



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE PARASITOLOGÍA AGRÍCOLA

MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL



“GENÉTICA DE LA RESISTENCIA A LA ROYA AMARILLA (*Puccinia striiformis* f. *sp. tritici* W.) EN GENOTIPOS DE TRIGO HARINERO (*Triticum aestivum* L.)”

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL SE REQUIERE PARA OBTENER EL
GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL

PRESENTA:

JESSICA RAMÍREZ VÁZQUEZ

Bajo la supervisión del DR. Santos Gerardo Leyva Mir

Chapingo, Estado de México, diciembre de 2017.



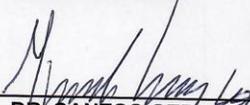
DIRECCIÓN GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXÁMENES PROFESIONALES

La tesis titulada "GENÉTICA DE LA RESISTENCIA A LA ROYA AMARILLA (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* W.) EN GENOTIPOS DE TRIGO HARINERO (*Triticum aestivum* L.), realizada por la alumna Jessica Ramírez Vázquez bajo la dirección y colaboración del H. Consejo Particular de asesores abajo indicados, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN PROTECCIÓN VEGETAL

CONSEJO PARTICULAR

DIRECTOR:


DR. SANTOS GERARDO LEYVA MIR

CO-DIRECTOR:


DR. JULIO HUERTA ESPINO

ASESOR:


DR. ANDRES BOLANOS ESPINOZA

ASESOR:


DR. HECTOR EDUARDO VILLASEÑOR MIR

Chapingo, Estado de México, diciembre de 2017.

AGRADECIMIENTOS

Al **CONACyT** por la beca brindada para poder realizar los estudios de maestría.

Se Agradece al fondo sectorial SAGARPA-CONACYT; **proyecto núm. 2010-03-146788** denominado “**sistema de mejoramiento genético para generar variedades resistentes a royas, de alto rendimiento y alta calidad para una producción sustentable de trigo en México**” del cual se derivó este trabajo.

A la **Universidad Autónoma Chapingo**, en especial a la Maestría en Ciencias en Protección Vegetal, por haber permitido realizar la maestría.

Al **Dr. Santos Gerardo Leyva Mir** por aceptar dirigir mi trabajo, brindarme su amistad, sabiduría, confianza y apoyo mutuo.

Al **Dr. Julio Huerta Espino** por su apoyo incondicional, amistad, sabiduría compartida y colaborar en todas las actividades realizadas en campo que hicieron posible este trabajo.

Al **Dr. Andrés Bolaños Espinoza** por su amistad, apoyo incondicional, colaboración y asesoría durante cada paso en la realización de esta investigación.

Al **Dr. Héctor Eduardo Villaseñor Mir** por su asesoría y facilidades en el laboratorio a su cargo para la realización de este trabajo.

A la **Dr. Elizabeth García León** por su amistad, confianza, motivación profesional para seguir con mis estudios, apoyo incondicional y asesoría brindada.

Al **Ing. Edgar López Herrera**, por su amistad, confianza, motivación para continuar con mis estudios y por su apoyo y facilidades para la conclusión de este trabajo.

Al personal que colabora en el Programa de Trigo del INIFAP-CEVAMEX Dr. Rene Hortelano Santa Rosa, Dr. Eliel Martínez Cruz, Dr. Eduardo Espitia Rangel, a la M.C. María Florencia Rodríguez, con especial afecto a Bety Pineda, Don José, Don Adrián, Don YiYo por su colaboración y facilidades brindadas en para la elaboración de esta tesis.

A **todos los profesores** que en este camino compartieron sus conocimientos y enriquecieron los míos.

A mis amigos de la Maestría, Eduardo Badillo López, Gabriela Ramírez Valades y Víctor Hernández Ángeles, por todo el apoyo brindado.

Al Ing. Leonel Hernández Santiago por la motivación y apoyo brindado en esta etapa Académica.

A el Grinch por su apoyo y cariño brindado para la culminación de este trabajo.

A mis padres y hermanos, por todo el amor, confianza y apoyo brindado durante todo este tiempo.

DATOS BIOGRÁFICOS

El autor nació el 13 de enero de 1992, en la ciudad de Celaya, estado de Guanajuato. Los estudios de educación básica fueron realizados en el municipio de Texcoco, Estado de México. Cursó la Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo, misma institución donde obtuvo el grado en Ingeniero Agrónomo Especialista en Fitotecnia (2010- 2014). En agosto del 2015 inició sus estudios de Maestría en el Departamento de Parasitología Agrícola de la Universidad Autónoma Chapingo, siendo miembro de la generación 57 como alumna del programa de Maestría en Ciencias en Protección Vegetal, finalizando en 2017 con la presentación de este trabajo de investigación.

GENÉTICA DE LA RESISTENCIA A LA ROYA AMARILLA (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* W.) EN GENOTIPOS DE TRIGO HARINERO (*Triticum aestivum* L.) ”

“GENETICS OF RESISTANCE OF YELLOW RUST (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* W.) IN GENOTYPES OF BREAD WHEAT (*Triticum aestivum* L.)”

Ramírez-Vázquez J. ¹, Leyva-Mir S.G. ²

Actualmente la roya amarilla causada por *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* es una enfermedad que amenaza la producción de trigo, disminuye el rendimiento y la calidad del grano. En México, los trigos harineros se siembran principalmente en zonas templadas donde las condiciones climáticas son favorables para el desarrollo de la enfermedad, además de que en los últimos años se han reportado nuevas razas del hongo causante de la enfermedad, por lo que la mejora genética es una tarea constante en la búsqueda de nuevos genes de resistencia para la incorporación de a nuevos materiales. Con el objetivo de determinar la genética de la resistencia en tres genotipos de trigo harinero (Alondra F2014, Orizaba y Valles F2015) a la roya amarilla, mediante el análisis de sus progenies, se realizaron cruza con los genotipos susceptibles Avocet y Urbina S2007. Se creó una epífita artificial con la nueva raza de roya amarilla CMEX14.25 y se evaluó en la generación F₂ plántulas de trigo. Los individuos se clasificaron en resistentes y susceptibles, con las frecuencias observadas y esperadas, se determinó el número de genes que confieren la resistencia en estos genotipos. Así en el caso de Alondra F2014 y Orizaba, la resistencia es conferida por dos genes dominantes, mientras que Valles F2015 tiene un gen dominante de resistencia.

Palabras clave: Trigo, resistencia, roya amarilla.

Currently the yellow rust caused by *Puccinia striiformis* f.sp. *tritici* is a disease that threatens wheat production, decreases yield and grain quality. In Mexico, bread wheats were planted mainly in temperate zones where climatic conditions are favorable for the development of the disease, in addition to recent years have been reported new races of the fungus causing the disease, so it is a constant task in the search for new resistance genes for the incorporation in new materials. With the objective of determining the genetics of resistance in three genotypes of bread wheat (Alondra F2014, Orizaba and Valles F2015) to the yellow rust, by analyzing their progenies, crosses were made with the susceptible genotypes Avocet and Urbina S2007. An artificial epiphyte was created with the new race of yellow rust CMEX14.25 and was evaluated in the generation F₂ wheat seedlings. The individuals were classified as resistant and susceptible, with the observed and expected frequencies, the number of genes that confer resistance in these genotypes was determined. Thus in the case of Alondra F2014 and Orizaba, the resistance is conferred by two dominant genes, while Valles F2015 has a resistance genotype.

Keywords: Wheat, resistance, yellow rust

¹Alumna de la Maestría en Ciencias en Protección Vegetal

²Director de tesis.

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| Objetivo..... | 2 |
| I. REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 2.1 Generalidades del cultivo del trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.)..... | 3 |
| 2.1.2 Clasificación taxonómica del trigo harinero. | 3 |
| 2.2 Estadísticas | 4 |
| 2.3 El trigo en México..... | 4 |
| 2.3.1 Trigo harinero en México. | 5 |
| 2.4 Enfermedades del trigo | 5 |
| 2.5 Roya Amarilla..... | 8 |
| 2.5.1 El Patógeno..... | 8 |
| 2.5.2 Importancia..... | 8 |
| 2.5.3 Taxonomía..... | 10 |
| 2.5.4 Morfología de las uredinias..... | 10 |
| 2.5.5 Ciclo de Vida | 11 |
| 2.5.6 Epidemiología | 13 |
| 2.5.7 Distribución..... | 14 |
| 2.5.8 Hospedantes | 15 |
| 2.5.9 Razas fisiológicas..... | 16 |
| 2.5.10 Agresividad..... | 17 |
| 2.5.11 Pérdidas..... | 17 |
| 2.6 Control de Roya Amarilla | 18 |
| II. MATERIALES Y MÉTODOS | 22 |
| 3.1 Localización del experimento..... | 22 |
| 3.2 Material genético | 22 |
| 3.2.1 Alondra F2014 | 23 |
| 3.2.2 Urbina S2007 | 23 |
| 3.2.3 Valles F2015 | 23 |
| 3.2.4 Orizaba..... | 24 |
| 3.2.5 Avocet | 24 |
| 3.3 Obtención de las generaciones F ₁ y F ₂ | 25 |
| 3.4 Incremento del inoculo | 27 |

| | | |
|-------|---|----|
| 3.4.1 | Recolección de esporas..... | 27 |
| 3.5 | Evaluación de plántulas en generación F_2 | 27 |
| 3.6 | Frecuencias Esperadas..... | 31 |
| 3.7 | Análisis de datos | 32 |
| III. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 33 |
| IV. | CONCLUSIONES..... | 42 |
| V. | BIBLIOGRAFÍA..... | 43 |

Índice de Cuadros

| | Nombre | Pagina |
|----------|--|---------------|
| Cuadro 1 | Cruza e historia de selección de los progenitores de las cuatro variedades de trigo utilizadas en el estudio. | 35 |
| Cuadro 2 | Cruzas de tres variedades de trigo harinero para determinar la genética de la resistencia a <i>P.striiformis</i> f. sp. <i>tritici</i> raza CMEX14.25. | 36 |
| Cuadro 3 | Clasificación de plantas F ₂ de acuerdo a su nivel de infección. | 41 |
| Cuadro 4 | Número de plantas resistentes y susceptibles observadas frente a la raza CMEX14.25 de roya amarilla. | 46 |

Índice de figuras

| Figura | Nombre | Pagina |
|---------------|--|---------------|
| 1 | Ciclo de <i>Puccinia striiformis</i> | 21 |
| 2 | Evaluación de Individuos F ₂ en plántula con la raza CMEX 14.25 de Roya Amarilla. | 39 |
| 3 | Escala del 0 al 9 para medir el tipo de infección | 40 |
| 4 | Clasificación de plántulas de Trigo. | 43 |

INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la civilización, el trigo (*Triticum aestivum* L.) ha sido uno de los cereales más importantes para la alimentación humana. Las enfermedades que actualmente afectan más al trigo son las royas, se ha estimado que las pérdidas en el rendimiento de grano pueden ser hasta de 30 % en variedades susceptibles no tratadas con fungicidas (Solís *et al.*, 2002).

La roya amarilla se presenta prácticamente en todas las zonas trigueras donde existen las condiciones climatológicas que favorecen la presencia de esta enfermedad (Rodríguez *et al.*, 2009).

La evolución de la virulencia a través de la migración, mutación, recombinación de genes de virulencia y su selección ha sido más frecuente en royas y cenicillas (Singh *et al.*, 2008). Por lo tanto, el avance en los conocimientos sobre las bases genéticas de la resistencia y el mejoramiento de variedades han recibido mayor atención.

El mejoramiento genético para lograr resistencia a esta enfermedad ha sido el método más eficiente en su control (Singh *et al.*, 2002). Biffen (1905), uno de los primeros investigadores que estudio la genética de la herencia de infección al ataque de roya amarilla, reportó que dicha resistencia es monogénica y de carácter recesivo. La mayoría de variedades resistentes a roya amarilla han tenido como fuente de resistencia a genes de herencia simple, pero la pérdida continua del efecto de estos genes o de sus combinaciones, ha obligado a buscar diversas fuentes de resistencia debido a que este patógeno tiene la

capacidad de mutar y evolucionar hacia mayor virulencia, lo que ocasiona que se rompa rápidamente la resistencia (Villaseñor *et al.*, 2009).

Por lo anterior es de suma importancia la identificación de genotipos que presenten genes de resistencia que puedan ser incorporados a las nuevas variedades de trigo.

Los materiales utilizados en esta investigación fueron seleccionados a partir de evaluaciones de la colección nacional de trigo perteneciente al INIFAP, esto se realizó en el LANARET en el segundo semestre del año 2014 donde se presentó la respuesta favorable de estos trigos ante diferentes aislamientos de roya amarilla dentro de los cuales se encontraba la raza CMEX14.25. Los resultados indicaron que estos materiales presentaban cierto nivel de resistencia ante la raza que afectó a los trigos sembrados en el ciclo PV-2014 en los Valles Altos de México. Sin embargo, ante la eminente epidemia era necesario evaluar a mayor profundidad la respuesta de estos genotipos.

Objetivo

1. Determinar la herencia de la resistencia en plántula a la infección causada por la raza de roya amarilla CMEX 14.25 en tres genotipos de trigo harinero: Orizaba, Alondra F2014 y Valles F2015.

Hipótesis

1. La resistencia es de herencia simple y esta conferida por un número reducido (uno o dos) de genes.

I. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Generalidades del cultivo del trigo (*Triticum aestivum* L.)

El trigo se cultiva en todo el mundo bajo diversas condiciones climáticas. Ha sido el alimento básico de las principales civilizaciones de Europa, Asia y Norte de África durante más de 8, 000 años. En 2014 ocupó el tercer lugar entre los cereales más cultivados después del maíz y el arroz, con una producción mundial de más de 600 millones de toneladas (FAOSTAT, 2016). Es uno de los cereales más usados en la elaboración de alimentos para consumo humano. En la industria de la panificación se emplea para la preparación de pastas y galletas. El valor nutritivo del trigo y de los productos derivados de sus harinas, siempre han sido una fuente importante de alimento para la humanidad, ya que aportan energía, proteína, vitaminas y minerales, muy necesarios para el crecimiento sano de la población (CANIMOLT, 2016a).

2 .1.2 Clasificación taxonómica del trigo harinero.

Reino: Plantae

Phylum: Tracheophyta

Clase: Liliopsida

Orden: Poales

Familia: Poaceae

Género: *Triticum*

Especie: *aestivum*

Triticum aestivum L.

(NCBI, 2017).

2.2 Estadísticas

Los principales países productores de trigo en el año 2014-2015 son la Unión Europea, China, India y Rusia, con 156, 126, 96 y 59 millones de toneladas producidas, México se ubica en el vigésimo lugar con 4 millones de toneladas del grano; mientras que los principales países importadores de trigo son Egipto, Indonesia y Argelia con 11.1, 7.1 y 7.1 millones de toneladas respectivamente, México tiene el noveno lugar de importaciones a nivel mundial con 4.6 millones de toneladas de este grano. En cuanto a exportaciones, los primeros lugares los ocupa la Unión Europea, Canadá y Estados Unidos, exportando 34.5, 23.5 y 23.4 millones de toneladas durante el mismo periodo; con 1.5 millones de toneladas, México se coloca en el doceavo lugar como país exportador a nivel mundial (CANIMOLT 2016b).

2.3 El trigo en México

El SIAP indica que para el año agrícola 2015 la producción del grano de trigo osciló alrededor de las 3.7 millones de toneladas, el trigo se cultivó en 23 estados de la república, con de 835 mil hectáreas sembradas, concentrándose en el Noreste del país. El volumen de la producción se agrupó en 7 estados: Sonora, Baja California, Guanajuato, Sinaloa, Chihuahua, Jalisco y Michoacán, aportando poco más del 92 % de la producción. El rendimiento promedio del cultivo de trigo fue de 5 toneladas por hectárea bajo condiciones de riego mientras que en temporal oscila en 2 toneladas.

2.3.1 Trigo harinero en México.

El trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) se utiliza en la elaboración de panes, tortillas, galletas y repostería. Se caracterizan por el gluten fuerte (muy elástico y extensible) (Hernández *et al.*, 2011).

En México dado que la cantidad y tipos de trigo que se producen no concuerdan con la cantidad y la calidad que exige la industria, se importa trigo harinero y se exporta trigo cristalino. La producción de trigo harinero-duro (panificable) es muy inferior a la demanda de la industria local, mientras que la de trigo cristalino excede en más del 50% las necesidades de la industria de pastas alimenticias. Esta es la razón de que alrededor del 70% de los más de 4.9 millones de toneladas de trigo harinero (duro y suave) que consume actualmente la industria molinera nacional provengan del trigo importado de Canadá y los Estados Unidos (Peña *et al.*, 2008).

La producción de temporal es importante porque se localiza muy cerca de la mayor zona de procesamiento (molienda y panificación) industrial, hecho que permite reducir costos de transportación, que son elevados cuando el trigo se traslada desde sitios lejanos (Villaseñor y Espitia, 2000).

2.4 Enfermedades del trigo

Entre los principales problemas que afectan el rendimiento del trigo tanto en riego como en temporal es la escasez de agua, fertilización, control de malezas y enfermedades (Soomro *et al.*, 2009).

La producción de este cereal es afectada principalmente por enfermedades fungosas, donde destacan las causadas por el género *Puccinia*. Line y Chen (1995) indican que la roya amarilla, roya de la hoja y roya del tallo causadas por los hongos *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* Eriks, *Puccinia triticina* E. y *Puccinia graminis* f. sp. *tritici*, son las enfermedades más destructivas del trigo en el mundo.

En las zonas productoras de trigo en México existen las condiciones climatológicas para el desarrollo de las tres royas, donde se encuentran ampliamente distribuidas (Huerta *et al.*, 2014).

La roya del tallo también se le conoce como roya negra del trigo y es la más agresiva y devastadora de las royas de los cereales. En México fue la más importante durante las décadas de 1930 y 1940, su control se logró a mediados de la década de 1950 gracias a la liberación de la variedad Yaqui 50 y al efecto del gen Sr2 que aún sigue efectivo (Huerta *et al.*, 2011); desde entonces no se ha observado roya del tallo en campos de agricultores (Huerta *et al.*, 2014).

La roya de la hoja ha ocasionado los mayores daños en la producción de trigo en México; la epidemia en el noroeste durante el 2001, 2002 y 2003 en trigos duros, debido a la nueva raza BBG/BN, causó pérdidas de 32 millones de dólares para los agricultores mexicanos (Herrera–Fossel *et al.*, 2005).

La roya amarilla hasta hace poco tiempo en México no se consideraba una enfermedad seria en las regiones productoras de trigo del Noroeste y Norte de México, aunque ya era común en El Bajío y las zonas de temporal en el

Altiplano (Huerta *et al.*, 2014), sin embargo, en los últimos años se han reportado estudios que revelan su importancia para el país. Ejemplo de ello son las investigaciones realizadas por Solís *et al.*, (2002) donde muestran el efecto que tiene la roya amarilla en la disminución del rendimiento de este cereal hasta 30% en variedades sin aplicación de fungicidas, lo que concuerda con Villaseñor *et al.*, (2012) quienes indican que es conveniente la aplicación de fungicidas para disminuir las mermas en la producción de trigo de temporal, ante el ataque de dicha enfermedad.

(Rodríguez *et al.*, 2014) indican que estas enfermedades amenazan constantemente la producción de este cereal, dado que pueden vencer la resistencia específica de variedades por la evolución hacia nuevos biotipos o razas fisiológicas del hongo, porque se reproducen rápidamente, porque se dispersan a grandes distancias y por la diversidad de razas que prevalecen, como por ejemplo, reportaron la presencia de alrededor de 18 razas fisiológicas en México.

2.5Roya Amarilla

2.5.1 El Patógeno

Desde que fue descrito el nombre del patógeno causante de la roya amarilla ha tenido diversas modificaciones, en 1777 que fue descrito por primera vez por Gadd (Eriksson y Henning, 1896). En 1827 Schmidt describe a la roya amarilla bajo el nombre de *Uredo glumarum*; en 1854 Westendorp la nombró *Puccinia striaeformis* como la roya lineal que ataca al centeno y en 1860 Fuckel la nombró como *Puccinia straminis*, y finalmente en 1894 Eriksson y Henning demostraron que la roya lineal amarilla está separada de la roya de los pastos y la nombraron *Puccinia glumarum*; así permaneció hasta que en 1953 Hylander y colaboradores fue revivido el nombre actual de *Puccinia striiformis* (Stubbs, 1985; Chen, 2002).

2.5.2 Importancia

La roya amarilla o lineal causada por *Puccinia striiformis* Westend. f. sp. *tritici* es una enfermedad del trigo de importancia mundial (Wan *et al.*, 2002), y puede ser tan destructora como la roya del tallo (Roelfs *et al.*, 1992). La amenaza de este hongo para la agricultura está enraizada en su enorme diversidad genética como resultado de la recombinación sexual que ocurre predominantemente en la región del Himalaya, su dispersión a través de los continentes por medios naturales y humanos y su rápida adaptación local a través de la evolución escalonada, superando un solo gen de resistencia a la vez (Hovmoller *et al.*, 2017).

Es una enfermedad importante en todo el mundo y causa pérdidas en rendimiento, especialmente en las regiones donde las condiciones climáticas son favorables. Huerta y Singh (2000) mencionan que una variedad susceptible puede tener pérdidas del 74% al 94%, dependiendo del año y época de siembra. La disminución en rendimiento puede ser hasta del 100% si ocurren infecciones tempranas y la enfermedad continúa desarrollándose durante el crecimiento en cultivares de trigo altamente susceptibles, debido a que utiliza el agua y los nutrientes de la planta hospedera mientras que esta se debilita (Chen, 2005).

La roya amarilla constantemente amenaza la producción de trigo de temporal y de riego en el país, debido a que no sólo tienen la capacidad de vencer la resistencia específica de variedades nuevas, a través de la evolución hacia nuevos biotipos del patógeno o razas fisiológicas con nuevos genes de virulencia, sino también porque se reproducen rápidamente y porque pueden moverse a distancias muy grandes (Huerta y Singh, 2000).

A nivel mundial, se han registrado en la literatura muchas epidemias devastadoras de roya amarilla. En América del Norte, la roya amarilla es una enfermedad importante del trigo en México y los EE.UU., y un problema menos frecuente en Canadá. En México principalmente en riego en el estado noroeste de Sonora y en el Bajío se han registrado pérdidas de rendimiento del 60% en cultivos de trigo común en esas zonas (Chen y Kang 2017).

2.5.3 Taxonomía

El hongo causante de la roya amarilla pertenece al Reino Fungi (produce micelio con las paredes las cuales contienen glucanos y quitinas). Al Phylum Basidiomycota, a la Clase Basidiomycetes (producen esporas sexuales que son llamadas basidiosporas, y son producidas externamente en grupo de una a cuatro células en una estructura llamada basidio). Al Orden Uredinales (Producen de dos a varios tipos de esporas: teliosporas, basidiosporas, picniosporas, aeciosporas y urediniosporas). Al género *Puccinia* pertenecen varias especies de roya que causan enfermedades graves en cereales y de otras plantas (Agrios, 2005).

Se separa por debajo del nivel de la especie por la especialización del hospedante en varios géneros de plantas, incluyendo hasta nueve formas especiales, de las cuales *P. striiformis* f. sp. *tritici* W. (Pst) causa la roya estriada o roya lineal (o amarilla) en el trigo (Chen *et al.*, 2014).

2.5.4 Morfología de las uredinias

Las pústulas o uredinias individuales son oblongas, con una media de 24,5 x 21,6 µm, de color amarillo a naranja, equinulado. Las teliosporas son predominantemente de dos células, de color marrón oscuro con paredes gruesas, en su mayoría oblonga (24-) 31-56 (-65) × (11-) 14-25 (-29) µm de longitud y ancho o con redondeadas con el ápice aplastado (Chen *et al.*, 2014).

2.5.5 Ciclo de Vida

La roya lineal aparece como una masa de urediniosporas de color amarillo a naranja que salen de las pústulas dispuestas en largas y estrechas líneas en las hojas (generalmente entre las venas), vainas, glumas y aristas en plantas susceptibles. Los cultivares de trigo resistentes se caracterizan por diversos tipos de infección, desde ningún signo visual hasta pequeñas manchas hipersensibles a uredinia rodeadas de clorosis o necrosis con una producción restringida de urediniosporas. En plántulas, la uredinia producida por la infección de una sola urediniospora no está confinada por las venas de las hojas, sino que progresivamente emergen del sitio de la infección en todas las direcciones, cubriendo potencialmente toda la superficie de la hoja (Chen *et al.*, 2014).

El ciclo de vida (Figura 1) comienza por la Uredia (A) que se forma en la hoja del trigo que contienen urediniosporas unicelulares, dicarióticas ($n+n$), ovoides y equinuladas. Las urediniosporas pueden germinar rápidamente en condiciones favorables y reinfectar al trigo (Ciclo asexual). Las telias son formadas debajo de la epidermis de la hoja cerca del fin de la temporada de crecimiento. Las teliosporas ($2n$) son oblongas y bicelulares. Posteriormente germinan las teliosporas y dan origen a las basidiosporas (n). Las basidiosporas producen picnias (C) en el haz de la hoja de *Berberis chinensis*. En forma de capítulo de girasol la aecia (D) es producida en el envés de la hoja de *Berberis chinensis*. Las aeciosporas son planas y esféricas. Plantas de trigo (E) pueden ser

infectados por las aeciosporas producidas en plantas de *Berberis* y pueden producir urediniosporas (Chen *et al.*, 2014).

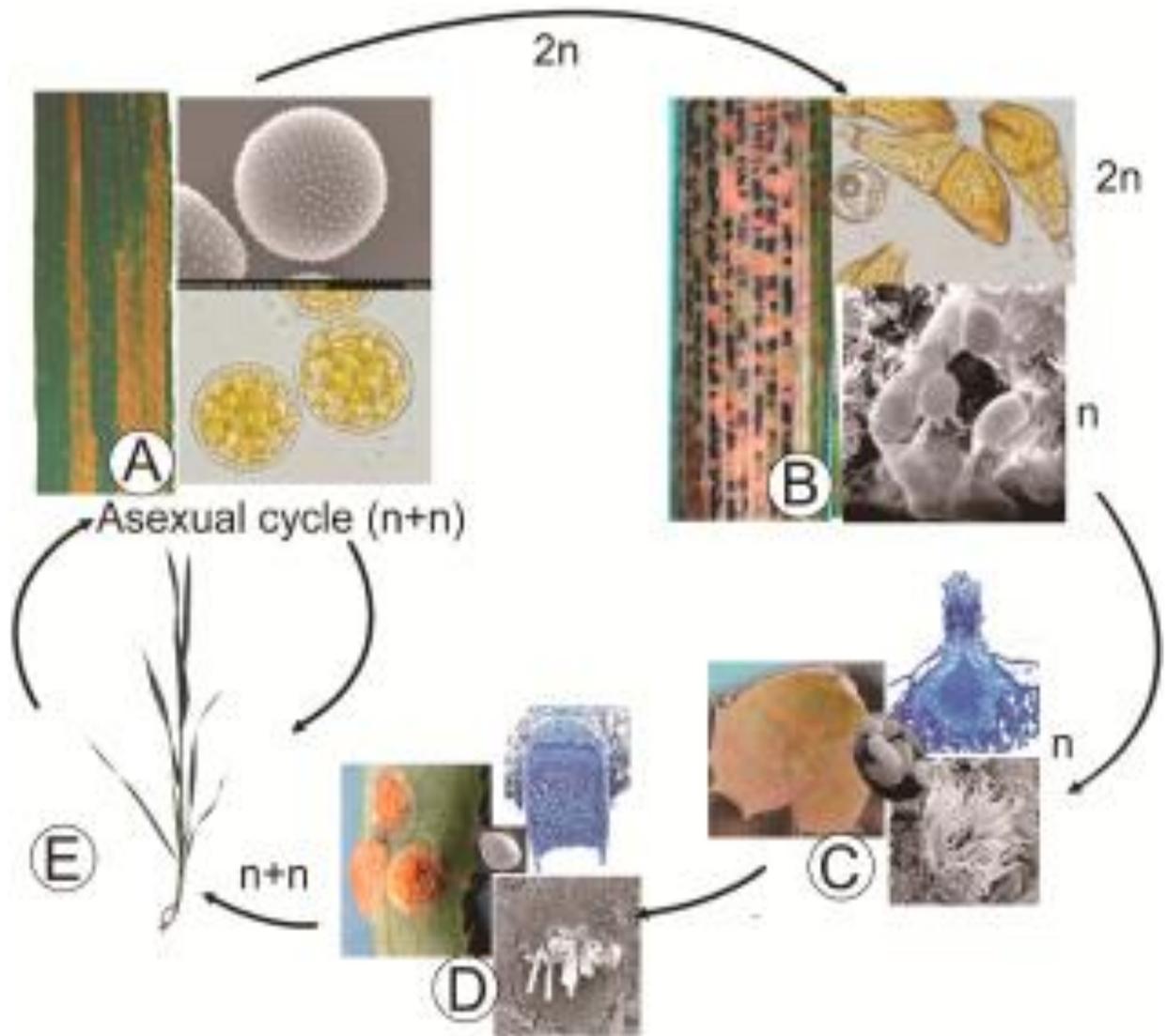


Figura 1. Ciclo de *Puccinia striiformis* (Chen *et al.*, 2014).

2.5.6 Epidemiología

Los tres factores climáticos más importantes que afectan la epidemia de la enfermedad son la humedad, temperatura y viento. La humedad, agua libre en forma de rocío, juega un papel importante en la germinación de la espora, en la infección y en la supervivencia del patógeno (Chen, 2005). Las urediniosporas del patógeno requieren de al menos 3 horas de agua libre en la superficie de la planta para germinar e infectar a las plantas (Rapilly, 1979).

La temperatura es el factor principal que afecta la supervivencia de la roya amarilla en invierno, además de ser un factor importante en la predicción de la enfermedad (Chen, 2005). *P. striiformis* se desarrolla a 0, 11 y 23 °C temperaturas mínima, óptima y máxima respectivamente (Roelfs *et al.*, 1992). Investigaciones más recientes, indican que 7°C es la temperatura óptima para la infección y que la roya amarilla causada por nuevos aislamientos se desarrollan más rápido que los antiguos en temperaturas relativamente más altas (Chen, 2005). Asimismo otros autores indican que para su infección se requiere una temperatura óptima de 7-10 °C y temperaturas por debajo de los 18 °C para su desarrollo (Huerta *et al.*, 2014). Mientras que a temperatura por arriba de los 25°C la esporulación se detiene y el micelio del hongo sobrevive en la hoja (Huerta y Singh, 2000).

El viento puede afectar a *P. striiformis* secando las urediniosporas, lo que reduce la infección y germinación, pero además incrementa la duración y la viabilidad de la espora. Lo más importante, es que el viento juega el mejor papel en la dispersión de roya amarilla. Generalmente el viento no es un factor

limitante dentro de un área pequeña, específicamente en un área con inoculo local (Chen, 2005).

2.5.7 Distribución

La roya lineal amarilla se encuentra distribuida en prácticamente todo el mundo (Roelfs *et al.*, 1992), ha sido reportada en más de 60 países en todos los continentes excepto la Antártida (Chen, 2005).

En china es una de las enfermedades más destructivas del cultivo, que causa grandes pérdidas, principalmente en cultivares de invierno y cuando se cultivan materiales susceptibles y las condiciones climáticas son favorables (Wan *et al.*, 2004). Mientras Boshoff *et al.*, (2002) mencionan que la roya amarilla también es importante en áreas más tropicales de mayor altitud, como los países del norte de África, las estribaciones del Himalaya de la India y Pakistán.

En Chile, la enfermedad causa grandes pérdidas de rendimiento (Becerra *et al.*, 2007). Mientras que Chen *et al.*, 2000, reportan la importancia de la enfermedad en el oeste de estados unidos ya que se ha extendido por gran parte del territorio causando pérdidas multimillonarias pese a la aplicación de fungicidas para el control de la enfermedad.

En México, la roya amarilla fue detectada por primera vez por Holway en cebada silvestre (*Hordeum jubatum*) en 1896 (Stubbs, 1985). Salazar y Gómez (1992), mencionan que se presentó en la región del bajío y en la mesa central. No se consideró una enfermedad seria en las regiones productoras de trigo del Noroeste y Norte de México, aunque ya era común en El Bajío y las zonas de

temporal en el Altiplano (Huerta *et al.*, 2014). Cobró mayor importancia en México a partir del 2001. Variedades para el sur de Sonora y norte de Sinaloa requieren de resistencia adicional a ésta enfermedad.

Para el año 2009 de acuerdo con trabajos de análisis de virulencia se habían identificado 18 razas fisiológicas de roya amarilla de trigo en los Valles Altos de México, donde se cultiva principalmente trigo harinero (Rodríguez *et al.*, 2009), lo que indica que cada vez es más común la enfermedad en nuestro país.

La roya lineal amarilla en trigos de temporal se presenta con mayor frecuencia en áreas frías y con un prolongado periodo de rocío, como son las partes cercanas a Toluca y otras zonas templadas y frías en el estado de México y zonas elevadas de Tlaxcala y Puebla, principalmente (Huerta y Singh, 2000), cobró mayor importancia en México a partir del 2001.

En la actualidad es problema en todas las áreas de producción de trigo en el mundo y en México, en 2014 la presencia de nuevas razas vencieron la resistencia de varias variedades que hasta ese momento eran resistentes (Villaseñor *et al.*, 2014).

2.5.8 Hospedantes

Puccinia striiformis es un patógeno de las gramíneas y cereales como el trigo, la cebada, el triticale y el centeno (Roeslfs *et al.*, 1992).

Hospedantes alternos.

Jin *et al.*, (2010), indicaron que *Berberis chinensis*, *B. holstii*, *B. koreana* y *B. vulgaris* sirven como hospedantes alternos para el patógeno. Otro hospedante es la uva de Oregon (*Mahonia aquifolium*) (Chen *et al.*, 2014).

Hospedantes Secundarios.

Puccinia striiformis afecta principalmente a cereales sus principales hospedantes pertenecen a los géneros *Aegilops*, *Agropyron*, *Bromus*, *Elymus*, *Hordeum*, *Secale* y a *Triticum* (Roeslfs *et al.*, 1992). En Estados Unidos existían alrededor de 126 especies de pastos de 20 géneros fueron susceptibles a la roya amarilla (Line, 2002).

2.5.9 Razas fisiológicas

Según con Caten (1987) una raza se define como un taxón de parásitos caracterizados por la especialización del hongo a infectar diferentes variedades de plantas hospedantes. Mientras que Huerta *et al.*, (2014) la definen como un conjunto de individuos (aislamientos puros) de una *formae specialis* morfológicamente iguales, pero que difieren en su capacidad para infectar una serie de genotipos de la misma especie denominadas plantas diferenciales

La raza 14E14 fue la más común en las zonas de trigo de temporal y El Bajío en México, se caracterizó por su virulencia para los genes Yr2, 3, 6, 7, Sk (Yr27) y A. En las áreas de temporal en México eran importantes tres razas fisiológicas: una venció la resistencia de las variedades Temporalera M87, Gálvez M87 y Verano S91; la segunda venció la resistencia de Batán F96 y de variedades que

poseen el gen Yr9; y la tercera permitía diferenciar plantas resistentes y susceptibles en la variedad de triticale Secano TCL96 (Huerta y Singh, 2000).

En el ciclo P-V 2014 en los Valles Altos, se presentó una severa incidencia de roya amarilla en planta y espiga en variedades comerciales que hasta la fecha habían sido resistentes. La roya amarilla se diseminó rápidamente en las zonas productoras de trigo en clima y altitudes donde no era común la presencia de ésta enfermedad (García *et al.*, 2014). Dichos aislamientos fueron denominados CEVAMEX14.25, MEX 14.191, MEX14.141 y MEX14.146, mismos que fueron los responsables de vencer la resistencia de Luminaria F2012 y de Nana F2007 (Solís *et al.*, 2016) los cuales combinan virulencia para los genes de Yr2, Yr3, Yr6, Yr7, Yr8, Yr9, Yr17, Yr27 y Yr31 entre otros.

2.5.10 Agresividad

Se sabe poco acerca de las diferencias en cuanto a agresividad entre los aislamientos de *P. striiformis*. Esas diferencias probablemente existen, pero la variabilidad de la respuesta de resistencia las oculta. Por otra parte, las diferencias en la humedad relativa, la luz, la temperatura y los contaminantes, combinadas con la resistencia de planta adulta, dificultan los estudios de las diferencias en la agresividad del patógeno (Roelfs *et al.*, 1992).

2.5.11 Pérdidas

La roya lineal es una enfermedad grave del trigo sobre todo durante el invierno o comienzos de la primavera, o en sitios de gran altitud (Roelfs *et al.*, 1992). Es de creciente importancia en los Valles Altos de México, pues llega a causar

pérdidas en el rendimiento mayores a 60 % y deteriora la calidad del grano (Villaseñor *et al.*, 2009), debido a que en estas áreas temporaleras se presentan condiciones favorables de humedad (mayor de 70 %) y temperatura (15-20 °C) para la incidencia de roya amarilla (Huerta y Singh, 2000) esto a su vez favorece que el hongo pueda evolucionar y vencer la resistencia de las nuevas variedades (Rodríguez *et al.*, 2009). Las pérdidas se deben generalmente al arrugamiento del grano, pero cuando la enfermedad es severa antes del embuche también puede disminuir el número de macollos (Roelfs *et al.*, 1992).

Solís *et al.*, (2002) mencionan que la roya lineal redujo el rendimiento en un rango de 28.5 a 31.7 % en materiales con moderada resistencia, mientras que en genotipos susceptibles se alcanzó un 100% de infección, esto en una etapa temprana del cultivo, antes de que la planta alcanzara la antesis, resaltando la importancia que tiene la etapa fenológica cuando es atacado por la enfermedad.

2.6 Control de Roya Amarilla

Para el control de cualquier enfermedad hay que subrayar que es esencial conocer la epidemiología de una enfermedad antes de iniciar cualquier estrategia de control, en especial una que implique el empleo de productos químicos o prácticas de cultivo. Sin duda el medio más eficaz para combatir las royas de los cereales sería combinar las prácticas de cultivo con variedades resistentes y, tal vez, las aplicaciones de fungicidas (Roelfs *et al.*, 1992).

Huerta *et al.*, (2014) sugieren dos métodos de control para las royas del trigo, el control genético y el control químico.

Genético. Es el método más eficaz; consiste en sembrar variedades con resistencia total (R) o moderada (MR) a la enfermedad. Este tipo de control tiene ventajas sobre el químico, porque no implica costo extra para el productor, y algo muy importante, no causa daño al ambiente.

Roelfs *et al.*, (1992) mencionan algunas ventajas y desventajas que tiene el control genético:

Ventajas:

- Puede reducir o eliminar la necesidad del control químico.
- Hasta donde se sabe, no afecta el ambiente en forma adversa.

Desventajas:

- La resistencia puede perder su eficacia después de cierto tiempo.
- Se requiere el conocimiento de la virulencia y la evolución del patógeno

En México la siembra de variedades resistentes es la mejor forma como se ha controlado la roya amarilla (Rodríguez *et al.*, 2009). El uso de tales variedades ha sido más empleado en el país; sin embargo, las variedades pierden su resistencia por la constante evolución del patógeno hacia nuevas razas fisiológicas virulentas o por la incidencia de razas que no habían estado presentes. Por lo anterior, se requiere la constante formación y liberación de nuevas variedades, para que sustituyan a las que van perdiendo la resistencia y que ayuden a contrarrestar la variabilidad genética del patógeno presente en las diferentes regiones de producción de este cereal. Además, con la evaluación constante de genotipos se han identificado fuentes de resistencia genética

mismas que se integran dentro de los grupos de progenitores en los programas de mejoramiento genético (Ramírez *et al.*, 2016).

El uso de cultivares resistentes es el método más efectivo y sustentable que se recomienda para el control de la enfermedad (Chen, 2005).

En general, las variedades con resistencia a raza específica, duran en promedio cinco años en explotación comercial donde la roya es endémica, periodo que equivale a la duración de la vida agronómica de una variedad. En algunos países, la roya puede presentarse en algunas variedades que se han sembrado por primera vez y en la mayoría de los casos los fracasos de las variedades resistentes han obedecido al inadecuado conocimiento previo de las razas o virulencias presentes en la población del patógeno. En algunos otros casos se han producido mutaciones o quizás recombinaciones de los factores de virulencia existentes que superaron la resistencia del hospedante (Singh *et al.*, 2000), como fue el caso de Luminaria y Nana F2007 (Solís *et al.*, 2016).

Con los estudios de la herencia de la resistencia en trigo, al cruzar una variedad susceptible por una resistente en su progenie, es posible determinar tanto el tipo de acción génica como el número de genes que confiere la resistencia (Zhang y Knott, 1990; Singh *et al.*, 2000).

En el caso de la roya amarilla se deben combinar de 4 a 5 genes de efecto aditivo para reducir el progreso de la enfermedad a niveles tan bajos que sólo se puedan observar trazas al tiempo de madurez, bajo una presión alta de la enfermedad (Singh *et al.*, 2001).

La estrategia que más ha apoyado el control de esta enfermedad es el uso de variedades resistentes, requiriéndose constantemente de fuentes de resistencia. Los trabajos de mejoramiento genético realizados en los últimos años tienen como objetivo generar genotipos con mayor potencial de rendimiento que las variedades comerciales de la región, resistentes a royas y de alta calidad industrial. Una alternativa para lograr mayor durabilidad de la resistencia es generar variedades que posean resistencia durable basada en genes que confieren resistencia de enroyamiento lento (slow rusting) (Huerta *et al.*, 2012).

Químico. Este tipo de control se utiliza cuando se siembran variedades susceptibles; consiste en realizar al menos una aplicación de fungicidas, lo que dependerá de la etapa fenológica en la cual se presente ya que en ocasiones, cuando incide antes del embuche, será necesario realizar hasta dos aplicaciones.

El fungicida que se recomienda para el control de la enfermedad es Sportak® el cual exhibió el mayor rendimiento de grano favoreciéndose en promedio 26.5 y 29.4%, cuando incidió roya amarilla y enfermedades foliares, respectivamente, y se determina que la aplicación de fungicida es una práctica cultural rentable que evita pérdidas en el rendimiento de trigo de temporal (Villaseñor *et al.*, 2012).

II. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del experimento.

El experimento se llevó a cabo en el Laboratorio Nacional de Royas y otras Enfermedades del Trigo (LANARET) perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) campo experimental Valle de México (CEVAMEX), localizado a 19° 29´ latitud norte y 99° 53´ longitud oeste a una altitud de 2,250 msnm (García, 1981), en el municipio de Texcoco, Estado de México, con una temperatura controlada en los invernaderos de 20° C en el área de Plantas Sanas y a 17° C en el área de Roya Amarilla.

3.2 Material genético

Con el propósito de realizar cruzamientos de materiales de trigo resistentes y susceptibles a la raza CMEX 14.25 de roya amarilla, durante el ciclo PV-2015, en el LANARET se realizó la siembra del material susceptible Avocet, y las variedades Alondra F2014, Urbina S2007, Valles F2015, materiales pertenecientes al programa de mejoramiento genético de trigo del INIFAP y Orizaba del programa de trigo del CIMMYT, resistente a la raza objeto de estudio.

Las características de las variedades se indican a continuación y en el Cuadro 1 se aprecian la cruce e historia de selección de los materiales utilizados.

3.2.1 Alondra F2014

Variedad de madurez intermedio, con 79 días a floración y 130 días a madurez fisiológica. Es semienana, con altura de planta de 90 cm; el tallo es fuerte hueco, de color crema y moderadamente resistente al acame. La espiga es de color blanco, bordes paralelos con barbas y endospermo fuerte. Los niveles de infección a roya lineal observados en campo son menores de 7 % cuando se realizan inoculaciones artificiales (Solís *et al.*, 2016).

3.2.2 Urbina S2007

Variedad de madurez intermedia, con 83 días a floración y 135 días a madurez fisiológica. Es semienana, con altura de planta de 100 cm; el tallo es fuerte hueco, de color crema y moderadamente resistente al acame. La espiga es de color blanco, de forma ovoide, bordes redondeados y endospermo suave. Los niveles de infección a roya lineal observados en campo son menores de 10 % cuando se realizan inoculaciones artificiales (Solís *et al.*, 2008). Urbina es susceptible en estado de plántula en particular a la raza CMEX 14.25.

3.2.3 Valles F2015

Línea experimental de ciclo intermedio, resistente a royas amarilla y de la hoja y tolerante a tizones y manchas foliares. De madurez temprana, con 80 días a floración y 110 días a madurez fisiológica. Es de porte intermedio, con altura de planta de 110 cm; el tallo es fuerte hueco, de color crema y resistente al acame.

La espiga es de color blanco, de forma alargada, bordes redondeados y endospermo suave. Los niveles de infección a roya lineal observados en campo son menores de 5 % cuando se realizan inoculaciones artificiales.

3.2.4 Orizaba

Línea avanzada desarrollada por el CIMMYT en 1977. Es una planta semi-enana y de madurez temprana resistente a la roya amarilla, del tallo y de la hoja

3.2.5 Avocet

Genotipo de origen australiano, susceptible tanto en plántula como en planta adulta a la mayoría de las razas fisiológicas de la roya amarilla que existen en México, se ha utilizado para realizar estudios genéticos de royas (Villaseñor *et al.*, 2005).

Cuadro 1. Cruza e historia de selección de los progenitores de las cuatro variedades de trigo utilizadas en el estudio.

| Variedad | Cruza/Genealogía |
|---------------|--|
| Avocet | WWW119/WW151//EGRET -YrA-30Y |
| Urbina S2007 | CNO79/PRL/CHIL/3/CUBA/4/CASILDA/CENTELLA TR00132-10R-0R-0R-0C-3R-0R |
| Orizaba | CIANO F 67/SIETE CERROS T 66//CORRECAMINOS/TOBARI F 66 II25918 |
| Alondra F2014 | TJB368/BUC//CUPE/3/ ENE/ZITA TR04074-2R-0C-0R-3RSE-1RSE-0R |
| Valles F2015 | PAMDOLY-PABG (Tardía) (C4) SRGD(4toCSR-O-I/07-08)-182C-0R-0OAX-0R-2C-0R |

3.3 Obtención de las generaciones F₁ y F₂

Durante el verano de 2015 se realizaron las cruzas entre los materiales resistentes por susceptible y resistente por resistente en el área de plantas sanas del LANARET. Para las cruzas de resistente por susceptible se realizaron cuatro cruzas que implicaron al material Avocet y Urbina S2007 como progenitores femeninos susceptibles y a los genotipos Alondra, Orizaba y Valles como progenitores masculinos.

Se sembró en macetas de 20 cm de diámetro y 25 de altura con tierra esteril, se sembraron cinco semillas de cada progenitor en tres fechas de siembra para hacer coincidir la polinización. A la obtención de la F₁ se sembraron un par de plantas de cada cruza, fueron inoculadas con roya amarilla raza CMEX 14.25 para observar su reacción ante la enfermedad en estado de plántula.

En el caso de las cruzas de resistente por resistente se realizó utilizando a los progenitores Alondra F2014, Orizaba y Valles F2015 donde se realizaron sus posibles combinaciones (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cruzas de tres variedades de trigo harinero para determinar la genética de la resistencia a *P.striiformis* f. sp. *tritici* raza CMEX14.25.

| Cruzas | |
|----------------------------------|----------------------------------|
| Susceptible X Resistente | Resistente x Resistente |
| 1. -Avocet X Alondra F2014 | 1.- Alondra F2014 X Valles F2015 |
| 2.- Avocet X Valles F2015 | 2.- Alondra F2014 X Orizaba |
| 3.- Avocet X Orizaba | 3.- Orizaba X Valles F2015 |
| 4.- Urbina S2007 X Alondra F2014 | |

La generación F₁ de cada cruza se sembró de forma mateada en macetas en el invernadero de plantas sanas del LANARET durante el invierno de 2015/16, de las cuales se cosecharon 120 semillas las cuales dieron origen a la generación F₂ de cada una de las cruzas.

3.4 Incremento del inoculo

El inoculo utilizado fue la raza de roya amarilla CMEX14.25 proporcionada por el LANARET. Para incrementar la cantidad de urediniosporas proporcionadas, se inocularon charolas de 20x30cm con plántulas del material susceptible Morocco+Lr19, que fueron sembradas al voleo; cuando la hoja cotiledonal se encontraba completamente desarrollada, cada charola fue asperjada con esporas de roya amarilla suspendida en aceite mineral Sotrol 170.

Las plantas inoculadas se dejaron secar por un periodo de 20 minutos; después se pasaron a una cámara de rocío a una temperatura de 6°C por un periodo de 24 horas con humedad; después se trasladaron al invernadero correspondiente.

3.4.1 Recolección de esporas

Después de 15 días transcurrida la inoculación y siendo visibles las pústulas de roya amarilla, se procedió a la recolección de urediniosporas utilizando boquillas recolectoras conectadas a un compresor, almacenándose en capsulas de gelatina que fueron sometidas a refrigeración a -55°C para su conservación.

3.5 Evaluación de plántulas en generación F₂

La semilla de la F₂ fue sembrada bajo condiciones de invernadero para evaluar su resistencia en estado de plántula. Además de evaluar las cruza también se evaluaron a los progenitores de cada cruza.

El material genético F₂ fue sembrado en tres fechas diferentes durante el ciclo Primavera Verano de 2016, en cada fecha se realizó la siembra en charolas de plástico de 20x30 cm con 52 cavidades, colocando 2 semillas por cavidad a una profundidad de 1 cm aproximadamente. Las charolas fueron mantenidas en el invernadero a una temperatura de 20° C durante la noche y a 24° C durante el día.

Cuando las plántulas mostraban la segunda hoja desarrollada se procedió a su inoculación con urediniosporas de la raza CMEX14.25. Las urediniosporas fueron suspendidas en aceite mineral SOTROL 170, la concentración utilizada fue de 2-3 mg. Las plántulas fueron asperjadas de manera uniforme con un atomizador conectado a un compresor de aire. Transcurrido 20 minutos después de la inoculación se procedió a someter las charolas a una cámara con humidificador a una humedad relativa del 100% por un periodo de 16 horas (Figura 2). Posteriormente fueron colocadas en el invernadero de roya amarilla a una temperatura de 17° C hasta la aparición de las pústulas.

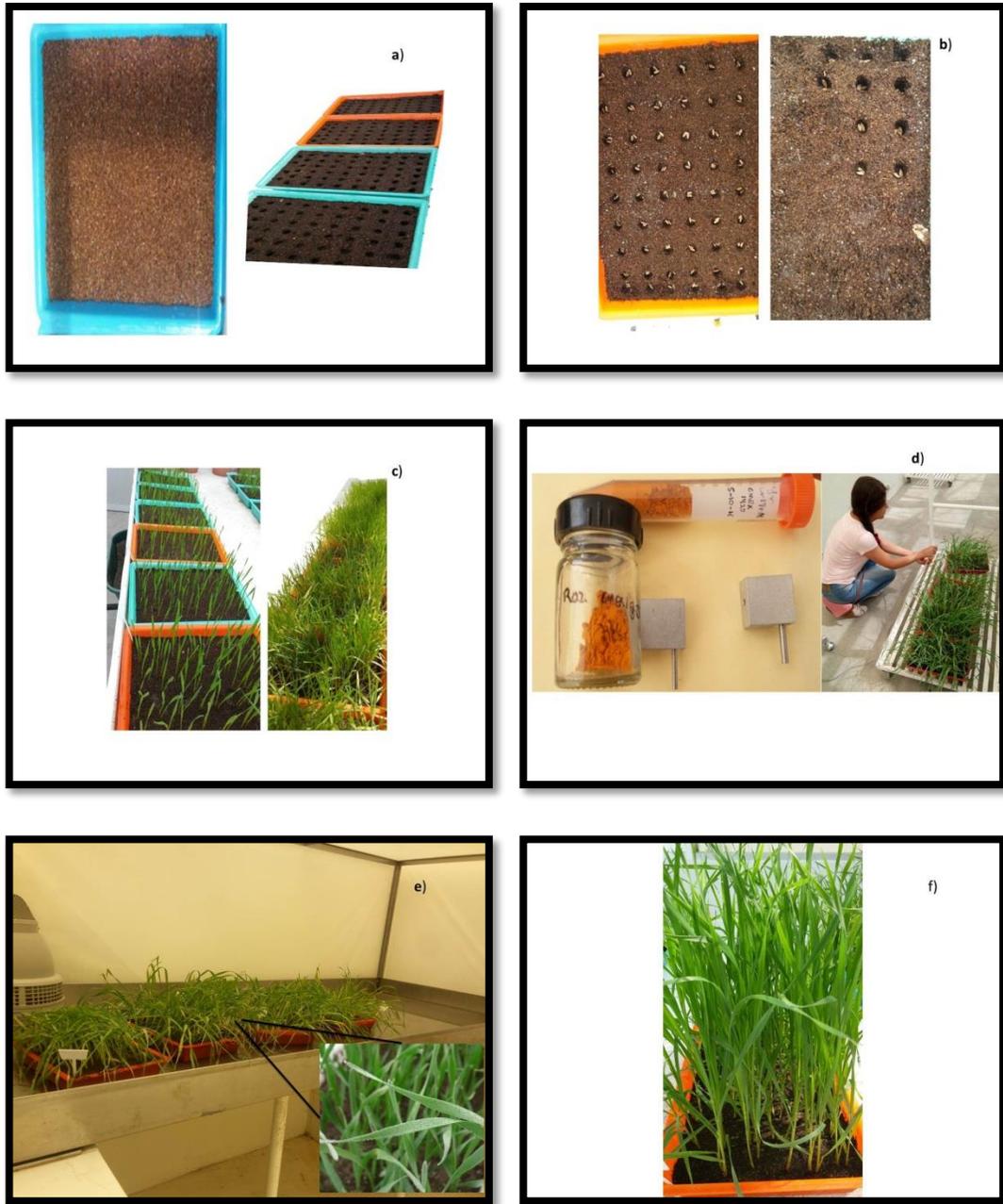


Figura 2. Evaluación de individuos F₂ en plántula con la raza CEMEX 14.25 de roya amarilla. a) Preparación de tierra y charolas. b) Siembra de material a evaluar. c) Crecimiento de plántulas. d) Inoculación con raza CEMEX 14.25 e) Cámara de roció. f) Plantas listas para la toma de notas de reacción.

La evaluación de la resistencia o susceptibilidad de las plantas F_2 fue realizada de forma visual, en base a la escala del 0 al 9 donde 0= resistente y 9= susceptible (Roelfs, 1992), tomando en cuenta las reacciones de infección producida por el patógeno en las hojas inoculadas (Figura 3). Las lecturas fueron llevadas a cabo alrededor de 15 días después de la inoculación, una vez que se presentaron los signos de la enfermedad.

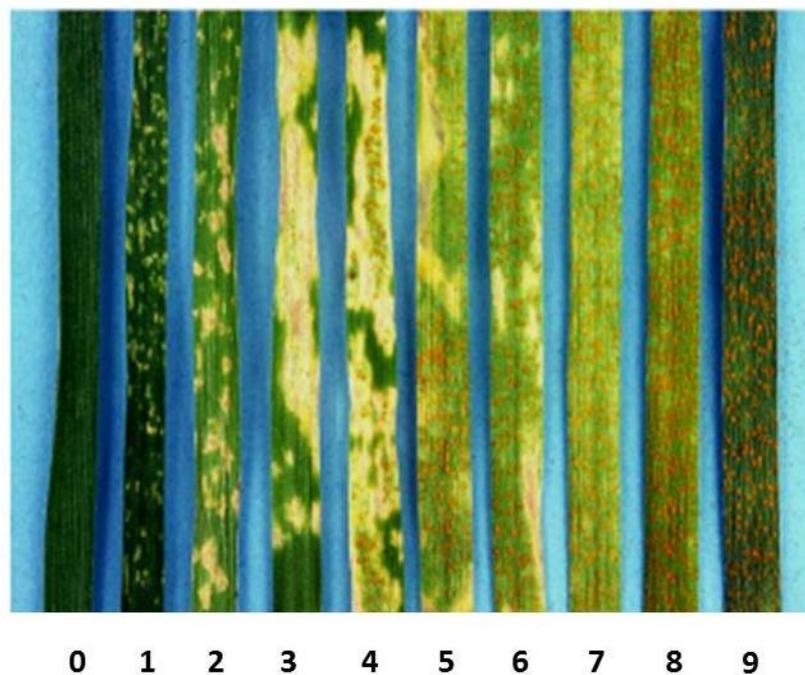


Figura 3. Escala del 0 al 9 para medir el tipo de infección (Huerta-Espino et al., 2014).

3.6 Frecuencias Esperadas

En cada cruce se registró el dato promedio de infección, las progenies se clasificaron en plantas resistentes (valores de 0,1 y 2), intermedios (valores de 3, 4, 5 y 6) y susceptibles (valores de 7, 8 y 9).

Una vez realizada la toma de datos, cada plántula fue clasificada en uno de los tres grupos indicados en el Cuadro 3 (Singh y Rajaram, 1994). Las frecuencias se utilizaron para determinar el número de genes basándose en que una proporción de 1/4 para un gen, 1/16 para dos genes, 1/64 para tres genes y 1/256 para cuatro genes (Villaseñor *et al.*, 2009). Se contabilizaron el número de plántulas de cada categoría por cruce para el análisis de datos.

Cuadro 3. Clasificación de plantas F₂ de acuerdo a su nivel de Infección.

| Grupo | Descripción |
|--------------|---|
| 1 | Plantas resistentes con una respuesta similar que el progenitor resistente. |
| 2 | Plantas susceptibles con una respuesta similar que el progenitor susceptible. |
| 3 | Plantas heterocigóticas con un nivel intermedio entre el progenitor resistente y el progenitor susceptible. |

3.7 Análisis de datos

Mediante la frecuencia de plántulas infectadas se evaluó el comportamiento de la genética de la resistencia en las diferentes progenies F₂. Los análisis se realizaron empleando la prueba de Ji-cuadrada (χ^2), Para el valor de tablas se usaron n-1 grados de libertad, donde n es el número de grupos de clasificación de familias F₃ (Infante-Gil y Zárate de Lara, 1990), con lo cual se logró determinar la bondad del ajuste de los datos obtenidos con los esperados en cada una de las cruzas (Strickberger, 1988).

Con el propósito de confirmar los resultados obtenidos de las plantas individuales provenientes de las cruzas realizadas y de observar el comportamiento de los resultados al incrementar el tamaño de muestra, se realizó el análisis de la suma total de plántulas de cada crusa.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las condiciones del invernadero fueron favorables para alcanzar altos niveles de infección en las plántulas susceptibles lo que facilitó su evaluación y clasificación de la F₁ y en los Individuos de la F₂ (Figura 4). Para analizar los datos, es necesario separar a los individuos en fenotipos, resistentes y susceptibles, bases utilizadas para determinar el número de genes de un genotipo, lo que permite saber si la resistencia esta conferida por uno dos o tres genes, basados en las leyes mendelianas. En este caso la evaluación fue realizada separando a los individuos resistentes y susceptibles, debido a que no se logró distinguir correctamente a las plantas segregantes.

En la evaluación de los progenitores, Avocet se localizó en los números 8-9, indicando que presentan un alto nivel de infección. Urbina S2007 presentó una moderada susceptibilidad a la infección al delimitarse en 7, mientras que el tipo de infección de Alondra F2014, Orizaba y Valles F2015 fue muy bajo ubicando centre 0 y 1 en la escala del 0 al 9.



Figura 4. Clasificación de plántulas de trigo. a) Plántulas resistentes. b) Plántulas con una respuesta intermedia. c) Plántulas susceptibles.

En la determinación del número de genes se tomó como referencia el número de plantas susceptibles, bajo el supuesto de que la virulencia del patógeno es recesiva y la resistencia en planta es dominante (Singh *et al.*, 2001).

Las cruza se realizaron resistentes por susceptibles, sin embargo en el caso de la cruza Avocet x Alondra F2014 se presentaron algunas dificultades para deducir el número de genes que confiere la resistencia de la variedad Alondra F2014. Una de las dificultades fue la discrepancia entre las proporciones observadas (datos no mostrados). En una planta se comprobó autofecundación, esto al no encontrar plantas resistentes en la F₂ al ser inoculadas con roya amarilla. En otra planta de la misma cruza se manifestaría que existen dos genes complementarios, el número de plantas resistentes fueron 50 mientras que 46 correspondieron a las susceptibles, ajustándose a una proporción 9:7, estos resultados concuerdan con la proporciones obtenidas por Mariscal y colaboradores en 2009, donde reportan una proporción 1:8:7 en avena para la cruza entre Chihuahua x Karma ($P= 0.90- 0.50$) en la generación F₃ indicando que Karma posee dos genes dominantes complementarios. Otros estudios del mismo autor (Mariscal *et al.*, 2007) indicaron que esta misma proporción en la cruza Atil C2000 x Syria 1740 indican la presencia de dos genes dominantes complementarios.

Sin embargo, de la misma cruza en otra planta se obtuvo un comportamiento para dos genes recesivos duplicados, manifestado en las proporciones correspondientes 7:9, de un total de 59 plantas observadas, 23 se mostraron resistentes y 36 plantas susceptibles.

Estas variaciones de las frecuencias observadas se convierten en una causa para que exista error en la propuesta de los genes que confieren resistencia para cada material. Debido a lo anterior se sumaron las dos evaluaciones que se realizaron individualmente para incrementar el número de individuos evaluados esperando que las proporciones esperadas se ajustaran mejor y así poder confirmar los resultados obtenidos.

Al ejecutar la suma se tuvieron un total de 73 resistentes y 83 susceptibles de un total de 155 plantas observadas, lo que también corresponde a una proporción 7:9 ($P=0.6$), para dos genes dominantes de resistencia. Estos datos no se tomaron como confiables para deducir el número de genes que posee la variedad Alondra F2014, por lo cual se recurrió a la cruce Urbina S2007 x Alondra F2014, para corroborar el número de genes que posee Alondra F2014, en base a que Urbina S2007 es susceptible a roya amarilla en estado de plántula.

Para el caso de las demás cruces de susceptible x resistente y resistentes x resistentes, se evaluaron diferentes plantas, sin embargo como no se observaron diferencias en las proporciones observadas se utilizaron las frecuencias de una sola planta o el total de individuos de diferentes plantas. Las frecuencias observadas, clasificadas en resistentes y susceptibles se muestran en el Cuadro 4.

En la cruce Urbina S2007 x Alondra F2014 se obtuvieron las frecuencias 180:11 correspondientes a resistentes: susceptibles, proporción que se ajustó a una relación 15:1 que indica que la variedad Alondra F2014 posee dos genes

de resistencia dominantes. Investigaciones similares de igual manera obtienen la proporción 15:1 como las cruzas que involucraron trigos sintéticos hexaploides (SH) SH2 x SH4 y SH4 x SH5 produjeron progenies que se ajustaron a dicha relación, tal como se espera para dos genes dominantes (Aguilar *et al.*, 2000).

Cuadro 4. Número de plantas resistentes y susceptibles observadas frente a la raza CEMEX14.25 de la roya amarilla.

| Cruza | Total de Plantas | Núm. de plantas observadas | | P.F. | X ² | Probabilidad |
|------------------------------|------------------|----------------------------|-----|-------|----------------|--------------|
| | | Res | Sus | | | |
| Urbina S2007 x Alondra F2014 | 191 | 180 | 11 | 15:1 | 0.005 | 0.85 |
| Avocet xValles F2015 | 165 | 131 | 34 | 3:1 | 0.42 | 0.5 |
| Avocet xOrizaba | 99 | 91 | 8 | 15:1 | 0.04 | 0.9 |
| Alondra F2014xValles F2015 | 101 | 100 | 1 | 63:1 | 0.003 | 0.99 |
| Alondra F2014 xOrizaba | 80 | 77 | 3 | 255:1 | 0.091 | 0.99 |
| Orizaba x/Valles F2015 | 195 | 193 | 2 | 63:1 | 0.006 | 0.8 |

Res= plantas resistentes, Sus= plantas susceptibles, P.F=proporción fenotípica

En este estudio la evaluación se realizó solo en plántula, no fue necesario realizar la evaluación en planta adulta ya que los niveles de resistencia se expresan en planta adulta, debido a que los genes de resistencia específica en plántula como en planta adulta se conserva (Hanson, 1958; Hsam y Zeller,

2002). Esto también lo demuestran los estudios realizados por Mariscal *et al.* (2009), donde las proporciones fenotípicas se mantuvieron en la misma proporción al evaluar plántulas y plantas adultas de Avena en generación F₃.

Las frecuencias observadas en plántula de la cruce Avocet x Valles F2015 fueron 122:34, resistentes: susceptibles que se ajustaron a una proporción de 3:1 (P=0.90) para un gen dominante, por lo que se deduce que Valles F2015 posee un gen dominante de resistencia. La relación fenotípica 3:1 ha sido reportada en la generación F₃ para la cruce Noio x Samayoa C2004 con proporción 1:2:1 y que indican que la variedad Samayoa C2004 posee un gen de resistencia dominante a la raza RTR de roya del tallo (Bárcenas *et al.*, 2016). Resultados similares los reportan para las variedades Atil C2000 x Cresso e inocular con la raza BBG/BN de roya de la hoja (Mariscal *et al.*, 2007). Mientras que Huerta *et al.*, (2011) mencionan que la resistencia a la roya de la hoja en los trigos cristalinos 'CWI52201' y 'CWI52271' es conferida por la presencia de un gen dominante al presentar la proporción 3:1.

En la cruce Avocet x Orizaba las frecuencias en plántula se ajustaron a una proporción 15:1, observando 91:8 plantas resistentes: susceptibles, lo que indicó que la resistencia en Orizaba está condicionada por dos genes dominantes. Esto concuerda con lo señalado por Huerta *et al.*, (2004), cuando la resistencia está condicionada por dos genes dominantes, se observaría una proporción de 15:1 resistentes por un susceptible.

Para poder corroborar el número de genes de resistencia que poseen los materiales Alondra F2014, Valles F2015 y Orizaba propuestos anteriormente,

basados en los resultados de las cruzas susceptibles x resistentes, se procedió a evaluar las cruzas entre los progenitores resistentes.

En el caso de las diferentes cruzas resistentes x resistentes se obtuvieron plantas susceptibles, esto indica la posibilidad que los genes de resistencia, en cada uno de los progenitores, sean diferentes para los tres casos. En estudios similares, el hecho de que las cruzas entre los materiales resistentes x resistentes no presenten plantas susceptibles indican que las variedades tienen un gen en común, Bárcenas *et al.* (2016) mencionan que en el caso de las cruzas entre las variedades resistentes x resistentes para roya del tallo no se encontraron familias susceptibles, lo que indica que las variedades tienen al menos un gen en común.

De acuerdo con datos expuestos anteriormente de las cruzas susceptible x resistente, se puede deducir que la variedad Alondra F2014 posee dos genes dominantes, mientras que Valles F2015 presenta un solo gen con dominancia completa de resistencia, por lo cual se esperaría que, al cruzar estos dos genotipos, la segregación expresada corresponda a la presencia de tres genes dominantes.

Las frecuencias observadas en la craza Alondra F2014 x Valles F2015 fueron 100:1 plántulas, resistentes: susceptibles, que se ajustaron a la proporción 63:1 ($P=0.99$), lo cual indica la presencia de tres genes dominantes de resistencia. Datos similares los reporta Mariscal *et al.* (2007), en la craza Syria 1740 x Creso donde observaron una proporción 123:4 que se ajusta a la relación

fenotípica 63:1 lo cual indica que la resistencia está condicionada por tres genes dominantes independientes.

Para el caso de la variedad Alondra F2014 y la línea Orizaba se encontró que ambas tienen dos genes dominantes de resistencia. Por lo cual al cruzar dichos trigos se prevé que las proporciones fenotípicas de la generación F₂ correspondan para cuatro genes dominantes. Las frecuencias obtenidas de Alondra F2014 x Orizaba fueron de 77:3 Plantas resistentes y susceptibles, proporción que se ajustó a la relación fenotípica 255:1 (P= 0.99), lo que comprueba que dicha cruce segrega para cuatro genes dominantes.

Al encontrar que Valles F2015 posee un gen dominante de resistencia, mientras que Orizaba tiene dos genes dominantes se esperaría que la proporción fenotípica de cruce de estos trigos resistentes se ajustara para la segregación de tres genes dominantes. Un solo gen que confiera resistencia es de gran importancia debido a que puede lograr mantener a salvo variedades de trigo ante el ataque de una nueva raza de roya amarilla. Por otro lado cuando se aumenta el número de genes también incrementa los niveles de resistencia e inclusive son más estables a través de los ambientes donde la roya es endémica (Huerta *et al.*, 2004).

Se encontró en la cruce Orizaba x Valles F2015, que el número de plantas observadas fueron 193:2, resistentes: susceptibles, lo que se ajusta a una proporción 63:1 (P=.8) con lo que se comprueba que la segregación es debida a tres genes dominantes, dos de Orizaba y uno de Valles F2015. Estas proporciones fenotípicas se han reportado en otros trabajos indicando la

presencia de tres genes. En estudios sobre roya de la hoja en trigo duro, encontraron que para la cruza 'Syria 1740 x Creso' donde se observó una proporción 123:4 que se ajusta a la proporción fenotípica 63:1, la cual indica que la resistencia está condicionada por tres genes dominantes independientes (Mariscal *et al.*, 2007).

Estos resultados obtenidos pueden en determinado momento corroborarse en un estudio en familias F₃, lo cual ayudaría a tener mayor seguridad en los resultados.

Los materiales evaluados presentan diferentes niveles de resistencia, los resultados indican que en general la resistencia de los genotipos evaluados es conferida por uno y dos genes o que es de herencia simple.

Con el cruzamiento de materiales resistentes por resistentes se logra incorporar genes que aumentan los niveles de resistencia de los genotipos. Por lo cual es necesario diversificar fuentes de resistencia para conjuntar valiosos genes, lo que no es un impedimento para obtener altos potenciales de rendimiento (Huerta y Singh, 2000). Un ejemplo, es el material Alondra F2014, que conjunta altos niveles de resistencia y rendimiento.

Este trabajo presentó mayor facilidad para propiciar la infección en las plantas de trigo ante el ataque de la roya amarilla al manipular las condiciones favorables para el hongo causante de la enfermedad. También fue cómodo para manipular las plántulas, realizando la investigación en un tiempo más corto que si se evaluara en una generación F₃ o en condiciones de campo abierto. Huerta

et al., (2004), mencionan que el análisis de genes mayores que condicionan la resistencia de plántulas es más fácil de evaluar y requiere de menos trabajo y espacio, pues se puede realizar en la generación F2 y en invernadero.

La búsqueda de nuevas fuentes de resistencia debe de ser un trabajo constante, buscando juntar varios genes de resistencia., por lo que la manera de conjuntar este número de genes es a través del mejoramiento genético (Singh *et al.*, 2000).

En un programa de mejoramiento genético y ante la constante amenaza de diversas razas de roya amarilla es necesaria la recombinación de materiales con la finalidad de encontrar fuentes de resistencia que permitan asegurar la sustentabilidad del trigo. Cabe resaltar la importancia que la resistencia que se debe de buscar es de tipo no específica también conocida como resistencia de desarrollo lento, lo que se ha comprobado es de tipo más durable.

IV. CONCLUSIONES

En el estudio de la herencia de los genotipos de trigo harinero se determinó que:

- La resistencia a roya amarilla a la raza CMEX14.25 de los trigos Alondra F2014 y Orizaba esta conferida por dos genes dominantes.
- La variedad Valles F2015 basa su resistencia a roya amarilla en un gen dominante.
- Los genes de resistencia determinados en los genotipos resistentes son diferentes unos de otros.
- Estos genes se pueden conjuntar en futuras variedades para asegurar una mayor durabilidad de la resistencia.

V. BIBLIOGRAFÍA

- Agrios, G. N. 2005. Plant pathology. 5th ed. Department of Plant Pathology University of Florida. pp. 922.
- Aguilar R. V. H., Singh, P. R., Molina G.J. y Huerta E. J. 2000. Prueba de similitud de genes de resistencia a la roya de la hoja en cinco trigos sintéticos hexaploides. *Agrociencia* 34(6): 741-746.
- Bárcenas S. D., Huerta E. J., Sandoval I.S., Villaseñor M. E.H., Leyva M.S.G., Mariscal A. L.A. y Michel A. A. 2016. Genética de la resistencia a la roya del tallo en genotipos de trigo cristalino. *Revista Fitotecnia Mexica* 39 (4): 379-384.
- Becerra V., Paredes M., Madariaga R., Bariana H. S., Mellado M., Rojo C. 2007. High genetic diversity in Chilean populations of wheat yellow rust (*Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* West.) assessed by RAPD and AFLP. *Australian Journal of Agricultural Research*, 525-531 p.
- Biffen R. H. 1905. Mendel's laws of inheritance and wheat breeding. *J. Agric. Sci.* 1:4-48.
- Boshoff W.H.P., Pretorius Z.A. and Niekerk B.D. van. 2002. Establishment, Distribution, and Pathogenicity of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in South Africa. *Plant disease* 86(5): 485-492.
- CANIMOLT. 2016a. Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo. El trigo en México. Disponible en: <http://www.canimolt.org/> consultado en abril de 2017.

- CANIMOLT. 2016b. Reporte estadístico 2014. Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo. 120 p.
- Caten, C.E. 1987 in Populations of plant pathogens: Their dynamics and genetics, concept of race in plant pathology, eds Wolfe, M.S., Caten C.E. (Blackwell, Oxford, UK), pp 21–37.
- Chen W; Wellings C; Chen X; Kang Z; Liu T. 2014. Wheat stripe (yellow) rust caused by *Puccinia striiformis* f. sp. tritici. *Molecular Plant Pathology* 15(5):433-46.
- Chen X., Moore M., Eugene A.M., Long D.L., Line R. F., Marshall D., Lee J. 2002 Wheat Stripe Rust Epidemics and Races of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici in the United States in 2000. *Plant disease* 86(1): 39-46.
- Chen X., Penman L. Wan A. and Cheng, P. 2010. Virulence races of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici in 2006 and 2007 and development of wheat stripe rust and distributions, dynamics, and evolutionary relationships of races from 2000 to 2007 in the United States. *Canadian Journal of Plant Pathology* 32(3):315-333.
- Chen Xianming (Editor) and Kang Zhensheng (Editor). 2017. *Stripe Rust*. Springer Netherlands; 1st ed. 719 pp.
- Chen, X. M. 2005. Epidemiology and control of stripe rust (*Puccinia striiformis* f. sp. tritici) on wheat. *Journal Plant Pathology* 27: 314-337.
- FAOSTAT, 2016. Estadísticas de la FAO. Estadísticas 2016 Trigo. Disponible en: www.fao.org/statistics/es Consultado en Abril de 2017.

- García E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Kopen (adaptación a condiciones de la República Mexicana) 3ª Edición México 86 p.
- García L.E., Huerta E.J., Villaseñor M.H.E., Rodríguez G.M.F. y Bárcenas S.D. 2014. Nuevas razas de roya amarilla (*Puccinia striiformis* f. Sp. *tritici*) en variedades comerciales de trigo harinero en los valles altos de México. In: memoria, XVII Congreso Internacional y XLII Nacional. Sociedad Mexicana de Fitopatología 2015.
- Hailu D. and Fininsa C. 2007. Epidemics of stripe rust (*Puccinia striiformis*) on common wheat (*Triticum aestivum*) in the highlands of Bale, southeastern Ethiopia. *Crop Protection* 26(8): 1209-1218.
- Hanson W. D. 1958. Minimum family sizes for the planning genetic experiments. *Agronomy Journal* 51:711-715.
- Hernández V.B., Alvarado P.J.I. y Valenzuela P. JA. 2011. Descripción de las variedades de trigo para el Valle de Mexicali, B.C y norte de Sonora. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias Centro de Investigación Regional Noroeste Campo Experimental Valle de Mexicali. Folleto técnico No. 18
- Herrera-Foessel S. A., R. P. Singh, J. Huerta E, J. Yuen, A. Djurle 2005 New genes for leaf rust resistance in CIMMYT durum wheat. *Plant Disease* 89:809-814.
- Hovmoller, M.S. and Justesen, A.F. 2007 Appearance of atypical *Puccinia striiformis* f. sp *tritici* phenotypes in north-western Europe. *Aust. J. Agric. Res.* 58: 518–524.

- Hsam S. L. K. and J. Zeller F. 2002. Breeding for powdery mildew resistance in common wheat (*Triticum aestivum* L.) In: The Powdery Mildews. A Comprehensive Treatise. R. R. Belanger, W. R. Bushnell, A. J. Dik, and T. L. w. Carver (Eds). American Phytopathological Society, St. Paul, MN. pp:219-238.
- Huerta E. J., Rodríguez C. M.E., Rodríguez G. M.F., Villaseñor M.H.E., Leyva M.S.G. y Espitia R.E. 2011. Variación genética de la resistencia a *Puccinia triticina* e. en trigos duros de Oaxaca, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 34(1): 35 – 41.
- Huerta E., J., Torres G. R., Rodríguez G. M. F., Villaseñor M.H. E. Leyva M.S. G.y Solís M.E. 2012. Resistencia a roya amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. tritici) en variedades de trigo harinero (*Triticum aestivum* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(5): 879-891.
- Huerta E.J., Singh R.P., Espitia R.E., Villaseñor M.H.E., Leyva M.S.G. 2004. Herencia de la resistencia a roya de la hoja en variedades de trigo para temporal. *Revista Fitotecnia Mexicana* 27(4):391-398.
- Huerta, E. J. y R. Singh. 2000. Las royas del trigo. In: el trigo de temporal en México. Villaseñor, M. H. E. y R. E. Espitia. SAGAR, INIFAP, CIR- CENTRO y CEVAMEX. México. pp 231-251.
- Huerta, E. J., M. F. Rodríguez, G., H. E. Villaseñor, M., R. P. Singh, E. Martínez, C., R. Hortelano, S. y E. Espitia, R. 2014. Descripción de las royas del trigo. Coatlinchán, Texcoco, México. INIFAP-CIRCE-CAVAMEX, Folleto Técnico No. 64. pp.32.

- Huerta-Espino, J. y Singh, R. P. 2000. Las Royas de Trigo. *In: El trigo de temporal en México.* Villaseñor, M. H. E. y Espitia, R. E. (Eds.) Secretaría de Agricultura, Ganadería y Desarrollo Rural (SAGAR), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigación Regional-Centro (CIR-CENTRO), Campo Experimental Valle de México (CEVAMEX). México. p. 231-249.
- Huerta E. J., Singh R.P. and Roelfs S.P. 2014. Rusts fungi of wheat *in: Fungi from Different Substrates*, Misra J.K., Tewari J.P., Deshmukh S.K and Vasvolgyi C. Editors, CRC. 217-259 p.
- Infante-Gil. S., y G. P. Zárate de Lara. 1990 Métodos estadísticos: un enfoque interdisciplinario. 2ª ed. Trillas. México, D.F. 643 p.
- Jin, Y., Szabo L. J. and Carson M. 2010. Century-Old Mystery of *Puccinia striiformis* Life History Solved with the Identification of *Berberis* as an Alternate Host. *Mycology* 100(5): 432-435.
- Line RF. 2002. Stripe rust of wheat and barley in North America: a retrospective historical review. *Annu Rev Phytopathology* 40:75–118.
- Line, R. F. and Chen, X. 1995. Successes in breeding for and managing durable resistance to wheat rusts. *Plant Disease* 79(12): 78-85
- Mariscal A. L. A., Huerta E. J., Villaseñor M. H. E., Leyva M. S. G., Sandoval I. S. y Benítez R. I. 2009. Genética de la resistencia a roya del tallo (*Puccinia graminis* f. sp. *avenae* Erikss. & Henning) en tres genotipos de avena (*Avena sativa* L.). *Agrociencia* 43: 869-879.

Mariscal A. L. A., Leyva M. S. G., Huerta E. J., Villaseñor M H. E. 2007. Genética de la resistencia a roya de la hoja (*Puccinia triticina* E.) en líneas elite de trigos duro. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30:33-38.

NCBI. 2017. National Center for Biotechnology Information. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/> (consultada Abril de 2016). Disponible en: <http://arctos.database.museum/name/Triticum%20sativum>

Peña B. R. J., Pérez H.P., Villaseñor M. H. E., Gómez V. M. M., Mendoza L. M. A. 2008. Calidad de la cosecha de trigo en México. Ciclo otoño-invierno 2006-2007. Publicación especial del CONASIST-CONATRIGO, México, D.F. 28p

Prescott, J.M., P.A. Burnett, Saari E.E., Ransom J., Bowman J., Milliano W., Singh R.P. y Bekele G. 1986. Enfermedades y plagas del trigo: una guía para su identificación en el campo. CIMMYT. México, D.F., México.

Ramírez V. J., Santa Rosa R. H., Villaseñor M. H. E., López H. E. Martínez C. E. y Espitia R. E. 2016. Evaluación de variedades y líneas uniformes de trigo harinero de temporal en Valles Altos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(3): 665-667.

Rapilly, F. 1979. Yellow rust epidemiology. *Annu. Rev. Phytopathology* 17:59-73.

Rodríguez G. M. F., Huerta E. J., Villaseñor M. H. E., Sandoval I. J. S. y Singh R.P. 2010. Análisis de virulencia de la roya amarilla (*Puccinia striiformis* f. sp. tritici) del trigo (*Triticum aestivum* L.) en los valles altos de México. *Agrociencia* 44(4): 491-502.

Rodríguez G. M. F., Huerta E. J., Villaseñor M. H.E. y Solís M.E. 2009. Virulencia de la roya amarilla del trigo en las principales zonas productoras de riego en México. *Agricultura técnica en México* 35(2):179-187.

Rodríguez, G. M. F, Huerta E. J., Villaseñor M. H. E., Solís M E. 2009. Virulencia de la roya amarilla del trigo en las principales zonas productoras de trigo. *Agricultura Técnica en México* 35(2): 179-187.

Rodríguez, G. M. F., Huerta E. J., Villaseñor M. H. E., Martínez C. E., Hortelano S.R. R. Leyva M. S.G. 2014. *Las Royas del Trigo en México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Valle de México (Desplegable técnica núm. 30).

Roelfs, A.P., Singh, R.P. y Saari, E.E. 1992. *Las royas del trigo: Conceptos y métodos para el manejo de esas enfermedades*. México, D.F: CIMMYT. 81 p.

Salazar-Gómez, M. 1992. La red nacional de investigación en ce-reales de grano pequeño. Organización actual y planes futuros. In: I Conferencia Nacional sobre la Producción de Trigo en México. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional del Noroeste. Cd. Obregón, Sonora, México pp: 35-47.

SIAP, 2015. *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Producción Agrícola*. Disponible en www.gob.mx/siap/ consultado en abril de 2017.

Singh R. P. and S. Rajaram. 1994. Genetics of adult plant resistance to stripe rust in ten spring bread wheats. *Euphytica* 72: 1-7.

- Singh R. P., Huerta E. J. and Rajaram, S. 2000. Achieving near-immunity to leaf and stripe rusts in wheat by combining slow rusting resistance genes. *Acta Phytopathologica et Entomologica Hungarica* 35: 133-139.
- Singh R. P., Huerta E.J., Roelfs A. P. 2002. The wheat rust. In: Bread Wheat. B C Curtis, S Rajaram, M H Gómez (eds). FAO. Roma, Italia. pp :246-271.
- Singh, R. P.; Huerta E. J. and William H. M. 2001. Resistencia durable a roya de la hoja y roya amarilla del trigo. In: estrategias y metodologías utilizadas en el mejoramiento de trigo un enfoque multidisciplinario. Man, M. K.; Díaz, A. M. and Castro, M. (Eds.). La estanzuela Uruguay 8-11 de Octubre. 109-117 pp.
- Solís M., E., Molina, G. J. D., Villaseñor M. H. E. y Sandoval I. S. 2002. Rendimiento de grano y resistencia a roya en poblaciones de trigo obtenidas mediante selección. *Revista Fitotecnia Mexicana* 25(1): 89-96.
- Solís M.E., Huerta E.J., Pérez H.P., Villaseñor, M.H.E., Ramírez R.A. y de la Cruz. G.M.L. 2016. Alondra F2014, nueva variedad de trigo harinero para el Bajío, México. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(5):1225-1229.
- Solís M.H., Huerta E.J., Pérez H.P., Ramírez, R. A., Villaseñor M.H.E., Espitia R.E. y Borodanenko A. 2008. Urbina S2007: nueva variedad de trigo harinero para la región "El bajío". *Agricultura técnica en México* 34(1): 113-118.
- Soomro U.A., Rahman M.U., Odhano E.A., Gul S. T. A. 2009. Effects of sowing method and seed rate on growth and yield of wheat (*Triticum aestivum*). *World Journal of Agricultural Science* 5: 159-162.

- Strickberger M. W. 1988. Genética. 3a ed. J. L. Ménsua (traducción). 1985. Omega. Barcelona, España. . 869 p
- Stubbs, R.W. 1988. Pathogenicity analysis of yellow (stripe) rust 01 wheat and its significance in a global context. Pp. 23-38 de N'w. Simmonds y S. Rajaram, eds. Breeding Strategies for Resistance to the Rusts 01 Wheat. CIMMYT: México, D.F.
- Stubbs. R., M.W. 1985. Stripe rust. pp 61-101. In: The Cereal Rust. Vol.2: Diseases, Distribution, Epidemiology and Control. W.R. Bushnell and A.P. Roelfs, (eds). Academic Press, Orlando F.L. 606.
- Villaseñor E.O.M., Huerta E.J., Leyva M.S.G., Villaseñor M.H.E., Singh R.P., Sandoval I.J.S. y Espitia R.E. 2009. Genética de la resistencia a roya amarilla en plantas adultas de trigo harinero. Revista Fitotecnia Mexicana 32(3): 217-223.
- Villaseñor M.H.E. y Espitia E.R. 2000. El trigo de temporal en México. Ed. E.H. Villaseñor Mir y E. Espitia R. Libro Técnico No. 1 INIFAP-CIRCE-CEVAMEX pp: 151-175.
- Villaseñor M.H.E., Hortelano S.R.R., Martínez C.E., Mariscal A.L.A., Leyva M.S.G. y Huerta E.J. 2012. Control químico de las enfermedades: una alternativa para la producción de trigo de temporal en Tlaxcala. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas 3(3): 595-600.
- Villaseñor M.H.E., Hortelano S.R.R., Martínez C.E., Pérez H.P., Huerta E.J., Espitia R.E., Moedano M.M.K y Ramírez V.J. 2014. Variedades de trigo recomendadas para los valles altos de México. Instituto nacional de investigaciones forestales,

agrícolas y pecuarias Centro de Investigación Regional Centro Campo Experimental Valle de México. Desplegable técnica Num.43.

Villaseñor, E. O. M., J. Huerta, E., S. G. Leyva, M., H. E. Villaseñor, M., S. Ravi, J. S. Sandoval, I. y Espitia R. E. 2009. Genética de la resistencia a roya amarilla en plantas adultas de trigo harinero. *Revista Fitotecnia Mexicana* 32 (3): 217-223.

Villaseñor, M. H. E. y E. Espitia, R. 2000. Mejoramiento genético del trigo para temporal. In: *El trigo de temporal en México*. Villaseñor M. H. E., Espitia R. E., (eds.). Chapingo, Estado de México, México, SAGAR, INIFAP, Campo Experimental Valle de México. Libro Técnico No. 1. Pp. 99-122.

Wan, A., Zhao, Z., Chen, X., He, Z., Jin, S., Jia, Q., Yao, G., Yang, J., Wang, B., Li, G., Bi, Y., and Yuan, Z. 2004. Wheat stripe rust epidemic and virulence of *Puccinia striiformis* f. sp. *tritici* in China in 2002. *Plant Disease* 88:896-904.

Zhang H. and D. R. Knott. 1990. Inheritance of leaf rust resistance in durum wheat. *Crop Science* 30:1218-1222.