



Sensibilidad del carbón de la espiga del maíz a diferentes fungicidas

Quezada-Salinas, Andrés; Moreno-Velázquez, Magnolia; De León, Carlos; Nava-Díaz, Cristian;
Hernández-Anguiano, Ana María; Márquez-Licona, Guillermo
Sensibilidad del carbón de la espiga del maíz a diferentes fungicidas
CIENCIA *ergo-sum*, vol. 30, núm. 2, julio-octubre 2023 | e200
Ciencias Naturales y Agropecuarias

Universidad Autónoma del Estado de México, México

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional.



Quezada-Salinas, A., Moreno-Velázquez, M., De León, C., Nava-Díaz, C., Hernández-Anguiano, A. M. y Márquez-Licona, G. (2023). Sensibilidad del carbón de la espiga del maíz a diferentes fungicidas. *CIENCIA ergo-sum*, 30(2). <http://doi.org/10.30878/ces.v30n2a7>

Sensibilidad del carbón de la espiga del maíz a diferentes fungicidas

Sensitivity of head smut of maize to different fungicides

Andrés Quezada-Salinas*

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, México

andresqsa79@gmail.com

 <http://orcid.org/0000-0002-6476-5251>


Recepción: 15 de junio de 2021

Aprobación: 3 de febrero de 2022

Magnolia Moreno-Velázquez

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, México


magnoliux@colpos.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-8222-6374>

Carlos De León

Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, México

cdeleon@colpos.mx

 <http://orcid.org/0000-0001-5945-1998>

Cristian Nava-Díaz

Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, México


cnava@colpos.mx

 <http://orcid.org/0000-0003-1502-0277>

Ana María Hernández-Anguiano

Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, México


ahernandez@colpos.mx

 <http://orcid.org/0000-0003-4562-4565>

Guillermo Márquez-Licona

Instituto Politécnico Nacional, México

gmarquezl@ipn.mx

 <http://orcid.org/0000-0002-3981-8585>

RESUMEN

Se determina la sensibilidad de *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* a diferentes fungicidas en condiciones de *in vitro*, como factor previo a su uso en campo. Para cada fungicida se evaluaron cinco concentraciones: 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 y 1 gramo de ingrediente activo por litro; la cantidad necesaria para preparar dichas concentraciones fue adicionada a medio de cultivo PDA, el cual se depositó en cajas Petri, y las teliosporas del hongo fueron expuestas sobre el medio. Se establece que carboxín y carboxín+captán inhibieron por completo la germinación de teliosporas y el desarrollo de colonias *in vitro*. Se propone el uso de carboxín y tebuconazol+thiram en la rotación de grupos químicos para el manejo integrado del carbón de la espiga del maíz.

PALABRAS CLAVE: *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae*, fungicidas, *in vitro*.

ABSTRACT

The sensitivity of *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* to different fungicides was determined under *in vitro* conditions, as a factor prior to its use in the field. Five concentrations were evaluated for each fungicide: 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 and 1 gram of active ingredient per liter; the necessary amount to prepare the concentrations was added to PDA culture medium, which was deposited in Petri dishes, teliospores of the fungus were exposed on the medium. Carboxin and carboxin+captan completely inhibit the teliospore germination and colony development *in vitro*. The use of carboxin and tebuconazole+thiram in the rotation of chemical groups for the integrated management of corn ear charcoal is proposed.

KEYWORDS: *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae*, fungicides, *in vitro*.

AUTOR PARA CORRESPONDENCIA

andresqsa79@gmail.com

INTRODUCCIÓN

México es uno de los más importantes consumidores de maíz. La producción de este cereal se concentra en los estados de Sinaloa, Jalisco, Michoacán, México, Guanajuato, Guerrero y Veracruz, los cuales aportan poco más del 67% de la producción nacional, la cual fue de 27 424 527.55 t para 2020 (SIAP, 2021). El maíz, como cualquier otro cultivo, no está exento del ataque de malezas, patógenos e insectos cuasantes de pérdidas en la producción (Reséndiz *et al.*, 2016). Una de las principales enfermedades es el carbón de la espiga causado por el hongo *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* (Kühn) Langdon y Fullerton (Basidiomycota, Ustilaginaceae), sinónimo *Sphacelotheca reiliana* (Khün) Clinton (Matyac y Kommedahl, 1985a; Matyac y Kommedahl, 1985b); esta enfermedad se presenta con mayor incidencia en los Valles Altos de México y sus daños se han incrementado ciclo tras ciclo desde su aparición en 2003 (Aquino-Martínez *et al.*, 2011). En el Estado de México se ha estimado una reducción en el rendimiento hasta del 15% en variedades e híbridos susceptibles, mientras que en otras regiones de México se reportan incidencias que oscilan de 0.1 hasta 42.5% (Pérez *et al.*, 2006; Sánchez-Pale *et al.*, 2011), pero también se han observado incidencias de hasta 80% en otras regiones del mundo (Pataky, 1999) y pérdidas en el rendimiento de hasta 300 000 t en China (Zhang *et al.*, 2013). La afectación en el rendimiento de grano causado por *S. reilianum* f. sp. *zeae* se debe a que este hongo desarrolla estructuras denominadas *soros* (que contienen teliosporas) que reemplazan de forma parcial o completa a la mazorca y la espiga, ambos durante la etapa de floración, lo cual reduce la producción de grano por planta y mazorca. La infección por este patógeno tiene lugar cuando las teliosporas (diploides) que se encuentran en el suelo de cultivo germinan y dan lugar a esporidias haploides de cuatro tipos diferentes de apareamiento (Ingold, 1994; Schirawski *et al.*, 2005). Las esporidias con diferente tipo de apareamiento a y b son compatibles y forman hifas de conjugación que se fusionan; esto conduce a la formación de un dicarion filamentoso (hifa parasítica) (Schirawski *et al.*, 2005), que penetra la raíz de la plántula, y las hifas proliferan para invadir el tejido de manera sistémica (Martínez *et al.*, 2000; Martínez *et al.*, 1999; Ghareeb *et al.*, 2011). Sólo en el momento de la floración los síntomas y signos son visibles: cuando la inflorescencia es reemplazada total o parcialmente por soros (Ghareeb *et al.*, 2011; Stromberg *et al.*, 1984). Debido a que la infección ocurre durante la germinación de la semilla y estados tempranos de desarrollo de la plántula de maíz, la principal estrategia de control se basa en la generación de material resistente, pero sobre todo en la aplicación directa de fungicidas a las semillas para prevenir el contacto entre el patógeno y el hospedante durante estas etapas de desarrollo (Stienstra *et al.*, 1985; Martínez y Ledesma, 1990; Wright *et al.*, 2006).

Sin embargo, se desconoce la eficiencia de los fungicidas utilizados en el tratamiento a la semilla, ya que, aun cuando es tratada, la incidencia de la enfermedad es cada vez mayor. Esto ha favorecido la dispersión del patógeno y el incremento en la superficie con problemas de carbón. Por lo anterior, el objetivo del artículo es evaluar la sensibilidad de *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* a diferentes fungicidas y sus efectos en la germinación de teliosporas y formación de basidiosporas que darán origen a la etapa infectiva.

1. MATERIALES Y MÉTODOS

1.1. Recolección de teliosporas

Mazorcas y espigas de plantas infectadas con *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* fueron recolectadas en parcelas de producción comercial de maíz localizadas en el municipio de Metepec, Estado de México, México (19°12'54.40" N; 99°36'1.09" O). El material vegetal infectado se colocó en bandejas plásticas y se dejó secar por 15 días en invernadero. Una vez pasado ese tiempo, se recolectaron las teliosporas y se almacenaron en bolsas de papel a 22 ± 2 °C hasta su uso.

1. 2. Viabilidad de teliosporas

Se utilizaron teliosporas de *S. reilianum* f. sp. *zeae* desinfectadas en una solución de CuSO₄ al 1% (w/v) por 12 h, se lavaron con tres cambios de agua destilada estéril y se recuperaron en papel filtro. La viabilidad del inóculo se verificó antes de su uso. Se preparó una suspensión de 50 000 teliosporas mL⁻¹ en una solución de Tween al 0.05% en agua destilada estéril y se depositó 1 mL por caja Petri con medio de cultivo de papa dextrosa agar (PDA) preparado a partir de papas (Gilchrist *et al.*, 2005). Las placas se incubaron en oscuridad a 25 °C durante 48, 72 y 96 h. Cinco placas se observaron directamente en el microscopio y el número de teliosporas germinadas por campo se contó a magnificación de 40X. Se observaron cinco campos por caja y se registró el promedio de germinación como porcentaje.

1. 3. Fungicidas

Se determinó la sensibilidad de *S. reilianum* f. sp. *zeae* a los fungicidas indicados en el cuadro 1.

CUADRO 1
Características y formulación de los fungicidas utilizados en la evaluación de la sensibilidad en el carbón de la espiga del maíz (*Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae*)

Fungicida	Grupo (Código FRAC) ^X	Modo de acción	Formulación	Dosis de aplicación recomendada por el fabricante	Dosis de aplicación en µg i. a.	Observaciones
Carboxín	SDHI (7)	Sistémico	400 g i. a. L ⁻¹	250 mL 100 kg semilla ⁻¹	1 g i. a.	<i>Sphacelotheca reiliana</i> *
Carboxín + Captán	SDHI (7), Phthalimides (M4)	Sistémico-contacto	200 + 200 g i. a. Kg ⁻¹	260 g 100 kg semilla ⁻¹	1 g i. a.	<i>Sphacelotheca reiliana</i> *
Difenoconazol	DMI (3)	Sistémico	250 g i. a. L ⁻¹	500 mL 100 L agua ⁻¹	1.25 g i. a.	
Propiconazol	DMI (3)	Sistémico	250 g i. a. L ⁻¹	500 mL 100 L agua ⁻¹	1.25 g i. a.	
Tebuconazol	DMI (3)	Sistémico	120 g i. a. L ⁻¹	500 mL 100 kg semilla ⁻¹	1.2 g i. a.	
Tebuconazol + Thiram	DMI (3), Dithio-carbamates (M3)	Sistémico-contacto	6.6 + 220 g i. a. L ⁻¹	300 mL 100 kg semilla ⁻¹	0.679 g i. a.	
Triadimenol	DMI (3)	Sistémico	150 g i. a. L ⁻¹	500 mL 100 kg semilla ⁻¹	0.75 g i. a.	<i>Sphacelotheca reiliana</i> *

Fuente: elaboración propia.

Nota: SDHI = succinate dehydrogenase inhibitors; DMI = demethylation inhibitor; * = recomendado por el fabricante para el control de *Sphacelotheca reiliana*; i. a. = ingrediente activo.

1. 4. Evaluación de la sensibilidad a fungicidas

La sensibilidad de *S. reilianum* f. sp. *zeae* a los diferentes fungicidas (cuadro 1) fue determinada sobre la germinación, tamaño del basidio, formación de basidiosporas primarias, secundarias y terciarias y formación de colonias de basidiosporas. Para cada fungicida se evaluaron cinco concentraciones: 0.0001, 0.001, 0.01, 0.1 y 1 g i. a. (gramo de ingrediente activo) L⁻¹ a partir de una solución madre a 1 g i. a. L⁻¹ diluida en RPMI-1640 (Sigma; cat#RH130-1L). La cantidad necesaria para preparar dichas concentraciones se adicionó a PDA a 50 °C (Noel *et al.*, 2018); PDA sin fungicida se usó como testigo. Una vez adicionado el fungicida al PDA, se mezcló durante 1 min con un agitador magnético estéril. La mezcla se vació en cajas Petri de plástico y se

dejaron reposar por 48 h. Se prepararon cuatro cajas por concentración de fungicida y testigo, y una suspensión de teliosporas desinfectadas en agua destilada estéril a concentración de 50 000 teliosporas estéril (Quezada-Salinas *et al.*, 2013). Se depositaron 0.5 mL de suspensión por caja con PDA y fungicida, y se distribuyó de manera uniforme sobre el medio de cultivo con un triángulo de vidrio estéril. Las cajas se incubaron en oscuridad a 25 °C.

La efectividad de cada fungicida se evaluó a las 96 h de incubación y se determinó el porcentaje de germinación, tamaño del basidio, formación de basidiosporas primarias, secundarias y terciarias y formación de colonias de basidiosporas. El porcentaje de germinación, formación de basidiosporas primarias, secundarias y terciarias y la formación de colonias de basidiosporas para cada dosis se calculó respecto al porcentaje de germinación del testigo. Las variables se cuantificaron en cuatro campos del microscopio de luz en 40x. El porcentaje medio por caja Petri se calculó usando la media de los cuatro campos observados. Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y a una prueba de comparación de medias (Tukey: $P \leq 0.05$) mediante el paquete estadístico SAS para Windows (Versión 8.1). El experimento se repitió en dos ocasiones bajo un diseño al azar. A partir de los porcentajes de inhibición de la germinación, obtenidos mediante la fórmula de Abbott (1925), se estimó la concentración efectiva 50 (CE₅₀); para ello, los porcentajes se transformaron a unidades probit y las concentraciones, a logaritmos (Throne *et al.*, 1995).

2. RESULTADOS

2. 1. Viabilidad de teliosporas

En medio PDA a 25 °C se registró 17%, 28% y 30.25% de teliosporas germinadas después de 48, 72 y 96 h respectivamente. Las teliosporas formaron un basidio septado con cuatro células y cada una de ellas dio origen a una basidiospora que desarrolló colonias tipo levadura de color crema (figura 1).

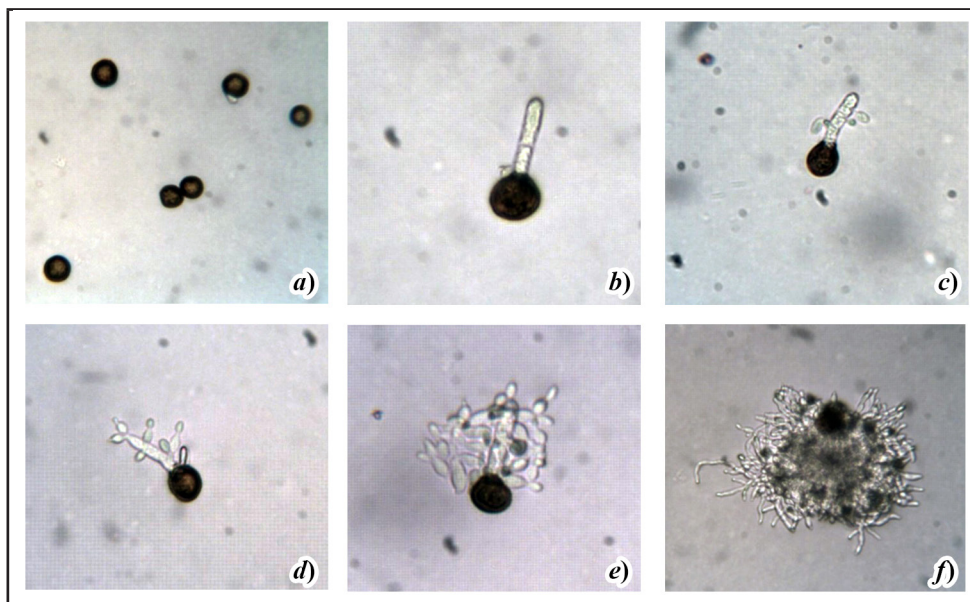


FIGURA 1

Proceso de germinación de una teliospora de *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* (sinónimo *Saphaceloteca reiliana*)

Fuente: elaboración propia.

Nota: a) Teliospora sin germinar. b) Teliospora germinada con basidio septado. c) Basidiosporas primarias. d) Basidiosporas primarias con formación de basidiosporas secundarias. e) Basidiosporas terciarias. f) Colonia de basidiosporas.

2. 2. Evaluación de la sensibilidad a fungicidas

La mayor cantidad de teliosporas germinadas en el testigo (30.25%) se obtuvo después de 96 h de incubación. Tanto en el testigo como en algunos tratamientos con fungicida, las teliosporas formaron un basidio septado con cuatro células, cada una de las cuales originó una basidiospora.

Todos los fungicidas inhibieron significativamente la germinación de teliosporas comparados con el testigo ($P \leq 0.05$) a 96 h después de la inoculación de cajas (cuadro 2). Sin embargo, carboxín inhibió en su totalidad la germinación a partir de 0.001 g i. a. L^{-1} , siendo el fungicida con mayor efectividad, seguido de carboxín+captán, el cual inhibió la germinación de teliosporas a partir de 0.01 g i.a. L^{-1} . Al respecto, ambos fungicidas están recomendados para el tratamiento de semilla de maíz y control de *Sphacelotheca reiliana* a una dosis de aplicación recomendada de 250 mL 100 kg semilla $^{-1}$ y 260 g 100 kg semilla $^{-1}$, respectivamente, que equivalen a 1 g i. a. en cada caso (cuadro 1), por lo que en este estudio se determinó que se requiere de una dosis menor a la recomendada para inhibir la germinación. Otro fungicida que también es recomendado y de mayor uso para el control de dicho patógeno es triadimenol; sin embargo, en este estudio fue el fungicida que, después del testigo (PDA), permitió el mayor porcentaje de germinación de teliosporas, el cual llegó a ser de 56.19% para la dosis más baja y de 38.01% en la mayor concentración, 1 g i. a. L^{-1} . Es decir, en ninguna de las concentraciones evaluadas para triadimenol se registró un efecto inhibitorio por arriba del 90%; cabe señalar que la dosis recomendada de acuerdo con el cuadro 1 es de 0.75 g i. a. Kg^{-1} para ejercer un control contra el patógeno. Un comportamiento muy similar al de triadimenol se observó para propiconazol, el cual también facilitó la germinación de teliosporas hasta en la dosis más alta (1 g i. a. L^{-1}). Difeconazol únicamente inhibió la germinación en la dosis de 1 g i. a. L^{-1} , por lo que requirió menor cantidad de ingrediente activo a la dosis de 1.25 g i. a. L^{-1} que recomienda el fabricante.

Por su parte, la combinación de tebuconazol+thiram, la cual está indicada para el tratamiento de semilla de cebada, avena y trigo para el control del carbón descubierto de la cebada (*Ustilago nuda*) y carbón cubierto (*Ustilago hordei*), inhibió la germinación de teliosporas de *S. reilianum* f. sp. *zeae* a partir de la concentración de 0.01 g i. a. L^{-1} . Por lo anterior se propone su uso en el tratamiento de semilla de maíz para el control del carbón de la espiga, ya que la dosis a la cual se inhibe la germinación es en menor a la dosis de aplicación que sugiere el fabricante (0.679 g i. a.). Por último, cuando se aplicó únicamente tebuconazol, la inhibición de la germinación se presentó a partir de las 0.1 g i. a. L^{-1} , que es una dosis menor a la recomendada por el fabricante (1.2 g i.a.).

CUADRO 2

Efecto de diferentes fungicidas adicionados al medio PDA en la germinación de teliosporas y la formación de basidiosporas de *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* a 25 °C en oscuridad durante 96 h de incubación

Fungicida	Fungicida Concentración (g i. a./L)	Acumulación de la germinación a las 96 horas					
		Teliosporas sólo con basidio (%)	Longitud del basidio (µm)	Teliosporas con basidio y basidiosporas primarias (%)	Teliosporas con basidio y basidiosporas secundarias (%)	> basi- diosporas secundarias (%)	Germi- nación Total (%)
Triadimenol	0.0001	3.31abc*	22.73cd	5.78abc	2.48dc	42.97bc	56.19bcd
	0.001	2.48abc	22.65cd	5.78abc	4.96abcd	40.49bcd	57.85bc
	0.01	1.65abc	21.18d	4.13bc	6.61abcd	36.36cde	54.54bcd
	0.1	1.65abc	21.76d	0.82c	4.13bcd	38.84bcd	52.06bcde
	1	2.48abc	21.00d	4.13bc	2.48dc	28.10cdefg	38.01cdefg

CUADRO 2 (continúa)

Efecto de diferentes fungicidas adicionados al medio PDA en la germinación de teliosporas y la formación de basidiosporas de *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* a 25 °C en oscuridad durante 96 h de incubación

Fungicida	Fungicida Concentración (g i. a./L)	Acumulación de la germinación a las 96 horas					
		Teliosporas sólo con basidio (%)	Longitud del basidio (µm)	Teliosporas con basidio y basidiosporas primarias (%)	Teliosporas con basidio y basidiosporas secundarias (%)	> basidiosporas secundarias (%)	Germinación Total (%)
Tebuconazole	0.0001	3.30abc	23.42cd	2.48bc	4.13bcd	42.97bc	56.19bcd
	0.001	0.82bc	27.08bc	6.61abc	3.30dc	28.10cdefg	40.49cdefg
	0.01	2.48abc	31.43b	3.30bc	5.78abcd	9.92hij	23.96ghi
	0.1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
	1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
Tebuconazole +Thiram	0.0001	2.48abc	37.71a	4.96bc	3.30dc	25.62defgh	39.67cdefg
	0.001	3.30abc	38.35a	4.96bc	2.48dc	22.31efgh	39.67cdefg
	0.01	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
	0.1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
	1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
Difenoconazole	0.0001	21.36d	3.31bc	10.74abc	32.23cdef	52.06bcde
	0.001	3.30abc	23.91cd	6.61abc	5.78abcd	35.53cde	55.37bcd
	0.01	2.48abc	21.48d	9.09ab	12.39ab	16.52fghi	44.63cdef
	0.1	4.13abc	20.06d	13.22a	13.22a	0.00j	32.23efgh
	1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
Propiconazole	0.0001	3.30abc	21.54d	1.65bc	4.13bcd	54.54b	68.59b
	0.001	3.30abc	23.36cd	9.09ab	1.65d	33.05cde	49.58bcde
	0.01	1.65abc	21.58d	2.48bc	0.82d	28.92cdef	37.19defg
	0.1	1.65abc	21.77d	4.96bc	4.13bcd	12.39ghij	28.92fgh
	1	5.78abc	21.16d	5.78abc	0.82d	0.00j	12.39hij
Carboxín+ Captán	0.0001	4.13abc	22.60cd	4.96bc	2.48dc	32.23cdef	46.28cdef
	0.001	7.43a	22.21cd	4.13bc	0.82d	1.65ij	14.04hij
	0.01	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
	0.1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
	1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
Carboxín	0.0001	6.61ab	19.10d	0.00c	0.00d	0.00j	6.61ij
	0.001	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
	0.01	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
	0.1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
	1	0.00c	0.00e	0.00c	0.00d	0.00j	0.00j
Testigo PDA	0.00c	23.49cd	0.00c	0.80d	99.1a	100.00a

Fuente: elaboración propia.

Nota: *medias con la misma letra en cada columna son iguales de acuerdo a la prueba de Tukey a una $P \leq 0.05$.

La CE₅₀ para la inhibición de la germinación de teliosporas de *S. reilianum* f. sp. *zeae* se presenta en el cuadro 3. Carboxín, carboxín+captán y tebuconazole+thiram tuvieron el mayor efecto en la inhibición de la germinación, mientras que difeconazol, propiconazol, tebuconazol, el menor efecto.

En el cuadro 3 también se muestran los valores de la CE_{50} para la inhibición de la formación de colonias de basidiosporas de *S. reilianum* f. sp. *zeae*. Carboxín en todas sus concentraciones probadas fue el único fungicida que inhibió la formación de colonias; sin embargo, todos los fungicidas fueron efectivos estadísticamente.

CUADRO 3

Concentración efectiva de fungicidas a la cual se inhibe el 50% de germinación de teliosporas y desarrollo de colonias de basidiosporas de *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* incubadas a 25 °C en oscuridad durante 96 h

Fungicida	Germinación	Formación de colonias
	CE_{50}	CE_{50}
Carboxín	0.054	0.000
Carboxín+captán	0.109	0.075
Difeconazole	1.095	0.064
Propiconazole	2.104	0.251
Tebuconazole	0.306	0.088
Tebuconazole+thiram	0.130	0.035
Triadimenol	19.609	7.1
DMS _(0.05)	5.523	0.077

Fuente: elaboración propia.

PROSPECTIVA

El hongo *S. reilianum* f. sp. *zeae* inverna como teliosporas en el suelo y en ocasiones sobre la semilla. Cuando se presentan las condiciones óptimas de temperatura y humedad del suelo para el desarrollo de las teliosporas, éstas germinan y dan origen a un filamento corto llamado *promicelio* o *probasidio*, en donde el núcleo diploide migra y experimenta la meiosis, la cual resulta en cuatro células, cada una con un núcleo haploide. Estas células producen basidiosporas, las cuales producen otras y así de manera sucesiva formando cadenas de células haploides denominadas *esporidias*. Las esporidias tienen la característica de poseer tipos de acoplamiento opuestos (+ y -), que por lo general son producidos en igual número (Ingold, 1994; Téféri *et al.*, 1989; Baier y Krüger, 1962). Esporidias con tipos de acoplamiento opuesto se unen dando origen a hifas infectivas dicarióticas (binucleadas). Estas hifas dicarióticas infectan a las plántulas de maíz vía mesocotilo o raíz (Martinez *et al.*, 2002; Martinez *et al.*, 2000; Fowler, 1985) e invaden sistémicamente los tejidos del meristemo y el tejido floral indiferenciado (Martinez *et al.*, 1999; Matyac, 1985; Fullerton, 1970).

Debido a que el inóculo se encuentra en el suelo de cultivo, los fungicidas han sido la herramienta de manejo primaria para el control del carbón de la espiga, en donde el principal objetivo es evitar la infección durante el desarrollo de la plántula (Wright *et al.*, 2006). Sin embargo, no existen estudios que sustenten su uso y que estén respaldados por evaluaciones de efectividad. Esto es de vital importancia, ya que un estudio de sensibilidad a fungicidas es fundamental para establecer una base para futuras comparaciones en el monitoreo de los cambios en la sensibilidad del patógeno a los fungicidas que, a su vez, pueden predecir la efectividad de los programas de manejo.

En México este es el primer reporte *in vitro* de la evaluación de la sensibilidad de *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* a diferentes fungicidas, en donde se analiza la germinación de teliosporas como factor de generación de esporidias, las cuales son necesarias para la formación de la hifa infectiva (dicarion), ya que la fase haploide es incapaz de infectar, y solamente la hifa dicariótica derivada de la unión de dos esporidias compatibles es infectiva (Schirawski *et al.*, 2005; Martinez *et al.*, 2002).

Aunque todos los fungicidas inhibieron significativamente la germinación de las teliosporas respecto al testigo, en nuestro estudio *S. reilianum* f. sp. *zeae* fue más sensible a carboxín, ya que únicamente se presentó la germinación de teliosporas a una dosis de 0.0001 g L^{-1} sin el desarrollo de basidiosporas, que son las responsables de la formación del dicarion (hifa infectiva) (Martinez *et al.*, 2000), por lo que este fungicida inhibe en 100% la formación de la fase infectiva a una dosis menor de la recomendada ($1000 \mu\text{g mL}^{-1}$). Asimismo, presenta la menor concentración efectiva (EC_{50}) requerida para inhibir el 50% de la germinación de teliosporas. Kosiada (2011) reportó resultados similares con carboxín en la inhibición de la germinación de teliosporas *in vitro*, en cuya investigación se utilizó la combinación de carboxín+thiram y de esta manera obtuvo una inhibición de la germinación total a partir de $0.01 \text{ g i.a. L}^{-1}$. Por su parte, Fullerton *et al.* (1974) en condiciones de campo registraron que con un tratamiento a la semilla de carboxín+captán al 0.2% es efectivo para reducir la incidencia del carbón de la espiga, ya que sólo se obtuvo un 4.56% de plantas enfermas.

Por otra parte, en todos los casos, triadimenol (fungicida recomendado para el control de *S. reilianum* f. sp. *zeae*) fue el menos efectivo en inhibir la germinación, después del testigo, pues se presentó hasta en un 38.01% en la dosis más alta (1 g i.a. L^{-1}), resultado que supera la dosis comercial recomendada de 0.75 g i.a. De acuerdo con este dato, no se recomienda seguir utilizando este ingrediente activo. Un efecto similar se obtuvo con propiconazol y difeconazol, los cuales presentaron porcentajes de germinación de teliosporas con las dosis de 1 y $0.1 \text{ g.i.a. L}^{-1}$ de 12.39 y 32.23% respectivamente. Estos fungicidas se recomiendan aplicar a dosis de 1.25 g i.a. , por lo que para el caso de difeconazol se requiere una dosis menor para inhibir la germinación. En el caso de propiconazol su eficacia en la inhibición de la germinación de teliosporas del carbón de la caña de azúcar, *Sporisorium scitamineum*, también ha sido inefectivo, ya que únicamente se ha reducido la germinación en condiciones de *in vitro* (Bhuiyan *et al.*, 2012); esto concuerda con lo reportado en esta investigación.

Sin embargo, los resultados de las pruebas en condiciones de campo pueden diferir de los observados *in vitro*; por ejemplo, en aplicación a la semilla, triadimenol y tebuconazol disminuyeron la incidencia del carbón de la espiga a 4.7% y 5.55% respectivamente, mejores resultados que carboxín (7.9%) (Gonzalez-Manzo, 1988). Asimismo, Wright *et al.* (2006) reportaron reducción del número de plantas infectadas con *S. reilianum* cuando las semillas de maíz fueron tratadas con propiconazol mediante el cual se obtuvo una incidencia del 2.3% si se compara con los de menor efectividad como tebuconazol y carboxín+thiram con 6.1 y 7.1%, respectivamente. En la evaluación realizada por Pradhanang y Ghimire (1996), donde las semillas de maíz fueron tratadas con propiconazol, tebuconazol y triadimenol, el porcentaje más bajo de plantas infectadas se produjo mediante el tratamiento con propiconazol (0.7%), seguido de tebuconazol (6.1%) y triadimenol (13.2%); lo anterior se compara con una infección del 35.9% en plantas testigo. Por su parte, Anderson (2015) determinó que los fungicidas con mayor reducción en la incidencia del carbón de la espiga fueron tebuconazol, fludioxonil y sedaxaner.

Cabe señalar que la evaluación de la eficacia de diferentes fungicidas para el control de *S. reilianum* se ha llevado a cabo con base en el tratamiento de la semilla y posterior siembra en parcelas con antecedentes de la presencia del patógeno. Ante esto se asume que la distribución del inóculo del patógeno en campo es uniforme y que cada semilla al ser sembrada tiene la misma posibilidad de estar en contacto con el patógeno y, por lo tanto, ser infectada. Este escenario ha llevado a resultados inconsistentes como los expuestos. Por lo tanto, antes de realizar una evaluación en campo, se debe tener en cuenta que la distribución del inóculo en el campo no es uniforme, sino que se presenta en agregados (Sánchez-Pale *et al.*, 2011), por lo que existe escape por contacto entre patógeno y hospedante.

De acuerdo con este panorama, se concluye que los productores, así como los beneficiadores de semilla de maíz deben continuar con el uso de carboxín para el tratamiento de la semilla, ya que inhibió el desarrollo de la fase infectiva de *S. reilianum* f. sp. *zeae*, aunque es necesaria su evaluación en campo. Asimismo, es indispensable la rotación de los productos empleados para el control de este patógeno, con base al MoA del grupo de FRAC, es decir, utilizar diferentes grupos químicos; en este sentido, se puede hacer uso de la combinación

de tebuconazol+thiram, pues gracias a esta investigación se determinó que con la dosis de 0.01 g i.a. L⁻¹, una dosis mucho menor a la recomendada de 0.679 g i.a., ya no se presenta germinación de teliosporas. Asimismo, se debe evitar el uso de triadimenol, dado que, a pesar de estar recomendado para el control de *S. reilianum* f. sp. *zeae* a una dosis comercial de 0.75 g i.a., en este trabajo permitió la germinación aún con la dosis más alta (1 g i.a. L⁻¹).

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los árbitros de la revista CIENCIA *ergo-sum* por sus revisiones y aportaciones al artículo. Sus comentarios fueron de gran utilidad para mejorar la redacción, contenido científico e interpretación de los resultados. Su comunicación fue oportuna, respetuosa y en apego a las normas establecidas por la revista.

REFERENCIAS

- Abbott, W. S. (1925). A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology*, 18, 265-267.
- Anderson, S. J., Simmons, H. E., & Munkvold, G. P. (2015). Real-time PCR assay for detection of *Sphacelotheca reiliana* infection in maize (*Zea mays*) seedlings and evaluation of seed treatment efficacy. *Plant Disease*, 99, 1847-1852. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-14-0776-RE>
- Aquino-Martínez, J. G., Sánchez-Flores, A., González-Huerta, A. y Sánchez-Pale, J. R. (2011). Resistencia de variedades e híbridos de maíz (*Zea mays*) a *Sporisorium reilianum* y su rendimiento de grano. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 29, 39-49. Retrieved from http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092011000100004
- Baier, W., & Krüger, W. (1962). *Sphacelotheca reiliana* on maize.II-Field studies on the effect of soil conditions. *South African Journal of Agricultural Science*, 5, 183-190.
- Bhuiyan, S. A., Croft, B. J., James, R. S., & Cox, M. C. (2012). Laboratory and field evaluation of fungicides for the management of sugarcane smut caused by *Sporisorium scitamineum* in seedcane. *Australasian Plant Pathology*, 41(6), 591-599. <https://doi.org/10.1007/s13313-012-0139-1>
- Fowler, M. (1985). Diseases of maize in New Zealand. *Maize management to market*. Special Publication No. 4. Agron. Soc. New Zealand.
- Fullerton, R. A. (1970). An electron microscopy of the intracellular hyphae of some smut fungi (Ustilaginales). *Australian Journal of Botany*, 18, 285-292.
- Fullerton, R. A., Scott, D. J., & Graham, G. J. (1974). Effect of fungicides on the control of head smut of maize, and the relationship between infection level and crop yield. *New Zealand Journal of Experimental Agriculture*, 2(2), 177-179. <https://doi.org/10.1080/03015521.1974.10425757>
- Ghareeb, H., Becker, A., Iven, T., Feussner, I., & Schirawski, J. (2011). *Sporisorium reilianum* infection changes inflorescence and branching architectures of maize. *Plant Physiology*, 156, 2037-2052.
- Gonzalez-Manzo, A. (1988). *Fungicidas y métodos de aplicación para el control del carbón de la espiga (Sphacelotheca reiliana) Kuhn Clinton, del maíz en Zapopan, Jalisco* (tesis de licenciatura). Universidad de Guadalajara.
- Gilchrist, S. L., Fuentes, D. G., Martínez, C. C., López, A. R. M., Duveiller, E., Singh, R. P., Henry, M., & García, A. I. (2005). *Guía práctica para la identificación de algunas enfermedades de trigo y cebada* (segunda edición). México.

- Ingold, C. T. (1994). Products of teliospore germination in *Sporisorium* spp. *Mycological Research*, 98, 467-473. [https://doi.org/10.1016/S0953-7562\(09\)81206-9](https://doi.org/10.1016/S0953-7562(09)81206-9)
- Kosiada, T. (2011). *In vitro* influence of selected fungicides on *Sphacelotheca reiliana* and *Ustilago maydis*. *Journal of Plant Protection Research*, 51(4), 342-348. <https://doi.org/10.2478/v10045-011-0056-2>
- Martinez, C. A., Roux, C., Jauneau, A., & Dargent, R. (2002). The biological cycle of *Sporisorium reilianum* f.sp. *zeae*: an overview using microscopy. *Mycologia*, 94, 505-514. <https://doi.org/10.2307/3761784>
- Martinez, C. A., Jauneau, C., Roux, C., Savy, C., & Dargent, R. (2000). Early infection of maize roots by *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae*. *Protoplasma*, 213, 83-92. <https://doi.org/10.1007/BF01280508>
- Martinez, C., Roux, C., & Dargent, R. (1999). Biotrophic development of *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* in vegetative shoot apex of maize. *Phytopathology*, 89, 247-253. <https://doi.org/10.1094/PHYTO.1999.89.3.247>
- Martínez, R. J. L., y Ledesma, M. J. (1990). Control químico del carbón de la espiga *Sphacelotheca reiliana* (Kühn) Clint., del maíz, en el valle de Zapopan, Jalisco. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 8, 68-70.
- Matyac, C. A. (1985). Histological development of *Sphacelotheca reiliana* on *Zea mays*. *Phytopathology*, 75, 924-929.
- Matyac, C. A., & Kommedahl, T. (1985a). Factors affecting the development of head smut caused by *Sphacelotheca reiliana* on corn. *Phytopathology*, 75, 577-581.
- Matyac, C. A., & Kommedahl, T. (1985b). Occurrence of chlorotic spots on corn seedlings infected with *Sphacelotheca reiliana* and their use in evaluation of head smut resistance. *Plant Disease*, 69, 251-254.
- Noel, Z. A., Wang, J., & Chilvers, M. I. (2018). Significant Influence of EC₅₀ Estimation by Model Choice and EC₅₀ Type. *Plant Disease*, 102, 708-714.
- Pataky, J. K. (1999). Smuts. In D. G. White (ed.), *Compendium of corn diseases* (3th. ed.). Minnesota: APS Press.
- Pérez, C. J. P., Bobadilla, M. M., Velásquez, C. G., Zacatenco, G. M. A., Espinoza, C. A. (2006). Logros y aportaciones de la investigación en maíz de riego en el Valle del Mezquital, Hgo. (pp. 55-65), *Memorias de veinte años de investigación y desarrollo tecnológico. Campo Exptl. Pachuca, Hidalgo*. Pachuca: INIFAP.
- Pradhanang, P. M., & Ghimire, S. R. (1996). Fungicide management of maize head smut (*Sphacelotheca reiliana*) by seed treatment. *Tropical Agriculture*, 73, 325-328. <https://doi.org/10.1080/01140671.2006.9514383>
- Quezada-Salinas, A., De León-García De Alba, C., Hernández-Anguiano, A. M. y Nava-Díaz, C. (2013). Evaluación de métodos de inoculación de semillas de maíz con *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* (Kühn) Langdon & Fullerton. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 31, 80-90.
- Reséndiz, R. Z., López, S. J. A., Osorio, H. E., Estrada, D. B., Pecina, M. J. A., Mendoza, C. M. C., & Reyes, M. C. A. (2016). Importancia de la resistencia del maíz nativo al ataque de larvas de lepidópteros. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 20(59), 3-14.
- Sánchez-Pale, J. R., Ramírez-Dávila, J. F., González-Huerta, A., & De León, C. (2011). Spatial distribution of head smut (*Sporisorium reilianum*) of corn in Mexico. *Ciencia e Investigación Agraria*, 38(2), 253-263. <https://doi.org/10.4067/S0718-16202011000200011>
- Schirawski, J., Heinze, B., Wagenknecht, M., & Kahmann, R. (2005). Mating type loci of *Sporisorium reilianum*: Novel pattern with three a and multiple b specificities. *Eukaryotic Cell*, 4(8), 1317-1327. <https://doi.org/10.1128/EC.4.8.1317-1327.2005>.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2021). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola 2020*. Disponible en <https://nube.siap.gob.mx/cierreagricola/>
- Stienstra, W. C., Kommedahl, T., Stromberg, E. L., Matyac, C. A., Windels, C. E., & Morgan, F. (1985). Suppression of corn head smut with seed and soil treatments. *Plant Disease*, 69, 301-302.

- Stromberg, E. L., Stienstra, W. C., Kommedahl, T., Matyac, C. A., Windels, C. E. & Geadelmann, J. L. (1984). Smut expression and resistance of corn to *Sphacelotheca reiliana* in Minnesota. *Plant Disease*, 68, 880-884.
- Téféri, A., Petitprez, M., Valles, V., & Albertini, L. (1989). Influence of soil water potential and soil texture on infection of maize by head smut agronomie. *Mycologia*, 9, 677-682.
- Throne, J. E., Weaver, D. K., & Baker, J. E. (1995). Probit analysis: assessing goodness-of-fit based on backtransformation and residuals. *Journal of Economic Entomology*, 88, 1513-1516.
- Wright, P. J., Fullerton, R. A., & Koolaard, J. P. (2006). Fungicide control of head smut (*Sporisorium reilianum*) of sweetcorn (*Zea mays*). *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 34, 23-26. <https://doi.org/10.1080/01140671.2006.9514383>
- Zhang, S., Xiao, Y., Zhao, J., Wang, F., & Zheng, Y. (2013). Digital gene expression analysis of early root infection resistance to *Sporisorium reilianum* f. sp. *zetae* in maize. *Molecular Genetics and Genomics*, 288(1-2), 21-37. <https://doi.org/10.1007/s00438-012-0727-3>

CC BY-NC-ND