

COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN FITOSANIDAD

FITOPATOLOGÍA

**RESISTENCIA INDUCIDA
A ROYA COMÚN
(*Puccinia sorghi* Schwein),
EN MAÍZ (*Zea mays* L.)**

CARMEN ALICIA ZÚÑIGA SILVESTRE

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2018

CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y
DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe, "**CARMEN ALICIA ZÚÑIGA SILVESTRE**", Alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor "**DR. CARLOS DE LEÓN**", por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis "**RESISTENCIA INDUCIDA A ROYA COMÚN (*Puccinia sorghi Schwein*), EN MAÍZ (*Zea mays L.*)**", y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Texcoco, a 11 de septiembre de 2018



CARMEN ALICIA ZÚÑIGA SILVESTRE



Vo. Bo. del DR. CARLOS DE LEÓN

La presente tesis titulada: "RESISTENCIA INDUCIDA A ROYA COMÚN (*Puccinia sorghi* Schwein), EN MAIZ (*Zea mays* L.)" realizada por la alumna CARMEN ALICIA ZÚÑIGA SILVESTRE, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
FITOSANIDAD
FITOPATOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO:



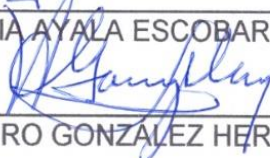
DR. CARLOS DE LEÓN

ASESORA:



M.C. VICTORIA AYALA ESCOBAR

ASESOR:



DR. VÍCTOR ARTURO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, septiembre de 2018

RESISTENCIA INDUCIDA A ROYA COMÚN (*Puccinia sorghi* Schwein), EN MAÍZ (*Zea mays* L.)

Carmen Alicia Zúñiga Silvestre, M. en C,
Colegio de Postgraduados, 2018.

RESUMEN

La roya común *Puccinia sorghi* Schw. forma pústulas en las hojas de plantas de maíz reduciendo el área foliar y la producción de fotoasimilados necesarios para el llenado de grano. El hospedante posee genes para codificar diferentes tipos de proteínas relacionadas con los mecanismos de defensas que impiden el establecimiento del patógeno. Sin embargo, existen plantas susceptibles incapaces de evitar el ataque del patógeno. Esta condición no es una regla ya que existen factores bióticos y abióticos, conocidos como inductores de resistencia, capaces de activar los procesos físico-químicos o morfológicos de defensa para contrarrestar la invasión del fitopatógeno. El híbrido Ceres XR21 es susceptible a *P. sorghi*, por lo que aquí se evaluó bajo un diseño de parcelas sub-subdivididas en dos ciclos primavera-otoño en los años 2016 y 2017, en el que se compararon cinco productos comerciales reportados como inductores de resistencia: *Bacillus subtilis* (Serenade® Max), *Bacillus firmus* +clotianidin (Poncho Votivo®), Fosetil aluminio (Aliette), proteína Harpin Ea (Messenger®), Acibenzolar S metil (Actigard 50 GS) y el fungicida trifloxystrobin + tebuconazol (Consist Max®). Cada producto se aplicó en tres dosis (50, 100 y 150% de la comercial), y por dos vías: suelo y foliar. Para determinar su función como inductores de resistencia, se evaluaron parámetros agronómicos y fisiológicos. Los resultados mostraron que trifloxystrobin + tebuconazol (Consist Max®), aplicado en follaje con el 50 % del producto adicional a la dosis recomendada comercialmente, destacó en la mayoría de variables evaluadas, pues controló mejor al patógeno *P. sorghi* y también aumentó la producción de grano.

Palabras clave: fitopatógeno, inductor de resistencia, mecanismo de defensa.

INDUCED RESISTANCE TO COMMON RUST (*Puccinia sorghi* Schwein), IN MAIZE (*Zea mays* L.)

Carmen Alicia Zúñiga Silvestre, M. en C.,
Colegio de Postgraduados, 2018.

ABSTRACT

The common rust, caused by *Puccinia sorghi* Schw. forms pustules on the leaves of maize plants, reducing the foliar area and the production of photoassimilates necessary for grain filling of grains. The host possesses genes to code different types of proteins, related to defense mechanisms preventing the establishment of the pathogen. However, there are susceptible plants that are incapable of preventing pathogen attack. This condition is not a rule, as there are biotic and abiotic factors known as inducers of resistance capable of activating the physico-chemical or morphological defense processes to counteract the invasion of the pathogen. The Ceres XR21 maize hybrid is susceptible to *P. sorghi*, so here it was evaluated under, a split-split-plot design was established in two spring-autumn cycles in the years 2016 and 2017, in which they were compared five commercial products reported as inducers of resistance: *Bacillus subtilis* (Serenade® Max), *Bacillus firmus* + clotianidin (Poncho Votivo®), Fosetil aluminum (Aliette), Harpin Ea protein (Messenger®), Acibenzolar S methyl (Actigard 50 GS) and the fungicide trifloxystrobin + tebuconazole (Consist Max®). Each one was applied in three doses (50, 100 and 150 % of the commercial), and in two ways: soil and spray. To determine their effect as inducers of resistance, agronomic and physiological parameters were evaluated. The results showed that trifloxystrobin + tebuconazole (Consist Max®), applied on the foliage with and the dose with 50% of the product additional to that recommended commercially (150 %), showed significantly different response in most of the variables evaluated, well controlling better the pathogen *P. sorghi* and also increasing grain yield.

Key words: phytopathogen, resistance inducer, defense mechanism.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las Instituciones y personas por su colaboración para realizar el trabajo de investigación.

Inicialmente, agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (Conacyt), por la beca otorgada para llevar a cabo esta investigación y la etapa profesional.

Al Colegio de Postgraduados, por brindarme la oportunidad de recibir una educación de excelencia, para desempeñar y aportar soluciones con profesionalismo en las actividades agronómicas, demandadas por la sociedad con perspectiva ecológica y económica.

Gracias al Consejo académico conformado por el Dr. Carlos De León a quién agradezco su infinita paciencia, su disponibilidad constante por compartir sus conocimientos con visión científica y crítica. Aprendí mucho de usted, sus enseñanzas engloban muchos aspectos de mí vida. De igual modo agradezco a mis asesores M.C. Victoria Ayala Escobar y el Dr. Víctor Arturo González Hernández por incorporarse con entusiasmo al proyecto, por las valiosas aportaciones que impulsaron la investigación. Logramos las metas planteadas. Gracias equipo.

A todas mis amistades de estancia, por los momentos aprendidos y compartidos. La amistad es una relación afectiva no importa si tienes pocos o muchos amigos, no hay duda que cada uno merece su reconocimiento.

DEDICATORIA

Dedico este escrito a la vida por su infinita bondad y amor. A mis padres Javier Zúñiga Olvera y Esther Silvestre Linares por ser las bases de mi formación, su apoyo incondicional en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien.

A mi amada hija Gabriela Ayelén Zúñiga Silvestre, porque eres mi alegría y motivación. Representas mi presente, mi futuro y lo mejor que me ha pasado.

A mi hermano Víctor Manuel Zúñiga Silvestre por formar parte de mis proyectos personales. Aunque las personas no estén... las enseñanzas permanecen.

A mis hermanas María Elena, Anabel y Martha Adriana, por estar conmigo a cada instante y porque son excelentes personas, y a Rodolfo por permanecer con nosotros íntegramente, por su fortaleza, perseverancia y entusiasmo. La casualidad no existe, todo surge de la más profunda fuente del destino.

Sorprendernos por algo, es el primer paso de la mente hacia el descubrimiento.

(Luis Pasteur)

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
AGRADECIMIENTOS	vi
DEDICATORIA	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE CUADROS DEL ANEXO	xii
INTRODUCCIÓN	1
OBJETIVO GENERAL	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	2
HIPÓTESIS	2
REVISIÓN DE LITERATURA	2
Cultivo de maíz	2
Importancia	3
Roya común (<i>Puccinia sorghi</i> Schwein)	3
Clasificación taxonómica de <i>Puccinia sorghi</i>	4
Ciclo de vida	5
Inducción de resistencia	6
Inductores biológicos y químicos	7
Ventajas y desventajas de los inductores	8
Productos comerciales eficientes para controlar enfermedades	9
Alliete (Fosetil aluminio)	9
Actigard 50 GS (Acibenzolar-S- metil)	9
Messenger (Proteína harpin Ea)	10
Poncho Votivo (<i>Bacillus firmus</i> + clotianidin) y Serenade® Max (<i>Bacillus subtilis</i>)	11
Consist Max® (trifloxystrobin+tebuconazol)	11
MATERIALES Y MÉTODOS	12
Establecimiento y desarrollo del experimento	12
Variables evaluadas	13
Caracterización morfológica de <i>P. sorghi</i>	15
Análisis estadístico	15

RESULTADOS Y DISCUSIÓN	16
Caracterización morfológica de <i>P. sorghi</i>	16
Severidad	17
Curva de crecimiento para el progreso de la enfermedad	18
Índice de altura	19
Intervalo de floración (ASI)	20
Aspecto de planta y mazorca	20
Tasa neta de fotosíntesis	21
Contenido de clorofila (unidades SPAD)	23
Número de mazorcas sanas y porcentajes de mazorcas podridas	24
Rendimiento de grano (t ha⁻¹)	24
CONCLUSIONES	26
LITERATURA CITADA	27
ANEXOS	35

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo biológico de <i>P. sorghi</i> (Pérez, 2010).	5
Figura 2. Estructuras morfológicas de esporas de <i>Puccinia sorghi</i> :.....	16
Figura 3. Severidad de <i>P. sorghi</i> en plantas de maíz en función del tiempo.....	19
Figura 4. Actividad fotosintética en plantas de maíz sometidas a tratamientos de control de patógenos.....	22
Figura 5. Rendimiento de grano de maíz, influenciado por la acción de diferentes tratamientos.	25

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Descripción de tratamientos aplicados en el cultivo de maíz para controlar <i>Puccinia sorghi</i>	13
Cuadro 2. Escala de evaluación para la roya <i>Puccinia sorghi</i>	15
Cuadro 3. Severidad de <i>Puccinia sorghi</i> en función de tratamientos, vías de aplicación y dosis.	18
Cuadro 4. Coeficientes, error estándar y función del modelo polinomial obtenidos con el programa CurveExpert 1.4 en el análisis del grado de severidad de <i>P. sorghi</i>	19
Cuadro 5. Variables de intervalo de floración (ASI), índice de altura, aspecto de planta y mazorca, y tasa neta de fotosíntesis.	22
Cuadro 6. Concentración de clorofila por influencia de los tratamientos.....	23
Cuadro 7. Variables: número de mazorcas sanas, mazorcas podridas y rendimiento en el cultivo de maíz por efecto de tratamientos.	26

LISTA DE CUADROS DEL ANEXO

Cuadro A.1. Análisis de varianza para la variable índice de altura	35
Cuadro A.2. Análisis de varianza para la variable aspecto de mazorca.....	35
Cuadro A.3. Análisis de varianza para la variable aspecto de planta.....	35
Cuadro A.4. Análisis de varianza para la variable intervalo de	36
Cuadro A.5. Análisis de varianza para la variable tasa neta de fotosíntesis	36
Cuadro A.6. Análisis de varianza para la variable tasa neta de fotosíntesis	36
Cuadro A.7. Análisis de varianza para la variable tasa neta de fotosíntesis	37
Cuadro A.8. Análisis de varianza para la variable clorofila (unidades SPAD) Lectura uno (V10) (SC tipo III)	37
Cuadro A.9. Análisis de varianza para la variable clorofila (unidades SPAD) Lectura dos (V12) (SC tipo III)	37
Cuadro A.10. Análisis de varianza para clorofila (unidades SPAD)	38
Cuadro A.11. Análisis de varianza para clorofila (unidades SPAD)	38
Cuadro A.12. Análisis de varianza para clorofila (unidades SPAD)	38
Cuadro A.13. Análisis de varianza para la variable número de mazorcas sanas (SC tipo III).....	39
Cuadro A.14. Análisis de varianza para la variable mazorcas podridas.....	39
Cuadro A.15. Análisis de varianza para la variable rendimiento	39

INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, el maíz (*Zea mays* L.) junto con el arroz (*Oryza sativa* L.) y el trigo (*Triticum aestivum* L.) son cereales primordiales para la alimentación. El maíz, además de ser una fuente importante de alimento, se utiliza para la elaboración de aceites, edulcorantes, dextrinas, etanol, papel, antibióticos, cosméticos, y de compuestos que pueden sustituir la función del petróleo y sus derivados (Grande y Orozco, 2013). El maíz es afectado por plagas y enfermedades que reducen el rendimiento y calidad de grano llegando a causar pérdidas en producción del 34.8 % (INIFAP, 2015). En este cultivo se reportan tres royas: roya polysora (*Puccinia polysora*), roya tropical (*Physopella zea*) y la roya común (*Puccinia sorghi*), que forman pústulas en las hojas y que son más conspicuas cuando se aproxima la etapa de floración. Su fácil adaptación les permite tener una amplia distribución en climas subtropicales, templados y en zonas altas con mucha humedad (CIMMYT, 2004). En el caso de *P. sorghi*, su desarrollo y multiplicación disminuye el área foliar fotosintética y daña la epidermis del hospedante, lo que afecta diferentes procesos fisiológicos y reduce la cantidad de fotoasimilados, provocando menor producción de grano (González, 2005). Los inductores de resistencia son moléculas exógenas capaces de activar mecanismos de defensa de las plantas para protegerse de agresiones fitopatógenas (Gómez y Reis, 2011). Los inductores, de origen biológico o químico, asociados con buenas prácticas agronómicas, protegen los cultivos con éxito hasta el final del ciclo. Por su origen y composición, los inductores causan diferentes efectos en crecimiento y vigor del hospedante, así como también reducen la incidencia y severidad de enfermedades. El conocimiento de estas variables es de utilidad para evaluar el efecto de diferentes inductores en el control de plagas y enfermedades, mediante procesos fisiológicos y agronómicos en las plantas (Jiménez *et al.*, 2012). Con base en lo anterior, en el presente trabajo se evaluaron varios productos con efecto fungicida e inductores biológicos y químicos comerciales efectivos para controlar enfermedades en cultivos hortícolas y solanáceas. En gramíneas no se ha comprobado su potencial en el control de enfermedades, por lo que se evaluarán estos productos como inductores de resistencia a *P. sorghi* en plantas de maíz, en condiciones de campo.

OBJETIVO GENERAL

Inducir resistencia a *P. sorghi* en plantas de maíz.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Comparar el efecto de seis productos biológicos y químicos para controlar la roya común del maíz, usando un testigo absoluto con tratamiento de agua.

- 1) Evaluar tres dosis diferentes de cada producto,
- 2) Determinar la mejor vía de aplicación (suelo o foliar), para controlar la enfermedad, y
- 3) Evaluar la inducción de resistencia y su efecto en variables agronómicas y fisiológicas.

HIPÓTESIS

En el cultivo de maíz, la incidencia y severidad de *P. sorghi* decrece por la acción de inductores de resistencia aplicados vía foliar o en suelo con una dosis determinada, lo que incrementa la producción de grano en comparación con el testigo.

REVISIÓN DE LITERATURA

Cultivo de maíz

Los tres cereales más importantes del mundo son el maíz, trigo y arroz, el primero con producción de aproximadamente 1 046 Mt (FAOSTAT, 2018), por ser un alimento básico en muchos países y de utilidad industrial. Los países y regiones de mayor producción del grano son Estados Unidos, China, la Unión Europea, Brasil y México (Valdés *et al.*, 2012). Este último se ha considerado su centro de origen y domesticación, con importancia cultural, simbólica y espiritual, y es en donde se encuentra la mayor diversidad genética (Ramírez *et al.*, 2014).

La planta posee información genética que facilita su adaptación en climas tropicales, subtropicales y templados, en distintas altitudes, pues prospera desde zonas debajo del nivel del mar (planicies del Caspio) hasta zonas de 3 800 m sobre el nivel del mar,

en la cordillera de los Andes, Perú y Bolivia (FENALCE, 2010). En México el maíz se siembra en más del 50 % de superficie agrícola. En época de lluvia, las localidades en donde se siembra material nativo cubren más del 80 % del área, y su cosecha se destina para autoconsumo. En el resto del área, con solamente 20 %, se siembran maíces mejorados, principalmente variedades mejoradas e híbridos que, por lo general, se destinan a la agroindustria (Fernández *et al.*, 2013).

Importancia

El maíz es el único cereal que puede ser utilizado como alimento en diferentes etapas de desarrollo. Los jilotes o “baby corn”, cosechado antes o al inicio de la formación de estigmas, son consumidas como hortaliza; las mazorcas tiernas o elotes se cocinan en gran escala asadas, horneadas o hervidas, y el grano seco se utiliza en gastronomía, alimento animal y elaboración de productos industriales (Fenalce, 2010). En 1844 se instaló la primera fábrica para refinar el cereal en donde inicialmente se obtenía solamente almidón, pero posteriormente se empezaron a separar sus componentes con procesos físicos y químicos para producir edulcorantes, aceites, añadir dextrosa en el proceso de fermentación, para obtener otros derivados como etanol, bióxido de carbono (CO₂), aminoácidos, antibióticos, biopolímeros empleados en la elaboración de empaques, vasos y películas plásticas que pueden remplazar varios productos derivados del petróleo (Grande y Orozco, 2013). ILSI Argentina (2006) menciona que existen más de 4000 usos diferentes de los subproductos obtenidos del maíz. En los países desarrollados se elaboran plásticos biodegradables que se utilizan en la producción de telas de secado rápido para prendas deportivas, piezas de computadoras y teléfonos, alfombras y envases de alimentos. Otros productos sobresalientes son los biocombustibles, tintas, colorantes, pegamentos, detergentes, jabones, cosméticos, gomas de mascar, bebidas, polvos azucarados, salsas y mayonesas.

Roya común (*Puccinia sorghi* Schwein)

Las plantas de maíz son afectadas principalmente por enfermedades fungosas que afectan el área foliar, como los tizones y las royas conocidas como *chahuixtle*. Se conocen tres royas que afectan al maíz, incluyendo la roya polysora, causada por

Puccinia polysora, la roya tropical inducida por *Physopella zaeae*, y la roya común causada por *Puccinia sorghi*. En esta última inicialmente se forman uredias de color anaranjado con uredosporas, que posteriormente forman telias con teliosporas de color café oscuro, y termina su ciclo en el hospedante alterno *Oxalis* sp. con aecias que contienen aeciosporas (CIMMYT, 2004). Anualmente, la enfermedad afecta a diferentes tipos de maíz con distintos niveles de severidad, dependiendo del genotipo del hospedante, los biotipos del patógeno y las condiciones ambientales, que reducen el rendimiento en genotipos susceptibles y moderadamente susceptibles.

En el proceso de desarrollo y multiplicación, el patógeno daña la epidermis, disminuye el área fotosintética y compite por los fotoasimilados, causando así que las plantas afectadas produzcan granos con menor peso (González, 2005). Una alternativa para controlar la roya común es mediante el empleo de materiales genéticos resistentes. Los programas de mejoramiento mencionan que la roya común genera resistencia ante factores externos, que en estado de desarrollo como urediospora con frecuencia expresa resistencia vertical o parcial conferida por genes dominantes mientras que en fase de teliospora presenta resistencia general u horizontal controlada por múltiples genes. Sus patrones de resistencia son semejantes con los creados por *Puccinia polysora*, de modo que posiblemente exista una recombinación entre ambas especies y por ello solamente se obtengan genotipos con resistencia parcial (Pataky y Pate, 2001). Otra alternativa es la aplicación de inductores de resistencia que pueden activar diferentes mecanismos de protección en materiales susceptibles, o extender la durabilidad de resistencia en cultivos con genes de resistencia a razas de patógenos (Patiño, 2008).

Clasificación taxonómica de *Puccinia sorghi*

Dominio: Eukaryota

Reino: Fungi

Phylum: Basidiomycota

Subphylum: Pucciniomycotina

Clase: Pucciniomycetes

Orden: Pucciniales

Familia: Pucciniaceae

Género: *Puccinia*

Especie: *Puccinia sorghi*

Ciclo de vida

La roya común es un parásito obligado por que necesita tejido vivo para desarrollarse (biótrofico), es macrocíclica ya que tiene diferentes estados esporicos que se designan como espermagonio (espermacios e hifas receptoras) (fase O), aeciospora (fase I), uredospora (fase II), teliospora (fase III) y basidiospora (fase IV). Cada estado esporico es morfológica y funcionalmente diferente. Además, el hongo es heteroico porque necesita dos hospedantes para completar su ciclo de vida. En las plantas de maíz presenta las fases de uredospora (estado infectivo del patógeno), teliospora con estructuras de resistencia con pared gruesa en las que ocurre cariogamia y meiosis para originar basidiosporas que no son infectivas para el maíz pero que infectan a *Oxalis*, su hospedante alternativo, en donde completa su ciclo biológico en estados de pignia y aecídico (Zuluaga *et al.*, 2008). Su ciclo biológico se ilustra en la siguiente figura:

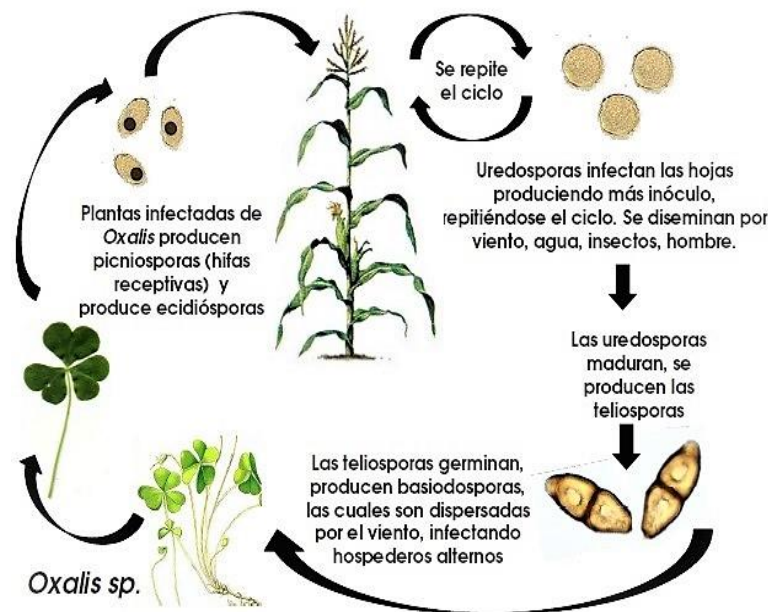


Figura 1. Ciclo biológico de *P. sorghi* (Pérez, 2010).

Las estructuras de *P. sorghi* presentan las siguientes características: Uredosporas de color dorado o marrón canela, de formas esféricas, elipsoides u ovoides, aseptadas, con tamaño de (24-) 26-31 (-33) × (21-) 24-28 (-30) μm , pared de 1.5-2.0 μm de espesor, minuciosamente equinulada, con 3-4 poros germinales ecuatoriales. Las teliosporas son de color café oscuro, oblongas, elipsoides u obovoides, con un septo ligeramente contraído; estas estructuras miden (28-) 30-42 (-50) × (14-) 18-23 (-25) μm , el espesor de pared en los lados mide (1-) 1.5-2 (-3) μm , el ápice mide (4-) 5-7

(-9) μm ; los pedicelos son de color amarillo pálido de hasta 80 μm de largo (McKenzie, 2013). En el envés de las hojas del hospedante alterno *Oxalis* sp. se forman las aeciosporas en pústulas color amarillo o anaranjadas, con 0.2-0.5 mm de diámetro, a menudo dispuestos en círculos. Las aeciosporas se caracterizan por ser delgadas, finamente equinuladas incoloras, de forma globosa (15-17 μm de diámetro) o elíptica (15-20 x 11-14) μm , a veces alargadas de 20-22 x 11-13 μm (Šafránková, 2014).

Inducción de resistencia

Las plantas contienen genes que codifican proteínas morfológicas o funcionales, para formar mecanismos de protección que pueden ser estructuras débiles o sustancias ineficientes en cantidad y con transporte lento, lo que favorece el establecimiento del patógeno, y en consecuencia el hospedante enferma. Sin embargo, existen mecanismos que involucran la participación de moléculas exógenas, conocidas como inductores de resistencia, capaces de activar procesos físico-químicos o morfológicos de defensa que contrarrestan el ataque del fitopatógeno, por lo que la susceptibilidad se considera como una excepción (Riveros, 2001). Los primeros estudios sobre inducción de resistencia se iniciaron en 1901, en los que se planteó la posible activación de mecanismos de defensa en el hospedante mediante estímulos apropiados por algunos factores ambientales como calor, frío y condiciones del cultivo, para protegerse de microorganismos patógenos (Bustamente y Patiño, 2001). En 1933, Chester revisó aproximadamente 200 publicaciones que describían un fenómeno que él denominó “inmunidad fisiológica adquirida”, concepto que incluía al menos tres procesos diferentes que incluyen protección cruzada viral, antagonismo (o control biológico) y resistencia sistémica adquirida (Patiño, 2008). El primer experimento para entender el fenómeno de resistencia se describió en 1959 con la roña del manzano (*Venturia inaequalis*), donde se mostró la capacidad del hospedante para defenderse de agentes fitopatógenos mediante activación de sistemas de defensa por estímulo de factores externos (elicitores), como algunos carbohidratos capaces de reconocer la pared celular del patógeno, enzimas microbianas, polipéptidos, lípidos, flagelinas, hapinas, 13-pep, laminarias, lípidos como siringólido, violicinas, polisacáridos oligogalacturónidos, quitina n-acetilglucosamina, quitosan, sistemina y xiloglucanos, que transmiten el mensaje a un efector intermediado por la proteína kinasa (MAPK) que participa en la fosforilación

de proteínas, y posteriormente emite la señal a los mecanismos de protección para generar resistencia (Dotor y Cabezas, 2014). En el Primer Simposio Internacional de Resistencia Inducida a Enfermedades de Plantas (First International Symposium on Induced Resistance to Plant Diseases), realizado en el año 2000 en Corfú, Grecia, se usó el término de “resistencia inducida” para designar a todos los tipos de respuestas que incitan a las plantas a protegerse de enfermedades e insectos, que incluyen tanto respuestas locales como sistémicas. Esta expresión involucra a los fenómenos de Resistencia Sistémica Adquirida (RSA) y Resistencia Sistémica Inducida (RSI), como conceptos semejantes ya que ambas consisten en la intervención de un agente inductor para activar los mecanismos de defensa. La diferencia entre estas dos resistencias radica en la naturaleza del elicitador (molécula presente en el inductor) y las vías de señalización (Gómez y Reis, 2011). La primera funciona por acumulación de ácido salicílico y proteínas relacionadas con la patogénesis (PRP), y la segunda respuesta es generada por señales asociadas al ácido jasmónico y etileno. Estos compuestos inducen la expresión de genes que codifican proteínas específicas, que incluyen inhibidores de proteasas, enzimas involucradas en la biosíntesis de flavonoides, osmotinas, lipoxigenasas y diferentes proteínas relacionadas con la patogénesis. El ácido jasmónico induce la biosíntesis de enzimas involucradas en reacciones de resistencia en plantas, entre las que destacan polifenol oxidasa, calcona, fenilalanina-amonio liasa (PAL) y HMG-Co-reductasa (HMGR), que intervienen en la producción de fitoalexinas. Además, el compuesto no participa de forma aislada en la activación de los procesos de protección que regula, sino que interactúa con otras rutas de señalización hormonal como las de etileno, ácido salicílico, auxinas y ácido abscísico (Laredo *et al.*, 2017).

Inductores biológicos y químicos

Un producto es considerado inductor cuando cumple tres criterios básicos: i. es capaz de proteger la planta contra fitopatógenos, ii. modifica la interacción planta-patógeno a una asociación incompatible al estimular los mecanismos de defensa, y iii. el compuesto y sus derivados no exhiben actividad antimicrobiana *in vitro* o *in vivo*. No obstante, algunos elicitores estimulan las defensas del hospedante y presentan efecto inhibitorio en los fitopatógenos. Por tanto, un inductor también tiene triple función: activa las defensas en la planta, ejerce labor antimicrobiana y promueve el

crecimiento vegetal. Por su modo de acción, dichos productos constituyen una nueva clase de plaguicidas llamados “fungicidas de cuarta generación” que se comercializan como fertilizantes foliares o bioestimulantes (Acuña y Grabowski, 2012).

Inductores bióticos y abióticos (Baenas *et al.*, 2014):

- a) Inductores bióticos: lipopolisacáridos, polisacáridos (pectina y celulosa de la pared celular, quitosán, quitina y glucanos, alginato, goma arábiga y extracto de levadura), proteínas (glicoproteína, criptogeína, oligandrina, celulasa, pectoliasa y proteínas hidrolizadas), lactoferrina, compuestos y estructuras de patógenos (toxinas, esporas fúngicas, micelio y pared celular microbiana), extractos y hormonas vegetales (ácido jasmónico, jasmonato de metilo, salicilato de metilo, ácido salicílico, etileno, citoquinina y giberelina GA₃).
- b) Inductores abióticos: ácido acético, benzotiadiazol, silicón, etanol, biorregulador prohexadiona, sales inorgánicas (HgCl₂, CuSO₄, CaCl₂ y VSO₄), iones metálicos (Co²⁺, Fe²⁺, Al³⁺, Ag²⁺, Ag⁺, Mn²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺, Pb²⁺ y Cd²⁺), agentes físicos (sequía, CO₂, temperatura extrema, alta presión, alta o baja osmolaridad, radiación UV, estrés salino, heridas y ozono).

Ventajas y desventajas de los inductores

La aplicación de inductores de resistencia activan los genes de resistencia en las plantas por medio de la síntesis de sustancias, y mediante el fortalecimiento de estructuras y de condiciones para impedir la penetración, el desarrollo y colonización del patógeno. Por lo tanto, los inductores de resistencia reúnen varias ventajas: a) no contaminan el ambiente, b) no existe riesgo de crear resistencia en los fitopatógenos, c) activan las vías de síntesis de ácido salicílico, jasmónico y etileno, lo que aumenta la probabilidad de protección ante enfermedades en los cultivos establecidos con material de resistencia genética (Guevara y Rodríguez, 2006), d) son de amplio espectro contra plagas y enfermedades, e) los inductores a base de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR), además de inducir resistencia también benefician al hospedante en la asimilación de agua y nutrientes, proveen fitohormonas y segregan sustancias de antibiosis (Hernández *et al.*, 2004), f) activan los mecanismos de defensa sin alterar el genoma del hospedante, g) se pueden aplicar

de manera preventiva y tienen efecto sistémico persistente, h) aseguran un control eficiente y de bajo costo, i) las aplicaciones son de menor número en comparación con los fungicidas convencionales, j) son biodegradables, no pesticidas, k) son inocuos para personas, animales y las propias plantas, y l) incrementan el rendimiento. Como desventajas, tales productos: a) proporcionan resistencia parcial, incompleta, y b) la inducción de la resistencia requiere un costo fisiológico al activarse en condiciones en donde su expresión no es necesaria, así como en ausencia de patógenos (Gómez y Reis, 2011).

Productos comerciales eficientes para controlar enfermedades

Alliete (Fosetil aluminio)

Este producto actúa como fungicida sistémico, con capacidad de translocación ascendente por el xilema y descendente por el floema. Al aplicarlo en la planta penetra en menos de una hora y se transloca con el flujo de la savia. Ejerce su acción en dos vías: a) vía directa, por bloqueo de la esporulación del hongo impidiendo la formación de esporangios, esporocistos, oosporas y clamidosporas, y b) vía indirecta, por estimulación en las defensas naturales del hospedante. Asegura una protección preventiva de larga duración y acción curativa durante 2-3 días después de la infección. Es eficaz sobre oomicetos, especialmente en peronosporales, sin favorecer la selección de cepas resistentes. Se degrada rápidamente tanto en suelos húmedos como en secos, en condiciones aerobias y anaerobias, con una vida media de 1-1.5 h en suelos limosos y arcillosos y de 20 min en arenosos. El fosetil se recomienda en cultivos de berenjena, calabacita, calabaza, espinaca, hortalizas del género *Brassica*, lechuga, melón, ornamentales herbáceas, ornamentales leñosas, pepino, pimiento, sandía, tabaco, tomate, papa, vid y cítricos (Terralia, 2018).

Actigard 50 GS (Acibenzolar-S- metil)

Este compuesto se trasloca sistemáticamente vía floema y xilema. Activa los mecanismos de defensa en las plantas al influir en diversos procesos: expresión de genes, actividades enzimáticas, producción de lignina y compuestos fenólicos relacionados con las vías de señalización de resistencia. Controla enfermedades

inducidas por *P. capsici* en chile pimiento, *P. cactorum* y *P. fragariae* var. *fragariae* en fresa, *P. capsici* en calabaza y *Pythium aphanidermatum* en *Curcuma longa* (Cosme *et al.*, 2015). También es capaz de proteger al hospedante de enfermedades ocasionadas por hongos, bacterias, nematodos, virus y fanerógamas parásitas (Mejía *et al.*, 2009). Romero *et al.* (2001) reportaron que el producto no tiene actividad antimicrobiana pero puede ser tóxico para la planta por su condición residual; en el cultivo de pimiento, al aplicar Acibenzolar-S-metil con intervalos de cinco días, estos investigadores observaron que después de la segunda aplicación las plantas mostraron síntomas de toxicidad y al final del ciclo presentaron reducción en crecimiento, número y tamaño de folíolos, así como en rendimiento, por lo que recomendaron hacer una sola aplicación del producto.

Messenger (Proteína harpin Ea)

En el comercio la proteína harpin Ea se distribuye con dos nombres, Messenger y Extend, que se recomiendan para potencializar el crecimiento vegetal y controlar enfermedades virales, fungosas y algunas poblaciones de insectos. Induce reacción de hipersensibilidad y estimula las vías de ácido salicílico (Capdeville *et al.*, 2008). Según Salamanca y Alvarado (2012), la bacteria *Erwinia amylovora* produce la proteína harpin, la cual no actúa directamente sobre el patógeno pero estimula las vías de protección del hospedante y así genera mayor vigor y promueve precocidad, reduce la acidificación, aumenta la biomasa en raíces e incrementa el rendimiento. Es capaz de controlar nematodos, como *Tylenchus semipenetrans* y *Rotylenchus reniformis*. También, contrarresta el ataque de *Penicillium expansum* en frutas en poscosecha, y se ha reportado que al aplicar la proteína en tomate, en cuatro aplicaciones con intervalos de quince días, disminuye la severidad de *Erysiphe polygoni* y, al mismo tiempo, las plantas mejoran su aspecto físico y aumentan la producción. Además, la proteína se degrada rápidamente sin efecto toxicológico sobre mamíferos y el ambiente. Gómez y Reis (2011) indican que el período de duración de un inductor depende de su composición, y que la proteína harpin se degrada más rápido (30 días) en comparación a Acibenzolar-S-metil (60 días).

Poncho Votivo (*Bacillus firmus* + clotianidin) y Serenade® Max (*Bacillus subtilis*)

Las bacterias del género *Bacillus* controlan poblaciones patógenas, favorecen la absorción de nutrientes en las plantas e influyen en la expresión de genes relacionados con las vías de señalización de resistencias del ácido salicílico, ácido jasmónico y etileno, producen sideróforos, enzimas detoxificadoras y líticas con actividad antimicrobiana (Gámez *et al.*, 2017). En programas de biocontrol, el empleo de *Bacillus subtilis*, es una herramienta eficiente para disminuir problemas fitosanitarios, por su habilidad para producir metabolitos primarios y secundarios efectivos para suprimir algunos patógenos como *Fusarium*, *Pythium*, *Phytophthora*, *Rhizoctonia*, *Sclerotinia*, *Septoria*, y *Verticillium* (Layton *et al.*, 2011). Las bacterias del género *Bacillus* sintetizan auxinas, citoquininas, vitaminas y etileno que promueven el desarrollo de las plantas. La acción combinada de *Bacillus* con otros compuestos como *Larrea tridentata* o con diferentes especies de *Bacillus*, disminuyen la severidad de patógenos como *Rhizoctonia solani* en cultivos de papa, al mejorar la producción del follaje y calidad en los tubérculos (Hernández *et al.*, 2008). Los *Bacillus* facilitan la solubilización de fosfato y la fijación biológica del nitrógeno, por lo que pueden reemplazar la aplicación química del elemento, y las bacterias se pueden aplicar en los cultivos para incrementar la producción y al mismo tiempo cuidar al suelo y al ambiente (Corrales *et al.*, 2016).

Consist Max® (trifloxystrobin+tebuconazol)

Los fungicidas con estrobilurinas se incluyen entre los fungicidas Quinona (QoI), por actuar en el sitio de unión externa de quinol del complejo citocromo bc. tebuconazole es un triazol que interfiere en el metabolismo de los patógenos fúngicos, principalmente al inhibir la biosíntesis del ergosterol. La combinación de trifloxystrobin 25% + tebuconazole 50% no tiene efecto residual, por lo que es seguro para la salud humana y ambiental (Singh y Singh, 2014). Las estrobilurinas pertenecen al grupo de fungicidas de origen natural, derivados del ácido β -metoxiacrílico producido por los hongos *Strobilurus tenacellus*, *Oudemansiella mucida* y *Myxococcus fulvus*. Al aplicarlas en las plantas, las estrobilurinas son absorbidas en una proporción relativamente baja y con acción translaminar, que se extienden en las hojas en sentido

acrópeto lento, actúan sobre el micelio del hongo en esporulación y durante la germinación de esporas, por lo que poseen efectos preventivos, curativos y erradicantes. El producto se puede aplicar en forma de aspersión foliar, en tratamiento de semilla y suelo para controlar enfermedades como *Pythium* spp y *Rhizoctonia solani*. Además, son eficientes para controlar ascomicetes como *Alternaria solani*, *Blumeria graminis*, *Magnaporthe grisea*, *Mycosphaerella graminicola*, *M. fijiensis*, *Venturia inaequalis*, basidiomicetos del género *Puccinia*, y oomicetos como *Plasmopara viticola* (Bartlett et al., 2002).

MATERIALES Y MÉTODOS

Establecimiento y desarrollo del experimento

El estudio se realizó en el Campo Experimental del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Edo. de México con coordenadas 19° 28' 4.26" N y 98° 53' 42.18" W, a 2250 de altitud, cuyo clima es templado subhúmedo con oscilación térmica entre 5 y 7 °C, con lluvias en verano; temperatura media anual de 15 °C, y corresponde a un clima clasificado como Cb (w₀) (w) (i') por García (1988).

Las siembras se realizaron el 4 de abril del 2016 y 6 de abril del 2017, con el híbrido Ceres XR21 reportado como susceptible a *P. sorghi*. Todo el experimento incluyó 126 parcelas de 7.2 m² cada una, con 2 surcos de 3 m de largo a distancia de 0.80 m entre surcos. Se sembraron 22 plantas por parcela, con 0.16 m entre plantas.

Las prácticas de manejo del cultivo se realizaron conforme al sistema del Campo Experimental del Colegio de Postgraduados. Después de sembrar se aplicaron cuatro riegos por gravedad, y luego se suspendieron cuando se establecieron las lluvias. Se fertilizó con una dosis de 160N-60P-00K. Se realizó escarda y aporque con tractor 20 días después de emerger la planta. El control de malezas se realizó manualmente, y no hubo necesidad de controlar plagas ni enfermedades, a excepción de los tratamientos estudiados para controlar el patógeno de interés.

La estrategia para controlar la roya común *P. sorghi*, consistió en tres puntos importantes: 1) aplicar cinco productos reportados como inductores de resistencia y un fungicida, 2) a partir de la dosis comercial recomendada seleccionar otras dosis para conocer si son capaces de superar la comercial, y 3) determinar si los productos funcionan mejor cuando se aplican al suelo o al área foliar. Para esto se trabajó con

el diseño experimental de parcelas sub-sub divididas con tres repeticiones, en donde las parcelas mayores representan los seis productos: el fungicida trifloxystrobin + tebuconazole (Consist Max®), y cinco inductores de resistencia: *Bacillus subtilis* (Serenade® Max), *Bacillus firmus* + clotianidin (Poncho Votivo), fosetil aluminio (Alliete), proteína harpin Ea (Messenger), Acibenzolar S metil (Actigard 50 GS) y un testigo (agua). Las subparcelas correspondieron al modo de aplicación de los tratamientos: al suelo en el momento de siembra, y al área foliar en etapa V6-V7. Como sub-subparcelas se incluyeron tres dosis en cada tratamiento: la mitad (50 %) de la dosis recomendada, la dosis recomendada (100 %), y la dosis con el 50 % del producto adicional a la recomendada comercialmente (150 %) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Descripción de tratamientos aplicados en el cultivo de maíz para controlar *Puccinia sorghi*.

Parcelas mayores	Subparcelas	Sub-subparcelas		
		50 %	Comercial (100%)	150 %
Actigard 50 GS (Acibenzolar metil)	Suelo (siembra) Foliar (V7)	20 g/ha	40 g/ha	60 g/ha
Alliete (Fosetil aluminio)	Suelo (siembra) Foliar (V7)	1.25 kg/ha	2.5 kg/ha	3.75 kg/ha
Consist Max® (trifloxystrobin+tebuconazol)	Suelo (siembra) Foliar (V7)	0.15 L/ha	0.30 L/ha	0.45 L/ha
Messenger (Proteína harpin Ea)	Suelo (siembra) Foliar (V7)	125 g/ha	250 g/ha	375 g/ha
Poncho Votivo (<i>Bacillus firmus</i> + clotianidin)	Suelo (siembra)	Aplicar por 80 000 semillas		
	Foliar (V7)	40 mL	80 mL	120 mL
Serenade® Max (<i>Bacillus subtilis</i>)	Suelo (siembra) Foliar (V7)	1.5 kg/ha	3 kg/ha	4.5 kg/ha

Variables evaluadas

Para determinar el efecto de los tratamientos en la inducción de resistencia a *Puccinia sorghi* en plantas de maíz, se midieron las siguientes características agronómicas:

- 1. Severidad de la enfermedad.** Se registró desde el inicio de infección en el mes de agosto en los ciclos (2016 y 2017), a través de cinco muestreos con intervalos de 15 días, utilizando una escala de 5 niveles de daño (Cuadro 2).
- 2. Intervalo de floración (ASI)** por sus siglas en inglés anthesis-silking interval, que se calcula con los días del 50% de floración femenina menos el 50% de anthesis.
- 3. Altura de planta y de**

mazorca. 4. **Aspecto de planta y aspecto de mazorca**, mediante una escala de 1-5, en donde 1= Muy bien (100%), 2= Bien (90%), 3= Regular (80%), 4= (70-60%) suficiente, y 5= (60-0%) insuficiente. 5. **Número de mazorcas sanas y podridas.**

6. La cosecha se realizó cuando el grano alcanzó la madurez fisiológica, considerando como indicador la capa de abscisión (capa negra) en la base del grano. El contenido de humedad del grano se estimó en cada tratamiento con el equipo Dickey John miniGAC plus, ajustando la humedad a 15 %. Los procedimientos y las unidades de medición empleados en el registro de datos se describen en CIMMYT-IBPGR (1991), Bolaños y Edmeades (1996) y Ángeles *et al.* (2010).

Como variables fisiológicas se evaluaron:

1. **Clorofila total (unidades Spad)**, que se midió con el aparato Spad 502 (Minolta Camera Co. Ltd., Japan). A partir de 60 días después de la siembra, se iniciaron las lecturas de clorofila con intervalos de 15 días. En cada parcela se realizaron tres lecturas en la parte media de la hoja mazorca de una planta, todas entre las 11 y las 13 horas; el promedio de dichas lecturas se registró en la libreta de campo para su posterior análisis estadístico. 2. **Tasa neta de fotosíntesis (An)**: en cada parcela se seleccionó una hoja con los mismos criterios utilizados en la medición de clorofila. Las tasas netas de la fotosíntesis se expresan como índices de asimilación del CO₂ ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), y se midieron con el aparato portátil LI-COR 6400 (LICOR, Inc. USA) operando en modo abierto para permitir la circulación del aire con atmósfera controlada alrededor de la fracción medida de la hoja durante aproximadamente 1 min, manteniendo constante el nivel del CO₂ del aire que ingresaba y tomando la lectura cuando el coeficiente de variación era de 2% o menos.

La medición de las tres repeticiones experimentales requirió de dos días, el primer día se tomaron la primera y segunda repetición del experimento, y al siguiente día se midió la tercera repetición. En el proceso de medición se aseguró que los niveles de radiación fotosintéticamente activa estuvieran en un mínimo de 1000 a 1200 $\mu\text{mol fotonos m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, y el flujo de aire se ajustó de 400-408 $\mu\text{moles mol}^{-1}$.

Las lecturas se hicieron en tres etapas de desarrollo del maíz: V10, VT y R5, según la escala de Hanway (1966). El procedimiento y unidades de medición, se describió por Rincón y Ligarreto (2010) y Sandoval *et al.* (2010).

Cuadro 2. Escala de evaluación para la roya *Puccinia sorghi*.

Escala	Severidad	Área foliar con pústulas
1	Resistente	10 %
2	Moderadamente Resistente	20-30 %
3	Moderadamente susceptible	40-50 %
4	Susceptible	60-70 %
5	Muy susceptible	100 %

Caracterización morfológica de *P. sorghi*

En el campo se recolectaron hojas de *Zea mays* y *Oxalis* sp. con síntomas de infección del patógeno, y posteriormente se trasladaron al Laboratorio de Enfermedades Bacterianas de Fitosanidad, Montecillo, Méx., para hacer las preparaciones semipermanentes del tejido vegetal infectado.

Inicialmente, las lesiones formadas por el hongo se observaron en un microscopio estereoscópico Velab (modelo VE-S1). Enseguida se procedió a cortar el material vegetal con navaja y colocado en cubreobjetos con glicerol al 40%. Para caracterizar morfológicamente las estructuras del patógeno, se tomaron medidas de las estructuras con el objetivo 40x del fotomicroscopio Carl Zeiss (modelo PMIII)

Análisis estadístico

González *et al.*, 2007 mencionan que en algunas investigaciones donde las variables se miden en varios períodos de tiempo sobre la misma unidad experimental, los datos registrados pueden analizarse estadísticamente mediante tres opciones: a) análisis univariados con la instrucción RANDOM del GLM, b) análisis univariados o multivariados a través de transformaciones lineales mediante la instrucción REPEATED del GLM y c) con modelos mixtos de covarianza con el procedimiento MIXED.

En el presente estudio, para analizar los datos de las variables agronómicas y fisiológicas en las plantas de maíz en los años 2016 y 2017, se sometieron al análisis de varianza con el modelo lineal mixto (Proc Mixed) con la instrucción RANDOM.

La separación de medias se hizo mediante GLM test DMS Fisher ($p \leq 0,05$) con el paquete SAS 9.4. Con los datos de severidad después de realizarles la comparación de medias ($p \leq 0,05$), con el paquete CurveExpert 1.4. se hizo la elección del modelo del crecimiento de *Puccinia sorghi* a través del tiempo, y el crecimiento que mostró en las plantas tratadas que resultaron con menor severidad del patógeno.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización morfológica de *P. sorghi*

En las preparaciones se observaron tres estructuras de esporas: uredosporas, teliosporas y aeciosporas (Fig. 2). En las hojas de maíz se encontraron dos de ellas: a) uredosporas unicelulares, color café claro, oblongas con $29.65 \times 26.38 \mu\text{m}$, grosor de pared $1.20 \mu\text{m}$, y b) teliosporas, color marrón, bicelulares, con $36.2 \times 19.43 \mu\text{m}$, grosor de pared en los lados $1.05 \mu\text{m}$, grosor del ápice $5.15 \mu\text{m}$, características que coinciden con el reporte de McKenzie (2013). En el hospedante alterno, *Oxalis* sp. se encontraron aeciosporas de $16.9 \times 15.9 \mu\text{m}$, unicelulares, forma globosa, color amarillo en el centro, la pared delgada, hialina, ligeramente equinulada que coinciden con los reportados por Šafránková (2014) para *Puccinia sorghi*.

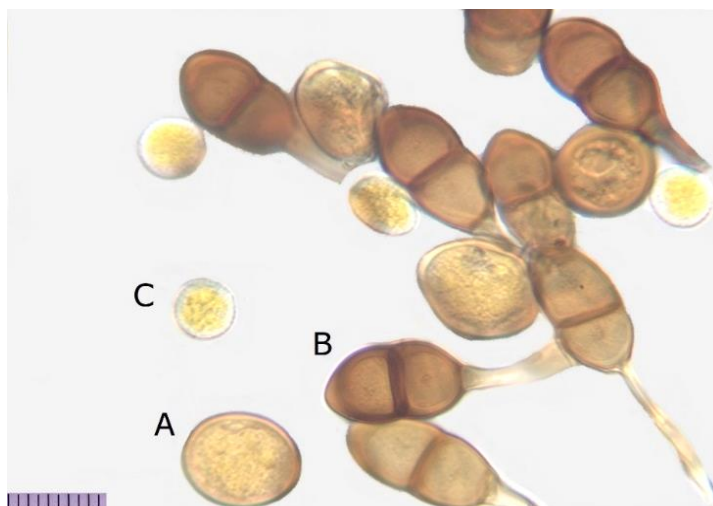


Figura 2. Estructuras morfológicas de esporas de *Puccinia sorghi*: A) uredosporas, B) teliosporas, y C) aeciosporas.

Severidad

En los cinco muestreos realizados de todos los tratamientos, Consist Max® (trifloxystrobin (estrobilurinas) + tebuconazole) brindó mayor protección a las plantas de maíz contra el hongo *P. sorghi*, al disminuir significativamente ($\alpha=0.05$) la severidad del patógeno. Con respecto a la vía de aplicación, a partir del tercer muestreo la vía foliar (V7) tiene mayor influencia significativa, para controlar al patógeno a diferencia de la aplicación en el suelo. Entre las dosis no se detectaron diferencias significativas (Cuadro 3). Comportamiento similar fue encontrado por Shah y Dillar (2010) quienes controlaron *P. sorghi* en híbridos de maíz dulce, al aplicar estrobilurinas en umbrales de 1, 10 y 20% con una aplicación foliar.

La aplicación preventiva es conveniente, según informaron Rodríguez *et al.* (2015) después de aplicar estrobilurinas en tres híbridos en las etapas V10 y R1, cuyos resultados indicaron menor severidad al aplicar el producto en estado fenológico V10. Carmona *et al.* (2011) en plantas de maíz aplicaron trifloxystrobin+ tebuconazole en vía foliar con diferentes dosis (mitad de la dosis recomendada, dosis recomendada y el doble de la dosis recomendada), y a diferentes momentos de aplicación; encontraron significativamente menor severidad de *P. sorghi* en las plantas tratadas con todas las dosis en comparación con el testigo, por lo que recomiendan realizar las aplicaciones cuando las plantas presenten 1% de severidad en la hoja de espiga. Los demás inductores de resistencia estudiados en el presente trabajo, *Bacillus subtilis* (Serenade® Max), *Bacillus firmus* + clotianidín (Poncho Votivo), Fosetil aluminio (Alliete), proteína harpin Ea (Messenger) y Acibenzolar S metil (Actigard 50 GS), también lograron inducir resistencia aunque en menor grado que Consist Max®, y todos ellos superaron al testigo absoluto que mostró la mayor severidad de daño a partir del muestreo tres (Cuadro 3).

Cuadro 3. Severidad de *Puccinia sorghi* en función de tratamientos, vías de aplicación y dosis.

Severidad de <i>Puccinia sorghi</i>					
Parcelas mayores	Muestreo 1	Muestreo 2	Muestreo 3	Muestreo 4	Muestreo 5
Consist Max®	0.838 a	1.166 a	1.397 a	1.769 a	2.111 a
Serenade® Max	1.250 b	1.708 b	1.566 a	2.025 bc	2.441 b
Actigard	1.027 ab	1.363 ab	1.452 a	1.869 ab	2.305 b
Alliete	1.019 ab	1.291 ab	1.500 a	1.872 ab	2.319 b
Poncho Votivo	1.022 ab	1.391 ab	1.588 ab	1.991 abc	2.386 b
Messenger	1.025 ab	1.322 ab	1.566 a	1.966 ab	2.350 b
Testigo	1.091 ab	1.375 ab	1.775 b	2.211 c	2.727 c
Promedio	0.746	1.374	1.549	1.957	2.37
DMS (0.05)	0.216	0.427	0.195	0.240	0.17
CV (%)	22.29	47.07	11.263	11.142	8.02
Subparcelas					
Aplicación foliar	1.025 a	1.377 a	1.502 a	1.891 a	2.284 a
Aplicación en suelo	1.017 a	1.371 a	1.596 b	2.024b	2.469 b
DMS (0.05)	0.132	0.263	0.089	0.1332	0.15
Sub subparcelas					
Dosis 50%	1.041 a	1.336 a	1.559 a	1.969 a	2.348 a
Dosis 100%	1.005 a	1.477 a	1.534 a	1.917 a	2.355 a
Dosis 150%	1.016 a	1.308 a	1.554 a	1.986 a	2.427 a
DMS(0.05)	0.099	0.282	0.076	0.095	0.083

Valores señalados con la misma letra dentro de la misma columna, no difieren estadísticamente entre sí (Tukey ≤ 0.05).

Curva de crecimiento para el progreso de la enfermedad

En el análisis de comparación de medias ($p \leq 0,05$), las plantas tratadas con Consist Max® mostraron significativamente menor severidad de daño causado por *P. sorghi* que las plantas del testigo (Cuadro 3), por lo que se realizó el análisis de regresión no lineal con el paquete estadístico CurveExpert 1.4. para modelar el crecimiento del patógeno en función del tiempo.

El grado de severidad a través del tiempo se ajusta a un modelo polinomial (Fig. 3 y Cuadro 4), y la curva de crecimiento en el testigo muestra el mayor aumento de severidad a través del tiempo que las plantas tratadas con Consist Max® (trifloxystrobin + tebuconazole) aunque ambos tratamientos presentaron el mismo tipo de curva.

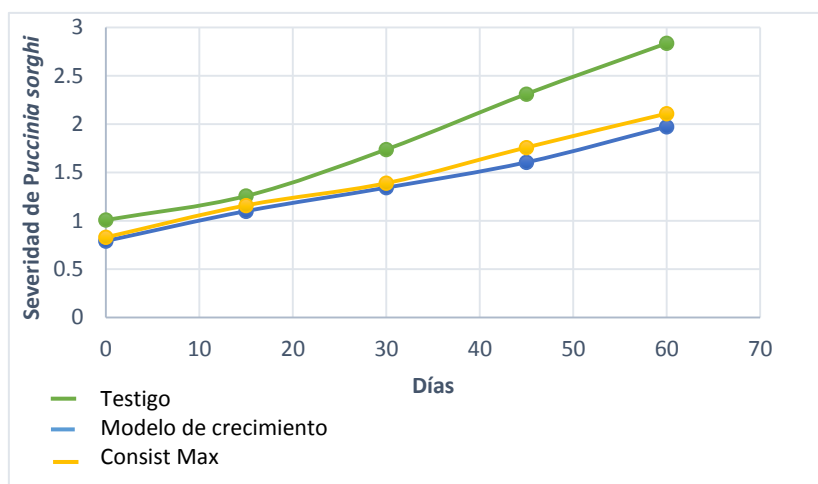


Figura 3. Severidad de *P. sorghi* en plantas de maíz en función del tiempo.

Cuadro 4. Coeficientes, error estándar y función del modelo polinomial obtenidos con el programa CurveExpert 1.4 en el análisis del grado de severidad de *P. sorghi*.

Modelo polinomial	Función $y=a+bx+cx^2+dx^3$	
	Testigo	Consist Max®
Coefficientes	a= 1.0088036117 b= 0.0056437588 c= 0.0008328177 d= -0.000006983	a= 0.791948833 b= 0.024686666 c= -0.00033734 d= 0.000004241
Coefficiente de correlación	0.8979436	0.7163295
Error estándar	0.3377	0.4077

Índice de altura

El tallo acumula los nutrientes elaborados en el proceso de fotosíntesis y que luego son transferidos a la mazorca durante el llenado de grano. Con los datos de altura de planta y de mazorca se obtiene el índice de altura = altura de mazorca/altura de planta (IAM/AP) (Ángeles *et al.*, 2010).

Se espera el valor 0.5 como el punto de inserción deseable para la mazorca, que determina la tolerancia de acame. En este estudio los resultados del índice de altura no mostraron diferencias significativas entre tratamientos, y sus valores variaron de 0.44-0.46 (Cuadro 5), por lo que el rango es aceptable e indica suficiente firmeza del tallo para evitar la ruptura por acción del viento. De acuerdo con Reynoso *et al.* (2014), los valores de 0.4-0.5 garantizaron menor probabilidad de acame en tallo y raíz de 17 híbridos evaluados en diferentes zonas del centro de México. Cai *et al.* (2012)

encontraron que la altura está determinada por QTLs y mencionan que es importante medir la altura de planta y de mazorca porque su estrecha relación condiciona la resistencia de acame, la fotosíntesis de dosel y el rendimiento de grano; además la altura de planta y de mazorca no solo se determina genéticamente, sino que también es regulada por condiciones ambientales y la aplicación de productos como los fertilizantes. Palafox *et al.* (2016) mencionan que los programas de mejoramiento genético buscan genotipos con relación entre la altura de mazorca y de planta, inferiores o cercanos a 0.5 puesto que valores superiores a éste pueden presentar problemas de acame, por tener la posición de mazorca arriba de la mitad de altura total de la planta.

Intervalo de floración (ASI)

En el estudio se observó que Serenade® Max destacó por presentar ASI inferior ($\alpha=0.05$), que los tratamientos Messenger y testigo, con intervalos de floración de 1.77 días (Cuadro 5) vs. 2.16 y 2.22 días. Los demás tratamientos dieron valores intermedios de ASI. Los valores del intervalo de floración indican que la aparición de estigmas se presentó después de la emisión de polen, lo que permite asegurar la receptividad de los estigmas durante la antesis, y que las plantas no presentaron problemas de protandria ni de protoginia. Según Noriega *et al.* (2011), primero debe emerger la espiga para iniciar la liberación de polen (antesis), uno o dos días antes de la emisión de estigmas. En condiciones de campo, entre mayor sea la sincronía entre el desarrollo de espiga y los estigmas mayor será la probabilidad de polinización de estigmas. MacRoberth *et al.* (2015) indican la importancia de conocer el tiempo de duración en la producción de polen y la emisión de estigmas (7-14 días), ya que un fuerte desfase entre la floración masculina y la femenina repercutirá en la producción de grano.

Aspecto de planta y mazorca

Para la variable aspecto de planta, valorada cualitativamente con una escala 1-5 (CIMMYT-IBPGR 1991), en donde 1= Muy bien (100%), 2= Bien (90%), 3= Regular (80%), 4= (70-60%) suficiente y 5= (60-0%) insuficiente, se obtuvieron diferencias significativas entre los productos aplicados, donde sobresalen el tratamiento Actigard,

seguido de Alliete y Consist Max® (Cuadro 5) pues las plantas tratadas mostraron aspecto deseable en color, uniformidad de altura y vigor. En aspecto de mazorca, Actigard y Consist Max® superaron significativamente ($\alpha=0.05$) al testigo en tamaño de mazorca y llenado de grano uniforme.

Tasa neta de fotosíntesis

En las tres lecturas de fotosíntesis, la primera realizada en la etapa V10 no mostró diferencia significativa entre los tratamientos ($\alpha=0.05$) cuyos valores fluctuaron de 27.7 a 31.9 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. En la segunda lectura realizada en la etapa VT que corresponde a la floración masculina, en donde todas las plantas, con excepción de las tratadas con Messenger aumentaron la tasa fotosintética con diferencia significativa sobre las del testigo (40.81 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y las de Actigard (39.03 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Este incremento registrado en la etapa fenológica VT se atribuye al funcionamiento óptimo del hospedante para elaborar la energía necesaria en la formación de sistemas reproductivos y de los fotoasimilados requeridos en la iniciación de la formación de grano. Entre las vías de aplicación no hubo diferencias significativas, y entre dosis sobresalió con significancia la menor (50 %).

En la última lectura registrada en etapa R5 que corresponde a la formación de grano dentado, las plantas tratadas con Consist Max®, Poncho y el testigo destacaron significativamente ($\alpha=0.05$), con valores de 23.48, 23.16 y 23.43 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, que superaron al Actigard que tuvo un valor de 8.09 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ aunque había mostrado ser el mejor en fotosíntesis el segundo muestro; entre las vías de aplicación no se detectaron diferencias significativas, y entre las dosis sobresalieron significativamente la menor (50%) y la comercial (100%). A diferencia del segundo muestreo VT en donde las hojas superiores recién alcanzaron la madurez y su máxima capacidad fotosintética, las plantas en el tercer muestreo en R5 presentaron menor tasa fotosintética, aproximadamente de 23-50 % (Fig. 4), lo que puede ser atribuido al acercamiento hacia la senectud de las hojas; las plantas que mostraron menor tasa fotosintética en este muestreo en comparación al testigo puede ser debido a una aceleración del desgaste de energía por efecto de los tratamientos (Cuadro 5). La importancia de medir la tasa de fotosíntesis según Gutiérrez *et al.* (2005), está relacionada con el rendimiento y puede utilizarse como parámetro fisiológico para pronosticar un incremento en la producción. Estos autores también mencionaron que

los niveles de clorofila no se asocian directamente con la fotosíntesis, ya que algunos cultivos tienen alta tasa fotosintética aun sin tener un alto contenido de clorofila; este contenido está más relacionado con el contenido de nitrógeno foliar, el cual no influye en la actividad fotosintética de la planta.

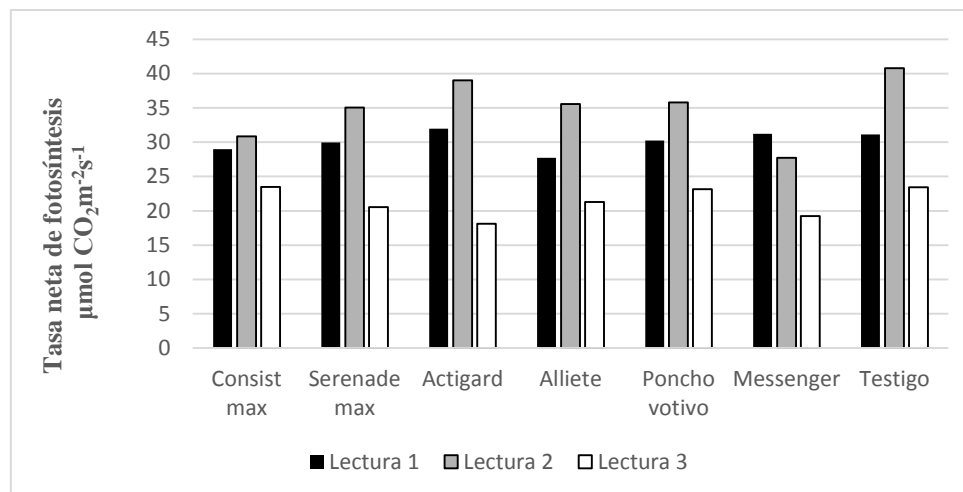


Figura 4. Actividad fotosintética en plantas de maíz sometidas a tratamientos de control de patógenos.

Cuadro 5. Variables de intervalo de floración (ASI), índice de altura, aspecto de planta y mazorca, y tasa neta de fotosíntesis.

Parcelas mayores	Intervalo (ASI)	Índice altura	Aspecto planta	Aspecto mazorca	Tasa neta de fotosíntesis (µmol CO₂ m⁻² s⁻¹)		
					V10	VT	R5
Consist Max®	1.97 ab	0.44 a	1.65 ab	1.62 a	29.01 a	30.86 bc	23.48 a
Serenade® Max	1.77 a	0.44 a	1.70 ab	1.79 ab	29.99 a	35.05 abc	20.53 bc
Actigard	1.97 ab	0.45 a	1.59 a	1.59 a	31.96 a	39.03 a	18.09 c
Alliete	2.08 ab	0.46 a	1.62 ab	1.75 ab	27.71 a	35.56 ab	21.27 ab
Poncho Votivo	2.11 ab	0.45 a	1.72 ab	1.72 ab	30.26 a	35.80 ab	23.16 a
Messenger	2.16 b	0.44 a	1.75 ab	1.83 ab	31.24 a	27.73 c	19.23 bc
Testigo	2.22 b	0.44 a	1.94 b	2.13 b	31.15 a	40.81 a	23.43 a
Promedio	2.04	0.44	1.71	1.77	30.18	34.98	21.31
DMS (0.05)	0.37	0.22	0.32	0.43	6.14	7.79	2.47
CV (%)	25.74	4.62	16.43	14.72	22.73	32.73	11.51
Subparcelas							
Aplicación foliar	2.02 a	0.44 a	1.61 a	1.70 a	29.26 a	35.17 a	20.85 a
Aplicación suelo	2.06 a	0.45 a	1.80 a	1.87 a	31.11 a	34.78 a	21.78 a
DMS (0.05)	0.23	0.006	0.21	0.19	3.05	6.75	1.31
Sub subparcelas							
Dosis 50%	2.00 a	0.456 a	1.69 a	1.81 a	31.00 a	37.14 a	22.83 a
Dosis 100%	2.04 a	0.445 b	1.71 a	1.75 a	29.73 a	35.72 ab	21.17 a
Dosis 150%	2.08 a	0.448 ab	1.73 a	1.79 a	29.83 a	32.07 b	18.55 b
DMS (0.05)	0.23	0.009	0.12	0.11	3.00	5.00	1.66

Valores señalados con la misma letra dentro de la misma columna, no difieren estadísticamente entre sí (Tukey ≤ 0.05).

Contenido de clorofila (unidades SPAD)

Los tratamientos aplicados no causaron variación significativa en el contenido de clorofila, excepto en la primera fecha de medición. En la primera lectura sobresalieron Actigard, Messenger y Poncho Votivo con valores de clorofila de 53.09, 52.84 y 52.47 unidades SPAD. La vía de aplicación foliar presentó significancia en las dos últimas lecturas con mejor contenido de clorofila, y la dosis que mostró mayor concentración del pigmento es la dosis comercial pero eso exclusivamente en la primera lectura, ya que en las cuatro lecturas subsecuentes no se registraron diferencias significativas. Mendoza *et al.* (2006) señalan que los niveles de clorofila cambian con relación al híbrido de maíz y contenido de nitrógeno en la planta, además de sufrir alteraciones por enfermedades, daño de insectos o heladas. Sin embargo, en el presente trabajo, las plantas mostraron poca variación en los registros de clorofila efectuados en el ciclo del cultivo, con valor máximo de 53.09 y mínimo de 47.32 unidades SPAD, sin alcanzar el valor crítico (Cuadro 6). Según Rincón y Ligarreto (2010), para tener un rendimiento de grano deseable en el cultivo de maíz se necesitan 50 unidades SPAD, o superiores, y el valor crítico es de 35.3 unidades SPAD, equivalente a 1.83 % de nitrógeno en la planta.

Cuadro 6. Concentración de clorofila por influencia de los tratamientos.

Parcelas mayores	Contenido de clorofila (Unidades SPAD)				
	Lectura 1 V10	Lectura 2 V12	Lectura 3 VT	Lectura 4 R1	Lectura 5 R4
Consist Max	50.52 b	48.32 a	52.48 a	48.07 a	47.32 a
Serenade Max	52.26 ab	50.68 a	50.35 a	50.20 a	49.50 a
Actigard	53.09 a	49.05 a	48.67 a	48.08 a	47.38 a
Alliete	51.50 ab	49.48 a	51.08 a	48.97 a	48.27 a
Poncho Votivo	52.47 a	48.45 a	50.55 a	50.50 a	49.80 a
Messenger	52.84 a	47.93 a	48.12 a	50.15 a	49.45 a
Testigo	52.35 ab	49.65 a	51.23 a	49.29 a	48.59 a
Promedio	52.14	48.65	50.35	49.32	48.61
DMS (0.05)	1.94	3.12	6.18	4.72	4.72
CV (%)	6.74	7.59	12.28	9.95	10.10
Subparcelas					
Aplicación foliar	53.08 a	49.15 a	51.23 a	50.09 a	49.39 a
Aplicación suelo	51.21 a	49.02 a	49.48 a	48.55 b	47.85 b
DMS (0.05)	1.33	1.86	1.91	1.27	1.27
Sub subparcelas					
Dosis 50%	51.55 b	49.02 a	50.40 a	49.26 a	48.56 a
Dosis 100%	53.42 a	48.54 a	50.55 a	49.65 a	48.95 a
Dosis 150%	51.48 b	49.69 a	50.12 a	49.06 a	48.36 a
DMS(0.05)	1.53	1.63	2.70	2.14	2.14

Valores señalados con la misma letra dentro de la misma columna, no difieren estadísticamente entre sí (Tukey ≤ 0.05).

Número de mazorcas sanas y porcentajes de mazorcas podridas

En número de mazorcas sanas no mostró diferencias significativas entre tratamientos. Sin embargo, el tratamiento Consist Max® tuvo menor porcentaje de mazorcas podridas (Cuadro 7).

Rendimiento de grano (t ha⁻¹)

En rendimiento de grano ajustado a 15% de humedad se detectaron diferencias significativas ($\alpha=0.05$) entre tratamientos, destacando Consist Max® con 13.40 t ha⁻¹ (Fig. 5) seguido de Serenade Max con 12.67 t ha⁻¹. Entre vías de aplicación no se presentaron diferencias significativas. En esta variable la respuesta de las plantas a las dosis resultó significativa ($\alpha=0.05$), ya que el rendimiento incrementó a medida que se agregó más producto, de modo que la dosis con el 50 % del producto adicional a la dosis recomendada comercialmente produjo una ganancia en rendimiento (Cuadro 7).

Comercialmente, Consist Max® es un fungicida con tebuconazole (triazol) y trifloxystrobin como ingrediente activo. Este compuesto pertenece al grupo de estrobilurinas, las cuales disminuyen la severidad de *P. sorghi* e incrementan significativamente el rendimiento de grano de maíz (Carmona *et al.*, 2009; Nelson *et al.*, 2015). Según Lazo y Ascencio (2014), las estrobilurinas, además de tener acción fungicida influyen positivamente en los procesos de metabolismo, pues alteran los niveles de fitohormonas, retrasan los procesos de senescencia e incrementan el rendimiento. En sus investigaciones en el cultivo del maíz, también reportaron un incremento en la tasa fotosintética, contenido de clorofila, producción de biomasa y dimensiones en las hojas (longitud y anchura). En otras investigaciones, con la aplicación de estrobilurinas y suficiente nitrógeno, la hoja bandera mostró un incremento en longevidad, acumulación de elevadas cantidades de clorofila que mejoró la asimilación de nitratos, aumento de biomasa en los granos y consecuentemente aumento del rendimiento (Kanungo y Joshi, 2014).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente trabajo, se postula que Consist Max® estimuló vías fisiológicas del hospedante resultando así el mejor tratamiento en las variables de: intervalo de floración, aspecto de mazorca, tasa

fotosintética, menor porcentaje de mazorcas podridas y menor severidad del patógeno, así como una ganancia de 6.2% en rendimiento de grano en relación al testigo. De acuerdo con Acuña y Grabowski (2012), un inductor de resistencia tiene triple función: activa las defensas en las plantas, ejerce acción antimicrobiana y promueve el crecimiento vegetal. Por su modo de acción, estos productos constituyen una nueva clase de plaguicidas llamados “fungicidas de cuarta generación”.

Por su parte, el tratamiento Serenade® Max (*Bacillus subtilis*) sobresalió por estimular el crecimiento de plantas pero sin mejorando el rendimiento de grano en comparación al testigo (Cuadro 7). Según Vega *et al.* (2016), las bacterias del género *Bacillus* sp. son capaces de producir auxinas que son hormonas involucradas en procesos fisiológicos que incrementan el desarrollo de biomasa y el rendimiento, además de intervenir en respuestas defensivas contra estreses biótico y abiótico.

El resto de los inductores, incluyendo Poncho Votivo, Alliete, Messenger y Actigard 50 GS, también lograron reducir la severidad de *P. sorghi* pero con rendimientos de grano similares al testigo (Cuadro 7). Así, los resultados sugieren que una aplicación de estos productos no es suficiente para estimular con eficiencia las vías fisiológicas que intervienen en el incremento de producción de grano. Es necesario continuar con estas investigaciones en campo para determinar la ruta de concentración de energía, evaluar más aplicaciones y determinar si la eficiencia de los productos está condicionada a factores ambientales. Gómez y Reis (2011) mencionan que, dependiendo del inductor y del cultivo, su acción puede activarse en el momento de su aplicación o prolongarse hasta 30 días, o más.

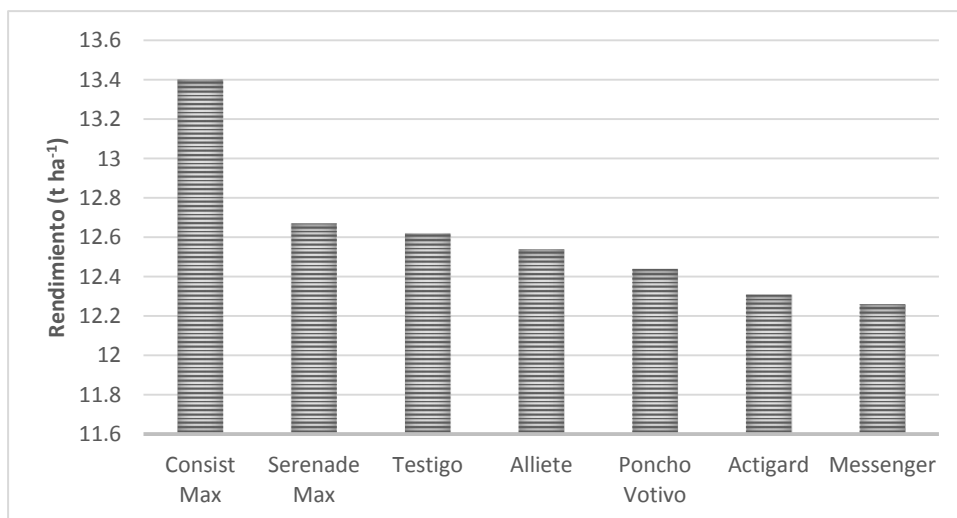


Figura 5. Rendimiento de grano de maíz, influenciado por la acción de diferentes tratamientos.

Cuadro 7. Variables: número de mazorcas sanas, mazorcas podridas y rendimiento en el cultivo de maíz por efecto de tratamientos.

Parcelas mayores	Número de mazorca sanas	Mazorca podrida (%)	Rendimiento (t ha⁻¹)
Consist Max®	29.91 a	2.69 a	13.40 a
Serenade® Max	29.30 a	4.45 abc	12.67 b
Actigard	29.30 a	5.87 c	12.31 ab
Alliete	29.41 a	3.40 ab	12.54 ab
Poncho Votivo	28.80 a	3.27 ab	12.44 ab
Messenger	26.94 a	2.68 a	12.26 ab
Testigo	28.19 a	5.32 ab	12.62 ab
Promedio	28.83	3.95	12.60
DMS (0.05)	3.29	0.62	1.40
CV (%)	8.43	83.77	5.82
Sub parcelas			
Aplicación foliar	28.76 a	1.15 a	12.72 a
Aplicación suelo	28.90 b	1.13 a	12.49 a
DMS (0.05)	1.590	0.39	0.58
Sub subparcelas			
Dosis (50 %)	29.19 a	1.16 a	12.40 b
Dosis (100 %)	28.63 a	1.01 a	12.52 ab
Dosis (150 %)	28.67 a	1.25 a	12.84 a
DMS(0.05)	1.06	0.41	0.32

Valores señalados con la misma letra dentro de la misma columna, no difieren estadísticamente entre sí (Tukey \leq 0.05).

CONCLUSIONES

Por su modo de acción, el producto Consist Max® (trifloxystrobin+tebuconazol) puede considerarse “fungicida de cuarta generación” debido a su capacidad para inhibir el crecimiento del fitopatógeno y, simultáneamente, estimular vías fisiológicas del hospedante, por lo que resultó ser el mejor tratamiento en las variables de: aspecto de mazorca, tasa fotosintética, menor porcentaje de mazorcas podridas y mínima severidad de daño causado por *P. sorghi*, además de provocar un aumento del rendimiento de grano de 6.2% en relación al testigo. La mejor vía de aplicación es la foliar a pesar de no tener diferencias significativas en rendimiento, resultó mejor en la concentración de clorofila y logró mayor disminución en la severidad de *P. sorghi*. La mejor dosis fue la dosis con el 50 % de producto adicional a la recomendada comercialmente (150%), por haber tenido la mayor influencia significativa en el rendimiento de grano.

LITERATURA CITADA

- Acuña, G.E.M. y Grabowski, O.C. 2012. Inducción de resistencia en plantas de trigo (*Triticum aestivum* L.) a la mancha amarilla (*Drechslera tritici-repentis*) y marrón (*Bipolaris sorokiniana*). *Investigación Agraria* 14(2):71-79.
- Ángeles, G.E., Ortiz, T.E., López, P.A. y López, R.G. 2010. Caracterización y rendimiento de poblaciones de maíz nativas de Molcaxac, Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33 (4):287–296.
- Baenas, N., García, V.C. y Moreno, D.A. 2014. Elicitation: A tool for enriching the bioactive composition of foods. *Molecules* 19:13541-13563.
- Bartleett, D., Clough, J.M., Hall, A.A., Hamer, M. and Dobrzanski, B.P. 2002. The strobilurin fungicides. *Pest Management Science* 58:649-662.
- Bustamante, R.E. y Patiño, H.L.F. 2001. En búsqueda de un sistema de resistencia estable en plantas cultivadas. *Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica)* 60:3-14.
- Bolaños, J. and Edmeades, G. O. 1996. The importance of the anthesis-silking interval in breeding for drought tolerance in tropical maize. *Field Crops Research* 48: 65-80.
- Cai, H., Chu, Q., Gu, R., Yuan, L., Liu, J., Zhang, X., Chen, F., Mi, G. and Zhang F. 2012. Identification of QTLs for plant height, ear height and grain yield in maize (*Zea mays* L.) in response to nitrogen and phosphorus supply. *Plant Breeding* 131: 502-510.
- Carmona, M., Sautua, F., Quiroga, M., Díaz, C. y Fernández, P. 2009. Control químico de la roya común del maíz (*Puccinia sorghi*): Criterio basado en el Umbral de Daño Económico (UDE). *Tropical Plant Pathology* 34:S120.

- Cosme, V.Y., Guzmán, P.R.A., Sandoval, I.S., Corona, T.T. y Mendoza, P.D. 2015. Efecto del acibenzolar S-metil en plantas de chile serrano (*Capsicum annum*) infectadas con *Phytophthora capsici* en diferentes edades. Revista Mexicana de Fitopatología 33(2):156-172.
- Centro Internacional de Mejoramiento del Maíz y Trigo (CIMMYT). 2004. Enfermedades del maíz: Una guía para su identificación en el campo. 4ª ed. México, D.F. 118 p.
- Corrales, R.L.C., Caycedo, L.L., Gómez, M.M.A., Ramos, R.S.J. y Rodríguez, T.J.N. 2016. *Bacillus* spp: una alternativa para la promoción vegetal por dos caminos enzimáticos. NOVA 15(27):45-65.
- De Capdeville, G., Beer, S.V., Wilson, C.L., and Aist, J.R. 2008. Some cellular correlates of harpin-induced resistance to blue mold of apples. Tropical Plant Pathology 33(2):103-113.
- Dotor, R.M.Y. y Cabezas, G.M. 2014. Mecanismo de resistencia sistémica en plantas. Acta Iguazu, Cascavel 3(2):1-19.
- FAOSTAT. 2018. Situación alimentaria mundial. Recuperado de <http://www.fao.org/worldfoodsituation/csdb/es/>.
- FENALCE. 2010. El cultivo del maíz historia e importancia. Importancia de los cultivos representados por Fenalce. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/263324117/El-Cultivo-Del-Maiz-Historia-e-Importancia>.
- Fernández, S.R., Morales, C.L.A y Gálvez, M.A. 2013. Importancia de los maíces nativos de México en la dieta nacional, una revisión indispensable. Revista Fitotecnia Mexicana 36:275-283.
- Gámez, S.B.Y., Reyes, R.A., Moreno, V.O.A y Tun S.J.M. 2017. Resistencia sistémica inducida contra virus fitopatógenos mediada por la inoculación con la rizobacteria *Bacillus* spp. Revista Protección Vegetal 32(1):10-22.

- García, E. 1988. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. D. F., México. 246 p.
- Gómez, D.E. y Reis, E. M. 2011. Inductores abióticos de resistencia contra fitopatógenos. *Revista Química Viva* 1(10):6-17.
- González, M. 2005. Roya común del maíz: Altos niveles de severidad en la zona maicera núcleo (campaña 04/05). [Common Rust of Maize: High levels of severity in the Core maize area (Growing Season 04/05)]. *Rev. Agromensajes* 15. Recuperado de www.fcagr.unr.edu.ar/Extension/Agromensajes/15/2AM15.htm
- González, V.D.M., Goicochea, L.J., Quintero, M.A.A., Rubio, G.J.L. y Aranguren, M.J.A. 2007. Análisis de tres procedimientos estadísticos para la evaluación del crecimiento de mautas mestizas bajo diferentes regímenes nutricionales. *Revista Científica Facultad de Ciencias Veterinarias (Luz)* 17(2):136-142.
- Grande, T.C.D. y Orozco, C.B.S. 2013. Producción y procesamiento del maíz en Colombia. *Revista Científica Guillermo de Ockham* 11(1):97-110.
- Gutiérrez, R.M., Paul, R.M., Escalante, E.J.A. y Larqué, S.A. 2005. Algunas consideraciones en la relación entre fotosíntesis y el rendimiento de grano en trigo. *Ciencia Ergo Sum.* 12(2):149-154.
- Guevara, I. y Rodríguez, G.E. 2006. Inductores químicos de resistencia en la supresión de la marchitez del algodonero causada por *Fusarium oxysporum* f. sp. *vasinfectum* en sistema hidropónico. *Universalia* 11(1):6-12.
- Hanway, J.J. (1966) How a Corn Plant Develops. Special Report No. 48, Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service.

- Hernández, C.F.D., Lira, S.R.H., Cruz, C.L., Gallegos, M.G., Galindo, C.M.E., Padrón, C.E. y Hernández, S.M. 2008. Potencial antifúngico de cepas de *Bacillus* spp. y extracto de *Larrea tridentata* contra *Rhizoctonia solani* en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). Revista Internacional de Botánica Experimental 77:241-252.
- Hernández, R.A., Hernández, L.A.N., Velázquez, D.M.G., Bigiramana, Y., Audenaert, K. y Hofte, M. 2004. Aplicación de rizobacterias para inducir resistencia en los sistemas frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) – *Colletotrichum indemuthianum* (Sacc. y Magnus). Revista Mexicana de Fitopatología 22(1):100-106.
- IBPGR. 1991. Descriptors for maize. International Maize and Wheat Improvement Center, Mexico City/International Board for Plant Genetic Resources. Rome. 85p.
- INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias), El tratamiento de semilla para la siembra de maíz en P-V. 2015. Recuperado de <http://www.inifapcirne.gob.mx/Eventos/2015/TRATAMIENTO%20DE%20SEMILLA%20ma%C3%ADz.pdf>.
- ILSI Argentina. 2006. Maíz y nutrición. Recopilación de ILSI Argentina 2:1-80.
- Jiménez, M.A., Asdrubal, A., Ulacio, D. y Hernández, A. 2012. Evaluación de *Trichoderma* spp. y Acibenzolar-S-Metil (Bion®) como inductores de resistencia a la pudrición blanca *Sclerotium cepivorum* Berk. en ajo (*Allium sativum* L.) bajo Condiciones de campo. Journal of the Selva Andina Research Society 1(1):14-25.
- Kanungo, M. and Joshi, J. 2014. Impact of Pyraclostrobin (F-500) on crop plants. Plant Science Today 1(3):174-178.
- Laredo, A.E.I., Martínez, H.J.L., Iliná, A., Guillen, C.L. y Hernández, C.F.D. 2017. Aplicación de ácido jasmónico como inductor de resistencia vegetal frente a patógenos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 8(3): 673-683.

- Layton, C., Maldona, E., Monroy, L., Corrales, L.C. y Sánchez, L.C. 2011. *Bacillus spp.*; perspectiva de su efecto biocontrolador mediante antibiosis en cultivos afectados por fitopatógenos. *Ciencias Biomédicas* 9(15):113-214.
- Lazo, J.V. y Ascensio, J. 2014. Algunas respuestas morfométricas y fisiológicas inducidas por el fungicida Opera® (Pyraclostrobin + Epoxiconazole) en la planta de maíz (*Zea mays* L.). *Revista Facultad de Agronomía (LUZ)* 31:39-59.
- MacRobert, J.F., Setimela, P.S., Gethi, J. y Worku, M. 2015. Manual de producción de semilla de maíz híbrido. México, D.F. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). El Batán, México. 26 p.
- McKenzie, E. 2013. *Puccinia sorghi* (*Puccinia sorghi*). PaDIL Species Factsheet. Recuperado de <http://www.padil.gov.au/maf-border/pest/main/143071>. [Consultado el 08/05/2018].
- Mejía, A.D.M., Rodas, G.E.I., Patiño, H.L.F. y González, J.E.P. 2009. Efecto del acibenzolar-S-metil sobre el desarrollo de la virosis causada por potyvirus en tomate de árbol. *Agronomía Colombiana* 27(1):87-93.
- Mendoza, E.M., Mosqueda, V.C., Rangel, L.J.A., López, B.A., Rodríguez, H.S.A., Latournerie, M.L. y Moreno, M.E. 2006. Densidad de población y fertilización nitrogenada en la clorofila, materia seca y rendimiento de maíz normal y QPM. *Agricultura Técnica en México* 32(1):89-99.
- Nelson, K.A., Dudenhoeffer, C.J., Burdick, B. and Harder, D. 2015. Enhanced efficiency foliar nitrogen and pyraclostrobin applications for high yielding corn. *Journal of Agricultural Science* 7(10):17-28.
- Noriega, G.L.A., Preciado, O.R.E., Andrino, E.E., Terrón, I.A.D. y Covarrubia, P.J. 2011. Fenología, crecimiento y sincronía floral de los progenitores del híbrido de maíz QPM H-374C. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2(4):489-500.

- Palafox, C.A., Rodríguez, M.F., Sierra, M.M., Meza, P.A. y Tehuacatl, S.L. 2016. Comportamiento agronómico de híbridos de maíz formados con líneas tropicales sobresalientes. Química, Biología y Agronomía. Handbook T-I. © Ecorfan 1:52-62.
- Pataky, J.K. and Pate, M.C. 2001. Resistance genes in the *rp1* region of maize effective against *Puccinia sorghi* virulent on the *Rp1-D* gene in North America. Plant Science 85(2):165-168.
- Patiño, H.L.F. 2008. Resistencia inducida mediante sustancias químicas a enfermedades en plantas causadas por hongos. Revista Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid 7:103-115.
- Pérez, P.H.Y. 2010. Enfermedades causadas por hongos del Phylum Basidiomycota. [PowerPoint slides]. Recuperado de http://www.ucv.ve/fileadmin/user_upload/facultad_agronomia/Botanica/Fitopatologia/BASIDIOMYCETES_2010.pdf
- Ramírez, A.O., Gutiérrez, E.A. y Espinosa, T.L.E. 2014. Condiciones económicas de la producción del maíz en los municipios de Frontera Comalapa y La Trinitaria, Chiapas. Debate Económico 3(9):95-118.
- Reynoso, Q. C. A., González, H.A., Pérez, L. D. J., Franco, M. O., Torres, F. J. L., Velázquez, C. G. A., Breton, L. C., Balbuena, M. A. y Mercado, V. O. 2014. Análisis de 17 híbridos de maíz sembrados en 17 ambientes de los Valles Altos del centro de México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 5(5):871-882.
- Rincón, C.A. y Ligarreto, G.A. 2010. Relación entre nitrógeno foliar y el contenido de clorofila, en maíz asociado con pastos en el Piedemonte Llanero colombiano. Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria 11(2):122-128.

- Riveros, A.A.S. 2001. Moléculas activadoras de la inducción de resistencia, incorporadas en programas de agricultura sostenible. Manejo Integrado de Plagas (Costa Rica) 61:4-11.
- Rodríguez, M.E., Micca, R.M.V., Andrada, N.R. y Larrusse, A.S. 2015. Parametrización epidémica para evaluar sistemas de manejo de roya común (*Puccinia sorghi*), en San Luis. Revista FAVE Sección Ciencias Agrarias 14(2):1-10.
- Romero, A.M., Kousik, C.S. and Ritchie D.F. 2001. Resistance to bacterial spot in bell pepper Induced by Acibenzolar-S-Methyl. Plant Disease 85(2):189-194.
- Šafránková, V. 2014. Occurrence of rust disease caused by *Puccinia oxalidis* on *Oxalis triangularis* in the Czech Republic Short Communication. Plant Pathology 50(1):17-18.
- Salamanca, C.M. y Avarado, A.G. 2012. Efecto de la proteína harpin y el fosfito de potasio en el control de mildew polvoso (*Erysiphe polygoni* D.C.) en tomate, en Sutamarchán (Boyacá). Ciencia y Agricultura 9(2):65-75.
- Sandoval, R.F.S., Arreola, A.J.G., Lagarda, M.A., Trejo, C.R., Esquivel, A.O. y García, H.G. 2010. Efecto de niveles de NaCl sobre fotosíntesis y conductancia estomática en nogal pecanero (*Carya illinoensis* (Wangeh.) K. Koch). Revista Chapingo Serie Zonas Áridas 9:135-141.
- Shah, D.A and Dillard, H.R. 2010. Managing Foliar Diseases of Processing Sweet Corn in New York with Strobilurin Fungicides. Plant Disease 94(2):213-220.
- Singh, G. and Singh B. 2014. Residue dynamics and risk assessment of trifloxystrobin and tebuconazole on tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.). American Journal of Environmental Protection 2(3):59-63.
- Terralia. 2018. Fosetil-Al. Productos fitosanitarios y nutricionales. Recuperado de https://www.terralia.com/vademecum_de_productos_fitosanitarios_y_nutricion

[ales/view_composition?book_id=1&composition_id=523](#). [Consultado el 05/06/2018].

Valdez, T.J.B., Soto, L.F., Osuna, E.T. y Báez, S.M.A. 2011. Modelos de predicción fenológica para maíz blanco (*Zea mays* L.) y gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda* J. E. Smith). *Agrociencia* 46(4):399-410.

Vega, C. P., Canchignia, M.H., González, M. y Seeger, M. 2016. Biosíntesis de ácido indol- 3-acético y promoción del crecimiento de plantas por bacterias. *Cultivos Tropicales* 37 (Supl. 1):33-39.

Zuluaga, C.M., Buritica, C.P. y Marín, M.M. 2011. Generalidades de los uredinales (Fungi: Basidiomycota) y de sus relaciones filogenéticas. *Acta Biológica Colombiana* 14(1):41-56

ANEXOS

**Cuadro A.1. Análisis de varianza para la variable índice de altura
(SC tipo III)**

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	0.00562	0.0009	1.00	0.4666
Error (a)	12	0.01108	0.0009		
Subparcelas	1	0.00069	0.0006	2.79	0.1172
Error (b)	14	0.00347	0.0002		
Sub subparcelas	2	0.0025	0.0012	2.97	0.0595
Error (c)	56	0.02424	0.0004		
Parcelas mayores * Subparcelas	6	0.1209	0.0020	8.13	0.0006
R ²	0.6641				
CV (%)	4.6236				

**Cuadro A.2. Análisis de varianza para la variable aspecto de mazorca
(SC tipo III)**

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	3.4129	0.5688	8.22	<.0001
Error (a)	12	4.2208	0.3517		
Subparcelas	1	0.9516	0.9516	3.69	0.0753
Error (b)	14	3.6092	0.2578		
Sub subparcelas	2	0.0717	0.0358	0.52	0.5983
Error (c)	56	3.8752	0.0692		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	3.0635	0.5105	1.98	0.1370
R ²	0.8350				
CV (%)	14.7253				

**Cuadro A.3. Análisis de varianza para la variable aspecto de planta
(SC tipo III)**

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	1.4365	0.2394	3.02	0.0126
Error (a)	12	2.4648	0.2054		
Subparcelas	1	1.1428	1.1428	3.70	0.0748
Error (b)	14	4.319	0.3085		
Sub subparcelas	2	0.0267	0.0133	0.17	0.8451
Error (c)	56	4.4408	0.0793		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	2.0376	0.3396	1.10	0.4092
R ²	0.7814				
CV (%)	16.4335				

Cuadro A.4. Análisis de varianza para la variable intervalo de floración (ASI) (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	2.4126	0.4021	1.45	0.2113
Error (a)	12	3.1587	0.2632		
Subparcelas	1	0.0496	0.0496	0.13	0.7201
Error (b)	14	5.194	0.3710		
Sub subparcelas	2	0.1468	0.0734	0.27	0.7680
Error (c)	56	15.495	0.2767		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	1.3809	0.2301	0.62	0.7114
R²	0.7076				
CV (%)	-25.7433				

Cuadro A.5. Análisis de varianza para la variable tasa neta de fotosíntesis etapa V10 (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	229.79	38.29	0.81	0.56
Error (a)	12	858.46	71.53		
Subparcelas	1	107.86	107.86	1.69	0.21
Error (b)	14	892.69	63.76		
Sub subparcelas	2	41.70	20.85	0.44	0.64
Error (c)	56	2638.7	47.12		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	645.79	107.63	1.69	0.19
R²	0.6211				
CV (%)	22.7362				

Cuadro A.6. Análisis de varianza para la variable tasa neta de fotosíntesis etapa VT (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	2176.59	362.76	2.77	0.0199
Error (a)	12	1381.2	115.11		
Subparcelas	1	4.77945	4.77945	0.02	0.9033
Error (b)	14	4375	312.50		
Sub subparcela	2	575.863	287.93	2.20	0.1207
Error (c)	56	7341.04	131.09		
Parcelas mayores*Sub parcela	6	1233.50	205.58	0.66	0.6844
R²	0.6536				
CV (%)	32.730				

Cuadro A.7. Análisis de varianza para la variable tasa neta de fotosíntesis etapa R5 (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	504.872	84.145	13.95	<.0001
Error (a)	12	138.964	11.580		
Subparcela	1	30.8445	30.844	2.61	0.1285
Error (b)	14	165.498	11.821		
Sub subparcela	2	46.8405	23.420	3.88	0.0262
Parcelas mayores*Subparcelas	6	242.291		3.42	0.0273
R²	0.9015				
CV (%)	11.5199				

Cuadro A.8. Análisis de varianza para la variable clorofila (unidades SPAD) Lectura uno (V10) (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	82.791	13.798	1.12	0.3649
Error (a)	12	86.275	7.1896		
Subparcelas	1	109.58	109.58	8.96	0.0097
Error (b)	14	171.17	12.227		
Sub subparcelas	2	101.42	50.711	4.10	0.0218
Error (c)	56	692.44	12.365		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	32.771	5.4619	0.45	0.8356
R²	0.5789				
CV (%)	6.7425				

Cuadro A.9. Análisis de varianza para la variable clorofila (unidades SPAD) Lectura dos (V12) (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	96.282	16.047	1.15	0.3441
Error (a)	12	222.63	18.553		
Subparcelas	1	0.5434	0.5434	0.02	0.8821
Error (b)	14	333.27	23.805		
Sub subparcelas	2	27.860	13.930	1.00	0.3738
Error (c)	56	778.87	13.908		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	120.44	20.074	0.84	0.5574
R²	0.6484				
CV (%)	7.5974				

**Cuadro A.10. Análisis de varianza para clorofila (unidades SPAD)
Lectura tres (VT) (SC tipo III)**

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	246.27	41.046	1.07	0.3900
Error (a)	12	869.12	72.426		
Subparcelas	1	96.556	96.556	3.85	0.0699
Error (b)	14	351.04	25.074		
Sub subparcelas	2	4.0900	2.0450	0.05	0.9480
Error (c)	56	2143.2	38.272		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	32.771	5.4619	0.45	0.8356
R²	0.5813				
CV (%)	12.284				

**Cuadro A.11. Análisis de varianza para clorofila (unidades SPAD)
Lectura cuatro (R1) (SC tipo III)**

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	109.05	18.176	0.75	0.6094
Error (a)	12	507.05	42.254		
Subparcelas	1	74.674	74.674	6.75	0.0211
Error (b)	14	154.87	11.062		
Sub subparcelas	2	7.4334	3.716	0.15	0.8576
Error (c)	56	1351.1	24.127		
Parcelas mayores *Sub parcelas	6	206.86	34.477	3.12	0.0373
R²	0.6080				
CV (%)	9.9580				

**Cuadro A.12. Análisis de varianza para clorofila (unidades SPAD)
Lectura cinco (R4) (SC tipo III)**

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	109.05	18.176	0.75	0.6094
Error (a)	12	86.275	7.1896		
Subparcelas	1	74.674	74.674	6.75	0.0211
Error (b)	14	171.17	12.227		
Sub subparcelas	2	7.4334	3.7167	0.15	0.8576
Error (c)	56	692.44	12.365		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	206.86	34.477	3.12	0.0373
R²	0.608039				
CV (%)	10.10137				

Cuadro A.13. Análisis de varianza para la variable número de mazorcas sanas (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	105.97	17.66	6.27	0.0035
Error (a)	12	1.71	20.52		
Subparcelas	1	0.6428	0.642	0.04	0.8500
Error (b)	14	1.2375	17.32		
Sub subparcelas	2	8.0833	4.041	0.68	0.5089
Error (c)	56	0.1055	5.910		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	27.718	4.6197	0.27	0.9435
R²	0.706560				
CV (%)	8.431894				

Cuadro A.14. Análisis de varianza para la variable mazorcas podridas (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	15.123	2.5205	2.75	0.0206
Error (a)	12	0.0626	0.7516		
Subparcelas	1	0.0079	0.0079	0.01	0.9325
Error (b)	14	0.0767	1.0674		
Sub subparcelas	2	1.2261	0.6130	0.67	0.5164
Error (c)	56	0.0163	0.9166		
Parcelas mayores*Sub parcelas	6	7.1309	1.1884	1.11	0.4029
R²	0.598734				
CV (%)	83.77487				

Cuadro A.15. Análisis de varianza para la variable rendimiento (SC tipo III)

F.V	GL	SC	CM	F	P>F
Parcelas mayores	6	15.659	2.6098	4.84	0.0005
Error (a)	12	44.642	3.7201		
Subparcelas	1	1.6346	1.6346	0.70	0.4164
Error (b)	14	32.626	2.3304		
Sub subparcelas	2	3.6021	1.8010	3.34	0.0427
Error (c)	56	30.214	0.5395		
Parcelas mayores *Sub parcelas	6	8.2901	1.3816	0.59	0.7313
R²	0.8210				
CV (%)	5.8252				