

Implementación del procesamiento de imágenes para la evaluación de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) en maíz (*Zea mays*)

Implementation of image processing for the evaluation of tar spot (*Phyllachora maydis*) in corn (*Zea mays*)

Rómulo Enrique Vincés-Tachong¹ , Mayra Carolina Vélez-Ruiz¹ ,
Ramiro Remigio Gaibor-Fernández¹  y Favio Eduardo Herrera-Eguez^{1,‡} 

¹ Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ecuador. Avenida Quito, km 1.5 vía a Santo Domingo de los Tsáchilas. 120501 Quevedo, Los Ríos, Ecuador.

[‡] Autor para correspondencia (fherrerae@uteq.edu.ec)

Editor de Sección: Dr. Fernando Abasolo Pacheco

RESUMEN

La enfermedad conocida como mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) afecta al cultivo de maíz (*Zea mays*). Esta enfermedad causa lesiones en las hojas que al progresar pueden ocasionar la muerte de la planta. Existen diferentes métodos para evaluar el progreso de una enfermedad en las plantas. Generalmente, se utilizan escalas de evaluación visual; sin embargo, su uso es bastante subjetivo. El procesamiento de imágenes ha sido utilizado como una alternativa para la evaluación de enfermedades. Este método evita sesgos y errores durante las evaluaciones. El objetivo de este ensayo fue utilizar el aplicativo telefónico Leaf Doctor como una alternativa a la evaluación de la enfermedad producida por *P. maydis*. Para el experimento se utilizó un diseño de bloques completamente al azar. Se sembraron tres variedades de maíz y se evaluó el nivel de tolerancia a la mancha de asfalto al ser tratadas con diferentes dosis de silicio. Las diferentes dosis de silicio no reducen la enfermedad, sin embargo, fue posible determinar aumento de la producción de maíz en dosis de silicio de 252 kg ha⁻¹. Los resultados indican que el programa puede considerarse como una alternativa eficiente para evaluar la mancha de asfalto debido a la alta correlación con la escala de evaluación visual (R²: 0.77-0.94). La variedad más resistente a la enfermedad fue INIAP-551.

Palabras clave: dosis, hoja, resistente, silicio, susceptible.

SUMMARY

The disease known as tar spot (*Phyllachora maydis*) affects corn (*Zea mays*). It causes lesions on the leaves that, when progressing, can cause the death of the plant. There are different methods to assess the progress of a disease in plants. Visual assessment scales are generally used; however, their use is quite subjective. Image processing has been used in recent times as an alternative for the evaluation of plant diseases. This alternative avoids bias and error during evaluations. The objective of this experiment was to use the Leaf Doctor cell phone application as an alternative to the evaluation of the disease caused by *P. maydis*. For the experiment, a completely randomized block design was used. Three varieties of corn were planted and the level of tolerance to tar spot was evaluated when treated with different doses of silicon. The most resistant variety to the disease was INIAP-551. The different doses of silicon do not reduce the disease; however, it was possible to determine an increase in the production of corn in doses of silicon of 252 kg ha⁻¹. The results indicate that the program can be considered as an efficient alternative to evaluate the development of the disease known as tar spot due to the high correlation with the visual assessment scale (R²: 0.77-0.94).

Cita recomendada:

Vincés-Tachong, R. E., Vélez-Ruiz, M. C., Gaibor-Fernández, R. R. y Herrera-Eguez, F. E. (2022). Implementación del procesamiento de imágenes para la evaluación de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) en maíz (*Zea mays*). *Terra Latinoamericana*, 40, 1-7. e1066. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.1066>

Recibido: 26 de octubre de 2021. Aceptado: 10 de enero de 2022.
Artículo. Volumen 40, noviembre de 2022.

Index words: doses, leaf, resistant, silicion, susceptible.

INTRODUCCION

La mancha de asfalto es una enfermedad que afecta al cultivo de maíz (*Zea mays*). Esta enfermedad es provocada por el hongo ascomyceto *Phyllachora maydis*. La presencia de *P. maydis* reduce el rendimiento y en algunos casos puede llegar a causar la muerte de plantas de maíz (Bajet, Renfro y Valdéz, 1994). A nivel de América latina se han documentado pérdidas de rendimiento de hasta el 46% (Hock, Kranz y Renfro, 1989, Pereyda-Hernández *et al.*, 2009). El patógeno es endémico de latino américa, pero fue identificado en México en 1904 (Maublanc, 1904). Los síntomas del complejo de mancha de asfalto suelen estar documentado por tres tipos de hongos que presentan diferentes síntomas.

La mancha de asfalto se caracteriza por la presencia de estromas negros en las hojas. Estas manchas son producto de los cuerpos fructíferos de *P. maydis* (Cannon, 1991). Este hongo es un biótrofo obligado que comienza infectando la parte baja de la planta, aunque puede infectar vainas o mazorcas (Bajet *et al.*, 1994). Una vez establecido, el hongo se distribuye a través de la hoja provocando manchas que llegan a unirse. Posteriormente, causando necrosis, senescencia prematura y muerte (Carson, 1999; Hock, Kranz y Renfro, 1995). El patógeno suele estar asociado al maíz, aunque otros géneros de *Phyllachora* pueden presentarse en gramíneas (Parbery, 1963).

P. maydis suele estar asociada con otros hongos como *Monographella maydis* y *Coniothyrium phyllachorae* (Hock *et al.*, 1995). *M. maydis* presenta lesiones de tipo ojo de pescado en las hojas cuando se asocia con *P. maydis* (Bajet *et al.*, 1994). Estas asociaciones se determinaron usando caracterizaciones morfológicas del patógeno, aunque los especímenes usados en la identificación se han perdido (Müller y Samuels, 1984). Cuando se documentaron las asociaciones con *C. phyllachorae*, se determinó que este hongo suele destruir los estromas, por lo que se considerado un posible controlador biológico (Hock *et al.*, 1989). En Ecuador, estos síntomas están presentes, pero *M. maydis* ni *C. phyllachorae* han sido documentados (McCoy *et al.*, 2019).

P. maydis produce esporas sexuales (ascosporas) y asexuales (conidias) (Hock, Dittrich, Renfro y Kranz, 1992). Estas esporas requieren temperaturas entre

20 y 25 °C y humedades relativas mayores al 75% para poder germinar (Groves, Kleczewski, Telenko, Chilvers y Smith, 2020). Las esporas pueden sobrevivir condiciones adversas como fuertes inviernos o la ausencia prolongada del huésped principal (Mottaleb, Loladze, Sonder, Kruseman y San Vicente, 2019). Las esporas suelen ser liberadas desde el estroma por fuertes lluvias o vientos (Hock *et al.*, 1995). Estas condiciones climáticas son predominantes en la provincia de Los Ríos, Ecuador y favorecen la repetición de múltiples ciclos de enfermedad.

Existen diferentes métodos para el manejo de la enfermedad. El uso de variedades resistentes parece ser la mejor alternativa debido al alto número de germoplasma disponible (Cao *et al.*, 2017; Mahuku *et al.*, 2016). Esta resistencia es muy hereditable y dominante en la naturaleza (Ceballos y Deutsch, 1992). Ensayos de loci de rasgos cuantitativos (QTL) han demostrado una variación entre el 18 y 46% de la variación fenotípica en la severidad de la enfermedad (Cao *et al.*, 2017; Mahuku *et al.*, 2016). Esto indica que se deben utilizar otros métodos para controlar la enfermedad.

El uso de fungicidas químicos alternando su modo de acción es otra herramienta para el manejo de la enfermedad. Los ensayos realizados han tenido diferentes niveles de eficiencia. Esto se debe a la variación climática que existe durante los diferentes años. Los autores concuerdan en que una aplicación en el momento adecuado es crítica al momento de controlar la enfermedad usando este método (Kleczewski *et al.*, 2019). La rotación de cultivos y manejo de la lámina de riego parece tener un efecto en reducir la severidad de la enfermedad (Telenko *et al.*, 2019). La zona de Los Ríos es conocida por su monocultivo de maíz y la humedad relativa alta debido al nivel de pluviosidad. Esto hace que estas alternativas no sean consideradas.

El uso de silicio parece ser una alternativa para el control de enfermedades producidas por hongos (Camargo, Amorim y Júnior, 2013). Distintos autores han registrado diferentes beneficios de la nutrición con silicio en las plantas. Algunos beneficios son: mayor crecimiento vegetal, fortalecimiento de la pared celular vegetal y tolerancia al estrés hídrico y térmico (Datnoff, Deren y Snyder, 1997). Este elemento puede reducir la progresión de la enfermedad. En la evaluación de enfermedades de tipo foliar como la mancha de asfalto, los ensayos hacen uso de escalas visuales. Las escalas visuales suelen ser subjetivas por parte del evaluador. Es necesario un método que reduzca el sesgo.

Las escalas de evaluación visuales presentan diferentes inconvenientes. El cansancio por parte del evaluador hace que los datos disminuyan su precisión y eficiencia. Incluso diferentes evaluadores pueden presentar diferentes datos usando la misma muestra (Nutter Jr, 1993). El procesamiento de imágenes reduce el sesgo por parte del investigador durante las evaluaciones (Pethybridge y Nelson, 2015). El software más conocido en el procesamiento de imágenes es ASSESS (Lamari, 2008). ASSESS ha disminuido su uso por los programas de código abierto. Estos programas permiten la personalización además de no tener altos costos (Wijekoon, Goodwin y Hsiang, 2008).

El objetivo de la investigación fue implementar el procesamiento de imágenes (Leaf Doctor) como una herramienta para la evaluación de la severidad de la mancha de asfalto. El procesamiento de imágenes fue comparado con las escalas visuales usando diferentes tipos de estrés biológico. Entre las variables evaluadas se encuentran: 1) la aplicación de diferentes dosis de silicio. 2) Se evaluaron hojas de diferente altura en la planta. 3) Se evaluaron variedades susceptibles y resistentes a la mancha de asfalto. 4) Se evaluaron diferentes periodos de siembra (2018-2021). Los resultados buscan establecer el uso de procesamiento de imágenes (Leaf Doctor) como una alternativa gratuita para la evaluación de la enfermedad.

MATERIALES Y METODOS

Área de Estudio

La investigación se realizó en las instalaciones de la finca experimental “La María” de la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, ubicada en el km 7 vía Quevedo-El Empalme, cuyas coordenadas geográficas son las siguientes: 79° 27” O y 01° 32” S a una altitud de 67 m.

Material Genético

Las variedades de maíz utilizadas fueron INIAP-551 (Instituto Ecuatoriano de Investigaciones Agropecuarias), Trueno (Agripac-Syngenta) y DK-7088 (Ecuaquímica), las cuales presentan diferentes niveles de tolerancia a la mancha de asfalto y son cultivadas en la zona de Los Ríos-Ecuador.

Tratamientos y Diseño Experimental

El diseño experimental usado fue de bloques completamente al azar (BCA) con tres repeticiones por tratamiento, donde cada unidad experimental estuvo comprendida por un área de 49 m². Cada parcela experimental fue sembrada a una densidad de 55 000 plantas por hectárea. Para el control de malezas se utilizó el herbicida Glifosato, con dosis de 2 L ha⁻¹, y para el control de insectos piretrinas con butóxido de piperonilo con dosis de 1 L ha⁻¹. Posterior al análisis de suelo, la fertilización se realizó con dosis de nitrógeno (200 kg ha⁻¹), potasio y fósforo (150 kg ha⁻¹), y para la evaluación de silicio con dosis 336, 252, 168 y 84 kg ha⁻¹ (Tamimi y Hunter, 1970). Los fertilizantes fueron fraccionados en tres partes a los 8, 30 y 45 días después de la siembra. Las variedades de maíz Trueno y DK-7088 fueron sembradas durante el período 2018 y 2019 y la variedad INIAP-551 durante el año 2021.

Variables Evaluadas

Severidad de la Mancha de Asfalto

Para evaluar la severidad de la mancha de asfalto se usó la escala diagramática de severidad para el complejo mancha de asfalto del maíz propuesta por Hernández y Sandoval (2015), de las hojas evaluadas se tomaron fotografías usando el programa Leaf Doctor (Pethybridge y Nelson, 2015), señalando los síntomas provocados en el tejido foliar. Para evaluar el programa comparándolo con la escala diagramática se usaron dos variedades con diferentes niveles de resistencia a la mancha de asfalto (Trueno y DK-7088). Para determinar si existe diferencia en la infección de hojas evaluadas a diferente altura, se usaron hojas tanto del tercio bajo, medio y alto (dos, cuatro y seis nudos desde la raíz hacia la inflorescencia respectivamente) de la variedad INIAP-551. La evaluación con el programa se realizó previo a la cosecha (120 días después de la siembra aproximadamente). Se utilizó la variedad INIAP-551 para la evaluación de hojas de distinta altura, por ser una variedad resistente a mancha de asfalto, en comparación a Trueno y DK-7088 donde sólo se evaluaron hojas bajas.

Rendimiento y Beneficio Neto

Se tomaron datos de cosecha cada uno de los tratamientos, eliminando las plantas de borde. Se registró

el peso total del maíz cosechado de cada una de las parcelas y se realizó un análisis de beneficio/costo en cada uno de los tratamientos al precio oficial de venta según el Ministerio de Agricultura del Ecuador ($\$0.88 \text{ kg}^{-1}$) al momento de realizar el ensayo.

Análisis Estadístico

Para validar el procesamiento de imágenes Leaf Doctor en comparación con la escala diagramática de severidad se realizó un análisis de regresión lineal. Se realizó la comparación entre la severidad de daño en cada una de las hojas, variedades y rendimiento. Para las variables de rendimiento y severidad de las hojas, se utilizó el análisis de varianza y comparaciones múltiples de medias (Tukey, $P = 0.05$). Los valores promedio se consideraron diferentes estadísticamente cuando $P \leq 0.05$. Los análisis estadísticos se realizaron con el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2009).

RESULTADOS Y DISCUSION

La mancha de asfalto (*P. maydis*) es un hongo patógeno obligado en el maíz que disminuye el rendimiento entre el 11 y 46% en América Latina (Hock *et al.*, 1989; Pereyda-Hernández *et al.*, 2009). Los síntomas producidos por el hongo suelen ser de estromas negros en ambos lados de las hojas cuando el cuerpo fructífero de *P. maydis* tiene condiciones óptimas de temperatura y humedad (Carson, 1999; CIMMYT, 2003). En casos severos puede causar necrosis, senescencia prematura y muerte de la planta (Ceballos y Deutsch, 1992; Hock *et al.*, 1995).

El manejo de la enfermedad suele estar basado en: 1) evitar el uso de híbridos susceptibles, 2) aplicación de fungicidas con modos de acción variados durante el momento adecuado, 3) manejo del riego, 4) rotación de cultivos con el fin de descomponer el patógeno y, 5) remoción de residuos de cultivos de maíz previos (Kleczewski *et al.*, 2019; Telenko *et al.*, 2019). Adicionalmente, ensayos de nutrición con silicio han documentado efectos positivos en el cultivo (Tamimi y Hunter, 1970).

Debido a la naturaleza biotrófica de *P. maydis*, estudios de laboratorio son difíciles ya que el patógeno no ha sido cultivado en medios sintéticos (Müller y Samuels, 1984). Distintas especies de *Phyllachora* han sido identificadas mediante síntomas y características morfológicas (Maublanc, 1904; Parbery 1963, Ruhl *et al.*, 2016) y ensayos de evaluación de híbridos en

campo suelen reportar pérdidas de hasta 91.5 kg ha^{-1} por cada incremento de 1% en la severidad del patógeno (Telenko *et al.*, 2019). Por estos motivos, tener diferentes métodos para la evaluación de la enfermedad son necesarios.

El presente estudio presenta el procesamiento de imágenes (Leaf Doctor), como una alternativa a la evaluación del progreso de la enfermedad. Usando diferentes variedades de maíz propias de la zona de Los Ríos, Ecuador (DK-7088, Trueno e INIAP-551), durante diferentes períodos (2018-2019-2021), hojas de diferente altura y diferentes dosis de silicio aplicados a la planta. Los estimados de la evaluación de la severidad de la enfermedad usando el programa Leaf Doctor y las escalas de evaluación visual fueron altamente similares con relaciones lineares significantes ($P < 0.001$). Los coeficientes de determinación (R^2) fueron de al menos 0.77 y los coeficientes de variación fueron menores usando el programa en comparación a la escala visual (Cuadro 1).

El uso de diferente germoplasma de maíz ha demostrado que existe un rango de resistencia a la mancha de asfalto (Cao *et al.*, 2017). El locus de rasgo cuantitativo conocido como *qRtsc8-1* de maíz producido en regiones de centro y sur América explica una variación fenotípica a la severidad de la enfermedad del 18 al 43% (Mahuku *et al.*, 2016). Los resultados obtenidos en este ensayo sugieren que el híbrido DK-7088 presenta una mayor severidad de mancha de asfalto en comparación a los híbridos de maíz Trueno e INIAP-551; adicionalmente, el híbrido Trueno tiene una mayor severidad que INIAP-551 (Cuadro 2).

Cuadro 1. Coeficiente de variación media (%) y determinación (R^2) de evaluaciones de hojas de maíz con síntomas de mancha de asfalto (n=90). Hojas alta, media y baja pertenecen a la variedad de maíz INIAP-551.

Table 1. Mean variation coefficient (%) and determination (R^2) of evaluations from leaves of corn with tar spot symptoms (n=90). High, medium, and low leaves belong to INIAP-551 corn variety.

Tipo de hoja de maíz	Programa Visual		R ²	P=
	- - - % - - -			
Alta	3.85	5.17	0.77	<0.001
Media	2.82	4.91	0.78	<0.001
Baja	7.59	8.04	0.79	<0.001
DK-7088	13.19	15.95	0.94	<0.001
Trueno	9.17	11.86	0.94	<0.001

Cuadro 2. Severidad de mancha de asfalto (%) entre dos variedades de maíz (n=90) bajo diferentes dosis de silicio, el mejor rendimiento y su relación beneficio/costo (B/C) (dosis: Si 252 kg ha⁻¹).**Table 2. Disease severity (%) between two varieties of corn (n=90) under different doses of silicon, the highest yield and benefit/cost analysis (B/C) (doses: Si 252 kg ha⁻¹).**

Variedad	Control	NPK	Si 336	Si 252	Si 168	Si 84	Rendimiento	B/C
			----- kg ha ⁻¹ -----					
DK-7088	15.95 a	8.81 b	7.77 b	9.15 b	8.61 b	8.65 b	23.81	1.28
Trueno	9.17 a	4.35 b	3.61 b	6.51 b	7.49 b	7.78 b	25.82	1.39

Medias con letras iguales no difieren significativamente para el análisis de varianza Tukey ($P < 0.05$).Means with the same letters do not differ significantly for the analysis of variance Tukey ($P < 0.05$).

Las hojas mayormente afectadas suelen ser de tipo basal (tercio bajo) debido a una transmisión del hongo por residuos de cosecha (Kleczewski *et al.*, 2019; Groves *et al.*, 2020). Sin embargo, hojas de diferente edad, altura o diferentes partes de la vaina o chala pueden también ser afectados (Bajet *et al.*, 1994; Hock *et al.*, 1995). Las partes infectadas apicales (tercio alto) en la planta sugieren una transmisión de larga distancia como fuente primaria de inóculo, sin embargo, la mayor distancia documentada de transmisión del inóculo hacia el área de cultivo es de 31 m (Liu, 1973). En el presente ensayo, las hojas bajas (tercio bajo), presentan una mayor severidad en comparación a las hojas medias y altas (cuatro y seis nudos respectivamente); sugiriendo que la fuente de inóculo es una descomposición pobre de cultivos previos y constante monocultivo en la zona (Cuadro 3).

El uso del silicio en la agricultura ha documentado beneficios agronómicos en la planta como mayor

crecimiento vegetativo (Datnoff *et al.*, 1997); reforzamiento de la pared celular vegetal (Ma y Takahashi, 2002), reducción del estrés oxidativo (Gunes, Inal, Bagci y Coban, 2007), disminución del estrés hídrico (Pei *et al.*, 2010), entre otros. Estos efectos positivos han llevado a su evaluación en el control de enfermedades de patógenos importantes del suelo (Roma-Almeida *et al.*, 2016; Dannon y Wydra, 2004; Saigusa, Onozawa, Watanabe y Shibuya, 2000) y del tipo foliar (Tamimi y Hunter, 1970; Kablan, Lagauche, Delvaux y Legrve, 2012; Camargo *et al.*, 2013). En el presente ensayo muestra que no existe una diferencia significativa en el control de la enfermedad en comparación al manejo convencional, sin embargo, el aumento en rendimiento incrementa el beneficio para el agricultor de la zona usando la dosis de silicio de 252 kg ha⁻¹ (Cuadros 2, 3) cuando se comparan las diferentes relaciones de beneficio/costo.

Cuadro 3. Severidad de la mancha de asfalto (%) de 3 hojas de diferente altura bajo diferentes dosis de silicio. Rendimiento total por tratamiento y su relación beneficio/costo (B/C).**Table 3. Disease severity of tar spot (%) of 3 leaves from different height under different doses of silicon. Total yield per treatment and benefit/cost analysis (B/C).**

Tratamiento	Alta	Media	Baja	Rendimiento	B/C
	%			kg	
Control	2.09	2.02	6.81	25.01 *	1.35
NPK	1.57	1.96	4.22	29.23	1.58
Si 336	1.47	1.74	3.41	30.31	1.64
Si 252	2.86	2.62	3.95	30.93	1.67
Si 168	1.53	2.63	4.51	29.53	1.60
Si 84	2.24	2.44	4.81	29.71	1.60

* Diferencia significativa con el resto de los tratamientos Tukey ($P < 0.05$).* Statistical differences with the rest of the treatments Tukey ($P < 0.05$).

CONCLUSIONES

Existen distintos métodos de evaluación visual y escalas representativas que son usadas para fenotipado o evaluaciones epidemiológicas. Estos métodos están basados en secciones de hojas donde los síntomas muchas veces no son uniformes (Valle-Torres *et al.*, 2020). Otros métodos, como el uso de drones que miden reflectancia (Mahlein, Kuska, Behmann, Polder y Walter, 2018) o índices vegetativos (Loladze *et al.*, 2019) pero requieren de equipos costosos y personal capacitado, aunque podrían ser más eficaces en grandes hectáreas. El presente ensayo indica que el software Leaf Doctor puede ser usado como un método de evaluación para la mancha de asfalto. El software no tiene costo y es de fácil manejo para los productores de la zona de Los Ríos que buscan optimizar el tiempo y aplicaciones de fungicidas en su cultivo.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 7^{ma} Convocatoria, a través del Proyecto "Epidemiología de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) en maíz (*Zea mays*) bajo el efecto de la aplicación de silicio usando el procesador de imágenes Leafdoctor[®]".

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Investigación, metodología y escritura: R.E.V.T. Escritura: revisión, edición y preparación del borrador

original: M.C.V.R. Administración del proyecto, escritura: revisión y edición: R.R.G.F. Curación de datos, análisis de datos, adquisición del fondo, conceptualización, escritura: F.E.H.E.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Técnica Estatal de Quevedo, por el apoyo otorgado a través del Fondo Competitivo de Investigación Científica y Tecnológica (FOCICYT) 7^{ma} Convocatoria, a través del Proyecto "Epidemiología de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis*) en maíz (*Zea mays*) bajo el efecto de la aplicación de silicio usando el procesador de imágenes Leafdoctor[®]".

LITERATURA CITADA

- Bajet, N. B., Renfro, B. L., & Valdéz-Carrasco, J. M.V. (1994). Control of tar spot of maize and its effect on yield. *International Journal of Pest Management*, 40(2), 121-125. <https://doi.org/10.1080/09670879409371868>
- Camargo, M.S., Amorim, L., & Júnior, A.R.G. (2013). Silicon fertilization decreases brown rust incidence in sugarcane. *Crop Protection*, 53, 72-79. <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2013.06.006>
- Cao, S., Loladze, A., Yuan, Y., Wu, Y., Zhang, A., Chen, J., ... Zhang, X. (2017). Genome-wide analysis of tar spot complex resistance in maize using genotype-bysequencing SNPs and whole genome prediction. *The Plant Genome*, 10(2), 1-14. <https://doi.org/10.3835/plantgenome2016.10.0099>
- Cannon, P. F. (1991). *A revision of Phyllachora and some similar genera on the host family Leguminosae* (302 pp.). Wallingford, United Kingdom: CAB International. ISBN: 0851987354
- Carson, M. L. (1999). *Diseases of minor importance and limited occurrence. Compendium of Corn Diseases*. Minnesota, USA: American Phytopathological Society.
- Ceballos, H., & Deutsch, J. A. (1992). Inheritance of resistance to tar spot complex in maize. *Phytopathology*, 82(5), 505-512.
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo). (2003). *Maize Diseases: A Guide for Field Identification*. (4th ed.). D.F., Mexico: CIMMYT.
- Dannon, E. A., & Wydra, K. (2004). Interaction between silicon amendment, bacterial wilt development and phenotype of *Ralstonia solanacearum* in tomato genotypes. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 64(5), 233-243. <https://doi.org/10.1016/j.pmpp.2004.09.006>
- Datnoff, L. E., Deren, C. W., & Snyder, G. H. (1997). Silicon fertilization for disease management of rice in Florida. *Crop Protection*, 16(6), 525-531. [https://doi.org/10.1016/S0261-2194\(97\)00033-1](https://doi.org/10.1016/S0261-2194(97)00033-1)
- Di Rienzo, J. A., Balzarini, M. G., González, L., Casanoves, F., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2009). *InfoStat. Manual del Usuario Versión 18*. Córdoba, Argentina: Editorial Brujas.
- Groves, C. L., Kleczewski, N. M., Telenko, D. E. P., Chilvers, M. I., & Smith, D. L. (2020). *Phyllachora maydis* ascospore release and germination from overwintered corn residue.

- Plant Health Progress*, 21(1), 26-30. <https://doi.org/10.1094/PHP-10-19-0077-RS>
- Gunes, A., Inal, A., Bagci, E. G., & Coban, S. (2007). Silicon-mediated changes on some physiological and enzymatic parameters symptomatic of oxidative stress in barley grown in sodic-B toxic soil. *Journal of Plant Physiology*, 164(6), 807-811. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2006.07.011>
- Hernández-Ramos, L., & Sandoval-Islas, J. S. (2015). Escala diagramática de severidad para el complejo mancha de asfalto del maíz. *Revista Mexicana de Fitopatología*, 33, 95-103.
- Hock, J., Dittich, U., Renfro, B. L., & Kranz, J. (1992). Sequential development of pathogens in the maize tar spot disease complex. *Mycopathologia*, 117(3), 157-161. <https://doi.org/10.1007/BF00442777>
- Hock, J., Kranz, J., & Renfro, B. L. (1995). Studies on the epidemiology of the tar spot disease complex of maize in Mexico. *Plant Pathology*, 44, 490-502. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb01671.x>
- Hock, J., Kranz, J., & Renfro, B. L. (1989). El complejo "mancha de asfalto" de maíz: Su distribución geográfica, requisitos ambientales e importancia económica en Mexico. *Revista Mexicana Fitopatología*, 7(2), 129-135.
- Kablan, L., Lagauche, A., Delvaux, B., & Legrve, A. (2012). Silicon reduces black sigatoka development in banana. *Plant Disease*, 96(2), 273-278. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-11-0274>
- Kleczewski, N. M., Chilvers, M., Mueller, D. S., Plewa, D., Robertson, A. E., Smith, D. L., ... Telenko, D. E. P. (2019). *Corn disease management: Tar spot*. CPN 2012-W. Washington, DC, USA: Crop Protection Network. <https://doi.org/10.31274/cpn-20190620-008>
- Lamari, L. (2008) *Assess: image analysis software for plant disease quantification V2.0*. St. Paul, MN, USA: The American Phytopathological Society.
- Liu, L. J. (1973). Incidence of tar spot disease of corn in Puerto Rico. *Journal of Agriculture of the University of Puerto Rico*, 42, 211-216.
- Loladze, A., Rodrigues Jr, F. A., Toledo, F., San Vicente, F., Gérard, B., & Boddupalli, M. P. (2019). Application of remote sensing for phenotyping tar spot complex resistance in maize. *Frontiers in Plant Science*, 10, 1-10.
- Ma, J. F., & Takahashi, E. (2002). *Soil, fertilizer, and plant silicon research in Japan*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. ISBN: 0 444 51166 0
- Mahlein, A. K., Kuska, M. T., Behmann, J., Polder, G., & Walter, A. (2018). Hyperspectral sensors and imaging technologies in phytopathology: state of the art. *Annual Review of Phytopathology*, 56, 535-558.
- Mahuku, G., Chen, J., Shrestha, R., Narro, L. A., Osorio-Guerrero, K. V., Arcos, A. L., & Xu, Y. (2016). Combined linkage and association mapping identifies a major QTL (qRtsc8-1), conferring tar spot complex resistance in maize. *Theoretical and Applied Genetics*, 129, 1217-1229.
- Maublanc, A. (1904). Espèces nouvelles de champignons inférieurs. *Bulletin de la Societe Mycologique de France*, 20, 72-74.
- Mottaleb, K. A., Loladze, A., Sonder, K., Kruseman, G., & San Vicente, F. (2019). Threats of tar spot complex disease of maize in the United States of America and its global consequences. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 24(2), 281-300. <https://doi.org/10.1007/s11027-018-9812-1>
- McCoy, A. G., Roth, M. G., Shay, R., Noel, Z. A., Jayawardana, M. A., Longley, R. W., ... Chilvers, M. I. (2019). Identification of fungal communities within the tar spot complex of corn in Michigan via Next-Generation Sequencing. *Phytopathology*, 3(3), 235-243. <https://doi.org/10.1094/PBIOMES-03-19-0017-R>
- Müller, E., & Samuels, G. J. (1984). *Monographella maydis* sp. nov. and its connection to the tar-spot disease of *Zea mays*. *Nova Hedwigia*, 40(1), 113-121.
- Nutter Jr, F. W., Gleason, M. L., Jenco, J. H., & Christians, N. C. (1993). Assessing the accuracy, intra-rater repeatability, and inter-rater reliability of disease assessment systems. *Phytopathology*, 83(8), 806-812.
- Parbery, D. G. (1963). Studies on graminicolous species of *Phyllachora* Fekl. I. Ascospores-their liberation and germination. *Australian Journal of Botany*, 11(2), 117-130.
- Pei, Z. F., Ming, D. F., Liu, D., Wan, G. L., Geng, X. X., Gong, H. J., & Zhou, W. J. (2010). Silicon improves the tolerance to water-deficit stress induced by polyethylene glycol in wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings. *Journal of Plant Growth Regulation*, 29, 106-115.
- Pereyda-Hernández, J., Hernández-Morales, J., Sandoval-Islas, J. S., Aranda-Ocampo, S., de León, C., & Gómez-Montiel, N. (2009). Etiología y manejo de la mancha de asfalto (*Phyllachora maydis* Maubl.) del maíz en Guerrero, México. *Agrociencia*, 43(5), 511-519.
- Pethybridge, S. J., & Nelson, S.C. (2015). Leaf Doctor: A new portable application for quantifying plant disease severity. *Plant Disease*, 99(10), 1310-1316. <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0319-RE>
- Roma-Almeida, R. C. C., Pereira, O. L., Dias-Dos Santos, D. C. F., Prabhu, A. S., De Filippi-Corsi, M. C., Duarte-Silvera, H. S., & Rodrigue-Ávila, F. (2016). Effect of calcium silicate and rice husk ash application on the incidence of fungi associated with spots in flooded rice seeds. *Summa Phytopathologica*, 42(1), 73-78. <https://doi.org/10.1590/0100-5405/2108>
- Ruhl, G., Romberg, M. K., Bissonnette, S., Plewa, D., Creswell, T., & Wise, K. A. (2016). First report of tar spot on corn caused by *Phyllachora maydis* in the United States. *Plant Disease*, 100(7), 1496. <https://doi.org/10.1094/PDIS-12-15-1506-PDN>
- Saigusa, M., Onozawa, K., Watanabe, H., & Shibuya, K. (2000). Effects of porous hydrate calcium silicate on the wear resistance, insect resistance, and disease tolerance of turf grass "Miyako". *Journal of Japanese Society of Grassland Science*, 45(4), 416-420.
- Tamimi, Y. N., & Hunter, J. E. (1970). Effect of P, CaCO₃ and CaSiO₃ Fertilization upon Incidence of Corn Smut 1. *Agronomy Journal*, 62(4), 496-498. <https://doi.org/10.2134/agronj1970.00021962006200040019x>
- Telenko, D. E. P., Chilvers, M. I., Kleczewski, N., Smith, D.L., Byrne, A.M., Devillez, P., ... Lauer, J. (2019). *How tar spot of corn impacted hybrid yields during the 2018 Midwest epidemic*. Washington, DC, USA: Crop Protection Network. <https://doi.org/10.31274/cpn-20190729-002>
- Valle-Torres, J., Ross, T. J., Plewa, D., Avellaneda, M. C., Check, J., Chilvers, M.I., ... Cruz, C. D. (2020). Tar spot: An understudied disease threatening corn production in the Americas. *Plant Disease*, 104(10), 2541-2550.
- Wijekoon, C. P., Goodwin, P. H., & Hsiang, T. (2008). Quantifying fungal infection of plant leaves by digital image analysis using Scion Image software. *Journal of Microbiological Methods*, 74(2-3), 94-101.