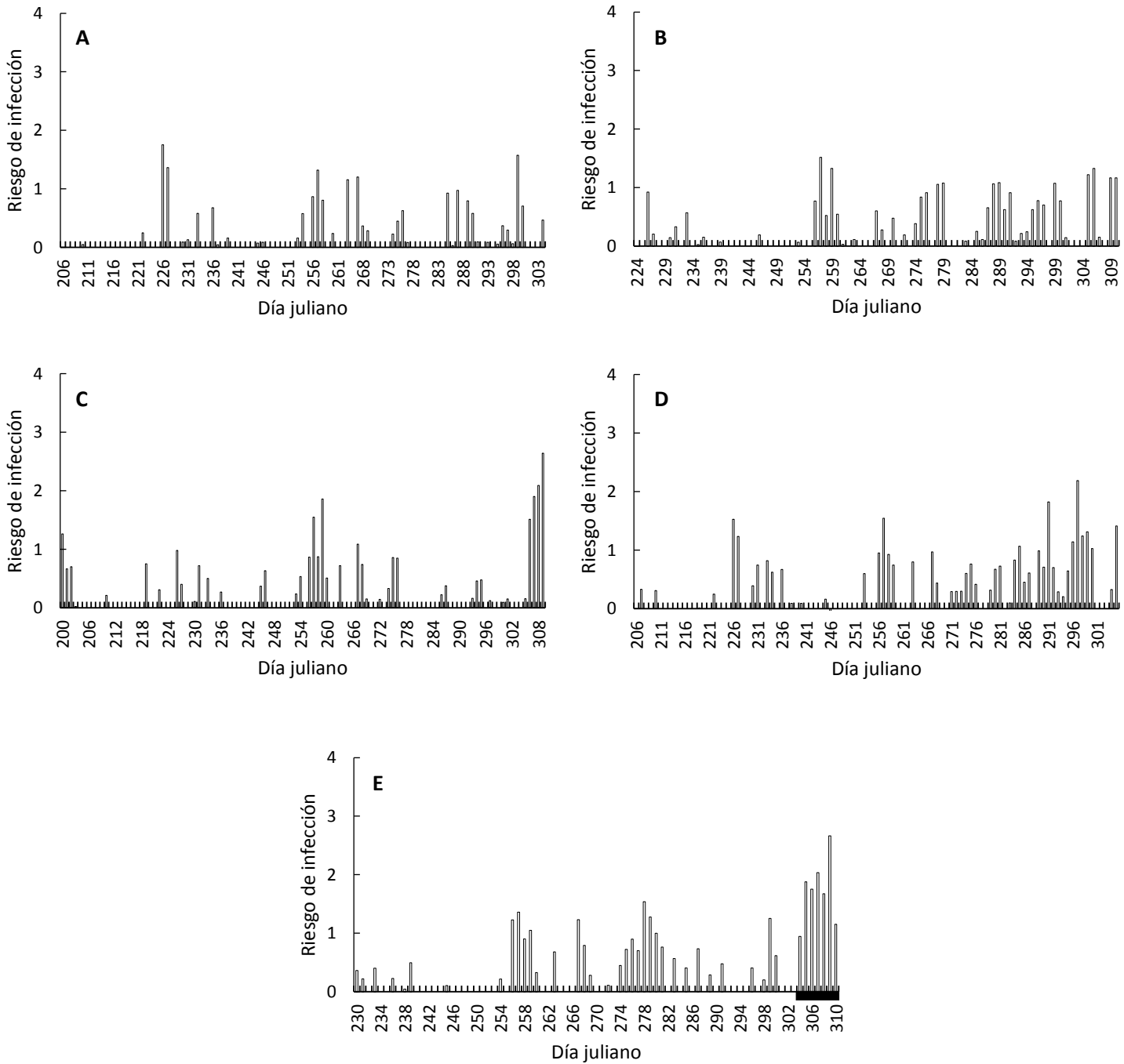
Clasificación por el modelo	Clasificación previa		
	No favorable	Favorable	Total
No favorable	1407 <b>97.84</b>	31 2.16	1438 100
Favorable	45 24.32	140 <b>75.68</b>	185 100
Total	1452 89.46	171 10.54	1623 100

En el predio José Ma. Morelos, no se cumplieron los criterios para determinar un día favorable, o un periodo favorable para la infección, sin embargo, en este predio la enfermedad fue detectada el DJ 272, por lo que probablemente el periodo de infección ocurrió entre los DJ 256 al 258, éste último día tuvo un riesgo cercano a 1 (0.85), esto puede deberse a la sensibilidad del modelo (Figura 2.2 e)

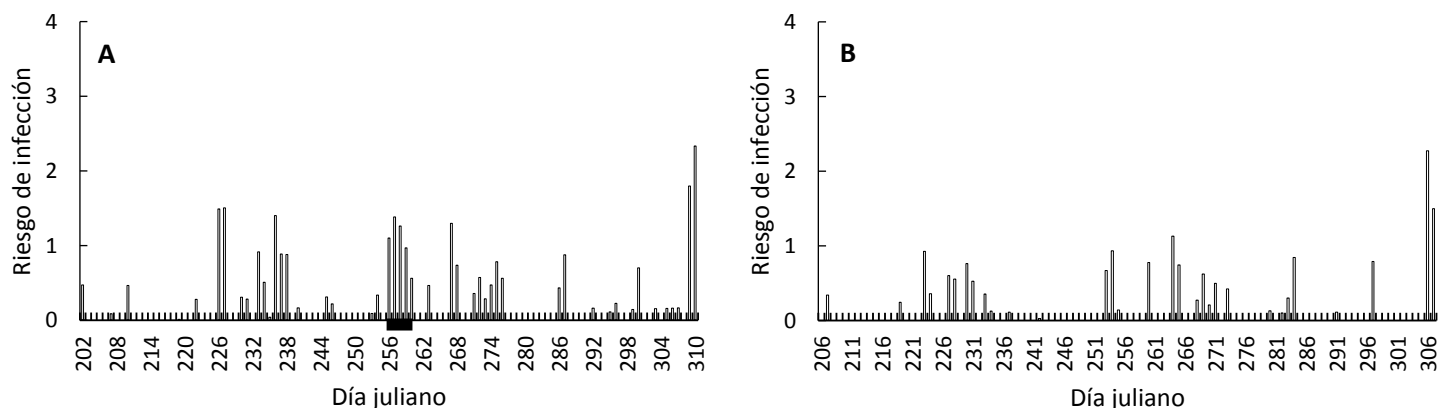
La enfermedad no fue detectada en los predios Tres de Mayo, Gertrudis, C.E. Las Huastecas (lote 2), Margaritas, Mata del Abra, Resolana y Venado. En el predio Tres de Mayo ningún día resultó favorable para la infección según las consideraciones propuestas; lo mismo ocurrió en el predio Gertrudis (Figura 2.3 a-b), mientras que en el segundo predio establecido en el C.E. Las Huastecas, se detectó un periodo favorable a partir del DJ 306 al 309, sin embargo el cultivo ya se encontraba en la etapa R8, por lo que la enfermedad probablemente no alcanzó a expresarse (Figura 2.3 c). Similarmente, en el predio Margaritas un periodo favorable fue detectado al final del ciclo de cultivo, del DJ 296 al 300, en la etapa fenológica R8, por lo que la enfermedad no fue observada (Figura 2.3 d). En el predio Mata del Abra, se presentó un periodo probable de infección del DJ 305 al 309, durante la etapa R8 por lo que los signos y síntomas no se expresaron (Figura 2.3 e). A pesar de que la enfermedad no fue detectada en el predio Resolana se presentó un periodo favorable para la infección a partir del DJ 256 al 258, 52 días previos a la detección de la enfermedad (Figura 2.4 a). En el predio Venado no se observó ningún periodo favorable para la ocurrencia de la roya asiática (Figura 2.4 b).



**Figura 2.2** Clasificación diaria del microclima (barras) para la infección de la roya asiática de la soja (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Cedros, b) Cervantes, c) Felipe, d) C.E. Las Huastecas y e) José Ma. Morelos. Escala 0-4. La flecha indica el día de la detección de la enfermedad. La línea obscura indica el periodo favorable para la infección.



**Figura 2.3** Clasificación diaria del microclima (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Tres de Mayo, b) Gertrudis, c) C.E. Las Huastecas (lote 2), d) Margaritas, e) Mata del Abra. Escala 0-4. La línea obscura indica el periodo favorable para la infección.



**Figura 2.4** Clasificación diaria del microclima (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Resolana y b) Venado. Escala 0-4. La línea oscura indica el periodo favorable para la infección.

### 2.3.1.2 Año 2013

En el predio El 30, se registró un periodo favorable de infección desde el DJ 247 al DJ 250, con niveles de riesgo de 1.16 a 3.65, 25 días previos a la detección de la enfermedad. Ningún periodo posterior fue detectado (figura 2.5 a).

En el predio Cervantes el periodo favorable fue del DJ 247 al 249, 26 días previos a la detección de pústulas. Ningún periodo favorable fue observado posteriormente (Figura 2.5 b).

En el predio Felipe, se detectaron dos periodos críticos para la infección, el primero el DJ 237 al 239, 41 días previos a la detección, y el segundo del DJ 249 al 251, 29 días previos a la detección de pústulas (Figura 2.5 c).

En el predio del C.E. Las Huastecas, se registró un periodo favorable para la ocurrencia de a roya asiática a partir del DJ 248 a 255, 26 días previos a la detección en campo (Figura 2.5 d).

En el predio José Ma. Morelos, se registraron dos periodos favorables; el primero del DJ 247 al 249, 27 días previos a la detección en campo; y el segundo periodo del DJ 254 a 257, 19 días previos a la detección de pústulas (Figura 2.5 e).

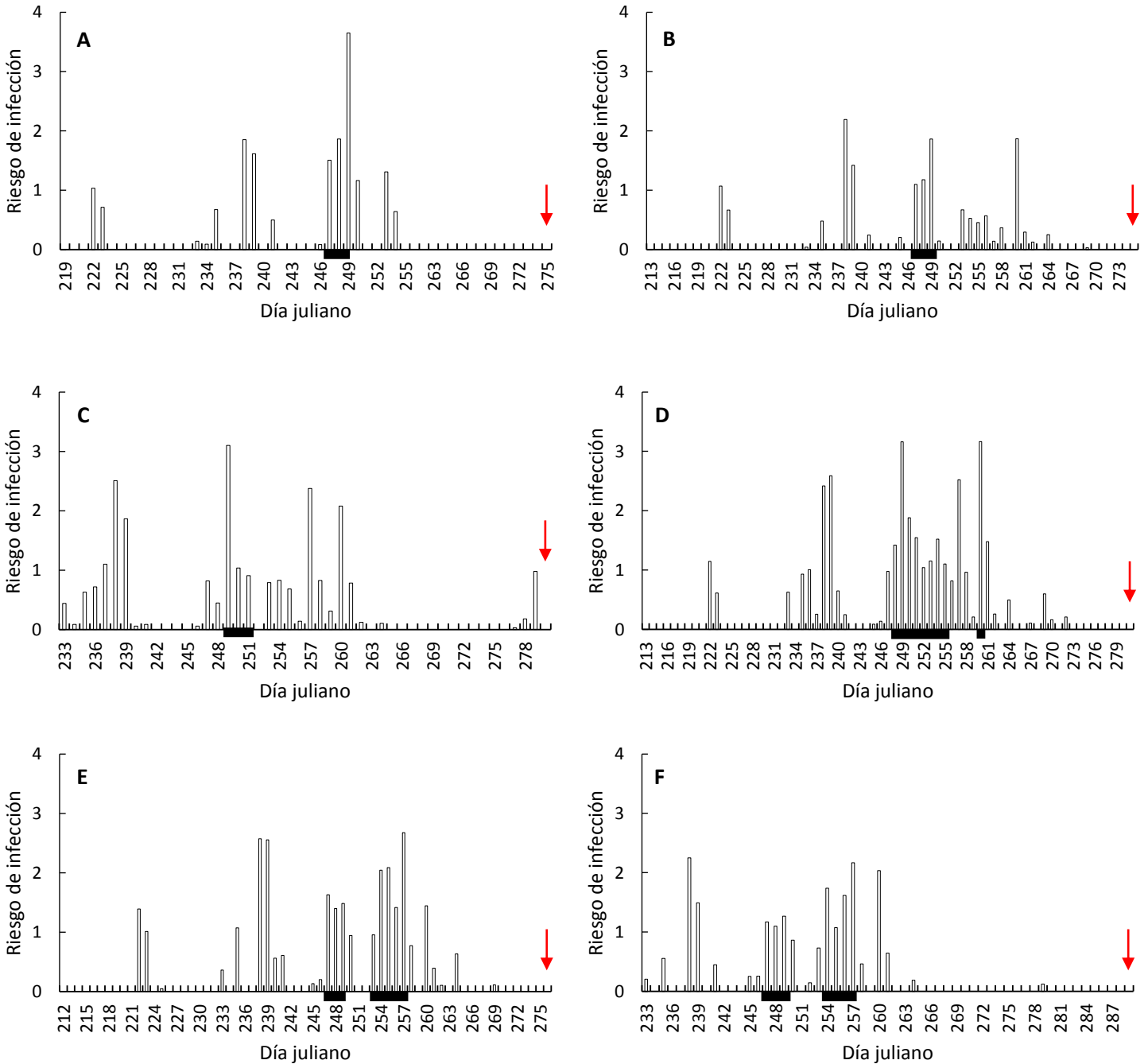
El predio Tres de Mayo presentaron dos periodos favorables para la infección, el primero del DJ 247 al 249, 40 días previos a la detección, y el segundo periodo del DJ 254 al 257, 32 días previos a la detección de la enfermedad (Figura 2.5 f).

En el segundo predio del C.E. Las Huastecas se presentaron dos periodos críticos para la infección. El primero ocurrió del DJ 247 al 250, 32 días previos a la detección. El segundo ocurrió el DJ 260, donde este día tuvo un valor de 3.69; esto ocurrió 22 días previos a la detección de la enfermedad (Figura 2.6 a).

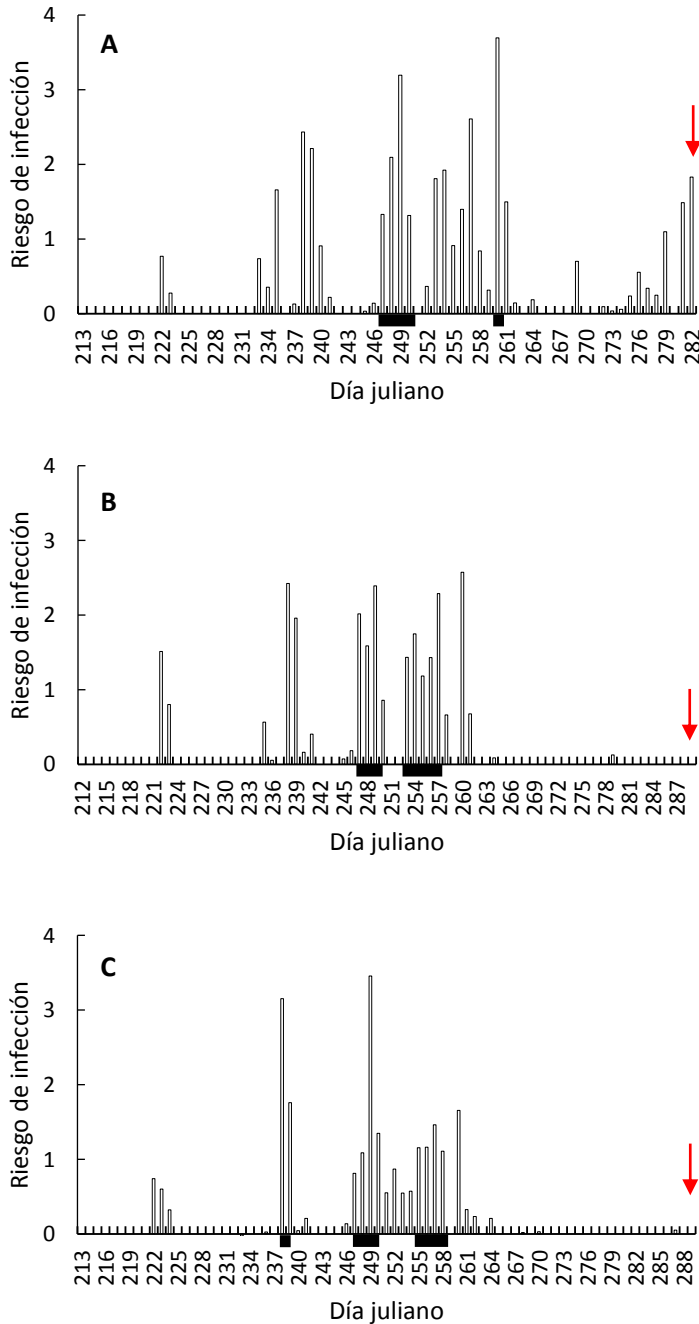
En el predio Mata del Abra se registraron dos periodos favorables para la infección, el primero ocurrió del DJ 247 al DJ 249, 40 días previos a la detección de signos. El segundo periodo fue del DJ 253 al 257, 32 días previos a la detección en campo (Figura 2.6 b).

En el predio la Estrella se registraron tres periodos favorables para la infección. El primero ocurrió el DJ 238 y tuvo un valor de probabilidad de 3.15, 51 días previos a la detección. El segundo ocurrió del DJ 248 al 250, 39 días previos a la detección. El tercer periodo se presentó del DJ 255 al 258, 34 días previos a la detección de la enfermedad (Figura 2.6 c).





**Figura 2.5** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2013 en predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) El 30, b) Cervantes, c) Felipe, d) C.E. Las Huastecas, e) José Ma. Morelos y f) Tres de Mayo. Escala de 0-4. La flecha indica el día de la detección de la enfermedad. La línea obscura indica el periodo favorable para la infección.



**Figura 2.6** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo genérico de infección de Magarey *et al.* (2005) durante el ciclo primavera-verano 2013 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) C.E. Las Huastecas (lote 2), b) Mata del Abra, c) Estrella. Escala 0-4. La flecha indica el día de la detección de la enfermedad.

## **2.3.2 Modelo lineal discriminante.**

### **2.3.2.1 Año 2012**

En el predio Cedros, 13 días fueron clasificados por el modelo como favorables para la infección con un periodo probablemente favorable del DJ 256 al DJ 259, 38 días previos a la infección, otro periodo fue detectado el DJ 267 al 272, 25 días previos a la detección de pústulas (Figura 2.7 a).

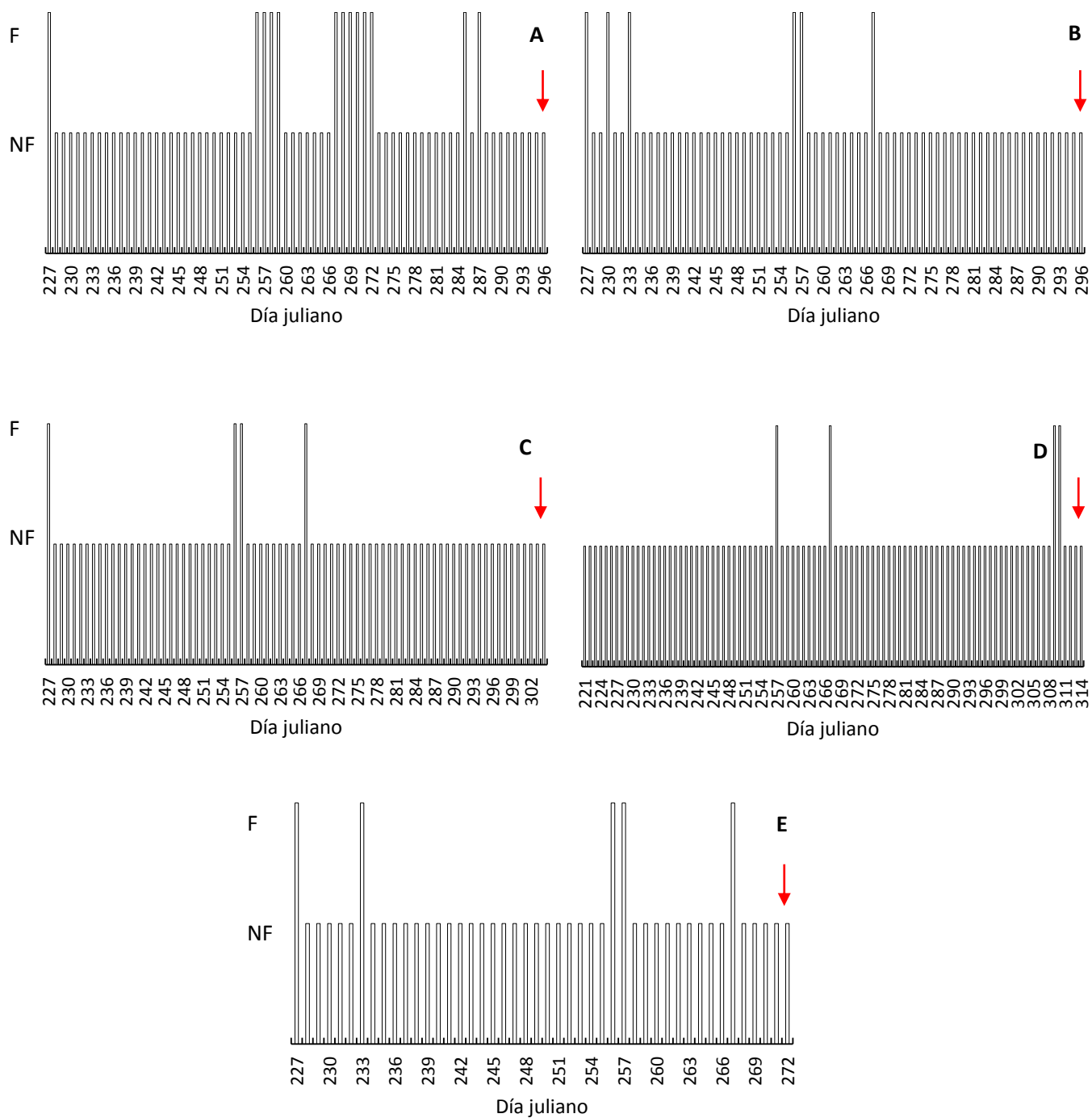
En el predio Cervantes, seis días fueron clasificados como favorables para la infección, sin embargo, la distribución de estos días a lo largo del ciclo de cultivo no permite determinar un periodo continuo favorable para la ocurrencia de la roya asiática (Figura 2.7 b).

En el predio Felipe, únicamente tres días fueron clasificados favorables, por lo que en este caso, tampoco es posible definir un periodo continuo favorable para la ocurrencia de la enfermedad (Figura 2.7 c).

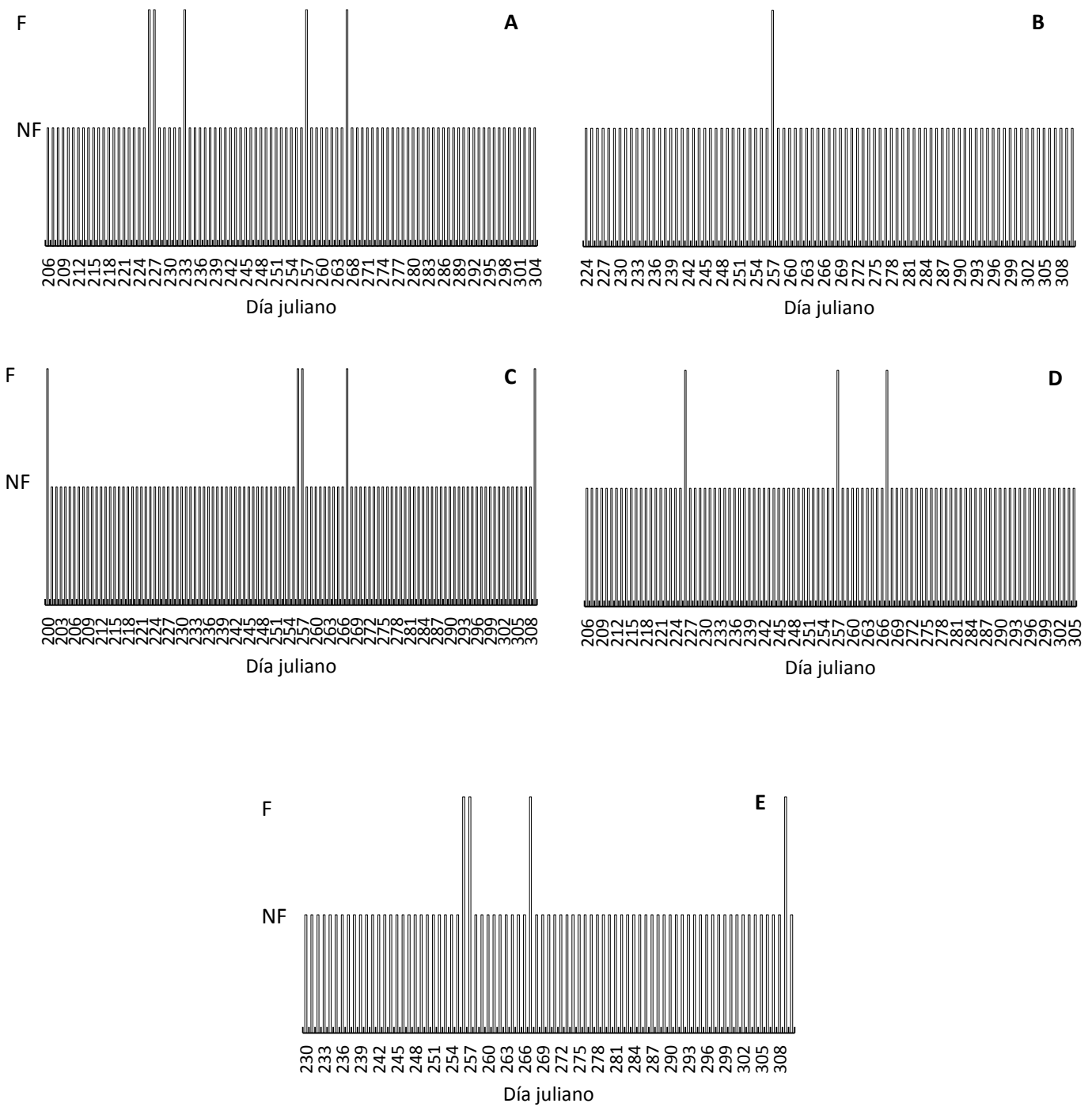
En el predio establecido en el C.E. Las Huastecas cuatro días fueron considerados favorables para la infección, sin embargo, la distribución de estos días por separado tampoco permite definir el periodo propicio para la infección (Figura 2.7 d)

En el predio José. Ma. Morelos, cinco días fueron clasificados como favorables para la ocurrencia de la enfermedad, pero al igual que en los casos anteriores, no fue posible determinar el periodo que favoreció la infección (Figura 2.7 e).

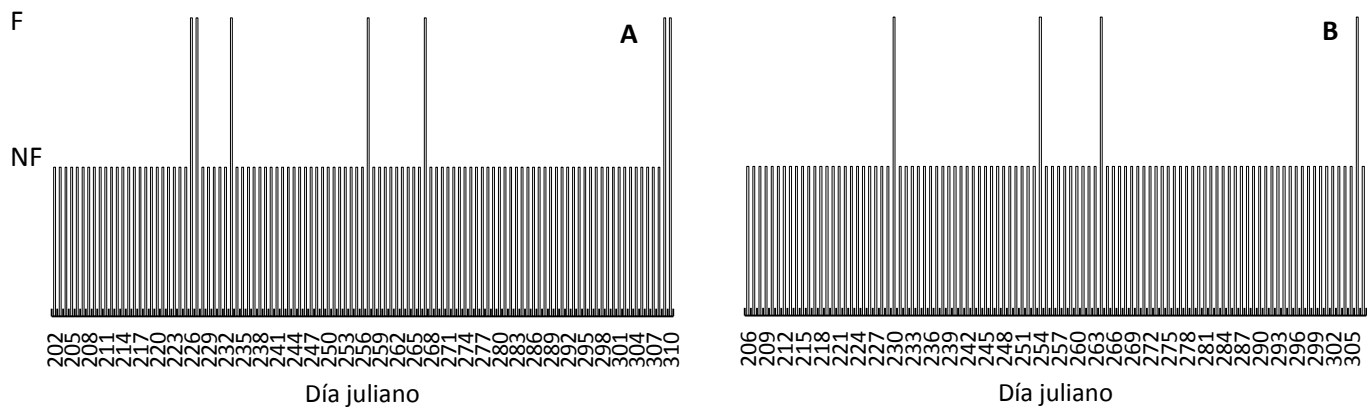
En el predio Tres de Mayo, se registraron cinco días favorables para la infección. En el predio Gertrudis se detectó únicamente un día favorable, por lo que en este caso el modelo acertó debido a que en este predio la enfermedad no fue detectada. En el segundo predio establecido en el C.E. Las Huastecas el modelo identificó cinco días favorables, en Margaritas tres, en Mata del Abra cuatro, en Resolana siete y en el predio el Venado únicamente cuatro días. En ninguno de estos predios se detectaron síntomas o signos de *P. pachyrhizi* (Figura 2.8 a-e y Figura 2.9 a-b).



**Figura 2.7** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Cedros, b) Cervantes, c) Felipe, d) C.E. Las Huastecas y e) José Ma. Morelos. La flecha indica el día de la detección de la enfermedad. F= favorable, NF=no favorable.



**Figura 2.8** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Tres de Mayo, b) Gertrudis, c) C.E. Las Huastecas, d) Margaritas, e) Mata del Abra. F= favorable, NF=no favorable.



**Figura 2.9** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2012 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) Resolana y b) Venado. F= favorable, NF=no favorable.

### 2.3.2.3 Año 2013

Durante este año el modelo permitió observar periodos favorables para la infección. En el predio El 30, seis días fueron favorables para la ocurrencia de la roya asiática, durante un período del DJ 247 al 253, 23 días previos a la detección de pústulas (Figura 2.10 a).

En el predio Cervantes 12 días fueron favorables para la infección, con un periodo propicio del DJ 247 al DJ 257, 19 días previos a la primera detección en campo (Figura 2.10 b).

En el predio Felipe siete días fueron detectados como favorables, del DJ 249 al 260, 21 días previos a la detección de la enfermedad (Figura 2.10 c).

En el predio del C.E. Las Huastecas, 12 días fueron detectados favorables, entre el DJ 248 al 261, 21 días previos a la detección de la enfermedad (Figura 2.10 d).

En el predio José Ma. Morelos 13 días fueron favorables para la ocurrencia de la roya, del DJ 247 al 250, 26 días previos a la detección. Un segundo periodo fue observado del DJ 253 al 257, 20 días previos a la detección de pústulas (Figura 2.10 e).

En el predio Tres de Mayo, nueve días fueron clasificados como favorables para la infección, del DJ 247 al 260, 30 días previos a la detección de síntomas (Figura 2.10 f).

En el segundo predio establecido en el C.E. Las Huastecas, se registraron 13 días favorables, del DJ 247 al 261, 22 días previos a la detección en campo (Figura 2.11 a).

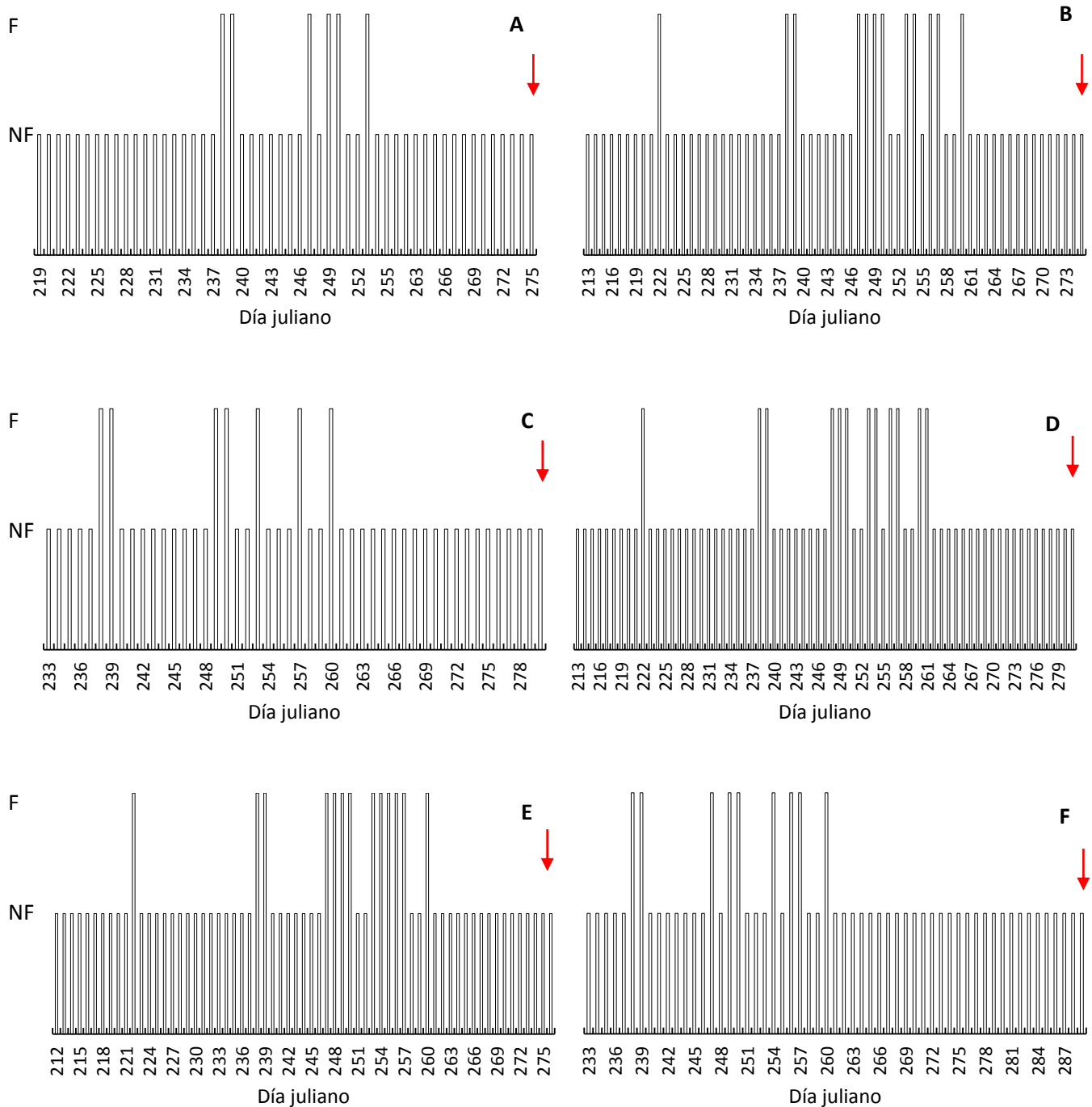
En el predio Mata del Abra, 12 días fueron favorables para la ocurrencia de la enfermedad, del DJ 247 al 260, 30 días previos a la detección (Figura 2.11 b).

En el predio La Estrella, nueve días fueron favorables para la enfermedad, entre el DJ 248 y 260, 30 días previos a la detección de pústulas (Figura 2.11 c).

## **2.4 Discusión**

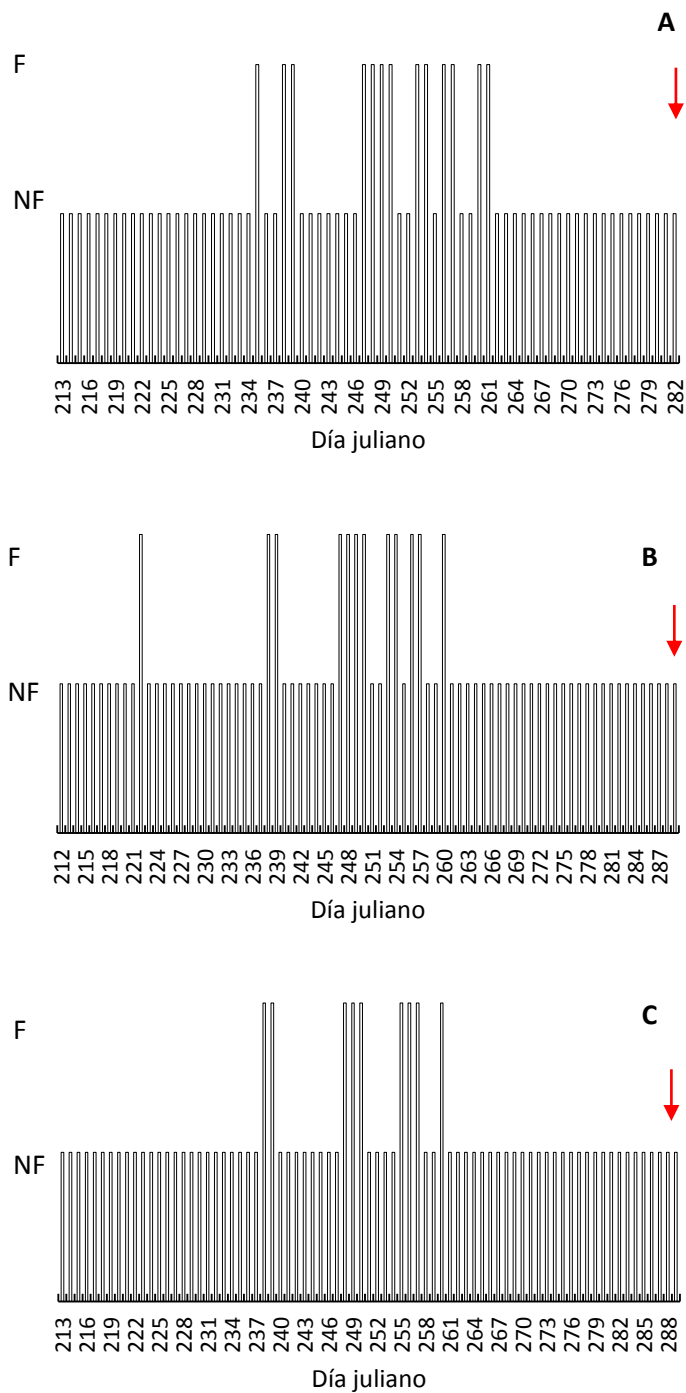
De 21 parcelas de observación, la ocurrencia o no ocurrencia de la enfermedad no fue predicha correctamente por el modelo genérico de infección en 2 de ellas, lo que corresponde a un acierto del 90.5%. Aunque ninguno de los dos modelos acertó totalmente en la predicción de la favorabilidad del microclima para la ocurrencia de la roya asiática, con ambos se identificó un periodo latente mayor a 13 días, el cual es más largo que lo observado en condiciones de laboratorio (Pivonia y Yang, 2006) y sugiere un comportamiento diferente del patógeno bajo las condiciones del sur de Tamaulipas.

En nuestros resultados los periodos favorables para la infección ocurrieron hasta 51 días previos a la detección de síntomas, lo cual concuerda con los resultados de Ward *et al.* (2012), en donde la roya asiática fue detectada mediante PCR cuantitativa desde 33 hasta más de 60 días previos a la detección de síntomas bajo condiciones de campo.



**Figura 2.10** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2013 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) El 30, b) Cervantes, c) Felipe, d) C.E. Las Huastecas, e) José Ma. Morelos y f) Tres de Mayo. F= favorable, NF=no favorable.





**Figura 2.11** Clasificación diaria del microclima favorable (barras) para la infección de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) por el modelo lineal discriminante durante el ciclo primavera-verano 2013 en diferentes predios localizados en el municipio de Altamira, Tamaulipas. a) C.E. Las Huastecas, b) Mata del Abra, c) Estrella. F= favorable, NF=no favorable.

Estos investigadores sugirieron que la duración extendida del periodo latente, pudo estar relacionada a que los síntomas no son producidos hasta estados reproductivos específicos en los cuales ocurren cambios fisiológicos que predisponen a la planta. Sin embargo, bajo condiciones del sur de Tamaulipas se han observado síntomas en etapas vegetativas de la soya. De acuerdo con Bonde *et al.* (2012) no hay relación entre la edad de la planta y la susceptibilidad a la infección. Probablemente en nuestros experimentos, el microclima del sur de Tamaulipas está condicionando que la enfermedad no se exprese rápidamente desde que se inicia el proceso de infección, propiciando que el patógeno permanezca latente durante largos periodos de tiempo hasta que se incremente la favorabilidad del ambiente. Para una mejor comprensión del comportamiento del patógeno será necesario estudiar las condiciones limitantes del periodo latente que propician su extensión.

Por otra parte, ambos modelos asumen disponibilidad ilimitada de inóculo, otro aspecto poco estudiado en la región. Sin embargo, considerando que desde la llegada de este patógeno a la región Huasteca han transcurrido casi 10 años, y que existen hospedantes ampliamente distribuidos en la región, la enfermedad podría considerarse endémica (Levy, 2004), por lo que es probable que el inóculo primario esté disponible en cada ciclo.

Existen aún muchos aspectos por ser estudiados en relación con la ocurrencia y desarrollo de la roya asiática de la soya en la región Huasteca. Los resultados de nuestro estudio documentaron que los periodos favorables para la infección de la roya asiática de la soya y pueden brindar las bases para investigaciones subsecuentes sobre la relación del microclima y la ocurrencia de la roya asiática en la Huasteca Tamaulipeca.

## **2.5 Conclusiones**

El modelo que tuvo una mejor estimación de la favorabilidad de los días para la ocurrencia de la roya asiática fue el modelo genérico de infección. Tanto este modelo como el modelo lineal discriminante deberán calibrarse con datos de más ciclos de

cultivo para tener una mejor precisión en la predicción de la ocurrencia de la roya asiática en el Sur de Tamaulipas. Su utilidad debe también ser validada con datos independientes de campo, pero un trabajo de esta naturaleza escapa a las posibilidades de esta tesis doctoral. Sería también recomendable determinar la variabilidad genética de *P. pachyrhizi* en la región Huasteca, ya que la adaptabilidad y evolución del patógeno podrían estar relacionadas con la tolerancia a días consideras típicamente no favorables tanto para la infección como para el desarrollo del patógeno, permaneciendo latente por un mayor tiempo al reportado por la literatura.

## 2.6 Literatura citada

- Bonde, M.R., S.E. Nester, D.K. Berner. 2012. Effect of soybean leaf and plant age on susceptibility to initiation of infection by *Phakopsora pachyrhizi*. Plant Health Progress. PHP-2012-0227-01-R.
- Cárcamo-Rodríguez, A., A. R. Solano-Báez, E. Maldonado-Cruz, y P. García-Zalazar. 2013. Primer reporte de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en frijol negro en Altamira, Tamaulipas, México. Revista Mexicana de Fitopatología 31:S96.
- Cummins, G. B., and Y. Hiratsuka. 2003. Illustrated Genera of Rust Fungi. 3rd Edition. American Phytopathological Society Press. St. Paul, MN. 225 p.
- Del Ponte, E. M., C.V. Godoy, M. G. Canteri, E.M. Reis, and X. B. Yang. 2006a. Models and applications for risk assessment and prediction of Asian soybean rust epidemics. Fitopatologia Brasileira 31:533-544.
- Garcés-Fiallos, F.R., and C.A. Forcelini. 2011. Control químico de la roya asiática de la soya en el Planalto Medio, RS., Brasil. Agronomía Mesoamericana 22:387-395.
- Levy, C. 2004. Manejo de la roya de la soja: Experiencias en África. In: Principales conclusiones del Panamerican Soybean Rust Workshop. Ploper, L.D. (ed.).

- Publicación especial No. 24, Tucumán Argentina, abril 2004. Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombes". 24p
- Magarey, R. D., T. B. Sutton, and C. L. Thayer. 2005. A simple generic infection model for foliar fungal plant pathogens. *Phytopathology* 95:92-100.
- 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.
- 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.
- Sikora, E. J., T.W. Allen, K. A. Wise, G. Bergstrom, C. A. Bradley, J. Bond, D. Brown-Rytlewski, M. Chilvers, J. Damicone, E. DeWolf, A. Dorrance, N. Dufault, P. Esker, T. R. Faske, L. Giesler, N. Goldberg, J. Golod, I. R. G. Gómez, C. Grau, A. Grybauskas, G. Franc, R. Hammerschmidt, G. L. Hartman, R. A. Henn, D. Hershman, C. Hollier, T. Isakeit, S. Isard, B. Jacobsen, D. Jardine, R. Kemerait, S. Koenning, M. Langham, D. Malvick, S. Markell, J.J. Marois, S. Monfort, D. Mueller, J. Mueller, R. Mulrooney, M. Newman, L. Osborne, G. B. Padgett, B. E. Ruden, J. Rupe, R. Schneider, H. Schwartz, G. Shaner, S. Singh, E. Stromberg, L. Sweets, A. Tenuta, S. Vaiciunas, X. B. Yang, H. Young-Kelly, and J. Zidek. 2014. A Coordinated Effort to Manage Soybean Rust in North America: A Success Story in Soybean Disease Monitoring. *Plant Disease* 98:864-875.
- Terán-Vargas, A. P., G. L. Ascencio, M. N. Maldonado y J. V. Ávila. 2007. La roya asiática de la soya en México. Folleto Técnico No. 22. Campo Experimental Sur de Tamaulipas, CIRNE-INIFAP. Altamira, Tam., México. 53 p.
- Twizeyimana, M., and G. L. Hartman. 2010. Culturing *Phakopsora pachyrhizi* on detached leaves and urediniospore survival at different temperatures and relative humidities. *Plant Disease* 94:1453-1460.
- Ward, N. A., R. W. Schneider, and C. L. Robertson. 2012. Documentation of an extended latent infection period by *Phakopsora pachyrhizi*, the soybean rust pathogen. Online. *Plant Health Progress* doi:10.1094/PHP-2012-0321-01-RS
- Yin, X., M. J. Kropff, G. McLaren, and R. M. Visperas. 1995. A nonlinear model for crop development as a function of temperature. *Agric. For. Meteorol.* 77:1-16.

### CAPITULO 3. EFECTO DE LA ROYA ASIÁTICA EN EL ESPECTRO DE REFLECTIVIDAD DEL CULTIVO DE SOYA.

#### RESUMEN

El patrón de reflectividad ha permitido detectar enfermedades de manera oportuna en diferentes cultivos, con la ventaja de que no implica muestreos destructivos ni invasivos. En el cultivo de soya solamente se ha evaluado el efecto de la roya asiática en el patrón de reflectividad bajo condiciones de laboratorio y no se ha comparado con datos de campo. En el presente trabajo se evaluó el patrón de reflectividad en experimentos con plantas tratadas y no tratadas con fungicidas cultivadas en el sur de Tamaulipas, así como en parcelas de observación en las que se dio seguimiento a la ocurrencia y severidad de la roya asiática durante los ciclos Primavera-Verano de 2012 y 2013. La severidad registrada durante el 2012 fue mínima (< 2 %) y baja en 2013 (< 9 %). La reflectividad en bandas del infrarrojo fue significativamente mayor en plantas tratadas con pyraclostrobin más epoxiconazol que en las testigo y varió significativamente de acuerdo a los niveles de severidad ocasionados por la roya asiática. En las plantas tratadas únicamente con epoxiconazol no se tuvieron diferencias significativas debido a la poca eficiencia en el control de la enfermedad. La reflectividad en la banda del infrarrojo cercano (760 nm) y del infrarrojo medio (810 y 830 nm) tuvieron una correlación negativa con la severidad.

**Palabras clave:** Porcentaje de reflectividad, severidad, *Phakopsora pachirhizi*.

## ABSTRACT

The pattern of reflectivity has allowed disease detection in different crops with the advantage that it does not require destructive or invasive sampling. Reflectance patterns in soybean crops affected by Asian rust have only been evaluated under laboratory conditions and results have not been compared with field data. Pattern of reflectance in experiments treated and untreated with fungicides was, as well as in untreated observation plots were evaluated during the Spring - Summer cropping cycles of 2012 and 2013. During 2012 disease severity was minimal (<2 %) and low in 2013 (<9 %). Reflectivity was higher in infrared bands of plants treated with pyraclostrobin plus epoxiconazole than in untreated plants. Plants treated only with epoxiconazole did not have significant differences due to the low efficiency of this fungicide in disease control. Reflectivity at Near-infrared (760 nm) and mid-infrared (810 and 830 nm) correlated negatively with disease severity.

**Keywords:** Percentage reflectivity , severity, *Phakopsora pachyrhizi* .

### 3.1 Introducción

La roya asiática causada por *Phakopsora pachyrhizi* es una de las enfermedades más destructivas del cultivo de la soya (Sikora *et al.*, 2014). En México la producción de esta leguminosa está en riesgo desde que la roya asiática se detectó por primera vez en 2005 (Cárcamo-Rodríguez *et al.*, 2006).

Generalmente esta enfermedad es detectada en etapas avanzadas del cultivo. Sin embargo, una detección oportuna permitiría tomar decisiones de manejo para evitar pérdidas en el rendimiento. Variaciones en el patrón de reflectividad permiten detectar cambios en las propiedades biofísicas de la hoja asociados con agentes patógenos (Jensen, 2007; Moran *et al.*, 1997; Moshou *et al.*, 2005), así como cuantificar el estrés

de la planta de una manera más objetiva que los métodos visuales (Moran, 1997; Nilsson 1995). Las bandas del infrarrojo cercano han sido utilizadas en la detección de enfermedades en diferentes cultivos, con la ventaja de ser una herramienta no destructiva ni invasiva (Jones *et al.*, 2010; Liu *et al.*, 2008; Mahlein *et al.*, 2010; Rumpf *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2008; Sankaran *et al.*, 2012).

En el caso específico de la soya, Gazala *et al.* (2013) determinaron que las reflectancias de las bandas 445, 688 y 750 nm pueden ser utilizadas para la detección del virus del mosaico amarillo. En otro estudio realizado en condiciones de laboratorio, Cui *et al.* (2009) reportaron que el espectro de reflectividad es diferente en plantas sanas con respecto al observado a diferentes niveles de severidad de la roya asiática y que valores de reflectividad cercanos a los 800 nm estuvieron muy relacionados con la severidad.

En México no existen antecedentes de estudios sobre la relación entre el patrón de reflectividad y la severidad de la roya asiática de la soya bajo condiciones de campo. En este artículo reportamos resultados de comparaciones en el patrón de reflectividad en campos de soya tratados y no tratados con fungicidas cultivados en el sur de Tamaulipas, donde la roya ocurre frecuentemente.

### **3.2 Materiales y métodos**

Durante 2012 y 2013 se establecieron cinco experimentos en donde se evaluó la severidad y reflectividad de parcelas tratadas y no tratadas con fungicidas (pyraclostrobin más epoxiconazol y epoxiconazol solo) para el control de la roya asiática, (Cuadro 3.1). Así como 18 predios en los que se evaluó el desarrollo de la enfermedad sin aplicación de fungicidas y la reflectividad del cultivo.

### 3.2.1 Año 2012

En este año se establecieron dos experimentos, el primero se ubicó en el C.E. Las Huastecas, y se comparó el efecto de la aplicación de 75 g i.a. ha<sup>-1</sup> de pyraclostrobin (Headline®, de BASF) más 25 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (Opus®, de BASF) contra un testigo. Se realizó una sola aspersion el DJ 286 (Cuadro 3.1).

Otro experimento fue ubicado en el predio La Resolana, y donde se evaluó el efecto de la aplicación del fungicida Opera® que contiene pyraclostrobin (66 g i.a. ha<sup>-1</sup>) más epoxiconazol (25 g i.a. ha<sup>-1</sup>), con respecto a testigos no tratados. Se realizó una aplicación el DJ 279, con el fin de prevenir el ataque de roya durante la etapa de llenado de grano (Cuadro 3.1).

La aplicación de fungicida se realizó con equipo terrestre, con boquillas de cono hueco TX-8, a una presión de 413.7 kPa y con un gasto de 200 L de agua ha<sup>-1</sup>. Se establecieron cuatro pares de parcelas con y sin fungicida, en franjas de 66 surcos. La parcela útil en cada tratamiento fue de 64 surcos con una longitud de 50 m, separados entre sí cada 0.76 m.

En todos los experimentos, la densidad de plantación, labores culturales, control de plagas se realizaron con base en lo recomendado por el INIFAP para el manejo de la roya asiática de la soya en el Sur de Tamaulipas. En nueve predios en los que se dio seguimiento al desarrollo epidémico de la roya asiática de a soya sin aplicación de fungicidas y se evaluó la reflectividad del cultivo. (Cuadro 3.2).

La detección de la roya asiática se realizó mediante una lupa de 40X. Fue corroborada mediante un microscopio compuesto (Marca Motic, modelo DMB1-223), el uso de las claves de Cummins e Hiratsuka (2003) y Ono *et al.*, (1992) y tiras inmunocromatográficas QuickStix (Enviroligix™) específicas para *P. pachyrhizi*.

La severidad total por planta se evaluó mediante la escala propuesta por Godoy *et al.*, (2006), considerando el promedio de todos los foliolos en cada planta. En cada evaluación se tomaron al azar, dentro de cada parcela útil, tres muestras de tres plantas con competencia completa. La parcela útil en cada tratamiento fue de 64 surcos con una longitud de 50 m, separados entre sí cada 0.76 m.



La reflectividad fue medida a lo largo del ciclo de cultivo en los mismo sitios de evaluación de la severidad mediante un radiómetro multiespectral marca CROPSCAN con las siguientes longitudes de onda: azul (460 y 485 nm), verde (510 y 560 nm), rojo (610 y 660 nm), infrarrojo cercano (710 y 760 nm), infrarrojo medio (810, 830 nm) e infrarrojo lejano (1650 nm) expresada en porcentaje. Las mediciones se llevaron a cabo a la misma hora durante los diferentes muestreos. El sensor del radiómetro se ubicó a una altura de 1.47 m arriba del dosel vegetal y se ajustó la altura del mismo conforme avanzó el ciclo de cultivo de tal manera que el sensor siempre se ubicó a 1.47 m sobre el dosel vegetal.

La comparación de tratamientos en las parcelas tratadas y no tratadas se realizó mediante la prueba t de Student con base en el método Pooled cuando las varianzas resultaron homogéneas. Cuando resultaron diferentes la comparación se hizo con base en el método Satterthwaite (Satterthwaite, 1946). El análisis estadístico de los datos se realizó mediante el programa SAS v.9.3 (Statistical Analysis System, SAS Institute, Cary North Carolina).

### **3.2.2 Año 2013**

Durante este año se establecieron tres experimentos, el primero se ubicó en el C.E. Las Huastecas del INIFAP. Se comparó el efecto de la aplicación de 75 g i.a. ha<sup>-1</sup> de pyraclostrobin (Headline®, BASF) más 25 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (Opus®, BASF) contra un testigo (Cuadro 3.1).

El segundo experimento se estableció en el Ejido Esteros. Se comparó el efecto de la aplicación de 62.5 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (Opus®, BASF).

El tercer experimento se estableció en el Ejido José María Morelos. Se comparó el efecto de la aplicación de 62.5 g i.a. ha<sup>-1</sup> de epoxiconazol (Rubric®, Cheminova), contra un testigo (Cuadro 3.1).

**Cuadro 3.1** Localización y datos generales de las parcelas experimentales evaluadas en los ciclos Primavera-Verano de 2012 y 2013 en el sur de Tamaulipas.

Experimento	Fecha de siembra (DJ)	Coordenadas		Variedad	Positivo a roya (DJ)
2012					
C.E. Las Huastecas *	216	N 22°34.087'	W 98°09.999'	H400	314
Resolana*	191	N 22°34.545'	W 98°00.117'	H200	ND
2013					
C.E. Las Huastecas *	200	N 22° 34.078	W 98° 10.461	H 200	281
José María Morelos**	179	N 22° 31.504	W 98° 05.247	H 400	276
Esteros**		N 22° 30.976	W 98° 07.879	H300	289
Tres de Mayo	176	N 22° 24.940	W 98° 02.911	H 400	289

DJ= Día juliano ND=no detectada. \*Aplicación de pyraclostrobin + epoxiconazol, \*\*Aplicación de epoxiconazol.

Se evaluaron nueve predios en los que se dio seguimiento a la ocurrencia de la roya asiática sin aplicación de fungicidas y a la reflectividad del cultivo. (Cuadro 3.2). En todos los casos, la densidad de plantación, labores culturales y control de plagas se realizaron con base en lo recomendado por el INIFAP para el manejo de la roya asiática de la soya en el Sur de Tamaulipas.

La evaluación de la severidad, reflectividad y análisis estadístico de los datos se realizó de la misma manera descrita para el año 2012. Se realizó un análisis de correlación entre la severidad y la reflectividad con las longitudes de onda de 460, 485, 510, 560, 610, 660, 710, 760, 810, 830 nm.

**Cuadro 3.2** Parcelas de observación, sin aplicación de fungicidas.

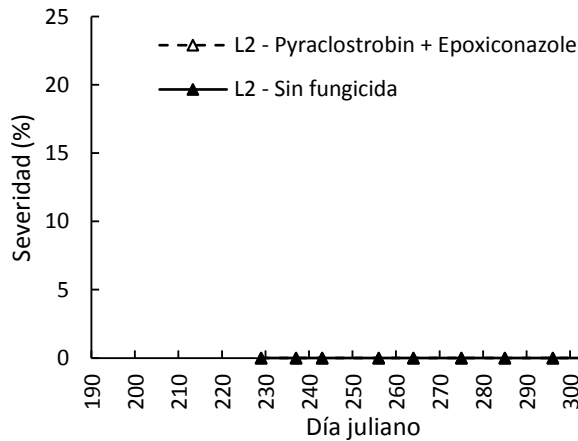
Predio	Fecha de siembra (DJ)	Coordenadas		Variedad	Positivo a roya (DJ)
2012					
C.E. Las Huastecas (lote 2)	182	N 22°34.292'	W 98° 10.262'	H200	ND
Tres de Mayo	176	N 22° 24.976'	W 98° 02.90 '	H400	ND
Margaritas	179	N 22°35.795'	W 98°03.069'	H400	ND
Venado	191	N 22°37.219'	W 97°57.978'	H300	ND
Sta. Gertrudis	210	N 22°37.507'	W 98°12.463'	H400	ND
Los Cedros	190	N 22°31.174'	W 98°10.147'	H200	296
José María Morelos	185	N 22°31.508'	W 98°05.253'	H400	272
Cervantes	186	N 22°26.744'	W 98°03.693'	H400	296
San Felipe	204	N 22°32.896'	W 98°14.141'	H200	304
2013					
Gertrudis	176	N 22° 37.541	W 98° 12.460	H 400	291
San Felipe	178	N 22° 32.914	W 98° 14.057	H 400	280
Mata del Abra	178	N 22° 27.414	W 98° 07.354	H 400	289
Cervantes	178	N 22° 26.789	W 98° 03.724	H 400	275
Tres de Mayo	176	N 22° 24.940	W 98° 02.911	H 400	289
La Estrella	199	N 22° 37.313	W 97° 57.972	H 400	289
La Resolana	176	N 22° 33.754	W 98° 00.280	H 400	282
C.E. Las Huastecas (lote 2)	176	N 22° 34.283	W 98° 10.269	H 200	282
El 30	180	N 22° 30.668	W 98° 09.968	H200	275

### 3.3 Resultados

#### 3.3.1 Año 2012

##### 3.3.1.1 Severidad

Durante este año la enfermedad se presentó únicamente en el predio establecido en el C.E. Las Huastecas, al final del ciclo de cultivo, con un severidad < 0.6 %. En el experimento establecido en La Resolana la enfermedad no fue detectada. No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 3.1).

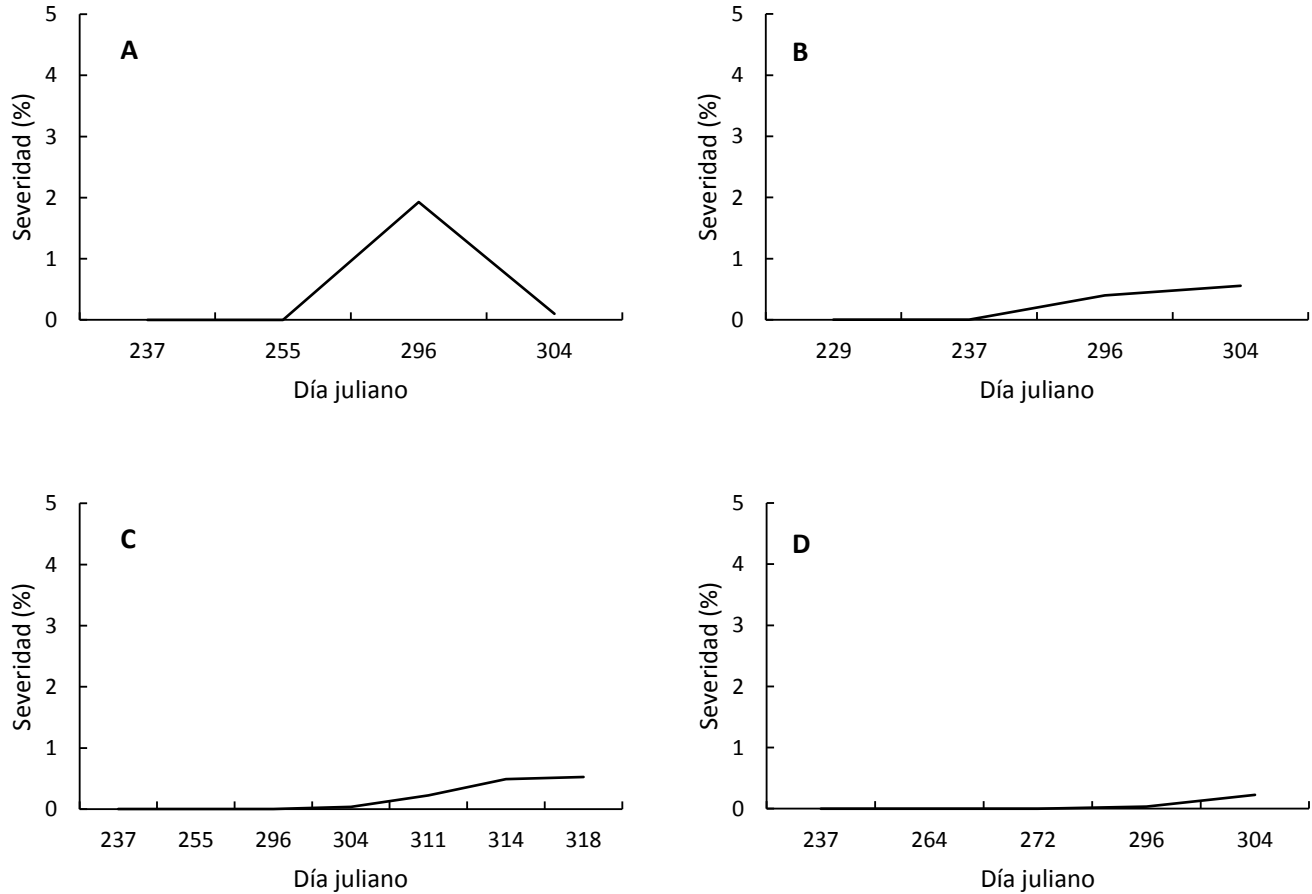


**Figura 3.1** Severidad de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en plantas tratadas con pyraclostrobin más epoxiconazol establecidas durante el ciclo Primavera-Verano 2012 en el Sur de Tamaulipas.

En las parcelas de observación, únicamente tres predios fueron afectados por la roya asiática. En el predio Cedros la enfermedad fue detectada a partir del DJ 296 y la severidad tuvo un valor máximo de 1.9 % pero la severidad final tuvo un valor de 0.1 %. Esta disminución pudo estar relacionada con la caída de foliolos. En el predio Cervantes la enfermedad fue detectada el DJ 296 con una severidad de 0.4 pero la severidad final fue de 0.6. En el predio Felipe la enfermedad fue detectada el DJ 304 con una severidad mínima (0.04 %), posteriormente se incrementó hasta un valor final de 0.5 %. En el predio José Ma. Morelos la enfermedad fue detectada el DJ 296 donde la severidad fue 0.04% hasta alcanzar un valor final de 0.2 % (Figura 3.2 b-c).

### 3.3.1.2 Reflectividad

En los experimentos del año 2012 el porcentaje de reflectividad fue menor a 31 %, y no hubo diferencias significativas entre tratamientos en ninguno de los experimentos evaluados durante este año. (Figuras 3.3 y 3.4).



**Figura 3.2** Severidad de la roya asiática de la soya (*Phakopsora pachyrhizi*) en parcelas de observación establecidas durante el ciclo Primavera-Verano 2012 en el Sur de Tamaulipas. a) Cedros, b) Cervantes, c) Felipe y d) José Ma. Morelos.

En las parcelas de observación la reflectividad tuvo mayores porcentajes al inicio del cultivo que al final. El porcentaje de reflectividad fue más alto en las bandas del infrarrojo cercano (760 nm) que en el espectro visible (Figura 3.5 y 3.6).

En el predio Cedros el porcentaje de reflectividad en las bandas del infrarrojo disminuyó desde el inicio del cultivo hacia el final de este (Figura 3.5 a). El mismo comportamiento ocurrió en el predio Cervantes (Figura 3.5 b). En el predio Felipe el porcentaje de reflectividad fue también menor en la última evaluación respecto a las

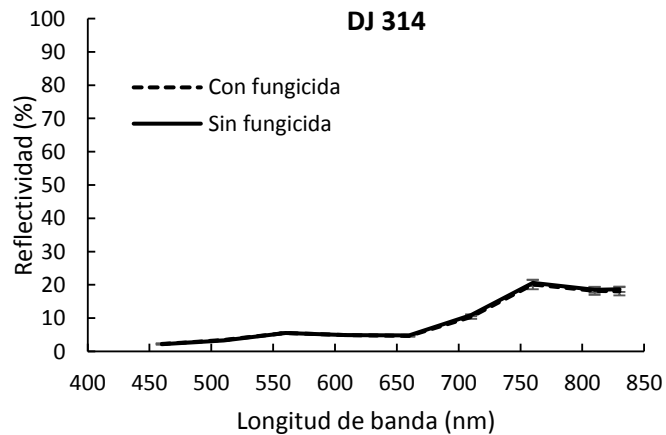
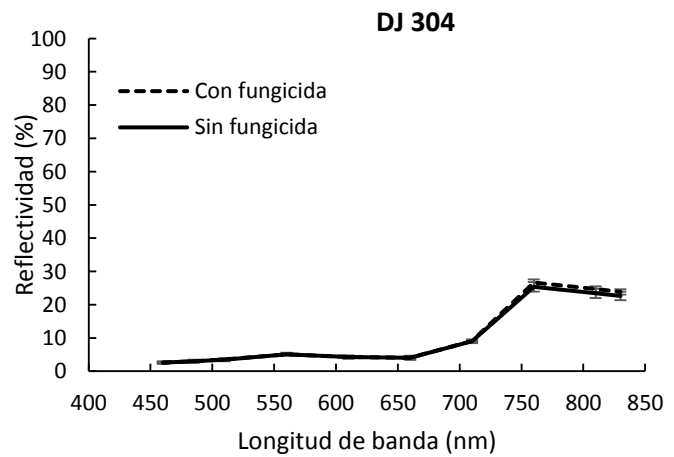
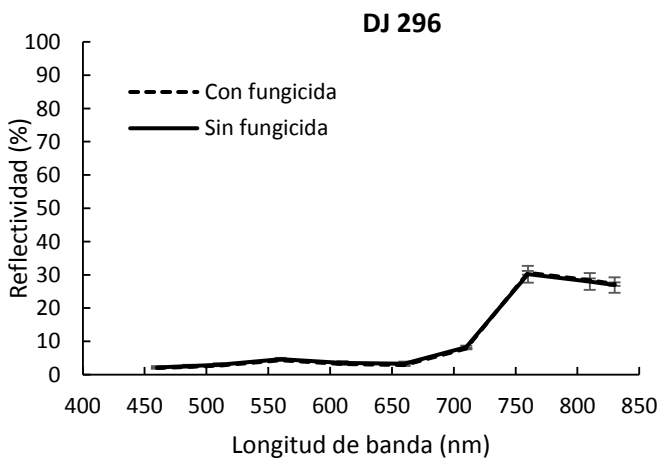
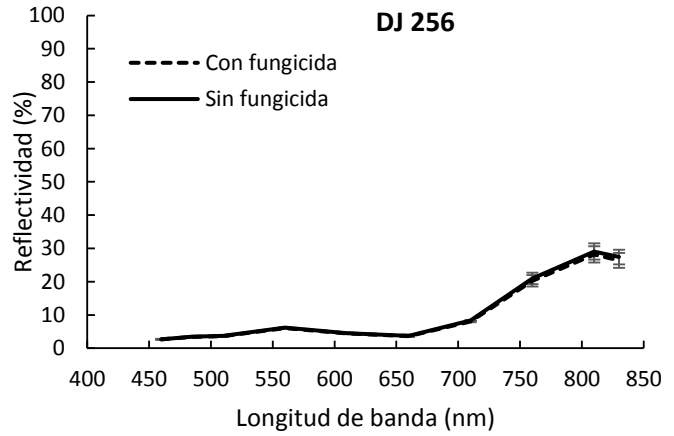
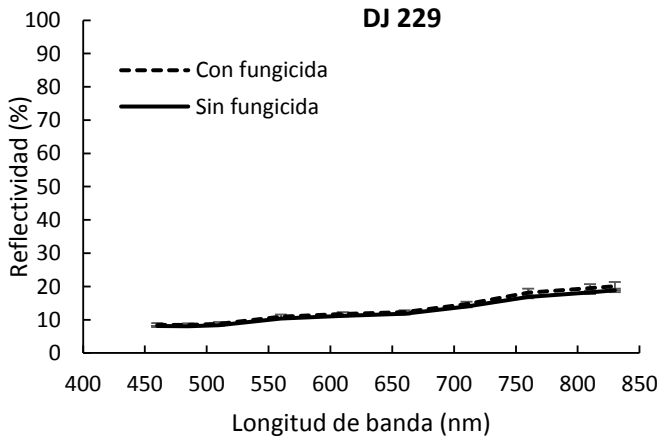
evaluaciones realizadas en fechas previas (Figura 3.5 c). En el predio José Ma. Morelos la reflectividad disminuyó de valores cercanos a 50 % al inicio del cultivo hasta valores de 14.5 % al final del ciclo de cultivo (Figura 3.5 d).

En el predio Gertrudis la reflectividad tuvo poca variación desde el inicio hasta el fin del ciclo de cultivo (Figura 3.6 a). En el predio del C.E. Las Huastecas, Margaritas y Tres de Mayo el porcentaje de reflectividad en el infrarrojo disminuyó conforme el cultivo alcanzó la etapa de madurez (Figura 3.6 b-d). En el predio el Venado, la reflectividad tuvo un comportamiento inverso a lo observado en la mayoría de las parcelas (Figura 3.6 e), con mayores porcentajes de reflectividad al final del cultivo que al inicio de éste. Con excepción de este cambio, al comparar los patrones de reflectividad entre campos afectados y no afectados por la roya, no fueron evidentes diferencias importantes entre ellos.

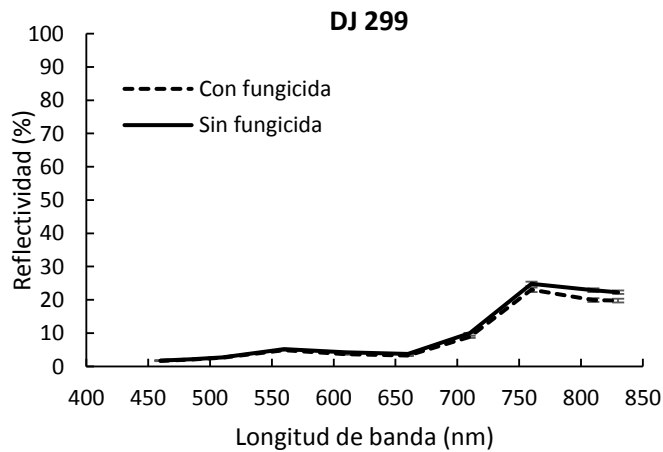
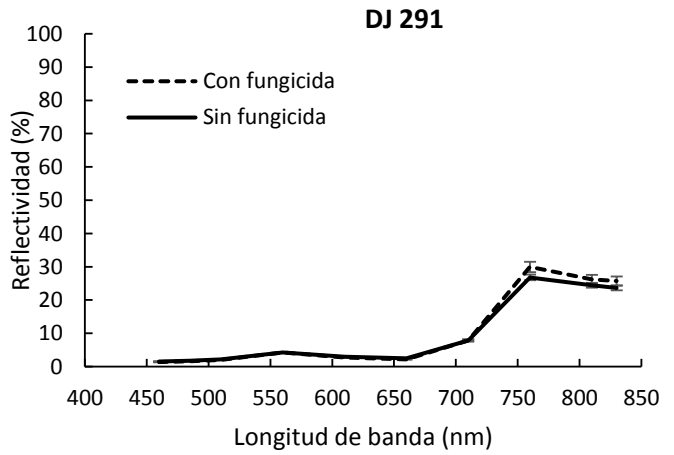
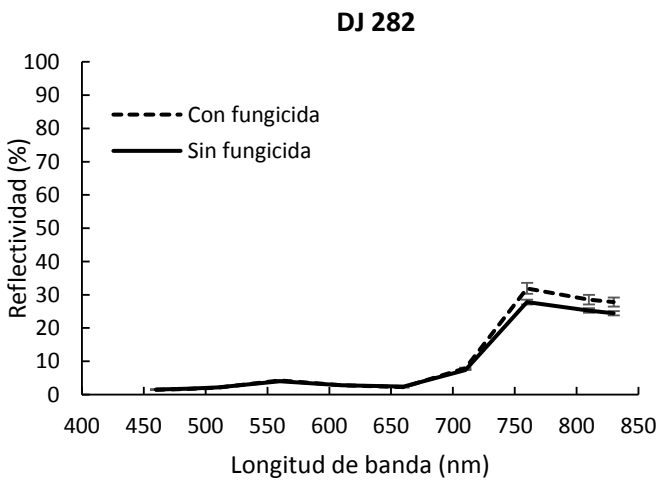
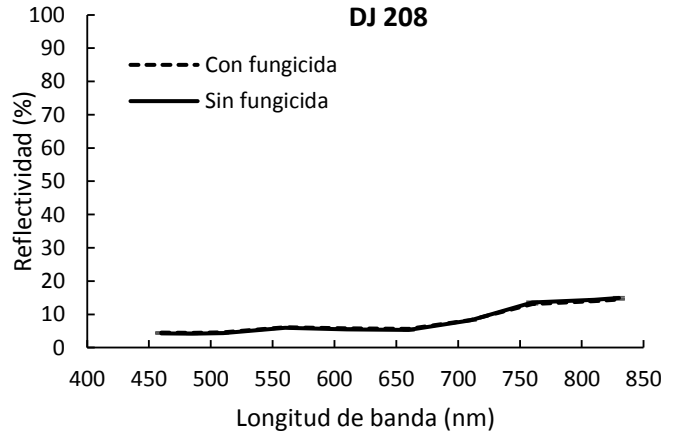
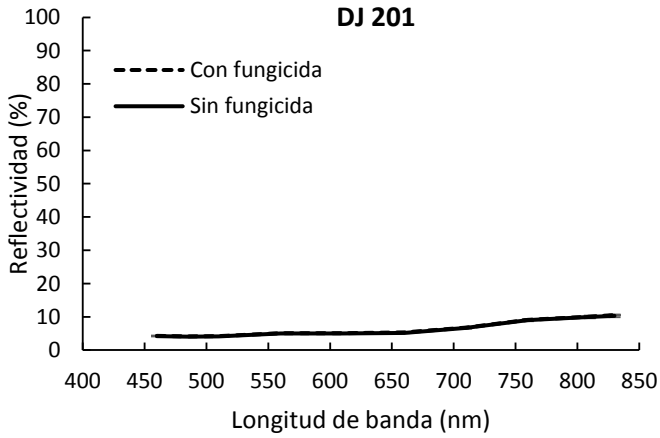
### **3.3.2 Año 2013**

#### **3.3.2.2 Severidad**

Durante este año la enfermedad se presentó en los tres experimentos. En el C.E. Las Huastecas la enfermedad se detectó el DJ 291, en este predio la severidad total fue de 8.3 % en las plantas testigo y < 0.1 % en las plantas tratadas con fungicida, estas diferencias fueron significativas (Figura 3.7 a). En el experimento establecido en Esteros la enfermedad se detectó el DJ 301, la severidad final fue de 2.7 % en plantas testigo y de 2 % en las plantas tratadas con fungicida, las diferencias no fueron significativas (Figura 3.7 b). En el experimento en José Ma. Morelos la enfermedad se detectó el DJ 276 la severidad final en ambos tratamientos fue < 0.1 % sin diferencias significativas (Figura 3.7 c).

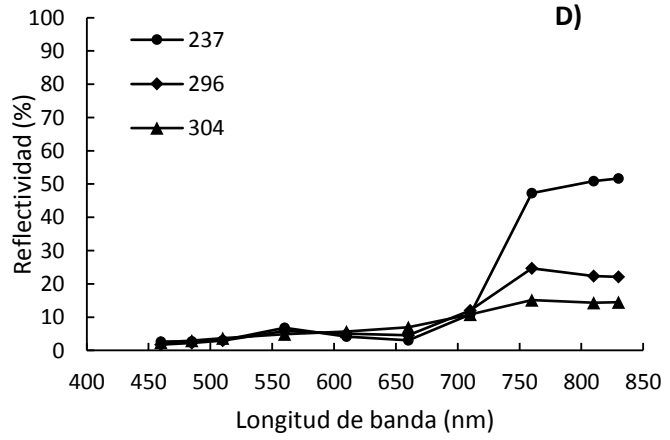
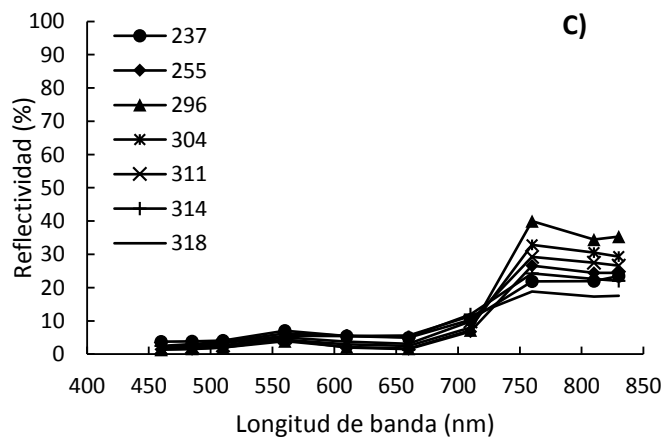
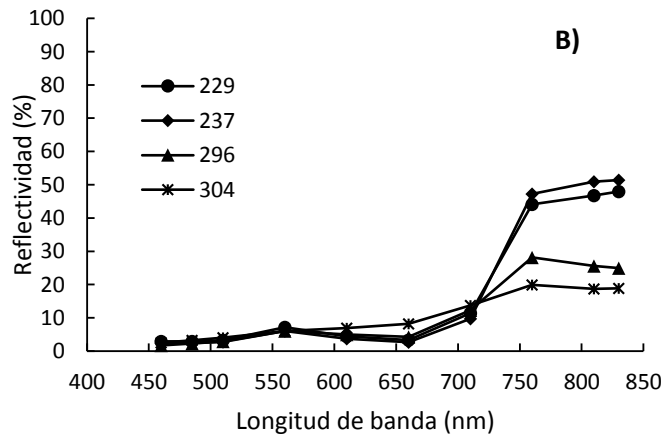
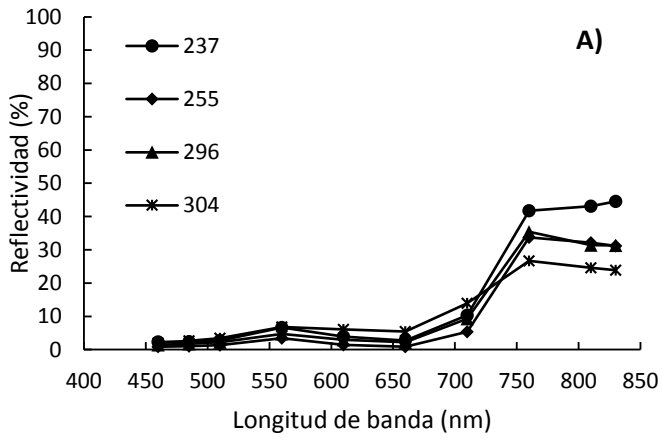


**Figura 3.3** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (pyraclostrobin más epoxiconazol) cultivadas en el C.E. Las Huastecas, Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2012. DJ= día juliano.

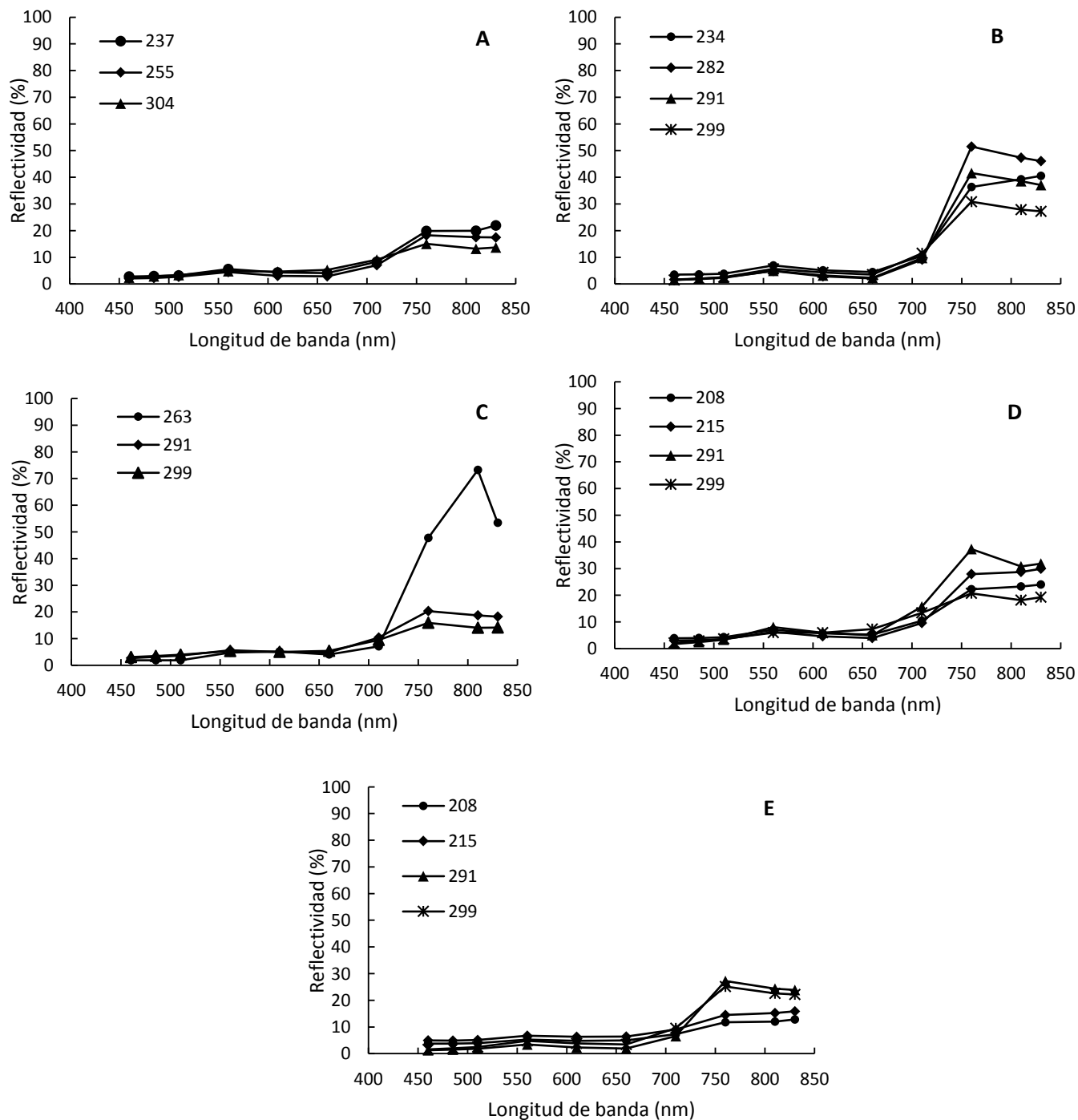


**Figura 3.4** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (pyraclostrobin más epoxiconazol) cultivadas en el rancho La Resolana en Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2012. La enfermedad no fue detectada. DJ= día juliano.





**Figura 3.5** Espectro de reflectividad en parcelas de observación, sin control de la enfermedad y que resultaron positivas a roya asiática durante el ciclo Primavera-Verano de 2012, en Altamira, Tamaulipas. a) Cedros, b) Cervantes, c) Felipe, d) José María Morelos. Cada línea representa un día juliano diferente.



**Figura 3.6** Espectro de reflectividad en parcelas, de observación, sin medidas de control de la roya asiática, donde no ocurrió la enfermedad, durante el ciclo Primavera-Verano de 2012, en Altamira, Tamaulipas. a) Gertrudis, b) C.E. Las Huastecas (lote 2), c) Margaritas, d) Tres de Mayo, e) Venado.

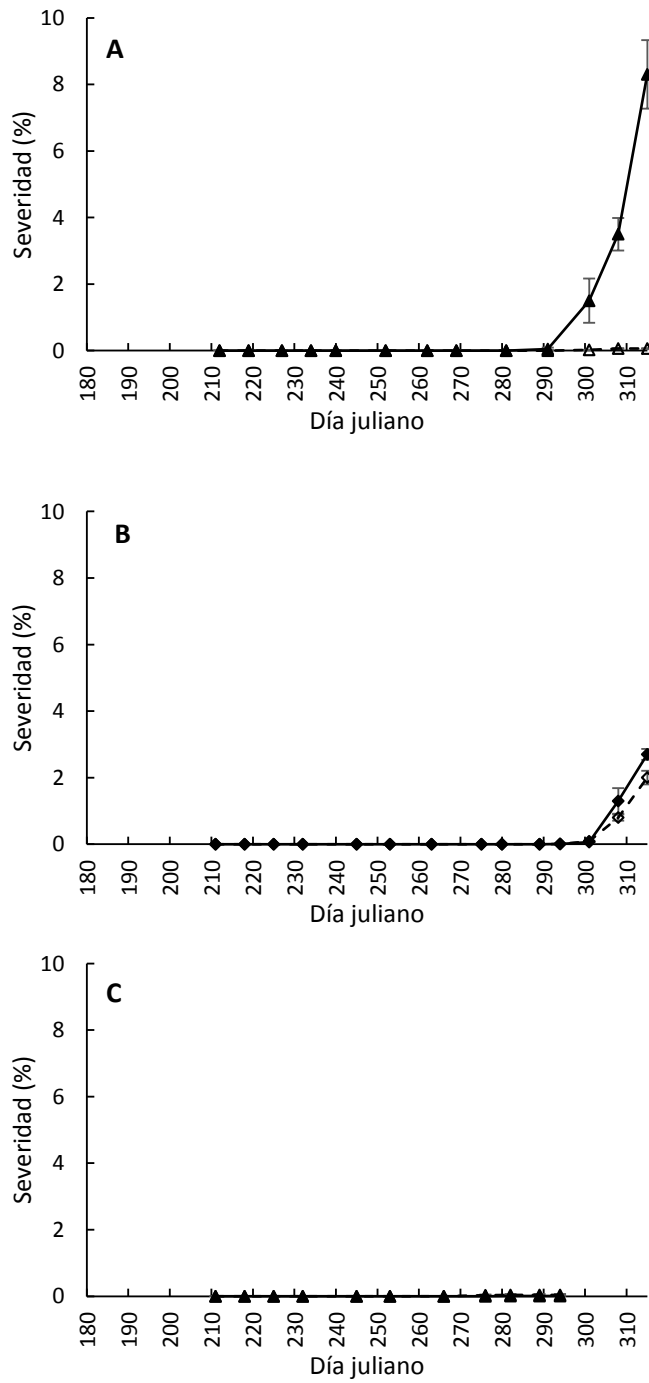
En las nueve parcelas de observación donde no se realizaron aplicaciones de fungicida, la severidad total fue baja. El predio El 30 alcanzó valores de 8.1% (Figura 3.8 a), en el segundo lote del C.E. Las Huastecas la severidad fue de 1.2% (Figura 3.8 b), en Tres de Mayo 0.7% (Figura 3.8 c), en Mata del Abra de 0.6 % (Figura 3.8 d), en la Resolana de 0.5 % (Figura 3.8 e). En los demás predios la severidad fue < 0.1 %.

### **3.3.2.2 Reflectividad**

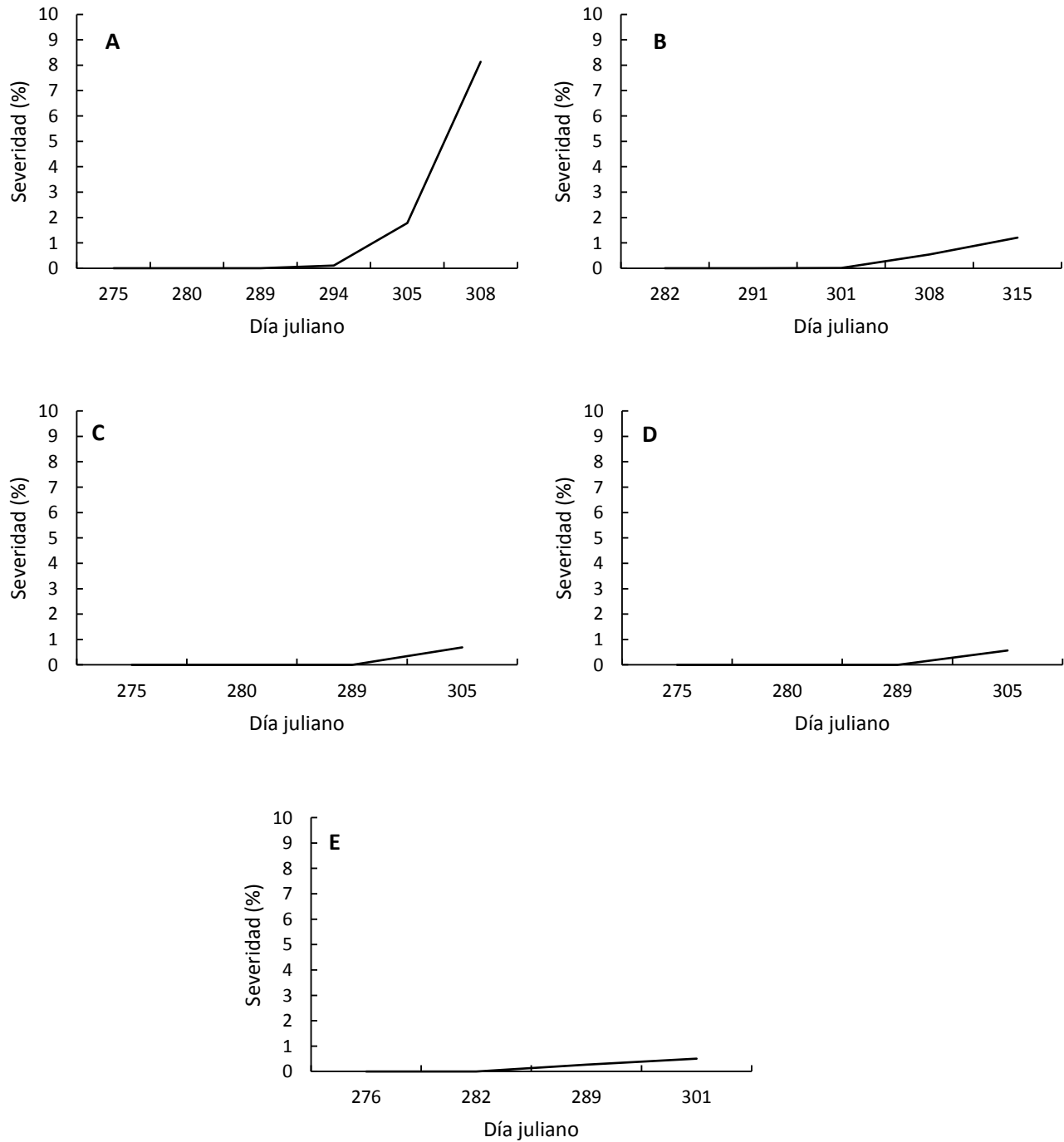
En el C.E. Las Huastecas la reflectividad fue significativamente diferente entre tratamientos a partir de la banda del infrarrojo cercano (760 nm) en todas las evaluaciones, excepto en el DJ 291 donde las diferencias no fueron significativas. La reflectividad a partir de los 760 nm en las plantas tratadas con fungicida comenzó con valores entre 51 a 57 % (DJ 281) y finalizó con valores entre 24 a 27 % (DJ 322). Las plantas testigo iniciaron con valores entre 46 a 50 % (DJ 281), y finalizaron con valores de 13 a 16 % (Figura 3.9). En Esteros la reflectividad tuvo valores a partir de los 760 nm de 55 a 60 % al inicio del ciclo de cultivo y finalizó con valores entre 41 y 46 % (Figura 3.10). En José Ma. Morelos los porcentajes de reflectividad iniciales fueron de 55 a 63 %, y finalizó con porcentajes entre 19 y 27 % (Figura 3.11). Tanto en Esteros como en José Ma. Morelos las diferencias entre tratamientos no fueron significativas.

Durante este año, la enfermedad se presentó en todas las parcelas de observación, el porcentaje de reflectividad tendió a disminuir conforme se alcanzó la madurez del cultivo en la mayoría de los casos, estos cambios se observaron a partir de la banda del infrarrojo cercano (760 nm) en todas las parcelas.

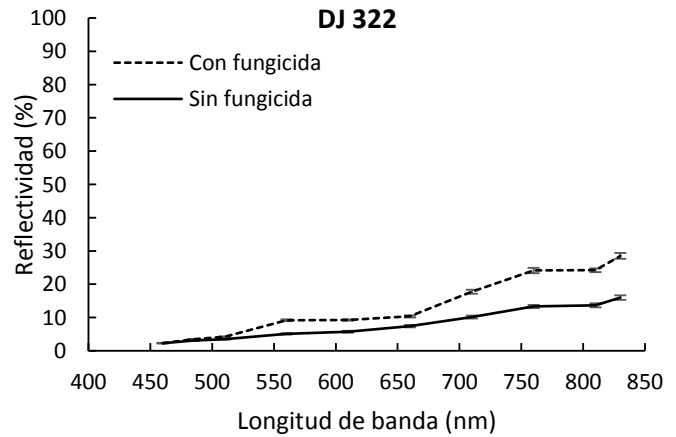
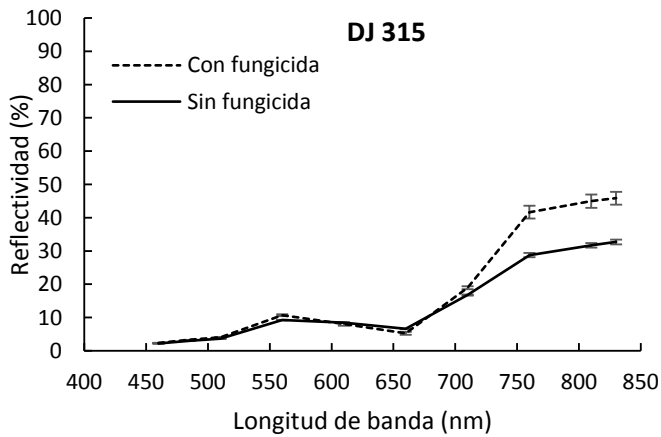
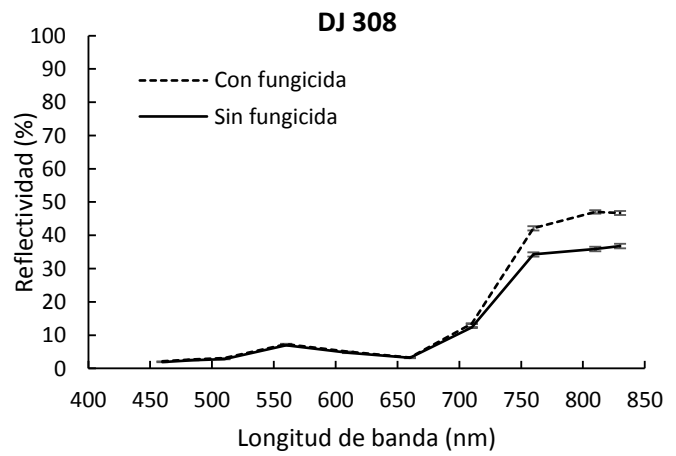
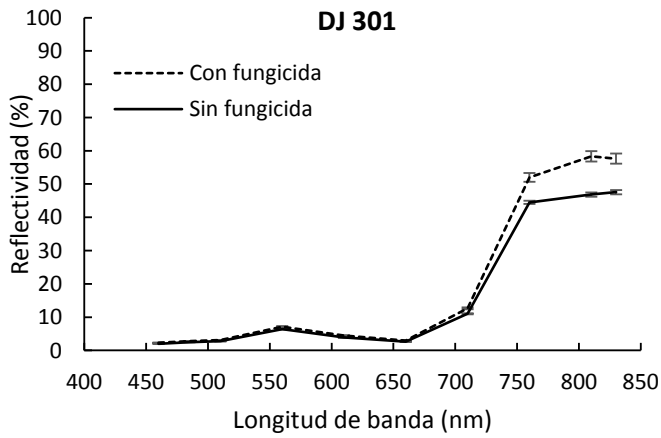
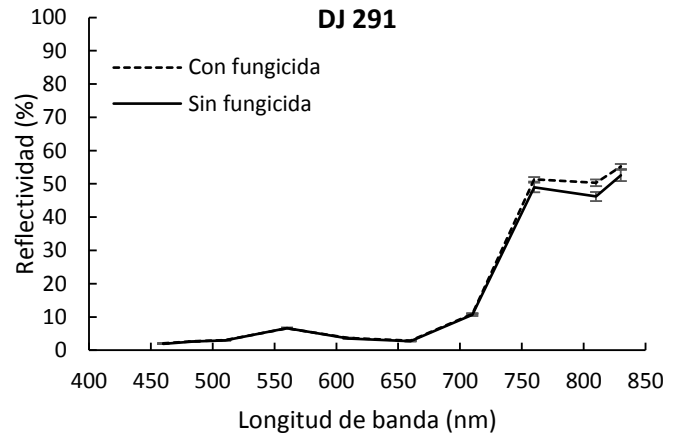
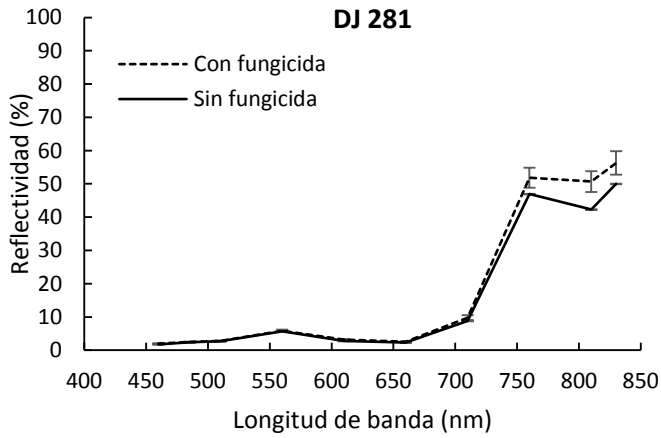
En el predio El 30 la reflectividad inició con valores entre 46 y 51 % y finalizó con valores entre 17 y 21 % (Figura 3.12 a). En Cervantes esta variable tuvo valores iniciales entre 39 y 42 %, al final del ciclo de cultivo los valores fueron de 15 a 18 % (Figura 3.12 b). En Felipe inició con valores entre 41 y 46 % y terminó con valores entre 19 y 23 % (Figura 3.12 c). En Gertrudis la reflectividad tuvo valores menores a 35 % al inicio del ciclo y terminó con reflectividades menores al 16 % (Figura 3.12 d).



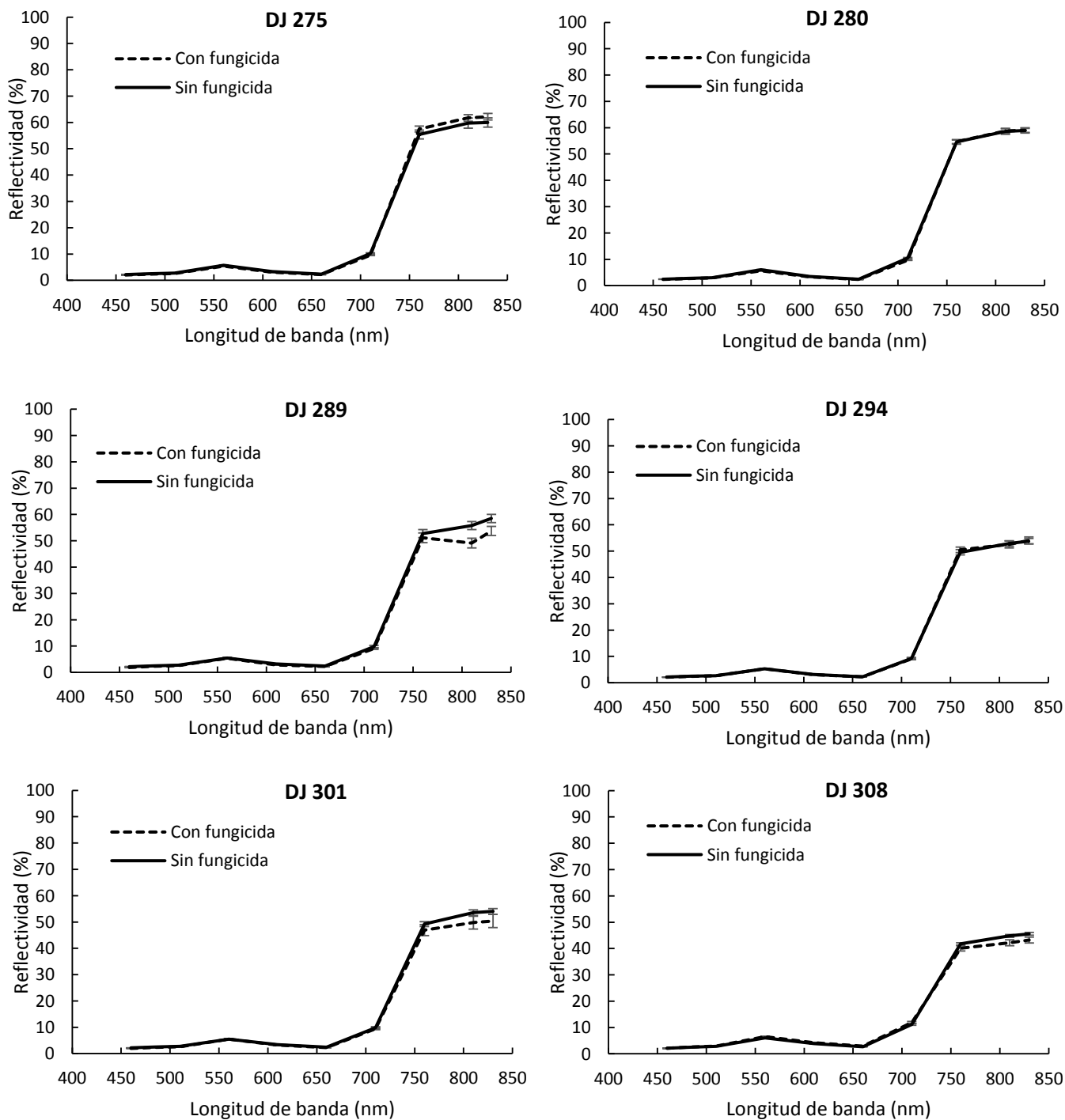
**Figura 3.7** Severidad en plantas tratadas y no tratadas con fungicida establecidas en Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano 2013. a) C.E. Las Huastecas, b) Esteros y c) José Ma. Morelos.



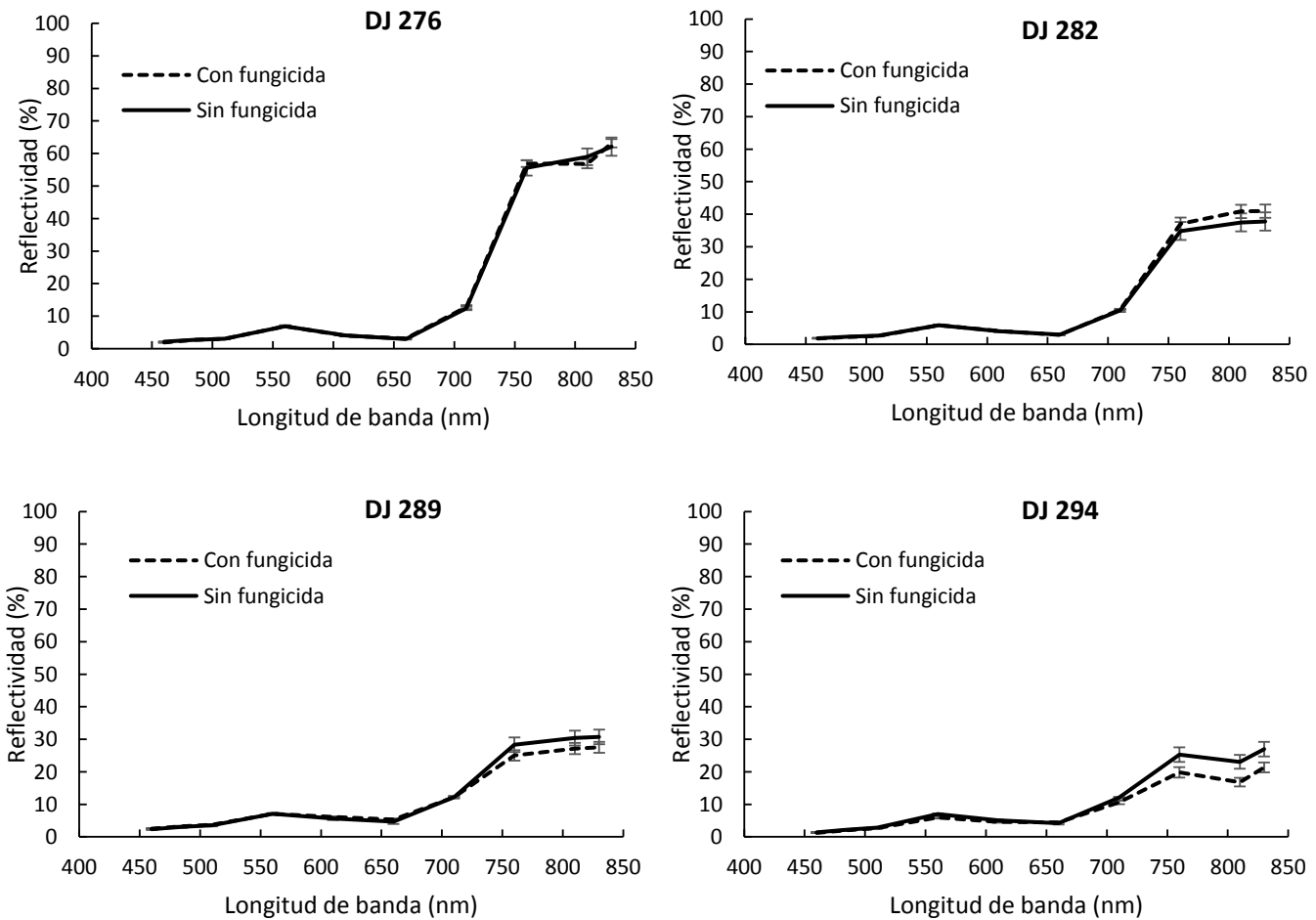
**Figura 3.8** Severidad de la roya asiática sin control de la enfermedad en parcelas cultivadas en Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo Primavera-Verano de 2013 a) El 30 b) C.E Las Huastecas (lote 2), c) Tres de Mayo, d) Mata del Abra, e) Resolana.



**Figura 3.9** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (pyraclostrobin más epoxiconazol) cultivadas en el C.E. Las Huastecas, Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2013. Detección de la roya asiática de soya (*Phakopsora pachyrhizi*) = DJ 281.



**Figura 3.10** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (epoxiconazol) cultivadas en Esteros, Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2013. Detección de la roya asiática de soja (*Phakopsora pachyrhizi*) = DJ 290.

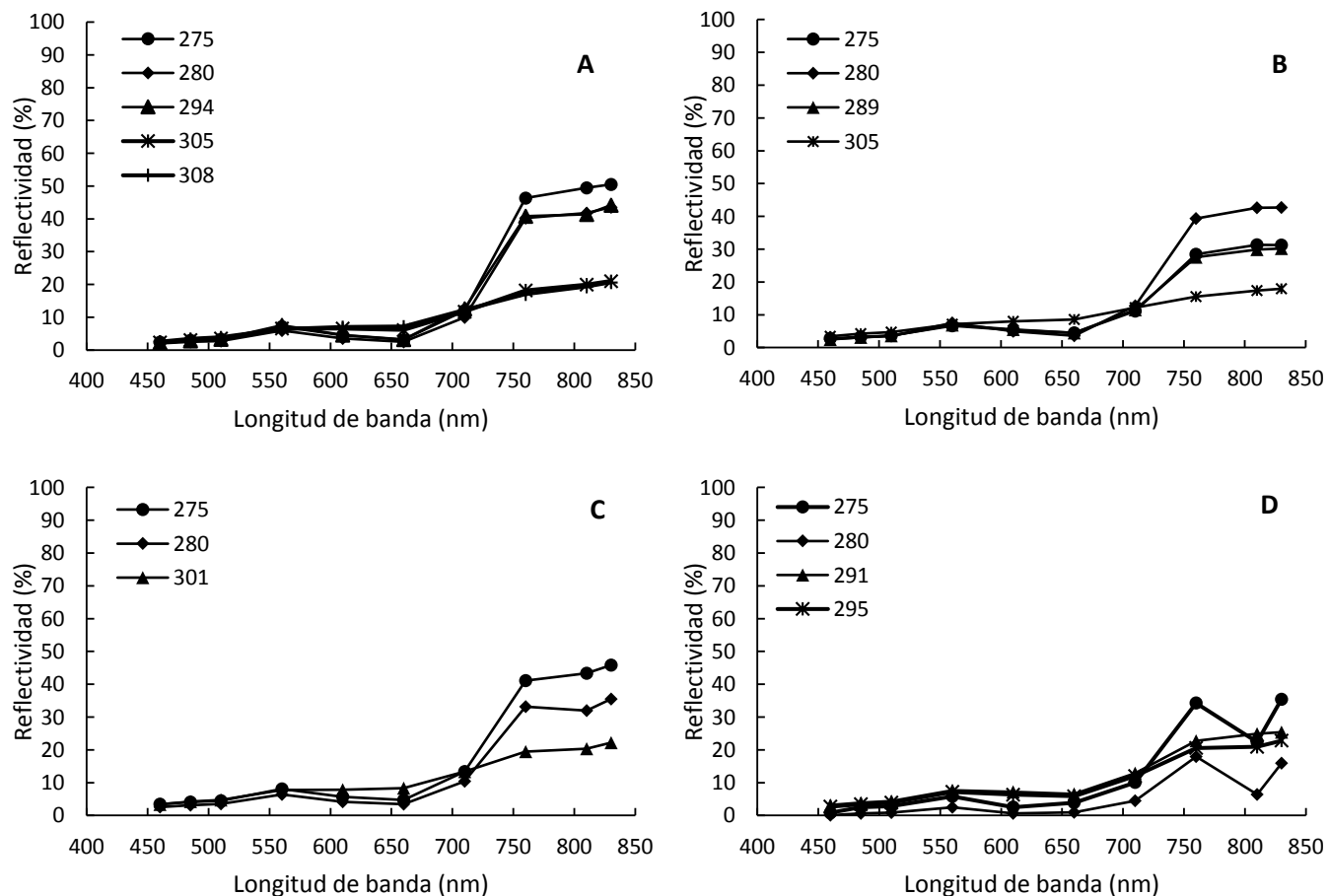


**Figura 3.11** Reflectividad en parcelas tratadas y no tratadas con fungicida (epoxiconazol) cultivadas en José Ma. Morelos, Altamira, Tamaulipas, durante el ciclo primavera-verano 2013. Detección de la roya asiática de soja (*Phakopsora pachyrhizi*) = DJ 277.

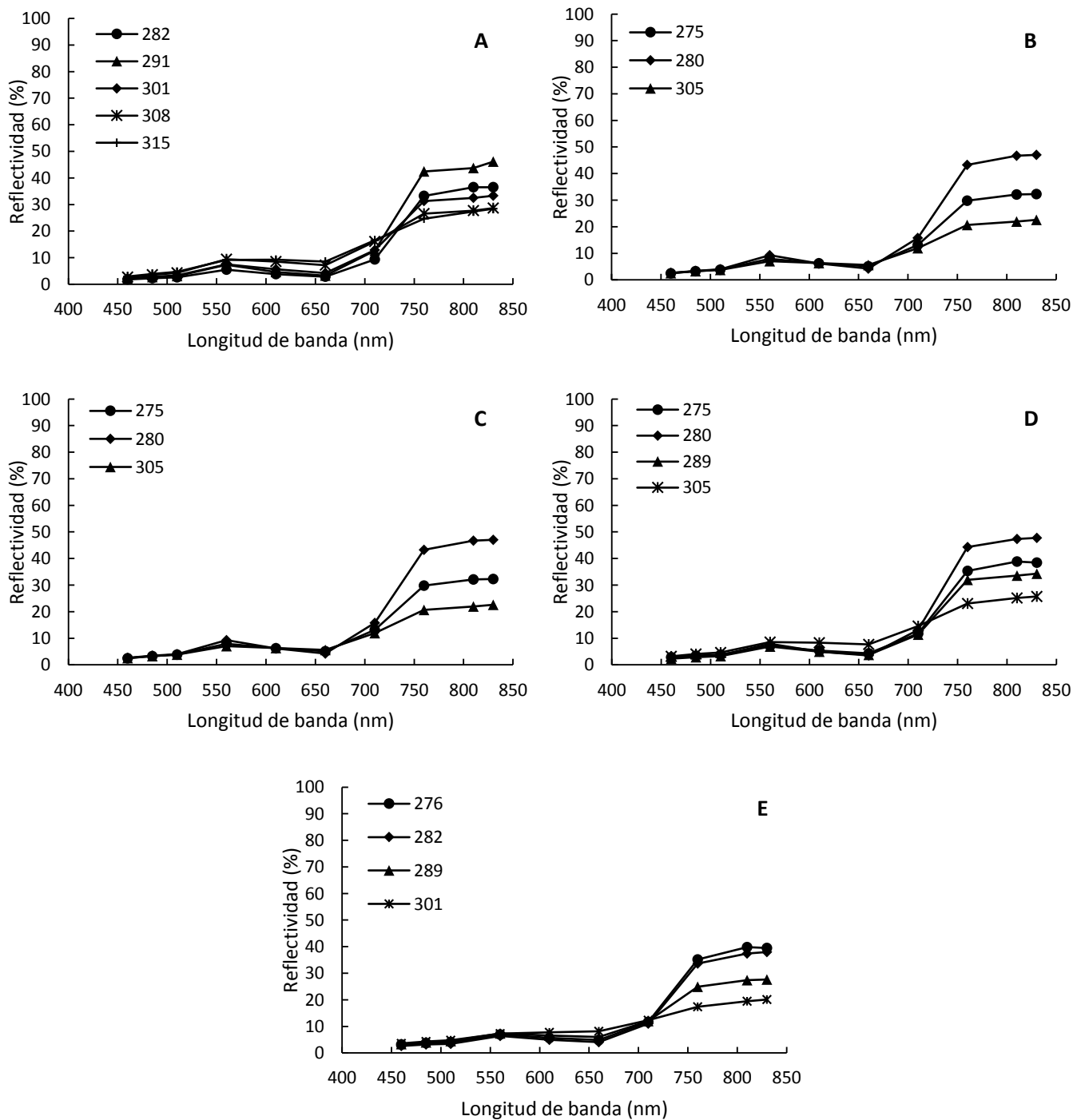
En el C.E. Las Huastecas (lote 2) la reflectancia tuvo valores iniciales entre 33 y 37 %, y finalizó con porcentajes entre 24 y 28 % (Figura 3.13 a). En Tres de Mayo esta variable inició con valores entre 29 y 33 %, posteriormente incrementó a valores entre 43 y 47 %, al final del ciclo la reflectividad decreció y tuvo valores entre 20 y 23 % (Figura 3.13 b). En La Estrella, la reflectividad tuvo un comportamiento similar, los porcentajes incrementaron de la primera (29 a 33 %) a la segunda evaluación (43 a 47 %), pero al final del ciclo de cultivo los porcentajes disminuyeron hasta valores entre 20 y 23 %



(Figura 3.13 c). En Mata del Abra los porcentajes también se incrementaron de la primera (31 a 39 %) a la segunda evaluación (44 a 48 %), pero al final del ciclo de cultivo los porcentajes disminuyeron hasta valores entre 23 y 26 % (Figura 3.13 d). En la Resolana esta variable inició con valores entre 33 y 40 %, posteriormente disminuyó gradualmente hasta valores entre 17 y 21 % (Figura 3.13 e).



**Figura 3.12** Reflectividad en parcelas de observación sin control de la enfermedad cultivadas en a) El 30, b) Cervantes, c) Felipe, d) Gertrudis, durante el ciclo primavera-verano 2013.



**Figura 3.13** Reflectividad en parcelas de observación sin control de la enfermedad cultivadas en a) C.E. Las Huastecas (lote 2), b) Tres de Mayo, c) La Estrella, d) Mata del Abra, e) Resolana durante el ciclo primavera-verano 2013.

### 3.3.2.3 Correlación entre severidad y reflectividad.

La severidad de la roya asiática y la reflectividad del cultivo de las parcelas experimentales tuvieron una estrecha correlación en las bandas del infrarrojo cercano (760 nm) e infrarrojo medio (810 y 830 nm). En Esteros las reflectividades en longitudes de onda de 760, 810 y 830 nm se correlacionaron negativamente con la severidad ( $r < -0.94$   $P < 0.0013$ ;  $r < -0.91$   $P < 0.005$  y  $r < -0.94$   $P < 0.002$  respectivamente). La severidad en el C.E. Las Huastecas también tuvo una correlación negativa en con las longitudes de onda de 760, 810 y 830 nm ( $r < -0.95$   $P < 0.011$ ;  $r = -0.88$   $P = 0.05$  y  $r < -0.92$   $P < 0.02$  respectivamente). En las parcelas establecidas en José Ma. Morelos la severidad nuevamente se correlacionó negativamente con las reflectividades a longitudes de onda de 760, 810 y 830 nm ( $r < -0.89$   $P < 0.04$ ;  $r < -0.87$   $P < 0.05$  y  $r < -0.89$   $P < 0.05$ ). En las parcelas de observación la severidad no tuvo correlación significativa con el patrón de reflectividad.

### 3.4 Discusión

Durante 2012 la severidad fue mínima e incluso no se detectó ocurrencia de la roya asiática de la soya en la mayoría de las parcelas, lo que no permitió detectar una correlación entre esta variable y el patrón de reflectividad. Sin embargo en 2013 aunque la enfermedad tuvo valores menores al 9 % en las parcelas experimentales, la severidad se correlacionó negativamente con la reflectividad en las bandas del infrarrojo cercano y medio, estas bandas han permitido realizar detecciones oportunas de enfermedades en diversos cultivos (Gazala *et al.* 2013; Jones *et al.* 2010; Liu *et al.* 2008). El comportamiento del patrón de reflectividad concuerda con los resultados obtenidos por Cui *et al.* (2009) por lo que estas longitudes de onda pueden ser utilizadas para detectar a la enfermedad mediante el uso de imágenes satelitales y proveer una herramienta no invasiva ni destructiva en el monitorio de la ocurrencia y desarrollo de la roya asiática de la soya.

### 3.5 Conclusiones

La severidad y la reflectividad en longitudes de onda 760, 810 y 860 estuvieron estrechamente correlacionadas en los experimentos bajo control de la roya asiática, por lo que estos patrones pueden ser utilizados como un indicador del nivel de severidad de la roya asiática bajo condiciones de campo en el sur de Tamaulipas. Estos resultados deberán ser confirmados con más evaluaciones ya que en las parcelas donde la enfermedad fue mínima no fue posible detectar dicha correlación.

### 3.6 Literatura citada

- Cárcamo-Rodríguez, A., J. Aguilar-Ríos, y J. R. Hernández. 2006. First report of Asia soybean rust caused by *Phakopsora pachyrhizi* from Mexico. *Plant Disease* 90:1260.
- Cui, D., Q. Zhang, M. Li, Y. Zhao, and G. L. Hartman. 2009. Detection of soybean rust using a multispectral image sensor. *Sens. & Instrumen. Food Qual.* 3:49–56.
- Cummins, G. B., and Y. Hiratsuka. 2003. *Illustrated Genera of Rust Fungi*. 3rd Edition. APS Press. St. Paul Minnesota, USA. 240p.
- Gazala, I. F. S., R. N. Sahoo, R. Pandey, B. Mandal, V. K. Gupta, R. Singh, and P. Sinha. 2013. Spectral reflectance pattern in soybean for assessing yellow mosaic disease. *Indian J. Virol.* 24:242–249.
- Godoy, C. V., L. J. Koga, and M. G. Canteri. 2006. Diagrammatic scale for assessment of soybean rust severity. *Fitopatologia Brasileira* 31:63-68.
- Jensen, J. R. 2007. *Remote sensing of the environment: an earth resources perspective*. 2nd ed. New Jersey: Pearson Education, Inc. Pag. 12–56.
- Jones, C. D., J. B. Jonesand, W. S. Lee. 2010. Diagnosis of bacterial spot of tomato using spectral signatures. *Compt. Electron. Agric.* 74:329-335.
- Liu, Z. Y., J. F. Huang, and R. X. Tao. 2008. Characterizing and estimating fungal disease severity of rice brown spot with hyperspectral reflectance data. *Rice Sci.* 15:232-242.

- Mahlein, A.K., U. Steiner, H. W. Dehne, and E. C. Oerke. 2010. Spectral signatures of sugar beet leaves for the detection and differentiation of diseases. *Prec. Agric.* 11:413-431.
- Moran, S., Y. Inoues, and E. M. Barnes. 1997. Opportunities and limitation for image-based remote sensing in precision farming. *Rem. Sens. Environ.* 61:319-46.
- Moshou, D., C. Bravo, R. Oberti, J. West, L. Bodria, A. McCartney, and H. Ramon. 2005. Plant disease detection based on data fusion of hyperspectral and multi-spectral fluorescence imaging using Kohonen maps. *Real Time Imaging* 11:75-83.
- Nilsson, H.E. 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology. *Annu Rev Phytopathol.* 15:489–527.
- Ono, Y., P. Buritica, and J. F. Hennen. 1992. Delimitation of *Phakopsora*, *Physopella* and *Cerotelium* and their species on Leguminosae. *Mycology Research* 96:825-850.
- Rumpf, T., A. K. Mahlein, U. Steiner, E. C. Oerke, H. W. Dehne, and L. Plümer. 2010. Early detection and classification of plant diseases with support vector machines based on hyperspectral reflectance. *Compt. Electron. Agric.* 74:91-99.
- Sankaran, S., R. Ehsani, S. A. Inch, and R. C. Ploetz. 2012. Evaluation of visible-near infrared reflectance spectra of avocado leaves as a nondestructive sensing tool for detection of laurel wilt. *Plant Dis.* 96:1683-1689.
- Satterthwaite, F.E. 1946. An approximate distribution of estimates of variance components. *Biometrics Bulletin*, 2, 110-114.
- Sikora, E. J., T.W. Allen, K. A. Wise, G. Bergstrom, C. A. Bradley, J. Bond, D. Brown-Rytlewski, M. Chilvers, J. Damicone, E. DeWolf, A. Dorrance, N. Dufault, P. Esker, T. R. Faske, L. Giesler, N. Goldberg, J. Golod, I. R. G. Gómez, C. Grau, A. Grybauskas, G. Franc, R. Hammerschmidt, G. L. Hartman, R. A. Henn, D. Hershman, C. Hollier, T. Isakeit, S. Isard, B. Jacobsen, D. Jardine, R. Kemerait, S. Koenning, M. Langham, D. Malvick, S. Markell, J.J. Marois, S. Monfort, D. Mueller, J. Mueller, R. Mulrooney, M. Newman, L. Osborne, G. B. Padgett, B. E. Ruden, J. Rupe, R. Schneider, H. Schwartz, G. Shaner, S. Singh, E. Stromberg, L. Sweets, A. Tenuta, S. Vaiciunas, X. B. Yang, H. Young-Kelly, and J. Zidek. 2014. A Coordinated Effort to Manage Soybean Rust in North America: A Success Story in Soybean Disease Monitoring. *Plant Disease* 98:864-875.

Wu, D., L. Feng, C. Zhang, and Y. He. 2008. Early detection of *Botrytis cinerea* on eggplant leaves based on visible and near-infrared spectroscopy. Trans. ASABE 51:1133-1139.

## CONCLUSIONES GENERALES

Aunque en diversos países la roya asiática de la soya ha sido devastadora para el cultivo de la soya, en los dos años de evaluación en el sur de Tamaulipas no se presentaron epidemias severas, la incidencia de la enfermedad fue alta, pero la severidad fue baja. Este comportamiento se debe probablemente a un microclima limitante para la enfermedad.

Mediante el modelo genérico de infección de Magarey y un modelo lineal discriminante fue posible determinar ciertos periodos críticos para la infección, sin embargo, se detectaron periodos latentes con duraciones mayores a las reportadas por la literatura, lo que sugiere un comportamiento diferente del patógeno bajo las condiciones del sur de Tamaulipas y que deberá ser abordado en investigaciones posteriores para tener una mejor comprensión de la biología de *P. pachyrhizi*. Los modelos probados en esta investigación deberán ser calibrados con más años de evaluaciones que comprendan más localidades para mejorar el nivel de predicción de la ocurrencia de la roya asiática de la soya en la región Huasteca. De igual manera, es importante determinar los reservorios de inóculo primario del patógeno y las plantas hospedantes existentes en esta región.

El monitoreo de la ocurrencia y desarrollo de la enfermedad puede auxiliarse del patrón de reflectividad ya que los resultados del presente trabajo indicaron que los valores de esta variable a longitudes de onda 760, 810 y 860 nm están fuertemente relacionados con la severidad.

Por otra parte, en este estudio también se comprobó la eficiencia de la aplicación de pyraclostrobin más epoxiconazol en el control de la enfermedad, la cual debería ser una práctica adoptada por los productores de soya del sur de Tamaulipas.