



UNIVERSIDAD AUTONOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA

MAESTRIA EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL

BUSQUEDA DE RESISTENCIA

DE TRIGOS MEXICANOS (*Triticum aestivum*)

A LA ROÑA DE LA ESPIGA DEL TRIGO (*Fusarium spp.*)

Que como requisito parcial

para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS



Presenta:

José Jalil Méndez Estrada

DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
ORGANISMO DE EXÁMENES PROFESIONALES

Bajo la supervisión de: Dr. Santos Gerardo Leyva Mir.

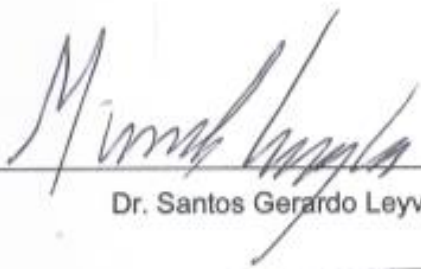


Chapingo, Estado de México, a 2 de mayo de 2019

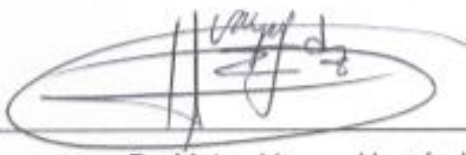
BUSQUEDA DE RESISTENCIA DE TRIGOS MEXICANOS (*Triticum aestivum*) A LA ROÑA DE LA ESPIGA DEL TRIGO (*Fusarium spp.*)

Tesis realizada por **José Jalil Méndez Estrada** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL

DIRECTOR: 
Dr. Santos Gerardo Leyva Mir

CO-DIRECTOR: 
Dr. H. Eduardo Villaseñor Mir

ASESOR: 
Dr. Mateo Vargas Hernández

ASESOR: 
Dra. Elizabeth García León

ASESOR: 
Dr. Andrés Bolaños Espinoza

Contenido

LISTA DE CUADROS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
AGRADECIMIENTOS	vii
DATOS BIOGRÁFICOS.....	viii
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 DISTRIBUCIÓN E IMPORTANCIA DE LA ROÑA DE LA ESPIGA.....	3
2.2 DAÑOS	4
2.3 SÍNTOMAS Y SIGNOS	4
2.4 MICOTOXINAS.....	5
2.5 CICLO DE LA ENFERMEDAD Y EPIDEMIOLOGÍA	6
2.5.1 El ciclo de la enfermedad	6
2.5.2 Condiciones ambientales y la roña de la espiga	7
2.6 MANEJO DE LA ENFERMEDAD.....	8
2.6.1 Manejo agronómico.....	8
2.6.2 Control biológico.....	9
2.6.3 Control químico	9
2.6.4 Resistencia genética	10
2.6.5 Manejo integrado.....	10
2.7 La roña de la espiga en México	10
2.8 Especies evaluadas	11
2.9 Mejoramiento genético contra la roña de la espiga.....	12
2.9.1 Antecedentes del mejoramiento genético.....	12
2.9.2 Resistencia a la roña de la espiga.....	13
2.9.3 Opciones para el mejoramiento.....	15

2.10 El mejoramiento genético del trigo en México.....	16
2.11 Literatura citada	17
3. Artículo científico.....	24

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Variedades de trigo utilizadas para medir la severidad de la roña de la espiga. 28

Cuadro 2. Análisis de varianza y comparación de medias del área bajo la curva del progreso de la enfermedad. LANARET, 2017..... 34

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Escala visual para estimar la severidad de la roña de la espiga del trigo. Elaboración propia con datos de la investigación.	30
Figura 2. Severidad de la enfermedad ocasionada por los aislamientos de <i>Fusarium spp</i> , a los 16 días después de la inoculación.	32
Figura 3. Niveles de severidad de la roña de la espiga que desarrollaron las variedades evaluadas.	33

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haber otorgado la beca de manutención para cumplir con los créditos del programa de la Maestría en Ciencias en Protección Vegetal.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: José Jalil Méndez Estrada

Fecha de nacimiento: 13 de diciembre de 1983

Lugar de nacimiento: Balancán, Tabasco, México.

No. Cartilla militar: 7737578

CURP: MEEJ831213HTCNSL03

Profesión: Ing. Agrónomo especialista en parasitología agrícola.

Cédula profesional: 5035782

Desarrollo académico

Bachillerato: Preparatoria agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

Licenciatura: Ingeniero agrónomo especialista en parasitología agrícola egresado de la Universidad Autónoma Chapingo.

RESUMEN

BUSQUEDA DE RESISTENCIA DE TRIGOS MEXICANOS (*Triticum aestivum* L) A LA ROÑA DE LA ESPIGA DEL TRIGO (*Fusarium spp.*)

La roña de la espiga del trigo (*Triticum aestivum* L.) afecta el rendimiento, la calidad de la producción y produce micotoxinas que representan un riesgo para la salud humana y animal; para su control, la alternativa más conveniente es la resistencia genética. Con el objetivo de evaluar la respuesta de 16 variedades de trigo harinero a la incidencia de *Fusarium avenaceum* (complejo *F. tricinctum*), *Fusarium graminearum* y *Fusarium cerealis*, (complejo de *F. sambucinum*), se estableció un experimento en el Laboratorio Nacional de Royas y otras Enfermedades de Trigo del INIFAP ubicado en el Campo Experimental Valle de México. Se emplearon 16 variedades, dos representativas por década, a partir de 1940, para conocer el avance del programa de mejoramiento genético en México; Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar. Se incrementó el inóculo en cultivo monospórico, agar con hojas de clavel. Las inoculaciones se realizaron durante la antesis, con bolitas de algodón impregnadas de una suspensión de conidios con una concentración de 8×10^6 esporas ml^{-1} . En cámara de incubación, durante ocho días se mantuvieron condiciones para la infección (humedad relativa $>95\%$, temperatura $19-21^\circ\text{C}$), posteriormente las plantas se trasladaron al invernadero. Se utilizó una escala visual elaborada ex profeso, para evaluar la roña de la espiga a los 8, 12 y 16 días después de la inoculación. Se hizo análisis estadístico con una confiabilidad del 95% utilizando el programa SAS ®. Los resultados muestran que entre los aislamientos de *Fusarium* no existe diferencia significativa respecto al grado de severidad ocasionado; existe mínima asociación entre la década de liberación de las variedades y el desarrollo de la enfermedad; las variedades de trigo expresaron diferentes niveles de resistencia a la roña de la espiga que se acentuó en las variedades de la década de los 90's.

Palabras clave: cereales, roña de la espiga, *Triticum aestivum* L., *Fusarium spp.*

ABSTRACT

Search for resistance of Mexican wheat (*Triticum aestivum* L) to the head scab of wheat (*Fusarium* spp.)

The *Fusarium* Head Scab of wheat (*Triticum aestivum* L.) causes yield losses and quality reductions of the wheat production, besides, it produces mycotoxins that are a risk to human and animal health; to manage the disease, resistant cultivars are the more convenient option. In order to evaluate the response of 16 varieties of bread wheat to the incidence of *Fusarium avenaceum* (*F. tricinctum* complex), *Fusarium graminearum* and *Fusarium cerealis* (*F. sambucinum* complex), an experiment in the National Laboratory of Rusts and other diseases of Wheat of the INIFAP, located in Valle de México Experimental Field was established. Sixteen varieties were used, two representative varieties per decade, since 1940 to know the performance of the Mexican wheat breeding program, in a Randomized Complete Block Design. The inoculum was increased in a monosporic culture, agar with carnation leaves. Inoculations were carried out during the anthesis, by means of spot inoculation with saturated cotton tufts in a suspension of conidia, 8×10^6 spores ml^{-1} concentration. In an incubation chamber, suitable conditions for infection (relative humidity >95%, temperature 19-21°C) were provided during eight days and subsequently the plants were moved to the greenhouse. An expressly made visual scale was used to evaluate *Fusarium* Head Blight of wheat at 8, 12 and 16 days after inoculation. Statistical analysis was performed with a reliability of 95% using the SAS ® program. The results showed that there was not significant difference among *Fusarium* isolates regarding to severity; there was minimum association among the varieties, according to the decade of their release, and the development of the disease; the evaluated varieties of wheat expressed different levels of resistance to *Fusarium* Head Scab that was accentuated in those varieties of the decade of the 90's.

Key words: Cereals, *Fusarium* head blight, *Triticum aestivum* L., *Fusarium* spp.

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El trigo (*Triticum aestivum* L) es el cereal más importante dentro de la dieta diaria de la humanidad, del total del volumen producido a nivel mundial, el trigo harinero representa cerca del 90 % (Vaughan y Geissler, 1997). De acuerdo con el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT, 2016) 80 millones de agricultores en el mundo obtienen los ingresos para su sustento de la producción de este cereal básico.

En el ciclo 2016/2017 la producción mundial de trigo fue de 751 millones de toneladas métricas (MTM); la Unión Europea encabeza la lista de productores principales de este grano, con 144.6 MTM, le sigue la República Popular China con 128.28 MTM, India con 87 MTM, Rusia con 72.5 MTM y Estados Unidos, en quinto lugar, con una producción de 62.8 MTM. México ocupa el vigésimo lugar con 3.88 millones de toneladas (USDA, 2017).

En México se siembran año con año alrededor de: 722 mil hectáreas de trigo, en las modalidades de riego y temporal, obteniéndose una producción promedio anual de 3.7 millones de toneladas. En el año agrícola 2016, los estados con mayor producción en la modalidad de riego fueron: Sonora, Baja California, Sinaloa y Guanajuato; mientras que en la modalidad de temporal fueron: Tlaxcala, Nuevo León, Guanajuato, Oaxaca y Edo. de México (SIAP, 2016).

El tizón o roña de la espiga ocasionado por el complejo de *Fusarium spp.* es una de las enfermedades más comunes y limitantes de la producción de cereales en todo el mundo (McMullen *et al.*, 2012). De acuerdo con Schmale y Bergstrom (2003) en las últimas décadas el tizón de la espiga ha acentuado su importancia como enfermedad del trigo siendo la especie *F. graminearum* la más importante; sin embargo, actualmente se han reportado otras especies del género *Fusarium* causando tizón de la espiga.

En México, el tizón de la espiga encuentra condiciones favorables y con frecuencia se desarrolla en las siembras de trigo harinero de temporal (Villaseñor,

2000); asimismo, la enfermedad se ha incrementado en los últimos años en estas regiones debido a que se practica la rotación maíz- trigo y ambas especies son hospedantes del hongo, a su vez, la enfermedad se ve favorecida por la implementación de métodos de labranza mínima (Duveiller *et al.*, 1997).

El tizón de la espiga del trigo afecta tanto el rendimiento como la calidad del grano obtenido, convirtiéndose en un problema grave para los agricultores y para la producción de alimentos; además de reducir el peso de los granos el hongo induce la producción de micotóxinas (principalmente deoxinivalenol), que pueden afectar la salud humana y animal (Schmale & Bergstrom, 2003).

La mejor opción de control para el tizón de la espiga del trigo es el mejoramiento genético a través de variedades resistentes (Ireta y Gilchrist, 1994; Parry *et al.*, 1995; McMullen, Jones y Gallenberg, 1997). Se han detectado genotipos de trigo con alto grado de resistencia, principalmente en trigos suaves, sin embargo, la versatilidad de comportamiento de *Fusarium spp.* ha dificultado su control (Ireta & Gilchrist, 1994).

Ante esta realidad y por la importancia de conocer las características de resistencia que expresan las variedades desde los años 40's hasta las actuales a la roña de la espiga; así como, para conocer el avance que ha tenido el programa de mejoramiento genético del trigo en México en las variedades evaluadas, tomando en cuenta que la roña de la espiga causada por *Fusarium spp.*, no ha sido un parámetro de estudio en dicho programa de mejoramiento, se planteó como objetivo de la presente investigación evaluar la respuesta de 16 variedades de trigo harinero liberadas desde la década de 1940 hasta el año 2015 a la incidencia de *Fusarium spp.*

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 DISTRIBUCIÓN E IMPORTANCIA DE LA ROÑA DE LA ESPIGA

La roña de la espiga afecta a todas las clases de trigo y otros granos pequeños, como triticale y cebada, ocasionando diferentes niveles de daño y puede llegar a ser una enfermedad devastadora.

Entre las especies del género *Fusarium* que pueden ocasionar la roña de la espiga, *Fusarium graminearum* Schwabe (teleomorfo *Gibberella zeae* [Schw.] Petch) es el principal agente causal en muchas regiones del mundo donde se produce cereales; aunque otras especies, bajo ciertas condiciones ambientales, pueden predominar localmente y tener ventajas adaptativas en algunos hospederos (Schmale & Bergstrom, 2003; Boutigny *et al.*, 2011; Kuhnem *et al.*, 2016; O'Donnell *et al.*, 2004).

Los primeros reportes de la roña de la espiga del trigo causada por *Fusarium* datan de Inglaterra en 1884 y posteriormente de los Estados Unidos en 1890 (Parry *et al.*, 1995).

En China, uno de los mayores productores de trigo del mundo, se menciona a la roña de la espiga como endémica (Ireta & Gilchrist, 1994; McMullen *et al.*, 1997). Las graves pérdidas causadas por la roña que afectó al cultivo de cebada en Corea del Sur en 1963 amenazaron a parte de la población con inanición (Vestal, 1964). En Argentina ocurrieron epidemias que afectaron al trigo duro en las décadas de 1960, 1970 y 1980 (Moschini & Fortugno, 1996).

Actualmente se presenta en regiones templadas y húmedas de todo el mundo donde se produce trigo, como el norte-centro de Europa y Asia (Ireta & Gilchrist, 1994; McMullen *et al.*, 1997).

Busch (1995) mencionó los efectos directos e indirectos que se producen cuando la roña de la espiga se convierte en epidemia, haciendo referencia a la epidemia

ocurrida en 1993 que afectó la principal zona productora de Norte América y que ocasionó pérdidas en rendimiento y calidad de la producción, estimadas en un 1 billón de dólares con la afectación de 4 millones de hectáreas. Esta epidemia impactó en todos los eslabones de la cadena producción-consumo. Los rendimientos disminuyeron un 45% en promedio, la calidad estaba por debajo del mínimo estándar requerido, con alto porcentaje de granos dañados y alto contenido de vomitoxinas. La presencia de vomitoxinas redujo la comercialización y el precio del grano; niveles altos de vomitoxinas por encima de lo permitido obligaron a la industria molinera a comprar solamente trigo libre de roña (Moore *et al.*, 1993) y muchos productores se vieron forzados a vender su producción para alimentación animal aun penalizados con grandes descuentos. Las evaluaciones de campo condujeron a la destrucción de cultivos o al intento de salvar algo de la producción.

Entre otros efectos adversos, la epidemia de roña produjo gran preocupación entre los productores de granos y de ganado, los molineros, y el público en general sobre la inocuidad del grano usado como alimento animal o humano.

2.2 DAÑOS

McMullen *et al.*, (1997) señalan que los daños causados por la roña de la espiga son principalmente: reducción del rendimiento, decoloración y arrugado de granos, contaminación con micotoxinas y reducción de la calidad de la semilla. La enfermedad también reduce el peso y la calidad requerida del producto para el mercado; dificulta la comercialización, exportación, procesamiento y uso del grano.

2.3 SÍNTOMAS Y SIGNOS

Los primeros síntomas de la roña de la espiga ocurren poco después de la floración. Las espiguillas enfermas exhiben un blanqueo prematuro a medida que el patógeno crece y se disemina dentro de la espiga. Se pueden blanquear una o más espiguillas ubicadas en la parte superior, media o inferior de la espiga. Con

el tiempo, el blanqueo prematuro de las espiguillas puede progresar a lo largo de toda la espiga.

En presencia de condiciones adecuadas de temperatura y humedad pueden aparecer agregaciones de esporas, llamadas esporodoquios, en el raquis y las glumas de espiguillas individuales. Después, pueden aparecer, en la superficie de las espiguillas afectadas, cuerpos esféricos los cuales son estructuras sexuales del hongo conocido como peritecios.

A medida que los síntomas progresan, el hongo coloniza el grano en desarrollo y hace que se contraiga y arrugue dentro de la espiga. A menudo, los granos infectados tienen un aspecto áspero y arrugado, con diferentes tonalidades de color (Schmale & Bergstrom, 2003).

2.4 MICOTOXINAS

Muchas especies del complejo *Fusarium* producen micotoxinas, que son metabolitos secundarios producidos por el hongo con diversos grados de toxicidad y que resultan dañinos para los animales; las micotoxinas son reconocidas como uno de los mayores problemas en la agricultura (Smith, 1985). Estos metabolitos pueden funcionar en la naturaleza para deshabilitar los mecanismos de defensa de la planta o para defender el hongo contra otros microorganismos. Schmale y Bergstrom (2003) señalan que las cepas del hongo de diferentes países producen diferentes micotoxinas, algunas muy potentes y peligrosas.

A nivel mundial el deoxinivalenol (DON) y el nivalenol (NIV) son las micotoxinas más comunes que se detectan en cereales afectados por la roña; el DON se asocia comúnmente con la roña de la espiga en todo Europa y los Estados Unidos por lo que se considera la toxina más importante (Bottalico, 1998). Sin embargo, se ha demostrado que la citotoxicidad del NIV es mayor que la de DON (Ryu *et al.*, 1988).

El DON se le llama a veces vomitoxina debido a sus efectos nocivos sobre el sistema digestivo de los cerdos y otros animales monogástricos. El DON interrumpe la función celular normal al inhibir la síntesis de proteínas. Los humanos que consumen harina de trigo contaminado con DON a menudo desarrollarán síntomas tales como: náuseas, fiebre, dolores de cabeza y vómitos. Numerosos estudios han demostrado los efectos negativos del consumo de DON en la salud humana y animal. El DON puede causar el rechazo del alimento, la pérdida de peso y hasta la muerte (Eriksen y Pettersson, 2004; Arunachalam y Doohan, 2013).

La contaminación por DON se mide en partes por millón (ppm). Los niveles de DON en el trigo infectado con roña de la espiga, con frecuencia son bastante altos (> 20 ppm). El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA por sus siglas en inglés) recomienda que los niveles de DON en alimentos humanos no excedan de 1 ppm. Sin embargo, los compradores individuales de granos pueden tener menores tolerancias de DON en el grano que compran. La agencia federal de Estados Unidos, Food and Drugs Administration (FDA) tiene varios niveles de referencia de DON permitidos en la alimentación del ganado: los animales rumiantes son los más tolerantes, mientras que los cerdos tienen la mayor sensibilidad al DON en su alimentación y rechazan el alimento que contenga 1 ppm de DON (Snijders, 1990; Schmale & Bergstrom, 2003).

2.5 CICLO DE LA ENFERMEDAD Y EPIDEMIOLOGÍA

2.5.1 El ciclo de la enfermedad

Schmale y Bergstrom (2003) mencionan que el hongo hiberna sobre residuos de cultivos infestados, tales como: paja, granos livianos y restos de espigas que caen al suelo durante la cosecha; en estos residuos produce esporas asexuales (conidios) que se dispersan en las plantas y otros residuos por salpicaduras de lluvia o el viento. La etapa sexual del hongo, los peritecios, se desarrollan sobre la superficie de residuos de plantas infestadas. Las esporas sexuales (ascosporas) son expulsadas con fuerza de los peritecios hacia el aire. Las

ascosporas son llevadas por corrientes de aire y pueden viajar grandes distancias.

El trigo es susceptible a la infección de la espiga desde el período de floración (polinización) hasta la fase de masa blanda del desarrollo del grano. Las esporas del hongo llegan a las anteras expuestas de la flor y luego crecen en los granos, glumas u otras partes de la espiga (McMullen *et al.*, 1997)

La infección ocurre cuando las ascosporas, y también los conidios, aterrizan en espigas de trigo susceptibles. Se piensa que las anteras expuestas durante la anthesis del trigo son el sitio de infección primaria. Si las anteras se infectan justo después de su emergencia, el hongo colonizará y matará los flósculos y los granos no se desarrollarán. Espiguillas que se infectan más tarde producirán granos enfermos arrugados y pálidos. Es posible que los granos que fueron colonizados por el patógeno durante el desarrollo tardío del mismo no se vean afectados, pero aun así pueden estar contaminados con micotoxinas.

Los granos infectados pueden usarse como semilla para un cultivo de trigo posterior. Estas semillas infectadas, si no se tratan, pueden dar lugar a plantas raquíticas y enfermas. El grado en que esto ocurre en el campo depende del porcentaje de semillas infectadas y las condiciones del suelo que afectan el crecimiento y desarrollo de las plántulas.

2.5.2 Condiciones ambientales y la roña de la espiga

La infección por la roña de la espiga se ve favorecida por períodos prolongados de alta humedad o humedad relativa mayor a 90% y temperaturas moderadamente cálidas (entre 15 a 30 ° C). Estas condiciones presentes antes, durante y después de la floración favorecen la producción de inóculo, la infección del flósculo y la colonización de granos en desarrollo (Gilbert *et al* 1995; Schmale & Bergstrom, 2003)

Otros factores. Si bien el medio ambiente es importante en el desarrollo de epidemias de roña, otros factores contribuyen, incluidas altas proporciones de

labranza mínima, grandes extensiones de tierra sembradas con cultivos hospedantes susceptibles e intervalos cortos de rotación entre cultivos susceptibles (Jones, 1994).

Sutton (1982) y Turnipseed (1993) citados por McMullen (2003) mencionan que el maíz es un hospedero y un importante reservorio del hongo de la roña; un aumento de la superficie sembrada con maíz bajo labranza de conservación, conlleva a un posible aumento de residuos infectados en la superficie del suelo que puede contribuir al desarrollo de la roña.

2.6 MANEJO DE LA ENFERMEDAD

Paul (2018) afirma que la roña de la espiga causada por el complejo de *Fusarium* es una enfermedad difícil de controlar. Esto se debe en parte a que ningún cultivar es inmune o altamente resistente a la roña, los mejores fungicidas por si solos son efectivos generalmente menos del 60% y las limitaciones prácticas con frecuencia evitan que los fungicidas se apliquen en la etapa de crecimiento recomendada.

2.6.1 Manejo agronómico

Dado que el riesgo de la roña de la espiga depende de una fuente de inóculo viable, la rotación de cultivos entre cereales y cultivos no hospederos junto con la incorporación de residuos de cultivos en el suelo afectan la incidencia de la roña de la espiga y son una clave para reducir el riesgo de roñas severas (Jones, 1994; Parry *et al*, 1995; Sutton, 1982; Windels y Kommedahl, 1984). Las reducciones en la labranza del suelo han contribuido a las epidemias regionales de roña al aumentar los niveles de inóculo disponibles para la infección. Estos puntos del manejo de la enfermedad deben ser aplicados de forma regional para lograr un mayor impacto en la reducción de la roña. (Schmale & Bergstrom, 2003; McMullen *et al.*, 2012)

2.6.2 Control biológico

La investigación se ha centrado en encontrar agentes de control biológico asequibles y compatibles con el medio ambiente para el control de la roña de la espiga. Los agentes de control biológico podrían desempeñar un papel importante en la producción de cereales orgánicos. En la producción convencional, dichos agentes pueden extender la protección de las espigas más allá de la etapa de floración. Ciertas cepas de bacterias productoras de esporas tales como *Bacillus spp.*, *Pseudomonas spp.*, *Lysobacter enzymogenes*, y *Streptomyces spp*) y hongos como *Cryptococcus spp.*, *Trichoderma spp.*, *Clonostachys rosea* y *Aureobasidium pullulans* muestran cierto control de la roña de la espiga y la reducción de la contaminación por micotoxinas. (Wegulo *et al.*, 2015).

2.6.3 Control químico

McMullen *et al.* (1997) mencionan que el control químico de la roña de la espiga con fungicidas proporciona un control parcial de la enfermedad y de las micotoxinas asociadas; sin embargo, los costos de los fungicidas en relación con el retorno por hectárea, la eficacia variable en el control (entre 50 y 60%) y la naturaleza errática de las epidemias de la roña de la espiga son factores limitantes en el uso de fungicidas.

Los fungicidas mayormente usados son del grupo de los triazoles, inhibidores de la demetilación (DMI) en la biosíntesis del ergosterol, estos incluyen al metconazol, propiconazol y tebuconazol. Para mejorar la efectividad, se recomienda que estos se apliquen en la etapa de antesis o 6 días después, debido a la alta susceptibilidad en esta etapa de desarrollo (McMullen *et al.*, 2012) El tratamiento de la semilla con fungicida también reduce el riesgo de tizón de plántulas por *Fusarium* (Schmale & Bergstrom, 2003).

2.6.4 Resistencia genética

La estrategia de manejo más rentable para la roña de la espiga es la resistencia genética (Ruckenbauer *et al.*, 2001). Históricamente, los mejoradores y patólogos han podido identificar y acumular resistencia parcial a la roña.

Debido a la naturaleza cuantitativa de la resistencia, el desarrollo de variedades resistentes ha sido lento, y solo se han lanzado pocas variedades con resistencia moderada en todo el mundo. Los esfuerzos para obtener resistencia usando técnicas tradicionales y moleculares continúan, y se han identificado fuentes de resistencia nativas y exóticas en las regiones del mundo donde se presenta la roña de la espiga (Bai y Shaner, 2004; Kollers *et al.*, 2013)

2.6.5 Manejo integrado

Schmale y Bergstrom (2003) señalan que los modelos de pronóstico de enfermedades resultan en una herramienta útil para optimizar el manejo de la roña de la espiga indicando el momento idóneo para la aplicación de fungicidas cuando las condiciones ambientales son propicias para el desarrollo de la enfermedad.

Estudios han demostrado que la integración de múltiples estrategias, tales como el uso de agentes de control biológico, las aplicaciones de fungicidas, la resistencia genética, las prácticas de labranza, la rotación con cultivos no hospederos y el manejo de residuos en el campo, proporcionan el mejor control de la roña de la espiga y DON (McMullen *et al.* 2008; Mesterhazy, Bartok y Lamper. 2003; Willyerd *et al.* 2012).

2.7 La roña de la espiga en México

Ireta y Gilchrist (1994) registraron brotes graves de roña de la espiga en algunos estados de las regiones Norte-Central y Valles Altos de México. Un brote particularmente grave en Los Altos y Sierra del Tigre, estado de Jalisco, causó

pérdidas de hasta el 90% de la cosecha de trigo, que dependieron de la variedad de trigo y las condiciones climatológicas.

La producción de trigo en México, se da bajo dos modalidades, trigo de riego y trigo de temporal; éste último, es aquel que se cultiva durante el ciclo de primavera – verano que, en muchas regiones, coincide con la época de lluvias y depende de la cantidad y distribución de las mismas para cumplir su ciclo biológico y lograr buena productividad. (Villaseñor *et al.*, 2014). La roña de la espiga es más frecuente en las áreas donde se cultiva el trigo bajo condiciones de temporal en los estados de Jalisco, Michoacán, Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo. En Tlaxcala e Hidalgo se presentó una incidencia importante, hasta del 60% a nivel poblacional y del 10% al 15% a nivel individual o de espiga. Sin embargo, la roña de la espiga no es exclusiva de las áreas de temporal, ya que también se le ha observado, de forma esporádica, en trigo cultivado bajo condiciones de riego durante el verano en la zona del Bajío estado de Guanajuato (Ireta y Gilchrist, 1994). En México, la información referente a las especies de *Fusarium* y la diversidad de micotoxinas asociadas con la roña de la espiga del trigo es limitada (Osman *et al.* 2016).

2.8 Especies evaluadas

Fusarium graminearum Schwabe pertenece a un complejo de especies más amplio, el complejo de *F. sambucinum* (O'Donnell *et al.*, 2013) se desarrolla en áreas donde las condiciones climáticas son cálidas y húmedas (25-30 °C y humedad relativa por encima del 85%). En México, esta especie es la predominante ocasionando roña de la espiga en las zonas productoras de trigo (Osman, 2016).

Fusarium avenaceum (teleom. *Gibberella avenacea*) pertenece al complejo de especies *F. tricinctum* definida por O'Donnell *et al.* (2013), es principalmente saprófito del suelo y es común en regiones templadas de todo el mundo. Puede ser patógeno de leguminosas, claveles y varias especies de plantas perennes, asimismo, puede causar roña de la espiga (Kang, Zingen-Sell & Buchenauer,

2005; Gräfenhan *et al.*, 2013). Cerón *et al.*, (2018) encontraron a *F. avenaceum* como una de las especies predominantes en la zona de la mixteca oaxaqueña en el sur de México y en los Valles Altos (estados de Tlaxcala, Puebla y México).

Fusarium cerealis (sin: *Fusarium crookwellense*) pertenece al complejo de especies de *F. sambucinum* (O'Donnell *et al.*, 2013), suele ser más común en las zonas templadas (Burgess, Nelson y Toussoun, 1982). Se han encontrado aislamientos en las áreas del norte de los EE. UU., Canadá, Sudáfrica, Japón, partes templadas de Australia, Nueva Zelanda, muchas partes de Europa y China. (Greenhalgh *et al.*, 1986). A diferencia de otros agentes causales de la roña de la espiga, *F. cerealis* produce únicamente la micotoxina nivalenol (NIV) (Bottalico, 1998; Sugiura *et al.*, 1993; Miller *et al.*, 1991). Cerón *et al.*, (2018) observaron una frecuencia baja de *F. cerealis* en los Valles Altos de México.

2.9 Mejoramiento genético contra la roña de la espiga

Aunque la selección de las líneas experimentales con resistencia mejorada a la roña de la espiga es bastante fácil y directa, el desarrollo de variedades de trigo ecológicamente adaptados que combinen rendimientos altos, de calidad y estables, con resistencia a los patógenos principales más un alto nivel de resistencia a *Fusarium*, no es una tarea trivial y necesita una planificación cuidadosa, inversiones sustanciales y esquemas de selección sofisticados. El objetivo más importante en el desarrollo de la resistencia es que las variedades resistentes muestren baja severidad de la enfermedad y simultáneamente baja contaminación por micotoxinas (Buerstmayr *et al.*, 2014).

2.9.1 Antecedentes del mejoramiento genético

Christiansen, Stakman e Immer (1929) hicieron mención de que "el único método eficaz para controlar la roña del trigo es cultivar variedades resistentes" (Christiansen, Stakman e Immer, 1929, citado por McMullen *et al.*, 1997).

Desde 1990, la investigación se ha enfocado en el desarrollo y uso de variedades resistentes para el control de la roña de la espiga que ocasiona el complejo de

Fusarium (Schmale y Bergstrom, 2003) y se han tenido avances en la identificación de nuevas fuentes de resistencia (Bai y Shaner, 1994, Busch, 1995; Lipps y Johnston, 1996; Van Ginkel *et al.*, 1996); existe una mejor comprensión de los tipos de resistencia (Mesterhazy, 1995); se están desarrollando las herramientas moleculares para incorporar resistencia (Bai y Shaner, 1994); se ha producido una mejor colaboración en el intercambio y evaluación de los materiales de reproducción.

2.9.2 Resistencia a la roña de la espiga

La resistencia a la roña de la espiga y DON en granos pequeños es compleja y se hereda cuantitativamente (Bai y Shaner, 2004). Las colecciones de germoplasma, las poblaciones mejoradas y la progenie de cruza resistentes con líneas parentales susceptibles generalmente muestran una variación cuantitativa en la severidad de la roña de la espiga. Se han descrito cinco tipos de resistencia (Shroeder y Christensen, 1963; Miller y Arnison, 1986; Wang y Miller, 1988; Mesterhazy, 1995; Mesterhazy *et al.* 1999): I, resistencia a la infección inicial; II, resistencia a diseminarse en tejido infectado; III, resistencia a la infección del grano; IV, tolerancia; y V, resistencia a la acumulación de toxinas.

La severidad de la enfermedad está regulada por: (i) factores genéticos del hospedero y del patógeno y (ii) la influencia ambiental en el establecimiento y desarrollo de la enfermedad (Campbell y Lipps, 1998). Las infecciones por *Fusarium* y el desarrollo de la enfermedad dependen en gran medida de la prevalencia del inóculo y de las condiciones ambientales. Los mejoradores necesitan medir las diferencias en la resistencia genética y tener en cuenta los factores no genéticos que conducen a errores en las pruebas. En condiciones naturales, la presión de infección no suele ser uniforme en el tiempo y el espacio. Por lo tanto, en la mayoría de los programas de pruebas de resistencia a la roña de la espiga se toman medidas para provocar las infecciones con una presión de inóculo uniforme a lo largo del tiempo (período de floración) y espacio (campo experimental o invernadero).

Inoculación en el mejoramiento

En el mejoramiento de variedades se requiere de un método de inoculación confiable que permita una evaluación de la enfermedad cuantitativa y precisa. Para realizar las inoculaciones artificiales, los aislados de *Fusarium* deben estar debidamente aislados y caracterizados y en cantidad suficiente para los experimentos (Nirenberg, 1981; Nelson, Tousson y Marasas, 1983; Leslie y Summerell, 2006) Se pueden usar macroconidios, micelio o ascosporas como inóculo, pero se prefieren los macroconidios porque son relativamente fáciles de incrementar.

Los diferentes tipos de resistencia se prueban utilizando métodos de inoculación específicos. Para probar la resistencia de Tipo II, se realizan inoculaciones al flósculo y se mantiene húmeda toda la espiga durante 24–72 h después de la inoculación para promover el desarrollo del hongo (Shroeder y Christensen, 1963, Dill-Macky, 2003). La extensión y/o la velocidad de propagación de los síntomas típicos desde el sitio de inoculación a lo largo de la espiga, se utilizan como medida cuantitativa de la severidad de la enfermedad. La resistencia de tipo I se considera más difícil de evaluar, ésta se mide mediante la incidencia de la enfermedad en parcelas o macetas inoculadas por aspersión o naturalmente (Dill-Macky, 2003).

Se acepta comúnmente que la inoculación por aspersión se parece más a las infecciones naturales. La reacción de la enfermedad debería reflejar todos los mecanismos posibles, que pueden contribuir al fenotipo resistente en condiciones epidémicas (Buerstmayr *et al.*, 2003). Como alternativa a las inoculaciones por aspersión se pueden emplear, el método de inóculo en grano, la siembra en campos con rastrojo de maíz en la superficie del suelo o las pruebas en parcelas donde de manera natural se presenta la roña de la espiga por *Fusarium*.

Evaluaciones de la severidad de la enfermedad

Para evaluar la roña de la espiga pueden realizarse, lecturas de la severidad en función del desarrollo de síntomas, registro visual de síntomas en una parcela completa ("resistencia general de campo"), la incidencia de la enfermedad (una medida de la resistencia de Tipo I) o la diseminación de los síntomas en espigas individuales después de la inoculación al flósculo (resistencia tipo II). El tiempo de las evaluaciones visuales es crucial y debe realizarse para todas las líneas en relación con la fecha de floración/infección. Incluso los intervalos de solo unos pocos días pueden llevar a diferencias pronunciadas en el desarrollo de los síntomas de la roña de la espiga, la severidad de la roña de la espiga puede duplicarse en un plazo de 4 a 5 días alrededor del máximo progreso de la enfermedad (Buerstmayr *et al.*, 2003).

Miles de líneas de plantas se inoculan artificialmente, aquellas que tienen un crecimiento reducido del hongo y bajos niveles de contaminación de semillas con la micotoxina DON se seleccionan para ensayos adicionales de mejoramiento genético. Las evaluaciones en invernadero de las líneas de reproducción, proporcionan información adicional sobre la susceptibilidad de variedades y líneas avanzadas. (McMullen *et al.*, 1997)

2.9.3 Opciones para el mejoramiento

Hasta poco antes de 2014, la selección fenotípica era la única opción para la obtención de nuevas variedades resistentes a la roña de la espiga. El principio básico es: (i) evaluar posibles parejas de cruza por su nivel de resistencia a la roña de la espiga, (ii) generar nuevas poblaciones a partir de cruza con al menos un progenitor con buen nivel de resistencia a la roña de la espiga o dos padres con resistencia moderada cada uno y (iii) seleccionar entre la progenie las mejores líneas con combinaciones de rasgos óptimas, incluida una resistencia aceptable a la roña de la espiga. La selección para la resistencia de la roña de la espiga se practica generalmente en generaciones más o menos avanzadas, por ejemplo, a partir de F4. Este enfoque no es ni simple ni barato ni rápido, pero ha resultado en variedades de buenas a excelentes (Buerstmayr *et al.*, 2003).

Las opciones para el mejoramiento pueden ser la selección fenotípica (Miedaner, 1997; Mesterhazy *et al.*, 1999; Mesterhazy, Bartok y Lamper, 2003; Rudd *et al.*, 2001; Miedaner *et al.*, 2008), la selección asistida por marcadores para QTL (Quantitative Trait Loci) de gran efecto (Anderson, 2007; Buerstmayr, Ban y Anderson 2009; Salameh, 2011) o la selección genómica basada en poblaciones caracterizadas de referencia (Rutkoski, 2012), o combinaciones de estos enfoques.

2.10 El mejoramiento genético del trigo en México

Antes de iniciar el mejoramiento genético del trigo en México, se sembraban variedades que eran mezclas de diferentes tipos muy susceptibles a las royas del tallo (*Puccinia graminis* f.sp. *tritici*) y de la hoja (*Puccinia recondita* f.sp. *tritici*) (Hernández, 1988). La roya predominaba como enfermedad devastadora y en 1943, México tuvo que importar el 55% de la demanda nacional (Borlaug, 1969, citado por Huerta *et al.*, 2011).

Puede decirse que el mejoramiento del trigo en México dio inicio en 1934, con las cruces realizadas por el Ing. Edmundo Taboada del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias, y que por la falta de una metodología apropiada no se liberó ningún cultivar (Huerta *et al.*, 2011); sin embargo, el mejoramiento genético se inició formalmente en 1945 (Hernández, 1984). Las principales características que se consideraron en el mejoramiento fueron el rendimiento, resistencia a la roya y la concentración de gluten.

En 1944, Norman E. Borlaug tomó la iniciativa del programa de mejoramiento de trigo a través de cruces y selección utilizando veinte genotipos seleccionados que combinaban resistencia a la roya del tallo, precocidad y buen rendimiento. La primera variedad liberada en México (Borlaug, 1949, citado por Huerta *et al.*, 2011) fue "Supremo 211". A partir de 1951, se comenzaron a usar en la producción comercial las variedades mejoradas que resultaron más rendidoras y resistentes a las royas (Stakman *et al.*, 1969, citado por Hernández, 1988).

Otro problema importante que debía resolverse para aumentar la producción, era la susceptibilidad al acame en las variedades mexicanas resistentes a la roya del tallo, que se logró cuando en 1953, Borlaug obtuvo semilla que incluía genes de una variedad de trigo enana japonesa, Norin 10. El uso de estos genes de enanismo, después de años de cruza y selección, en variedades semi-enanas permitiría la producción de variedades con alto potencial de rendimiento (Huerta *et al.*, 2011).

En México, desde el inicio del mejoramiento científico, en la década de 1940, se han liberado más de 160 variedades de trigo harinero y más de 20 variedades de trigo duro. La mayoría de ellos han contribuido enormemente a la economía de los agricultores y han satisfecho parcialmente la creciente demanda de la población. Además, la mayoría de las variedades mexicanas han contribuido a aumentar el potencial de rendimiento en muchos otros países, ya sea a través de su lanzamiento directo como variedades locales o indirectamente a través de su uso en programas nacionales de mejoramiento; Sin embargo, desde los inicios del mejoramiento genético en México, en la década de los 40's (Hernández, 1984), hasta años recientes, 2011- 2015, la investigación se ha enfocado principalmente en la búsqueda de resistencia a royas, al incremento del rendimiento y mejora de la calidad (Hortelano *et al.*, 2016).

2.11 Literatura citada

- Anderson J. A. (2007). Marker-assisted selection for *Fusarium* head blight resistance in wheat. *International Journal of Food Microbiology*, 119, 51-3.
- Arunachalam C., Doohan F. M. (2013). Trichothecene toxicity in eukaryotes: cellular and molecular mechanisms in plants and animals. *Toxicology Letters*, 217:149–158.
- Bai G., Shaner G. (1994). Scab of wheat: Prospects for control. *Plant Disease*, 78:760-766.
- Bai G., Shaner G. (2004). Management and resistance in wheat and barley to *Fusarium* head blight. *Annual Review of Phytopathology*. 42:135-161. Doi:10.1146/annurev.phyto.42.040803.140340

- Borlaug N. E. (1969). Mejoramiento de trigo, su impacto en el abastecimiento mundial de alimentos. Sobretiro n° 2. CIMMYT, El Batán, México, 40 p.
- Borlaug N. E., Harrar J. G., Rupert J. A. (1949). Nuevos trigos para México. México, DF (México): SAG. Oficina de Estudios Especiales. 29 p. Series: SAG Folleto de Divulgación. No. 5 Abstract in English.
- Bottalico A. (1998). *Fusarium* diseases of cereals: species complex and related mycotoxin profiles, in Europe. *Journal of Plant Pathology*; 80,85–103. <http://dx.doi.org/10.4454/jpp.v80i2.807>
- Boutigny A. L., Ward T. J., Van Coller G. J., Flett B., Lamprecht S. C., O'Donnell K., Viljoen A., (2011). Analysis of the *Fusarium graminearum* species complex from wheat, barley and maize in South Africa provides evidence of species-specific differences in host preference. *Fungal Genetics and Biology*. 48, 914–920. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fgb.2011.05.005>.
- Buerstmayr H., Ban T., Anderson J. A. (2009). QTL mapping and marker-assisted selection for *Fusarium* head blight resistance in wheat: a review. *Plant Breeding*, 128,1–26.
- Buerstmayr H., Buerstmayr M., Schweiger W., and Steiner B. (2014). Breeding for resistance to head blight caused by *Fusarium* spp. in wheat. *CAB Reviews Perspectives in Agriculture Veterinary Science Nutrition and Natural Resources*, 9, 236-276 DOI: 9. 10.1079/PAVSNNR20149007.
- Buerstmayr H., Steiner B., Hartl L., Griesser M., Angerer N., Lengauer D. *et al.* (2003). Molecular mapping of QTLs for *Fusarium* head blight resistance in spring wheat. II. Resistance to fungal penetration and spread. *Theoretical and Applied Genetics*, 107, 503–8.
- Busch R. (1995). Breeding for scab resistance. Page 3 in: Proc. 1994 Regional Scab Forum Res. Conf. Minnesota Wheat Research and Promotion Council, Red Lake Falls.
- Campbell K. A. G., Lipps P. E. (1998). Allocation of resources: sources of variation in *Fusarium* head blight screening nurseries. *Phytopathology*, 88, 1078–86.
- Cerón-Bustamante M., Ward T. J., Kelly A., Vaughan M. M., McCormick S. P., Cowger C., ... Nava-Díaz C. (2018). Regional differences in the composition of *Fusarium* Head Blight pathogens and mycotoxins associated with wheat in Mexico. *International Journal of Food Microbiology*, 273, 11–19. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.03.003
- Christensen J. J., Stakman E. C., and Immer F. R. (1929). Susceptibility of wheat varieties and hybrids to fusarial head blight in Minnesota. Minn. Agric. Exp. Stn. Bull. 59.
- CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo). 2016. Investigación sobre trigo. Disponible en línea: <http://www.cimmyt.org/es/investigacion-sobre-trigo/>

- Dill-Macky R. (2003). Inoculation methods and evaluation of *Fusarium* head blight resistance in wheat. In: Leonard KJ, Bushnell WR, editors. *Fusarium Head Blight of Wheat and Barley. The American Phytopathological Society*, St Paul, MN; p. 184–210.
- Duveiller E., Fucikovsky L. and Rudolph K. (eds). (1997). The bacterial Diseases of Wheat: Concept and Methods of Disease Management. México, D.F. CIMMYT.
- Eriksen G. S., Pettersson H. (2004) Toxicological evaluation of trichothecenes in animal feed. *Animal Feed Science and Technology*, 114, 205–239
- Gilbert J., Tekauz A., Kaethler R., Mueller E., and Kromer U. (1995). Occurrence of *Fusarium* head blight in Manitoba in 1994. *Canadian Journal of Plant Disease. Surv.* 75:124-125.
- Gräfenhan T., Patrick S.K., Roscoe M., Trelka R., Gaba D., Chan J.M., ... Tittlemier S.A. (2013). *Fusarium* damage in cereal grains from western Canada. 1. Phylogenetic analysis of moniliformin-producing *Fusarium* species and their natural occurrence in mycotoxin-contaminated wheat, oats, and rye. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 61, 5425–5437. <http://dx.doi.org/10.1021/jf400651p1>.
- Greenhalgh R., Levandier D., Adams W., Miller J. D., Blackwell B. A., McAlees A. J., & Taylor A. (1986). Production and characterization of deoxynivalenol and other secondary metabolites of *Fusarium culmorum* (CMI 14764, HLX 1503). *Journal of agricultural and food chemistry*, 34, 98-102.
- Hernández S., A. (1988). Avance en el mejoramiento genético del trigo en México. *Agronomie, EDP Sciences*. 8, 633-638. <hal-00885143>
- Hernández S., A., (1984). Antecedentes del mejoramiento genético del trigo en México. En: Germen, Bol. Intercambio Científico SOMEFI-MEXICO. n° 2, 32-45
- Hortelano R., Martínez E., Villaseñor H. E. y Morales V. (2016). Mejoramiento genético de trigo en México. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*, 3, 25-31
- Huerta E., J., Villaseñor M., H. E., Espitia R., E., Solis M., E. and Ginkel M. (2011). The history of wheat breeding in Mexico In: Bonjean A. P., Angus W. J., Ginkel M. (Eds) *The World Wheat Book Volume 2. A History of Wheat Breeding* (pp. 275-308). Paris: Editions TEC & DOC.
- Ireta J., M. y Gilchrist S. (1994). Roña o tizón de la espiga del trigo. Informe especial de trigo No. 20. CIMMYT. México, D.F. 25 p.
- Jones R. K. (1994). Managing *Fusarium* head scab for (1995). Minn. Ext. Serv. Plant Pest Newsl. PPST17:100-102. Department of Plant Pathology, University of Minnesota, St. Paul.

- Kang Z., I. Zingen-Sell and H. Buchenauer. (2005). Infection of wheat spikes by *Fusarium avenaceum* and alterations of cell wall components in the infected tissue. *European Journal of Plant Pathology*, 111, 19-28.
- Kollers S., Rodemann B., Ling J., Korzun V., Ebmeyer E. *et al.*, (2013). Whole genome association mapping of *Fusarium* head blight resistance in European Winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *PLoS ONE* 8 (2), e57500. <http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0057500>
- Kuhnem P.R., Ward T.J., Silva C.N., Spolti P., Ciliato M.L., Tessmann D.J., Del Ponte E.M., (2016). Composition and toxigenic potential of the *Fusarium* graminearum species complex from maize ears, stalks and stubble in Brazil. *Plant Pathology*, 65, 1185–1191. <http://dx.doi.org/10.1111/ppa.12497>
- Leslie J. F., Summerell B. A. (2006). The *Fusarium* Laboratory Manual. Blackwell Publishing, Oxford, UK.
- Lipps P., and Johnston A. L. (1996). Head scab reaction of selected winter wheat cultivars, breeding lines, and germplasm lines to *Fusarium* graminearum, 1995. *Biol. Cult. Tests Control Plant Disease*. 11:85.
- McMullen M., Jones R. & Gallenberg D. (1997). Scab of Wheat and Barley: A Re-emerging Disease of Devastating Impact. *APS. Plant disease*. 81, 1,340 - 1,348 doi./10.1094/PDIS.1997.81.12.1340
- McMullen M., Halley S., Schatz B., Meyer S., Jordahl J. and Ransom J. (2008). Integrated strategies for *Fusarium* head blight management in the United States. *Cereal Research Communications*, 36, 563-568
- McMullen M., Bergstrom G., De Wolf E., Dill-Macky R., Hershman D., Shaner G., and Van Sanfrod D. (2012). A unified effort to fight an enemy of wheat and barley: *Fusarium* head blight. *Plant Disease*, 96, 1712–1728. Retrieved from <http://apsjournals.apsnet.org/doi/abs/10.1094/PDIS-03-12-0291-FE14>
- Mesterhazy A., (1995). Types and components of resistance to *Fusarium* head blight of wheat. *Plant Breeding*, 114, 377–86.
- Mesterhazy A., Bartok T., Mirocha C., Komoroczy R. (1999). Nature of wheat resistance to *Fusarium* head blight and the role of deoxynivalenol for breeding. *Plant Breeding*, 118, 97–110.
- Mesterhazy A, Bartok T., and Lamper C. (2003). Influence of wheat cultivar, species of *Fusarium*, and isolate aggressiveness on the efficacy of fungicides for control of *Fusarium* head blight. *Plant Disease*, 87, 1107-1115
- Miedaner T. (1997). Breeding wheat and rye for resistance to *Fusarium* diseases. *Plant Breeding*;116, 201–20.
- Miedaner T., Wilde F., Korzun V., Ebmeyer E. (2008). Phenotypic selection for high resistance to *Fusarium* head blight after introgression of quantitative

- trait loci (QTL) from exotic spring wheat and verification by simple sequence repeat markers a posteriori. *Plant Breeding*, 127, 217–21.
- Miller J. D. and Arnison P. G. (1986). Degradation of deoxynivalenol by suspension cultures of the *Fusarium* head blight resistant wheat cultivar Frontana. *Canadian Journal of Plant Pathology – Revue Canadienne de Phytopathologie*; 8,147–50.
- Miller J. D., Greenhalgh R., Wand Y., Lu M. (1991). Trichothecene chemotypes of three *Fusarium* species. *Mycologia*; 83, 121–30.
- Moore W. R., Helm J. L., Olson T. C., Nelson R., and Puhr D. (1993). The quality of the regional (Montana, North and South Dakota, Minnesota) 1993 hard red spring wheat (DNS) crop. Page 4 *in*: Hard Red Spring (DNS) Wheat 1993 Regional Quality Report. Cereal Science Department, North Dakota State University, Fargo.
- Moschini R. C., and Fortugno C. (1996). Predicting wheat head blight incidence using models based on meteorological factors in Pergamino, Argentina. *European Journal of Plant Pathology*, 102, 211-218.
- Nelson P. E., Tousson T. A., Marasas W. F. O. (1983). *Fusarium* Species. An Illustrated Manual for Identification. The Pennsylvania State University Press, University Park, PA.
- Nirenberg H. I., (1981). A simplified method for identifying *Fusarium* spp. occurring on wheat. *Canadian Journal of Botany – Revue Canadienne de Botanique*; 59, 1599–609.
- O'Donnell K., Rooney A. P., Proctor R. H., Brown D. W., McCormick S. P., Ward T. J., ... Geiser D. M., (2013). Phylogenetic analyses of RPB1 and RPB2 support a middle Cretaceous origin for a clade comprising all agriculturally and medically important fusaria. *Fungal Genetics and Biology*, 52, 20–31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fgb.2012.12.004>.
- O'Donnell K., Ward T.J., Geiser D.M., Corby Kistler H., Aoki T., (2004). Genealogical concordance between the mating type locus and seven other nuclear genes supports formal recognition of nine phylogenetically distinct species within the *Fusarium* graminearum clade. *Fungal Genetics and Biology*, 41, 600–623. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fgb.2004.03.003>.
- Osman M., He X., Benedettelli S., Singh P.K., (2016). Trichothecene genotypes of *Fusarium* graminearum species complex and *F. cerealis* isolates from Mexican cereals. *Journal Plant Pathology*, 98, 331–336.
- Parry D. W., Jenkinson P., and McLeod L. (1995). *Fusarium* ear blight (scab) in small grain cereals - a review. *Plant Pathology*. 44:207- 238.
- Paul P. A., Salgado J. D., Bergstrom G. C., Bradley C., Byamukama E., Byrne A. M., ... Yabwalo D. (2018). Integrated Effects of Genetic Resistance and Prothioconazole + Tebuconazole Application Timing on *Fusarium* Head Blight in Wheat. *Plant Disease*. doi:10.1094/pdis-04-18-0565-re

- Ruckebauer P., Buerstmayr H., Lemmens M., (2001). Present strategies in resistance breeding against scab (*Fusarium* spp.). *Euphytica* 119, 121-127
- Rudd J. C., Horsley R. D., McKendry A. L., Elias E. M. (2001). Host plant resistance genes for *Fusarium* head blight: sources, mechanisms, and utility in conventional breeding systems. *Crop Science*; 41, 620–7.
- Rutkoski J., Benson J., Jia Y., Brown-Guedira G., Jannink J. L., Sorrells M. (2012). Evaluation of genomic prediction methods for *Fusarium* head blight resistance in wheat. *Plant Genome*; 5, 51–61.
- Ryu J-C., Ohtsubo K., Izumiyama N., Nakamura K., Tanaka T., Yamamura H., Ueno Y. (1988). The acute and chronic toxicities of nivalenol in mice. *Fundamental and Applied Toxicology*; 11, 38–47.
- Salameh A., Buerstmayr M., Steiner B., Neumayer A., Lemmens M., Buerstmayr H. (2011). Effects of introgression of two QTL for *Fusarium* head blight resistance from Asian spring wheat by marker-assisted backcrossing into European winter wheat on *Fusarium* head blight resistance, yield and quality traits. *Molecular Breeding*; 28, 485–94.
- Schmale III D. G. and G. C. Bergstrom. (2003). *Fusarium* head blight in wheat. *The Plant Health Instructor*. DOI:10.1094/PHI-I-2003-0612-01. Updated 2010.
- Shroeder H. W., Christensen J. J., (1963). Factors affecting resistance of wheat to scab caused by *Gibberella zeae*. *Phytopathology* 53, 831-838
- SIAP (2017): Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Revisado en línea: <http://www.siap.gob.mx/>. (junio 2018)
- Smith J. E.; Moss M.O. *Mycotoxins: Formation, Analysis and Significance*. John Wiley & Sons. Chichester. UK, 1985, 148p.
- Snijders C. H. A. (1990). *Fusarium* head blight and mycotoxin contamination of wheat, a review. *Neth. J. Plant Pathology*. 96:187-198.
- Stakman E. C., Bradfield R., Mangelsdorf P. C., (1969). Campañas contra el hambre. Traducido por Rafael Castillo Dibildox. Ed. Uteha (Union Tipográfica Editorial Hispano-americana). México.
- Sugiura Y., Fukasaku K., Tanaka T., Matsui Y., Ueno Y. (1993). *Fusarium poae* and *Fusarium crookwellense*, fungi responsible for the natural occurrence of nivalenol in Hokkaido. *Applied and Environmental Microbiology*, 59, 3334–3338.
- Sutton J. C. (1982). Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. *Canadian Journal Plant Pathology*. 4, 195-209.
- Turnipseed B. (1993). Testing of scabby seed. Pages 38-41 in: Proc. (1993). Regional Scab Forum. Minnesota Wheat Research and Promotion Council, Red Lake Falls.
- USDA (2017) World Agricultural Supply and Demand Estimates. Consultada en <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf> (junio 2018)

- Van Ginkel M., Van Der Schaar W., Zhuping Y., and Rajarm S. (1996). Inheritance of resistance to scab in two wheat cultivars from Brazil and China. *Plant Disease*. 80, 863-867.
- Vaughan J. and Geissler C. (1997). Grain crops: Wheats (págs. 2-3). En J. Vaughan y C. Geissler, *The New Oxford Book of Food Plants* New York: Oxford University Press Inc. ISBN: 0198548257. Impreso en China
- Vestal E. F. (1964). Barley scab in South Korea in 1963 and 1964. *Plant Disease*. 48, 754-755.
- Villaseñor M., H. E. (2000). Importancia del trigo In: Villaseñor, M.H. E., y R.E. Espitia (Eds) *El Trigo de Temporal en México*. Chapingo, Estado de México, México, SAGAR, INIFAP, CIRCE, CEVAMEX. Libro Técnico Núm. 1. pp: 7-22
- Villaseñor M., H. E., Huerta, E. J., Rodríguez, G. M. F. (2014). Descripción de las royas del trigo. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México. (Folleto Técnico Núm. 64). 32 p.
- Wang Y. Z., Miller J. D. (1988). Effects of *Fusarium* graminearum metabolites on wheat tissue in relation to *Fusarium* head blight resistance. *Journal of Phytopathology-Phytopathology Z*;122, 118–25.
- Wegulo S. N., Baenziger, P. S., Hernandez Nopsa, J., Bockus, W. W., & Hallen-Adams, H. (2015). Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley. *Crop Protection*, 73, 100–107. doi:10.1016/j.cropro.2015.02.025
- Willyerd K. T., Li, C., Madden, L. V., Bradley, C. A., Bergstrom, G. C., Sweets, L. E., ... Paul, P. A. (2012). Efficacy and stability of integrating fungicide and cultivar resistance to manage *Fusarium* head blight and deoxynivalenol in wheat. *Plant Disease*. 96:957-967.
- Windels C. E., and Kommedahl, T. (1984). Late-season colonization and survival of *Fusarium* graminearum Group II in cornstalks in Minnesota. *Plant Disease*, 68, 791-793.
- Windels C. E. (2000) Economic and social impacts of *Fusarium* head blight: changing farms and rural communities in the Northern Great Plains. *Phytopathology*; 90:17–21 DOI: 10.1094/PHYTO.2000.90.1.17

3. Artículo científico

BUSQUEDA DE RESISTENCIA DE TRIGOS MEXICANOS A LA ROÑA DE LA ESPIGA (*Fusarium spp.*)

Search for resistance of Mexican wheat to the head scab of wheat (*Fusarium spp.*)

RESUMEN

La roña de la espiga del trigo (*Triticum aestivum* L.) afecta el rendimiento, la calidad de la producción y produce micotoxinas que representan un riesgo para la salud humana y animal; para su control, la alternativa más conveniente es la resistencia genética. Con el objetivo de evaluar la respuesta de 16 variedades de trigo harinero a la incidencia de *Fusarium avenaceum* (complejo *F. tricinctum*), *Fusarium graminearum* y *Fusarium cerealis*, (complejo de *F. sambucinum*), se estableció un experimento en el Laboratorio Nacional de Royas y otras Enfermedades de Trigo del INIFAP ubicado en el Campo Experimental Valle de México. Se emplearon 16 variedades, dos representativas por década, a partir de 1940, para conocer el avance del programa de mejoramiento genético en México; Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar. Se incrementó el inóculo en cultivo monospórico, agar con hojas de clavel. Las inoculaciones se realizaron durante la antesis, con bolitas de algodón impregnadas de una suspensión de conidios con una concentración de 8×10^6 esporas ml^{-1} . En cámara de incubación, durante ocho días se mantuvieron condiciones para la infección (humedad relativa >95%, temperatura 19-21°C), posteriormente las plantas se trasladaron al invernadero. Se utilizó una escala visual elaborada *ex profeso*, para evaluar la roña de la espiga a los 8, 12 y 16 días después de la inoculación. Se hizo análisis estadístico con una confiabilidad del 95% utilizando el programa SAS ®. Los resultados muestran que entre los aislamientos de *Fusarium* no existe diferencia significativa respecto al grado de severidad ocasionado; existe mínima asociación entre la década de liberación de las variedades y el desarrollo de la enfermedad; las variedades de trigo expresaron diferentes niveles de resistencia a la roña de la espiga que se acentuó en las variedades de la década de los 90's.

Palabras clave: cereales, roña de la espiga, *Triticum aestivum* L., *Fusarium spp.*

ABSTRACT

The *Fusarium* Head Scab of wheat (*Triticum aestivum* L.) causes yield losses and quality reductions of the wheat production, besides, it produces mycotoxins that are a risk to human and animal health; to manage the disease, resistant cultivars are the more convenient option. In order to evaluate the response of 16 varieties of bread wheat to the incidence of *Fusarium avenaceum* (*F. tricinctum* complex), *Fusarium graminearum* and *Fusarium cerealis* (*F. sambucinum* complex), an experiment in the National Laboratory of Rusts and other diseases of Wheat of the INIFAP, located in Valle de México Experimental Field was established. Sixteen varieties were used, two representative varieties per decade, since 1940 to know the performance of the Mexican wheat breeding program, in a Randomized Complete Block Design. The inoculum was increased in a monospore culture, agar with carnation leaves. Inoculations were carried out during the anthesis, by means of spot inoculation with saturated cotton tufts in a suspension of conidia, 8×10^6 spores ml^{-1} concentration. In an incubation chamber, suitable conditions for infection (relative humidity >95%, temperature 19-21°C) were provided during eight days and subsequently the plants were moved to the greenhouse. An expressly made visual scale was used to evaluate *Fusarium* Head Blight of wheat at 8, 12 and 16 days after inoculation. Statistical analysis was performed with a reliability of 95% using the SAS® program. The results showed that there was not significant difference among *Fusarium* isolates regarding severity; there was minimum association among the varieties, according to the decade of their release, and the development of the disease; the evaluated varieties of wheat expressed different levels of resistance to *Fusarium* Head Scab that was accentuated in those varieties of the decade of the 90's.

Key words: Cereals, *Fusarium* head blight, *Triticum aestivum* L., *Fusarium* spp.

INTRODUCCIÓN

El trigo es el cereal más importante en la dieta diaria de la humanidad; alrededor de 750 millones de toneladas son producidas en el mundo anualmente (USDA, 2017) de las cuales el 90 % es trigo harinero (Vaughan y Geissler, 1997). Del volumen total de la producción mundial de trigo, México participa con 3.8 millones de toneladas producidas bajo condiciones de riego y temporal (SIAP, 2017).

La roña de la espiga ocasionada por el complejo de *Fusarium* spp. es una de las enfermedades más comunes y limitantes de la producción de cereales en todo el mundo, llegando a ser devastadora (McMullen *et al.*, 2012). Los daños ocasionados por la enfermedad son la reducción del rendimiento hasta en un 50 % (Windels, 2000), decoloración y arrugamiento de granos, contaminación con

toxinas que pueden afectar la salud humana y animal (Bottalico, 1998), y reducción de la calidad de la semilla; también reduce el peso hectolítrico y la calidad requerida para la comercialización, exportación, procesamiento y uso del grano (McMullen *et al.*, 1997; Schmale y Bergstrom, 2003).

Ireta y Gilchrist (1994) registraron brotes fuertes de roña de la espiga en algunos estados de las regiones Norte-Central y Valles Altos de México, e indicaron que en el área del Altiplano del estado de Jalisco un brote causó pérdidas de hasta el 90% de la cosecha de trigo lo que dependió de la variedad y las condiciones climatológicas.

En México, la roña de la espiga es más frecuente en las áreas donde se cultiva trigo bajo condiciones de temporal, en los estados de Jalisco, Michoacán, Estado de México, Tlaxcala e Hidalgo (Villaseñor, 2000). En Tlaxcala e Hidalgo se presentó incidencia hasta del 60% a nivel poblacional y del 10% al 15% a nivel individual o de espiga (Ireta y Gilchrist, 1994); entre los agentes causales, *Fusarium graminearum* (teleom. *Gibberella zeae*) es la especie predominante (Osman, 2016), *Fusarium avenaceum* (teleom. *Gibberella avenacea*) es una de las especies principales en la zona de la mixteca (estado de Oaxaca) y en los Valles Altos, mientras que *Fusarium cerealis* se presenta con baja frecuencia en los Valles Altos (Cerón *et al.*, 2018).

Desde 1990, la investigación a nivel mundial se ha enfocado en el desarrollo y uso de variedades resistentes para el control de la roña de la espiga ocasionada por el complejo *Fusarium* spp. (Schmale y Bergstrom, 2003); en México, el mejoramiento genético del trigo se ha enfocado en características como el rendimiento, resistencia a royas, contenido de gluten, resistencia al acame y resistencia a niveles limitantes de humedad edáfica (Huerta *et al.*, 2011).

La roña de la espiga es una enfermedad difícil de controlar (Paul *et al.*, 2018), porque ninguna variedad es inmune o resistente y los fungicidas por si solos no son muy efectivos; la mejor estrategia para el control de la roña de la espiga es

el mejoramiento genético a través de variedades resistentes. (McMullen *et al.*, 1997; Ruckebauer *et al.*, 2001).

En México, la información respecto a las especies de *Fusarium* que causan roña de la espiga en el cultivo de trigo y las micotoxinas que se asocian a esta enfermedad es limitada (Osman *et al.*, 2016); asimismo, no se han realizado ensayos de investigación con los aislamientos y variedades para cuantificar niveles de resistencia.

Ante esta realidad y por la importancia de conocer las características de resistencia a la roña de la espiga que expresan las variedades liberadas por el mejoramiento de trigo en México y para cuantificar los progresos de ese mejoramiento a través del tiempo, se planteó la presente investigación que tiene como objetivo evaluar la respuesta de 16 variedades de trigo harinero liberadas en México desde la década de 1940 hasta el 2015, a la incidencia de *Fusarium* spp.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar del experimento

El experimento se estableció en el Laboratorio Nacional de Royas y otras Enfermedades de Trigo (LANARET), ubicado en el Campo Experimental Valle de México del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) y el inóculo utilizado se incrementó en el laboratorio de Micología del Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo.

Variedades de trigo

Las semillas de las variedades de trigo fueron proporcionadas por el INIFAP y se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Variedades de trigo utilizadas para medir la severidad de la roña de la espiga.

No	Variedad	Año de liberación	Década	Genealogía
1	SUPREMO 211	1945	1941-1950	Surpresa x (Hope x Mediterranean)
2	YAQUI 48	1948		Newthatch/Marroqui 588
3	MAYO 52	1952	1951-1960	My48/Egypt nalOl/ff
4	MEXE 53	1953		Y48/Kt48
5	PENJAMO T62	1962	1961-1970	Fkn/N10b
6	CIANO F67	1967		Pi/Chr//Sn64
7	JUPATECO F73	1973	1971-1980	Il12300/1lr64/8156/31Nor
8	PAVON F76	1976		Vcm//Cno/7c/3/Kal/Bb
9	GLENSSON M81	1981	1981-1990	Kvz/Buho//Kal/Bb
10	OPATA M85	1985		Bjy/Jup
11	ARIVECHI M92	1992	1991-2000	Wuhl/Glen/4/Inia66/Ag.di//Inia66/3/Gen
12	BORLAUG M95	1996		Hahn*2/Prl
13	TACUPETO F2001	2002	2001-2010	Babax*2/9/KtBage/IFnlU/3lBza/41Trrn/5/
14	NORTEÑA F2007	2007		Aldanl6/Seri/7/Yr/S/Opata
15	BORLAUG 100 F2014	2014	2011-2020	Prl*2/Pastor
16	CONATRIGO F2015	2015		RoelfS07/4/Bow/Nkt//Cbrd/3/Cbrd/5/Fret2
				/Tukuru//Fret2
				Thelin/2*Wbl1

Especies de *Fusarium*

Las especies de *Fusarium*, que se evaluaron fueron: *F. avenaceum*, *F. graminearum* y *F. cerealis*, que fueron obtenidas y purificadas, a partir de espigas de trigo con síntomas de roña de la espiga colectadas en los años 2013 y 2014 por Cerón-Bustamante y colaboradores (Cerón *et al.*, 2018) en las regiones productoras de Tlaxcala, Estado de México y la región Mixteca Oaxacaqueña.

Siembra y manejo del trigo

El experimento se desarrolló en dos ciclos del cultivo, el primero se inició en septiembre y el segundo en diciembre ambos en 2017. Se sembraron 16 variedades de trigo, en macetas plásticas del número cinco, en un sustrato previamente esterilizado con vapor libre. Se sembraron tres semillas por maceta, con un total de seis macetas, para cada variedad de trigo. El manejo que se les dio a las plantas en el invernadero consistió de riego semanal y fertilización, esta

última se inició siete días después de la emergencia de las plántulas; las primeras seis semanas se fertilizó con urea y posteriormente con el producto comercial Tricel-20®; a la par, se efectuó el corte de ápices foliares para inducir y favorecer el amacollamiento.

Incremento del inóculo

El incremento del inóculo se realizó mediante cultivo monospórico, agar con hojas de clavel (CLA); se agregaron cinco trozos pequeños de hoja de clavel por caja con agua-agar al 2%, para favorecer la producción de conidios, a una temperatura de 25 °C (Gilchrist *et al.*, 2005).

Pruebas de patogenicidad e inoculación

Las pruebas de patogenicidad se realizaron durante la etapa de antesis de las variedades de trigo (etapa de mayor susceptibilidad), para lo cual se preparó el inóculo del crecimiento de los hongos en las cajas Petri con medio CLA, mediante el raspado de la capa superficial del crecimiento fungoso, filtrado con manta de cielo y con agua estéril, para obtener 20 mL de una suspensión de conidios a la que se le agregó Tween 20 como adherente para lograr una concentración de 1 mL L⁻¹.

La inoculación se hizo usando bolitas de algodón esterilizadas de un tamaño aproximado de 0.5 cm de diámetro que fueron sumergidas y saturadas en la suspensión de conidios con una concentración promedio de 8×10^6 esporas mL⁻¹; se colocaron dos bolitas por espiga, cada una entre dos espiguillas de la primera mitad de la espiga y se cubrieron con bolsas de papel encerado (Eyal *et al.*, 1987).

Después de la inoculación, las plantas se colocaron en una cámara de incubación a una temperatura de 19 a 21°C, junto con un humidificador (Hydrofogger) para darles 8 horas diarias de rocío y mantener la humedad relativa arriba del 95 %,

con 12 horas de luz y 12 horas de oscuridad por ocho días. Posteriormente se trasladaron al invernadero a una temperatura aproximada de 22°C.

Evaluaciones

Las evaluaciones del avance y/o la velocidad de propagación de los síntomas desde el sitio de inoculación a lo largo de la espiga (resistencia Tipo II), se hicieron con la ayuda de una escala visual para la evaluación de la roña de la espiga elaborada *ex profeso* (Figura 1).

Se realizaron tres evaluaciones del porcentaje de severidad desarrollado en las espigas inoculadas de las correspondientes variedades de trigo; la primera evaluación a los 8 días después de la inoculación (DDI), la segunda a los 12 DDI y la tercera a los 16 DDI.

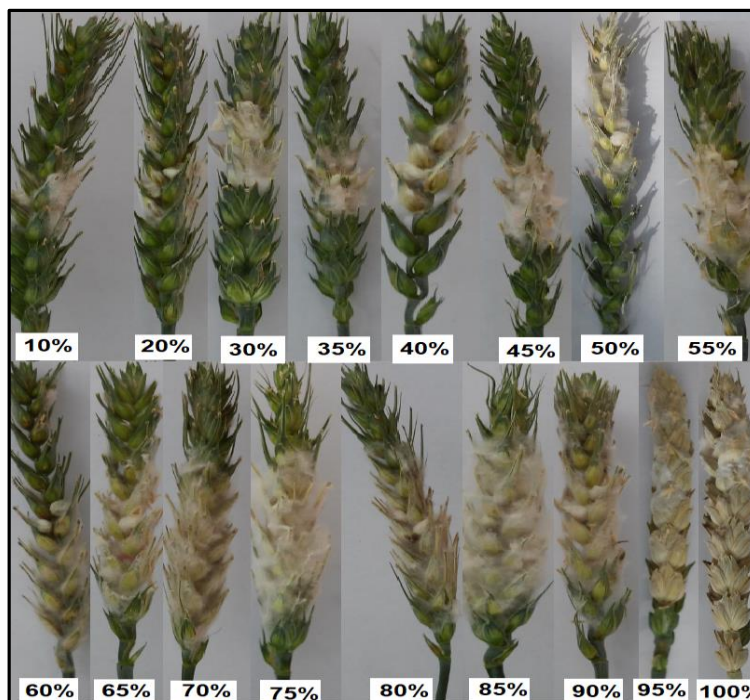


Figura 1. Escala visual para estimar la severidad de la roña de la espiga del trigo. Elaboración propia con datos de la investigación.

Análisis estadístico

El diseño experimental empleado fue de bloques completos al azar con seis repeticiones. La unidad experimental consistió de una espiga por planta. Se consideró como variable respuesta el porcentaje de la severidad de la infección causada por las diferentes especies del hongo.

Debido a que no se encontraron diferencias significativas en ambos ciclos del cultivo, los datos se analizaron en conjunto. El análisis estadístico se realizó a través de un análisis de varianza con el procedimiento GLM del programa SAS (Statistical Analysis System para Windows versión 9.4); asimismo, para las variables con significancia estadística, se realizaron pruebas de comparación de medias con la prueba de Tukey, con una confiabilidad del 95%.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aislamientos

El análisis estadístico reveló que no existe diferencia significativa entre los tres aislamientos de *Fusarium* estudiados, lo cual indica que, bajo las mismas condiciones de humedad y temperatura, las tres especies tienen grados de patogenicidad similar; en contraste, esta patogenicidad disminuye o se intensifica bajo condiciones ambientales diferentes; el área geográfica y las condiciones agroecológicas son determinantes para que cierta especie predomine y tenga ventajas adaptativas (Schmale y Bergstrom, 2003; Boutigny *et al.*, 2011; O'Donnell *et al.*, 2004), como es el caso de *F. cerealis* que suele ser más común en las zonas templadas de EE.UU., Canadá y Europa (Saremi *et al.*, 1999).

Aunque no hubo diferencias estadísticas significativas entre aislamientos, en el nivel de severidad, en general *F. cerealis* mostró menos severidad como puede observarse en la (Figura 2), que de acuerdo con Desjardins *et al.*, (1996) y Puri y Zhong (2010), podría deberse a la presencia y diferencia en las concentraciones

de micotoxinas en los aislados de *Fusarium* que han mostrado tener un rol importante en la agresividad o virulencia, lo cual implica la necesidad de realizar otras evaluaciones y medir las concentraciones de micotoxinas para confirmar los resultados.

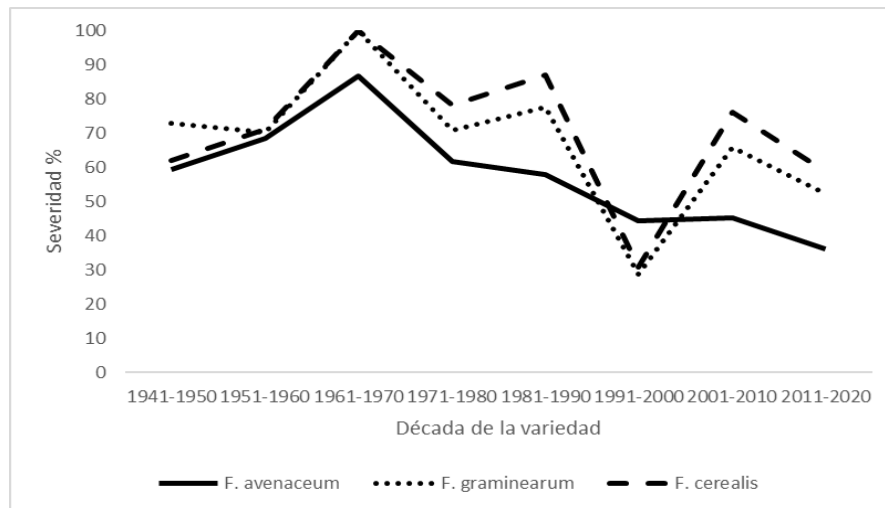


Figura 2. Severidad de la enfermedad ocasionada por los aislamientos de *Fusarium* spp, a los 16 días después de la inoculación.

Variedades

El coeficiente de correlación (-0.32 , $p < 0.0001$) mostró escasa asociación entre los niveles de severidad de la roña de la espiga desarrollados y la década en que fueron liberadas las variedades de trigo (Figura 3), aunque las representativas de la década de los 90's mostraron menor severidad de las tres especies; este resultado se atribuye a que el mejoramiento genético del trigo que se ha realizado en México no ha incorporado a la roña de la espiga como parámetro de estudio; se sabe que desde los inicios del mejoramiento genético, en la década de los 40's, hasta años recientes, 2011- 2015, la investigación en México se ha enfocado principalmente en la resistencia a royas y al incremento del rendimiento y la calidad (Hortelano *et al.*, 2016). Con base en los resultados es posible decir que la resistencia a la roña de la espiga, posiblemente por su característica multigénica, se ha conservado en las variedades estudiadas y con el

mejoramiento genético no ha habido erosión ni ganancia genética para esta enfermedad.

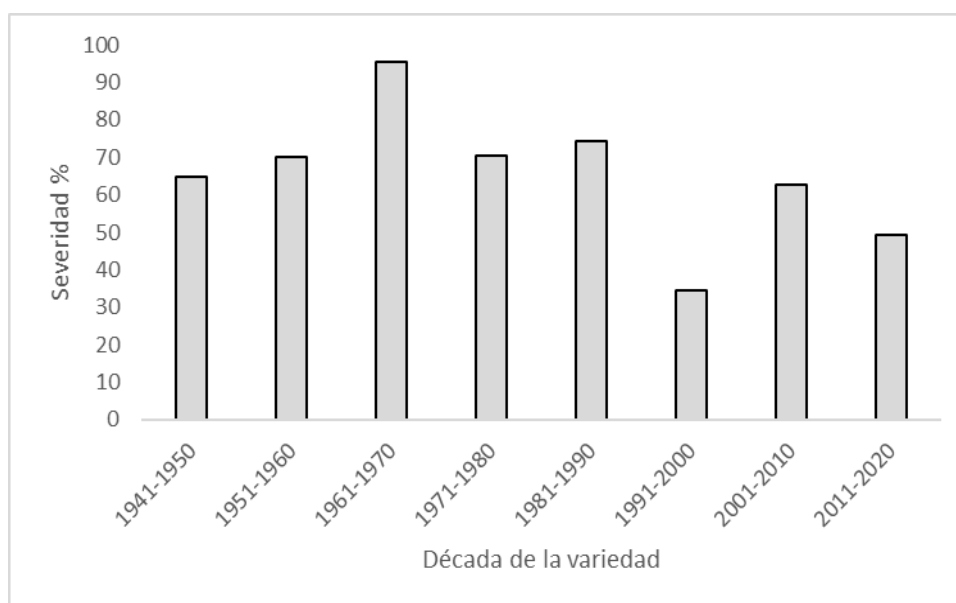


Figura 3. Niveles de severidad de la roña de la espiga que desarrollaron las variedades evaluadas.

El análisis estadístico de la variable área bajo la curva del progreso de la enfermedad (Cuadro 2), mostró que las variedades de trigo evaluadas expresan diferentes niveles de resistencia a la roña de la espiga, siendo las variedades de la década de los 60's las que expresaron menor resistencia (96% de severidad) y las variedades de la década de los 90's las que expresaron mayor resistencia (35% de severidad); esta respuesta podría deberse a la naturaleza cuantitativa y multigénica de la resistencia a la roña de la espiga (Buerstmayr *et al.*, 2014) o bien, puede deberse a un mecanismo de resistencia pasiva, debido a características morfológicas de las variedades tales como la presencia de aristas, anteras retenidas y espigas compactas que interfieren con el inicio de la enfermedad, tal como ocurre en otro tipo de interacciones patógeno-hospedante, tal y como lo indica Ribichich y Vegetti (2001); quienes encontraron diferencias en el período de incubación, entre la variedad resistente SUMAI 3 y la variedad susceptible PROINTA OASIS, a pesar de que ambas variedades se inocularon el mismo día. La variedad PROINTA presentó mayor severidad de roña, mientras

que SUMAI 3 presentó síntomas leves en estado avanzado del cultivo impidiendo el desarrollo de la enfermedad.

Cuadro 2. Análisis de varianza y comparación de medias del área bajo la curva del progreso de la enfermedad. LANARET, 2017.

Década	especie	<i>F. avenaceum</i>	<i>F. graminearum</i>	<i>F. cerealis</i>
1941-1950		389 ABC	411 BC	393 AB
1951-1960		490 AB	421 BC	414 AB
1961-1970		551^z A	752 A	737 A
1971-1980		375 ABC	437 BC	548 AB
1981-1990		369 ABC	525 B	632 A
1991-2000		284 C	187 D	206 B
2001-2010		322 BC	391 BC	525 AB
2011-2020		224 C	290 CD	352 AB

^z. Medias con letras iguales no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05)

A nivel mundial, el desarrollo de los cultivares resistentes ha sido lento, y solo se han lanzado unos pocos cultivares con resistencia moderada (Bai y Shaner, 2004; Paul *et al.*, 2018). Es de considerarse el nivel de resistencia que presentan las variedades liberadas en la década de los 90's, ya que podría recurrirse a este germoplasma para implementar un programa que busque la resistencia genética a la roña de la espiga.

El cambio climático se asocia con una mayor frecuencia y severidad de las epidemias de la roña de la espiga (Parikka *et al.*, 2012), al modificar el ambiente que propicia el desarrollo de la enfermedad. La amenaza constante de la roña de la espiga y los efectos adversos que conlleva en la producción de cereales,

aunado a la limitada información respecto a las especies de *Fusarium* y las micotoxinas asociadas con la roña de la espiga en el México (Osman *et al.*, 2016) es motivo de preocupación y conviene aumentar la investigación y búsqueda de resistencia de los trigos mexicanos, toda vez que los variedades resistentes desempeñan un papel clave en el control integrado de la roña de la espiga causada por *Fusarium* spp.

CONCLUSIONES

Con base en la década de su liberación, las variedades de trigo evaluadas en esta investigación no guardan relación con el desarrollo de la roña de la espiga ocasionada por *Fusarium avenaceum*, *Fusarium graminearum* y *Fusarium cerealis*, entre otras causas, porque la enfermedad no ha sido un criterio de selección importante en el mejoramiento genético de trigo en México.

Todas las variedades de trigo evaluadas expresan diferente nivel de resistencia a la roña de la espiga y esta resistencia se acentuó en las variedades de la década de los 90's, germoplasma que podría servir de referencia para implementar un programa de mejoramiento genético.

BIBLIOGRAFIA

- Bai G. and G. Shaner (2004) Management and resistance in wheat and barley to *Fusarium* head blight. *Annual Review of Phytopathology*. 42:135-161. Doi:10.1146/annurev.phyto.42.040803.140340
- Bottalico A. (1998) *Fusarium* diseases of cereals: species complex and related mycotoxin profiles, in Europe. *Journal of Plant Pathology*; 80:85–103. <http://dx.doi.org/10.4454/jpp.v80i2.807>
- Boutigny A. L., T. J. Ward, G. J. Van Coller, B. Flett, S. C. Lamprecht, K. O'Donnell and A. Viljoen (2011) Analysis of the *Fusarium graminearum* species complex from wheat, barley and maize in South Africa provides evidence of species-specific differences in host preference. *Fungal Genetics and Biology*. 48:914–920. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fgb.2011.05.005>
- Buerstmayr, H., M. Buerstmayr, W. Schweiger and B. Steiner (2014) Breeding for resistance to head blight caused by *Fusarium* spp. in wheat. *CAB Reviews*

- Cerón-Bustamante M., T. J. Ward, A. Kelly, M. M. Vaughan, S. P. McCormick, C. Cowger, ..., C. Nava-Díaz (2018) Regional differences in the composition of *Fusarium* Head Blight pathogens and mycotoxins associated with wheat in Mexico. *International Journal of Food Microbiology*, 273:11–19. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2018.03.003
- Desjardins A. E., R. H. Proctor, G. Bai, S. P. McCormick, G. Shaner, G. Buechley and T. M. Hohn (1996) Reduced virulence of trichothecene-nonproducing mutants of *Gibberella zeae* in wheat field tests. *Molecular Plant Microbe Interactions*. 9:775-781. DOI: 10.1094/MPMI-9-0775
- Eyal Z. S. (1987) Enfermedades del trigo causadas por *Septoria*: Conceptos y métodos relacionados con el manejo de estas enfermedades. CDMX, México: CIMMYT. 46 p. Retrieved septiembre 2017.
- Gilchrist-Saavedra L., G. Fuentes-Dávila, C. Martínez-Cano, R.M. López-Atilano, E. Duveiller, R. P. Singh, M. Henry e I. García A. (2005) Guía práctica para la identificación de algunas enfermedades de trigo y cebada. Segunda edición. CIMMYT. México, D.F. 68 p.
- Hortelano R., E. Martínez, H. E. Villaseñor y V. Morales (2016) Mejoramiento genético de trigo en México. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. 3:25-31
- Huerta E. J., H. E. Villaseñor M., E. Espitia R., E. Solis M. and M. Ginkel (2011) The history of wheat breeding in Mexico. In: Bonjean A. P., Angus W. J., Ginkel M. (Eds) *The World Wheat Book Volume 2. A History of Wheat Breeding* (pp. 275-308). Paris: Editions TEC & DOC.
- Ireta J. M. y L. Gilchrist S. (1994) Roña o tizón de la espiga del trigo. Informe especial de trigo No. 20. CIMMYT. México, D.F. 25 p.
- McMullen M., G. Bergstrom, E. De Wolf, R. Dill-Macky, D. Hershman, G. Shaner and D. Van Sanfrod (2012) A unified effort to fight an enemy of wheat and barley: *Fusarium* head blight. *Plant Disease*, 96(12): 1712–1728. Retrieved from <http://apsjournals.apsnet.org/doi/abs/10.1094/PDIS-03-12-0291-FE> 14
- McMullen M., R. Jones and D. Gallenberg (1997) Scab of Wheat and Barley: A Re-emerging Disease of Devastating Impact. *American Phytopathological Society. Plant disease*. 81:1,340 - 1,348 doi./10.1094/PDIS.1997.81.12.1340
- O'Donnell K., T.J. Ward, D. M. Geiser, H. Corby Kistler, and T. Aoki (2004) Genealogical concordance between the mating type locus and seven other nuclear genes supports formal recognition of nine phylogenetically distinct species within the *Fusarium graminearum* clade. *Fungal Genetics and Biology* 41:600–623. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fgb.2004.03.003>.

- Osman M., X. He, S. Benedettelli, and P. K. Singh (2016) Trichothecene genotypes of *Fusarium graminearum* species complex and *F. cerealis* isolates from Mexican cereals. *J. Plant Pathology*. 98, 331–336. doi: 10.1186/s40529-016-0156-4
- Parikka P., K. Hakala and K. Tiilikkala (2012) Expected shifts in *Fusarium* species' composition on cereal grain in Northern Europe due to climatic change. *Food Additives & Contaminants*. 29:1543-1555. <https://doi.org/10.1080/19440049.2012.680613>
- Parry D. W., P. Jenkinson, and L. McLeod (1995) *Fusarium* ear blight (scab) in small grain cereals - a review. *Plant Pathology*. 44:207- 238. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3059.1995.tb02773.x>
- Paul P. A., J. D. Salgado, G. C. Bergstrom, C. A. Bradley, E. Byamukama, A. M. Byrne, ... D. Yabwalo (2018) Integrated Effects of Genetic Resistance and Prothioconazole + Tebuconazole Application Timing on *Fusarium* Head Blight in Wheat. *American Phytopathological Society Plant Disease*. 103: 223-237 doi:10.1094/pdis-04-18-0565-re
- Puri K.D. and S. Zhong (2010) The 3ADON population of *Fusarium graminearum* found in North Dakota is more aggressive and produces a higher level of DON than the prevalent 15ADON population in spring wheat. *Phytopathology* 100:1007-1014. doi: 10.1094/PHYTO-12-09-0332.
- Ribichich K. and A. Vegetti. (2001). Fusariosis de la espiga de trigo: evaluación de caracteres exomorfológicos asociados a la resistencia. *Revista Facultad de Agronomía-La Plata* 104:121-127
- Ruckenbauer P., H. Buerstmayr, M. Lemmens (2001) Present strategies in resistance breeding against scab (*Fusarium* spp.). *Euphytica* 119:121-127 DOI: 10.1023/A:1017598523085
- Saremi H., L. W. Burgess and D. Backhouse (1999) Temperature effects on the relative abundance of *Fusarium* species in a model plant–soil ecosystem. *Soil Biology and Biochemistry*, 31:941-947. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(99\)00001-2](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(99)00001-2)
- Schmale III D.G. and G.C. Bergstrom (2003) *Fusarium* head blight in wheat. The Plant Health Instructor. DOI:10.1094/PHI-I-2003-0612-01. Updated 2010.
- SIAP (2017) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Consultado en: <http://www.siap.gob.mx/> (Junio 2018).
- USDA (2017) World Agricultural Supply and Demand Estimates. Consultada en <https://www.usda.gov/oce/commodity/wasde/latest.pdf> (Junio 2018).
- Vaughan J. and C. Geissler (1997) Grain crops: Wheats (págs. 2-3). In: J. Vaughan y C. Geissler, The New Oxford Book of Food Plants New York: Oxford University Press Inc. ISBN: 0198548257. China
- Villaseñor M. H. E. (2000) Importancia del trigo. In: Villaseñor M. H. E. y R. E. Espitia (Eds) El Trigo de Temporal en México. Chapingo, Estado de

México, México, SAGAR, INIFAP, CIRCE, CEVAMEX. Libro Técnico Núm. 1. pp: 7-22

Windels C. E. (2000) Economic and social impacts of *Fusarium* head blight: changing farms and rural communities in the Northern Great Plains. *Phytopathology*; 90:17–21 DOI: 10.1094/PHYTO.2000.90.1.17