



**COLEGIO DE POSTGRADUADOS**

**INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS**

**CAMPUS MONTECILLO**

**POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD**

**GENÉTICA**

**CARACTERIZACIÓN DE LA  
RESISTENCIA DE TRIGOS  
CRISTALINOS DE ETIOPÍA A  
LA ROYA DE LA HOJA EN  
MÉXICO**

**LAURA MARISA DELGADO SÁNCHEZ**

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL  
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

**DOCTORA EN CIENCIAS**

**MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO**

2021

La presente tesis titulada: CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA DE TRIGOS CRISTALINOS DE ETIOPÍA A ROYA DE LA HOJA EN MÉXICO realizada por la alumna: **Laura Marisa Delgado Sánchez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

DOCTORA EN CIENCIAS  
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD  
GENÉTICA

CONSEJO PARTICULAR

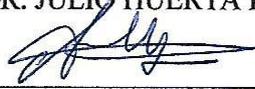
CONSEJERO

  
DR. IGNACIO BENTEZ RIQUELME

DIRECTOR DE TESIS

  
DR. JULIO HUERTA ESPINO

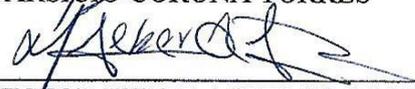
ASESOR

  
DR. KARIM AMMAR

ASESOR

  
DR. TARSICIO CORONA TORRES

ASESOR

  
DR. VICTOR HEBER AGUILAR RINCÓN

Montecillo, Texcoco, Estado de México, mayo de 2021

# CARACTERIZACIÓN DE LA RESISTENCIA DE TRIGOS CRISTALINOS DE ETIOPIÁ A ROYA DE LA HOJA EN MÉXICO

Laura Marisa Delgado Sánchez, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2021

## RESUMEN

El trigo cristalino se considera un cultivo mediterráneo tradicional. Etiopía es un posible centro de origen; sin embargo, parece ser un centro de diversificación. Las variedades procedentes de Etiopía pueden llegar a ser fuente importante de resistencia, ya que logran proporcionar nuevos alelos y se pueden utilizar para la mejora de genotipos en zonas productoras de trigo a nivel mundial. La roya de la hoja es una de las principales enfermedades del trigo cristalino en México, causada por el hongo *Puccinia triticina* E., que puede afectar al cultivo en todas las etapas de crecimiento. Por lo tanto, la formación de variedades resistentes es la tecnología más efectiva, y viable para el control de roya de la hoja mediante la evaluación, caracterización y comparación fenotípica y genotípica. Las evaluaciones realizadas en México de 194 genotipos (169 criollos y 25 mejorados) con las razas de roya de la hoja BBG/BPCG y BBG/BPCJ indicaron que 61 genotipos criollos y tres mejorados podrían ser fuente de resistencia a roya de la hoja, por su baja severidad final a ambas razas. Con la evolución de una nueva raza denominada BBG/BP-Cirno y al evaluar los mismos genotipos, se identificaron 76 resistentes (38 %) y 118 susceptibles (61 %) en estado de plántula; mientras que en planta adulta fueron 98 resistentes (50.5 %) y 96 susceptibles (49.5 %). Los genotipos resistentes tanto en plántula como en planta adulta (RPRPA) correspondieron al 27 %. Entre los genotipos susceptibles en plántula, el 23 % mostro resistencia de planta adulta (SPRPA). No es muy frecuente encontrar genotipos resistentes en plántula y susceptibles en planta adulta

(RPSPA); sin embargo, el 12 % de los genotipos fueron clasificados en esta categoría. Finalmente, un 38 % de los genotipos evaluados fueron susceptibles en plántula y planta adulta (SPSPA) los cuales carecen de valor agronómico inmediato desde el punto de vista de la resistencia. Aunque el trigo no es originario de México, el germoplasma mejorado mexicano actual, posee una base genética amplia. Es posible desarrollar variedades con resistencia durable al combinarse con las fuentes de resistencia identificadas en el presente estudio; entre los que destacan seis genotipos en los que se determinó la herencia de la resistencia. Los resultados del análisis genético indican que la resistencia de estos es de herencia simple condicionada por uno a tres genes.

**Palabras clave:** *Triticum turgidum*, *Puccinia triticina*, genes, resistencia, susceptibilidad.

# CHARACTERIZATION OF THE RESISTANCE OF CRYSTALLINE WHEATS FROM ETHIOPIA TO LEAF RUST IN MEXICO

Laura Marisa Delgado Sánchez, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2021

## ABSTRACT

The crystalline wheat is considered a traditional Mediterranean crop. Ethiopia is a possible center of origin; however, it appears to be a center of diversification. The varieties from Ethiopia can become an important source of resistance, as they manage to provide new alleles and can be used for genotype improvement in wheat producing areas worldwide. Leaf rust is one of the main diseases of crystalline wheat in Mexico, caused by the fungus *Puccinia triticina* E., which can affect the crop at all stages of growth. Therefore, the formation of resistant varieties is the most effective and feasible technology for rust control through phenotypic and genotypic evaluation, characterization and comparison. The evaluations carried out in Mexico of 194 genotypes (169 landraces and 25 improved) with the BBG / BPCG and BBG / BPCJ leaf rust races indicated that 61 landraces genotypes and three improved genotypes can be a source of resistance to leaf rust, for its low final severity to both races. With the evolution of a new race BBG / BP-Cirno and when evaluating the same genotypes, 76 resistant (38 %) and 118 susceptible (61 %) were identified in the seedling stage; while in the adult plant they were 98 resistant (50.5 %) and 96 susceptible (49.5 %).

Resistant genotypes both in seedlings and in adult plant (RPRPA) corresponded to 27 %. Among the susceptible genotypes in seedlings, 23 % showed adult plant resistance (SPRPA).

It is not very frequent to find resistant genotypes in the seedling and susceptible in the adult plant (RPSPA); however, 12 % of the genotypes were classified in this category.

Finally, 38 % of the evaluated genotypes were susceptible in seedlings and adult plants (SPSPA), which lack immediate agronomic value from the point of view of resistance. Although wheat is not native to Mexico, current mexican improved germplasm has a broad genetic base. It is possible to develop varieties with long lasting resistance when combined with the sources of resistance identified in the present study; among which six genotypes stand out in which the inheritance of resistance was determined. The results of the genetic analysis indicate that the resistance of these is of inheritance conditioned simple by one to three genes.

**Index words:** *Triticum turgidum*, genes, resistant, susceptibility.

## DEDICATORIA

A mis queridos padres **Leonila Sánchez Morales** y **Román Delgado Fonseca** por ser mis grandes ejemplos de fortaleza, paciencia, perseverancia, trabajo, por ser personas admirables, por ser mi apoyo incondicional, y las personas más importantes en mí vida.

Infinitas gracias.

A mis sobrinos **Ángel Sebastián Delgado Benítez** y **Miguel Ángel Delgado Benítez** por traer alegría, paz, felicidad y motivación a mí vida.

A mí hermano **Iván Delgado Sánchez** y **Alma Lilia Benítez Cerón** por su cariño y apoyo incondicional.

*Laura Marisa Delgado Sánchez*

## AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el financiamiento que se otorgó para realizar mis estudios de Doctorado.

Al Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, por el desarrollo académico y profesional que me brindó.

Al Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), en especial al Programa de Trigo Duro por las facilidades y el apoyo que se me brindó para la realización de la investigación.

Al Dr. Julio Huerta Espino por su paciencia, comprensión, apoyo, dirección personal y profesional. Por compartir su valioso tiempo conmigo. Mi admiración y respeto.

Al Dr. Ignacio Benítez Riquelme, por su tiempo, apoyo y consideración para la realización del proyecto.

Al Dr. Karim Ammar por permitirme la realización de mi investigación en el programa de Trigo Duro, por todas las facilidades que se brindaron.

Al Dr. Tarsicio Corona Torres por brindarme su amistad, comprensión y apoyo.

Al Dr. Víctor Heber Aguilar Rincón por compartir sus conocimientos y apoyo.

A la Dra. Carolina Saint Pierre por ser un apoyo incondicional, por su gran amistad e inmensa comprensión.

A la Dra. Ma. Cristina Guadalupe López Peralta por su inmenso apoyo, comprensión y paciencia.

A la Ingeniera Vania Xahil Téllez Arce por compartir sus conocimientos, y su valiosa amistad.

Al personal de Trigo Duro por todo el conocimiento y apoyo que me brindaron.

A mis amigos, compañeros y familiares por su apoyo y comprensión.

## CONTENIDO

<b>RESUMEN .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>v</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>vii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>viii</b>
<b>LISTA DE CUADROS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>INTRODUCCIÓN GENERAL .....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>6</b>
Objetivo general.....	6
Objetivos específicos .....	6
<b>HIPÓTESIS.....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE TRIGOS CRISTALINOS DE                   ETIOPÍA POR SU RESISTENCIA A ROYA DE LA HOJA EN                   PLÁNTULA Y PLANTA ADULTA EN MÉXICO.....</b>	<b>10</b>
1.1 RESUMEN .....	10
1.2 ABSTRACT.....	10
1.3 INTRODUCCIÓN .....	11
1.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	13
1.4.1 Material genético.....	13
1.4.2 Siembra de genotipos en plántula .....	14
1.4.3 Inoculación.....	14
1.4.4 Evaluación.....	14
1.4.5 Siembra de genotipos en planta adulta.....	15
1.4.6 Inoculación.....	15

1.4.7 Raza del patógeno .....	15
1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	16
1.6 CONCLUSIONES .....	19
1.7 LITERATURA CITADA .....	19
 <b>CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DE GENOTIPOS CRIOLLOS DE</b>	
<b>TRIGO CRISTALINO DE ETIOPÍA POR SU RESISTENCIA A</b>	
<b>ROYA DE LA HOJA EN MÉXICO.....</b>	
<b>2.1 RESUMEN .....</b>	<b>22</b>
2.2 ABSTRACT.....	23
2.3 INTRODUCCIÓN .....	23
2.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	27
2.4.1 Material genético.....	27
2.4.2 Siembra de genotipos .....	27
2.4.3 Razas del patógeno.....	27
2.4.4 Inoculación.....	28
2.4.5 Evaluación a la respuesta de la roya de la hoja en los 194 progenitores en CIMMYT-Batán y CIMMYT-CENEB .....	28
2.4.6 Clasificación de los genotipos.....	28
2.4.7 Determinación del progreso de la roya de la hoja.....	29
2.4.8 Análisis estadístico.....	29
2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	29
2.6 CONCLUSIÓN.....	35
2.7 LITERATURA CITADA .....	35

<b>CAPÍTULO III. ACCIÓN GÉNICA Y NÚMERO DE GENES QUE OTORGAN RESISTENCIA A ROYA DE LA HOJA EN LÍNEAS DE TRIGO CRISTALINO .....</b>	<b>39</b>
3.1 RESUMEN .....	39
3.2 ABSTRACT.....	39
3.3 INTRODUCCIÓN .....	40
3.4 MATERIALES Y MÉTODOS .....	42
3.4.1 Material genético:.....	42
3.4.2 Cruza de progenitores .....	43
3.4.3 Obtención de las generaciones filiales F1, F2, F3 y F4 .....	44
3.4.4 Siembra de las generaciones F3 y F4.....	44
3.4.5 Raza del patógeno .....	45
3.4.6 Inoculación.....	45
3.4.7 Evaluación de familias, F3 y F4.....	45
3.4.8 Frecuencias esperadas .....	46
3.4.9 Análisis genético .....	46
3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	46
3.6 CONCLUSIONES .....	51
3.7 LITERATURA CITADA .....	52
<b>DISCUSIÓN GENERAL .....</b>	<b>55</b>
Literatura citada .....	59
<b>CONCLUSIONES GENERALES .....</b>	<b>61</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>62</b>

## LISTA DE CUADROS

<b>Cuadro 2.1</b> Agrupación de los 194 genotipos de acuerdo con el nivel de infección y clasificación de Huerta et al. (2020) para las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ.....	<b>30</b>
<b>Cuadro 3.1</b> Progenitores resistentes criollos procedentes de Etiopía y el genotipo susceptible ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’ .....	<b>43</b>
<b>Cuadro 3.2</b> Cruzamientos para determinar la genética de la resistencia en cinco genotipos de trigo cristalino y el número de familias F3 y F4 evaluadas. .....	<b>44</b>
<b>Cuadro 3.3.</b> Distribución y frecuencias relativas de las familias F3.....	<b>47</b>
<b>Cuadro 3. 4.</b> Distribución y frecuencias relativas de las familias F4.....	<b>47</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.1** Número y porcentaje de genotipos, resultado de la evaluación en plántula y planta adulta. RPRPA: Resistente en Plántula-Resistente en Planta Adulta, SPRPA: Susceptible en Plántula-Resistente en planta Adulta, RPSPA: Resistente en Plántula-Susceptible en Planta Adulta, SPSPA: Susceptible en Plántula-Susceptible en Planta Adulta..... **17**
- Figura 2.1** Representación gráfica del porcentaje de los diferentes grupos formados de acuerdo con su nivel de resistencia. .... **31**
- Figura 2.2** Distribución de medias del ABCPE de roya de la hoja en los genotipos de trigo cristalino en respuesta a las razas BBG/BPCG (DMS= 84.05) y BBG/BPCJ (DMS= 74.08). .... **32**
- Figura 2.3** Genotipos en que disminuyó la severidad final cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ. .... **33**
- Figura 2.4** Genotipos en que aumentó la severidad final cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ. .... **34**

## INTRODUCCIÓN GENERAL

En el género *Triticum* pertenecen las plantas cultivadas y silvestres que se clasifican dentro del grupo de los trigos. Este género se constituye por especies diploides, tetraploides y hexaploides, dependiendo del número de genomas que constituyen su número básico duplicado de siete cromosomas (Huerta-Espino y Stokmand 2000).

*Triticum durum* (trigo duro, cristalino o macarronero) probablemente se originó en Egipto o cualquier otro país de la cuenca del mediterráneo mediante mutación en *T. dicoccum*, principalmente para el gen *QQ* que promueve o determina dureza de grano, glumas compactas y raquis quebradizo al gen alternativo *qq* que determina suavidad del grano, glumas más o menos sueltas y un raquis fuerte (Huerta-Espino y Skovmand 2000).

El trigo cristalino (*Triticum turgidum* ssp *durum*), tetraploide y con el genoma AABB (Huerta-Espino y Skovmand, 2000), es un alimento básico para la dieta humana que se convirtió en un importante cultivo comercial (Elias, 1995), y que proporciona el 23 % del suministro de energía de origen vegetal (Sentayehu *et al.*, 2004); es la base de alimentación de muchas culturas, ya que aporta altas cantidades fósforo, calcio, magnesio, silicio, vitaminas del grupo B y contenido energético (Reynolds *et al.*, 2014).

Es uno de los cereales que se adapta a la región mediterránea, pues se considera un cultivo tradicional, donde se concentra aproximadamente el 75 % de la producción mundial (Amadou, 2019) y representa un grupo importante de recursos útiles para el mejoramiento genético (Nachit, 200).

Un problema fitopatológico importante al que se enfrenta este cultivo es la roya de la hoja causada por el hongo *Puccinia triticina* E., la roya de la hoja puede afectar al cultivo en todas las etapas de crecimiento y los daños que genera son variables, por las diferencias en las condiciones climáticas, susceptibilidad de los genotipos y la presencia del inóculo (Adenow *et al.*, 1997). Los daños al follaje causan pérdidas hasta del 100 %

del rendimiento; sus infecciones tempranas disminuyen el número de granos por espiga, peso electrolítico y calidad del grano (Dubin y Rajaram, 1996). La roya de la hoja ocurre con mayor regularidad y en más regiones del mundo a diferencia de la roya del tallo (*Puccinia graminis*) o roya amarilla (*Puccinia Stritiformis*). Por lo tanto, *Puccinia triticina* E. es un patógeno importante en la producción del trigo en todo el mundo (Huerta-Espino *et al.*, 2011).

El control más económico, eficaz y ambientalmente seguro de esta enfermedad es mediante la resistencia genética. En el trigo la resistencia genética a los patógenos causantes de las royas se divide generalmente en resistencia horizontal y vertical (Singh y Rajaram 1992b).

La resistencia horizontal también se conoce como resistencia no específica general, cuantitativa de planta adulta, de campo o durable. La cual está bajo el control de muchos genes y cada uno de estos genes por separado es ineficaz para contrarrestar el efecto del patógeno y puede tener una función menor que la resistencia horizontal en la planta (Agrios, 1995). Esta resistencia de desarrollo lento de la roya de la hoja (*Puccinia triticina* E.) puede ser de tipo durable, se caracteriza por su efecto aditivo, tanto con genes de resistencia de desarrollo lento de la roya (Singh y Rajaram 1992b) como con genes de resistencia específica (German y Kolmer, 1992).

Algunas variedades vegetales son resistentes a algunas razas de un patógeno, pero en cambio son susceptibles a otras razas, dependiendo de la raza del patógeno que se utiliza para infectar a una variedad vegetal, esta puede ser resistente o susceptible a una determinada raza (Huerta y Singh, 2000).

La resistencia vertical, específica, cualitativa o diferencial permite distinguir entre las razas de un patógeno y se controla por uno o algunos genes (monogénica u oligogénica). Estos genes intervienen en una etapa importante de la interacción que se

establece entre el patógeno y la planta hospedante (Agrios, 1995). La mayoría de los genes de raza específica confieren un efecto mayor en la resistencia desde la etapa de plántula hasta la etapa de planta adulta; sin embargo, este tipo de resistencia es poco durable, ya que el patógeno puede evolucionar. (McIntosh *et al.*, 2017). Los genes de raza no específica confieren resistencia en planta adulta y sus efectos individuales son menores, pero cuando se conjuntan tres o más suman sus efectos y se heredan como una característica cuantitativa (Roelfs *et al.*, 1992).

Las variedades criollas de trigo cristalino de Etiopía se caracterizan por una variabilidad fenotípica significativa (Mengistu *et al.*, 2016), estabilidad de rendimiento incluso en malas condiciones de suelo (Hammer y Diederichsen, 2009) o exposición a condiciones climáticas adversas, tienen una base genética valiosa; y resistencia genética a ciertas enfermedades como *Erysiphe graminis*, *Puccinia triticina* spp. y Septoria; por lo tanto, es un grupo importante de recursos genéticos (Mengistu *et al.*, 2015)

Sin embargo, aunque la especie tetraploide de *Triticum*, es un cultivo importante en el mundo se considera a Etiopía como un posible centro de origen de esta especie; aunque, parece ser un centro de diversificación (Giunta *et al.*, 2007).

En México la producción de trigo cristalino representa el 29.79 % que satisface el consumo nacional, y también posiciona a México como el tercer exportador de este producto a nivel mundial. En el ciclo otoño-invierno 2020, la superficie sembrada fue de 448 mil 735 hectáreas (SIAP, 2020). Las entidades productoras de trigo en México son Sonora, Guanajuato, Michoacán y Baja California que en conjunto representan 80.4 % del total nacional; sin embargo, en el Noroeste de México se cultiva en condiciones de riego, específicamente en los Valles del Yaqui y del Mayo en el Estado de Sonora, y en los Valles del Carrizo y del Fuerte en el Estado de Sinaloa (SIAP, 2020).

A través del mejoramiento genético es posible incorporar genes que permitan mantener la resistencia a la roya de la hoja por periodos largos de tiempo (Solis-Moya *et al.*, 2013). En México en la Mixteca alta del Estado de Oaxaca se cultivaron trigos cristalinos criollos que se denominaron como “trigos ventureros”, que llegaron durante la colonia, y su posible origen es la Península Ibérica (Evenson y Lemarie 1998).

Presentaron variabilidad genética en su resistencia a la roya de la hoja a las razas actuales de *P. triticina*, por lo que pueden utilizarse con otros progenitores efectivos para incrementar los niveles de resistencia (Huerta *et al.*, 2011). Aunque el trigo no es originario de México, el germoplasma mejorado mexicano actual, posee una base genética amplia, y es posible desarrollar variedades con resistencia durable (Ponce-Molina *et al.*, 2018). En México y en Etiopía existe una especialización fisiológica en las poblaciones de *P. triticina.*, donde se ubican razas que preferentemente causan la roya de la hoja en trigos cristalinos (Huerta-Espino y Roelfs 1989).

La resistencia a la roya de la hoja del trigo cristalino en México permaneció efectiva hasta antes del 2001, pues solo existía la raza BBB/BN (Singh, 1991); pero, en el 2001 apareció una raza muy similar que indicaría la evolución de virulencia para *Lr11*; la respuesta de otras líneas diferenciales comprobó que fue una introducción de origen desconocido que venció la resistencia de ‘Altar C84’ (Singh *et al.*, 2004). La raza fue designada como BBG/BN que acopló de manera virulenta a más del 80 % de la colección de trigos cristalinos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), al igual que a la variedad ‘Altar C84’ que permaneció resistente por más de 20 años (Singh *et al.*, 2004; Huerta-Espino *et al.*, 2009).

Algunos genes *Lr* que se sabe están presentes en el trigo harinero, incluyen *Lr14a* (Herrera-Foessel *et al.*, 2008), *Lr3a* (Herrera-Foessel *et al.*, 2007) y *Lr27 + Lr31* (Huerta-Espino *et al.*, 2009), *Lr23* y *Lr33* que también se confirmaron en el trigo cristalino (Marais

*et al.*, 2005). Los genes que se identificaron en trigos cristalinos *Lr10*, *Lr23*, y *Lr72* en plántula y planta adulta son inefectivos a la raza BBG/BN que superó la resistencia de las variedades de trigo cristalino que se cultiva en México en el 2001 (Singh *et al.*, 2004).

Los genes de raza específica que ya no son efectivos son: *Lr3* vencido por la raza CBG/BPCG en la línea ‘Storlom’ (Huerta-Espino *et al.*, 2009); *Lr27+31* presentes en ‘Banamichi C2004’ y ‘Jupare C2001’ que se vencieron por la raza BBG/BP (Huerta-Espino *et al.*, 2009); *Lr61* inefectivo a la raza BBB/BNJQ (Delgado-Sánchez *et al.*, 2016), y recientemente el gen *LrCam* por la raza BBG/BPCJ presente en la variedad ‘Cirno C2008’ (Huerta-Espino *et al.*, 2017).

En México, existen siete razas: BBB/BNG, BBB/BNJ, BBG/BNC, BCG/BNC, BBG/BPC, CBG/BPC, y BBG/BPC-Cirno, y en la actualidad la más importante, ya que venció la resistencia de ‘Cirno C2008’ en el 2017 (Huerta *et al.*, 2017).

Por lo anterior, y con el objetivo de diversificar e identificar fuentes genéticas de resistencia a roya de la hoja en trigo cristalino se aborda un análisis de la resistencia genética a roya de la hoja en genotipos criollos de Etiopía.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

- Caracterizar, fenotípicamente genotipos de trigo cristalino en México (*Triticum Durum*) proveniente de Etiopía para resistencia a roya de la hoja (*Puccinia Triticina* E.).

### Objetivos específicos

- Evaluar fenotípicamente en campo 194 genotipos de trigo cristalino provenientes de Etiopía, de los cuales 169 son criollos y 25 mejorados, e identificar las mejores fuentes de resistencia a la roya de la hoja.
- Comparar la resistencia de los 194 genotipos de trigo cristalino en plántula bajo condiciones controladas en invernadero y planta adulta en el campo.
- Identificar el número de genes que confieren la resistencia a roya de la hoja en seis genotipos seleccionados por su resistencia.

## HIPÓTESIS

- La mayoría de los genotipos criollos provenientes de Etiopía son resistentes a la roya de la hoja en México.
- La resistencia que presentan los genotipos resistentes seleccionados es de herencia simple.

## LITERATURA CITADA

- Adenow Y., M. Hulluak, G. Bela and Tesemma (1997) Resistance and tolerance to leaf rust in Ethiopian tetraploid wheat landraces. *Plant Breeding* 116, 533-536.
- Agrios G. (1995) *Fitopatología*. Ed. Limusa. México. 838 p.
- Amadou T., S. T. Chiari, W. Legess, K. Seid-Ahmed, R. Ortiz, M. Ginkel, M. Filippo (2019) *Durum Wheat (Triticum durum Desf.): Origin, Cultivation and Potential Expansion in Sub-Saharan Africa*.
- Dubin H.J. and S. Rajaram (1996) Breeding disease-resistant wheat for tropical highlands and lowlands. *Annual Review of Phytopathology* 34: 503-516.
- Evenson R.E. and S. Lemaire (1998) Optimal collection and search for crop genetic resources. pp. 79–92. In: M. Smale (ed.) *Farmers, Gene Banks and Crop Breeding: Economic Analyses of Diversity in Wheat, Maize, and Rice*, Kluwer Academic Publishers, London.
- Elias E.M (1995) Durum wheat products. In *Durum Wheat Quality in the Mediterranean Region*; Di Fonzo, N., Kaan, F., Nachit, M., Eds.; CIHEAM: Zaragoza, Spain, Volume 22, pp. 23–31.
- Flor H. H (1971) Current status of the gene for gene concept. *Annual Review. Phytopathology* 9: 275-296.
- Giunta F., R. Pruneddu (2007) Trends since 1900 in the yield potential of Italian-bred durum wheat cultivars. *Eur J. Agron* 27:12-24.
- German S.E., J.A. Kolmer (1992) Effect of gene *Lr34* in the enhancement of resistance to leaf rust of wheat. *Theor. Appl. Gen.* 84:96-105.
- Hammer K. and A. Diederichsen (2009). Evolution, status and perspectives for landraces in Europe. In *Vetelainen M, Negri V. Maxted (eds.) European Landraces On-Farm Conservation, Management and Use. Biodiversity Technical Bulletin No. 15*. Rome Italy: Biodiversity International pp. 23-44.
- Herrera-Foessel S. A., R. P. Singh, J. Huerta-Espino, H. M. William, V. Garcia, A Djurle, J. Yuen (2008) Identification and molecular characterization of leaf rust resistance gene *Lr14a* in durum wheat. *Plant Dis.* 92:469-473.
- Herrera-Foessel S., R.P. Singh, J. Huerta-Espino, H. William, G. Rosewarne, G, A. Djurle, and J. Yuen (2007) Identification and mapping of *Lr3a* and a linked leaf rust resistance gene in durum wheat. *Crop Sci.* 47:1459- 1466.
- Huerta-Espino J. and A. P. Roelfs (1989) Physiological specialization of leaf rust on durum wheat. *Phytopathology* 79: 1218.
- Huerta E. J. y R.P. Singh (2000) Origen, botánica y taxonomía del trigo. In: *el trigo de temporal en México*. Villaseñor, M. H. E. y Espitia, R. E. (Eds.). SAGARPA, INIFAP. CIR-CENTRO y CEVAMEX, México. 231-259 pp.

- Huerta E. J. y B. Skovmand (2000) Origen, botánica y taxonomía del trigo. In: el trigo de temporal en México. Villaseñor, M. H. E. y Espitia, R. E. (Eds.). SAGARPA, INIFAP. CIR-CENTRO y CEVAMEX, México. 25-38 pp
- Huerta E.J., R.P. Singh, E. Espitia R, E. Villaseñor, S. G. Leyva (2004) Herencia de la resistencia a roya de la hoja en variedades de trigo de temporal. Rev. Fitotec. Mex. Vol. 27 (4):391-398,2004.
- Huerta-Espino J., R.P, Herrera-Foessel S.A, Perez-Lopez J.B, Figueroa-López P (2009) First detection of Virulence in *Puccinia triticina* to Resistance Genes *Lr27+Lr31* present in durum Wheat in Mexico. Plant Disease. 93:110.
- Huerta-Espino J., M. E. Rodríguez, E. Villaseñor, S. G. Leyva, E. Espitia (2011) Variación genética de la resistencia a *Puccinia triticina* E. en trigos cristalinos de Oaxaca, México. Rev. Fitotecnia Mexicana. Vol. 34 (1): 35-41.
- Huerta-Espino J., R. P. Singh, S. Germán, B. D. McCallum, R. F. Park, W. Q. Chen, S. C. Bhardwaj, and H. Goyeau (2011) Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. Euphytica 179:143-160.
- Huerta-Espino J., H.E. Villaseñor-Mir, R.P. Singh, J.B. Perez-López, K. Amar, E. García-León, E. Solís-Moya (2017) Evaluation of lines and varieties of durum wheat to the leaf rust race BBG/BP-Cirno caused by *Puccinia triticina* E. that defeated the resistance of Cirno C2008. Mexican Journal of Phytopathology 35: S2017 34 p.
- McIntosh R. A., J. Dubcovsky, W. J. Rogers, C. Morris and X. C. Xia (2017) MacGene 2017: catalogue of gene symbols for wheat. KOMUGI-Wheat Genetic Resource Database. National Bioresource Project. Kyoto, Japan.
- Marais G. F., Z. A. Pretorius, C. R. Wellings, B. Mc Callum, A. S. Marais (2005) Leaf rust and stripe rust resistance genes transferred to common wheat from *Triticum dicoccoides*. Euphytica 143:115-123.
- Mengistu D., Y. Afeworki, C and Pe M (2015) Ethiopian durum wheat landraces harbor resistant genotypes for terminal drought adaptation. In: Gimany G. Amanuel Z, Habtam T. Dereje A, Tsehaye A. Ayele B, Tesfaye N. and Goitom (eds.) Improving Food Security in the Face of Climate Change in Africa. Proceeding of the international conference. 13-15 July, 2015. Institute of Climate and Society Makelle University, Mekelle, Ethiopia.
- Mengistu D. and P. M (2016) Revisiting the ignored Ethiopian durum wheat (*Triticum turgidum* var. *durum*) landraces for genetic diversity exploitation in future wheat breeding programs: Journal of Plant Breeding and Crop Science 8:45-59.
- Nachit M. (2000) ICARDA germplasm program. Annual report for Durum wheat germplasm improvement for increased productivity, yield stability and grain quality n West Asia and North Africa. 125-152.
- Ponce-Molina L., J. Huerta-Espino, R. P. Singh, B.R. Basnet, G. Alvarado, M.S. Randhawa, C. X. Lan, V. H. Aguilar-Rincón, R. Lobato-Ortiz and J.J. García-Zavala (2018) Characterization of leaf rust and stripe rust resistance in spring wheat “Chilero”. Plant Disease 102:421-427.

- Roelfs A. P., P. Singh y E. E. Saari (1992) Las royas del trigo: Conceptos y Métodos para el Manejo de esas Enfermedades en México, D.F. CIMMY. 81p.
- Reynolds M. P., R. Trethowan., J. Crossa, M. Vargas, y K. D. Sayre (2014) Physiological factors associated with genotype by environment interaction wheat. *Field Crops Research* 75: 140-141.
- Rodríguez-García, M. F., J. Huerta-Espino, y H. E. Villaseñor-Mir (2009) Virulencia de la roya amarilla de trigo en las principales zonas productoras de riego en México, INIFAP. CIR-CENTRO y CEVAMEX, México. pp: 20-31.
- Sentayehu A. S. Chebotar, X. Huang, M. Roder and A. Borner. Genetic diversity in Ethiopia hexaploid and tetraploid wheat germplasm assessed by microsatellite 7 markers (2004) *Genetic Resources and Crop Evolution* 51:559-557.
- SIAP, Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera (2020) Anuario estadístico de la producción agrícola. Secretaria de Agricultura, Ganadería Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Ciudad de México. [http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola\\_siap\\_gb/icultivo/index.jsp](http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/icultivo/index.jsp) (febrero, 2020)
- Singh, R.P (1991) Pathogenicity variations of *Puccinia recondita* f.sp. tritici and *P. graminis* l.sp. tritici in wheat-growing areas of Mexico during 1988 and 1989. *Plant. Dis.* 75:790-794.
- Singh R. P. S. Rajaram (1992b) Genes for resistance to *Puccinia recondita* f. sp. Tritici in 73 Mexican bread wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. In: *Cereal Rusts and Mildew Conf.* F. J. Zeller, G. Fishbeck (eds). Sept. 8-11. 1992. Weihenstephan/Germany, *Vortrage fur Pflanzenzuchtung* 24:211-213.
- Singh R. P. and H. J. Dubin (1997) Sustentable control of wheat diseases Mexico. In: *Primer Simposio Internacional de Trigo Memorias.* 7-9 de abril de 1997. Cd. Obregón, Sonora. pp: 93-102.
- Singh R. P., J Huerta-Espino, W. Pfeiffer, P. Figueroa-López (2004) Occurrence and impact of a new leaf rust race on durum wheat in Northwestern Mexico from 2001 to 2003. *Plant Dis.* 88:703-708.
- Solis-Moya E., J. Huerta-Espino, M.F. Rodríguez-García, H.E. Villaseñor-Mir, E. Espitia-Rangel, L. Ledesma-Ramírez y M.P. Suaste-Franco (2013) Resistencia de la roya de la hoja en variedades de trigo (*Triticum* spp. L) adaptadas a el bajío, México. *Agrociencias* 47:457-469.

# CAPÍTULO I. CARACTERIZACIÓN DE TRIGOS CRISTALINOS DE ETIOPIA POR SU RESISTENCIA A ROYA DE LA HOJA EN PLÁNTULA Y PLANTA ADULTA EN MÉXICO

## 1.1 RESUMEN

Con el fin de identificar los genotipos resistentes, se hicieron evaluaciones en plántula y planta adulta de 194 genotipos de trigo cristalino procedentes de Etiopía en invernadero y campo respectivamente con la raza BBG/BP-Cirno. Entre los genotipos evaluados, se identificaron en plántula 76 resistentes (38 %) y 118 susceptibles (61 %), mientras que en planta adulta 98 (50.8 %) de los genotipos evaluados fueron resistentes y 96 susceptibles (49.5 %). De los genotipos resistentes en plántula, 52 permanecieron resistentes en planta adulta y 24 fueron susceptibles. Sin embargo, de los genotipos susceptibles en plántula 73 (37 %) permanecieron susceptibles, mientras que 45 (23 %) mostraron resistencia de planta adulta. Los 52 genotipos criollos y seis genotipos mejorados resistentes tanto de plántula como planta adulta identificados pueden servir como fuentes de resistencia adicional en el programa de mejoramiento de trigos cristalinos y así diversificar las fuentes de resistencia a la roya de la hoja.

**Palabras clave:** *Puccinia triticina* Eriks, *Triticum turgidum* var. *durum*, criollos, resistencia, susceptibilidad.

## 1.2 ABSTRACT

With the purpose of identifying the resistant genotypes, evaluations were made in seedlings and adult plant of 194 genotypes of crystalline wheat from Ethiopia in greenhouse and field respectively with the race BBG / BP-Cirno. Among the genotypes evaluated, were identified in seedling 76 resistant (38 %) and 118 susceptible (61 %), while in adult plant 98 (50.8 %) of the genotypes evaluated were resistant and 96 (49.5 %) susceptible. Of the resistant genotypes in seedlings, 52 remained resistant in adult

plants and 24 were susceptible. However, of the susceptible genotypes in seedlings 73 (37 %) remained susceptible, while 45 (23 %) showed resistance from the adult plant. The 52 landraces genotypes and six improved resistant genotypes for both seedling and adult plant identified can serve as sources of additional resistance in the crystal wheat breeding program and thus diversify sources of resistance to leaf rust.

**Index words:** *Puccinia triticina* Eriks, *Triticum turgidum* var. *durum*, landraces, resistant, susceptibility.

### 1.3 INTRODUCCIÓN

La roya de la hoja causada por el hongo *Puccinia triticina* E., es una de las principales enfermedades del trigo cristalino en México.

A través del mejoramiento genético se pueden incorporar y combinar genes de resistencia de plántula y planta adulta, que permiten mantener la resistencia a roya de la hoja, por periodos largos de tiempo y así obtener una resistencia más duradera (Solis-Moya *et al.*, 2013).

Las enfermedades como las royas que siguen un patrón de herencia Mendeliana que se pueden controlar genéticamente por la presencia de uno o varios genes y se define como resistencia verdadera, que a su vez se divide en horizontal y vertical (Singh y Dubin, 1997). La resistencia genética a las royas en trigo se puede lograr a través de la selección de genotipos con características de resistencia adecuados, es decir con genes de resistencia de herencia simple. Se conoce como resistencia de plántula, vertical, de raza específica o monogénica (Huerta *et al.*, 2002).

Actualmente se usa el termino de resistencia en todas las etapas de desarrollo de la planta, donde la selección es relativamente fácil en generaciones tempranas, y se usa contra patógenos altamente especializados (Parlevliet y Zadoks, 1997).

Algunas variedades son resistentes a ciertas razas de un patógeno, pero son susceptibles a otras razas de este. Por lo tanto, este tipo de resistencia en las plantas permite diferenciar entre las razas de un patógeno y su efectividad o ineficiencia contra ciertas razas específicas del mismo (Agrios, 1980).

La resistencia vertical o específica, por lo general, se controla por uno o algunos genes que al parecer controlan una etapa importante de la interacción que se establece entre el patógeno y la planta hospedante. En general este tipo de resistencia inhibe el establecimiento inicial del patógeno, limita su desarrollo y por tanto al inoculo inicial (Parleviet y Zadoks, 1997).

Por otro lado, la resistencia horizontal, parcial, o de infección lenta o resistencia de raza no específica, generalmente es asociada con la resistencia durable y referida comúnmente como resistencia de planta adulta porque se expresa con un desarrollo lento de la enfermedad en el campo, comparativamente con un testigo susceptible (Herrera-Foessel *et al.*, 2014).

Este tipo de resistencia está bajo el control de varios genes, y cada uno de estos por separado, es ineficaz para contrarrestar el efecto del patógeno y puede tener una función menor en la resistencia horizontal total de la planta (Agrios, 1980).

Por lo tanto, la resistencia horizontal no evita que las plantas sean infectadas, sino que retarda el desarrollo de la enfermedad y de las epifitas.

Algunos genes *Lr* que se sabe están presentes en el trigo harinero, incluidos *Lr14a* (Herrera-Foessel *et al.*, 2008), *Lr3a* (Herrera-Foessel *et al.*, 2007) y *Lr27 + Lr31* (Huerta-Espino *et al.*, 2009), *Lr23* y *Lr33* también se confirmaron en el trigo cristalino. Si bien son efectivos para BBG/BN (Marais *et al.*, 2005), estos genes que se mencionan no son efectivos para las razas *Puccinia triticina* E., en trigo harinero (McIntosh *et al.*, 1995). También se identificaron dos genes de resistencia adicionales, conocidos solo en el trigo

cristalino efectivos para la raza BBG/BN: *Lr61* en ‘Guayacán INIA’ y un gen no designado en ‘Camayo’ (Herrera-Foessel *et al.*, 2008).

Los genes identificados en trigos cristalinos *Lr10*, *Lr23*, y *Lr72* en plántula y planta adulta son inefectivos a la raza BBG/BN que superó la resistencia de las variedades de trigo cristalino cultivados en México en el 2001 (Singh *et al.*, 2004; Solis-Moya *et al.*, 2013).

Otros genes de raza específica que ya no son efectivos son: *Lr3* vencido por la raza CBG/BPCG en la línea ‘Storlom’ (Huerta-Espino *et al.*, 2009); *Lr27+31* presentes en ‘Banamichi C2004’ y ‘Jupare C2001’ que fueron vencidos por la raza BBG/BP (Huerta-Espino *et al.*, 2009); *Lr61* inefectivo a la raza BBB/BNJQ (Delgado-Sánchez *et al.*, 2016), y recientemente el gen *LrCam* por la raza BBG/BPCJ presente en la variedad ‘Cirno C2008’ (Huerta-Espino *et al.*, 2017).

Algunos de los genotipos de trigos cristalinos que se cultivan en México son resistentes a la roya de la hoja en todas las etapas de crecimiento por la presencia del gen *Lr14a* entre otros no identificados, para el cual aún no existe virulencia en México entre las razas que preferentemente atacan a trigos cristalinos (Huerta-Espino *et al.*, 2010); aunque ya se reportó virulencia para *Lr14a* en otros países (Goyeau *et al.*, 2006).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio fue evaluar y comparar la resistencia de 194 genotipos de trigo cristalino provenientes de Etiopía en plántula bajo condiciones controladas en invernadero y planta adulta en el campo.

## **1.4 MATERIALES Y MÉTODOS**

### **1.4.1 Material genético**

Se evaluaron 194 genotipos de trigo cristalino procedentes de Etiopía, que se establecieron en México para la selección de progenitores a la roya de la hoja en el ciclo 2016-2017 en los invernaderos de CIMMYT-Batán Texcoco, Estado de México. Por la

aparición de una nueva raza del patógeno se continuo su evaluación en la estación experimental CIMMYT-CENEB Cd. Obregón, Sonora en el ciclo 2017-2018.

#### **1.4.2 Siembra de genotipos en plántula**

Para su evaluación en plántula se sembraron los 194 genotipos de trigo cristalino y 48 genotipos diferenciales de roya de la hoja en los invernaderos de CIMMYT-Batán Texcoco, Estado de México en el ciclo 2016-2017.

Los genotipos se sembraron en charolas de plástico de 20 cm de largo x 30 cm de ancho x 6 cm de profundidad en una mezcla de sustrato (tierra + turba “peat moss” proporción 1:1). Se marcaron 48 orificios de 1 cm de diámetro x 2 cm de profundidad con una plancha de acero de 8 hileras y 6 columnas. Se sembraron diez semillas de cada uno de los genotipos. Las charolas se etiquetaron y colocaron en invernadero a una temperatura de  $18\pm 2^{\circ}\text{C}$  durante la noche y  $20\pm 2^{\circ}\text{C}$  en el día. Las plántulas se fertilizaron con la fórmula 17-17-17 (N-P-K) disuelta en agua al aplicar 125 ml por charola.

#### **1.4.3 Inoculación**

Se realizó la inoculación 10 días después de la siembra, cuando se extendió por completo la hoja primaria, mediante aspersión foliar de las plántulas con una suspensión de urediniosporas en aceite mineral Soltrol®170 (Chevron Phillips Chemical Company LP) de la raza BBG/BP-Cirno. Una vez que las plantas se inocularon, se dejaron secar por 20 min y luego se colocaron por 16h en una cámara húmeda con humidificador (Hydrofogger, H<sub>2</sub>OTTEK, Monterrey, México) al 100 % de humedad relativa, posteriormente las plántulas se trasladaron al invernadero donde se mantuvieron entre 20 y 24°C de temperatura hasta la aparición de los signos de la enfermedad.

#### **1.4.4 Evaluación**

La infección se evaluó a los 9 y 10 días después de la inoculación, mediante la escala de 0 a 4 propuesta por Roelfs et al. (1992); en la que los genotipos con tipo de

infección de 0 a 2 se consideran resistentes mientras que los genotipos con tipo de infección 3-4 se identificaron como susceptibles.

#### **1.4.5 Siembra de genotipos en planta adulta**

Los mismos genotipos fueron sembrados en CIMMYT-CENEB durante el invierno 2017-2018 en un surco sencillo de 1.5 m sobre camas separadas a 80 cm con 5 g de semilla y 50 cm de separación entre bloques. El diseño experimental fue de Bloques completos al azar con tres repeticiones.

#### **1.4.6 Inoculación**

Para inducir la epidemia de los lotes donde se sembraron los trigos cristalinos en CIMMYT-CENEB, se sembró la variedad de trigo ‘Cirno C2008’ en el 2017 como bordo que actuó como fuente de dispersión del inóculo del patógeno, y como testigos susceptibles ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’.

Se inoculó con la raza BBG/BPC-Cirno respectivamente en una concentración  $1 \times 10^6$  esporas/mL, en aceite mineral Soltrol<sup>®</sup> 40 días después de la siembra y se roció totalmente a las hojas de las plantas. A la segunda y tercera semana se inocularon nuevamente los bordos para asegurar el establecimiento del hongo.

#### **1.4.7 Raza del patógeno**

Para ambas evaluaciones (plántula y planta adulta) se utilizó una de las razas que preferentemente atacan trigos cristalinos. La raza BBG/BP-Cirno que venció la resistencia de la variedad ‘Cirno C2008’ (Huerta *et al.*, 2017).

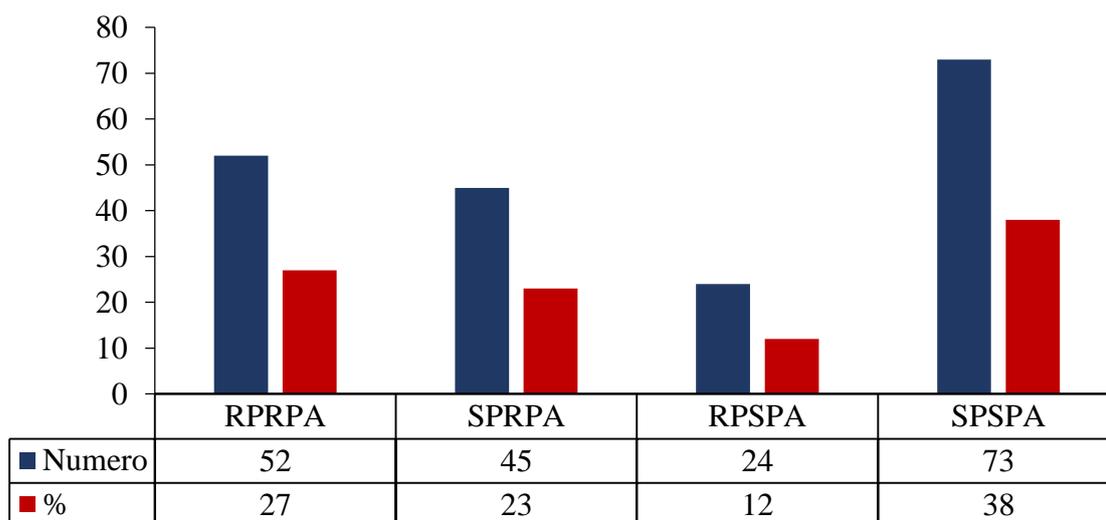
La fórmula de avirulencia/virulencia de esta raza es: *Lr1, Lr2a, Lr2b, Lr2c, Lr3, Lr3bg, Lr3ka, Lr9, Lr13, Lr14a, Lr15, Lr16, Lr17, Lr18, Lr19, Lr21, Lr24, Lr25, Lr26, Lr28, Lr29, Lr30, Lr32, Lr36, Lr61 /Lr10, Lr11, Lr12, Lr14b, Lr20, Lr23, Lr27, Lr31, Lr33, Lr72, LrCam* (Singh *et al.*, 2004; Huerta *et al.*, 2017).

## 1.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la evaluación de los genotipos en estado de plántula a la raza BBG/BP-Cirno se identificaron 76 genotipos resistentes que equivalen al 39 % y 118 susceptibles equivalentes al 61 % restantes; mientras que en planta adulta fueron 98 resistentes (50.8 %) y 96 (49.5 %) susceptibles casi en una proporción 1:1. Entre los genotipos que mostraron resistencia en plántula, 53 permanecieron resistentes en planta adulta y 23 fueron susceptibles. De los genotipos susceptibles en plántula 53 permanecieron susceptibles en planta adulta, mientras que 45 mostraron resistencia de planta adulta.

Los resultados de la evaluación de las líneas diferenciales para roya de la hoja, solo se usó para verificar la pureza de la raza y la correspondencia en virulencia a la variedad 'Cirno C2008'.

Una vez que los genotipos se evaluaron por su resistencia en plántula y planta adulta, estos se agruparon de acuerdo con las siguientes categorías: Resistente en Plántula-Resistente en Planta Adulta (RPRPA), Susceptible en Plántula-Resistente en Planta Adulta (SPRPA), Resistente en Plántula-Susceptible en Planta Adulta (RPSPA), Susceptible en Plántula-Susceptible en Planta Adulta (SPSPA) como se indica en la Figura 1.1.



**Figura 1.1 Número y porcentaje de genotipos, resultado de la evaluación en plántula y planta adulta. RPRPA: Resistente en Plántula-Resistente en Planta Adulta, SPRPA: Susceptible en Plántula-Resistente en planta Adulta, RPSPA: Resistente en Plántula-Susceptible en Planta Adulta, SPSPA: Susceptible en Plántula-Susceptible en Planta Adulta.**

Los genotipos que contarón con resistencia en plántula y resistencia en plántula adulta (RPRPA) corresponden al 27 %. Los resultados revelaron que los genes de resistencia en plántula fueron efectivos también en planta adulta en evaluaciones en campo (Huerta *et al.*, 2011). Se espera que en ausencia de virulencia un gen de resistencia que se expresa en plántula también lo hace en planta adulta como en el caso de la variedad ‘Quilafen’, en la que se reportó la presencia *Lr17* (Zhang y Knott 1993).

Otro ejemplo sería el gen *Lr14a* que es efectivo en contra de poblaciones de roya de la hoja en trigos cristalinos, pero entre las razas de trigos harineros. En el 23 % se encuentran los genotipos susceptibles en plántula, pero resistentes en planta adulta (SPRPA), esta resistencia puede ser de raza específica como es el caso de *Lr35* o *Lr37*; pero también pueden existir solos o en combinación con otros genes de raza no específica como es el caso de *Lr46*.

En la variedad ‘Topacio C97’ se postularon los genes *Lr10* y *Lr23* en planta adulta (en campo). En respuesta a la inoculación con la raza *BBG/BN*. ‘Topacio C97’ mostró un gen de desarrollo lento de roya que ocasiona que los niveles máximos de infección sean menores de 30MS (Mariscal *et al.*, 2007). Sin embargo, en las áreas donde la enfermedad se presenta desde las primeras etapas de desarrollo del cultivo y los genes de raza específica son inefectivos, un solo gen de resistencia a la roya de desarrollo lento de esta línea no es suficiente. La presencia de *Lr46* en trigos cristalinos se confirmó en la variedad ‘Gema C2004’, y en ‘Atil C2000’ (Herrera-Foessel *et al.*, 2011b).

Una variedad de trigo que posea un solo gen de resistencia de desarrollo lento de la roya muestra niveles de resistencia moderados. Cuando el número de genes se incrementa los niveles de resistencia también se incrementan e inclusive son más estables a través de ambientes donde la roya de la hoja es endémica (Solis-Moya 2013).

La resistencia de desarrollo lento o resistencia durable también se caracteriza por su efecto aditivo, tanto con genes de resistencia de desarrollo lento de la roya (Singh y Rajaram, 1992b), como con genes de resistencia específica (German y Kolmer, 1992).

Entre los genotipos resistentes en plántula; se espera que esta resistencia permanezca en planta adulta; pero existen evidencias de que ciertos genes que confieren resistencia en plántula; en la etapa adulta son de efectos intermedios e inclusive se comportan como susceptibles. Este es el caso de *Lr16* tanto en trigos harineros como en trigos cristalinos. Por ejemplo 12 % contempla a aquellos genotipos resistentes en plántula y susceptible en planta Adulta (RPSA). Cuando hay genes efectivos en plántula por ejemplo a la raza *MBJ/SP*, éstos permanecen en todas las etapas de crecimiento de la planta a excepción de las líneas portadoras del gen *Lr16* que, si bien son efectivo en plántula, en planta adulta no lo es y se convierte en un gen con efectos intermedios (Huerta

*et al.*, 2002). Como es el caso del comportamiento de la variedad ‘Kronstad’ y en otros trigos cristalinos portadores de *Lr16* (Singh *et al.*,2013).

Los genotipos susceptibles en plántula y planta adulta (SPSPA) equivalentes al 38 % desde el punto de vista de resistencia a la roya de la hoja carecen de valor agronómico (Singh *et al.*, 1999).

## 1.6 CONCLUSIONES

Entre los 194 genotipos evaluados, el 27 % fueron resistentes tanto en plántula como en planta adulta; mientras que el 23 % fueron susceptibles en plántula, pero resistentes en planta adulta. Los genotipos resistentes identificados pueden servir como fuentes de resistencia programas de trigos cristalinos y así diversificar la resistencia a la roya de la hoja.

## 1.7 LITERATURA CITADA

- Agrios G.N (1980) Escape from disease. In “Plant Disease”. Academic Press, New York. Vol. 5, pp.17-37.
- Delgado-Sánchez L. M., J. Huerta-Espino., M. C. López-Peralta, I. Benítez-Riquelme y E. Hernández-Meneses (2016). Genética de la resistencia a *Puccinia triticina* Eriks en trigos cristalinos invernales. Rev. Fitotec. Mex. 39 (2):133-139.
- German S.E., J.A. Kolmer (1992) Effect of gene *Lr34* in the enhancement of resistance to leaf rust of wheat. Theor. Appl. Gen. 84:96-105.
- Goyeau H., R. Park, B. Schaeffer, and C. Lannou (2006) Distribution of pathotypes with regard to host cultivars in French wheat leaf rust populations. Phytopathology, 96,264-273. <https://doi.org/10.1094/PHYTO-96-0264>
- Huerta, E. J., H.E. Villaseñor, M. E. Espitia R, S. G. Leyva M y R. P. Singh (2002) Análisis de la resistencia a la roya de la hoja en trigos harineros para temporal. Rev. Fitotec. Mex. 25:161-169.
- Huerta-Espino J., R. Singh, S. Herrera-Foessel, J. Perez-Lopez, and P. Figueroa-Lopez (2009) First detection of virulence in *Puccinia triticina* to resistance genes *Lr27* + *Lr31* present in durum wheat in Mexico. Plant Dis. 93:110. 12. <https://doi.org/10.1094/PDIS-93-1-0110C>
- Huerta-Espino J., R. P. Singh, H.E. Villaseñor M, E. Espitia y S.G. Leyva M (2010) Transferencia del gen *Lr14a* de trigos harineros a trigos cristalinos y expresión de la resistencia a roya de la hoja. Revista Fitotecnia Mexicana 33:26-36.

- Huerta, E. J., M. E. Rodríguez, H. E. Villaseñor M. S.G. Leyva M., E. Espitia R (2011) Variación genética de la resistencia a *Puccinia triticina* E. en trigos duros de Oaxaca, México. Rev. Fitotec. Mex. Vol34(1):35- 41.
- Huerta-Espino J., H.E. Villaseñor-Mir, R.P. Singh, J.B. Perez-López, K. Amar, E. García-León, E. Solís-Moya (2017) Evaluation of lines and varieties of durum wheat to the leaf rust race BBG/BP-CIRNO caused by *Puccinia triticina* E. that defeated the resistance of Cirno C2008. Mexican Journal of Phytopathology 35: S2017 34 p.
- Herrera-Foessel S., R.P. Singh, J. Huerta-Espino, H. William, G. Rosewarne, G, A. Djurle, and J. Yuen (2007) Identification and mapping of *Lr3a* and a linked leaf rust resistance gene in durum wheat. Crop Sci. 47:1459- 1466. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.10.0663>
- Herrera-Foessel S. A., R. P. Singh, J. Huerta-Espino, H. M. William, V. Garcia, A Djurle, J. Yuen (2008) Identification and molecular characterization of leaf rust resistance gene *Lr14a* in durum wheat. Plant Dis. 92:469-473. <https://doi.org/10.1094/PDIS-92-3-0469>
- Herrera-Foessel, S.A, R.P. Singh, J. Huerta-Espino, V. S. Calvo and E. S. Lagudah. 2011b. First report of slow rusting gene *Lr46* in durum wheat. Book of abstracts 2011. BGRI Tech. Workshop Ju. 13-16. Saint Paul MN. USA. 191p.
- Herrera-Foessel S.A., R.P. Singh, M. Lillemo, J. Huerta, S. Bhavani S. Singh, C. Lan, V. Calvo-Salazar and E. S. Lagudah (2014) *Lr67/Yr46* confers adult plant resistance to stem rust and powdery mildew in wheat. Theoretical and Applied Genetics 127:781-789.
- Marais G. F., Z. A. Pretorius, C. R. Wellings, B. Mc Callum, A. S. Marais (2005) Leaf rust and stripe rust resistance genes transferred to common wheat from *Triticum dicoccoides*. Euphytica 143:115-123. <https://doi.org/10.1007/s10681-005-2911-6>.
- McIntosh R., C. Wellings, and R. Park (1995). Wheat rusts: An atlas of resistance genes. CSIRO, Australia.
- Parlevliet J.E. and J.C. Zadocks (1997) The integrated concept of disease resistance, a new view including horizontal and vertical resistance in plants. Euphytica 26:5-21.
- Roelfs A. P., P. Singh y E. E. Saari (1992) Las royas del trigo: Conceptos y Métodos para el Manejo de esas Enfermedades en México, D.F. CIMMY. 81p.
- Singh R.P., S. Rajaram (1992b) Genes for resistance to *Puccinia recondita* f. sp. *Tritici* in 73 Mexican bread wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. In: Cereal Rusts and Mildews. Proc. 9th European and Mediterranean Cereal Rust and Mildew Conf. F J. Zeller. G. Fischbeck (Eds) Weihenstephan/Germany Vortrage fur Pflanzenzuchtug 24:211-213-
- Singh, R.P. and J. H. Dubin (1997) Sustainable control of wheat diseases in Mexico. In: Pacheco, C.J.J., y S.L. Perez. (comps). Memorias del Primer Simposio

Internacional de Trigo. Abril 7-9 de 1997. Cd, Obregón, Sonora, México. Pp:91-103.

Singh R.P., Rajaram, J. Huerta-Espino (1999) Combining additive genes for slow rusting type of resistance to leaf and stripe rusts in wheat In: CIMMY. 1999. The 10th Regional Wheat Workshop for Eastern, Central and Southern Africa. Addis Ababa, Ethiopia: CIMMYT. pp: 394-403.

Singh R.P., S.A. Herrera-Foessel, J.Huerta-Espino, C.X. Lan, B.R. Basnet, S. Bhavani, E.S. Lagudah (2013) Pleiotropic gene *Lr46/Yr29/Pm39/Ltn2* confers slow rusting, adult plant resistance to wheat stem rust fungus. In Proceedings Borlaug Global Rust Initiative, 2013 Technical Workshop, 19–22 August, New Delhi, India, p 17.1

Solis-Moya E., J. Huerta-Espino, M.F. Rodríguez-García, H.E. Villaseñor-Mir, E. Espitia-Rangel, L. Ledesma-Ramírez y M.P. Suaste-Franco (2013) Resistencia de la roya de la hoja en variedades de trigo (*Triticum* spp. L) adaptadas a el Bajío, México. *Agrociencias* 47:457-469.

Zhang H., and D. R. Knott (1993) Inheritance of adult plant resistance to leaf rust in six durum wheat cultivars. *Crop Sci.* 33:694-69. <https://doi.org/10.2135/cropsci1993.0011183X003300040010x>

## **CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN DE GENOTIPOS CRIOLLOS DE TRIGO CRISTALINO DE ETIOPÍA POR SU RESISTENCIA A ROYA DE LA HOJA EN MÉXICO**

### **2.1 RESUMEN**

Entre 169 genotipos criollos y 25 mejorados de trigos cristalinos procedentes de Etiopía, evaluados con las razas *Puccinia triticina* BBG/BPCG y BBG/BPCJ. Se identificaron 89 genotipos resistentes equivalente al 35 % en contra de la raza BBG/BPCG y 91 equivalente al 45 % resistentes en contra de la raza BBG/BPCJ. Los genotipos que no tienen un valor agronómico inmediato con niveles de infección igual o mayor al 40 % fueron 59 en el caso de la raza BBG/BPCG y que representan el 30 %; sin embargo, para la raza BBG/BPCJ la cual venció la resistencia de ‘Cirno C2008’ se identificaron 98 genotipos resistentes equivalentes al 50 %. El incremento de genotipos más susceptibles a la raza BBG/BPCJ indica que estos comparten la misma fuente de resistencia que la conferida en ‘Cirno C2008’ a través de su progenitor ‘Camayo’ (*Lrcam*). El 31 % de los genotipos evaluados permanecieron resistentes y con el mismo grado de severidad contra las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ; mientras que en el 16 % de los genotipos su nivel de resistencia aumento cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCG, y en el 53 % del total de los genotipos, la severidad de la enfermedad aumento o el nivel de resistencia se redujo. De los 194 genotipos evaluados, solo 61 criollos y tres mejorados clasificados como resistentes podrían ser fuente de resistencia a roya de la hoja.

**Palabras clave:** *Puccinia triticina* Eriks, *Triticum turgidum* var. *durum*, criollos, resistencia, susceptibilidad.

## 2.2 ABSTRACT

Among 169 landraces genotypes and 25 improved crystalline wheats from Ethiopia, evaluated with the races *Puccinia triticina* BBG / BPCG and BBG / BPCJ. 89 resistant genotypes were identified equivalent to 35 % against the race BBG / BPCG and 91 (45 %) resistant against the race BBG / BPCJ. The genotypes that do not have an immediate agronomic value with infection levels equal to or greater than 40 % were 59 in the case of the race BBG / BPCG and that represent 30 %; however, for the race BBG / BPCJ, which overcame the resistance of 'Cirno C2008', The 98 resistant genotypes equivalent to 50 % were identified. The increase in genotypes more susceptible to the race BBG / BPCJ indicates that they share the same source of resistance as that conferred in 'Cirno C2008' through its parent 'Camayo' (*Lrcam*). The 31 % of the evaluated genotypes remained resistant and with the same degree of severity against the races BBG / BPCG and BBG / BPCJ; while in 16 % of the genotypes their resistance level increased when they were evaluated with the race BBG / BPCG, and in 53 % of the total genotypes, the severity of the disease increased or the level of resistance was reduced. Of the 194 genotypes evaluated, only 61 landraces and three improved classified as resistant could be a source of resistance to leaf rust.

**Palabras clave:** *Puccinia triticina* Eriks, *Triticum turgidum* var. *durum*, criollos, resistencia, susceptibilidad.

## 2.3 INTRODUCCIÓN

El trigo (*Triticum* spp.) es un alimento básico y uno de los cultivos más importantes del mundo, proporciona el 23 % del suministro de energía de origen vegetal (Sentayehu *et al.*, 2004). El trigo cristalino es uno de los cereales que se adapta a la región mediterránea donde se concentra aproximadamente el 75 % de la producción mundial

(Amadou, 2019) y se considera como un cultivo mediterráneo tradicional, que representa un grupo importante de recursos útiles para el mejoramiento genético (Nachit, 2000).

La base genética que tiene el trigo cristalino de Etiopía es muy valiosa por sus adaptaciones a estrés abiótico y biótico y son fuentes únicas para el mejoramiento genético (Negassa, 1986). Etiopía se considera, un posible centro de origen de la especie tetraploide *Triticum*; sin embargo, parece ser más bien un centro de diversificación (Giunta *et al.*, 2007).

A pesar de la amplia adaptación y calidad del grano, la producción comercial del trigo cristalino en ambientes mediterráneos tiene problemas con el ciclo vegetativo, susceptibilidad a las royas y otras enfermedades como *Zymoseptoria tritici* (Alamayehu, 1996). En el mediterráneo, más de dos tercios de la superficie se cultivan con variedades locales de trigo tetraploide (Moragues *et al.*, 2006).

Dentro de las enfermedades del trigo cristalino, una de las más importantes es la roya de la hoja que puede afectar al cultivo en todas las etapas de crecimiento y los daños que genera son variables, por las diferencias en las condiciones climáticas, susceptibilidad de los genotipos y la presencia del inóculo (Adenow *et al.*, 1997).

Las variedades locales o criollas de trigo son el resultado de la selección natural y usualmente exhiben variación para rasgos cualitativos y cuantitativos, en ocasiones su rendimiento puede ser más bajo, pero confiable en comparación con las variedades mejoradas (Maccaferri *et al.*, 2003). Estas variedades pueden llegar a ser fuentes importantes de resistencia que logran proporcionar nuevos alelos que pueden utilizarse para la mejora de genotipos, en zonas productoras de trigo a nivel mundial (Hussein, 2005).

El conocimiento de la diversidad genética de las variedades criollas es fundamental para comprender las relaciones entre cultivares, que faciliten su clasificación

y caracterización para así, definir nuevas estrategias de cruzamiento y selección en programas de mejoramiento (Hulluka *et al.*, 1991). La conservación del germoplasma y la selección de progenitores con antecedentes genéticos diversos hace que el mejoramiento en cultivos sea más eficiente (Adenow *et al.*, 1997).

En México con la introducción del trigo en 1529, llegaron nuevas formas de alimentación y mestizaje (Huerta *et al.*, 2011). En el Estado de Oaxaca se cultivan trigos cristalinos criollos “trigos ventureros”, que llegaron durante la colonia (Huerta *et al.*, 2011) los cuales fueron resistentes a la raza BBG/BN de *Puccinia triticina* E., y pueden incrementar los niveles de resistencia (Huerta *et al.*, 2011). Algunas de las variedades criollas de trigo cristalino son frecuentemente susceptibles y la severidad de la enfermedad suele ser alta (Adenow *et al.*, 1997). También se pueden encontrar genotipos con altos niveles de resistencia; que representan nuevas y valiosas alternativas que deberían utilizarse en programas de mejoramiento genético. Por ejemplo, el gen *Lr79* descubierto recientemente en un trigo criollo australiano Aus26582 (Qureshi, *et al.*, 2018).

Aunque el trigo no es originario de México, el germoplasma mejorado mexicano actual, posee una base genética amplia, y es posible desarrollar variedades con resistencia durable (Ponce *et al.*, 2018). La búsqueda de fuentes de resistencia a la roya de la hoja en variedades locales de trigo cristalino, son una opción sobre las especies silvestres. La resistencia en el genotipo ‘Camayo’ procede de una cruce entre un criollo de Etiopía (ETH-LRBR A1-133) y ‘Altar C84’ (Herrera-Foessel *et al.*; 2005; Singh *et al.*; 2004).

Una línea de la cruce ‘Atil’/ ‘Camayo’ se liberó en México como ‘Cirno C2008’ (Herrera-Foessel *et al.*, 2007), que alcanzó un máximo del 85 % en el área de cultivo de trigo cristalino durante 2011-2012 y 2012-2013 (Muñoz-Cáñez, 2014).

En México y en Etiopía existe una especialización fisiológica en las poblaciones de *P. triticina.*, donde se ubican razas que preferentemente causan la roya de la hoja en trigos cristalinos (Huerta-Espino y Roelfs 1989).

En México, antes del 2001, solo existía la raza BBB/BN (Singh, 1991); sin embargo, en el 2001 apareció una raza muy similar a BBB/BN que indicaría la evolución de virulencia para *Lr11*, la respuesta de otras líneas diferenciales comprobó que fue una introducción de origen desconocido que venció la resistencia de ‘Altar C84’ (Singh *et al.*, 2004). La raza fue designada como BBG/BN.

En el 2009, se consideró necesario agregar un juego adicional de diferenciales para poder seguir la evolución de estas razas (Singh, 2004). El sexto juego de diferenciales fue integrado por genotipos que poseen los genes *Lr14a*, *Lr28*, *Lr61* y *Lr72* al identificarse una variante que venció la resistencia de las variedades ‘Jupare C2001’ y ‘Banamichi C2004’ como BBG/BP (Huerta-Espino *et al.*, 2009) y BBG/BPC (Delgado-Sánchez *et al.*, 2016).

El agente causal de la roya de la hoja que preferentemente ataca trigos cristalinos ha seguido su evolución en México y en el 2017 se identificó una raza que venció la resistencia de la variedad ‘Cirno C2008’, y otros genotipos que comparten la misma base genética de resistencia lo que hace necesario agregar nuevas diferenciales (Huerta-Espino *et al.*, 2009).

Desde el punto de vista económico y ambiental, la formación de variedades resistentes es la tecnología más efectiva para el control de roya de la hoja, y ante la necesidad de identificar nuevas fuentes de resistencia el objetivo de este estudio fue evaluar fenotípicamente en campo 194 genotipos de trigo cristalino provenientes de Etiopía, de los cuales 169 son criollos y 25 mejorados, e identificar las mejores fuentes de resistencia a la roya de la hoja.

## 2.4 MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.4.1 Material genético

Se evaluaron 169 genotipos criollos y 25 mejorados de trigo cristalino procedentes de Etiopía. Estos trigos se establecieron en México para seleccionar progenitores con resistencia a la roya de la hoja en el ciclo 2016 CIMMYT-Batán Texcoco Estado de México y en el Campo Experimental Norman E. Borlaug CIMMYT-CENEB, Ciudad Obregón, Sonora ciclo 2017 (Anexo 1).

### 2.4.2 Siembra de genotipos

Los 194 genotipos se sembraron en CIMMYT-Batán durante el verano 2016, en un surco sencillo de 1.5 m sobre camas separadas a 80 cm con 5 g de semilla y 50 cm de separación entre bloques. El diseño experimental fue de Bloques completos al azar con tres repeticiones. Los mismos genotipos fueron sembrados en CIMMYT-CENEB durante el invierno 2016-2017 con el mismo diseño y tamaño de parcela.

### 2.4.3 Razas del patógeno

Para la evaluación de la resistencia, en CIMMYT-Batán se utilizó la raza BBG/BPCG; mientras que en el CIMMYT-CENEB se utilizó BBG/BPCJ. La fórmula de avirulencia/virulencia de BBG/BPCG es: *Lr1, Lr2a, Lr2b, Lr2c, Lr3, Lr3ka, Lr3bg, Lr9, Lr13, Lr14a, Lr15, Lr16, Lr17, Lr18, Lr19, Lr21, Lr24, Lr25, Lr26, Lr28, Lr29, Lr30, Lr32, Lr35, Lr36, Lr37, Lr61, LrCam/ Lr10, Lr11, Lr20, Lr23, Lr27+ Lr31, Lr33, Lr72*. Mientras que la fórmula de BBG/BPCJ es similar a la anterior, pero con virulencia a *LrCam*.

Con el fin de distinguir las diferentes razas de *P. triticina* que preferentemente atacan trigos cristalinos, se decidió agregar un séptimo juego con *LrGaza, Lr33, LrCam* y *Lr51*, de tal forma que las razas existentes en México en trigos cristalinos con la nueva nomenclatura son: BBB/BNGQ, (Singh, 1991) BBB/BNJQ (Delgado-Sánchez *et al.*,

2016), BBG/BNCG, BCG/BNCG (Singh et al, 2004) BBG/BPCG, CBG/BPCG (Huerta-Espino *et al.*, 2009) y BBG/BPCJ con virulencia a *LrCam* presente en la variedad ‘Cirno C2008’ (Huerta-Espino *et al.*, 2017).

#### **2.4.4 Inoculación**

Para inducir la epidemia de los lotes donde se sembraron los trigos cristalinos en CIMMYT-Batán y en CIMMYT-CENEB, se sembró la variedad de trigo ‘Banamichi’ en el 2016 y ‘Cirno C2008’ en el 2017 como bordo que actuó como fuente de dispersión del inóculo del patógeno, y como testigos susceptibles ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’.

Se inoculó con esporas de las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ respectivamente en una concentración  $1 \times 10^6$  esporas/mL, en aceite mineral Soltrol<sup>®</sup> 40 días después de la siembra y se roció totalmente a las hojas de las plantas. A la segunda y tercera semana se inocularon nuevamente los bordos para asegurar el establecimiento del hongo.

#### **2.4.5 Evaluación a la respuesta de la roya de la hoja en los 194 progenitores en CIMMYT-Batán y CIMMYT-CENEB**

Se hicieron tres evaluaciones en cada genotipo, la primera cuando el progenitor susceptible ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’ presentaron el 20 % de severidad en la hoja bandera, la segunda en un intervalo de ocho días. La tercera evaluación se realizó cuando el progenitor susceptible ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’ presentaron el 100 % de severidad en la hoja bandera. En todos los casos la evaluación de la enfermedad se realizó con la escala modificada de Cobb (Peterson *et al.*, 1948).

#### **2.4.6 Clasificación de los genotipos**

Los genotipos se agruparon de acuerdo con la severidad final de la enfermedad. Se clasificaron en grupos en base a la metodología de Huerta-Espino et al. (2020) donde: Inmune/Cercano a la inmunidad: NI (0-1 % de severidad); Resistente: R (5-10 % de severidad); Resistente a Moderadamente Resistente: RMR (15-20 % de severidad);

Moderadamente Resistente: MR (30 % de severidad); Moderadamente Resistente a Moderadamente susceptible: MRMS (40 % de severidad); Moderadamente Susceptible: MS (50-60 % de severidad); Moderadamente Susceptible a Susceptible: MSS (70-80 % de severidad); Susceptible: S (90-100 % de severidad).

#### **2.4.7 Determinación del progreso de la roya de la hoja**

Se calculó el Área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) a través de la severidad. El ABCPE se determinó de acuerdo con la fórmula de Van der Plank (1975):

$$ABCPE = [(Y_i + (Y_{i+1})) / 2] [t_{i+1} - t_i]$$

Donde  $Y_i$  = intensidad de la enfermedad (%), que se obtiene con base en la severidad observada  $t_i$  = período de evaluación en días, por lo que las unidades son % día<sup>-1</sup>. La tasa de intensidad de la enfermedad (TIE) representa la velocidad con que se desarrolla una epidemia y se expresa en % día<sup>-1</sup>:  $TI = (Y_t - (Y_{t-1})) / (t - (t-1))$ . Dónde:  $t$  y  $t-1$  = fechas en que se cuantificó la enfermedad  $Y_t$  y  $Y_{t-1}$  = % de enfermedad registradas en cada fecha.

#### **2.4.8 Análisis estadístico**

Se realizó el análisis de varianza con el ABCPE para después realizar la comparación de medias mediante la prueba DMS ( $p \leq 0.05$ ).

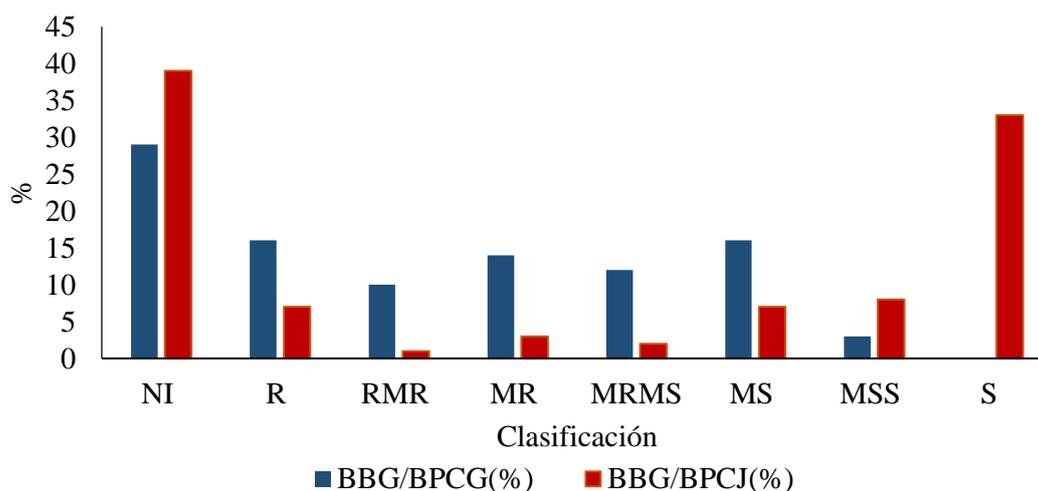
### **2.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los 194 genotipos se agruparon de acuerdo con su respuesta a la infección de las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ. Los genotipos más resistentes, en su mayoría fueron los criollos. Se identificaron 89 genotipos resistentes equivalente al 35 % (NI y R) en contra de la raza BBG/BPCG y para la raza BBG/BPCJ fueron 91 los genotipos resistentes que representan el 45 %. Los genotipos que no tienen un valor agronómico inmediato con niveles de infección igual o mayor al 40 % fueron 59 en el caso de la raza BBG/BPCG y

que representan el 30 %; sin embargo, para la raza BBG/BPCJ la cual venció la resistencia de ‘Cirno C2008’ existieron 98 genotipos, equivalentes al 50 %. Este incremento de genotipos más susceptibles a la raza BBG/BPCJ indica que estos genotipos comparten la misma fuente de resistencia que la conferida en ‘Cirno C2008’ a través de su progenitor ‘Camayo’ (*Lrcam*). Los grupos correspondientes que se formaron en respuesta a las dos razas que se utilizaron en el estudio se presentan en el Cuadro 2.1 y gráficamente en la figura 2.1. Es notable el incremento de genotipos susceptibles, cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ, lo que indica que esta raza podría poseer virulencia adicional a *LrCam* presente en la variedad ‘Cirno C2008’.

**Cuadro 2.1 Agrupación de los 194 genotipos de acuerdo con el nivel de infección y clasificación de Huerta et al. (2020) para las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ.**

<b>Grupo</b>	<b>BBG/BPCG</b>	<b>BBG/BPCG</b>	<b>BBG/BPCJ</b>	<b>BBG/BPCJ</b>
	<b>(#)</b>	<b>(%)</b>	<b>(#)</b>	<b>(%)</b>
NI	58	29	78	39
R	31	16	13	7
RMR	19	10	1	1
MR	27	14	4	3
MRMS	23	12	3	2
MS	31	16	13	7
MSS	5	3	15	8
S	0	0	67	33

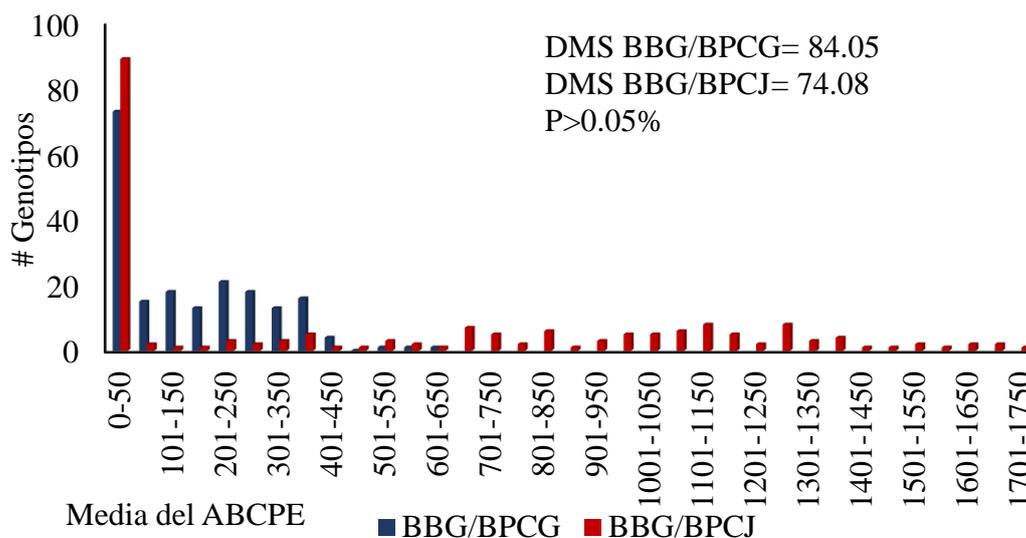


**Figura 2.1 Representación gráfica del porcentaje de los diferentes grupos formados de acuerdo con su nivel de resistencia.**

Además de la severidad final, el desarrollo de la enfermedad en diferentes etapas permitió calcular el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) en respuesta a las dos razas con las que se evaluaron los genotipos.

El análisis de varianza indico valores altamente significativos, pero no se consideró practico hacer una comparación de medias, aunque el valor de DMS al 5 % si se reporta. En este caso los niveles bajos de ABCPE coinciden con los niveles más bajos de la severidad final de la enfermedad (NI a R) (Figura 2.2).

Algunos investigadores han llegado a la conclusión de que el ABCPE no es una medición útil para los estudios de las royas de los cereales, si la resistencia de raza especifica o de genes mayores predomina. Sin embargo, cuando la mayoría de los genotipos son resistentes, el desarrollo de la enfermedad limita la realización de un análisis del ABCPE, pero en el caso donde no existen genes de efectos mayores y la comparación es obligada con los testigos susceptibles y el progreso de la enfermedad es lenta comparada con el progreso rápido de la enfermedad en los genotipos susceptibles.

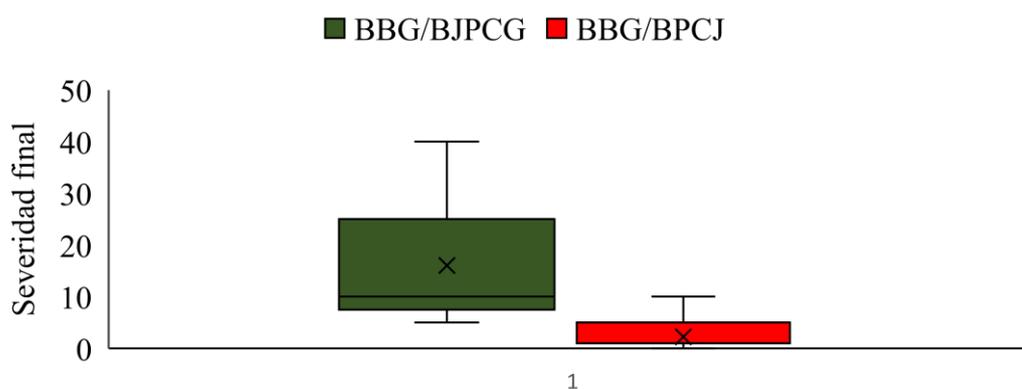


**Figura 2.2 Distribución de medias del ABCPE de roya de la hoja en los genotipos de trigo cristalino en respuesta a las razas BBG/BPCG (DMS= 84.05) y BBG/BPCJ (DMS= 74.08).**

Las observaciones múltiples son útiles para detectar ciertos tipos de resistencia. Con la severidad registrada generalmente en la etapa de espigamiento y dos o más lecturas subsiguientes incluyendo la severidad final se calcula el área bajo la curva del progreso de la enfermedad (ABCPE) como una medida de la resistencia que presenta el progreso de la roya de la hoja, pero es acumulativa, y el número de pústulas presentes en un inicio de la epidemia afectan el área a lo largo de su desarrollo (Pedraza, 1995). La ventaja de utilizar trigo cristalino de Etiopía en México es la singularidad en varios aspectos morfológicos, pero el de mayor importancia es la resistencia a la roya de la hoja (Belay y Tesemma 1991). Aun cuando algunos genes de resistencia han perdido su efectividad como en el caso del criollo de Etiopía que se usó en el desarrollo de ‘Camayo’ que es uno de los progenitores de la variedad ‘Cirno C2008’ (Figuerola *et al.*, 2010), en general, el comportamiento de los genotipos fue diferente con cada una de las razas de *P. triticina*.

Lo anterior no permitió un análisis de varianza combinado como inicialmente se planteó; pero si fue posible hacer una reclasificación en tres grupos de acuerdo con el

comportamiento de cada genotipo. Los 194 genotipos evaluados se agruparon de acuerdo con su respuesta a la raza BBG/BPCG y en base a la raza BBG/BPCJ como se indica a continuación: Grupo A) Aquellos que permanecieron resistentes, con el mismo grado de severidad para ambas razas y que representan el 31 % del total (61 genotipos), dentro de los cuales sólo cuatro fueron genotipos mejorados. Sin embargo, el genotipo ‘2000/02 population 82 no.5’ permaneció susceptible con una severidad final del 70 % (Moderadamente Susceptible a Susceptible). En los genotipos restantes, la respuesta de severidad final a la enfermedad es aceptable dentro del mejoramiento genético como genotipos resistentes, ya que existieron 54 genotipos que se agruparon como NI, 5 como R, 1 como RMR y 1 como MR. Por lo tanto, éste es el grupo más importante para los objetivos del mejoramiento genético para incorporar resistencia a la roya de la hoja, ya que representa variación genética efectiva no solo en contra de la raza BBG/BPCG, sino también en contra de CBG/BPCJ que venció la resistencia de ‘Cirno C2008’. Grupo B) El 16 % que considera genotipos que se incluyeron en los grupos RMR, MR, MS a la raza BBG/BPCG, pero que su nivel de resistencia aumento y la severidad final disminuyo cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ y que se clasificaron como NI, R, RMR (Figura 2.3).

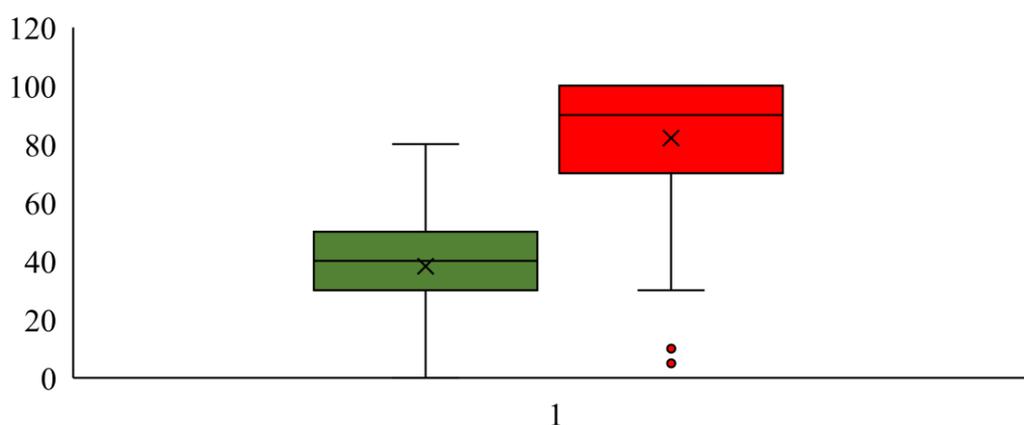


**Figura 2.3 Genotipos en que disminuyo la severidad final cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ.**

Normalmente, esto es algo que no ocurre al evaluar genotipos en contra de una raza que adquirió nuevos genes de virulencia. Sin embargo, se han reportado razas que ganan virulencia para algunos genes, pero pierden virulencia para otros (Huerta-Espino *et al.*, 1996).

Uno de los principales problemas fitopatológicos del trigo cristalino es la presencia de nuevas razas de roya de la hoja (*Puccinia triticina* E.), con distintas combinaciones de genes de avirulencia/virulencia que generan pérdidas considerables en el noroeste y norte de México (Huerta-Espino *et al.*, 2011).

Grupo C) Corresponde el 53 % del total (103 genotipos) en los que la severidad de la enfermedad aumento. Algunos genotipos pasaron de ser NI, R a Susceptibles (Figura 2.4).



**Figura 2.4 Genotipos en que aumento la severidad final cuando se evaluaron con la raza BBG/BPCJ.**

Este grupo incluye aquellos genotipos que no tienen un valor agronómico inmediato desde el punto de vista del mejoramiento para resistencia a la roya de la hoja, se identificaron genotipos con niveles altos de resistencia en contra de las dos razas que se utilizaron en el estudio. Los genotipos resistentes que se identificaron hacen suponer que contienen genes diferentes a los que ‘Camayo’ posee.

Cada raza que afecta al trigo cristalino cuenta con genes de virulencia, que hacen su grado de complejidad diferente. La menos compleja (más genes de virulencia) es la raza BBG/BN, seguida de BCG/BN, BBG/BP y CBG/BP respectivamente (Singh *et al.*, 2004).

Sin embargo, en el ciclo otoño-invierno 2016-2017 en el Río Mayo (Huatabampo, Sonora) se identificó una nueva raza de roya de la hoja BBG/BP-Cirno, que venció la resistencia de ‘Cirno C2008’ y que tiene resistencia a roya de la hoja por uno de sus progenitores ‘Camayo’, progenie de una variedad local de Etiopía (Herrera-Foessel *et al.*, 2007). El gen que se venció en ‘Camayo’ está presente también en ‘Cirno C2008’ y tiene un origen criollo de Etiopía (ETH-LRBR A1-133). El segundo padre, ‘Altar C84’, susceptible a la raza BBG/BN (Singh *et al.*, 2004).

Las variedades locales de trigo cristalino tienen prioridad como especies silvestres, en la búsqueda de fuentes de resistencia a la roya de la hoja, ya que en México es la enfermedad del trigo de mayor importancia económica e histórica, porque es la que más se distribuye en el noroeste y causa pérdidas del 30 % a 60 % según la variedad y las condiciones climáticas (Villaseñor *et al.*, 2003).

## **2.6 CONCLUSIÓN**

De los 194 genotipos de trigo cristalino provenientes de Etiopía se identificaron 61 genotipos criollos y tres mejorados, que presentaron resistencia a las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ y que podrían ser una fuente de resistencia a roya de la hoja para ambas razas y así poder utilizarse como progenitores en programas de mejoramiento genético para resistencia a roya de la hoja de trigos cristalinos.

## **2.7 LITERATURA CITADA**

Adenow Y., M. Hulluak, G. Bela and Tesemma (1997) Resistance and tolerance to leaf rust in Ethiopian tetraploid wheat landraces. *Plant Breeding* 116:533-536. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1997.tb02185>

- Alamayehu F., J. Parlevliet (1996). Variation for resistance to *Puccinia hordei* in Ethiopia barley landraces. *Euphytica* 90:365-370.
- Amadou T., S. Chiari, T. Legesse.W, Seid-Ahmed. K, Ortiz., R. Ginkel, M. Filippo (2019) Durum Wheat (*Triticum durum* Desf.): Origin, Cultivation and Potential Expansion in Sub-Saharan Africa.
- Belay G., T. Tesemma and K. Mohammed (1990) Utilization of exotic durum wheat germplasm in Ethiopia. In: D.G. Tanner, M. van Ginkel, and W. Muangi (eds). Wheat Workshop for Eastern Central and Southern Africa 52-58. CIMMYT, Addis Ababa.
- DeLacy I., H. B. Skovman, J. Huerta-Espino (2000) Characterization of Mexican wheat landraces using agronomically useful of Mexican wheat landraces using agronomically useful attributes. *Genet. Resour. Crop Evol.* 47:591-602.
- Delgado-Sánchez L. M., J. Huerta-Espino., M. C. López-Peralta, I. Benitez-Riquelme y E. Hernández-Meneses (2016) Genética de la resistencia a *Puccinia triticina* Eriks en trigos cristalinos invernales. *Rev. Fitotec. Mex.* 39 (2):133-139.
- Evenson R.E. and S. Lemaire (1998) Optimal collection and search for crop genetic resources. pp. 79–92. In: M. Smale (ed.) *Farmers, Gene Banks and Crop Breeding: Economic Analyses of Diversity in Wheat, Maize, and Rice*, Kluwer Academic Publishers, London.
- Figuroa-Lopez P., J. Félix-Fuentes, G. Fuentes-Dávila, V. Chávez-Villalba and J. Mendoza-Lugo (2010) CIRNO C2008, nueva variedad de trigo cristalino con alto rendimiento potencial para el estado de Sonora. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* 1:739-744.
- Giunta F., R. Pruneddu (2007) Trends since 1900 in the yield potential of Italian-bred durum wheat cultivars. *Eur J. Agron* 27:12-24.
- Herrera-Foessel S.A., R.P. Singh, J. Huerta-Espino, J. Yuen, A. Djurle (2005) New genes for resistance to leaf rust in CIMMYT durum wheats. *Plant Disease.* 89, 809-814. <https://doi.org/10.1094/PD-89-0809>
- Herrera-Foessel S.A., R.P Singh, J. Huerta-Espino, M. William, G. Rosewarne, A. Djurle, J. Yuen (2007) Identification and mapping of Lr3 and a linked leaf rust resistance gene in durum wheat. *Crop Science.* 47:1459-1466. <http://dx.doi.org/10.2135/cropsci2006.10.0663>
- Huerta-Espino J. and A. P. Roelfs (1989) Physiological specialization of leaf rust on durum wheat. *Phytopathology* 79: 1218.
- Huerta-Espino, J. and R.P. Singh (1996) Misconceptions on the durability of some adult leaf rust resistance genes in wheat. In: G.H.J. Kema, R.E. Niks, and R.A. Daamen. *Proceedings of the 9th European and Mediterranean Cereal Rust and Powdery Mildews Conference.* September 2-6, 1996. Lunteren, The Netherlands. pp 109-111.
- Huerta-Espino J., R.P. Herrera-Foessel, S.A. Perez-Lopez J.B, Figuroa-López P (2009) First detection of Virulence in *Puccinia triticina* to Resistance Genes Lr27+Lr31 present in durum Wheat in Mexico. *Plant Disease.* 93:110.

- Huerta E. J., R. P. Singh, H. E. Villaseñor, E. Solís, R. Espitia, y S. G. Leyva (2010) Transferencia del gen *Lr14a* de trigos harineros a trigos cristalinos y expresión de la resistencia a roya de la hoja. *Rev. Fitotec. Mex.* 33 (1): 29-36.
- Huerta-Espino J., M. E. Rodríguez, M.F. Rodríguez, E. Villaseñor, S. G. Leyva, E. Espitia (2011) Variación genética de la resistencia a *Puccinia triticina* E. en trigos duros de Oaxaca, México. *Rev. Fitotecnia Mexicana.* Vol. 34 (1): 35-41.
- Huerta-Espino J., H.E. Villaseñor-Mir, R.P. Singh, J.B. Perez-López, K. Amar, E. García-León, E. Solís-Moya (2017) Evaluation of lines and varieties of durum wheat to the leaf rust race BBG/BP-CIRNO caused by *Puccinia triticina* E. that defeated the resistance of Cirno C2008. *Mexican Journal of Phytopathology* 35: S2017 34 p.
- Huerta-Espino J., R. Singh, L.A. Crespo-Herrera, H.E. Villaseñor-Mir, M.F. Rodríguez-García, S. Dreisigacker, D. Barcenas-Santamaria, E. Lagudah (2020) Adult Plant Slow Rusting Genes Confer High Levels of Resistance to Rusts in Bread Wheat Cultivars From Mexico. *Plant Science.* Vol 11. Art. 824. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.00824>
- Huerta-Espino J., R. Singh, M.E. Villaseñor, G.F. Rodríguez, M.E. Solís, R.E. Espitia (2020) Habilidad competitiva de razas de roya de la hoja provenientes de trigos cristalinos. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas.* Vol 11. (1):97-109.
- Hulluka, M. and Y. Andnew (1991) Variation within indigenous durum wheat germplasm for response to stem and leaf rust races in Ethiopia. In: Tanner, D.G. Mwangi, W. (eds.) *Seventh Regional Wheat Workshop: For Eastern, Central and Southern Africa*, (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo), Addis Ababa (Ethiopia). Regional Office) (eds.). México, DF (México): CIMMYT, 1991.- ISBN 968-6127-62-3. p. 131-134
- Hussein S. and Z.A. Pretorius (2005) Leaf and stripe rust resistance among Ethiopian grown wheat varieties and lines. *Ethiop. J. Sci.*, 28 (1):23-32, 2005.
- Maccaferri M., M. Sanghinetti, C. Donini, P. and T. Buberosa (2003) Microsatellite analysis reveals progressive widening of the genetic basis in the elite durum wheat germplasm. *Theor. Appl. Genet.* 107:783-797.
- Moragues M., M. García, M. Moralejo, C. Royo (2015) Exploring genetic diversity from landraces in wheat breeding for adaptation to climate change. *J. Exp. Bot.* 2015:66:3477-3486.
- Muñoz-Cáñez A (2014) El fenómeno de la variedad de trigo Cirno C-2008 en el sur de Sonora. *ENLACE la Revista de la Agricultura de Conservación.* 18:26-30.
- Nachit M. (2000) ICARDA germoplasm program. Annual report for 2000. Durum wheat germplasm improvement for increased productivity, yield stability and grain quality in West Asia and North Africa. 125-152.
- Negassa M. (1986) Estimates of phenotypic diversity and breeding potential of Ethiopian wheat. *Hereditas* 104:41-48.
- Peterson R. F., Campbell, A. B., and A.E. Hannah (1948) A diagrammatic scale for estimating rust intensity of leaves and stem of cereals. *Peterson, R.F.* C26:496-500.

- Pedraza S.A. (1995) Epidemiología Agrícola. Principios y aplicaciones unidad regional universitaria en zonas áridas. UACH. Bermejillo Dgo. México.
- Ponce-Molina L.J., J. Huerta-Espino, R. P. Singh, B.R. Basnet, G. Alvarado, M.S. Randhawa, C. X. Lan, V. H. Aguilar-Rincón, R. Lobato-Ortiz and J.J. García-Zavala (2018) Characterization of leaf rust and stripe rust resistance in spring wheat “Chilero”. *Plant Disease* 102:421-427. <https://doi.org/10.1094/PDIS-11-16-1545-RE>
- Qureshi N., Bariana, H. Kumran, V.V. Muruga, S.Forrest, K. L. Hayden M. J. and Bansal, U (2018) A new leaf rust resistance gene *Lr79* mapped in chromosome 3BL from the durum wheat landrace Aus26582. *Theoretical and Applied Genetics*. 131:1091–1098. <https://doi.org/10.1007/s00122-018-3060-3>.
- Singh, R.P. (1991) Pathogenicity variations of *Puccinia recondita* f.sp. tritici and *P. graminis* sp. tritici in wheat-growing areas of Mexico during 1988 and 1989. *Plant Dis.* 75:790-794.
- Singh R. P., J. Huerta-Espino, W. Pfeiffer, P. Figueroa-López (2004) Occurrence and impact of a new leaf rust race on durum wheat in Northwestern Mexico from 2001 to 2003. *Plant Dis.* 88:703–708. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2004.88.7.703>
- Sentayehu A. S., X. Chebotar, M. Huang, M. Roder and A. Borner (2004) Genetic diversity in Ethiopia hexaploid and tetraploid wheat germplasm assessed by microsatellite 7 markers. *Genetic Resources and Crop Evolution* 51:559-557. <https://doi.org/10.1023/B:GRES.0000024164.80444.f0>
- Van der Plank J. E. (1975) *Principals of plant infection*. Academic Press New York. 150 p.
- Villaseñor M., R. Espitia, J. Huerta, C. Ortiz (2003) Variedades de trigo F200, una opción para las siembras de temporal en el Estado de México. Folleto Técnico No. 15. SGARPA, INIFAP, CEVAMEX. Chapingo, México. 36p.

## CAPÍTULO III. ACCIÓN GÉNICA Y NÚMERO DE GENES QUE OTORGAN RESISTENCIA A ROYA DE LA HOJA EN LÍNEAS DE TRIGO CRISTALINO

### 3.1 RESUMEN

La roya de la hoja causada por el hongo *Puccinia triticina* E., es una enfermedad que, cuando se presenta, genera pérdidas hasta del 100 % en el rendimiento de grano del trigo cristalino (*Triticum turgidum* ssp. *durum* L.). Como medida de protección genética en la construcción piramidal de nuevos genotipos resistentes, se plantea necesario identificar en el germoplasma resistente existente a este hongo, el número de genes involucrados y su acción génica. Con este propósito, se hicieron cruzas entre el progenitor susceptible común ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’, con seis líneas resistentes de trigo cristalino procedentes de Etiopia durante el ciclo de cultivo Otoño-Invierno 2017-2018. Las generaciones filiales de las cruzas se obtuvieron alternadamente en CIMMYT-Batán, Estado de México y CIMMYT-CENEB, Ciudad Obregón, Sonora, hasta obtener las Familias F3 y F4. Con base en las familias evaluadas F3 y F4 y del análisis de segregantes, se encontró que en las líneas ‘WC-2 no. 100’, ‘DW-K2 no. 47’, ‘Oda’, ‘2000/01 population FR. no. 43’, ‘2000/01 population 37-30 BDI no. 63’ y ‘2000/01 population 37-30 BDI no. 12’, la resistencia la roya de la hoja es conferida por dos genes dominantes.

**Palabras clave:** *Triticum turgidum*, *Puccinia triticina*, genes, resistencia, susceptibilidad.

### 3.2 ABSTRACT

The leaf rust caused for the fungus *Puccinia triticina* E. is a disease that, when present, generates loses of up to 100 % in the grain yield of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp. *durum* L.). As a measure of genetic protection in the pyramidal construction of news resistant genotypes, it is necessary to identify in the resistant germplasm to this fungus, the number of genes involved and their gene action. For this aim, crosses were made

between the common susceptible parent 'Atred#1' y 'Atred#2', with six resistant lines of durum wheat landraces from Ethiopia during the Autumn-Winter 2017-19 crop cycle. The generations of the of the lines were obtained alternately in CIMMYT-Batan, State of Mexico and CIMMYT-CENEB, Ciudad Obregon, Sonora, until obtaining Families F3 and F4. Based on the family evaluations in the F3 and F4 and the segregating analysis, it was found that the resistance in the lines WC-2 no. 100, DW-K2 no. 47, Oda, 2000/01 population FR. no. 43, 2000/01 population 37-30 BDI no. 63 y 2000/01 population 37-30 BDI no. 12, the resistance to leaf rust is conferred by two dominant genes.

**Index words:** *Triticum turgidum* var. *durum*, *Puccinia triticina* Eriks, genes, resistance, susceptibility.

### 3.3 INTRODUCCIÓN

Los trigos, harinero (*Triticum aestivum*) y cristalino (*Triticum turgidum* ssp *durum*), son la base de la alimentación para muchas culturas; además, con el trigo cristalino, se añade un alto aporte de fósforo, calcio, magnesio, silicio, vitaminas del grupo B y contenido energético (Reynolds *et al.*, 2014). El harinero, hexaploide con el genoma AABBDD y el cristalino, tetraploide con el genoma AABB (Huerta-Espino y Skovmand, 2000), motiva que la sémola del grano cristalino sea utilizada principalmente para elaborar pastas, productos de repostería y semolina. El consumo de ambas fuentes de harinas, constituyen el 40 % del gasto de los hogares mexicanos y proporciona el 10 % del total de calorías (SIAP, 2021).

Un problema fitopatológico importante al que se enfrenta este cultivo es la roya de la hoja causada por el hongo *Puccinia triticina* E. Los daños al follaje causan pérdidas hasta del 100 % del rendimiento; sus infecciones tempranas disminuyen el número de granos por espiga, peso hectolítrico y calidad del grano (Dubin y Rajaram, 1996). Privilegiando la alimentación inocua, este problema se ha abordado con resistencia

genética. En este sentido y por lo general, las variedades formadas pueden poseer un gen dominante de resistencia; sin embargo, esta resistencia puede ser corta, de 3 a 5 años; pues el patógeno evoluciona rápido hacia nuevas formas de virulencia (Singh y Dubin, 1997).

El trigo cristalino en México permaneció altamente resistente a la roya de la hoja hasta el año 2001. En este año, se identificó una nueva raza, la BBG/BN que acopló de manera virulenta a más del 80 % de la colección de trigos cristalinos del Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), al igual que a la variedad ‘Altar C84’ que había permanecido resistente por más de 20 años (Singh *et al.*, 2004; Huerta-Espino *et al.*, 2009).

En Etiopía, el cultivo de variedades de trigo representa el 12 % de especies cultivadas que se caracterizan por la variabilidad fenotípica. La resistencia a roya es una prioridad en la producción de cultivos (Hammer y Diederichsen 2009).

En México se identificaron alrededor de 50 razas fisiológicas del hongo causante de la roya de la hoja, mediante un conjunto de líneas diferenciales que sólo poseen un gen de resistencia específico. Sin embargo, para conocer la dinámica de la interacción planta-patógeno, es necesario realizar muestreos a lo largo del ciclo del cultivo para vigilar las reacciones de virulencia de las razas de roya, ya que una misma variedad puede ser susceptible en ciertas regiones y resistente en otras (Rodríguez-García *et al.*, 2009). La interacción planta-patógeno se ajusta a la teoría de gen a gen; por lo tanto, por cada gen de resistencia en la planta existe un gen correspondiente de avirulencia en el patógeno (Flor, 1971). En el caso de la roya de la hoja que preferentemente ataca a los trigos cristalinos en México existen siete razas: BBB/BNG, BBB/BNJ, BBG/BNC, BCG/BNC, BBG/BPC, CBG/BPC, (Huerta-Espino *et al.*, 2020) siendo, en la actualidad BBG/BPC-

Cirno la más importante, ya que venció la resistencia de ‘Cirno C2008’ en el 2017 (Huerta *et al.*, 2017).

La mayoría de los nuevos genotipos de trigos cristalinos que se cultivan en México son resistentes a la roya de la hoja, tanto en estado de plántula como de planta adulta, por la presencia del gen *Lr14a*, para el cual, aún no existe virulencia en este país (Huerta-Espino *et al.*, 2020). Sin embargo, ya existe virulencia para este gen en el sur de Francia (Goyeau *et al.*, 2010).

Las razas del hongo causante de la roya de la hoja evolucionan y adquieren virulencia para los genes de resistencia, por lo que es necesario identificar nuevas fuentes de resistencia o nuevos genes; localizarlos en el genoma ya sea de forma tradicional o mediante marcadores moleculares. Con su ubicación en el genoma, es posible orientar los cruzamientos entre progenitores complementarios y asistir en la selección de segregantes mediante marcadores moleculares para acumular genes que aportan resistencia a roya de la hoja (Lan *et al.*, 2017).

Por lo tanto; el objetivo de este estudio fue identificar en seis genotipos resistentes de trigo cristalino a este hongo, el número de genes involucrados mediante el estudio de las progenies en cruza con las variedades susceptibles ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’.

### 3.4 MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.4.1 Material genético:

**Material genético:** Se utilizaron seis genotipos criollos procedentes de Etiopía de trigo cristalino: WC-2 no. 100, DW-K2 no. 47, Oda, 2000/01 population FR. no. 43, 2000/01 population 37-30 BDI no. 63 (BDI63) y 2000/01 population 37-30 BDI no. 12 (BDI12), que son resistentes a roya de la hoja; ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’ genotipos susceptibles a la roya que alcanza severidad del 100 % (Cuadro 3.1). Estos trigos fueron

introducidos a México y evaluados por su resistencia a la roya de la hoja en el ciclo 2016 en CIMMYT-Batán (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo-Batán).

**Cuadro 3.1 Progenitores resistentes criollos procedentes de Etiopía y el genotipo susceptible ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’.**

<b>Genotipo</b>	<b>GID</b>	<b>Tipo</b>	<b>S_Abbr</b>	<b>S_Loc_Cyc</b>
WC-2 no. 100 (WC-2)	7882310	Criollo	Uniboethinc	BV-16
DW-K2 no. 47 (DW-K2)	7882367	Criollo	Uniboethinc	BV-16
Oda	7882390	Criollo	Uniboethinc	BV-16
2000/01 population FR no. 43 (FR43)	7882479	Criollo	Uniboethinc	BV-16
2000/01 population 37-30 BDI no. 63 (BDI63)	7882494	Criollo	Uniboethinc	BV-16
2000/01 population 37-30 BDI no. 12 (BDI12)	7882501	Criollo	Uniboethinc	BV-16
Atred #1	5460556	Testigo S		BV-16
Atred #2	5460556	Testigo S		BV-16

**GID= Identificador del germoplasma, S\_Abbr= Identificador del germoplasma, S\_Loc Cvc= Localidad de origen, Testigo S= Susceptible.**

### 3.4.2 Cruza de progenitores

Se hicieron cruzamientos entre los genotipos resistentes a la raza BBG/BP-Cirno de roya de la hoja con los genotipos susceptibles ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’ (Cuadro 3.2), durante el ciclo Otoño-Invierno 2017 en el CIMMYT-CENEB (Centro Internacional de Maíz y Trigo-Campo Experimental Norman E. Borlaug) Sonora, México. Los progenitores se sembraron en tres fechas con un intervalo de 10 días, con la finalidad de que la etapa de floración coincidiera y así hacer los cruzamientos.

**Cuadro 3.2 Cruzamientos para determinar la genética de la resistencia en cinco genotipos de trigo cristalino y el número de familias F3 y F4 evaluadas.**

<b>Cruza</b>	<b>Pedigrí</b>	<b>F3</b>	<b>F4</b>
WC-2 no. 100x Atred#1	CDSS17Y00353S	333	310
DW-K2 no. 47x Atred#1	CDSS17Y00361S	412	398
Oda x Atred#2	CDSS17Y00367S	312	312
2000/01 population FR no. 43x Atred#2	CDSS17Y00369S	298	298
2000/01 population 37-30 BDI 63xAtred#2	CDSS17Y00370S	207	207
2000/01 population 37-30 BDI 12xAtred#2	CDSS17Y00377S	359	359

### **3.4.3 Obtención de las generaciones filiales F1, F2, F3 y F4**

Las semillas F1, provenientes de una espiga de cada cruza, se sembraron en el CIMMYT-Batán, donde se cosechó una planta para obtener la semilla F2, que se sembró en el Campo Experimental Norman E. Borlaug CIMMYT-CENEB, Ciudad Obregón, Sonora, en diciembre del año 2017. En mayo del año 2018 en CIMMYT-Batán se sembraron las semillas de una espiga de las plantas F2 en un surco sencillo de 1.5 m con una separación de 0.5 m.

### **3.4.4 Siembra de las generaciones F3 y F4**

La semilla de las familias F3 se sembraron el 30 de noviembre del año 2019 en CIMMYT-CENEB Ciudad Obregón, Sonora para obtener familias F4. Las familias de cada cruza fueron sembradas en un diseño completamente al azar sin repeticiones en un surco doble de 1.2 m con 0.8 m de separación.

### 3.4.5 Raza del patógeno

Se utilizó una de las razas que preferentemente atacan trigos cristalinos. La raza BBG/BP-Cirno que venció la resistencia de la variedad ‘Cirno C2008’ (Huerta *et al.*, 2017). La fórmula de avirulencia/virulencia de esta raza es: *Lr1, Lr2a, Lr2b, Lr2c, Lr3, Lr3bg, Lr3ka, Lr9, Lr13, Lr14a, Lr15, Lr16, Lr17, Lr18, Lr19, Lr21, Lr24, Lr25, Lr26, Lr28, Lr29, Lr30, Lr32, Lr35, Lr36, Lr61 /Lr10, Lr11, Lr12, Lr14b, Lr20, Lr23, Lr27, Lr31, Lr33, Lr72, Cam* (Singh *et al.*, 2004; Huerta *et al.*, 2017).

### 3.4.6 Inoculación

Para inducir la epidemia en el lote donde se sembraron las familias F3 en CIMMYT-Batán y F4 en CIMMYT-CENEB, se sembró la variedad de trigo ‘Cirno’ como bordo que actuó como fuente de dispersión del inóculo del patógeno, se inoculó con esporas de la raza BBG/BP-Cirno en una concentración  $1 \times 10^6$  esporas/mL, en aceite mineral Soltrol® 40 días después de la siembra y se roció totalmente a las hojas de las plantas. A la segunda y tercera semana se inocularon nuevamente los bordos para asegurar el establecimiento del hongo.

### 3.4.7 Evaluación de familias, F3 y F4

Se realizaron tres evaluaciones en cada tipo de familias. La primera cuando los progenitores susceptibles ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’ presentaron el 20 % de severidad en la hoja bandera y las otras dos a intervalos de ocho días. La tercera evaluación se realizó cuando el progenitor susceptible ‘Atred#1’ y ‘Atred#2’ presentaron el 100 % de severidad en la hoja bandera. En todos los casos la evaluación de la enfermedad se realizó siguiendo la escala modificada de Cobb (Peterson *et al.*, 1948). Las familias de cada cruce se agruparon con base en las siguientes características:

1. Familias homocigóticas resistentes con una respuesta similar al progenitor resistente, con 1 a 5 % de daño en el follaje.

2. Familias heterocigóticas que incluyen: a) Plantas con resistencia intermedia (10 a 20 % de daño); b) Plantas con susceptibilidad mayor al 30 %.
3. Familias homocigóticas susceptibles con una respuesta similar al progenitor susceptible.

#### **3.4.8 Frecuencias esperadas**

Se calcularon las frecuencias esperadas de las familias F3 y F4 respectivamente, para determinar el número de genes involucrados en la resistencia, con el supuesto o la hipótesis de que las frecuencias genotípicas son las correspondientes para dos pares de genes.

#### **3.4.9 Análisis genético**

Las frecuencias observadas y esperadas se compararon mediante la prueba de  $\chi^2$ . El valor de tablas y la significancia se determinaron de acuerdo con la  $\chi^2$  que obtuvieron las proporciones de las familias de cada cruce. Para el valor de tablas se usaron n-1 grados de libertad, en donde n es el número de clasificación de familias F4 (Infante y Zárate de Lara, 1990).

### **3.5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Los seis progenitores resistentes confirmaron sus cualidades de resistencia pues cuando los progenitores 'Atred#1' y 'Atred#2' mostraron el 100 % de susceptibilidad, esos genotipos solamente presentaron entre 0 y 1 %.

En las pruebas de  $\chi^2$  de las familias F3 y F4, solo se tuvieron tres categorías: familias susceptibles, familias resistentes y familias segregantes; ello por las distintas combinaciones gaméticas esperadas para dos pares de genes en cada generación segregante.

Sin embargo, para su análisis se tuvieron solo dos categorías, las familias susceptibles y otras (familias resistentes + familias segregantes) por la posible variación

continua a causa de la presencia de otros genes de efectos menores exclusivos para planta adulta.

Los resultados indicaron que la distribución de frecuencias fenotípicas relativas de las familias F3 y F4 se ajustó a dos genes independientes y con dominancia completa a una probabilidad de 0.05 (Cuadros 3.3, y 3.4).

**Cuadro 3.3. Distribución y frecuencias relativas de las familias F3.**

Cruza	Total de familias	OT. O	OT. E	SO	SE	Relaciones fenotípicas	$\chi^2$ Obs	$\chi^2$ Esp	# genes
1	333	314	312.18	19	20.81	15:1	0.15	3.84	2
2	412	387	386.25	25	25.75	15:1	0.02	3.84	2
3	312	291	290.16	21	19.51	15:1	0.11	3.84	2
4	298	278	277.14	20	18.62	15:1	0.10	3.84	2
5	207	196	194.06	11	12.93	15:1	0.30	3.84	2
6	206	193	191.58	13	12.87	15:1	0.01	3.84	2

**OT. O= Otros Observados (Resistentes Observados + Segregantes Observados), OT. E= Otros Esperados (Resistentes Esperados + Segregantes Esperados), SO= Susceptibles Observados, SE= Susceptibles Esperados,  $\chi^2$  Obs =  $\chi^2$  Observada,  $\chi^2$  Esp=  $\chi^2$  Esperada, 1= WC-2 x Atred#1, 2= DW-K2 x Atred#1, 3= Oda x Atred#2, 4= FR43 x Atred#2, 5= BDI63 x Atred#2, 6= BDI12 x Atred#2.**

**Cuadro 3. 4. Distribución y frecuencias relativas de las familias F4.**

Cruza	Total de familias	OT. O	OT. E	SO	SE	Relaciones fenotípicas	$\chi^2$ Obs	$\chi^2$ Esp	# genes
1	310	263	266.29	47	43.58	13.75:2.25	0.89	3.84	2
2	398	344	341.88	54	55.95	13.75:2.25	0.08	3.84	2
3	310	264	166.41	46	43.29	13.75:2.25	0.15	3.84	2
4	281	238	141.48	43	39.51	13.75:2.25	0.35	3.84	2
5	199	173	171.01	26	27.89	13.75:2.25	0.16	3.84	2
6	197	173	169.28	24	27.70	13.75:2.25	0.57	3.84	2

**OT. O= Otros Observados (Resistentes Observados + Segregantes Observados), OT. E= Otros Esperados (Resistentes Esperados + Segregantes Esperados), SO= Susceptibles Observados, SE= Susceptibles Esperados,  $\chi^2$  Obs =  $\chi^2$  Observada,  $\chi^2$  Esp=  $\chi^2$  Esperada, 1= WC-2 x Atred#1, 2= DW-K2 x Atred#1, 3= Oda x Atred#2, 4= FR43 x Atred#2, 5= BDI63 x Atred#2, 6= BDI12 x Atred#2.**

El criterio para determinar el número de genes se basó en registrar el número de familias homocigóticas susceptibles pues éstas son más fáciles de identificar en campo,

bajo el supuesto de que la virulencia del patógeno es recesiva y que la resistencia en la planta es dominante (Roelfs y Groth, 1988).

Para el caso de la F3, en las seis cruzas, se postula que existe la presencia de dos genes dominantes con una frecuencia de 15:1 en la F3 y 13.75:2.25 en la F4. Puesto que, a medida que aumenta el número de generaciones de autofecundación disminuye la proporción de individuos heterocigóticos. Por cada generación de autofecundación la proporción de heterocigotos se reduce a la mitad; sin embargo, las proporciones en F3 y F4 coinciden con que la resistencia se basa por dos genes dominantes.

El conocimiento de la resistencia a la roya de la hoja en el trigo cristalino en México ha sido muy limitado. En parte debido a que las razas de *P. triticina* que preferentemente atacan al trigo cristalino son avirulentas a la mayoría de los genes que confiere resistencia a la roya de la hoja en trigos harineros, por lo tanto; se espera que los genes efectivos presentes en los genotipos de trigo cristalino sean diferentes de los que son efectivos en el trigo harinero contra las razas que atacan este cultivo. Sin embargo, durante mucho tiempo se desconocía si los trigos cristalinos compartían los mismos genes de resistencia que los presentes en el genoma A y B del trigo harinero. Estudios recientes permitieron la identificación de varios genes (*Lr3a*, *Lr14a*, *23 Lr27+31*) en trigos cristalinos que se encuentran comúnmente inefectivos en el trigo harinero, debido a la alta frecuencia de virulencia entre las poblaciones de *P. triticina*. Sin embargo, estos genes mencionados son eficaces para la mayoría de las razas que atacan trigos cristalinos.

En la última década se realizaron extensos esfuerzos en INIFAP y CIMMYT para mejorar la información y así la resistencia a la roya de la hoja. Varias de las fuentes de resistencia que se identificaron en el CIMMYT se han vuelto ineficaces debido a la detección de virulencia en el Noroeste de México con las nuevas razas de roya de la hoja que vencieron la resistencia de 'Altar C84', 'Atil C2001', 'Jupare C2001', 'Banamichi

C2004' y recientemente la resistencia de 'CIRNO C2008' (Singh *et al.*, 2004, Huerta-Espino *et al.*, 2009 y Huerta Espino *et al.*, 2017).

Para reducir la vulnerabilidad del trigo cristalino a la roya de la hoja se ha hecho énfasis para encontrar una solución más duradera en el control de esta enfermedad, que incluye la identificación de nuevas fuentes de resistencia, especialmente en trigos introducidos de un centro de diversificación como lo es Etiopía (Hammer y Diederichsen 2019) y por lo tanto parte fundamental de esta investigación.

Aunque se han llevado a cabo varios estudios de herencia para determinar la base genética de la resistencia a la roya de la hoja en trigo cristalino (Zhang y Knott, 1993; Gupta *et al.*, 1995 Singh *et al.*, 1993; Herrera-Foessel *et al.*, 2005; Mariscal Amaro *et al.*, 2007; algunos de ellos se han llevado a cabo sólo en estado de plántula en condiciones de invernadero y algunos fueron evaluados con razas de roya de la hoja inapropiadas, con reportes de acción génica que no se ha logrado confirmar; por eso la importancia de las pruebas de campo y las razas que provienen de trigos cristalinos como en el presente estudio.

Mediante cruces entre dos progenitores o por postulación, se ha determinado la presencia de diferentes genes de resistencia a la roya de la hoja en trigos cristalinos como el *Lr3* en el cultivar 'Storlom' (Herrera-Foessel *et al.*, 2007), o *Lr14a* identificado 'Colosseo' y 'Somateria' (Soleiman *et al.*, 2014); *Lr10*, *Lr14b*, *16*, *17*, *23*, *27*, *31*, *Lr72*, y otros genes que se han identificado en genotipos de trigo cristalinos (Huerta-Espino *et al.*, 2011) incluyendo el gen *Lr72* presente en 'Altar C84' y 'Atil C2000' (Herrera-Foessel *et al.*, 2014).

Los estudios genéticos también han reportado la presencia de un gen dominante como es el caso de *LrCam* derivado de un trigo criollo de Etiopía que confiere resistencia a la variedad 'Cirno C2008' que ya es inefectivo a la raza que evolucionó de la

preexistente BBG/BP (Huerta *et al.*, 2017). Un gen dominante y un gen recesivo ha sido reportado en el trigo invernal ‘Elinia 48’, mientras que en ‘Mirlo 26’ la resistencia fue conferida por un gen recesivo; y la progenie del entrecruzamiento de estos dos genotipos indicó que el gen recesivo fue común (Delgado-Sánchez *et al.*, 2016).

En otro estudio, en la cruce de ‘CWI52345’ con ‘Altar C84’ se identificó un gen dominante (Huerta *et al.*, 2011) al igual que en cuatro poblaciones derivadas de los progenitores ‘Amria’, ‘Byblos’, ‘Geromtel\_3’ y ‘Tunsyr\_2’ con el progenitor susceptible ‘Atred #2’ evaluados con la raza BBG/BP, donde se determinó que existe un gen dominante en ‘Amria’ y ‘Byblos’ localizado en el cromosoma 7BL, mientras que en ‘Geromtel\_3’ y ‘Tunsyr\_2’ el gen de resistencia se localizó en el cromosoma 6BS (Kthiri *et al.*, 2018). Un gen dominante denominado *Lr79* fue identificado en el genotipo australiano ‘Aus26582’ y localizado en el cromosoma 3BL (Qureshi *et al.*, 2018). Mientras que en el trigo cristalino ‘PI192051’ criollo de Portugal, también se idéntico un gen dominante localizado en la región pericentromérica del cromosoma 4A (Aoun *et al.*, 2019).

La presencia de dos genes complementarios como en el caso de ‘Jupare C2001’ (Herrera-Foessel *et al.*, 2005) y ‘Banamichi C2004’, (Huerta Espino *et al.*, 2009) han sido reportados en ‘Don Ricardo’ y ‘Don Valentín’ (Soleiman *et al.*, 2014); ‘Syria 1740’ y ‘CMH8A’ (Mariscal *et al.*, 2007).

Los resultados del presente estudio coinciden con lo reportado por Gupta *et al.* (1995) quienes indicaron la presencia de dos genes dominantes presentes en la variedad ‘PBW 34’ temporalmente designados como *Lrd1* y *Lrd2* mientras que *Lrd1* y *Lrd3* estuvieron presentes en la variedad ‘DWL 5023’ y también con lo reportado por Kthiri *et al.* (2019) en la variedad ‘Gaza’ donde se identificó la presencia de dos genes con

dominancia completa en respuesta a la inoculación con la raza BBG/BP y localizados en el cromosoma 6B y 6BL respectivamente.

La presencia de tres genes no es lo más común, pero existen estudios como lo reportado en la cruce de ‘Jupare C2001’ con ‘Altar C84’+*Lr14a* que mostró una segregación de 19:38:7 (familias homocigóticas resistentes: familias segregando: familias homocigóticas susceptibles) que corresponde a tres genes de resistencia, dos complementarios dominantes (*Lr27+Lr31*) provenientes de ‘Jupare C2001’ y uno dominante (*Lr14a*) proveniente de ‘Altar’+*Lr14a* (Huerta *et al.*, 2010).

Con las nuevas fuentes y genes de resistencia a la roya de la hoja en trigos cristalinos incluyendo las identificadas en el presente estudio, es necesario la incorporación de estos genes en las nuevas variedades de trigo cristalino; sin olvidar las fuentes de resistencia de raza no específica que se hicieron evidentes solo después de la aparición de la raza que venció la resistencia de ‘Altar C84’ (Singh *et al.*, 2004) y más recientemente la de ‘Cirno C2008’ (Huerta-Espino *et al.*, 2017); además se debe continuar con la identificación de otras fuentes de resistencia.

Los resultados de este estudio indican la presencia de dos genes dominantes en cada uno de los progenitores evaluados, sin embargo; para demostrar si estos genes son comunes o diferentes entre sí e identificar cuáles son sus diferencias; es necesario realizar las cruces para la prueba de alelismo y, por lo tanto, el análisis molecular ayudara a la localización de estos genes en el genoma del trigo cristalino.

### **3.6 CONCLUSIONES**

La resistencia que presentan los progenitores es de herencia simple y condicionada por dos genes independientes. El tipo de acción génica en todas las cruces fue dominancia completa. Los seis progenitores: WC-2, DW-K2, Oda, FR43, BDI63, BDI12, pueden emplearse como fuente de resistencia a roya de la hoja para la raza BBG/BP-Cirno y las

otras razas que preferentemente atacan trigos cristalinos existentes en México. Estas fuentes de resistencia aquí identificadas proveen opciones adicionales para los programas de mejoramiento genético de trigos cristalinos.

### 3.7 LITERATURA CITADA

- Aoun M., J. A. Jolmer, M. N. Rouse, M. E. Elias, M. Breiland, W. D. Bulbuna, S. Chao, A. Maricelis (2019) Mapping of Novel Leaf Rust and Stem Rust Resistance Genes in the Portuguese Durum Wheat Landrace PI 192051 *Genes/Genomes/Genetics* 9 (8): 253:2547. <https://doi.org/10.1534/g3.119.400292>
- Delgado-Sánchez L. M., J. Huerta-Espino, M. C. López-Peralta, I. Benítez-Riquelme y E. Hernández-Meneses (2016) Genética de la Resistencia a *Puccinia Triticina* Eriks en trigos cristalinos invernales. *Revista Fitotecnia Mexicana* 39 (2):133-139. <https://doi.org/10.35196/rfm.2016.2.133-139>
- Dubin H. J. and S. Rajaram (1996) Breeding disease-resistant wheat for tropical highlands and lowlands. *Annual Review of Phytopathology* 34: 503-516. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.34.1.503>
- Flor H. H (1971) Current status of the gene for gene concept. *Annual Review. Phytopathology* 9: 275-296.
- Goyeau H., K. Ammar, J. Berder (2010) Virulence in *Puccinia triticina* for Durum Wheat, Cultivar Creso and Other Durum Wheat Cultivars Carrying Resistance Gene Lr14a in France. *Plant disease* 94 (8):1068.
- Gupta S., R. G. Saini and A. K. Gupta (1995) Genetic analysis of resistance to leaf-rust (*Puccinia recondite* f. sp. *Triticici*) pathotypes in the durum wheats 'PBW 34' and 'DWL 5023'. *Plant Breeding* 114:176-178. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0523.1995.tb00786>
- Hammer K and A. Diederichsen (2009) Evolution, status and perspectives for landraces in Europe. In Veteläinen M, Negri V and Maxted N (Eds) *European Landraces On-Farm Conservation, Management and Use*. Bioversity Technical Bulletin No. 15. Rome, Italy: Bioversity International. pp. 23-44.
- Herrera-Foessel S. A., R. P. Singh, J. Huerta-Espino, J. Yuen, A. Djurle (2005) New genes for leaf rust resistance in CIMMYT durum wheats. *Plant Disease*. 89:809-814.
- Herrera-Foessel S. A., R. P. Singh, J. Huerta-Espino, M. William, G. Rosewarne, A. Djurle, J. Yuen (2007) Identification and mapping of *Lr3* and a linked leaf rust resistance gene in durum wheat. *Crop Sci* 47:1459–1466. <https://doi.org/10.2135/cropsci2006.10.0663>
- Herrera-Foessel, S. A., J. Huerta-Espino, V. Calvo-Salazar, C. X. Lan, R. P. Singh (2014) Lr72 Confers Resistance to Leaf Rust in Durum Wheat Cultivar Atil C2000. *Plant Disease* 98(5):631-635. doi: 10.1094/PDIS-07-13-0741-RE

- Huerta E. J. y B. Skovmand (2000) Origen, botánica y taxonomía del trigo. In: el trigo de temporal en México. Villaseñor, M. H. E. y Espitia, R. E. (Eds.). SAGARPA, INIFAP. CIR-CENTRO y CEVAMEX, México. 25-38 pp.
- Huerta-Espino J., R. P. Singh, S. A. Herrera-Foessel, J. B. Pérez-López and P. Figueroa-López (2009) First detection of virulence in *Puccinia triticina* to resistance genes Lr27+Lr31 present in durum wheat in México. Plant Disease 93(1):110. <http://doi.org/10.1094/PDIS-93-1-0110C>
- Huerta-Espino J., R. P. Singh, H. E. Villaseñor M, E. Espitia R y S. G. Leyva M (2010) Transferencia del gen Lr14a de trigos harineros a trigos cristalinos y expresión de la resistencia a roya de la hoja. Revista Fitotecnia Mexicana 33:26-36.
- Huerta-Espino J., R. P. Singh, S. German, B.D. McCallum, R.F. Park, W. Q. Chen, S. C. Bhardwaj, H. Goyeau (2011) Global status of wheat leaf rust caused by *Puccinia triticina*. Euphytica 179:143-160. DOI 10.1007/s10681-011-0361-x
- Huerta Espino J., M. E. Rodríguez Contreras, M. F. Rodríguez García, H. E. Villaseñor Mir, S. G. Leyva Mir y E. Espitia Rangel (2011) Variación genética de la resistencia a *Puccinia triticina* E. en trigos duros de Oaxaca. México. Revista Fitotecnia Mexicana 34:35-41.
- Huerta-Espino J., H. E. Villaseñor-Mir, R. P. Singh, J. B. Pérez-López, K. Ammar, E. García-León, E. Solís-Moya (2017) Evaluation of lines and varieties of durum wheat to the leaf rust race BBG/BP-CIRNO caused by *Puccinia triticina* E. that defeated the resistance of Cirno C2008. Mexican Journal of Phytopathology 35: S2017 34 p.
- Huerta Espino J., R. P. Singh, H. E. Villaseñor Mir, M. F. Rodríguez García, E. Solís Moya, E. Espitia Rangel (2020) Habilidad competitiva de razas de roya de la hoja provenientes de trigos cristalinos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas (REMEXCA). 11(1):97-109. Doi:10.29312/remexca.1i1.1763
- Infante G. S., G. P. Zárate de Lara (1990) Métodos Estadísticos: Un Enfoque Interdisciplinario. 2a ed. Trillas. México, D. F. 643 p.
- Kthiri D., A. Loladze, P. R. McLachlan, A. N'Diaye, S. Walkowiak, K. Nilsen (2018) Characterization and mapping of leaf rust resistance in four durum wheat cultivars. PLoS ONE 13(5): e0197317. <https://doi.org/10.1371/journal.Pone.0197317>
- Kthiri D., A. Loladze, A. N'Diaye, K. T. Nilsen, S. Walkowiak, S. Dreisigacher, K. Ammar and C. J. Pozniak (2019) Mapping of Genetic Loci Conferring Resistance to Leaf Rust from Three Globally Resistant Durum Wheat Sources. Front. Plant Science 10:1247. Doi:10.3389/fpls.1019.0147
- Lan C. X., Y. Ren, R. P. Singh, B. R. Basnet y J. Huerta-Espino (2017) Identification and mapping of adult plant resistance loci to leaf rust and stripe rust in common wheat cultivar Kundan. Plant Disease 101:456-463. <https://doi.org/10.1094/PDIS-06-16-0890-RE>

- Mariscal Amaro L. A., S. G. Leyva Mir, J. Huerta Espino y H. E. Villaseñor Mir (2007) Genética de la resistencia a roya de la hoja (*Puccinia triticina* E.) en líneas elite de trigo duro. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30(1):33-38.
- Peterson R. F., A. B. Campbell and A. E. Hannah (1948) A diagrammatic scale for estimating rust intensity of leaves and stem of cereals. *Canadian Journal of Research* 26:496-500.
- Qureshi N., H. H. Bariana, V. V. Kumran, S. Muruga, K. L. Forrest, M. J. Hayden and U. Bansal (2018) A new leaf rust resistance gene *Lr79* mapped in chromosome 3BL from the durum wheat landrace Aus26582. *Theor Appl Genet* 131:1091-1098. <http://doi.org/10.1007/s00122-018-3060-3>
- Reynolds M. P., R. Trethowan, J. Crossa, M. Vargas y K. D. Sayre (2014) Physiological factors associated with genotype by environment interaction wheat. *Field Crops Research* 75: 140-141. [http://doi.org/10.1016/S0378-4290\(02\)00023-0](http://doi.org/10.1016/S0378-4290(02)00023-0)
- Rodríguez-García M. F., J. Huerta-Espino y H. E. Villaseñor-Mir (2009) Virulencia de la roya amarilla de trigo en las principales zonas productoras de riego en México. INIFAP. CIR-CENTRO y CEVAMEX, México. pp: 20-31.
- Roelfs A. P and J. V. Groth (1988) *Puccinia graminis* f. sp. *Tritici* black stem rust of *Triticum spp.* In: *Genetics of Plant Pathogenic Fungi. Advances in Plant Pathology*. Vol. 6. pp: 345-361.
- Singh R. P., E. Bechere, O. Abdalla (1993) Genetic Analysis of resistance to leaf rust in nine durum wheats. *Plant Disease*. 77:460-463.
- Singh R. P and H. J. Dubin (1997) Sustainable control of wheat diseases Mexico. In: *Primer Simposio Internacional de Trigo Memorias*. 7-9 de abril de 1997. Cd. Obregon, Sonora. pp: 93-102.
- Singh R. P., J. Huerta-Espino, W. Pfeiffer, L. P. Figueroa (2004) Occurrence and impact of a new leaf rust race on durum wheat in the Northwestern Mexico during 2001-2003. *Plant Disease*. 88:703-708.
- SIAP 2021. Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. [www.siap.sagarpa.gob.mx](http://www.siap.sagarpa.gob.mx).
- Soleiman N. H., I. Solis, S. Mahmoud, J. Sillero, D. Villegas, F. Alvarado, C. Royo, J. Serra, K. Ammar, F. Martínez-Moreno (2014) Resistance Leaf Rust in a Set of Durum Wheat Cultivars and landraces in Spain. *Agriculture research*. Vol 14 No. 3 2016.
- Zhang H. D y R. Knott (1993) Inheritance of adult plant resistance to leaf rust in six durum wheat cultivars. *Crop Science* 33:694-69.

## DISCUSIÓN GENERAL

La utilización de trigo cristalino de Etiopía en México tiene ventajas por su singularidad en diversos aspectos morfológicos y de resistencia a la roya de la hoja y otras enfermedades, a pesar de la adaptación, calidad del grano (Giunta *et al.*, 2007); y su potencial productivo en ambientes mediterráneos que tienen problemas de adaptación y de susceptibilidad a las royas (Alamayehu, 1996). La presencia de nuevas razas de roya de hoja con distintas combinaciones de genes de avirulencia/virulencia que generan pérdidas considerables en el noroeste y norte de México es un problema constante (Huerta-Espino *et al.*, 2011).

En este estudio se realizó el análisis de la resistencia a la roya de la hoja en 194 genotipos de trigo cristalino (169 criollos y 25 mejorados) procedentes de Etiopía, en el cual se considera, la resistencia genética en plántula y planta adulta a la raza BBG/BP-Cirno, su respuesta a la infección a las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ y la caracterización de la progenie mediante el resultado del cruzamiento con los progenitores susceptibles ‘Atred #1 y ‘Atred #2’.

En la evaluación en estado de plántula y planta adulta a la raza BBG/BP-Cirno se identificaron genotipos resistentes para ambas evaluaciones, lo que indica que los genes de resistencia en plántula fueron efectivos también en planta adulta en evaluaciones en campo. Se espera que en ausencia de virulencia un gen de resistencia que se expresa en plántula también lo hace en planta adulta como en el caso de la variedad ‘Quilafen’, en la que se reportó la presencia del gen *Lr17* (Zhang y Knott 1993).

Por ejemplo, los genotipos de trigos cristalinos como: ‘Lloyd’, ‘Medora’, ‘Pelissier’, ‘Stewart 63’ y ‘Wakooma’, que presentaron resistencia en plántula, y que al realizar cruzamientos con el progenitor susceptible ‘RL6089’ los resultados revelaron que los genes de resistencia también eran efectivos en planta adulta (Zhang y Knott 1993).

Algunos genotipos de trigos duros cultivados en México son resistentes a la roya de la hoja en estado de plántula y planta adulta por la presencia del gen *Lr14a* para el cual aún no existe virulencia entre las razas que preferentemente atacan a trigos cristalinos (Huerta Espino *et al.*, 2010). Aunque el gen de resistencia *Lr14a* puede ser usado en combinación con otros genes de efectos mayores y con genes de resistencia no específica (Huerta-Espino *et al.*, 2010).

Entre los genotipos resistentes en plántula; se espera que esta resistencia permanezca en planta adulta. También se identificaron genotipos susceptibles en plántula, pero resistentes en planta adulta, esta resistencia puede ser de raza específica como la conferida por *Lr35* o *Lr37*; u otros genes que también pueden existir solos o en combinación con otros genes de raza no específica como es el caso de *Lr46*.

Una variedad de trigo que posea un solo gen de resistencia de desarrollo lento de la roya muestra niveles de resistencia moderados. Cuando el número de genes se incrementa los niveles de resistencia también se incrementan e inclusive son más estables a través de ambientes donde la roya de la hoja es endémica (Solis-Moya 2013).

La resistencia de desarrollo lento o resistencia durable se caracteriza por su efecto aditivo, tanto con genes de resistencia de desarrollo lento de la roya (Singh y Rajaram, 1992b), como con genes de resistencia específica (German y Kolmer, 1992). En la variedad ‘Topacio C97’ en planta adulta en respuesta a la inoculación con la raza BBG/BN mostró un gen de desarrollo lento de roya de la hoja (Solis-Moya *et al.*, 2013).

La variedad ‘Syria 1740’ fue resistente en planta adulta y su resistencia fue condicionada por dos genes dominante complementarios (Mariscal *et al.*, 2007). Singh *et al.* (1993) hicieron cruces de nueve trigos duros con el genotipo ‘DW7276’ susceptible a la raza BBB/BN, y encontraron que un gen parcialmente dominante confiere resistencia en plántula en las variedades ‘Altar 84’, ‘Carcomun’, ‘Morus’ y ‘Totanos’. Este gen en

forma individual no confiere un nivel aceptable de resistencia en planta adulta; sin embargo, interactúa de manera aditiva con otros genes de efecto aditivo. Los que confieren resistencia en planta adulta a las variedades ‘Mexicali 75’, ‘Yavaros 79’, ‘Diver’, ‘Kingfisher’ y ‘Somorguho’ (Huerta *et al.*, 2009). En el caso de ‘Altar C84’ que permaneció resistente durante casi 20 años en México, pero se volvió altamente susceptible en el 2001 con la raza BBG/BN.

También se identificó un pequeño y significativo grupo de genotipos que fueron resistentes en plántula, pero susceptibles en planta adulta, lo cual no es muy común. Sin embargo, existen evidencias de que ciertos genes que confieren resistencia en plántula; en la etapa adulta son de efectos intermedios a ciertas razas del patógeno e inclusive se comportan como susceptibles (Huerta y Singh 1996; Singh *et al.*, 1999).

En la evaluación de los genotipos con las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ, se identificaron 89 genotipos resistentes equivalente al 35% (de 0 a 10% de infección) en contra de la raza BBG/BPCG y para la raza BBG/BPCJ fueron 91 los genotipos resistentes que representan el 45%.

Sin embargo, existió un incremento de genotipos más susceptibles a la raza BBG/BPCJ es posible que estos genotipos compartan la misma fuente de resistencia que ‘Cirno C2008’ a través de su progenitor ‘Camayo’ (*Lrcam*). El grupo más importante para los objetivos del mejoramiento genético, son aquellos genotipos que permanecieron resistentes para ambas razas y con una severidad final aceptable.

La selección de los seis progenitores resistentes que presentaron entre 0 y 1% de severidad final, cuando los progenitores susceptibles ‘Atred#1 y 2’ mostraron el 100% de susceptibilidad. De los cuales ‘WC-2 no. 100’ y 2000/01 population 37-30 BDI no.63’ mostraron resistencia en plántula y planta adulta; sin embargo, el resto de los progenitores seleccionados fueron susceptibles en plántula, pero resistentes en planta adulta.

El resultado de las proporciones fenotípicas observadas y esperadas en F3 y F4 que se obtuvieron al analizar las progenies coinciden en que la resistencia se basa en dos genes dominantes.

Poco se ha reportado de la resistencia a base de dos genes dominantes; sin embargo, las fuentes de resistencia deben ser diferentes a las antes identificadas, por lo que deben combinarse con otros genes aun efectivos en contra de las razas existentes en un programa de mejoramiento genético a corto y mediano plazo en las nuevas variedades de trigos cristalinos, lo que permitiría controlar genéticamente a la roya de la hoja.

La resistencia que presentan los progenitores es de herencia simple y el tipo de acción génica en todas las cruzas fue dominancia completa. Por ejemplo, en las variedades ‘Syria 1740’ y ‘CMH82A.1062’ la resistencia se debió a la presencia de dos genes dominantes y el tipo de acción génica fue dominante (Mariscal *et al.*, 2007).

En trigos ventureros que son genotipos genéticamente homocigotos-homogéneos para la resistencia a la raza BBG/BN de roya de la hoja, presentaron resistencia de herencia simple condicionada por uno o dos pares de genes (Huerta-Espino *et al.*, 2011)

Por lo general las variedades poseen un gen dominante de resistencia que produce una respuesta de hipersensibilidad. Esta resistencia puede durar poco tiempo, dado que se pierde cuando el patógeno evoluciona hacia nuevas formas de virulencia (Huerta *et al.*, 2004) Ante las limitaciones señaladas y por la mayor presencia de trigos cristalinos, varios investigadores han tomado como modelo para sus estudios de la herencia de la resistencia, a la roya de la hoja que ataca preferentemente al trigo harinero (Huerta *et al.*, 2011). En la mayoría de los casos sus resultados revelaron que la herencia de la resistencia es predominantemente cualitativa, otorgada por genes simples o acaso dos pares de genes independientes o epistáticos (Ortiz *et al.*, 1976).

Las fuentes de resistencia identificadas en el presente estudio deben combinarse con otras fuentes en un programa de mejoramiento genético a corto y mediano plazo en las nuevas variedades de trigos cristalinos, lo que permitirá controlar genéticamente a la roya de la hoja. Puesto que la resistencia genética es una de las alternativas de manejo sustentable más viables para el control de la roya del trigo en México.

### **Literatura citada**

- Adenow Y., M. Hulluak, G. Bela and Tesemma (1997) Resistance and tolerance to leaf rust in Ethiopian tetraploid wheat landraces. *Plant Breeding* 116:533-536.
- Alamayehu F., J. Parlevliet (1996). Variation for resistance to *Puccinia hordei* in Ethiopia barley landraces. *Euphytica* 90:365-370.
- Giunta F., R. Pruneddu (2007) Trends since 1900 in the yield potential of Italian-bred durum wheat cultivars. *Eur J. Agron* 27:12-24.
- Huerta-Espino, J. and R.P. Singh (1996) Misconceptions on the durability of some adult leaf rust resistance genes in wheat. In: G.H.J. Kema, R.E. Niks, and R.A. Daamen. Proceedings of the 9th European and Mediterranean Cereal Rust and Powdery Mildews Conference. September 2-6, 1996. Lunteren, The Netherlands. pp 109-111.
- Huerta E. J., H.E. Villaseñor, M. E. Espitia R, S. G. Leyva M y R. P. Singh (2002) Análisis de la resistencia a la roya de la hoja en trigos harineros para temporal. *Rev. Fitotec. Mex.* 25:161-169.
- Huerta E.J., R. Singh, P. Ravi, R. Espitia, M.Villaseñor, G.Santos (2004) Herencia de la resistencia a roya de la hoja en variedades de trigo para temporal. *Rev. Fitotec. Mex.* 27:391-398.
- Huerta-Espino J., R. P. Signh, H.E. Villaseñor M, E. Espitia y S.G. Leyva M (2010) Transferencia del gen *Lr14a* de trigos harineros a trigos cristalinos y expresión de la resistencia a roya de la hoja. *Revista Fitotecnia Mexicana* 33:26-36.
- Huerta-Espino J., M. E. Rodríguez, M.F. Rodríguez, E. Villaseñor, S. G. Leyva, E. Espitia (2011) Variación genética de la resistencia a *Puccinia triticina* E. en trigos duros de Oaxaca, México. *Rev. Fitotecnia Mexicana*. Vol. 34 (1): 35-41.
- Ortiz F. G., V. A. Rodríguez, y M. A. Quiñonez. 1976. Herencia de la resistencia en trigos duros (*Triticum durum* Desf.) a *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* Ericks. y Henn. y *Puccinia recondita* f. sp. *tritici* Ericks y Henn. *Agrociencia* 25:89-99.
- Mariscal A. L., L. Mir, G.Santos, J. Huerta-Espino, M. Villaseñor (2007) Genética de la resistencia a roya de la hoja (*Puccinia triticina* E. ( en líneas elite de trigo duro. *Rev. Fitotecnia Mexicana*, vol. 30(1):33-38.

- Roelfs A. P., and V. Groth. 1988. *Puccinia graminis* f. sp. *Tritici* black stem rust of *Triticum* spp. In: Genetics of Plant Pathogenic Fungi. Advances in Plant Pathology. Vol. 6. pp: 345-361.
- Singh R.P., S. Rajaram (1992b) Genes for resistance to *Puccinia recondita* f. sp. *Tritici* in 73 Mexican bread wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. In: Cereal Rusts and Mildews. Proc. 9th European and Mediterranean Cereal Rust and Mildew Conf. F J. Zeller. G. Fischbeck (Eds) Weihenstephan/Germany Vortrage fur Pflanzenzuchtug 24:211-213.
- Sing R. P., S. Rajaram, J. Huerta-Espino (1999) Combining additive genes for slow rusting type of resistance to leaf and stripe rust in wheat. In: CIMMT 1999. The 10th Regional Wheat Work-shop for Eastern Central and Southern Africa. Addis Ababa, Ethiopia: CIMMYT. pp:394-403.
- Solis-Moya E., J. Huerta-Espino, M.F. Rodríguez-García, H.E. Villaseñor-Mir, E. Espitia-Rangel, L. Ledesma-Ramírez y M.P. Suaste-Franco (2013) Resistencia de la roya de la hoja en variedades de trigo (*Triticum* spp. L) adaptadas a el bajío, México. Agrocencias 47:457-469.
- Zhang H., and D. R. Knott (1993) Inheritance of adult plant resistance to leaf rust in six durum wheat cultivars. Crop Sci. 33:694-69.
- German S. E., J.A. Kolmer (1992) Effect of gene *Lr34* in the enhancement of resistance to leaf rust of wheat. Theor. Appl. Gen. 84:97-105.

## CONCLUSIONES GENERALES

- De los genotipos proveniente de Etiopía 61 criollos y tres mejorados, fueron resistentes a las razas BBG/BPCG y BBG/BPCJ; mientras que el 15 % fueron resistentes a la raza BBG/BPCJ. Entre los 194 genotipos evaluados, el 27 % fueron resistentes tanto en plántula como en planta adulta; mientras que el 23 % fueron susceptibles en plántula, pero mostraron resistencia de planta adulta.
- La resistencia que presentan los progenitores al ser evaluados con la raza BBG/BP-Cirno es de herencia simple y condicionada por dos genes.
- El tipo de acción génica en todas las cruzas fue dominancia completa.
- Los genotipos que se identificaron en este estudio proveen opciones adicionales para los programas de mejoramiento genético de trigos cristalinos.

## ANEXOS

### Anexo 1. Progenitores Criollos de Etiopía

Ent	Cid	GID	Numero de colecta o variedad	TIPO
1	690305	7882270	WC-1 no. 4	CRIOLLO
2	690306	7882271	WC-1 no. 59	CRIOLLO
3	690307	7882272	WC-2 no. 85	CRIOLLO
4	690308	7882273	WC-4 no. 2	CRIOLLO
5	690309	7882274	WC-10 no. 75	CRIOLLO
6	690310	7882275	DW-K-I no. 24	CRIOLLO
7	690311	7882276	DW-K-I no. 96	CRIOLLO
8	690312	7882277	DW-K-I no. 131	CRIOLLO
9	690313	7882278	DW-K-I no. 136	CRIOLLO
10	690314	7882279	DW-A-I no. 71	CRIOLLO
11	690315	7882280	DW-A-I no. 80	CRIOLLO
12	690316	7882281	DW-A-I no. 130	CRIOLLO
13	690317	7882282	DW-A-4 no. 17	CRIOLLO
14	690318	7882283	DW-A-4 no. 36	CRIOLLO
15	690319	7882284	DW-B-3 no. 28	CRIOLLO
16	690320	7882285	DW-B-3 no. 40	CRIOLLO
17	690321	7882286	DW-A-3 no. 73	CRIOLLO
18	690322	7882287	CD- no. 32	CRIOLLO
19	690323	7882288	CD-1 no. 65	CRIOLLO
20	690324	7882289	CD-1 no. 89	CRIOLLO
21	690325	7882290	DW-B1 no. 34	CRIOLLO
22	690326	7882291	DW-B1 no. 98	CRIOLLO
23	690327	7882292	Gojam-23 no. 39	CRIOLLO
24	690328	7882293	Gojam-24 no. 23	CRIOLLO
25	690329	7882294	Gojam-24 no. 33	CRIOLLO
26	690330	7882295	Tigray-8 no. 7	CRIOLLO
27	690333	7882298	Shoa-28 no. 15	CRIOLLO
28	690334	7882299	Shoa-28 no. 17	CRIOLLO
29	690335	7882300	Shoa-28 no. 22	CRIOLLO
30	690336	7882301	WC-1 no. 109	CRIOLLO
31	690337	7882302	WC-2 no.1	CRIOLLO
32	690338	7882303	WC-2 no.12	CRIOLLO
33	690339	7882304	WC-2 no. 33	CRIOLLO
34	690340	7882305	WC-2 no.41	CRIOLLO
35	690341	7882306	WC-2 no.47	CRIOLLO
36	690342	7882307	WC-2 no.58	CRIOLLO
37	690343	7882308	WC-2 no.80	CRIOLLO
38	690344	7882309	WC-2 no.90	CRIOLLO
39	690345	7882310	WC-2 no.100	CRIOLLO
40	690346	7882311	WC-4 no.78	CRIOLLO

41	690347	7882312	WC-4 no.85	CRIOLLO
42	690348	7882313	WC-4 no.101	CRIOLLO
43	690349	7882314	WC-5 no.99	CRIOLLO
44	690350	7882315	WC-6 no.50	CRIOLLO
45	690351	7882316	WC-8 no. 57	CRIOLLO
46	690352	7882317	WC-9 no.104	CRIOLLO
47	690353	7882318	WC-12 no.28	CRIOLLO
48	690354	7882319	WC-12 no.36	CRIOLLO
49	690355	7882320	WC-12 no.40	CRIOLLO
50	690356	7882321	WC-12 no.53	CRIOLLO
51	690357	7882322	WC-12 no.70	CRIOLLO
52	690358	7882323	WC-14 no.24	CRIOLLO
53	690359	7882324	WC-14 no.29	CRIOLLO
54	690360	7882325	WC-14 no.53	CRIOLLO
55	690361	7882326	WC-14 no.61	CRIOLLO
56	690362	7882327	WC-14 no.72	CRIOLLO
57	690363	7882328	WC-15 no.105	CRIOLLO
58	690364	7882329	WC-16 no.57	CRIOLLO
59	690365	7882330	WC-16 no.88	CRIOLLO
60	690366	7882331	DW-K-I no.39	CRIOLLO
61	690367	7882332	DW-K-I no.42	CRIOLLO
62	690368	7882333	DW-K-I no.52	CRIOLLO
63	690369	7882334	DW-K-I no.63	CRIOLLO
64	690370	7882335	DW-K-I no.67	CRIOLLO
65	690371	7882336	DW-K-I no.128	CRIOLLO
66	690372	7882337	DW-A-I no.27	CRIOLLO
67	690373	7882338	DW-A-I no.33	CRIOLLO
68	690374	7882339	DW-A-I no.48	CRIOLLO
69	690375	7882340	DW-A-I no.52	CRIOLLO
70	690376	7882341	DW-A-I no.57	CRIOLLO
71	690377	7882342	DW-A-I no.94	CRIOLLO
72	690378	7882343	DW-A-I no.1	CRIOLLO
73	690379	7882344	DW-A-I no.19	CRIOLLO
74	690380	7882345	DW-A-I no.21	CRIOLLO
75	690381	7882346	DW-A-I no.50	CRIOLLO
76	690382	7882347	DW-B-3 no.22	CRIOLLO
77	690383	7882348	DW-B-3 no.24	CRIOLLO
78	690384	7882349	DW-B-3 no. 30	CRIOLLO
79	690385	7882350	DW-B-3 no.32	CRIOLLO
80	690386	7882351	DW-A-3 no.38	CRIOLLO
81	690387	7882352	DW-A-3 no.40	CRIOLLO
82	690388	7882353	DW-A-3 no.50	CRIOLLO
83	690389	7882354	DW-A-3 no.58	CRIOLLO
84	690390	7882355	DW-A-3 no.60	CRIOLLO
85	690391	7882356	CD-1 no.10	CRIOLLO

86	690392	7882357	CD-1 no.14	CRIOLLO
87	690393	7882358	CD-1 no.25	CRIOLLO
88	690394	7882359	CD-1 no.36	CRIOLLO
89	690395	7882360	CD-1 no.39	CRIOLLO
90	690396	7882361	CD-1 no.55	CRIOLLO
91	690397	7882362	CD-1 no.58	CRIOLLO
92	690398	7882363	CD-1 no.61	CRIOLLO
93	690399	7882364	Gonder-19-no.33	CRIOLLO
94	690400	7882365	CD-1 no.79	CRIOLLO
95	690401	7882366	DW-K2 no.40	CRIOLLO
96	690402	7882367	DW-K2 no.47	CRIOLLO
97	690403	7882368	DW-K2 no.60	CRIOLLO
98	690404	7882369	Gojam-23no.3	CRIOLLO
99	690405	7882370	Gojam-24 no.31	CRIOLLO
100	690406	7882371	Selam	MEJORADO
101	690407	7882372	Asassa	MEJORADO
102	690408	7882373	Megenagna	MEJORADO
103	690409	7882374	Werer	MEJORADO
104	690410	7882375	Mettaya	MEJORADO
105	690411	7882376	Ejersa	MEJORADO
106	690412	7882377	Flakit	MEJORADO
107	690413	7882378	Ude	MEJORADO
108	690414	7882379	Malefia	MEJORADO
109	334316	389815	QUAMY	MEJORADO
110	690415	7882380	Mossobo	MEJORADO
111	690416	7882381	Ginchi	MEJORADO
112	690417	7882382	Toltu	MEJORADO
113	690418	7882383	Yerer	MEJORADO
114	690419	7882384	Obsa	MEJORADO
115	124180	134040	BICHENA	MEJORADO
116	690420	7882385	Leliso	MEJORADO
117	690421	7882386	Denbi	MEJORADO
118	690422	7882387	Tate	MEJORADO
119	690423	7882388	Hitosa	MEJORADO
120	690424	7882389	Bakalcha	MEJORADO
121	364019	389783	KILINTO	MEJORADO
122	690425	7882390	Oda	MEJORADO
123	690426	7882391	Kokate	MEJORADO
124	690427	7882392	Ilani	MEJORADO
125	690501	7882466	2000/01 population 69-47 FR no. 75	CRIOLLO
126	690502	7882467	2000/01 population 69-47 FR no. 83	CRIOLLO
127	690503	7882468	2000/01 population 69-47 FR no. 93	CRIOLLO
128	690504	7882469	2000/01 population 69-47 FR no. 95	CRIOLLO
129	690505	7882470	2000/01 population 69-47 FR no. 99	CRIOLLO
130	690506	7882471	2000/01 population 69-47 FR no. 101	CRIOLLO

131	690507	7882472	2000/01 population 69-47 FR no. 102	CRIOLLO
132	690508	7882473	2000/01 population 69-47 FR no. 103	CRIOLLO
133	690509	7882474	2000/01 population FR no. 11	CRIOLLO
134	690510	7882475	2000/01 population FR no. 16	CRIOLLO
135	690511	7882476	2000/01 population FR no. 29	CRIOLLO
136	690512	7882477	2000/01 population FR no. 30	CRIOLLO
137	690513	7882478	2000/01 population FR no. 40	CRIOLLO
138	690514	7882479	2000/01 population FR no. 43	CRIOLLO
139	690515	7882480	2000/01 population FR no. 45	CRIOLLO
140	690516	7882481	2000/01 population FR no. 85	CRIOLLO
141	690517	7882482	2000/01 population FR no. 87	CRIOLLO
142	690518	7882483	2000/01 population FR no. 88	CRIOLLO
143	690520	7882485	2000/01 population 75-51 FR no. 15	CRIOLLO
144	690521	7882486	2000/01 population 75-51 FR no. 23	CRIOLLO
145	690522	7882487	2000/01 population 75-51 FR no. 34	CRIOLLO
146	690523	7882488	2000/01 population 75-51 FR no. 41	CRIOLLO
147	690524	7882489	2000/01 population 75-51 FR no. 51	CRIOLLO
148	690525	7882490	2000/01 population 75-51 FR no. 57	CRIOLLO
149	690526	7882491	2000/01 population 90 FR no.59	CRIOLLO
150	690519	7882484	2000/01 population 75-51 FR no. 92	CRIOLLO
151	690527	7882492	2000/01 population 37-30 BDI no.7	CRIOLLO
152	690528	7882493	2000/01 population 37-30 BDI no.10	CRIOLLO
153	690529	7882494	2000/01 population 37-30 BDI no.12	CRIOLLO
154	690530	7882495	2000/01 population 37-30 BDI no.20	CRIOLLO
155	690531	7882496	2000/01 population 37-30 BDI no.26	CRIOLLO
156	690532	7882497	2000/01 population 37-30 BDI no.36	CRIOLLO
157	690533	7882498	2000/01 population 37-30 BDI no.48	CRIOLLO
158	690534	7882499	2000/01 population 37-30 BDI no.51	CRIOLLO
159	690535	7882500	2000/01 population 37-30 BDI no.55	CRIOLLO
160	690536	7882501	2000/01 population 37-30 BDI no.63	CRIOLLO
161	690537	7882502	2000/01 population 37-30 BDI no.105	CRIOLLO
162	690538	7882503	2000/01 population 14 no.3	CRIOLLO
163	690539	7882504	2000/01 population 14 no.5	CRIOLLO
164	690540	7882505	2000/01 population 14 no.10	CRIOLLO
165	690541	7882506	2000/01 population 14 no.13	CRIOLLO
166	690542	7882507	2000/01 population 14 no.36	CRIOLLO
167	690543	7882508	2000/01 population 14 no.45	CRIOLLO
168	690544	7882509	2000/01 population 14 no.55	CRIOLLO
169	690545	7882510	2000/01 population 14 no.60	CRIOLLO
170	690546	7882511	2000/01 population 14 no.81	CRIOLLO
171	690547	7882512	2000/01 population 14 no.94	CRIOLLO
172	690548	7882513	2000/01 population 14 no.106	CRIOLLO
173	690549	7882514	2000/01 population 25-23 BDI no.1	CRIOLLO
174	690553	7882518	2000/01 population 25-23 BDI no.22	CRIOLLO
175	690554	7882519	2000/01 population 25-23 BDI no.24	CRIOLLO

176	690555	7882520	2000/01 population 25-23 BDI no.27	CRIOLLO
177	690556	7882521	2000/01 population 25-23 BDI no.29	CRIOLLO
178	690557	7882522	2000/01 population 25-23 BDI no.35	CRIOLLO
179	690558	7882523	2000/01 population 25-23 BDI no.42	CRIOLLO
180	690559	7882524	2000/01 population 25-23 BDI no.45	CRIOLLO
181	690560	7882525	2000/01 population 25-23 BDI no.48	CRIOLLO
182	690561	7882526	2000/01 population 25-23 BDI no.50	CRIOLLO
183	690562	7882527	2000/01 population 25-23 BDI no.57	CRIOLLO
184	690563	7882528	2000/01 population 25-23 BDI no.60	CRIOLLO
185	690564	7882529	2000/01 population 25-23 BDI no.64	CRIOLLO
186	690565	7882530	2000/01 population 25-23 BDI no.68	CRIOLLO
187	690566	7882531	2000/01 population 25-23 BDI no.72	CRIOLLO
188	690567	7882532	2000/01 population 25-23 BDI no.80	CRIOLLO
189	690568	7882533	2000/01 population 25-23 BDI no.83	CRIOLLO
190	690569	7882534	2000/01 population 25-23 BDI no.90	CRIOLLO
191	690570	7882535	2000/01 population 25-23 BDI no.93	CRIOLLO
192	690571	7882536	2000/01 population 25-23 BDI no.105	CRIOLLO
193	690572	7882537	2000/02 population 82 no.4	CRIOLLO
194	690573	7882538	2000/02 population 82 no.5	CRIOLLO

**CID= Identificador de la Cruza, GID= Identificador del germoplasma,**