



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**EFECTO DEL TIPO DE CASTRACION SOBRE EL
COMPORTAMIENTO DE CUATRO LINEAS DE MAIZ
PARA LA PRODUCCION DE SEMILLA HIBRIDA**

ING. AGR. MARIANO ROBERTO LUGO

TRABAJO FINAL PARA OPTAR AL TITULO DE ESPECIALISTA EN PRODUCCIÓN DE
SEMILLAS DE CEREALES, OLEAGINOSAS Y FORRAJERAS

DIRECTOR: Dr. Mariana L. Bianculli

CO- DIRECTOR: Dr. Alvaro Quijano

2022

**EFFECTO DEL TIPO DE CASTRACION SOBRE EL COMPORTAMIENTO DE
CUATRO LINEAS DE MAIZ PARA LA PRODUCCION DE SEMILLA HIBRIDA**

Mariano Roberto Lugo

Ingeniero Agrónomo – Universidad Nacional de Rosario.

Este Trabajo Final es presentado como parte de los requisitos para optar al grado académico de Especialista en Producción de semillas de cereales, oleaginosas y forrajeras, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en esta u otra Universidad. El mismo contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el grupo de Investigación para la Producción de Bayer, durante el período comprendido entre 2018 y 2020, bajo la dirección de Dr. Mariana L. Bianculli.

Nombre y firma del autor

Nombre y firma del Director

Nombre y firma del Co - Director

Defendida: 11 Agosto de 2022.

Abreviaturas y Símbolos

RHS: Sistema de hibridación por Roundup (del inglés: Roundup Hybridization System).

CMS: Androesterilidad citoplasmática (del inglés: Cytoplasmic Male Sterility).

EPSPS: enzima 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintasa.

DDS: Días desde la siembra.

50E: 50% de floración femenina.

Tb: Temperatura base

HESP: Hojas sobre la espiga.

ALTP: Altura de planta.

RDTO: Rendimiento

Resumen

La producción de semilla híbrida de maíz es una de las más costosas y complejas en términos operativos. En la mayoría de los casos, se logra combinando el despanojado mecánico y manual, aunque actualmente se están adoptando diferentes sistemas de andro-esterilidad tales como la esterilidad citoplasmática o inducida químicamente. En el presente trabajo, se evaluó si la castración química tiene un efecto diferencial, en comparación a la castración mecánica tradicional, sobre las principales variables que determinan el éxito del cruzamiento. Se estudiaron cuatro líneas endocrías en las que se evaluó el efecto del sistema de castración sobre la floración, rendimiento y perfil de gradeo. Los ensayos se realizaron durante la campaña 2018/2019 en las localidades de La Carlota y Miramar y durante la campaña 2019/2020 en las localidades de Pergamino y Miramar.

La floración femenina no se modificó por el tipo de castración, sin embargo, se observó una tendencia a retrasar el tiempo para alcanzar el 50% de floración en el sistema de castración mecánica. Se observó un mayor rendimiento para la castración mecánica en comparación a la castración química y la magnitud de la respuesta dependió del genotipo. La reducción del rendimiento para la castración química aquí observado puede deberse a una menor granazón y, por lo tanto, menor cantidad de semillas por espiga. En cuanto al perfil de gradeo, se observó que la castración química aumentó la fracción de granos redondos y grandes en comparación a la castración mecánica. Estos resultados están relacionados a un mayor peso de mil granos lo cual explicaría la reducción del rendimiento con el sistema de castración química debido a un menor porcentaje de granazón.

Abstract

The production of hybrid corn seed is one of the most costly and complex in operational terms. In most cases, it is achieved by combining mechanical and manual detasseling, although different andro-sterility systems are currently being adopted. In the present work, the effect of mechanical and chemical hybridization systems was studied on the main variables that determine the success of the cross. Four lines were studied in which the effect of the hybridization system on flowering, yield and grade profile was evaluated. Data from trials carried out during the 2018/2019 season in the towns of La Carlota and Miramar and during the 2019/2020 season in the towns of Pergamino and Miramar were used.

The female flowering was not modified by the type of castration, however, a trend was observed for a longer time to reach 50% of flowering in the mechanical castration system. A higher yield was observed for mechanical castration compared to chemical castration and the magnitude of the response depended on the genotype. The reduction in the yield for chemical castration observed here may be due to a lower pomegranate and, therefore, a smaller quantity of seeds per spike.

Regarding the grade profile, it was observed that chemical castration increased the fraction of round grains compared to mechanical castration. For chemical castration, a predominance of large grains was observed. These results are related to a greater weight of one thousand grains, which would explain the reduction in yield with the chemical castration system due to a lower percentage of kernels.

Índice general

Abreviaturas y Símbolos	I
Resumen	II
Abstract	III
Índice general	IV
Índice de Figuras	V
Índice de Tablas	VI
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Situación problema.....	7
1.2 Objetivo.....	8
1.3 Hipótesis	8
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	8
2.1.1 Descripción de los experimentos	8
2.1.2 Mediciones.....	11
2.1.3 Análisis de datos.....	11
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
3.1 Condiciones generales de los ensayos	12
3.2. Efecto del tipo de castración sobre la floración femenina.	13
3.3. Efecto del tipo de castración sobre el rendimiento.....	14
3.4. Efecto del tipo de castración sobre el perfil de gradeo.....	16
4. DISCUSIÓN.....	18
5. CONCLUSIÓN.....	21
6. BIBLIOGRAFÍA.....	22

Índice de Figuras

Figura 1. A) Representación diagramática del arreglo de los surcos de hembras y machos. B) Lote de producción de semilla híbrida.....	2
Figura 2. Maquina cortadora (A) y roladora (B).....	5
Figura 3. Panojas estériles del parental hembra de un lote de semilla híbrida de maíz producida con el sistema RHS (Roundup Hybridization System, Bayer®).....	7
Figura 4. Localidades donde fueron realizados los ensayos.....	9
Figura 5. Evolución de las temperaturas medias del aire durante el desarrollo del cultivo para las localidades de La Carlota y Miramar.....	12
Figura 6. Evolución de las temperaturas medias del aire durante el desarrollo del cultivo para las localidades de Pergamino y Miramar.....	13
Figura 7. Tiempo térmico para alcanzar el 50 % de floración femenina (°Cd, temperatura base 10°C) para diferentes líneas endocriadas de maíz.....	14
Figura 8. Rendimiento (kg/ha) para diferentes tratamientos de castración masculina.....	15
Figura 9. A) Número de hojas sobre la espiga y B) altura de planta.....	16
Figura 10. Forma de la semilla (%) para cada genotipo y tratamiento de castración.....	17

Índice de Tablas

Tabla 1. Fecha de siembra y de cosecha, duración siembra-cosecha y densidad para las localidades de Pergamino, La Carlota y Miramar durante las campañas 2018/19 y 2019/20.....	10
Tabla 2. Respuesta relativa del calibre de semilla al tratamiento de castración para 4 líneas endocrías de maíz.....	17

1. INTRODUCCIÓN

El maíz (*Zea mays* L.) es uno de los cereales más importantes en el mundo junto al trigo y el arroz. La producción mundial durante la campaña 2019/20 fue de 1,17 mil millones de toneladas (USDA, 2020). Los principales países productores son Estados Unidos (33,7%), China (22,4%) y Brasil (9%); ocupando Argentina el quinto lugar como región productora de maíz (4,5% de la producción mundial). En la campaña 2019/20 se sembraron 9 millones de hectáreas con una producción de 56.860.704 toneladas, de las cuales se exporta el 60-70% (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2020). Su relevancia se debe a que posee una gran diversidad de usos. Si bien, la mayor parte de la producción mundial se destina a alimentación animal, también es utilizado como materia prima de la alimentación humana como en productos no alimenticios (e.g. polenta, copos de maíz, harina, bebidas alcohólicas y no alcohólicas, golosinas, endulzantes, producción de bioetanol, fabricación de pinturas y disolventes, farmacia, productos cosméticos, polímeros biodegradables, entre otros; Izquierdo y Cirilo, 2013).

El maíz es una especie monoica y alógama, perteneciente a la familia de las poáceas (gramíneas) y originaria de América. La separación en la misma planta de las estructuras florales de distinto sexo ha dado lugar a una amplia gama de métodos de mejoramiento y producción de semilla; siendo así, uno de los principales cultivos sometidos a diferentes tecnologías de hibridación o polinización cruzada. De este modo, el cruzamiento controlado de dos líneas endocriadas homogéneas (todos los individuos que pertenecen a una misma línea son genéticamente idénticos) y homocigotas (condición en la cual ambos cromosomas de cada par poseen en cada locus los mismos alelos) no emparentadas genera una descendencia (generación F1) que resulta más productiva y más vigorosa que sus padres, lo cual se conoce como heterosis o vigor híbrido (East, 1908; Shull, 1908, 1909).

La hibridación permite producir semilla híbrida con una composición genética única y constante. Es de suma importancia contar con buenas prácticas agronómicas a fin de garantizar el éxito de este proceso tales como una adecuada sincronía de la floración de los parentales, evitar la contaminación con polen extraño, eliminar plantas atípicas, evitar mezclas mecánicas, etc. En un campo de producción de semilla híbrida, los parentales macho y hembra son sembrados siguiendo un arreglo de surcos

determinado, en general cuatro o seis hileras de plantas femeninas por cada surco de plantas masculinas, según las características del macho (Figura 1). Además, durante la etapa de floración es necesario que los granos de polen de la inflorescencia masculina del parental masculino polinicen el estigma receptivo de la inflorescencia femenina del parental femenino (Wych, 1988). En base al conocimiento del momento de floración de cada parental, se ajustará el diferimiento de siembra entre parentales (mediante fórmulas de siembra expresadas en tiempo térmico) con el fin de asegurar la sincronía o coincidencia de las ventanas de floración. Cualquier falta de sincronización entre la floración de ambos parentales reduce el rendimiento y expone al parental hembra a ser contaminado con polen foráneo.

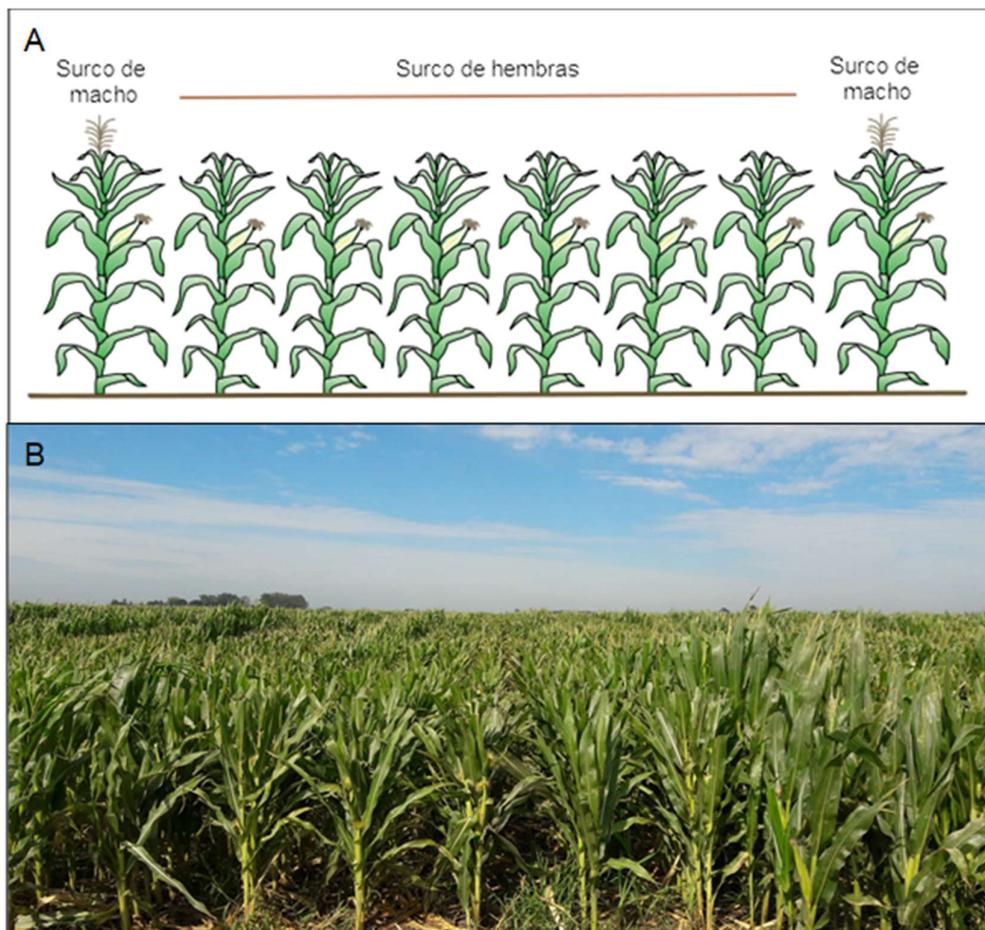


Figura 1. A) Representación diagramática del arreglo de los surcos de hembras y machos en un campo de producción de semilla híbrida de maíz (adaptado de MacRobert et al., 2015). B) Imagen de un lote de producción de semilla híbrida en Argentina con una proporción de hembra: macho de 6:1.

En la producción de semilla híbrida, es crítico evitar que las plantas elegidas como parentales femeninos se autopolinicen a fin de lograr los estándares de pureza genética. Para evitar la autopolinización, se utiliza la técnica de castración o despanojado que consiste en la remoción de la panoja de la línea que será el parental femenino. De esta manera, en el lote de producción de semilla híbrida, permanecen sólo las panojas de la línea parental masculina liberando polen y polinizando al parental femenino para producir la fecundación cruzada (Bartolini, 1990). Es de suma importancia que esta operación se realice en el momento correcto y de manera adecuada. En este sentido, la panoja debe eliminarse antes que comience a emitir polen y de que emerjan sus estigmas para evitar la autofecundación y pérdida de pureza genética (Espinosa-Calderón et al., 2010). Actualmente, la práctica de despanojado se puede realizar en forma manual o mecánica. Ambas tienen el mismo objetivo; sin embargo, el tiempo y la calidad del trabajo son diferentes. La eliminación de la panoja, a través del despanojado manual o mecánico, conlleva que se pierdan las hojas superiores del canopeo. Si la eliminación se realiza de forma prematura, las hojas son removidas junto a la panoja o bien la panoja puede quebrarse y no ser completamente removida (Beck, 2002). Esta pérdida de hojas está asociada a la arquitectura del parental hembra. Por ejemplo, un genotipo con el pedúnculo de la panoja largo tendrá una pérdida menor de hojas al momento del despanojado. Dicha pérdida de hojas podría afectar negativamente el número de semillas producidas y la proporción de cada forma y tamaño de los calibres comerciales establecidos (Quiroga-Cardona, 2019).

Actualmente, en la mayoría de los casos la producción de semilla híbrida de maíz se logra combinando el despanojado mecánico y manual. Su eficiencia depende de las características de la planta (posición y ángulo de la panoja, tipo de canopeo, facilidad de extracción), la uniformidad de altura del cultivo y la experiencia del operador (Wych, 1988). El mismo consta de tres etapas principales: “Cortado”, “Rolado” y “Repaso”.

- 1) Cortado: se realiza con maquinaria autopropulsada provista de cuchillas giratorias denominadas cortadoras (Figura 2A), que cortan el extremo superior del canopeo de las plantas del parental hembra. Estas cuchillas se disponen sobre los cuerpos de trabajo que brindan una capacidad operativa de hasta 12 surcos de parental hembra en cada recorrido de la máquina

cortadora. El objetivo de esta etapa es lograr adelantar la exposición de la panoja del parental hembra para proceder con la extracción de la panoja por las máquinas roladoras. Dicha tarea, se efectúa aproximadamente entre 3 a 5 días (equivalente a 50 °Cd en promedio) antes de la aparición de los primeros estigmas del parental hembra. En esta etapa la planta pierde parte de su área foliar lo cual se traduce en una disminución del rendimiento cuya magnitud es dependiente de cada genotipo.

- 2) Rolado: ocurre aproximadamente entre 2 a 3 días (equivalente a 30 °Cd en promedio) después de haberse realizado el cortado y entre 1 a 2 días antes de la aparición de los primeros estigmas del parental hembra. Esta labor se realiza mediante maquinaria autopropulsada denominada roladoras o “puller” (Figura 2B) provistas de ruedas dispuestas de a pares que al girar en sentido contrario extraen las panojas de plantas del parental hembra. El objetivo de esta etapa es extraer la mayor cantidad posible de las panojas presentes en el parental hembra.
- 3) Repaso: consiste en la extracción manual de todas las panojas remanentes en el parental hembra y se realiza inmediatamente después de la práctica de rolado. Según la eficiencia del rolado (i.e. porcentaje de panojas extraídas cada 100 plantas) y la uniformidad del lote pueden ser necesarios hasta 3 repasos para la eliminación total de las panojas, aumentando los costos de producción y disminuyendo la seguridad del personal que ejecuta dicha tarea.



Figura 2. Maquina cortadora (A) y roladora (B). Fuente: www.hagie.com.

Otra opción para eliminar el polen masculino de la planta femenina incluye el uso de genética con macho-esterilidad citoplasmática (del inglés, CMS: Cytoplasmic Male Sterility). Esta herramienta induce la esterilidad masculina y es una herramienta valiosa para la producción de semilla híbrida en distintas especies, como el arroz, algodón, maíz, entre otros. La utilización del sistema CMS en maíz puede estar limitado debido a que existe interacción del genotipo con el ambiente. En este caso, puede aparecer polen viable en panojas de plantas femeninas y el despanojado mecánico debe ser utilizado para evitar la auto-polinización (Feng et al., 2013).

Recientemente, Bayer® ha lanzado un nuevo sistema para la hibridación de maíz denominado “Sistema de Hibridación Round Up®” (del inglés, RHS: Roundup Hybridization System, evento MON87427; U.S. Patente N°20090165166 y U.S.

Patente N°7314970). Este sistema biotecnológico, también denominado castración química, induce la esterilidad de las panojas de los parentales femeninos mediante dos aplicaciones con una dosis específica de glifosato (Roundup Ready®) previo al desarrollo de la panoja (aproximadamente entre V8 y V10 según escala de Ritchie y Hanway, 1982; Feng et al., 2013). El glifosato es un herbicida que se transloca rápidamente por floema hacia las áreas con alta actividad meristemática (destinos) y actúa sobre la expresión de la enzima 5-enolpiruvilshikimato-3-fosfato sintasa (EPSPS). El evento MON87427 genera una reducción en la expresión de la enzima EPSPS en los tejidos reproductivos masculinos lo que resulta en la esterilidad masculina luego de la aplicación de glifosato (Feng et al., 2014). La especificación de uso de este herbicida indicada por marbete para el control de malezas no afecta la producción de polen de plantas con MON87427, porque los tejidos reproductores masculinos no se están desarrollando activamente en ese momento. La inhibición del desarrollo del polen debido a la aplicación de glifosato es una herramienta valiosa para la producción de semilla híbrida de maíz ya que permite reemplazar el despanojado mecánico, disminuir daños en las plantas, disminuir los costos de producción y labores asociadas y eventualmente evitar pérdidas de rendimiento por la disminución del área foliar. La reducción de rendimiento en los genotipos con el evento MON87427 es un factor de estudio importante para conocer si el genotipo califica o no para ser convertido y utilizado bajo el sistema RHS. Estudios recientes realizados en Bayer han mostrado que, en algunos genotipos, el glifosato causa menor impacto en el rendimiento respecto al despanojado tradicional (Betz, 2018). La aplicación de glifosato en el momento fenológico correcto permitirá la máxima traslocación de glifosato a los tejidos reproductivos y por lo tanto la obtención de panojas estériles en el parental hembra con el evento MON87427. Si por algún motivo (e.g. condiciones climáticas adversas) la aplicación de glifosato para esterilidad no se realiza en tiempo y/o forma, el cultivo deberá ser despanojado mecánica o manualmente. Por esto, es de interés comparar el comportamiento de la línea endocrizada, en términos de desarrollo y productividad, bajo los dos tipos de castración a fin de entender como impacta la tecnología de castración química en comparación a la actualmente utilizada en campos de producción de semilla híbrida de maíz (i. e. castración o despanojado mecánico).



Figura 3. Panojas estériles del parental hembra de un lote de semilla híbrida de maíz producida con el sistema RHS (Roundup Hybridization System, Bayer®).

1.1 Situación problema

La reciente incorporación de nuevas tecnologías de esterilización para la producción de semilla híbrida de maíz requiere ser evaluada respecto de la castración mecánica tradicional, en aspectos claves tales como el ciclo del cultivo, la floración, el rendimiento y el perfil de gradeo (i.e. forma y tamaño de la semilla).

El tipo de esterilización utilizado en la producción de semilla híbrida de maíz puede tener un impacto en las siguientes variables de interés:

- Floración: Cualquier desfase en la etapa de la floración femenina puede afectar la sincronía con la floración masculina (nicking) impactando en el rendimiento potencial y en la pureza genética de la semilla.
- Rendimiento: Afecta directamente la rentabilidad de la actividad.

- Perfil de gradeo: los diferentes tamaños y formas de las semillas tiene implicancias comerciales en el mercado y en la percepción del productor.

1.2 Objetivo

Estudiar el efecto del método de diferentes sistemas de castración masculina sobre la dinámica de floración, el rendimiento y el perfil de gradeo de líneas endocriadas de maíz.

1.3 Hipótesis

- 1) El sistema de castración no afecta la floración femenina en líneas endocriadas de maíz.
- 2) El rendimiento de las líneas endocriadas de maíz no depende del sistema de castración.
- 3) El sistema de castración no modifica el perfil de gradeo de líneas endocriadas de maíz.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1.1 Descripción de los experimentos

El presente trabajo se realizó utilizando la base de datos de ensayos del grupo Investigación para la Producción de Bayer® llevados a cabo durante la campaña 2018/2019 en las localidades de La Carlota (33°25'05"S 63°17'37"O) y Miramar (38°16'00"S 57°50'00"O) y durante la campaña 2019/2020 en las localidades de Pergamino (33°53'01"S 60°34'01"O) y Miramar (38°16'00"S 57°50'00"O) (Figura 4). En cuanto a las características de los suelos en las tres localidades se trabajó sobre suelos de tipo Argiudol Típico con buen drenaje de textura franco-limosa para Pergamino, limosa-fina para Miramar y franco para La Carlota (Taxonomía USDA). En la Tabla 1 se presentan los datos de fecha de siembra, fecha de cosecha, duración siembra-cosecha y densidad para las distintas localidades y años.

Para la siembra se utilizó una sembradora experimental de siembra directa provista de cuatro cuerpos con doble fertilización. Se planteo una densidad objetivo a cosecha de 110000 plantas/ha. No obstante, la siembra se realizó en exceso, para luego, cercano a V3 (Ritchie y Hanway, 1982), cada parcela fuera raleada y así lograr la densidad objetivo. La fertilización se realizó con 100 kg/ha de Fosfato Diamónico y 100 kg/ha de Urea a la siembra y 200 kg/ha de Urea repartidos entre V4 y V8. En cuanto a los aportes de agua se realizan riegos complementarios a fin de evitar el déficit hídrico. Malezas, insectos y enfermedades fueron controladas adecuadamente.

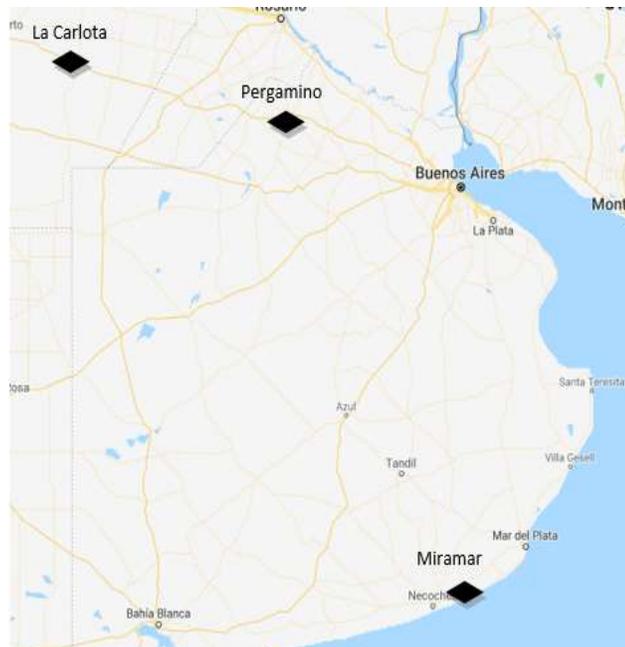


Figura 4. Localidades donde fueron realizados los ensayos

Tabla 1. Fecha de siembra y de cosecha, duración siembra-cosecha y densidad para las localidades de Pergamino, La Carlota y Miramar durante las campañas 2018/19 y 2019/20.

Campaña	Localidad	Fecha de siembra	Fecha de cosecha	Duración siembra-cosecha (días)	Densidad (plantas/ha)
18/19	Miramar	7/11/2018	22/5/2019	196	110777
	La Carlota	2/11/2018	19/4/2019	168	107171
19/20	Pergamino	24/9/2019	5/3/2020	163	108974
	Miramar	30/10/2019	2/5/2020	185	109736

El experimento fue conducido bajo un diseño en bloques completos aleatorizados con arreglo de parcelas divididas con 3 repeticiones, donde la parcela principal fue el tipo de castración y la sub-parcela el genotipo. Cada parcela consistió en 4 surcos, 5 m de largo y 0,52 m de distanciamiento entre hileras. Se utilizó como bordura una mezcla de tres genotipos, de diferente longitud de ciclo, para asegurar polen durante todo el periodo de floración femenina y evitar limitaciones de polen. Se testearon 4 líneas hembras (A, B, C y D) con el evento MON87427 que otorga esterilidad química en la panoja a través de la aplicación de glifosato (U.S. Patente N°. 20090165166 y U.S. Pat. N°. 7314970).

Los tratamientos de castración fueron:

- Castración mecánica (despanojado): consistió en el corte en la base de la panoja en el estado de panoja embuchada. Para estimar el momento de corte, cada parcela se monitoreó diariamente previo a floración observando las espigas. Cuando al menos una espiga de cada parcela presentaba los estigmas a 3 o 4 cm de emerger, se realizó el corte de la panoja con tijera de podar a una altura tal que el mayor número de plantas quede con al menos un 25 % de largo de panoja. Dos días posteriores al corte, los restos de panojas se arrancaron en forma manual simulando la acción de una roladora en un lote de producción.

- **Castración química (RHS):** Se realizaron dos aplicaciones de glifosato en momentos específicos del desarrollo vegetativo del cultivo con una dosis de 2x y 1x, respectivamente. La aplicación se realizó en forma manual con mochila de CO₂, replicando las características de un fumigador en lote de producción.

2.1.2 Mediciones

- **Temperatura media del aire:** para cada ensayo se registró la temperatura de estaciones meteorológicas cercanas (a 800 m de los experimentos).
- **Densidad de plantas:** se contó el total de plantas de cada parcela después del raleo en V3 y se expresó en plantas por hectárea.
- **50% de estigmas (50E):** se registró el momento en días desde la siembra (DDS) en que el 50 % de las plantas de una parcela mostró al menos un estigma visible. Luego, se transformó este dato a tiempo térmico ($T_b=10^{\circ}\text{C}$).
- **Hojas sobre la espiga (HESP):** en post-floración se contó la cantidad de hojas promedio sobre la espiga principal incluyendo la hoja bandera en 4-5 plantas del centro de la parcela.
- **Altura de planta (ALTP):** en post-floración se registró la altura promedio (cm) entre el suelo y el extremo superior de la panoja de 3 o 4 plantas representativas de cada parcela.
- **Rendimiento (RDTO):** Posterior a R6, se cosechó cada parcela con máquina experimental de 4 surcos la cual contaba con balanza, humidímetro y tomador de muestras. El rendimiento fue expresado en kg/ha y corregido a una humedad de 13,5%.
- **Calibre de semilla:** Se recolectó una muestra representativa de cada parcela, las cuales fueron procesadas a través de una serie de zarandas. Los granos se dividieron en i) tamaño: 1, 2, 4 y 5 siendo 1 el más chico y 5 el más grande, y ii) forma: chato (C) y redondo (R). Cada fracción se expresó en porcentaje.

2.1.3 Análisis de datos

Los datos fueron procesados mediante análisis de varianza utilizando el software JMP 12.0 (SAS Institute, 2018). Se ajustó un modelo mixto considerando

como efecto aleatorio el ambiente (año*localidad) y como efectos fijos el tratamiento de castración y el genotipo. Los valores medios, la desviación estándar y las diferencias significativas se calcularon utilizando el modelo de ajuste de mínimos cuadrados. Las diferencias entre tratamientos se evaluaron utilizando el método de Tukey de rango estudiado ($p < 0,05$). El test de χ^2 para la comparación de las proporciones de calibres de semillas ($p < 0,05$).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Condiciones generales de los ensayos

En la campaña 18/19 la temperatura media del aire fue diferente en ambas localidades a lo largo de todo el ciclo de desarrollo del cultivo; siendo en promedio 23°C para La Carlota y 18°C en Miramar (Figura 5). Por otra parte, se observó una temperatura media similar en las localidades testeadas durante la campaña 19/20, (en promedio 17°C para Miramar y 19°C para Pergamino; Figura 6). En cuanto a precipitaciones, si bien los ensayos se realizaron bajo riego complementario, en el periodo 18/19 fue de 610 mm en Miramar y 690 mm en La Carlota (datos no presentados). En tanto, para el periodo 19/20 ambas localidades tuvieron precipitaciones similares rondando los 730 mm durante el periodo de cultivo con mayor concentración en el periodo de octubre a febrero (datos no presentados).

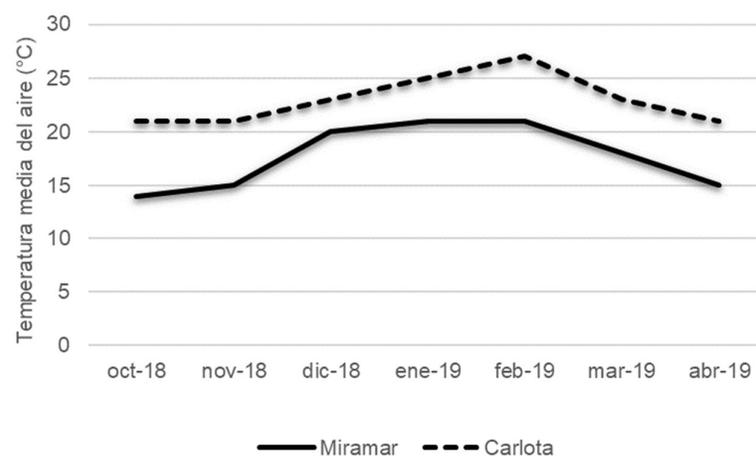


Figura 5. Evolución de las temperaturas medias del aire durante el desarrollo del cultivo para las localidades de La Carlota y Miramar durante la campaña 2018/19.

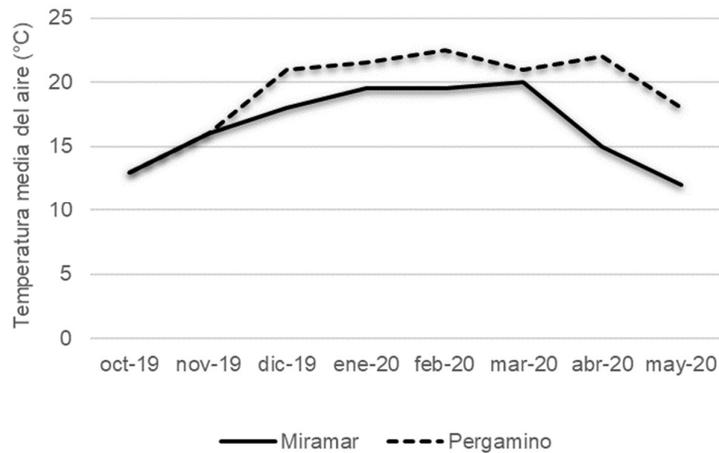


Figura 6. Evolución de las temperaturas medias del aire durante el desarrollo del cultivo para las localidades de Pergamino y Miramar durante la campaña 2019/20.

3.2. Efecto del tipo de castración sobre la floración femenina.

No se encontró una interacción significativa para la castración masculina*genotipo ($p > 0,05$) en el tiempo para alcanzar el 50% de la floración femenina (50E). Sólo hubo efecto significativo del genotipo ($p < 0,001$). En la Figura 7 se observa el tiempo térmico para alcanzar el 50 % de floración femenina (expresado en °Cd, temperatura base 10°C, 50E) para los cuatro genotipos testeados. El 50E vario entre 807-862°Cd y el ambiente (año*localidad) explicó el 85% de la variabilidad. Si bien no hubo efecto significativo del tratamiento de castración ($p = 0,3603$), se observó una tendencia a mayor 50E en la castración mecánica ($334 \pm 32^\circ\text{Cd}$) en comparación a la castración química ($329 \pm 32^\circ\text{Cd}$).

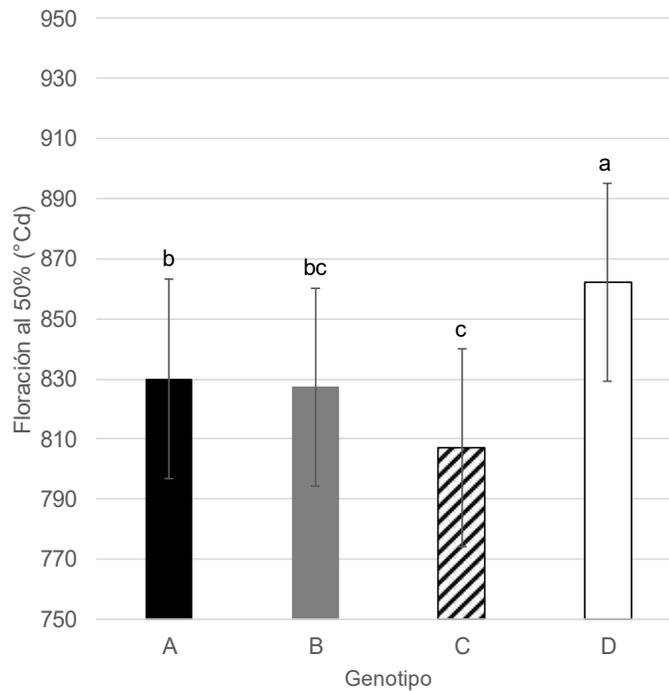


Figura 7. Tiempo térmico para alcanzar el 50 % de floración femenina (°Cd, Temperatura base = 10°C) para diferentes líneas endocrizadas de maíz. Las líneas verticales representan el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

3.3. Efecto del tipo de castración sobre el rendimiento.

No se encontró una interacción significativa para la castración masculina*genotipo sobre el rendimiento (RDTO). Hubo efecto significativo del tratamiento de castración ($p < 0,0037$) y del genotipo ($p < 0,0001$) sobre el RDTO. En la Figura 8 se presenta el rendimiento para los tratamientos de castración. La castración mecánica tuvo un mayor rendimiento en comparación a la castración química (15% menos de rendimiento en promedio para los cuatro genotipos). Si bien la interacción no fue significativa ($p = 0,6628$), es importante resaltar que la diferencia en RDTO entre tratamientos dependió de cada genotipo. Los genotipos mostraron una reducción del RDTO por la castración química de 4-22%. El aumento del peso de mil granos (datos no presentados) sugieren que la reducción en el rendimiento cuando se utiliza la castración química en estos genotipos podría estar explicado por un menor porcentaje de granazón en la espiga.

Durante el proceso de la castración mecánica se produce una reducción del área foliar. En la Figura 9 se presenta el número de hojas sobre la espiga (HESP) y la altura de planta (ALTP) para los dos tratamientos de castración aquí estudiados. No hubo interacción significativa de la castración masculina*genotipo sobre ninguna de las dos variables. La castración mecánica redujo significativamente la HESP y la ALTP ($p < 0,001$) respecto a la castración química. Sin embargo, esta reducción en el área foliar no impactó negativamente en el rendimiento.

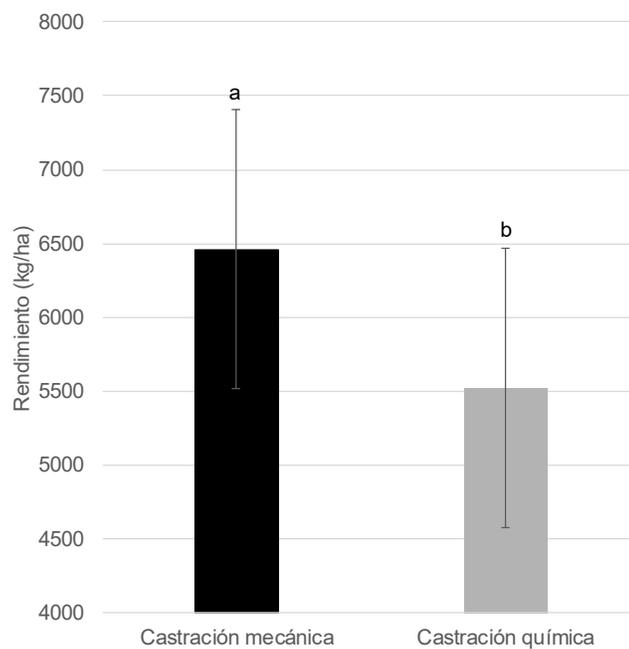


Figura 8. Rendimiento (kg/ha) para diferentes tratamientos de castración masculina. Las líneas verticales representan el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

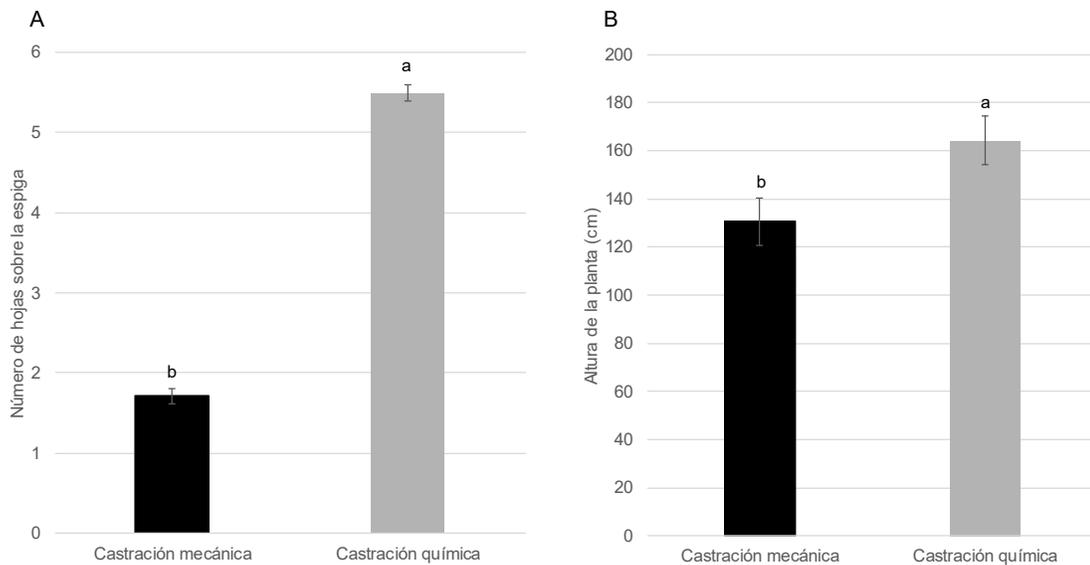


Figura 9. A) Número de hojas sobre la espiga y B) altura de planta para diferentes tratamientos de castración masculina. Las líneas verticales representan el error estándar de la media. Letras distintas indican diferencias significativas entre tratamientos ($p < 0,05$).

3.4. Efecto del tipo de castración sobre el perfil de gradeo

Los cuatro genotipos testeados presentaron una variación significativa en el perfil de gradeo debido al tipo de castración ($\text{Chi}^2 < 0,05$). La magnitud de la variación fue genotipo dependiente. En la Figura 10 se presenta la proporción de cada tamaño para los granos con forma chata (Figura 10A) y forma redonda (Figura 10B). En general, se observó que la castración química aumento el porcentaje de granos redondos en detrimento de los granos chatos en comparación a la castración mecánica. En la Tabla 2 se presenta la respuesta relativa de cada calibre al tratamiento de castración calculada como $[(\% \text{ para castración química} - \% \text{ para castración mecánica}) * 100 / \% \text{ para castración mecánica}]$. La castración química redujo el porcentaje de granos chicos (C4, C5, R4 y R5) y aumento el porcentaje de granos grandes (C1, C2, R1 y R2). La magnitud de la respuesta fue mayor para los genotipos C y D.

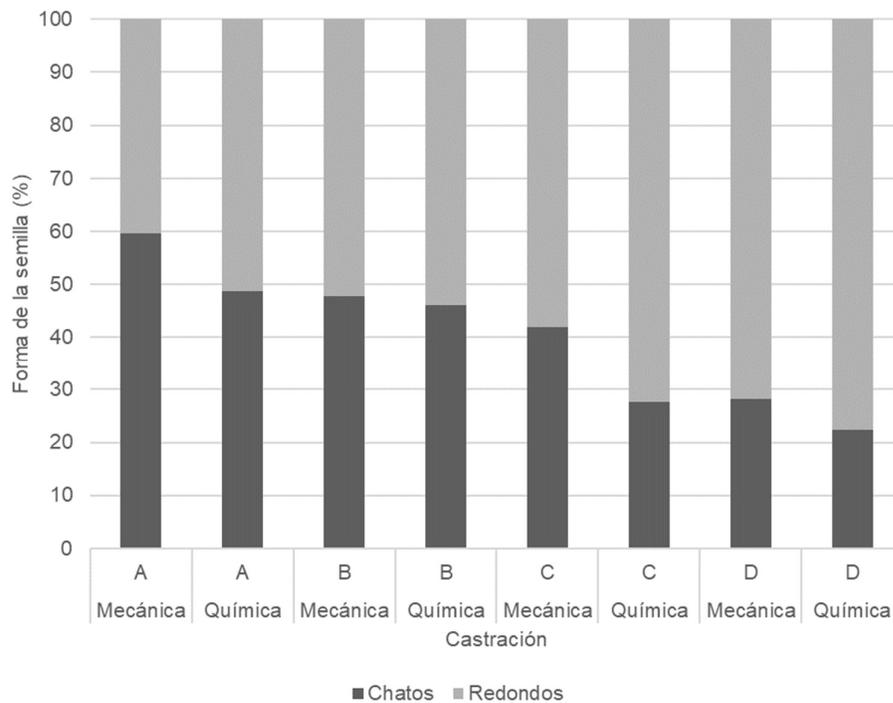


Figura 10. Forma de la semilla (%) para cada genotipo (A, B, C y D) y tratamiento de castración. Todos los genotipos presentaron diferencias significativas en la proporción de los calibres debido al tratamiento de castración ($\text{Chi}^2 < 0,05$).

Tabla 2. Respuesta relativa del calibre de semilla al tratamiento de castración para 4 líneas endocriadas de maíz.

Genotipo	Calibre							
	C1	C2	C4	C5	R1	R2	R4	R5
A	13,0	-5,3	-21,4	-23,3	63,2	42,1	28,3	10,4
B	39,4	18,9	-19,7	-25,1	26,3	11,4	-3,3	-19,7
C	76,5	-25,9	-46,9	-48,4	167,7	64,9	-18,5	-44,5
D	10,5	8,8	-35,4	-40,1	0,2	33,6	-13,0	-41,5

* respuesta relativa = $(\% \text{ para castración química} - \% \text{ para castración mecánica}) * 100 / \% \text{ para castración mecánica}$

4. DISCUSIÓN

La producción de semilla híbrida de maíz se realiza a través del cruzamiento dirigido entre un parental hembra y un parental macho. Para evitar la autofecundación y pérdida de pureza genética, es clave la eliminación de la panoja del parental hembra en tiempo y forma. Usualmente, este procedimiento se realiza de manera manual y/o mecánica (i.e. despanojado o castración mecánica). La alta demanda de mano de obra para este proceso hace que la producción de semilla híbrida de maíz sea una de las más costosas. Recientemente, Bayer® ha lanzado una tecnología denominada “Sistema de Hibridación Roundup” (RHS), el cual mediante aplicaciones específicas de glifosato genera la esterilidad de la panoja del parental hembra (i.e. esterilidad o castración química) reemplazando el sistema tradicional de despanojado. En el presente trabajo se estudió el efecto del tipo de castración sobre variables tales como la floración, el rendimiento y el perfil de gradeo (i.e. tamaño y forma de las semillas).

- Floración:

El tiempo para alcanzar el 50% de la floración femenina (50E) no se modificó por el tratamiento de castración (Figura 7). Sin embargo, se observó una tendencia a mayor 50E en la castración mecánica. Esta diferencia en tiempo térmico se traduce en aproximadamente 1 o 2 días. El tiempo de floración en líneas de maíz es un *trait* cuantitativo complejo (Buckler *et al.*, 2009) el cual puede tener una interacción con el ambiente. Futuros estudios son necesarios para capturar la variabilidad ambiental sobre esta variable y estudiar la curva de floración de ambos parentales. Este conocimiento permitirá explicar potenciales problemas de autofecundación y granazón generados por un desfasaje en la floración, así como, evaluar un posible cambio en la fórmula de siembra. La Hipótesis 1 que establecía que **“el sistema de castración no afecta la floración femenina en líneas endocriadas de maíz”** no se rechaza.

- Rendimiento:

La bibliografía respecto al efecto de la remoción de la panoja sobre el rendimiento es contradictoria. La eliminación de la panoja ha sido asociada con un aumento (Hunter *et al.*, 1969), disminución (Hunter *et al.*, 1973; Wilhelm *et al.*, 1995; Gonzalez Vega, 2017) o efecto neutro (Leonard y Kiesselbach, 1932) sobre el rendimiento en granos.

En el presente trabajo se observó un mayor rendimiento para la castración mecánica en comparación a la castración química y la magnitud de la respuesta dependió del genotipo (Figura 8). Esto es de relevancia ya que la calificación del genotipo para utilizar el sistema de RHS se basa en umbrales de merma de rendimiento por la aplicación de glifosato en comparación a la merma histórica por despanojado (Celani, 2018).

En el tratamiento de castración química, las plantas presentaron mayor cantidad de hojas sobre la espiga y mayor altura (Figura 9). La presencia de mayor área foliar genera un mayor sombreado de la parte inferior del canopeo, reduciendo la tasa de fotosíntesis y por lo tanto afectando negativamente el rendimiento (Duncan et al., 1967). Por otra parte, cuando no se remueve la panoja existe una competencia de fotoasimilados entre la panoja y la espiga en desarrollo (Grogan, 1956). Finalmente, la presencia de mayor cantidad de hojas sobre la espiga puede actuar como barrera de polen y consecuentemente, disminuir el rendimiento producto de una menor granazón. A partir de esto, se pueden incorporar prácticas para aumentar la productividad como manejo de la densidad y mejora en la distribución de polen.

En la producción de semillas se utiliza como indicador de productividad el número de bolsas producidas, calculadas en base a la cantidad de semillas. La reducción del rendimiento para la castración química aquí observado puede deberse a una menor granazón y, por lo tanto, menor cantidad de semillas por espiga. En base a esto, futuras investigaciones son necesarias para un mejor entendimiento de los tratamientos de castración sobre los componentes del rendimiento (i.e. número de semillas y peso de mil semillas).

La Hipótesis 2 que establecía que “**El rendimiento de las líneas endocriadas de maíz no depende del sistema de castración**” se rechaza.

- Perfil de gradeo:

El tamaño y la forma (i.e. calibre) de la semilla son determinados por las características genéticas de la línea materna y el ambiente durante el período de llenado de granos (e.g., temperatura, disponibilidad de agua y fertilidad y la posición en la espiga (Egli, 1998). Actualmente, la semilla de maíz se comercializa en bolsas clasificadas en diferentes calibres. Además del impacto comercial, el calibre influye

sobre la percepción del productor quienes en general prefieren granos de tamaño intermedio y de forma redonda (Fassio, 2017).

Cada genotipo presenta un perfil de gradeo característico. Sin embargo, el ambiente, las condiciones de cultivo y el manejo agronómico pueden modificar este patrón. En este trabajo se observó que la castración química aumentó la fracción de granos redondos en comparación a la castración mecánica (Figura 10). Es de interés conocer como es la respuesta relativa de cada tamaño y forma. Para la castración química se observó predominancia de granos grandes (Tabla 2). Estos resultados están relacionados a un mayor peso de mil granos (datos no presentados) lo cual explicaría la reducción del rendimiento con el sistema de castración química debido a un menor porcentaje de granazón. Es de importancia profundizar en el comportamiento del calibre de las semillas y su relación con los componentes de rendimiento (número de granos y peso de mil granos) ante distintas practicas agronómicas. La Hipótesis 3 que establecía que **“El sistema de castración no modifica el perfil de gradeo de líneas endocriadas de maíz”** se rechaza.

5. CONCLUSIÓN

En el presente trabajo se propuso estudiar el comportamiento de cuatro líneas endocriadas de maíz, en términos de floración, rendimiento y perfil de gradeo, ante dos métodos de remoción de la panoja: mecánica o química. La respuesta en las distintas variables dependió del genotipo. En general, la castración química disminuyó el rendimiento con semillas redondas y de mayor tamaño en comparación con la castración mecánica.

Los ensayos fueron conducidos en condiciones ideales, sin limitaciones hídricas y nutricionales y con un control adecuado de malezas, plagas y enfermedades. Es posible que en determinados ambientes o en condiciones de estrés, tales como densidad alta de plantas, suelos poco fértiles o déficit hídrico, se modifiquen las respuestas aquí observadas. Futuras investigaciones son necesarias para entender con mayor profundidad la interacción del tipo de castración con el genotipo, el ambiente y las prácticas agronómicas. Este conocimiento es de gran valor y permitirá abordar modelos de referencia para predecir el rendimiento y realizar un ajuste de la estimación según las condiciones del cultivo y el sistema de producción utilizado.

La producción de semillas está comenzando a adoptar sistemas de andro-esterilidad, tales como CMS o RHS. Este último, lanzado por Bayer® recientemente, induce la esterilidad de las panojas de las líneas femeninos a través de aplicaciones específicas de glifosato. A diferencia del sistema tradicional de remoción de panojas o despanojado, RHS implica una mayor área foliar, dominancia apical, mayor disponibilidad de asimilados y una limitación en el acceso a polen. Por esto, es necesario entender como esta tecnología afecta las variables aquí estudiadas a fin de lograr un programa de selección de germoplasmas para el uso de esta tecnología que mejore el comportamiento en términos de rendimiento y esterilidad haciendo un uso eficiente de los recursos. Además, la implementación de este sistema de producción permitirá aumenta la seguridad de las tareas a campo, así como, lograr una producción más sustentable reduciendo las emisiones de gases con efecto invernadero.

6. BIBLIOGRAFÍA

BARTOLINI, 1990. El maíz. Mundi-Prensa. Madrid, España. p. 2-25.

BECK, D.L. 2002. Management of hybrid maize seed production. 68p.

BETZ, K. 2018. Effect of detasseling on yield for RHS qualification CY2016 & CY2017. MSL0029505, Bayer Confidential.

BUCKLER, E.S.; HOLLAND, J.B.; BRADBURY, P.J.; ACHARYA, C.B.; BROWN, P.J.; BROWNE, C. y MCMULLEN, M.D. 2009. The genetic architecture of maize flowering time. *Science*, 325, 714-718.

CELANI, 2018. Roundup Hybridization System: glyphosate dose study. MSL0029438. Bayer Confidential.

DUNCAN, W.G.; WILLIAMS, W.A. y LOOMIS, R.S. 1967. Tassels and the productivity of maize. *Crop Science*, 7, 37-39.

EAST, E. 1908. Inbreeding in corn. In Reports of the Connecticut Agricultural Experiment Station for Years 1907–1908, 419-428.

EGLI, D.B. 1998. Seed biology and the yield of grain crops. CAB international.

ESPINOSA-CALDERON, A.; Tadeo-Robledo, M.; Meza-Guzmán, L.D.; Arteaga-Escamilla, I. et al. 2010. "Eliminación de espiga y hojas en un híbrido de maíz androestéril y fértil." *Universidad y Ciencia* 26.3: 215-224.

FASSIO, N. 2017. Efecto de la densidad de siembra sobre el número, peso y calibre de semillas en líneas endocriadas de maíz. Tesis de Maestría. FCA-UNR.

FENG, P.C.; QI, Y.; CHIU, T.; STOECKER, M.A.; SCHUSTER, C.L.; JOHNSON, S.C.; FONSECA, A.E y HUANG, J. 2013. Improving hybrid seed production in corn with glyphosate-mediated male sterility. *Pest Management Science*, 70, 212-218.

GONZALEZ VEGA, 2017. Efecto del despanojado mecánico en el rendimiento de semilla de maíz (*Zea mays*).

GROGAN, C.O. 1956. Detasseling responses in corn. *Agronomy Journal*, 48, 247-249.

HAGIE. www.hagie.com/. Fecha de consulta 5/10/2020.

HUNTER, R.B.; DAYNARD, T.B.; HUME, D.J.; TANNER, J.W.; CURTIS, J.D. y KANNENBERG, L.W. 1969. Effect of tassel removal on grain yield of corn (*Zea mays* L.). *Crop Science*, 9, 405-406.

HUNTER, R.B.; MORTIMORE, C.G. y KANNENBERG, L.W. 1973. Inbred Maize Performance Following Tassel and Leaf Removal. *Agronomy Journal*, 65, 471-472.

IZQUIERDO, N.G. y CIRILO, A.G. 2013. Usos del maíz. Efectos del ambiente y del manejo sobre la composición del grano. *Jornada de Actualización. Calidad del grano de maíz para la industria y la producción en bovinos*, p. 83-92.

LEONARD, W.H. y KIESSELBACH, T.A. 1932. The effect of the removal of tassels on the yield of corn. *Agronomy Journal*, 24, 514-516.

MACROBERT, J.F.; SETIMELA, P.S.; GETHI, J. y REGASA, M.W. 2015. *Manual de producción de semilla de maíz híbrido*.

MINISTERIO DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA. <http://datosestimaciones.magyp.gob.ar/reportes.php?reporte=Estimaciones>. Fecha de consulta 9/9/2020.

QUIROGA-CARDONA, J. 2019. Comportamiento del rendimiento y frecuencia en el tamaño de la semilla F1 de maíz (*Zea mays* L.) y su relación con la pérdida de hojas en el despanojado de líneas parentales. *Orinoquía*, 23, p. 85-91.

RITCHIE, S.W. y HANWAY, J.J. 1982. How a corn plant develops. Iowa State University of Science and Technology, Cooperative Extension Service Ames, Iowa (Special Report 48).

SAS Institute, JMP version 14.1.0 (64-bit), SAS Institute Inc., Cary, NC, 2018.

SHULL, G.H. 1908. The composition of a field of maize. Journal of Heredity, N°1, p. 296-301.

SHULL, G.H. 1909. A pure-line method in corn breeding. Journal of Heredity, N°1, p. 51-58.

USDA. www.fas.usda.gov/. Fecha de consulta 9/9/2020.

WILHELM, W.W.; JOHNSON, B.E. y SCHEPERS, J.S. 1995. Yield, quality and nitrogen use of inbred corn with varying numbers of leaves removed during detasseling. Crop Science, 35, 209-212.

WYCH, R.D. 1988. Production of hybrid seed corn. Corn and corn improvement, N°18, p. 565-607.