

Gains in recurrent selection cycles for grain yield and resistance to head smut in maize

Ganancia en ciclos de selección recurrente para rendimiento y resistencia a carbón de la espiga en maíz

¹Gelasino Díaz-Ramírez, ¹Carlos De León-García de Alba*, ¹Daniel Nieto-Ángel, ²Ma. del Carmen Mendoza-Castillo, ¹Programa de Fitosanidad-Fitopatología, ²Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad-Genética, Colegio de Postgraduados, Carretera México-Texcoco Km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, C.P. 56230, México. *Autor para correspondencia: cdeleon@colpos.mx

Recibido: 06 de Agosto, 2020.

Aceptado: 20 de Noviembre, 2020.

Díaz-Ramírez G, De León-García de Alba C, Nieto-Ángel D and Mendoza-Castillo MC. 2021. Gains in recurrent selection cycles for grain yield and resistance to head smut in maize. Mexican Journal of Phytopathology 39(1).

DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2008-1>

Primera publicación en línea: 14 de Diciembre, 2020.

First publication on line: December 14, 2020.

Resumen. El basidiomiceto *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* infecta al cultivo de maíz y causa importantes pérdidas en regiones donde existen condiciones propicias para el desarrollo de la enfermedad. En este trabajo se evaluó la respuesta a la selección de seis ciclos de selección recurrente de maíces de endospermo blanco y cinco ciclos de maíces de endospermo amarillo para caracteres agronómicos deseables, rendimiento de grano y resistencia al carbón de la espiga. Los diferentes

Abstract. The basidiomycet *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* infects the maize plant causing important losses in regions with adequate conditions for disease development. In this work, the response to selection of six and five cycles of selection in a white and a yellow endosperm maize populations improved through S₁ recurrent selection for desirable agronomic characters, grain yield and resistance to head smut were evaluated. In a separate trial, same cycles were planted to measure progress in disease resistance and to evaluate a new method of inoculation were artificially inoculated. A randomized complete block design with three replications was used for the yield trials and two replications in the inoculated trial. Cycles evaluated in the two populations showed an increase in disease resistance of 0.94 y 1.2% cycle⁻¹, and a genetic gain in grain yield of 272.9 y 620 kg ha⁻¹ cycle⁻¹ for the white and yellow endosperm populations, respectively. Results showed that recurrent S₁ selection was efficient in improvement

ciclos en las dos poblaciones se obtuvieron siguiendo el método de selección recurrente de familias S_1 , los cuales fueron evaluados para determinar el avance genético. En un ensayo anexo, las poblaciones fueron inoculadas artificialmente para medir el progreso de la resistencia a la enfermedad y evaluar un nuevo método de inoculación. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones para el ensayo de rendimiento y dos repeticiones para el ensayo inoculado. Los ciclos evaluados en las dos poblaciones mostraron un incremento en la resistencia de 0.94 y 1.2% ciclo⁻¹, una ganancia genética para rendimiento de grano de 272.9 y 620 kg ha⁻¹ ciclo⁻¹ para la población blanca y amarilla, respectivamente. Los resultados mostraron que la selección recurrente de familias S_1 fue eficiente para mejorar el rendimiento de grano y resistencia al carbón de la espiga en ambas poblaciones.

Palabras claves: Familias S_1 , resistencia poligénica, resistencia genética, carbón de la espiga.

El maíz (*Zea mays*) es ampliamente cultivado en el mundo, superando en producción al trigo y al arroz (FAOSTAT, 2018), es el cereal con mayor demanda como producto alimenticio, para consumo humano y animal, así como materia prima para la industria (Eckhoff *et al.*, 2003; Kaul and Olakh, 2019); sin embargo, su producción se ve afectada por plagas y enfermedades. Una de las enfermedades fúngicas de importancia económica es el carbón de la espiga causado por el basidiomiceto *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* (Basidiomycota, Ustilaginaceae), sin. *Sphacelotheca reiliana*, que se encuentra distribuido en varias regiones del mundo productoras del cereal (Stromberg, 1981; Lynch *et al.*, 1980; Martínez de la Parte *et al.*, 2016; Bernardo *et al.*, 1992; Fullerton *et al.*, 1974). En México,

of grain yield and resistance to head smut in both populations.

Key words: S_1 families, polygenic resistance, genetic resistance, head smut.

Maize (*Zea mays*) is widely planted worldwide, surpassing wheat and rice in production (FAOSTAT, 2018). It is the cereal with the highest demand as a food product for both human and animal consumption, as well as for raw material in industries (Eckhoff *et al.*, 2003; Kaul and Olakh, 2019). However, its production is affected by pests and diseases. One of the diseases with great economic importance is head smut, caused by the basidiomycete *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* (Basidiomycota, Ustilaginaceae), sin. *Sphacelotheca reiliana*, which is distributed in several regions of the world where this cereal is grown (Stromberg, 1981; Lynch *et al.*, 1980; Martínez de la Parte *et al.*, 2016; Bernardo *et al.*, 1992; Fullerton *et al.*, 1974). In Mexico, there are reports of its presence in areas of the Bajío and the Highlands (Aquino *et al.*, 2011; Ramírez *et al.*, 2011).

The inoculum is found in the soil and in the initial stages of infection the infective hypha penetrates the seedling through the root, invades the vascular bundles and grows systematically in the phloem (Kruger, 1962; Qi *et al.*, 2019). In the stage of vegetative growth, symptoms are difficult to observe, although some authors have reported development of chlorotic spots on the leaves (Matyac and Kommendhal, 1985; Martínez *et al.*, 2002; Quezada-Salinas *et al.*, 2017), as well as stunting (Stromberg *et al.*, 1984; Halisky, 1963). In the reproductive stage of the plant, signs and symptoms become visible in both inflorescences, the flowers of which are replaced by a dusty carbonlike mass,

se tienen reportes de su presencia en zonas del Bajío y valles altos (Aquino *et al.*, 2011; Ramírez *et al.*, 2011).

El inóculo se encuentra en el suelo y en las primeras etapas de infección, la hifa infectiva penetra por la raíz de la plántula e invade los haces vasculares y crece sistemáticamente a través del floema (Kruger, 1962; Qi *et al.*, 2019). En la etapa de crecimiento vegetativo, los síntomas son difíciles de observar; sin embargo, algunos autores han reportado manchas cloróticas en las hojas (Matyac y Kommendhal, 1985; Martínez *et al.*, 2002; Quezada-Salinas *et al.*, 2017) y enanismo (Stromberg *et al.*, 1984; Halisky, 1963). En la etapa reproductiva de la planta los síntomas y signos se hacen visibles en ambas inflorescencias, cuyas flores son reemplazadas por una masa carbonosa pulverulenta compuesta por teliosporas o produciendo filodia en las estructuras afectadas, causando pérdidas de rendimiento (Stromberg *et al.*, 1984; Matyac, 1985; Martínez *et al.*, 2002; Qi *et al.*, 2019). En México, el control de la enfermedad ha sido principalmente con productos químicos, prácticas culturales (CESAVEM, 2015) y por la evaluación de genotipos tolerantes mediante infección natural (Pérez-Camarillo y Bobadilla-Meléndez, 2003 y 2007; Pérez-Camarillo *et al.*, 2009; Aquino *et al.*, 2011). La mayoría de los programas de mejoramiento genético están enfocados a incrementar el rendimiento de grano y existen pocos reportes de programas diseñados para seleccionar resistencia a enfermedades en el cultivo de maíz.

Un esquema de mejoramiento genético eficiente para la generación de cultivares resistentes a plagas y enfermedades es la selección recurrente de familias S_1 . Este método es reconocido ya que incrementa la frecuencia de alelos favorables de uno o más caracteres agronómicos que se heredan de manera cuantitativa y porque elimina 50% de los alelos indeseables después de cada autofecundación,

composed of teliospores or producing phyllodia in the affected structures, causing a reduction in yield (Stromberg *et al.*, 1984; Matyac, 1985; Martínez *et al.*, 2002; Qi *et al.*, 2019). In Mexico, the disease has been controlled using mainly chemical products, cultural practices (CESAVEM, 2015) and with the selection of tolerant genotypes using natural infection (Pérez-Camarillo and Bobadilla-Meléndez, 2003 and 2007; Pérez-Camarillo *et al.*, 2009; Aquino *et al.*, 2011). Most genetic breeding programs focus on increasing grain yield and there are few reports of programs designed to select resistance to maize diseases.

An efficient genetic breeding scheme to generate pest and disease-resistant cultivars is the recurring selection of S_1 families. This method is well-known for increasing the frequency of favorable alleles of one or more agronomic traits which are quantitatively inherited, and because it eliminates 50% of undesirable alleles after every self-pollination, helping to set traits of interest which are additively inherited (Márquez, 1985; Hallauer *et al.*, 2010). This method is recommended for lower-heritability traits, since it improves the population mean and maintains the genetic variability of the population, which helps continue the selection through breeding cycles. The following steps are taken to carry out a recurring S_1 family selection scheme: 1) S_1 families are generated by self-pollinating 400 healthy and vigorous plants from a widely based gene population, 2) The S_1 families are evaluated in different environments, and 3) The best S_1 families are recombined with superior traits of interest to the breeder (Márquez, 1985; Hallauer *et al.*, 2010).

There is also the possibility that the evaluation and recombination of the S_1 families are done in one cycle, reducing costs and time. However, it is important to consider if the trait of interest is expressed before flowering (Dhillon and Khehra,

permitiendo fijar caracteres de interés que se heredan de forma aditiva (Márquez, 1985; Hallauer *et al.*, 2010). Este método es recomendado para caracteres de baja heredabilidad ya que mejora la media poblacional y mantiene la variabilidad genética de la población, lo que permite continuar la selección a través de los ciclos de mejoramiento. Para realizar un ciclo de selección recurrente de familias S_1 se llevan a cabo los siguientes pasos: 1) Obtención de familias S_1 , autofecundando 400 plantas sanas, vigorosas, de una población de amplia base genética, 2) Evaluación de las familias S_1 en diferentes ambientes y 3) Recombinación de las mejores familias S_1 con características superiores o de interés para el mejorador (Márquez, 1985; Hallauer *et al.*, 2010).

También existe la posibilidad de que en un mismo ciclo se lleve a cabo la evaluación y recombinación de las familias S_1 , reduciendo costo y tiempo; sin embargo, se debe considerar si el carácter de interés se expresa antes de la floración (Dhillon y Khehra, 1989). Por lo anteriormente mencionado, el objetivo de éste trabajo fue evaluar seis ciclos de selección recurrente de maíz con endospermo blanco y cinco ciclos con endospermo amarillo para determinar su rendimiento de grano, resistencia al carbón de la espiga y caracteres agronómicos de interés incluyendo severidad en roya mediante infección natural, sincronía floral, relación altura de planta y mazorca y aspecto de planta, entre otros, así como evaluar un método de inoculación que facilite la adherencia de las teliosporas en la semilla y asegurar la distribución del inóculo en campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del área de estudio

La evaluación de la ganancia en los ciclos de selección se llevó a cabo en parcelas del Centro de

1989). With this information, the aim of this investigation was to evaluate six cycles of recurrent selection of maize with white endosperm and five cycles with yellow endosperm to determine their grain yield, resistance to head smut and agronomic traits of interest, including severity of common rust (*Puccinia sorghi*) by natural infection, floral synchrony, relationship between plant and ear height, plant aspect, and others, as well as to evaluate an inoculation method to facilitate the adherence of teliospores in the seed and ensure the uniform distribution of inoculum in the field.

MATERIALS AND METHODS

Description of the study area

The evaluation of gains in the cycles of selection was done in plots at the Cinta Larga Technological Innovation and Research Center, in Mixquiahuala, State of Hidalgo (20° 11' N, 99° 14' W, 2100 masl). The crop was sown on March 28, 2019 in the spring-summer planting cycle, under rainfed conditions. The field evaluation was carried out in the state of Hidalgo and the laboratory activities described were performed at the Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, State of Mexico.

Maize germplasm evaluated

The genetic material evaluated in this study consisted of six breeding cycles (C_0 to C_5) of a population with white endosperm and five cycles (C_0 to C_4) of a population with yellow endosperm. The genetically broad based maize populations of white and yellow endosperm were developed including 45 and 55 collections of diverse germplasm, including commercial hybrids, improved varieties and native populations collected in the Mexican Highlands. The different components included

Innovación y Desarrollo Tecnológico de Cinta Larga, en Mixquiahuala, Estado de Hidalgo (20° 11' N, 99° 14' W, 2100 msnm). La siembra se realizó manualmente el 28 de marzo en el ciclo agrícola primavera-verano 2019, en condiciones de temporal. La evaluación agronómica de campo se realizó en el estado de Hidalgo y las actividades de laboratorios descritas en éste trabajo se hicieron en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Edo. de México.

Germoplasma de maíz evaluado

Los materiales genéticos evaluados en ésta investigación fueron seis ciclos de mejoramiento (C_0 a C_5) de una población con endospermo blanco y cinco ciclos (C_0 a C_4) de una población con endospermo amarillo. Las poblaciones base de endospermo blanco y amarillo incluyeron 45 y 55 colectas de diverso germoplasma, incluyendo híbridos comerciales, variedades mejoradas y poblaciones nativas, colectadas en la región del altiplano de México. Los diferentes componentes que entraron en la formación de las poblaciones base se recombinaron en lotes aislados durante dos ciclos consecutivos, en el Ejido Santa Teresa Tiloxtoc, en Valle de Bravo, Edo. de México (19° 13' N, 100° 107' W, 1740 msnm), sembrando en un lote aislado dos surcos de 10 m de largo de cada uno de los componentes colectados que se usaron como hembras, alternando con un surco de macho que estuvo constituido por un compuesto balanceado de semillas de todos los materiales usados como hembra.

Después de dos ciclos de recombinación en aislamiento para su homogenización, se inició el método de selección recurrente intrapoblacional de familias S_1 en ambas poblaciones. Cada ciclo se completó en dos años. Año uno: en cada una de las poblaciones de grano blanco o amarillo se autofecundaron 400 plantas para obtener las familias S_1

in the formation of the base populations were recombined in isolated fields for two consecutive cycles in the Ejido Santa Teresa Tiloxtoc, in Valle de Bravo, State of Mexico (19° 13' N, 100° 107' W, 1740 masl), planting each component in two rows, each one 10 m long, which were used as females, alternating with one row as male which included a mechanical balanced composite of all the materials included as females.

After two cycles of recombination for their homogenization, the method for the intrapopulation selection of S_1 families began in both populations. Each cycle was completed in two years. Year one: in each white or yellow grain population, 400 plants were self-pollinated to generate S_1 families of each population. During the growing cycle and until harvest, plants with undesirable characters were eliminated. Year two: seeds from the best 60-70 S_1 selected families were inoculated with head smut (*S. reilianum*) teliospores, as described by Quezada-Salinas *et al.* (2013) and were planted ear-to-row in the field. Out of the total S_1 families under evaluation, a selection pressure of 33% was applied and selected S_1 families from each population were recombined. The best plants of each family selected, with desirable characters, healthy, with no symptoms of head smut and common rust (*P. sorghi*) were manually recombined with a pollen mixture. A balanced, mechanical mixture of seeds of the recombined families formed the next cycle (C_1). This sequence was repeated to obtain the six cycles of the white endosperm population and the five of the yellow endosperm population evaluated in this study.

A completely randomized block design with three replications was used in the evaluation trials of the different cycles of selection, in 3m long rows, 80 cm between rows, 16 cm between plants and 44 plants per row to adjust to 22 and at a

de cada población. Durante el ciclo del cultivo y hasta la cosecha se eliminaron plantas con características indeseables. Año dos: semillas de las mejores 60-70 familias S_1 se inocularon con teliosporas del carbón de la espiga (*S. reilianum*) de acuerdo a Quezada-Salinas *et al.* (2013) y se sembraron en campo donde cada surco constituyó una familia. Del total de familias S_1 en evaluación se aplicó una presión de selección de 33%. Así, se seleccionaron y recombinaron las 60-70 mejores familias S_1 de cada población. Las mejores plantas de cada familia seleccionada, con características deseables, sanas, libres de síntomas de carbón de la espiga y de roya (*Puccinia sorghi*) se recombinaron manualmente con mezcla de polen. Una mezcla mecánica balanceada de semilla de las 60-70 familias recombinadas formaron el siguiente ciclo (C_1). Esta secuencia se repitió para obtener los seis ciclos de la población blanca y los cinco ciclos de la población amarilla, evaluados en este trabajo.

Para los ensayos de evaluación de los diferentes ciclos de selección se utilizó un diseño experimental bloques completos al azar, con tres repeticiones, en surcos de 3 m de largo y 80 cm de distancia entre surcos, 16 cm entre plantas y 44 plantas por surco, para ajustar a 22, y tener una densidad de 80 000 plantas ha^{-1} . Cada surco constituyó una parcela útil. La preparación del terreno y las labores de manejo del cultivo fueron realizadas por personal del Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico de Cinta Larga, estado de Hidalgo. Después de la siembra se dio un riego rodado y posteriormente uno o dos cada mes dependiendo de las lluvias. El control de maleza se realizó con cuatro aplicaciones del herbicida (sal de potasio del ácido 3,6-dicloro-2-metoxibenzoico y 6-Cloro-N2-etil-N4-isopropil-1,3,5, triazina-2,4 diamina). No hubo necesidad de aplicar fertilizante ni realizar control de plagas y enfermedades.

density of 80 000 plants ha^{-1} . Each row constituted a plot. Soil preparation and crop management were carried as done at the Cinta Larga Technological Innovation and Research Center, in Mixquiahuala, State of Hidalgo. Furrow irrigation was applied after planting, followed by once or twice monthly depending on rainfalls. Weed control done with four applications of herbicide (potassium salt of 3,6-dichloro-2-methoxybenzoic acid and 6-Chloro-N2-ethyl-N4-isopropyl-1,3,5, triazine-2,4 diamine). There was no fertilizer application or pest and disease control.

Trials of artificial inoculation in white and yellow endosperm maize populations

To evaluate genetic gains by cycle of improvement of head smut resistance, two replications were included with seeds inoculated with *S. reilianum* teliospores were included. The inoculum was collected in September 2018 from infected maize plants from the previous planting at the Cinta Larga field, in Mixquiahuala, Hidalgo. The inoculum was collected from infected tassels and ears dried for seven days in a greenhouse, collecting the teliospores after cleaning with a 117 μm sieve and storing them at 20 ± 2 °C for their later use. Seeds from each cycle of both populations were treated using a suspension of 1×10^6 teliospores mL^{-1} , immersed in white glue (Polyvinyl acetate = Resistol 85®) diluted to 20% with water (v/v) and drying them for 2 h at 35 ± 2 °C. Smut incidence was evaluated in the six cycles of the white endosperm population and the five cycles of the yellow endosperm population. The purpose of this trial was to evaluate the incidence of head smut with artificial inoculation and to evaluate the efficiency of white glue used to stick the teliospores to the seeds. The same conditions, design and management were applied as in the yield trial.

Ensayos con inoculación artificial en la población de maíz blanca y amarilla

Para evaluar las ganancias genéticas por ciclo de mejoramiento de resistencia al carbón de la espiga, se incluyeron dos repeticiones de las poblaciones con semilla inoculada con teliosporas de *S. reilianum*. El inóculo se colectó en septiembre de 2018, a partir de plantas infectadas de maíz del ciclo anterior en el campo de Cinta Larga, Municipio de Mixquiahuala, Hidalgo. Las plantas de donde se obtuvo el inóculo se secaron por siete días en invernadero, recuperando las teliosporas con un tamiz de 117 μm y se almacenaron a 20 ± 2 °C para su uso posterior. Semillas de cada ciclo de ambas poblaciones se trataron con una suspensión de 1×10^6 teliosporas mL^{-1} inmersas en pegamento blanco (Acetato de polivinilo= Resistol 85®) diluido a 20% con agua (v/v) secándolas por 2 h a 35 ± 2 °C. La incidencia de carbón se evaluó en los seis ciclos de las poblaciones de endospermo blanco y los cinco ciclos de las de endospermo amarillo. El propósito de éste ensayo fue evaluar la incidencia del carbón de la espiga con inoculación artificial y evaluar la eficiencia del pegamento blanco usado como adherente de las teliosporas a las semillas. Se aplicaron las mismas condiciones, diseño y manejo que para el ensayo de rendimiento.

Para evaluar las diferencias y ganancias obtenidas entre los diferentes ciclos de mejoramiento, se determinaron las siguientes variables:

1) Días a floración masculina (anthesis): Se determinó el número de días desde la fecha de siembra hasta que 50% de las plantas en la parcela iniciaron la emisión de polen. 2) Días a floración femenina (emisión de estigmas): se tomó el número de días desde la fecha de siembra hasta que 50% de las plantas mostraban exposición de estigmas. 3) Altura de

To evaluate the differences and gains obtained between the different cycles of selection, the following variables were determined:

1) Days to male flowering (anthesis): Registered as the number of days between the day of planting until 50% of plants began shedding pollen. 2) Days to female flowering (emission of silks): Recorded as the number of days between date of planting to 50% silking. 3) Plant height (cm): height between the basis of the stalk and the insertion of the tassel. 4) Ear height (cm) was measured from the base of the stalk to the basis of the main ear. 5) Grain moisture (%): determined by plot at harvest time, taking 500 g of seeds from the central part of five good ears. It was measured using a Dickey John miniGAC plus moisture tester. For the analysis, grain yield was adjusted to 15% moisture and transformed to t ha^{-1} . 6) Rust severity: Data were taken at flowering stage using an arbitrary scale of 1 to 5 where 1: No damage (foliar tissue 100% healthy), 2: few lesions (90% healthy), 3: regular (80% healthy), 4: bad (60 - 70% healthy) and 5: very bad (0 - 60% healthy). 7) Head smut incidence: The response to infection was determined a few days after the emission of both inflorescences. Incidence was determined as a percentage (Num. of diseased plants divided by the total number of diseased plants per plot x 100). The variables studied were determined following IBPGR (1991) and Edmeades *et al.* (2000).

Statistical analysis

All data were analyzed using the software SAS (Statistical Analysis System, version 9.4) (SAS Institute Inc., 2013), using the procedure PROG GLM and PROG REG to obtain the linear regression. An analysis of variance was used along with a DMS comparison of means with $\alpha \geq 0.05$.

planta (cm): Se midió la altura desde la base del tallo hasta el nudo de inserción de la inflorescencia masculina. 4) La altura de la mazorca (cm) se midió desde la base del tallo hasta la base de la mazorca principal. 5) Humedad del grano: Se determinó por parcela, tomando 500 g de semillas de la parte central de cinco de las mejores mazorcas. La humedad de grano se determinó con el medidor de humedad Dickey John miniGAC plus. Para el análisis, el rendimiento de grano se ajustó a 15% de humedad y se convirtió a $t\ ha^{-1}$. 6) Severidad de la roya. Los datos se tomaron en la etapa de floración usando una escala arbitraria de 1 a 5 en donde 1: No daño (tejido foliar 100% sano), 2: pocas lesiones (90% sano), 3: regular (80% sano), 4: malo (60 - 70% sano) y 5: muy malo (0 - 60% sano). 7) Incidencia del carbón de la espiga. La respuesta a la infección se determinó unos días después de la emisión de ambas inflorescencias. La incidencia se determinó en porcentaje (No. de plantas enfermas entre el número total de plantas de cada parcela x 100). Las variables estudiadas se realizaron de acuerdo a IBPGR (1991) y Edmeades *et al.* (2000).

Análisis estadísticos

Todos los datos se analizaron con el software estadístico SAS (Statistical Analysis System, versión 9.4) (SAS Institute Inc., 2013), usando el procedimiento PROG GLM y PROG REG para la obtención de la regresión lineal. Se realizó un análisis de varianza y prueba de comparación de medias DMS con $\alpha \geq 0.05$.

RESULTADOS

Ensayo de rendimiento en la población blanca y amarilla

Por problemas de baja germinación no se incluyó el ciclo dos (C_2) de las dos poblaciones. El

RESULTS

Yield trial in white and yellow populations

Due to low germination problems, cycle two (C_2) of the populations was not included. Table 1 shows the measurements for the different traits described. For the variables of plant and ear height and head smut incidence, there were no significant differences based on the DMS (0.05) in both populations. For the trait of days to male and female flowering, significant differences were observed between cycles of selection in both populations. For the yellow endosperm cycles, the variables of rust severity and grain yield showed significant differences but not in the white endosperm population. In the variables that did not present a statistically significant response, the advanced selection cycles express an improvement in comparison with the initial cycles. To better appreciate the behavior of the traits evaluated in the different cycles of both populations, data were analyzed by linear regression to get the average gain cycle^{-1} (Table 2). For the ear height, an increase of 3.5 and 4.3 $\text{cm}\ \text{cycle}^{-1}$ was observed, and for ear height there was also an increase of 1.7 and 2.2 $\text{cm}\ \text{cycle}^{-1}$ in the white and yellow endosperm populations, respectively. For days to tassel, a reduction of -1.51 and -1.6 $\text{day}\ \text{cycle}^{-1}$ was observed, and for days to silking -1.8 and -2.2 $\text{days}\ \text{cycle}^{-1}$ was recorded in both populations, indicating that, as the selection cycles in the populations advanced, populations tend to be earlier in flowering. A reduction of -0.2 and -0.6 cycle^{-1} was found for common rust severity (Figure 1). For head smut incidence, a reduction of -0.9 % cycle^{-1} was found in the population of white endosperm and -1.2 % cycle^{-1} in the yellow endosperm population (Figure 1). For grain yield, there was an increase of 0.3 and 0.6 $t\ ha^{-1}\ \text{cycle}^{-1}$ for the white and yellow populations, respectively (Figure 1).

Cuadro 1 muestra las medias para los diferentes caracteres evaluados. Para las variables altura de planta y mazorca e incidencia del carbón de la espiga no hubo diferencias significativas con base en la prueba de medias DMS (0.05) en ambas poblaciones. Para los caracteres días a floración masculina y femenina se observaron diferencias significativas entre los ciclos de selección en las dos poblaciones. Para la población de endospermo amarillo las variables severidad en roya y rendimiento de grano mostraron diferencias significativas, no así, en la población de endospermo blanco. De las variables que no mostraron una respuesta estadísticamente significativa, los ciclos avanzados de selección expresan una mejora con respecto a los ciclos iniciales. Para una mejor apreciación del comportamiento de los caracteres evaluados de los diferentes ciclos en ambas poblaciones, los datos se sometieron a un análisis de regresión lineal para realizar el cálculo correspondiente de ganancia promedio por ciclo (Cuadro 2). Para el carácter altura de mazorca se observó un incremento de 3.5 y 4.3 cm ciclo⁻¹ y para altura de mazorca también hubo un

DISCUSSION

The S1 recurrent selection was effective for most of the traits evaluated in the white and yellow endosperm populations, mainly for grain yield and resistance to head smut (*S. reilianum*). Similar results have been found in other investigations, where the breeding method was also the recurring selection of S₁ families. Rodríguez and Hallauer (1988) evaluated 10 populations using different selection models and concluded that the method of S₁ families was better than other methods evaluated. The response to the selection for grain yield was lower than that obtained by Ruiz de Galarreta and Álvarez (2007), but similar to those reported by Tanner and Smith (1987) and Maya-Lozano and Ramírez-Díaz (2002), who reported at least one negative response to the selection, similar as in this study where ear and plant heights showed no responses to selection.

There are also reports indicating that, depending on the size of the base population, the evaluation of the progeny and the recombination method used

Cuadro 1. Medias para los diferentes caracteres evaluados en la población de maíz de endospermo blanco y amarillo.
Table 1. Means of the different characters evaluated in the white and yellow endosperm maize populations.

Ciclos de selección	Días a floración masculina	Días a floración femenina	Población endospermo blanco				Rendimiento t ha ⁻¹
			Altura de planta (cm)	Altura de mazorca (cm)	Severidad en roya (1-5)	Incidencia carbón de la espiga (%)	
C ₀	87.3 a	91.0 a	180.0 b	113.3 a	2.8 a	12.6 a	11.2 a
C ₁	79.3 b	82.6 b	195 ab	113.3 a	1.6 b	10.7 a	11.4 a
C ₃	77.0 b	81.6 b	190 b	108.3 a	1.5 b	10.2 a	12.2 a
C ₄	79.6 b	82.3 b	196.6 ab	116.6 a	1.5 b	8.5 a	11.6 a
C ₅	79.6 b	83.3 b	196.6 ab	120.0 a	1.8 ab	9.0 a	12.4 a
DMS (0.05)	2.9	2.6	19.9	23	1	16.6	4.5
			Población endospermo amarillo				
C ₀	87.3 a	91.3 a	208.3 a	121.6 b	3.6 a	14.2 a	12.5 b
C ₁	79.0 bc	83.3 bc	206.6 a	121.6 b	2.0 b	8.3 a	12.3 b
C ₃	78.6 bc	81.0 bc	215.0 a	138.3 a	1.5 b	12.5 a	12.2 b
C ₄	82.0 b	84.6 b	220.0 a	123.3 b	1.6 b	8.8 a	14.6 a
DMS (0.05)	3.6	4	35	13.4	1	28	2

Cuadro 2. Respuesta a la selección en las poblaciones de endospermo blanco y amarillo.
Table 2. Response to selection in the white and yellow endosperm populations.

Carácter	Población endospermo blanco			Población endospermo amarillo		
	^x b	^y I	^z R ²	b	I	R ²
Días a floración masculina	-1.51	85.0	0.4	-1.63	85.8	0.30
Días a floración femenina	-1.8	88.9	0.4	-2.24	90.6	0.50
Altura de planta (cm)	3.48	181.2	0.61	4.35	201.6	0.82
Altura de mazorca (cm)	1.67	109.3	0.4	2.18	120.7	0.20
Severidad roya (1-5)	-0.21	2.47	0.4	-0.65	3.80	0.75
Incidencia del carbón (%)	-0.94	13.02	0.86	-1.2	13.95	0.30
Rendimiento (t ha ⁻¹)	0.2729	10.9	0.63	0.62	11.35	0.5

^xCoeficiente de regresión (b); ^yintercepto (I); ^z coeficiente de determinación (R²). ♦ ^xRegression coefficient (b); ^yinterception (I); ^zDetermination coefficient (R²).

incremento de 1.7 y 2.2 cm ciclo⁻¹ en la población de endospermo blanco y amarillo, respectivamente. Para días a floración masculina se observó una disminución de -1.51 y -1.6 días ciclo⁻¹ y para floración femenina -1.8 y -2.2 días ciclo⁻¹ en las dos poblaciones, lo que indica que conforme se avanza en los ciclos de selección las poblaciones tienden a ser precoces. En severidad de roya se obtuvo una reducción de -0.2 y -0.6 ciclo⁻¹ (Figura 1). Para la variable incidencia del carbón de la espiga se encontró una disminución de -0.9% ciclo⁻¹ en la población de endospermo blanco y -1.2% ciclo⁻¹ en la de endospermo amarillo (Figura 1). Para el carácter rendimiento de grano hubo un incremento de 0.3 y 0.6 t ha⁻¹ por ciclo para la población blanca y amarilla, respectivamente (Figura 1).

DISCUSIÓN

La selección S₁ recurrente fue efectiva para la mayoría de los caracteres evaluados en las poblaciones blanca y amarilla, principalmente para rendimiento de grano y resistencia al carbón de la espiga (*S. reilianum*). Resultados similares se han encontrado en otros trabajos donde el método de mejoramiento también fue la selección recurrente

are variables that modify their response to selection (Hallauer *et al.*, 2010). Kebede (2001) suggests that to avoid genetic drift, 30 families should be used in case five or more selection cycles are desired. Weyhrich *et al.* (1998) mention that genetic drift is stronger when less than 10 families are used in the recombination. In this investigation 60-70 families were used per cycle, which ensures the maintenance of genetic variability.

Regarding resistance to head smut (*S. reilianum* f. sp. *zeae*), it is inherited additively and is partially dominant (Whyte and Gevers, 1988). In this research, there was a gain in resistance of 0.94% cycle⁻¹ in the white population and 1.2% cycle⁻¹ in the yellow population, indicating that, as the breeding cycles progress, genes are accumulated additively with each cycle. Resistance is given by the genes *zmWAK*, *zmNL* and *GRMZM2G047152*, which are expressed in the first stages of the infection process, where they inhibit the spread of the infective hypha of the fungus *S. reilianum* f. sp. *zeae* (Zuo *et al.*, 2014; Qi *et al.*, 2019).

CONCLUSIONS

The S₁ families recurrent selection was effective to increase the grain yield in 272.9 kg ha cycle⁻¹

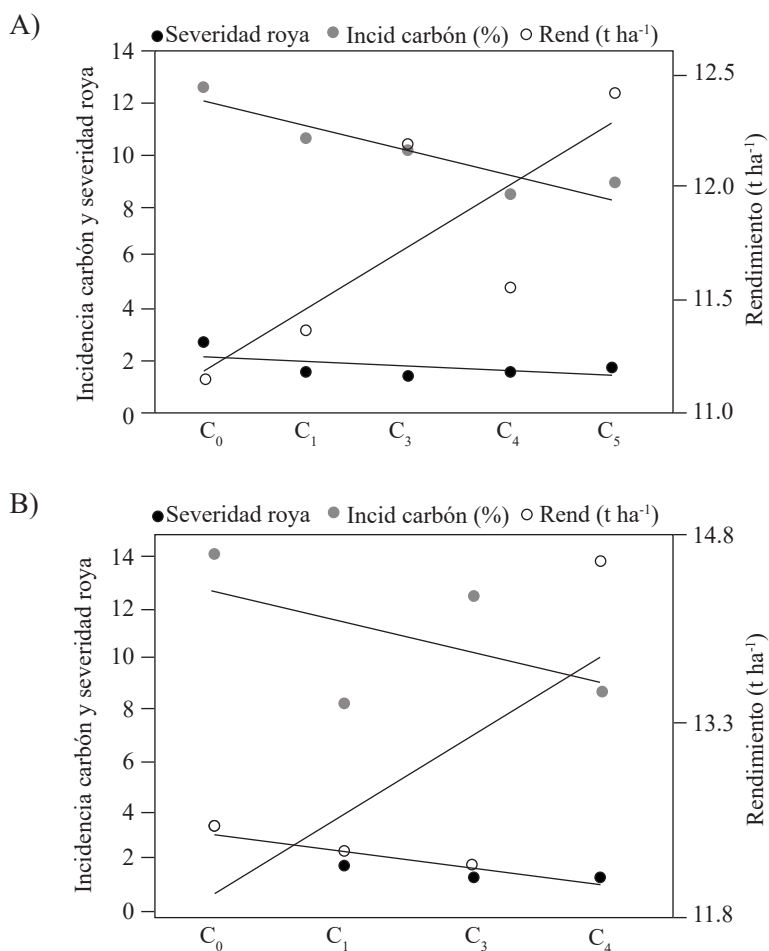


Figura 1. Regresión lineal para las variables severidad en roya, incidencia del carbón de la espiga y rendimiento de grano. Población de maíz de endospermo blanco (A) y población de maíz endospermo amarillo (B).

Figure 1. Linear regression for the variables of rust severity, head smut incidence and grain yield. Population of white endosperm maize (A) and population of yellow endosperm maize (B).

de familias S₁. Rodríguez y Hallauer (1988) evaluaron 10 poblaciones usando diferentes métodos de selección, concluyeron que el método de familias S₁ fue mejor que los otros métodos evaluados. La respuesta a la selección para rendimiento de grano fue inferior a la obtenida por Ruiz de Galarreta y Álvarez (2007), pero similar a lo reportado por Tanner y Smith (1987) y Maya-Lozano y Ramírez-Díaz (2002), quienes reportan al menos una respuesta negativa a la selección similar a lo obtenido

and resistance to head smut in 0.94% cycle⁻¹ in the white endosperm population and 620 kg ha cycle⁻¹ and 1.2% cycle⁻¹ for resistance to head smut in the yellow endosperm population.

All other variables considered in the present research showed a positive response to selection, except for plant and ear heights in both populations, therefore, greater selection pressure must be applied on these traits to advance the populations to the following cycles.

en éste trabajo, donde altura de planta y mazorca no mostraron una respuesta a la selección.

También, existen reportes en los que se indica que dependiendo del tamaño de la población base, la evaluación de las progenies y el método de recombinación empleado son variables que modifican la respuesta a la selección (Hallauer *et al.*, 2010). Kebede (2001) sugiere que, para evitar la deriva genética, se deben usar 30 familias en caso de pretender llevar a cabo cinco, o más ciclos de selección. Weyhrich *et al.* (1998), mencionan que la deriva genética es más fuerte cuando se usan menos de 10 familias en la recombinación. En éste trabajo se seleccionaron 60-70 familias por ciclo, lo que asegura mantener la variabilidad genética.

Con respecto a la resistencia al carbón de la espiga (*S. reilianum* f. sp. *zetae*), esta se hereda de forma aditiva y es parcialmente dominante (Whyte y Gevers, 1988). En el presente trabajo se obtuvo un incremento en la resistencia de 0.94 % ciclo⁻¹ en la población blanca y 1.2 % ciclo⁻¹ en la población amarilla. Lo que indica que conforme se avanzan en los ciclos de mejoramiento se van acumulando genes de manera aditiva con cada ciclo obtenido. La resistencia está dada por los genes *zmWAK*, *zmNL* y *GRMZM2G047152* que se expresan en las primeras etapas del proceso de infección en donde inhiben la dispersión de la hifa infectiva del hongo *Sporisorium reilianum* f. sp. *zetae* (Zuo *et al.*, 2014; Qi *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

El método de selección recurrente de familias S₁ fue efectivo para incrementar el rendimiento de grano 272.9 kg ha ciclo⁻¹ y la resistencia al carbón de la espiga 0.94 % ciclo⁻¹ en la población de endospermo blanco y 620 kg ha ciclo⁻¹ y 1.2 % ciclo⁻¹ en la resistencia al carbón de la espiga para la población de endospermo amarillo.

Artificial seed inoculation using white glue 20% v/v as an adherent was efficient to produce a uniform infection in the field.

~~~~~ End of the English version ~~~~~

Todas las otras variables consideradas en la presente investigación mostraron una respuesta positiva a la selección, excepto para altura de planta y altura de mazorca en las dos poblaciones, por lo que el manejo de las poblaciones para obtener los siguientes ciclos se debe aplicar una mayor presión de selección hacia estos caracteres.

La inoculación artificial a la semilla usando pegamento blanco a 20 % v/v como adherente fue eficiente para inducir una infección uniforme en campo.

## LITERATURA CITADA

- Aquino-Martínez JG, Sánchez-Flores A, González-Huerta A y Sánchez-Pale JR. 2011. Resistencia de variedades e híbridos de maíz (*Zea mays* L.) a *Sporisorium reilianum* y su rendimiento de grano. *Revista Mexicana de Fitopatología* 29: 39-49. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0185-33092011000100004](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-33092011000100004)
- Bernardo R, Bourrier M and Oliver JL. 1992. Generation means analysis of resistance to head smut in maize. *Agronomie* 12(4): 303-306. <https://doi.org/10.1051/agro:19920403>
- CESAVEM (Comité Estatal de Sanidad Vegetal del Estado de México). 2015. Campaña manejo fitosanitario del maíz. 8p. <http://www.cesavem.mx/img/fitosanitariodelmaiz/maiz2.pdf>
- Dhillon BS and Khehra AS. 1989. Modified S<sub>1</sub> recurrent selection in maize improvement. *Crop Science* 29: 226-228. <https://doi.org/10.2135/cropsci1989.0011183X002900010049x>
- Eckhoff SR, Paulsen MR and Yang SC. 2003. Maize. pp 3647-3653. In: Caballero B, Finglas P and Toldra F. *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*. 2nd Edition. Academic Press. 6000p. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227055-X/00725-2>
- Edmeades GO, Bolaños J, Elings A, Ribaut JM, Bänziger M and Westgate ME. 2000. The role and regulation of the anthesis silking interval in maize. In: Westgate M, Boote K,

- Knievel D and Kiniry J (eds.). Physiology and modeling kernel set in maize. Crop Science Society of America and the American Society of Agronomy 48: 65-80. <https://doi.org/10.2135/cssaspecpub29.c4>
- FAOSTAT (Food and Agriculture Organization Corporate Statistical Database). 2018. Producción mundial de maíz. <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>.
- Fullerton RA, Scott DJ and Graham GJ. 1974. Effect of fungicides on the control of head smut of maize and the relationship between infection level and crop yield. New Zealand Journal of Experimental Agriculture 2: 177-179. <https://doi.org/10.1080/03015521.1974.10425757>
- Hallauer AR, Carena MJ and Miranda JB. 2010. Quantitative Genetics in Maize Breeding, Handbook of Plant Breeding. New York: Springer Science and Business Media. 663p. <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-0766-0>
- Halisky PM. 1963. Head smut of sorghum, sudan grass, and corn, caused by *Sphacelotheca reiliana* (Kühn) Clint. Journal of Agricultural Science 34(8): 287-304. <http://dx.doi.org/10.3733/hilg.v34n08p287>
- IBPGR. 1991. Descriptors for Maize. International Maize and Wheat Improvement Center, México City/International Board for Plant Genetic Resources, Rome. 85p.
- Kaul J, Jain K and Olakh D. 2019. An overview on role of yellow maize in food, feed and nutrition security. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences 8(2): 3037-3048. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.802.356>
- Kebede PM. 2001. Response to  $S_1$  recurrent selection and estimation of genetic parameters in effective population sizes of the BS11 maize population. Retrospective theses and dissertations. 663p. <https://doi.org/10.31274/rtd-180813-14332>
- Kruger W. 1962. *Sphacelotheca reiliana* on maize. I. Infection and control studies. South African Journal of Agricultural Science. 5: 43-56. [https://hdl.handle.net/10520/AJA05858860\\_650](https://hdl.handle.net/10520/AJA05858860_650)
- Lynch KV, Edgington LV and Busch LV. 1980. Head smut, a new disease of corn in Ontario. Canadian Journal Plant Pathology 2: 176-178. <https://doi.org/10.1080/070606680095014371B>
- Márquez SF. 1985. Genotecnia vegetal: Métodos, teoría, resultados. Tomo I. México D.F. AGT Editor, S. A. 357p.
- Matyac CA and Kommedahl T. 1985. Factors affecting the development of head smut caused by *Sphacelotheca reiliana* on corn. Phytopathology 75: 577-581. [https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1985Articles/Phyto75n05\\_577.PDF](https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1985Articles/Phyto75n05_577.PDF)
- Martínez CA, Roux A, Jauneau A and Dargent R. 2002. The biological cycle of *Sporisorium reilianum* f.sp. *zeae*: an overview using microscopy. Mycologia 94: 505-514. <http://dx.doi.org/10.1080/15572536.2003.11833215>
- Martínez- de la Parte E, Wilson BD, Lorenzo ME, Guerrero BD, García RD, Rodríguez GG, Sierra RP y Gómez LY. 2016. El carbón de la espiga del maíz causado por *Sphacelotheca reiliana* (J.G. Kühn) GP. Clinton en Cuba. Fitosanidad 20(1): 3-38. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=209157223005>
- Maya-Lozano JB y Ramírez-Díaz JL. 2002. Selección recurrente en tres poblaciones de maíz para el subtropico de México. Revista Fitotecnia Mexicana 25(2): 201-207. <http://www.revistafitotecniamexicana.org/documentos/25-2/11a.pdf>
- Pérez-Camarillo JP y Bobadilla-Meléndez M. 2007. Carbón de la espiga de maíz. Síntesis de resultados del ciclo agrícola P.V. 2006. Valle del Mezquital, Hgo. Desplegable Técnica Número 15. Centro de Investigación Regional Centro. INIFAP-Hidalgo. 2 p.
- Pérez-Camarillo JP y Bobadilla-Meléndez M. 2003. Carbón de la espiga de maíz. Síntesis de resultados del ciclo agrícola P.V. 2002. Valle del Mezquital, Hgo. Desplegable Técnica Número 6. Centro de Investigación Regional Centro. INIFAP-Hidalgo. 4 p.
- Pérez-Camarillo JP, Martínez-Ruiz E y Bobadilla-Meléndez M. 2009. Carbón de la espiga de maíz. Síntesis de resultados del ciclo agrícola P.V. 2008. Valle del Mezquital, Hgo. Desplegable Técnica Número 21. Centro de Investigación Regional Centro. INIFAP-Hidalgo. 4 p.
- Quezada-Salinas A, De León-García De Alba C, Hernández-Anguiano AM y Nava-Díaz C. 2013. Evaluación de métodos de inoculación de semillas de maíz con *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* (Kühn) Langdon & Fullerton. Revista Mexicana de Fitopatología 31(2): 80-90. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v31n2/v31n2a1.pdf>
- Quezada-Salinas A, Moreno-Velázquez M, De León-García de Alba C, Nava-Díaz C, Solano-Báez AR. 2017. Resistencia genética a *Sporisorium reilianum* f. sp. *zeae* en líneas seleccionadas de maíz (*Zea mays* L.) con endospermo blanco y amarillo. Revista Mexicana de Fitopatología 35(3): 534-548. <http://dx.doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1705-2>
- Qi F, Zhang L, Dong X, Di H, Zhang J, Yao M, Dong L, Zeng X, Liu X, Wang Z and Zhou Y. 2019. Analysis of Cytology and Expression of Resistance Genes in Maize Infected with *Sporisorium reilianum*. Plant Disease 103(8): 2100-2107. <https://doi.org/10.1094/PDIS-09-18-1687-RE>
- Ramírez Dávila JF, Sánchez Pale JR y De León C. 2011. Estabilidad espacio temporal de la distribución del carbón de la espiga del maíz (*Sporisorium reilianum*) en el Estado de México, México. Revista Mexicana de Fitopatología 29: 1-14. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v29n1/v29n1a1.pdf>
- Rodríguez OA and Hallauer AR. 1988. Effects of recurrent selection in corn populations. Crop Science 28: 276-280. <https://doi.org/10.2135/cropsci1988.0011183X002800050015x>
- Ruiz de Galarreta JI and Álvarez RA. 2007. Six cycles of  $S_1$  recurrent selection in two Spanish maize synthetics. Spanish Journal Agriculture Research 5(2): 193-198. <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2007052-239>
- SAS (Statistical Analysis System). 2013. The SAS system. Version 9.4. SAS OnlineDoc. HTML. Format, SAS Institute, Cary, NC, USA
- Stromberg EL, Stienstra WC, Kommedahl T, Matyac CA, Windels CE and Gadelmann JL. 1984. Smut expression and resistance of corn to *Sphacelotheca reiliana* in Minnesota. Plant Disease 69: 880-884. <https://doi.org/10.1094/PD-68-880>
- Stromberg EL. 1981. Head smut of maize, a new disease in Minnesota. Phytopathology 71: 906.
- Tanner AH and Smith OS. 1987. Comparison of half-sib and  $S_1$  recurrent selection in the Krug yellow dent maize populations. Crop Science 27: 509-513. <https://doi.org/10.2135/cropsci1987.0011183X002700030016x>

Weyhrich RA, Lamkey KR and Hallauer AR. 1998. Effective population size and response to S1 progeny selection in the BS11 maize population. *Crop science* 38(5): 1149-1158. <https://doi.org/10.2135/cropsci1998.0011183X003800050008x>

Whyte IV and Gevers HO. 1988. Diallel analysis of resistance of eight maize inbred lines to *Sphacelotheca reiliana*. *Phytopathology* 78: 65-68. [https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1988Articles/Phyto78n01\\_65.PDF](https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1988Articles/Phyto78n01_65.PDF)

Zuo W, Chao Q, Zhang N, Ye J, Tan G, Li B, Xing Y, Zhang B, Liu H, Fengler K, Zhao J, Zhao X, Chen Y, Lai J, Yan J and Xu M. 2015. A maize wall-associated kinase confers quantitative resistance to head smut. *Natural Genetic* 47: 151–57. <https://doi.org/10.1038/ng.3170>