



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE FITOSANIDAD

FITOPATOLOGÍA

IDENTIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE RAZAS FISIOLÓGICAS DE *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* EN VALLES ALTOS DE MÉXICO

ADRIANA ZAMUDIO COLUNGA

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MÉXICO

2016

La presente tesis titulada: **IDENTIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE RAZAS FISIOLÓGICAS DE *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* EN VALLES ALTOS DE MÉXICO**; realizada por la alumna: Adriana Zamudio Colunga; bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS

FITOSANIDAD

FITOPATOLOGÍA

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



Dr. José Sergio Sandoval Islas

ASESOR



Dr. Héctor Eduardo Villaseñor Mir

ASESOR



Dr. Julio Huerta Espino

ASESOR



Dr. Eduardo Espitia Rangel

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Junio de 2016

**IDENTIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE RAZAS FISIOLÓGICAS DE *Puccinia*
graminis f. sp. *avenae* EN VALLES ALTOS DE MÉXICO**

Adriana Zamudio Colunga

Colegio de Postgraduados, 2016

RESUMEN

Se estudió las variantes patogénicas de *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* en el cultivo de avena (*Avena sativa* L.) en los Valles Altos del centro de México, mediante la identificación de razas fisiológicas a partir del análisis de 170 muestras de Pga colectadas en el Estado de México, Tlaxcala, Puebla, Hidalgo y Morelos, se aislaron a través de monopustulares y se incrementaron. Los aislamientos fueron analizados con doce diferenciales monogénicas, variedades comerciales y líneas avanzadas. Se identificaron 62 razas, siendo las comunes TNQ (15 %), TNB (9 %), TLQ (7 %), TNG (6 %) y TPS (5 %). También se mostró porcentajes altos de virulencia mayores al 75% los genes Pg1-Pg7 y Pg9 y bajos Pg10, Pg11, Pg12 y Pg13. Las líneas inmunes con excepción de S-129 y pueden ser usadas como fuentes de resistencia en futuras variedades.

Palabras clave: *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*, *Avena sativa* L., razas fisiológicas.

**IDENTIFICATION AND DISTRIBUTION OF RACES *PHYSIOLOGICAL Puccinia
graminis* f. sp. *avenae* IN HIGH VALLEYS OF MEXICO**

Adriana Zamudio Colunga

Colegio de Postgraduados, 2016

ABSTRACT

Pathogenic variants of *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* was studied in growing oats (*Avena sativa* L.) in the high valleys of central Mexico, by identifying physiological races based on the analysis of 170 samples collected Pga in the State of Mexico, Tlaxcala, Puebla, Hidalgo and Morelos they were isolated through monopustulares. The isolates were analyzed with twelve differentials monogenic, commercial varieties and advanced lines. 62 races were identified, the most common TNQ (15 %), TNB (9 %), TLQ (7 %), TNG (6 %) and TPS (5 %). High percentages of greater virulence also showed 75% of Pg1-Pg7 and Pg9 and low Pg10, Pg11, Pg12 and Pg13. Immune lines except S-129 can be used as sources of resistance in future varieties.

Keywords: *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*, *Avena sativa* L., physiological races.

AGRADECIMIENTOS

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por otorgarme una beca para realizar mis estudios de Maestría.

Al **Colegio de Postgraduados**, especialmente al programa de **Fitosanidad-Fitopatología** por darme la oportunidad de continuar con mi formación profesional.

Al **Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias Campo Experimental Valle de México (INIFAP-CEVAMEX)** por el apoyo otorgado para realizar la investigación en campo y laboratorio.

Al personal del **Programa de Mejoramiento Genético de Trigo y Avena del INIFAP-CEVAMEX** por su amistad y apoyo brindado en el desarrollo de las diferentes actividades de la investigación.

Al **Dr. Héctor Eduardo Villaseñor Mir** por el tiempo y apoyo que me proporcionó en el trabajo de campo, por todas las facilidades prestadas en el laboratorio del programa de trigo y avena, por financiar este trabajo, por sus buenas sugerencias, por compartir su vasta experiencia conmigo y sobre todo por la amistad que siempre me brinda.

Al **Dr. Julio Huerta Espino** por el tiempo y apoyo que me proporcionó en el trabajo de invernadero, por su participación en la dirección de la presente investigación, por sus

consejos, sugerencias y aportaciones para el enriquecimiento de este trabajo, por compartir sus conocimientos conmigo, además de la amistad que me brindó.

Al **Dr. Eduardo Espitia Rangel** por su valiosa ayuda durante el periodo de la investigación, por los consejos y sugerencias para mejorar el trabajo y por su apoyo en la última etapa para concluir la maestría, al mismo tiempo quiero agradecer la amistad que me aportó.

Al **Dr. José Sergio Sandoval Islas** por todo su apoyo, orientación y paciencia durante la maestría, así como en la revisión del presente trabajo.

Al **Sr. Emilio Ponce** por su amistad y colaboración en los trabajos de invernadero.

DEDICATORIA

A Dios.

"Mira que te mando que te esfuerces y seas valiente; no temas ni desmayes, porque Jehová tu Dios estará contigo en dondequiera que vayas." Josue 1:9

Por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres

"Honra a tu padre y a tu madre, como Jehová tu Dios te ha mandado, para que sean prolongados tus días, y para que te vaya bien sobre la tierra que Jehová tu Dios te da."

Deuteronomio 5:16

Mi madre Elvira Colunga y mi padre Francisco Zamudio, por darme la vida, quererme mucho, creer en mi y porque siempre tengo su apoyo incondicional, son el amor de mi vida.

A mis hermanos

"Por lo demás, hermanos, todo lo que es verdadero, todo lo honesto, todo lo justo, todo lo puro, todo lo amable, todo lo que es de buen nombre; si hay virtud alguna, si algo digno de alabanza, en esto pensad." Filipenses 4:8

Mis hermanos Alejandra, Martín, Marisela; Francisco, Daniel y Luz Elena, por estar conmigo y apoyarme siempre, los amo mucho.

A mis amigos

"En todo tiempo ama el amigo, es como un hermano en tiempo de angustia."

(Proverbios 17:17)

Todos mis amigos y compañeros de la maestria por compartir conmigo los buenos y malos momentos.

CONTENIDO

| | |
|--|------|
| RESUMEN | iii |
| ABSTRACT | iv |
| AGRADECIMIENTOS..... | v |
| DEDICATORIA | vii |
| CONTENIDO..... | viii |
| ÍNDICE DE CUADROS..... | x |
| ÍNDICE DE FIGURAS | xi |
| CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL..... | 1 |
| Objetivo General | 3 |
| Objetivos Particulares..... | 3 |
| CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA | 4 |
| 2.1. Roya del tallo de avena | 4 |
| 2.1.1 Importancia y distribución de la roya del tallo..... | 4 |
| 2.1.2 El patógeno | 5 |
| 2.1.2.1 Clasificación taxonómica | 6 |
| 2.1.2.2 Características morfológicas del patógeno..... | 6 |
| 2.1.2.3 Ciclo biológico | 7 |
| 2.1.2.4 Epidemiología..... | 10 |
| 2.1.3 Signos en plantas de avena..... | 11 |
| 2.1.4 Hospedantes | 12 |
| 2.2 Pérdidas en el rendimiento del cultivo de avena ocasionadas por roya del tallo | 13 |

| | |
|---|-----------|
| 2.3 Razas fisiológicas | 15 |
| 2.4 Virulencia de roya del tallo..... | 16 |
| 2.4.1 Virulencia de roya del tallo en otros países | 16 |
| 2.4.2 Virulencia de roya del tallo en México | 18 |
| CAPÍTULO 3. VARIACIÓN FENOTÍPICA DE <i>Puccinia graminis</i> f. sp. <i>avenae</i> EN LOS VALLES ALTOS DEL CENTRO DE MÉXICO | 19 |
| RESUMEN..... | 19 |
| ABSTRACT..... | 20 |
| INTRODUCCIÓN..... | 21 |
| MATERIALES Y MÉTODOS..... | 25 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 29 |
| CONCLUSIONES..... | 37 |
| LITERATURA CITADA | 38 |
| CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES | 42 |
| CAPITULO 5. LITERATURA CITADA GENERAL | 43 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|--|----|
| Cuadro 1. Respuestas del hospedante, tipo de infección y descripción de los síntomas para evaluar <i>Puccinia graminis</i> f. sp. <i>avenae</i> (Roelfs et al., 1992)..... | 27 |
| Cuadro 2. Código de letras para las razas de <i>P. graminis</i> f. sp. <i>avenae</i> usando 12 diferenciales líneas <i>Pg</i> -genes en tres subconjuntos ordenados de cuatro líneas cada uno (Fetch y Jin 2007). | 28 |
| Cuadro 3. Frecuencia y la distribución de las razas fisiológicas de <i>Puccinia graminis</i> f. sp. <i>avenae</i> en Valles Altos de México en 2014. | 30 |
| Cuadro 4. Razas fisiológicas de <i>P. graminis</i> f. sp. <i>avenae</i> identificadas a partir de las diferenciales monogénicas (<i>Pg</i>), las variedades comerciales y líneas avanzadas. | 34 |
| Cuadro 5. Porcentaje de virulencia de las diferenciales de avena, las variedades comerciales y líneas avanzadas obtenidos a partir de los aislamientos de <i>P. graminis</i> f. sp. <i>avenae</i> | 36 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Etapas de <i>Puccinia graminis</i> (Roelfs et al., 1992). | 7 |
| Figura 2. Ciclo biológico de <i>Puccinia graminis</i> (Leonard y Szabo, 2005). | 10 |
| Figura 3. Signos de la roya del tallo a) Tallo con pústulas errupentes; b) Hojas afectadas de plántula (1) y planta adulta (2). | 12 |
| Figura 4. Distribución de razas fisiológicas de <i>P. graminis</i> f. sp. <i>avenae</i> detectadas en Valles Altos del Centro de México durante el 2014. | 33 |

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL

El cultivo de avena (*Avena sativa* L.) es el séptimo cereal más importante en producción a nivel mundial después del maíz (*Zea mays* L.), arroz (*Oryza sativa* L.), trigo (*Triticum aestivum* L), cebada (*Hordeum vulgare* L.), sorgo (*Sorghum vulgare* Pers.) y mijo (*Panicum miliaceum*), con una producción anual de 26 millones de toneladas de grano (FAO, 2012). En México en los últimos años ha incrementado su superficie de siembra de aproximadamente 450 mil a 850 mil hectáreas, se atribuye, entre otras cosas, a la gran adaptabilidad del cultivo, tanto a zonas altas, frías y lluviosas, como en ambientes semiáridos. En altitudes mayores a 1 800 msnm es una alternativa apropiada cuando los cultivos de maíz, frijol, trigo o cebada se siniestran por sequía o heladas tempranas (Villaseñor *et al.*, 2008). Durante el 2014 se sembraron 731 013 ha⁻¹ de avena forrajera con una producción de 10 838 129 t y un rendimiento promedio de 14.92 t ha⁻¹. Para la producción de grano se sembraron 53 426 ha⁻¹, con una producción de 93 020 t y un rendimiento promedio 1.7 t ha⁻¹. En los Valles Altos de México se sembraron 126 071 ha⁻¹ de avena forrajera y se obtuvo un rendimiento promedio de 18 t ha⁻¹ y 20 743 ha⁻¹ de avena para grano, con un rendimiento promedio de 1.75 t ha⁻¹ (SIAP, 2016).

La avena al igual que otros cereales como el trigo y la cebada, está expuesta a los daños que ocasionan los hongos, siendo las royas las enfermedades más conocidas y destructivas de este cereal, presentes en casi todas las áreas aveneras del mundo (Zillinsky, 1984). Villaseñor *et al.* (2001) mencionan que en los Valles Altos de la Mesa Central Mexicana las royas son un factor adverso para este cultivo.

La principal limitante en la producción de avena es la roya del tallo causada por el hongo *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*, es una enfermedad muy agresiva y devastadora que daña cualquier parte de la planta que se encuentre sobre la superficie del suelo, desde la etapa de plántula hasta la de llenado de grano (Zilinsky, 1984), y puede reducir el rendimiento de grano hasta el 70%.

En variedades muy susceptibles la pérdida en la producción de materia seca fluctúa entre 32 y 45 % (Leyva *et al.*, 2004). La medida más eficiente de control es la utilización de variedades resistentes, sin embargo, en México la mayoría de las variedades recomendadas para siembra se han vuelto susceptibles debido a la evolución de las razas del patógeno que causa esta enfermedad.

Las áreas cultivadas con avena en el norte de México, las Grandes Planicies de los Estados Unidos de América y las praderas del este de Canadá, constituyen una sola área epidemiológica relativamente estable de la roya del tallo, dominada desde 1963 por un sólo fenotipo virulento del hongo, la raza NA 27 (Roelfs *et al.*, 1979).

En México, poco se ha trabajado en el patosistema avena – *P. graminis* f. sp. *avenae* y sobre todo aspectos de razas fisiológicas existentes. El trabajo más reciente fue desarrollado por Mariscal *et al.* (2011) quienes estudiaron la variación patogénica de Pga a nivel de razas fisiológicas y propusieron siete genotipos de avena comercial como diferenciales, pero aún falta por explorar detalladamente todas las regiones productoras de avena para generar información concluyente sobre los genes de resistencia que tienen las variedades comerciales y las virulencias existentes.

Villaseñor *et al.* (2007) mencionan que en Valles Altos de México al parecer inciden más de 10 razas distintas. Verificar la existencia de estas razas y una correcta

clasificación permitiría conocer la respuesta de los genotipos a estas razas y determinar la vulnerabilidad en campo de las nuevas variedades. Por lo anterior, en la presente investigación se plantean los siguientes objetivos:

Objetivo General

- Identificar y determinar la distribución de razas fisiológicas de *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* en las diferentes regiones productoras de avena en los Valles Altos de México.

Objetivos Particulares

- Caracterizar las razas fisiológicas de roya del tallo (*Puccinia graminis* f. sp. *avenae*) existentes en las principales zonas productoras de avena en los Valles Altos del Centro de México.
- Conocer la distribución de las principales razas fisiológicas de *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* en los Valles Altos del Centro de México.

CAPÍTULO 2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Roya del tallo de avena

La enfermedad que causa *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* recibe el nombre de roya del tallo, óxido negro de cereales, roya negra y polvillo de la caña (Roelfs *et al.*, 1992). Es una enfermedad que ataca al cultivo de avena, cuando incide en variedades susceptibles amenaza la producción, causando pérdidas del 70% (Leyva *et al.*, 2004).

2.1.1 Importancia y distribución de la roya del tallo

Esta roya, es una enfermedad importante cuando el ciclo del cultivo esta avanzando, particularmente para las variedades que se siembran o maduran tardíamente en altitudes bajas. Para el desarrollo de la enfermedad se requieren condiciones adecuadas, como el inóculo, huéspedes susceptibles, temperatura y humedad (Roelfs *et al.*, 1992). Cuando se tienen estas condiciones, las pérdidas en el cultivo por enfermedades pueden llegar a ser graves.

A pesar de que la roya del tallo en gran medida se ha controlado en todo el mundo por el uso de cultivares resistentes (Roelfs *et al.*, 1992), el hongo es potencialmente un problema continuo.

Es distribuida generalmente en el centro y sur de la India y en las regiones del este, que comprende partes de Uttar Pradesh, Bihar y Bengala. Normalmente no sobrevive a los veranos cálidos y secos de las llanuras centrales. Sin embargo, los valles del Himalaya y las colinas del sur de la India proporcionan las condiciones adecuadas para

la supervivencia de las royas durante todo el año, son los focos de infección para los cultivos obtenidos en el centro de la India durante el invierno (Nagarajan y Joshi, 1985). Presente en Asia occidental (Irán, Irak, Turquía, Siria, Israel, Jordania, Líbano) (Cabi 2015). En África al sur del Sahara y la Península Arábiga sur-oeste. China es probablemente una fuente de inóculo para Corea, Japón y el Lejano Oriente soviético (Saari y Prescott, 1995). Problema potencial en la región de las llanuras del norte de los Estados Unidos (Minnesota, Dakota del Norte y Dakota del Sur) y la región de las praderas del este de Canadá (Manitoba y Saskatchewan oriental) (Roelfs, 1985b). América del Sur cuenta con dos regiones epidemiológicas distintas (Harder *et al.*, 1996). En Australia se presenta afectando gravemente las zonas productoras de avena (Luig, 1985).

En México *P. graminis* se encuentra en gran parte del territorio, sin embargo, se han detectado pocas epidemias graves debido a la sincronización de los cultivos y el uso de cultivares resistentes (Roelfs, 1985a).

2.1.2 El patógeno

El primer género reconocido de las royas fue *Puccinia*, llamado así en honor a Thomas Puccini (Arthur, 1928). Los italianos Fontana y Tozzetti proporcionaron de forma independiente los primeros informes inequívocos y detallados de la roya del tallo en 1767 (Fontana, 1932; Tozzetti, 1952). En 1797 Persoon nombró *Puccinia graminis* al hongo causante de la roya del tallo en el cultivo de trigo, proporcionó la primera binomial y se mantiene para este y muchos otros taxones (Persoon, 1801). Chester (1946) proporcionó una de las primeras historias detalladas de la literatura sobre las

royas. La roya del tallo en el cultivo de avena *Puccinia graminis* Pers. f. sp. *avenae* Eriks. y E. Henn. fue observada por primera vez en el sur de Manitoba, Canada el 11 de julio de 1977 (Martens, 1978).

2.1.2.1 Clasificación taxonómica

Dominio Eukariota

Reino Eumycota

Phylum Basidiomycota

Subphylum Pucciniomycotina

Clase Pucciniomycetes

Orden Pucciniales

Familia Pucciniaceae

Género *Puccinia*

Especie *P. graminis* f. sp. *avenae*

(CABI, 2016).

2.1.2.2 Características morfológicas del patógeno

P. graminis es una roya macrocíclica con las cinco fases reproductoras, fase 0 (espermagonio), I (ecios), II (uredinios), III (telios) y IV (basidios) (Roelfs y Bushnell, 1985).

Las picniosporas son unicelulares, aparecen en un fluido viscoso que se forma en la abertura picnial. Las aeciosporas son dicarióticas, cilíndricas, con medidas de 16-23 x 15-19 μ (Roelfs y Bushnell, 1985). Las uredosporas son dicarióticas, de 18-22 x 24-32 μ de diámetro, de color café rojizas, elípticas a ovoides, equinuladas, con tejido de la epidermis expuesto, sobresaliendo de los márgenes; presenta teliosporas diploides, color café oscuras, bicelulares y cuneiformes, conservan una porción de pedicelo o

talo, con paredes gruesas (de hasta cinco capas de la pared) y medidas de 18-23 x 40-60 μ (Figura 1) (Zillinsky, 1984). Las basidiosporas son pequeñas de 6 x 8 μ , hialinas, y de forma ovalada (Roelfs y Bushnell, 1985).

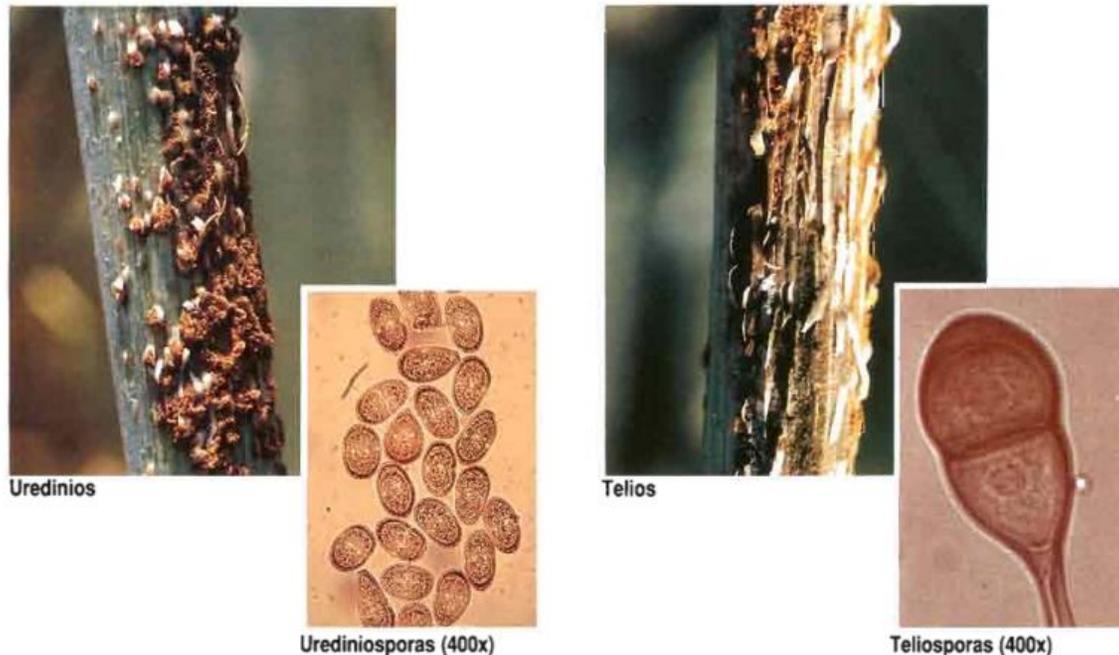


Figura 1. Etapas de *Puccinia graminis* (Roelfs et al., 1992).

2.1.2.3 Ciclo biológico

El ciclo de vida de *P. graminis* ha sido ampliamente estudiado. Fontana (1932) realizó el primer dibujo del hongo, Persoon en 1791 denominó *Aecidium berberidis* al hongo del agracejo posteriormente y en 1794 *P. graminis* al de trigo (Roelfs et al., 1992). DeBary (1866) mostró que *P. graminis* en cereales y *Aecidium berberidis* en el agracejo, eran diferentes etapas de un mismo organismo.

Las basidiosporas haploides (1N) se forman en esterigma en cada celda del basidio, son liberadas a pocos centímetros en la madurez (Buller, 1958), llevadas por el viento

al hospedante alterno (Berberis, Mahonia), sobreviven sólo unas pocas horas en condiciones ideales (Rofls y Bushnell, 1985). Germinan y penetran directamente, para que se produzca la infección máxima el tejido foliar debe tener menos de dos semanas de edad (Roelfs *et al.*, 1992).

Aproximadamente cinco días después de la infección en el hospedante alterno, los signos iniciales de desarrollo de picnios (1N) se hacen visibles (Cotter, 1932), producen un solo tipo de sexo (+ o -), hifas receptivas y picniosporas que sirven como gametos masculinos y femeninos (Roelfs *et al.*, 1992). Se forman de 7 a 14 días después en un fluido viscoso que se forma en el hostiolo del picnio, se fusiona con una hifa receptiva de diferente sexo para que se inicie el desarrollo de la eciospora (Roelfs y Bushnell, 1985). Con frecuencia la transferencia de las picniosporas es efectuada por insectos atraídos por el néctar que emana del picnidio (Roelfs *et al.*, 1992).

El núcleo de la picniospora migra a través de las hifas monocarióticas hasta que alcanza el protoaecium, este proceso requiere de 20 a 25 hrs. Tras la dicariorización, se desarrolla un aecium en el envés de la hoja de la planta de los 7 a 10 días posteriores. Las eciosporas son dicarióticas (N + N) y se producen en los aecios, son producto de la recombinación genética y difieren en cuanto a su virulancia y agresividad (Roelfs *et al.*, 1992). Transportadas por el viento a la hoja de la gramínea hospedante (Roelfs y Bushnell, 1985).

Se forma un uredio, los signos iniciales son visibles a los 6 días después de la inoculación, a los 4 días posteriores comienzan a esporular, producen aproximadamente 10,000 uredosporas por uredio por día (Rowell y Roelfs, 1971). La mayoría de las uredosporas se depositan dentro del mismo cultivo (Roelfs, 1972). Son

resistentes a temperaturas que van de los 0° a 40°C, permanen viables a temperatura ambiente durante varias semanas, su longevidad disminuye con la exposición a humedades relativas elevadas (> 80%), y se prolonga a humedades relativas de 20 a 30% (Roelfs y Bushnell, 1985).

El ciclo uredial se repite cada 14 a 21 días en condiciones ambientales adecuadas. A medida que madura el hospedante, se generan telios directamente desde la infección por urediniosporas, o se pueden producir teliosporas en una pústula de uredios maduros (Roelfs *et al.*, 1992).

Las teliosporas son dicarióticas (N+N) y permanecen en la paja hasta la primavera. Durante este periodo se produce la cariogamia y las teliosporas se vuelven diploides (2N) con las lluvias primaverales y las temperaturas favorables, la teliospora germina, sufre un proceso de meiosis y produce un basidio de cuatro células. Cada célula origina un esterigma con una sola basidiospora haploide (1N) (Roelfs *et al.*, 1992).

La epidemiología de *Puccinia graminis* es similar a *Puccinia triticina*. Las temperaturas mínima, óptima y máxima para germinación de esporas son 2°, 15° a 24° y 30°C respectivamente, para la esporulación es de 5°, 30° y 40°C, 5°C más alta en cada categoría que para *P. triticina* (Hogg *et al.*, 1969 citado por Roelfs *et al.*, 1992).

En climas cálidos y húmedos, la roya del tallo puede ser especialmente grave debido al largo período de condiciones favorables para el desarrollo de la enfermedad cuando una fuente de inóculo local está disponible. Requiere de un período de rocío de seis a ocho horas y tres horas de exposición de luz (10, 000 lux) (Roelfs *et al.*, 1992).

El patógeno sobrevive mediante la producción de un gran número de uredinosporas, 5000 por día por uredinio, se presentan hasta 1000 uredinios por tallo. La dispersión de larga distancia se produce cuando las corrientes de aire caliente levantan las esporas a 3000 m, a esta altitud se pueden transportar a cientos de kilómetros, con una velocidad máxima de aproximadamente 1cm/s en aire en reposo, pocas esporas caen al suelo. Sin embargo, pueden ser lavadas de manera eficiente desde el aire por la lluvia de 25 mm o más (Watson y de Sousa, 1983).

2.1.3 Signos en plantas de avena

La roya del tallo se distingue fácilmente en campo por las lesiones (pústulas) color café rojizo a café oscuro que ocasiona en los tallos de las plantas, también se pueden encontrar en las láminas de las hojas, tanto en el haz como en el envés y en algunas ocasiones la infección es tan alta que afecta la panícula Figura 3. Los primeros síntomas de infección no son visibles al ojo humano, la enfermedad es conspicua

cuando las pústulas o uredinias rompen la epidermis y la masa de urediniosporas son liberadas (Huerta *et. al.*, 2014).

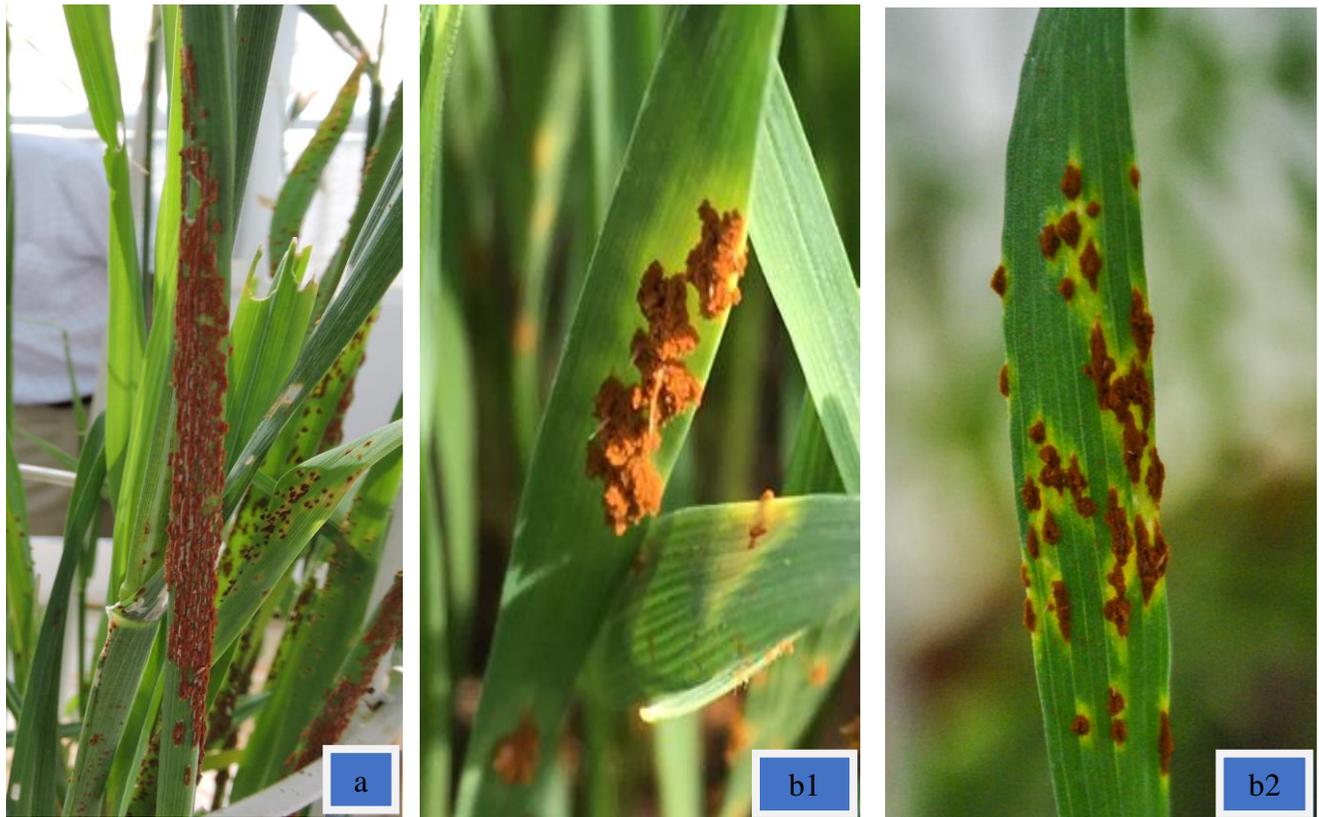


Figura 3. Signos de la roya del tallo a) Tallo con pústulas errupentes; b) Hojas afectadas de plántula (1) y planta adulta (2).

2.1.4 Hospedantes

Los hospedantes alternos para roya del tallo son *Berberis vulgaris* o *Mahonia*. *P. graminis* se cree que se originó como un parásito en *Mahonia* (Green, 1971a; Leppik, 1961), y continuó evolucionando en las comunidades de plantas herbáceas, donde también estuvo presente *Berberis* (Urbano y Markova, 1984). *P. graminis* subsp.

graminicola parece haber sido el primero en evolucionar en sus hospedantes, seguido por subsp. *graminis*.

Los españoles trajeron el agracejo a América del Norte. Muchas especies de *Berberis*, *Mahonia* y *Mahoberberis* son susceptibles a *P. graminis* (Roelfs, 1985b).

El huésped alternativo es una fuente importante de nuevas combinaciones de genes de virulencia y agresividad en el patógeno (Groth y Roelfs, 1982). El agracejo es una fuente importante de inóculo para el cultivo, puede producir alrededor de 64×10^9 aeciosporas en unas pocas semanas (Stakman, 1923). En Dinamarca (Hermansen, 1968) y América del Norte (Roelfs, 1982) fue una fuente importante de inóculo. El éxito en la reducción de las epidemias de la roya del tallo del norte de Europa y América del Norte fue debido a la eliminación del agracejo. *Berberis vulgaris* se vuelve resistente a la infección por alrededor de 14 días después de que las hojas se despliegan. Sin embargo, las infecciones se producen tanto en las bayas, como en las espinas y tallos, lo que sugiere que el endurecimiento de la cutícula puede no ser tan importante como se pensaba originalmente.

2.2 Pérdidas en el rendimiento del cultivo de avena ocasionadas por roya del tallo

La mayor pérdida debido a la roya del tallo es actualmente en los costos incididos para encontrar, incorporar y evaluar la resistencia de nuevos cultivares (Roelfs *et al.*, 1992).

El impacto económico de la roya se ha reducido principalmente a través de la obtención de variedades resistentes. Sin embargo, la resistencia en cultivares debe seguir

mejorando para mantenerse al día con la evolución de patógenos (McIntosh y Brown, 1997).

Dickson (1963), menciona que el patógeno está ampliamente difundido en todo el mundo, reduciendo el valor del forraje y el rendimiento de grano. Roelfs y Long (1980) determinan pérdidas en el rendimiento de 4, 5, 7, 10 y 25 % en Dakota del Sur y del Norte, Wisconsin, Iowa y Minnesota, respectivamente, con pérdidas en los Estados Unidos de 947 450 ton.

La roya del tallo (*Puccinia graminis* f. sp. *avenae* Eriks. y Henn.) de la avena afecta significativamente la producción y calidad del grano reduciendo el rendimiento y el peso de grano en un 75 y 60%, respectivamente (Epstein *et al.*, 1988).

En México se realizaron evaluaciones en campo bajo condiciones de temporal para determinar las pérdidas de rendimiento en avena causadas por la roya del tallo, este se redujo hasta 36% en las algunas variedades como Chihuahua y Juchitepec con pérdidas de 755.2 y 713.9 kg/ha (Leyva *et al.*, 2004).

Las royas en los Valles Altos de la Mesa Central son un factor limitante para el cultivo de la avena (Villaseñor *et. al.* 2001). Las pérdidas en la producción de materia seca en las variedades susceptibles fueron de 32 al 42% (Villaseñor *et. al.* 2005).

Martínez (2000) menciona que al aplicar un tratamiento con fungicida en el cultivo de avena el rendimiento de grano esperado es mayor al igual que el número de días a madurez, comparado con el testigo, debido a que el fungicida protege contra el daño foliar por la roya, esta investigación coincide con los resultados obtenidos por Gómez (1999) y Beltrán (1998); quienes mencionan que una planta mal nutrida y enferma

tiende a acortar su ciclo, en comparación con una sana y bien nutrida la cual se desarrolla normalmente.

En Manitoba, Canadá, *P. graminis* causó un efecto significativo en la expresión del rendimiento y algunos de sus componentes, estimándose pérdidas del 35% de la producción en variedades susceptibles (Martens, 1972).

Recientemente se presentó una epidemia en Manitoba y el este de Saskatchewan, Canadá, en el 2002, causando pérdidas de rendimiento estimado de 5 al 10% (Fetch 2003).

En China durante el 2008 y 2009, en Baicheng, provincia de Jilin se produjeron epidemias graves de roya del tallo de avena en las principales zonas productoras, y en 2012 y 2013, se presentaron epidemias similares en la provincia de Zhangjiakou, Hebei. La enfermedad causó pérdidas de rendimiento de aproximadamente el 15% (Li *et. al.* 2015).

2.3 Razas fisiológicas

Una raza fisiológica se define como un conjunto aleatorio de avirulencia/virulencia determinado en una serie de hospedantes diferenciales (Roelfs *et al.*, 1992). Las razas se encuentran situadas en un taxón más abajo que las formas especiales, el cual es designado por medio de diferencias fisiológicas (diferencias patogénicas en interacciones hospedante-patógeno), más allá de diferencias morfológicas (Roelfs, 1984).

El concepto de razas fisiológicas tomó mucha importancia en el mejoramiento genético para resistencia a royas en México, de tal manera, que en la actualidad se puede conocer la respuesta de los genotipos a la inoculación con las diferentes razas, por lo

que se puede estimar o predecir la longevidad de las nuevas variedades (Huerta-Espino y Singh, 2000), aunque lo que no se puede predecir, es la respuesta de estas variedades a la aparición de nuevas razas fisiológicas.

Para la designación de razas fisiológicas en avena a la roya del tallo, se utilizó la nomenclatura propuesta por Fetch y Jin (2007), quienes presentaron un nuevo sistema de nomenclatura que de manera sencilla y sistemática caracteriza a la virulencia en *P. graminis* f. sp. *avenae*, utiliza líneas diferenciales de un solo gen con los genes de resistencia a Pg1, PG2, PG3, PG4, Pg6, PG8, PG9, PG10, PG12, Pg13, PG15, y Pg16, agrupados en tres subgrupos de cuatro líneas. Cada raza se designa mediante un código de tres letras, basado en el tipo de infección de plántulas (resistente o susceptible) en 12 líneas diferenciales, se asigna un código para cada raza con el sistema de nomenclatura de América del Norte (NA), actualmente se utiliza para Canadá y Estados Unidos.

2.4 Virulencia de roya del tallo

2.4.1 Virulencia de roya del tallo en otros países

La roya del tallo en avena ha causado pérdidas significativas de rendimiento en Canadá, se ha controlado principalmente a través de la resistencia de las variedades y la siembra temprana. Los genes Pg2 y Pg13 son los más eficaces y se tienen en muchos cultivares de avena actuales. Sin embargo, en 1998, se detectaron 2 razas, NA67 y NA76, con virulencia en Pg2 y Pg13 en la región de las praderas, actualmente, en esta región la raza NA67 es predominante por lo que todos los cultivares canadienses son susceptibles a esta raza (McCallum *et. al.*, 2007).

La roya del tallo en avena ha causado pérdidas significativas de rendimiento en Canadá, se ha controlado principalmente a través de la resistencia de las variedades y la siembra temprana. Los genes Pg2 y Pg13 son los más eficaces y se tienen en muchos cultivares de avena actuales. Sin embargo, en 1998, se detectaron 2 razas, NA67 y NA76, con virulencia en Pg2 y Pg13 y avirulencia para Pg16, Pga y Pg15 en la región de las praderas, actualmente, en esta region la raza NA67 es predominante por lo que todos los cultivares canadienses son susceptibles a esta raza (McCallum *et. al.*, 2007).

Las razas más prevalentes identificadas cultivares de avena en Canadá son NA67 (49.6%), NA29 (30.6%), y NA76 (9.1%), todos los aislamientos resultaron virulentos a Pg9, Pg13 y Pg15. La raza NA67 aumentó la incidencia un 12% de 1998 a 2000 mientras que, NA76 8% de 1999 al 2000 (McCallum *et al.*, 2002).

En un análisis de 121 aislamientos provenientes de avena silvestre en Canadá se identificaron 6 razas de las cuales las más prevalentes fueron NA29 (55%), NA67 (18.6%) y NA27 (17.8%), todos los aislamientos fueron virulentos a Pg1, Pg2, Pg3, Pg4 y Pg8. (McCallum *et. al.*, 2002).

En el año 2000, se identificaron razas de *P. graminis* f. sp. *avenae* con la virulencia a Pg16 y Pga, los cuales son fuentes de resistencia contra NA67 y NA76. En Dakota del Norte se incorporó en la variedad 'Paul' IC 9221 el gen Pga para conferir resistencia (McMullen *et al.*, 1997).

En el 2003 en los Estados Unidos se identificaron siete razas de *P. graminis* f. sp. *avenae* de las cuales las razas más predominantes fueron NA27, NA29 y NA67, la raza NA76 se identificó por primera vez (Jin, 2005).

2.4.2 Virulencia de roya del tallo en México

La raza NA27 domina desde 1963 una sola área epidemiológica relativamente estable de la roya del tallo la cual comprende desde el norte de México, las Grandes Planicies de los Estados Unidos de América y las praderas del este de Canadá (Roelfs *et al.*, 1979).

El trabajo más reciente con *P. graminis* f. sp. *avenae* fue desarrollado por Mariscal *et al.* (2011) quienes estudiaron la variación patogénica de Pga a nivel de razas fisiológicas y propusieron siete genotipos de avena comercial como diferenciales.

Estudios realizados por Villaseñor *et al.* (2007) mencionan que en Valles Altos de México al parecer inciden más de 10 razas distintas. Verificar la existencia de estas razas y una correcta clasificación permitiría conocer la respuesta de los genotipos a estas razas y determinar la vulnerabilidad en campo de las nuevas variedades.

CAPÍTULO 3. VARIACIÓN FENOTÍPICA DE *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* EN LOS VALLES ALTOS DEL CENTRO DE MÉXICO

PHENOTYPIC VARIATION OF *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* IN THE HIGH VALLEYS OF CENTRAL MEXICO

Adriana Zamudio Colunga¹, Julio Huerta Espino², Eduardo Espitia Rangel², José Sergio Sandoval Islas¹ y

Héctor Eduardo Villaseñor Mir^{2*}

RESUMEN

En México la superficie sembrada de avena se ha incrementado considerablemente en los últimos 15 años, porque es una alternativa cuando los cultivos tradicionales se siniestran o ya no se pueden sembrar. La enfermedad más importante es *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* (Pga). En el 2014 se obtuvieron 170 muestras de Pga colectadas en los Valles Altos de México que se aislaron a través de monopustulares y se incrementaron. Los aislamientos fueron analizados usando las diferenciales monogénicas: Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg5, Pg6, Pg7, Pg9, Pg10, Pg11, Pg12 y Pg13; variedades comerciales y líneas avanzadas fueron incluidas para analizar estos aislamientos. A partir de las diferenciales se identificaron 62 razas, son evidencia de la gran diversidad del patógeno que le permite romper la resistencia de nuevas variedades en corto tiempo.

¹Fitosanidad- Fitopatología. Colegio de Postgraduados Km 36.5 Carretera México- Texcoco, C.P. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. De México. Tel: (595) 952 02 29 Fax: (595) 952 02 30.

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX), A. P. 10. C.P. 56230, Coatlinchan, Texcoco, Edo. de México. Tel: (595) 954 22 77 Ext. 127.

*Autor para correspondencia: e-mail: villasenor.hector@inifap.gob.mx

Las razas más comunes detectadas usando las diferenciales monogénicas (Pg) fueron TNQ (15%), TNB (9%), TLQ (7%), TNG (6%) y TPS (5%). En las razas identificadas la TNQ es la más distribuida en las zonas productoras de avena de los Valles Altos de México. Los porcentajes de virulencia para los genes Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg5, Pg6, Pg7 y Pg9 fueron mayor al 75%, mientras que para Pg11, Pg12 y Pg13 fue de 57%, 62% y 67% respectivamente. Los menores porcentajes de virulencia se observaron en Pg10 con solo un 22% entre los aislamientos evaluados. Las líneas calificadas como inmunes presentaron porcentajes bajos de virulencia con excepción de S-129 y pueden ser usadas como fuentes de resistencia en futuras variedades.

Palabras clave: Razas fisiológicas, diferenciales monogénicas, variedades, cultivo de avena, virulencia.

ABSTRACT

The planting oat area in Mexico has increased considerably in the past 15 years, due to it is an alternative when sown of traditional crops fail or it already cannot be planted because of delay of rain fall. The most important oat disease is *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* (Pga). In 2014 were 170 Pga samples collected in the high valleys of central Mexico that were isolated through single pustule culture and then increased. Isolates were analyzed using the monogenic differentials: Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg5, Pg6, Pg7, Pg9, Pg10, Pg11, Pg12 and Pg13; commercial varieties and advanced lines were also included in order to analyze those isolates. Evidence of the great diversity of the pathogen are the 62 races, those were identified using the differentials that allows pathogen to break the resistance of new varieties in short time. The most common

razas detected using the monogenic differentials (Pg) were TNQ (15%), TNB (9%), TLQ (7%), TNG (6%) and TPS (5%). In the identified races the TNQ is the most distributed in the oats producing areas in the high valleys of central Mexico. The percentages of virulence for the genes Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg5, Pg6, Pg7 and Pg9 were greater than 75% while for Pg11, Pg12, Pg13 was 57%, 62% and 67% respectively. The lower percentages of virulence were observed in Pg10 with only 22% among the isolates tested. Lines classified as immune showed low percentages of virulence with the exception of S-129 and it can be used as source of resistance in future varieties.

Keywords: Physiological Races, monogenic differentials, varieties, cultivation of oats, virulence.

INTRODUCCIÓN

La principal limitación en la producción del cultivo de avena es la roya del tallo causada por el hongo *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* (Zilinsky, 1984). En variedades susceptibles la pérdida en la producción de materia seca fluctúa entre 32 y 45 % (Leyva *et al.*, 2004). El uso de variedades resistentes es una medida adecuada para el control de la enfermedad, sin embargo, las variedades recomendadas para siembra en México se han vuelto susceptibles debido a la evolución de las razas fisiológicas del patógeno.

Se conoce como raza fisiológica a un conjunto aleatorio de virulencias y avirulencias de una especie patógena determinada en una serie de hospedantes diferenciales. En avena es difícil lograr consenso para generar y utilizar una sola nomenclatura para identificar y designar razas fisiológicas de royas. La falta de uniformidad se debe a que distintas variedades se usan como una misma diferencial, los ambientes y los sistemas

de identificación de razas son diferentes. La confusión aumenta cuando se designan nuevas razas que fisiológicamente pueden ser las mismas ya clasificadas (Stewart y Roberts, 1970; Chong *et al.*, 2000).

En Canadá desde 1919 se han llevado a cabo investigaciones para determinar la incidencia, severidad y virulencia de *P. graminis* f. sp. *tritici* y *P. graminis* f. sp. *avenae* (Johnson y Green, 1957). La especificación fisiológica de Pga fue descrito por primera vez por Stakman *et al.* en 1923, identificaron las primeras cuatro razas de roya del tallo en avena con las diferenciales Victory, White Tartar y Monarch analizando muestras provenientes de colectas de Estados Unidos y Canadá. Bailey en 1925, publicó una clave analítica para formas fisiológicas en las variedades White Tartar, Richland y Joannette Strain.

En 1937 Levine y Smith identificaron 10 razas con las diferenciales White Tartar, Richland y Sevnothree. En 1944 utilizando las mismas diferenciales, Newton y Johnson encontraron 13 razas más, después de esto se describieron 13 genes que confieren resistencia a Pga determinados mediante el uso de una letra (p.e. gen A), actualmente son clasificados mediante un sistema estandarizado de nomenclatura (p. e. Pg1). En 1955 en Estados Unidos se incluyen nuevas diferenciales que facilitaban la identificación de razas en el país: Rodney, C. I. 4023 (C. I.8111), C.I.5844 y Saia (Stewart y Roberts, 1970).

Stewart y Roberts (1970) publicaron el primer sistema internacional propuesto para identificar razas de Pga al usar un grupo de seis diferenciales, identificaron 97 razas. Harder (1994) identificó 74 razas en Canadá al utilizar 10 diferenciales. Posteriormente en Estados Unidos Fetch y Jin (2007) al usar 13 genotipos con los genes Pg1, Pg2,

Pg3, Pg4, Pg6, Pg8, Pg9, Pg10, Pg12, Pg13, Pg15, Pg16 y Pga, identificaron 67 razas, las cuales fueron caracterizadas mediante un sistema de nomenclatura de América del Norte NA que actualmente se utiliza para caracterizar virulencia de *P. graminis* f. *sp.avenae* en Canadá y Estados Unidos.

En el año de 1998 en Manitoba y Saskatchewan, Canadá, se encontró por primera vez la raza NA67 (TJJ), es virulenta a los genes Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg8, Pg9, Pg13, Pg14, Pg15 y Pg17 y avirulenta a Pg6, Pg10, Pg11, Pg12, Pg16, y Pg-a, durante el 2002 y 2003 causó grandes pérdidas en el rendimiento, afectó el 63% del cultivo sembrado de avena (Gold *et al.*, 2005; Fetch y Jin, 2008).

Las razas TJJ y TJG tienen virulencia para los genes Pg2 y Pg13, los cuales proporcionan resistencia a la mayoría de los cultivares comerciales canadienses, pero en el 2003 ya se encontraban en un 76% de frecuencia combinada, poniendo en peligro la resistencia de todas las variedades recomendadas de ser infectadas por roya del tallo (Fetch y Jin, 2008).

La raza NA-76 que es virulenta para los genes Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg8, Pg9 y Pg13 y avirulenta a Pg15, Pg16 y Pg-a, se reportó por primera vez en Canadá en el año de 1999 y en Estados Unidos en el 2003, esta raza es similar a NA-67 la única diferencia es que es avirulenta para Pg15 (Jin, 2005).

Durante el 2003 en Estados Unidos se identificaron las razas NA-5, NA-10, NA-27, NA-29, NA-30, NA-67 y NA-76, de las cuales NA-27, NA-29, y NA-67 afectan considerablemente la producción de avena, porque se encuentran ampliamente distribuidas y son predominantes en la población de roya del tallo de avena en América del Norte (Jin, 2005).

Reportes de Canadá indican que en Ontario se detectó la raza TDJ (NA26), mientras que en Manitoba y Saskatchewan las razas TGB (NA27), TGD (NA29) y TJG (NA76), estas aumentaron su frecuencia en las avenas cultivadas en un 25%, 18% y 13% respectivamente. La raza TGL (NA28), se encontró como virulenta a los genes Pg12 y Pg-a y se identificó de una muestra de avena silvestre en Saskatchewan (Fetch, 2005).

Fetch (2005) encontró que el gen Pg6 derivado de *A. barbata* es altamente efectivo a la raza NA67, sin embargo, el gen está vinculado con bajos rendimientos y sensible a la temperatura; Pg10 es intermedio en la expresión de la resistencia; Pg11 se expresa únicamente en planta adulta y se asocia con paja quebradiza, bajo rendimiento y clorosis progresiva con la madurez de la planta; Pg-a es altamente resistente a NA67, pero inefectivo a la raza NA28 que esporádicamente se ha detectado en llanuras de Canadá.

Las áreas cultivadas con avena del norte de México, las Grandes Planicies de los Estados Unidos de América y las praderas del este de Canadá, constituyen una sola área epidemiológica, dominada desde 1963 por la raza NA 27 (Roelfs *et al.*, 1979).

En México se ha trabajado poco con la identificación de razas fisiológicas de *P. graminis* f. sp. *avenae* verificar la existencia de estas razas y su correcta clasificación permitiría determinar la vulnerabilidad en campo de las nuevas variedades, por lo que, el objetivo de esta investigación fue identificar para la región de los Valles Altos del Centro de México las razas fisiológicas del hongo *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Aislamiento de *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*. En 2014 se colectaron 170 muestras de tallos, hojas y panículas, de las cuales del Estado de México fueron 65, de Tlaxcala 46, Puebla 33, Hidalgo 22 y Morelos 4. De cada muestra se obtuvieron las uredosporas del hongo, las cuales se almacenaron en cápsulas de gelatina que dieron origen a 138 aislamientos monopostulares.

Obtención de monopustulares. En vasos de unisel con un sustrato de tierra (60%) y Peat Moss (40%) se colocaron 12 semillas de la variedad susceptible Ópalo, se mantuvieron en invernadero a 20 °C noche y 23 °C día. Cuatro días después de la siembra (dds) se les agregó el herbicida MH-30 (ácido maléico) (3,6-dihydrozypyridazine, 99%), en una dosis de 0.2 gL⁻¹. El ácido maléico (MH) inhibe el punto de crecimiento meristemático, la hoja primaria se extiende al máximo y las plantas no crecen, lo que permite obtener mayor cantidad de inóculo (Samborski *et al.*, 1960).

El inóculo se incrementó en plántulas de 12 días de edad, sobre las cuales se asperjaron urediniosporas diluidas en aceite mineral Soltrol®. Una vez que el aceite se evaporó, los vasos se colocaron en cámara húmeda por 13 h de rocío y tres h de luz, posteriormente, se trasladaron al invernadero y se colocaron de manera separada en jaulas de plástico a 20 °C por la noche y 24 °C durante el día. Ocho días después de la inoculación (ddi) se observaron las primeras pústulas y para evitar contaminación se dejaron solamente cuatro hojas por vaso, los cuales se colectaron individualmente. Cada pústula formó un aislamiento monopustular, los cuales se colectaron con boquillas colectoras y se almacenaron en cápsulas de gelatina. Las uredosporas de

cada pústula se incrementaron en plántulas de la variedad susceptible Ópalo para obtener mayor cantidad de inóculo que sirvió para inocularse a las diferenciales de avena y así determinar la raza.

Inoculación de los aislamientos en diferenciales y otros genotipos de avena.

Para identificar las razas fisiológicas del hongo se utilizó un grupo de diferenciales monogénicas: Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg5, Pg6, Pg7, Pg9, Pg10, Pg11, Pg12 y Pg13, un grupo de 13 variedades comerciales y un grupo de 6 líneas avanzadas del programa de mejoramiento genético del INIFAP-CEVAMEX, fueron evaluadas para caracterizar los aislamientos. Todos los genotipos fueron sembrados en charolas de plástico con sustrato (60% tierra y 40% Peat Moss). En cada charola se realizaron 48 perforaciones con una plancha de acero, quedando seis perforaciones por hilera y se colocaron seis semillas en cada perforación, sólo en las hileras 1, 3, 5, 7 y 8 de izquierda a derecha, en la hilera 2 se colocó la semilla del último genotipo, de tal forma que se evaluaron 31 genotipos por charola. Las charolas se identificaron y se colocaron en un invernadero, 14 dds se inocularon con los aislamientos monopostulares y se colocaron en una cámara húmeda con 13 h de rocío y tres h de luz, después se mantuvieron en un invernadero a 23°C día y 20°C noche.

Lectura del tipo de infección en las diferenciales. Los tipos de infección (TI) se registraron a los 14 ddi, tiempo en que la esporulación de los genotipos susceptibles fue abundante. Para determinar el TI se usó la escala propuesta por Roelfs *et al.* (1992) donde los genotipos con valores 3 y 4 fueron clasificados como susceptibles y 0-, ;-, 1, 2, X como resistentes (Cuadro 1).

Cuadro 1. Respuestas del hospedante, tipo de infección y descripción de los síntomas para evaluar *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* (Roelfs et al., 1992).

| Clase | TI | Síntomas o signos de la enfermedad |
|---------------------------|----|--|
| Inmune | 0- | Ningún uredinio presente |
| Casi inmune | ;- | No hay uredinios, pecas cloróticas/necróticas que indican hipersensibilidad |
| Muy resistente | 1 | Uredinios pequeños rodeados por necrosis |
| Moderadamente Resistente | 2 | Uredinios pequeños o medianos rodeados por clorosis o necrosis; puede haber una isla verde rodeada por clorosis o necrosis |
| Heterogénesis | X | Uredinios de tamaño variable distribuidos al azar en una sola hoja |
| Moderadamente Susceptible | 3 | Uredinios medianos con cierta clorosis |
| Susceptible | 4 | Uredinios grandes sin clorosis |

Nomenclatura usada en la denominación de *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*.

Las 12 diferenciales fueron colocadas en 3 subconjuntos de cuatro líneas, organizados en un sistema hexadecimal que tiene 16 posibles combinaciones de reacción, resistente (R) o susceptible (S) para cada letra (Cuadro 2) (Fetch y Jin 2007).

En los subconjuntos del 1-3 se encuentran las diferenciales monogénicas (Pg) usadas a nivel mundial para la identificación de razas fisiológicas. En cada aislamiento se identificó la raza fisiológica, se designó un código de tres letras en función a su TI, si era susceptible en las cuatro diferenciales del subconjunto se colocaba la letra T y si era resistente la letra B; de modo que si un aislamiento produce tipos de infección susceptible en las 12 diferenciales el código de letras para nombrar la raza es “TTT”.

Cuadro 2. Código de letras para las razas de *P. graminis* f. sp. *avenae* usando 12 diferenciales líneas *Pg*-genes en tres subconjuntos ordenados de cuatro líneas cada uno (Fetch y Jin 2007).

| Código de raza | Subconjunto | Clasificación de los tipos de infección (TI) ^a | | | |
|----------------|-------------|---|-------------|-------------|-------------|
| | 1 | <i>Pg1</i> | <i>Pg2</i> | <i>Pg3</i> | <i>Pg4</i> |
| | 2 | <i>Pg6</i> | <i>Pg8</i> | <i>Pg9</i> | <i>Pg10</i> |
| | 3 | <i>Pg12</i> | <i>Pg13</i> | <i>Pg15</i> | <i>Pg16</i> |
| B | | R | R | R | R |
| C | | R | R | R | S |
| D | | R | R | S | R |
| F | | R | R | S | S |
| G | | R | S | R | R |
| H | | R | S | R | S |
| J | | R | S | S | R |
| K | | R | S | S | S |
| L | | S | R | R | R |
| M | | S | R | R | S |
| N | | S | R | S | R |
| P | | S | R | S | S |
| Q | | S | S | R | R |
| R | | S | S | R | S |
| S | | S | S | S | R |
| T | | S | S | S | S |

^a Clasificación de los tipos de infección: R= Resistente (TI de 0-, ;-, 1, 2 y X), S= Susceptible (TI de 3 y 4).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se identificaron 62 razas usando las 12 diferenciales monogénicas (Pg). Siendo las más comunes TPS con 5%, TNG (6%), TLQ (7%), TNB (9%) y TNQ (15%), las cuales son virulentas a los genes Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg6, Pg9, Pg12, Pg13 y avirulentas a Pg8, Pg10, Pg 15, Pg16) (Cuadro 3).

Las razas más virulentas fueron TTS, TPS, TPQ, TPD y TNQ, de las cuales la raza más agresiva y mejor adaptada fue TNQ al identificarse en muestras provenientes de 21 localidades correspondientes al estado de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala excepto Morelos. Es virulenta a los genes Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg6, Pg9, Pg12, Pg13 y avirulenta a Pg5, Pg7, Pg10 y Pg11.

El estado con mayor porcentaje de razas identificadas fue México con un total de 41 razas, seguido del estado de Tlaxcala con 19, Hidalgo 16, Puebla 14 y Morelos 4 (Figura 4).

Las razas con mayor frecuencia identificadas en muestras del Estado de México son TPS, TNQ, TNG, TNB, TLQ, TLG, TFQ y KNQ, mientras que en Hidalgo se identificaron TPQ, TNQ y TNB, en Morelos TPQ, TNG, TNB y TBB, en Puebla TNQ, TNB y SNG, por último en Tlaxcala se identificaron TPS, TNQ, TLQ y KLQ.

Las razas que se presentaron en los cinco estados fueron TNG y TNB; seguidas de TPS y TLQ al encontrarse en el Edo. de México, Hidalgo, Puebla y Tlaxcala; TPQ se identificó en Hidalgo, Morelos y Tlaxcala; TNL en Hidalgo, Puebla y Tlaxcala; TLG en Edo. de México, Hidalgo y Tlaxcala y TBB en Edo. de México, Morelos y Tlaxcala.

La raza JDB identificada en Huamantla en el estado de Tlaxcala corresponde a la raza NA41 (Norte América), es la única compatible a las razas identificadas en Estados Unidos y Canadá (Fetch y Jin 2007).

Las razas más comunes en Norte América son TJG, TJJ y TJS representan una amenaza directa para la producción de avena. Todos los cultivares de Canadá y algunos de Estados Unidos son susceptibles a las razas TJJ y TJS, con virulencia a Pg 2 y Pg 13, y avirulencia a Pg10, 11, 16 y Pg-a (Fetch *et.al.* 2015), estos genes son utilizados en los programas de mejoramiento genético para obtener plantas resistentes contra el hongo, esta raza aún no está presente en México a pesar de la cercanía de los países.

Cuadro 3. Frecuencia y la distribución de las razas fisiológicas de *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* en Valles Altos de México en 2014.

| Raza† | Genes <i>Pg</i> vir | %† | Edo. Méx. | Hidalgo | Morelos | Puebla | Tlaxcala |
|-------|-------------------------------------|----|-----------|---------|---------|--------|----------|
| T T S | 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 15 | 1 | 1 | | | | |
| T P S | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 12, 13, 15 | 5 | 3 | 1 | | 1 | 2 |
| T P Q | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 12, 13 | 3 | | 2 | 1 | | 1 |
| T P D | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 10, 15 | 1 | | 1 | | | |
| T N Q | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12, 13 | 15 | 10 | 2 | | 5 | 4 |
| T N L | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 12 | 2 | | 1 | | 1 | 1 |
| T N G | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 13 | 6 | 4 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| T N B | 1, 2, 3, 4, 6, 9 | 9 | 4 | 2 | 1 | 4 | 1 |

| | | | | | | |
|-----|---------------------------|---|---|---|---|---|
| TMJ | 1, 2, 3, 4, 6, 10, 13, 15 | 1 | 1 | 1 | | |
| TLQ | 1, 2, 3, 4, 6, 12, 13 | 7 | 5 | 1 | 1 | 3 |
| TLL | 1, 2, 3, 4, 6, 12 | 1 | | | 1 | |
| TLG | 1, 2, 3, 4, 6, 13 | 3 | 2 | 1 | | 1 |
| TFQ | 1, 2, 3, 4, 9, 10, 12, 13 | 1 | 2 | | | |
| TDQ | 1, 2, 3, 4, 6, 9, 13 | 1 | 1 | 1 | | |
| TDL | 1, 2, 3, 4, 9, 12 | 1 | | | | 1 |
| TCN | 1, 2, 3, 4, 10, 12, 15 | 1 | | | 1 | |
| TBQ | 1, 2, 3, 4, 12, 13 | 1 | 1 | | | |
| TBB | 1, 2, 3, 4 | 2 | 1 | | 1 | 1 |
| SNG | 1, 2, 3, 6, 9, 13 | 1 | | | 2 | |
| SFB | 1, 2, 3, 9, 10 | 1 | | | | 1 |
| SDQ | 1, 2, 3, 9, 12, 13 | 1 | | | 1 | |
| SDG | 1, 2, 3, 9, 13 | 1 | | | | 1 |
| SDB | 1, 2, 3, 9 | 1 | 1 | | | |
| RNG | 1, 2, 4, 6, 9, 13 | 1 | 1 | | | |
| RNB | 1, 2, 4, 6, 9 | 1 | 1 | | | |
| RLQ | 1, 2, 4, 6, 12, 13 | 1 | 1 | | | |
| QDQ | 1, 2, 9, 12, 13 | 1 | 1 | | 1 | |
| QDB | 1, 2, 9 | 1 | 1 | | | |
| PNB | 1, 3, 4, 6, 9 | 1 | 1 | | | |
| PKQ | 1, 3, 4, 8, 9, 10, 12, 13 | 1 | 1 | | | |
| PCJ | 1, 3, 4, 10, 13, 15 | 1 | | | | 1 |
| MLL | 1, 4, 6, 12 | 1 | | 1 | 1 | |
| MDB | 1, 4, 9 | 1 | 1 | | | |
| LFL | 1, 9, 10, 12 | 1 | 1 | | | |
| KPD | 2, 3, 4, 6, 9, 10, 15 | 1 | | | | 1 |
| KNQ | 2, 3, 4, 6, 9, 12, 13 | 4 | 4 | 1 | | |
| KNL | 2, 3, 4, 6, 9, 12 | 1 | | | | 1 |
| KNB | 2, 3, 4, 6, 9 | 1 | | | | 1 |
| KMN | 2, 3, 4, 6, 10, 12, 15 | 1 | 1 | | | |

| | | | | | | | |
|--------------|-------------------------|-----|----|----|---|----|----|
| K M L | 2, 3, 4, 6, 10, 12 | 1 | | | | | 1 |
| K L Q | 2, 3, 4, 6, 12, 13 | 2 | 1 | | | | 2 |
| K L B | 2, 3, 4, 6 | 1 | | 1 | | | |
| JDB- NA41 | 2, 3, 9 | 1 | | | | | 1 |
| J N B | 2, 3, 6, 9 | 1 | 1 | | | | |
| H N Q | 2, 4, 6, 9, 12, 13 | 1 | 1 | | | | |
| H N G | 2, 4, 6, 9, 13 | 1 | 1 | | | | |
| H L B | 2, 4, 6 | 1 | 1 | | | | |
| F P S | 3, 6, 9, 10, 12, 13, 15 | 1 | | 1 | | | |
| F P Q | 3, 4, 6, 9, 10, 12, 13 | 1 | 1 | | | | |
| F N Q | 3, 4, 6, 9, 12, 13 | 1 | | 1 | | | |
| F D L | 3, 4, 9, 12 | 1 | 1 | | | | |
| D F B | 3, 9, 10 | 1 | 1 | | | | |
| C N Q | 4, 6, 9, 12, 13 | 1 | 1 | | | 1 | |
| C N B | 4, 6, 9 | 1 | | | | 1 | |
| C L Q | 4, 6, 12, 13 | 1 | 1 | | | | |
| B N B | 6, 9 | 1 | 1 | | | | |
| B L B | | 6 | 1 | 1 | | | |
| B F Q | 9, 10, 12, 13 | 1 | 1 | | | | |
| B F D | 9, 10, 15 | 1 | 1 | | | | |
| B F B | 9, 10 | 1 | 1 | | | | |
| B D Q | 9, 12, 13 | 1 | 1 | | | | |
| B B Q | 12, 13 | 1 | 1 | | | | |
| | Total [§] | 100 | 67 | 19 | 4 | 22 | 26 |

† Basado en 16 diferenciales dispuestos en tres subgrupos (subconjunto 1 = Pg 1, 2, 3, 4; subgrupo 2 = Pg 6, 8, 9, 10; subconjunto 3 = Pg 12, 13, 15, 16)

¶ Frecuencia de las razas identificadas.

§ Número total de aislamientos establecidos de cada región.

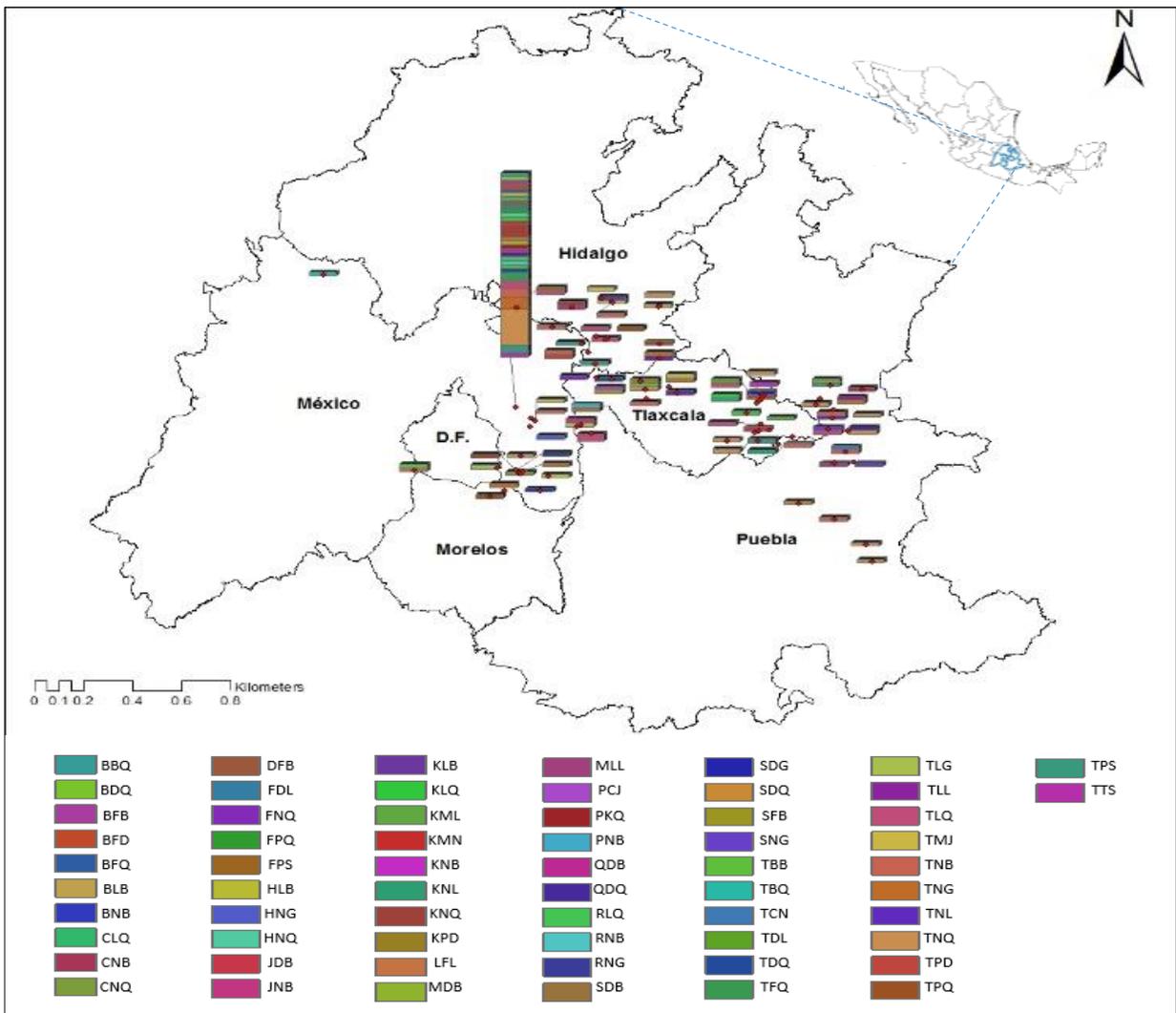


Figura 4. Distribución de razas fisiológicas de *P. graminis* f. sp. *avenae* detectadas en Valles Altos del Centro de México durante el 2014.

Con el uso de las variedades y de las líneas inmunes en la caracterización de razas fisiológicas de Pga observamos que la variabilidad del patógeno es más amplia, debido a que las razas se subdividen, al usar las variedades como diferenciales se encontró que se identifican un total de 92 razas, mientras que al colocar las diferenciales monogénicas (Pg) y las líneas inmunes se identificaron un total de 100 razas.

Las razas virulentas para las variedades y líneas inmunes que presentaron bajos porcentajes de virulencia se observan en el Cuadro 4.

Las razas KNQPT y TPSTT son virulentas a las líneas inmunes VIS S-115, VIS S-118, VIS S-125 y EUA S-15. Para las variedades Jade y Turquesa se identificó un total de 8 razas, de las cuales CTF, CBP y BTF son diferentes a las demás variedades.

Cuadro 4. Razas fisiológicas de *P. graminis* f. sp. *avenae* identificadas a partir de las diferenciales monogénicas (Pg), las variedades comerciales y líneas avanzadas.

| Diferenciales | Aislamientos | Aislamientos | % | Razas |
|---------------|--------------|--------------|------------|--|
| | Vir | Avir | Virulencia | |
| VIS S-115 | 6 | 132 | 4 | KNQPT, TPSTT |
| VIS S-125 | 12 | 126 | 9 | KNQPT, TPSTT |
| Jade | 12 | 126 | 9 | TTT, TTF, RQF, RPF, QPF, CTF, CBP, BTF |
| VIS S-118 | 17 | 121 | 12 | KNQPT, TPSTT |
| EUA S-15 | 14 | 124 | 10 | KNQPT, TPSTT |
| Diamante | 15 | 123 | 11 | TTT, TTF, RQF, RPF, QPF |
| Bachíniva | 18 | 120 | 13 | TTT, TTF, RQF, RPF, QPF |
| Turquesa | 21 | 117 | 15 | TTT, TTF, RQF, RPF, QPF, CTF, CBP, BTF |
| VIS S-106 | 26 | 112 | 19 | TFQTH, TNQTH, TPSTT |

Los porcentajes de virulencia de *P. graminis* f. sp. *avenae* en las 12 diferenciales, las variedades comerciales y líneas avanzadas de avena se muestran en el Cuadro 4.

Las variedades Bachíniva, Diamante, Karma, Turquesa y Jade presentaron un alto grado de resistencia ante la mayoría de los aislamientos, mientras que Ópalo, Cuauhtémoc y Páramo fueron susceptibles.

Casi todos los aislamientos fueron virulentos en Ópalo (99%), mientras que en Páramo con 87%, todas menos cinco razas (BLB, BNB, BBQ y BDQ) fueron virulentas a Pg2, Pg4, y Pg10. La mayoría de los genes (Pg) fueron ineficaces para los aislamientos evaluados, debido a que ninguno presentó inmunidad a todos los aislamientos, lo que indica que la población del patógeno (Pga) en México tiene un amplio espectro de virulencia.

De las líneas diferenciales Pg10 fue el más efectivo en contra de las razas de Pga identificadas en el estudio, pero fue susceptible a 31 aislamientos. Se detectó virulencia para Pg10 en los cinco estados muestreados principalmente en las razas TTS, TPS, TPQ y TPD este resultado es importante debido a que en el estudio de Harder (1999) realizado en Norte América demostró que este gen es una fuente útil de resistencia.

En este trabajo las diferenciales Pg11 y Pg13 obtuvieron porcentajes altos de virulencia con el 57 y 67% respectivamente, susceptibles a 78 y 93 aislamientos virulentos, estos genes son considerados como fuentes de resistencia en el desarrollo de variedades en Canadá contra las razas de *P. graminis* f. sp. *avenae* según los resultados obtenidos por Fetch *et al.* (2011).

En México Pg6 presentó virulencia en un 80%, al ser susceptible a 111 aislamientos. En resultados obtenidos en Australia en el 2000 se encontró que había razas virulentas

a Pg6 (Adhijari *et al.*, 2000). En Canadá ningún aislamiento fue virulento para Pg 6, Pg10 y Pg16 (Fetch *et al.* 2015). En China Li *et al.* 2015 encontraron que Pg 6 y Pg 15 fueron resistentes a todos los aislamientos probados, lo que indica que la evolución de roya del tallo en Valles Altos es de gran magnitud.

En los resultados obtenidos en esta investigación se observa que Pg12 presentó un 62% de virulencia y fue susceptible a 86 aislamientos. En 1997 se detectó por primera y única vez la raza TGL (NA28) virulenta al gen Pg12, la cual apareció nuevamente hasta el 2003, en investigaciones realizadas por Fetch (2005) encontró que el gen Pg12 se expresa como resistente sólo en el estado de plántula para razas fisiológicas presentes en Canadá.

Cuadro 5. Porcentaje de virulencia de las diferenciales de avena, las variedades comerciales y líneas avanzadas obtenidos a partir de los aislamientos de *P. graminis* f. sp. *avenae*.

| Diferenciales | % | Variedades | % | Líneas | % Virulencia |
|---------------|------------|------------|------------|-----------|--------------|
| Avena | Virulencia | Avena | Virulencia | inmunes | |
| Pg-1 | 76 | Gema | 57 | EUA S-15 | 10 |
| Pg-2 | 85 | Bachíniva | 13 | VIS S-106 | 19 |
| Pg-3 | 84 | Diamante | 11 | VIS S-115 | 4 |
| Pg-4 | 81 | Chihuahua | 17 | VIS S-118 | 12 |
| Pg-5 | 88 | Cuauhtémoc | 61 | VIS S-125 | 9 |
| Pg-6 | 80 | Menonita | 42 | VIS S-129 | 46 |
| Pg-7 | 75 | Karma | 29 | | |
| Pg-9 | 75 | Obsidiana | 36 | | |
| Pg-10 | 22 | Avemex | 52 | | |
| Pg-11 | 57 | Turquesa | 15 | | |

| | | | |
|-------|----|--------|----|
| Pg-12 | 62 | Jade | 9 |
| Pg-13 | 67 | Páramo | 87 |
| | | Ópalo | 99 |

La variedad Turquesa que se empleó como diferencial para esta investigación, es la más sembrada en México y obtuvo un porcentaje bajo de virulencia (15%), fue susceptible a 21 aislamientos del hongo. Estos resultados concuerdan con Villaseñor *et al.* (2009) quienes mencionan que esta variedad presentó una respuesta de resistente a moderadamente resistente en la incidencia de *P. graminis*.

Las líneas diferenciales identificadas como inmunes presentaron porcentajes bajos de virulencia, excepto S-129 que obtuvo un 46%, siendo susceptible a 63 aislamientos.

CONCLUSIONES

Se identificaron 62 razas a partir de las diferenciales monogénicas de Pga. Las razas más comunes fueron KNQ, TPS, TNG, TLQ, TNB Y TNQ. De las razas identificadas la TNQ es la más distribuida en las zonas productoras de avena de los Valles Altos de México.

Las variedades Jade, Diamante, Bachíniva y Turquesa mostraron un alto grado de resistencia.

Las líneas diferenciales identificadas como inmunes del programa de mejoramiento genético en avena presentaron porcentajes bajos de virulencia, por lo que pueden ser usadas para incorporarlas en el programa de mejoramiento genético.

LITERATURA CITADA

- Adhikari, K. N., R. A. McIntosh, and J. D. Oates. 2000. Distribution and temperature sensitivities of genes for stem rust resistance in Australian oat cultivars and selected germplasm. *Australian Journal of Agricultural Research*, 51, 75–83.
- Bailey, D. L. 1925. Physiologic specialization in *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* Erikss. and Henn. Minn. United States Department of Agriculture Technical Bulletin. 35. Cabi, 2016.
- Chong J., J., J. Leonard K., and J. Salmerón J. 2000. North American system of nomenclature for *Puccinia coronata* f. sp. *avenae*. *Plant Disease* 84:580-585.
- Epstein, A. H., M. D. Simons, K. J. Frey, and P. G. Rothman. 1988. Field resistance of oats to *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* measured via yield and seed weight reduction. *Plant Disease* 72:154-156.
- Fetch Jr., T. G. 2005. Races of *Puccinia graminis* on wheat, barley, and oat in Canada in 2002 and 2003. *Canadian Journal of Plant Pathology* 27:572-580.
- Fetch Jr., T. G. and Y. Jin. 2007. Letter code system of nomenclature for *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*. *Plant Disease* 91:763-766.
- Fetch Jr., T. G. and Y. Jin. 2008. Races of *Puccinia graminis* on wheat, barley, and oat in Canada in 2004. *Canadian Journal of Plant Pathology* 30: 260-266.
- Fetch Jr., T. G., J. M. Fetch, and A. Xue. 2011. Races of *Puccinia graminis* on barley, oat and wheat in Canada in 2006. *Canadian Journal of Plant Pathology* 33:1, 54-60.

- Fetch Jr., T. G., J. M. Fetch, and A. Xue. 2015. Races of *Puccinia graminis* on barley, oat, and wheat in Canada in 2007 and 2008, Canadian Journal of Plant Pathology. 37:3, 331-341.
- Gold Steinberg, J., Mitchell Fetch, J., and Fetch Jr., T. G. 2005. Evaluation of *Avena* spp. Accessions for resistance to oat stem rust. Plant Dis. 89:521-525.
- Harder, D. E. 1994. Identification of new races of *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*. Plant Disease 78:367-368.
- Harder, D. E. 1999. Usefulness of gene Pg10 as a source of stem rust resistance in oat breeding. Phytopathology 89:1214-1217.
- Jin, Y. 2005. Races of *Puccinia graminis* identified in the United States during 2003. Plant Disease. 89:1125-1127.
- Johnson, T., and G.J. Green. 1957. Physiologic specialization of wheat stem rust in Canada, 1919 to 1955. Canadian Journal Plant Science. 37: 275–287.
- Li, T., Y. Cao, X. Wu, S. Chen, H. Wang, K. Li y L. Shen. 2015. First report on race and virulence characterization of *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* and resistance of oat cultivars in China. European Journal of Plant Pathology. 142:85-91.
- Leyva M., S. G., E. Espitia R., H. E. Villaseñor M. y E. J. Huerta. 2004. Pérdidas ocasionadas por *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* Eriks. y Henn. Causante de la roya del tallo en seis cultivares de avena (*Avena sativa* L.) en los Valles Altos de México. Revista Mexicana de Fitopatología 22: 166-171.
- Levine, M. N., and D. C. Smith. 1937. Comparative reaction of oat varieties in the seedling and

- maturing stages to physiologic races of *Puccinia graminis avenae* and the distribution of these races in the united states. *Journal Agricultural Research*. 55: 713-729.
- Mariscal A., L. A., J. Huerta E., H. E. Villaseñor M., S. G. Leyva M., J. S. Sandoval I. y I. Benitez R. 2011. Selección de genotipos de avena para la identificación de razas de roya del tallo. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 2: 593-600.
- Newton, M., and Johnson, T. 1944. Physiologic specialization of oat stem rust in Canada. *Canadian Journal Research*. 22: 201-216.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2016. URL: <http://www.fao.org/docrep/W1808S/w1808s0c.htm#TopOfPage>. Consultado febrero de 2016.
- Roelfs, A. P., D. H. Casper, and D. L. Long. 1979. Races of *Puccinia graminis* in the United States during 1978. *Plant Disease* 63:748-751.
- Roelfs, A. P., and J. W. Martens. 1988. An international system of nomenclature for *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*. *Phytopathology* 78:526-533.
- Roelfs, A. P., P. R. Singh, and E. E. Saari. 1992. Las royas del trigo. CIMMYT. D. F., Méx. 81 p.
- Samborski, D.J., C.O. Person and F.R. Forsyth. 1960. Differential effects of Maleic Hydrazide on the growth of leaf and stem rusts of wheat. *Canadian Journal Botany* 38:1-7.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2016. Anuario estadístico de la producción agrícola 2014. URL: <http://www.siap.gob.mx>.

- Stakman, E. C., M. N. Levine, and D. L. Bailey. 1923. Biologic forms of *Puccinia graminis* on varieties of *Avena* spp. *Journal Agricultural Research* 24:1013-1018.
- Stewart, D. M., and J. B. Roberts. 1970. Identifying races of *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*. A modified International System. Technical Bulletin No. 1416. Agricultural Research Service, United States Department of Agriculture. USA. 23 p.
- Torres P., I., M. González C., H. E. Villaseñor M., J. Huerta E., E. Villordo P., E. Espitia R., R. Guevara G. y L. Guevara O. 2007. Marcadores genéticos de resistencia a roya de tallo (*Puccinia graminis* Persoon f. sp. *avenae*) en avena (*Avena sativa* L.). *Agricultura Técnica en México* 33(3):221-230.
- Villaseñor, M. H. E., E. Espitia, R. y C. Márquez, G. 1998. Karma nueva variedad de avena para la producción de grano y forraje en México. INIFAP CIRCE-CEVAMEX. 16 p. (Folleto Técnico Núm. 11).
- Villaseñor, M. H. E., R. Espitia, E. and G. C. Márquez. 2001. Registration of "Cevamex" oat. *Crop Sci.* 41 (1): 266-267.
- Villaseñor M., H. E., J. Huerta E., R. González R., S. G. Leyva M., J. Salmerón, L. Osorio A., C. Jiménez P., J. López, E. Solís, B. Cabañas y E. Espitia R. 2007. Estrategia en la selección de líneas avanzadas de avena por resistencia durable a roya del tallo (*Puccinia graminis* f. sp. *avenae*). In: Memoria, XXXIV Congreso Nacional de Fitopatología, IX Congreso Internacional de Fitopatología, Cancún, Quintana Roo, México. 72 p.
- Villaseñor, M. H. E., A. Limón, O., J. Huerta, E., M. F. Rodríguez, G., E. Espitia, R. y S. G. Leyva, M. 2008. El cultivo de avena en el Estado de México. Instituto

- Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Centro. Campo Experimental Valle del México. Chapingo, Estado de México, México. Folleto técnico Núm. 29. 21 p.
- Villaseñor M., H. E., E. Espitia R., J. Huerta E., L. Osorio A y J. López H. 2009. Turquesa, nueva variedad de avena para la producción de grano y forraje en México. *Agricultura Técnica en México*35(4):480-485.
- Zillinsky, F. J. 1984. Guía para la Identificación de Enfermedades en Cereales de Grano Pequeño. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. El Batán, Texcoco, Edo. de México. 141 p.

CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES GENERALES

La identificación de gran variabilidad de razas fisiológicas de *Puccinia graminis* f. sp *avenae*, los patrones de virulencia y los cultivares resistentes identificados en este estudio, son un indicador que en México la roya del tallo es un problema importante que tiende a presentar diversidad de razas que rompen la resistencia de las nuevas variedades en corto tiempo y que se dispone de líneas experimentales progenitores que permitirán acumular genes favorables para el control genético de la enfermedad.

México cuenta con un gran número de razas fisiológicas, se identificaron 62 razas, siendo las más comunes TPS con 5%, TNG (6%), TLQ (7%), TNB (9%) y TNQ (15%), virulentas a los genes Pg1, Pg2, Pg3, Pg4, Pg6, Pg9, Pg12, Pg13 y avirulentas a Pg8, Pg10, Pg 15, Pg16).

De todas las razas una de ellas fue compatible a las razas identificadas en Estados Unidos y Canadá corresponde a la raza NA41 (Norte América) JDB.

CAPITULO 5. LITERATURA CITADA GENERAL

- Arthur, J. C. 1928. Progress of rust studies. *Phytopathology*, 18:659-674.
- Beltrán, L. E. 1998. Control Integrado de las Enfermedades Foliares del Trigo (*Triticum aestivum* L.) de Temporal en Juchitepec, Estado de México. Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. De México. 94 p.
- Buller, A. H. R. (1958). The violent discharge of aecidiospores. In "Researches on Fungi," Vol. III, pp. 552–559. Hafner, New York.
- Chester, K. S., 1946. The nature and prevention of the cereal rusts as exemplified in the leaf rust of wheat. Chronica Botánica Company, Waltham, Mass., xvi + 269 pp.
- DeBary, A. 1866. Neue Untersuchungen über die Uredineen insbesondere die Entwicklung der *Puccinia graminis* und den Zusammenhang derselben mit *Aecidium berberis*. In Monatsber Preuss. Akad. Wiss., Berlin, p. 1520.
- Epstein, A.H., Simons, M.D., Frey, K.J., and Rothman, P.G. 1988. Field resistance of oats to *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* measured via yield and seed weight reduction. *Plant Disease* 72:154-156.
- Fetch Jr., T. G. 2005. Races of *Puccinia graminis* on wheat, barley, and oat in Canada in 2002 and 2003. *Canadian Journal of Plant Pathology* 27:572-580.
- Fetch Jr., T. G. and Y. Jin. 2007. Letter code system of nomenclature for *Puccinia graminis* f. sp. *avenae*. *Plant Disease* 91:763-766.
- Fontana, F. 1932. *Observations on the rust of grain*. P.P. Pirone, transl. Classics No. 2. Washington, DC, Amer. Phytopathol. Society. (Originally published in 1767).

- Gómez, A.R. 1999. Efectos de las Enfermedades Foliares y Transmisión de Patógenos por Semillas en Cereales de Grano Pequeño de Temporal en Ambientes Críticos. Tesis de Licenciatura. Depto. de Parasitología Agrícola.
- Harder, D. E., M. Dunsmore K., G. Wilson R., J. Salmeron J., 1996. Stem rusts on wheat and barley in Canada, and on oat in Canada and Mexico in 1994. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 18(4):379-383; 16 ref.
- Huerta E. J., G. Rodriguez M. F., M. Villaseñor H. E., P. Ravi S., C. Martínez E., S. R. Hortelano R., R. Espitia E. 2014. Descripción de las royas del trigo. INIFAP. Folleto técnico número 64. ISBN: 978-607-37-0270-6.
- Invasive Species Compendium (CABI) 2016. Cookies on Invasive Species Compendium. URL: <http://www.cabi.org>
- Jin, Y. 2005. Races of *Puccinia graminis* identified in the United States during 2003. *Plant Disease*. 89:1125-1127.
- Leonard, K. J. and Szabo, L. J. 2005. Stem rust of small grains and grasses caused by *Puccinia graminis*. *Molecular Plant Pathology* 6:99-111.
- Leyva, M., S. G., E. Espitia R., H. E. Villaseñor M. yJ. Huerta E. 2004. Pérdidas ocasionadas por *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* Eriks. y Henn. Causante de la roya del tallo en seis cultivares de avena (*Avena sativa* L.) en los Valles Altos de México. *Revista Mexicana de Fitopatología* 22: 166-171.
- Li, T., Y. Cao, X. Wu, S. Chen, H. Wang, K. Li y L. Shen. 2015. First report on race and virulence characterization of *Puccinia graminis* f. sp. *avenae* and resistance of oat cultivars in China. *European Journal of Plant Pathology*. 142:85-91.

- Luig, N. H., 1985. Epidemiology in Australia and New Zealand In: Roelfs AP, Bushnell WR, eds. The Cereal Rusts Vol. II. Orlando, USA: Academic Press, 301-328.
- Martens, J. W. 1972. Stem rust of oats in Canada in 1972. Plant Disease 52:171-172.
- Martens, J. W. 1978. Stem rust of oats en Canada in 1977. Canadian Plant Disease Suvery. 58:3.
- Martínez, L.E. 2000. Respuesta de los Cereales a Diferentes Ambientes en los Valles Altos de México. Tesis de Licenciatura. Depto. de Fitotecnia. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Edo. de México. 70 p.
- McCallum, B. D., T. Fetch, J. Chong. 2007. Cereal rust control in Canada. Australian Journal of Agricultural Research. 58(6) 639–647.
- Nagarajan, S. & Joshi, L.M. 1985. Epidemiology in the Indian subcontinent. In A.P. Roelfs & W. R. Bushnell, eds. The cereal rusts, vol. 2, Diseases, distribution, epidemiology, and control, p. 371402. Orlando, FL, USA, Academic Press.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). 2016. URL: <http://www.fao.org/docrep/W1808S/w1808s0c.htm#TopOfPage>. Consultado febrero de 2016.
- Persoon CH, 1801. Synopsis Methodica Fungorum. Göttingen.
- Roelfs, A. P., D. H. Casper, and D. L. Long. 1979. Races of *Puccinia graminis* in the United States during 1978. Plant Disease 63:748-751.
- Roelfs, A. P. and Bushnell, W. R 1985. The Cereal Rusts. Diseases, Distribution, E pidemiology, and Control. Volume II. Academic Press, INC. 592 pp.
- Roelfs, A. P. 1985. Epidemiology in North America In: Roelfs AP, Bushnell WR, eds. The Cereal Rusts Vol. II. Orlando, USA: Academic Press, 403-434.

- Roelfs, A. P. 1985. Wheat and rye stem rust In: Roelfs AP, Bushnell WR, eds. The Cereal Rusts Vol. II. Orlando, USA: Academic Press, 3-37.
- Roelfs, A. P., D. H. Casper, and D. L. Long. 1979. Races of *Puccinia graminis* in the United States during 1978. Plant Disease 63:748-751.
- Roelfs, A. P., P. R. Singh, and E. E. Saari. 1992. Las royas del trigo. CIMMYT. D. F., Méx. 81 p.
- Saari, E. E. & Prescott, J. M. 1985. World distribution in relation to economic losses. In A.P. Roelfs & W.R. Bushnell, eds. *The cereal rusts, vol. 2, Diseases, distribution, epidemiology, and control*, p. 259-298. Orlando, FL, USA, Academic Press.
- Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2016. Anuario estadístico de la producción agrícola 2014. URL: <http://www.siap.gob.mx>.
- Tozzetti, G. T. 1952. V. Alimurgia: True nature, causes and sad effects of the rusts, the bunts, the smuts, and other maladies of wheat and oats in the field. In L.R. Tehon, transl. *Phytopathological Classics No. 9*, p. 139. St Paul, MN, USA, American Phytopathol. Society. (Originally published 1767).
- Villaseñor M., H. E., J. Huerta E., R. González R., S. G. Leyva M., J. Salmerón, L. Osorio A., C. Jiménez P., J. López, E. Solís, B. Cabañas y E. Espitia R. 2007. Estrategia en la selección de líneas avanzadas de avena por resistencia durable a roya del tallo (*Puccinia graminis* f. sp. *avenae*). In: Memoria, XXXIV Congreso Nacional de Fitopatología, IX Congreso Internacional de Fitopatología, Cancún, Quintana Roo, México. 72 p.
- Villaseñor, M. H. E., A. Limón, O., J. Huerta, E., M. F. Rodríguez, G., E. Espitia, R. y S. G. Leyva, M. 2008. El cultivo de la avena en los Valles de México. In: Día de

campo CEVAMEX-2005, Memoria Técnica. Chapingo, Estado de México. 60-68 pp.

Villaseñor, M. H. E., A. Limón, O., J. Huerta, E., M. F. Rodríguez, G., E. Espitia, R. y S. G. Leyva, M. 2008. El cultivo de avena en el Estado de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Centro de Investigación Regional del Centro. Campo Experimental Valle del México. Chapingo, Estado de México, México. Folleto técnico Núm. 29. 21 p.

Villaseñor, M. H. E., R. Espitia, E. and G. C. Márquez. 2001. Registration of “Cevamex” oat. *Crop Sci.* 41 (1): 266-267.

Villaseñor, M. H. E., R. Espitia, E. and G. C. Márquez. 2001. Registration of “Cevamex” oat. *Crop Sci.* 41 (1): 266-267.

Watson. I. A., Sousa C. N. A. 1983. Long distance transport of spores of *Puccinia graminis tritici* in the southern hemisphere. *Proceedings of the Linnean Society of New South Wales*, 106(4):311-321

Zillinsky, F. J. 1984. Guía para la Identificación de Enfermedades en Cereales de Grano Pequeño. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo. El Batán, Texcoco, Edo. de México. 141 p.

<http://www.ars.usda.gov/Main/docs.htm?docid=9910>