



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

"Determinación del periodo crítico en el cultivo de canola"

**TESIS PROFESIONAL QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO
AGRONÓMO FITOTECNISTA**

PRESENTA:

GUSTAVO GARCÍA HERNÁNDEZ

MODALIDAD: TESIS INDIVIDUAL

ASESORES:

DR. GASPAR ESTRADA CAMPUZANO

DR. CARLOS GUSTAVO MARTÍNEZ RUEDA

**Campus Universitario "El Cerrillo" El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca
México**



**La presente tesis forma parte del proyecto de investigación
“DETERMINACIÓN DEL RENDIMIENTO EN HABA Y CANOLA AFECTADO
POR REDUCCIONES EN RADIACIÓN INTERCEPTADA EN DIFERENTES
ETAPAS FENOLOGICAS.” Con clave de registro 4731/2019CIB**

DEDICATORIAS

Dedico este trabajo a todas esas personas que incondicionalmente estuvieron apoyándome durante estos 5 años de trabajo y esfuerzo.

A Lidia, Camila y Valentín por esa paciencia y apoyo pero sobre todo por estar a mi lado a pesar de los malos momentos que hemos vivido juntos.

A mi mamá María por luchar todos estos años por mis hermanos y por mí siempre con objetivo de salir adelante.

A Mariana y Ernesto por ese apoyo que siempre me han brindado, como hermanos.

AGRADECIMIENTOS

Un sincero agradecimiento a la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM) y a la Facultad de Ciencias Agrícolas por las facilidades otorgadas para que pudiera realizar mis estudios de licenciatura.

Al Dr. Gaspar Estrada Campuzano por tenerme paciencia y brindarme su apoyo en la realización de este trabajo.

Un gran agradecimiento a los compañeros trabajadores de campo de la Facultad de Ciencias Agrícolas incluyendo a aquellos que ya se han jubilado por compartir conmigo toda esa gran experiencia durante todos estos años.

A compañeros y amigos de la carrera de Ingeniero Agrónomo Fitotecnista de la generación 2013-2018 por ese apoyo brindado en el conteo de ramas y silicuas durante el experimento de canola.

A todas y cada una de las personas que de una u otra forma contribuyeron a la realización de este trabajo. A todos ellos muchas gracias por todo, siempre los tendré presentes.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIAS.....	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE GENERAL	V
ÍNDICE DE CUADROS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
RESUMEN.....	XI
ABSTRACT	XII
I. INTRODUCCION	1
II. REVISION DE LITERATURA	3
2.1. Importancia mundial.....	3
2.2. Importancia nacional.....	3
2.3. Importancia estatal	5
2.4. Origen de la canola como planta cultivada	5
2.5. Morfología del cultivo de canola	6
2.6. Fenología del cultivo de canola.....	7
2.7. Importancia del periodo crítico	9
2.8. Generación del rendimiento	10
III. MATERIALES Y METODOS	14
3.1. Ubicación del trabajo experimental	14
3.2. Tratamientos y diseño experimental.....	15
3.3. Condiciones generales del experimento	15
3.4. Variables evaluadas	16

3.4.1. Fenología	16
3.4.2. Número final de hojas	16
3.4.3. Radiación interceptada	16
3.4.4. Producción de biomasa	17
3.4.5. Rendimiento de grano.....	17
3.4.6. Índice de cosecha.....	17
3.4.7. Numero de granos por unidad de superficie	18
3.4.8. Peso individual de grano	18
3.4.9. Numero de silicuas por m ²	18
3.4.10. Numero de granos por silicua.....	18
3.5. Análisis estadístico	18
IV. RESULTADOS.....	20
4.1. Condiciones climáticas.....	20
4.2. Análisis de Varianza.....	21
4.3. Efecto del sombreado sobre los componentes fisiológicos del rendimiento	29
4.4. Rendimiento de grano y sus componentes en términos relativos...	36
V. DISCUSIÓN.....	42
VI. CONCLUSIONES.....	47
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	49

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Superficie cosechada, producción y rendimiento promedio de los principales estados productores de canola. Fuente: SIAP, 2015.....	5
Cuadro 2. Valores de F y su significancia estadística para Biomasa a madurez (Biom), rendimiento (Rend), índice de cosecha (IC), número de granos por m ² (NG), peso de 1000 granos (P1000g), número de silicuas por m ² (NS), número de granos por silicua (NGPS) , rendimiento relativo (Rend _{rel}), numero de granos relativo (NG _{rel}), numero de silicuas relativo (NS _{rel}) y número de granos por silicua relativo (NGPS _{rel}), para dos variedades sometidas a sombreado en diferentes momentos durante el ciclo, en Toluca, México.	23
Cuadro 3. Valores de F y su significancia estadística para las etapas fenológicas del cultivo de canola D1 (Elongación inflorescencia visible), D2 (Elongación botón cubierto de inflorescencias secundarias visibles) , BFV (Elongación botón separado), F1 (Inicio de floración primeras flores abiertas, F2 (Floración alargamiento de rama floral numerosas flores abiertas), G1 (Floración caída de pétalos 10 primeras silicuas de 2cm de largo) , G3 (Maduración silicuas de más de 4cm), G4 (Maduración coloreado de granos) Y G5 (Maduración coloreado de granos). Para dos variedades sometidas a sombreado en diferentes momentos durante el ciclo, en Toluca, México.....	25
Cuadro 4. Valores medios para las variables biomasa a madurez (Biom), rendimiento de grano (Rend), índice de cosecha (IC), número de granos por m ² (NG), peso de 1000 granos (P1000g), número de silicuas por m ² (NSm ²) y	

número de granos por silicua (NGPS) para los testigos de dos genotipos de canola, en Toluca, México.	26
Cuadro 5. Correlación de rendimiento y sus componentes para dos genotipos de canola sometidos a tratamientos de sombreo en Toluca, México.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Superficie cosechada, producción y rendimiento promedio de los principales países productores de canola.....	4
Figura 2. Escala Cetiom y FAUBA para el cultivo de canola.	9
Figura 3. Condiciones agroclimáticas ocurridas durante la conducción del trabajo experimental.	21
Figura 4. Relaciones entre el rendimiento de grano con la biomasa a madurez (a) y el índice de cosecha (b) para los tratamientos de sombreado aplicados antes del inicio de la floración en dos genotipos de canola, en Toluca, México.....	30
Figura 5. Relaciones entre el rendimiento de grano con la biomasa a madurez (a) y con el índice de cosecha (b) para los tratamientos de sombreado impuestos en postfloración, en Toluca, México.....	31
Figura 6. Relación entre el rendimiento de grano con el número de granos (a) y peso de grano con el número de granos (b) para los tratamientos de sombreado impuestos antes del inicio de la floración (prefloración) en dos cultivares de canola en Toluca México.	33
Figura 7. Relaciones entre el número de granos por m ² (a) y el peso individual de grano (b) con respecto a los tratamientos de sombreado impuestos en postfloración en dos genotipos de canola, en Toluca México.	35
Figura 8. Relación entre el rendimiento relativo y el punto medio del tratamiento de sombreado desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México.	37

Figura 9. Relación entre el número de granos por m² relativo y el punto medio del tratamiento de sombreo desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México..... 38

Figura 10. Relación entre el peso relativo de 1000 granos y el punto medio del tratamiento de sombreo desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México..... 39

Figura 11. Relación entre el número de silicuas relativo por m² y el punto medio del tratamiento de sombreo desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México. 40

Figura 12. Relación entre el número de granos por silicua relativo y el punto medio del tratamiento de sombreo desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México. 41

RESUMEN

DETERMINACIÓN DEL PERIODO CRÍTICO EN EL CULTIVO DE CANOLA

Gustavo García Hernández. Ingeniero Agrónomo Fitotecnista.

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas

Asesores: Dr. Gaspar Estrada Campuzano y Dr. Carlos Gustavo Martínez Rueda.

En el presente trabajo se identificó el periodo crítico del cultivo de canola con base en la reducción de la radiación incidente en diferentes momentos a lo largo del ciclo fenológico. Para lograr el objetivo se sembraron dos cultivares primaverales de canola uno de ciclo corto y otro de ciclo intermedio que se sometieron a tratamientos de 10 días de sombreo (14 en total) durante el ciclo agrícola invierno 2015 y primavera 2016. Los tratamientos (combinación de cultivares y momentos de sombreo) se establecieron en un arreglo de parcelas divididas, en donde la parcela principal fue asignada a los cultivares, mientras que los momentos de sombreo fueron asignados a las subparcelas, estos últimos fueron distribuidos en un diseño de bloques completos al azar con 3 repeticiones. Los análisis estadísticos consistieron en análisis de varianza y cuando la prueba de F de los análisis de varianza resultó significativa, se procedió a realizar la prueba de medias utilizando para ello la diferencia mínima significativa honesta de la prueba de (Tukey) a un nivel de significancia del 5%. Las relaciones entre variables se analizaron mediante análisis de regresión y se ajustaron modelos lineales, bi-lineales, o sigmoideos (TBL curve, Jandel Scientific, AISN Software) según la variable. El periodo crítico para la generación del rendimiento y número de granos difirió entre genotipos y se ubicó durante el periodo comprendido después del inicio de la floración. El componente numérico del rendimiento más afectado por reducciones en los niveles de radiación incidente fue el número de granos. El número de granos por silicua y el número de silicuas explicaron en gran medida los cambios en el número de granos. Nuestros resultados permitirán orientar mejor las estrategias de mejoramiento genético y de manejo agronómico tendientes a incrementar el rendimiento potencial.

Palabras clave: Brassica napus L., rendimiento, numero de granos, radiación incidente.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE CRITICAL PERIOD IN CANOLA CULTIVATION

Gustavo García Hernández. Ingeniero Agrónomo Fitotecnista.

Universidad Autónoma del Estado de México. Facultad de Ciencias Agrícolas

Advisors: Dr. Gaspar Estrada Campuzano and Dr. Carlos Gustavo Martínez Rueda.

In the present work, the critical period of canola crop was identified by reducing the incident radiation at different times throughout the phenological cycle. To achieve the objective, two spring canola cultivars were sowing, one of short cycle (Hyola 61) and the other of intermediate cycle (Bioaureo 2486), which were exposed to fourteen shading (reducing 80% incident radiation) treatments of 10 days, during cycle winter 2015 and spring 2016. The treatments (combination of cultivars and shading moments) were established in an arrangement of split plots, where the main plot was assigned to the cultivars, while the shading moments were assigned to the sub-plots, the latter were distributed in a complete random block design with 3 repetitions. The statistical analyzes consisted of analysis of variance and when the F test of the analysis of variance was significant, the means test using the minimum significant difference honest of the test of (Tukey) at a level of significance of 5% was performed. The relationships between variables were analyzed by regression analysis and adjusted linear, bi-linear, or sigmoid models (TBL curve, Jandel Scientific, AISN Software) according to the variable. The critical period for yield and grain number determination was different between genotypes and was located during the period after the beginning of flowering. The numerical component of yield most affected by reductions in incident radiation levels was the number of grains. The number of grains per silicua and the number of silicuas explained the changes in the number of grains.

Our results will allow to better the strategies of crop breeding and agronomic management tending to increase the potential yield.

Key words: Brassica napus L., grain yield, grain number, incident radiation

I. INTRODUCCION

La canola *Brassica napus* y *B. rapa* es una planta oleaginosa muy difundida en el mundo de la cual se obtiene aceite comestible de excelente calidad cuyo contenido de grasas esenciales puede ayudar a prevenir enfermedades del corazón (Morris, 2004). A nivel mundial la superficie sembrada de este cultivo es cercana a 36 millones de hectáreas, con una producción de más de 78 millones de toneladas y rendimiento promedio de 2.0 t ha⁻¹.

En México, la canola es un cultivo de reciente introducción principalmente en algunas áreas del norte y centro del país, donde su explotación comercial es promovida principalmente por la industria alimentaria y a la agricultura por contrato. En la región semiárida del norte de Tamaulipas se considera una opción importante en el ciclo otoño-invierno (Díaz y Ortegón, 2006; González y Ortegón, 2006). Este cultivo es una buena alternativa para la producción de forraje en las regiones áridas y semiáridas de México, ya que produce forraje nutritivo con mayor eficiencia en el uso del agua que la avena, uno de los principales forrajes en la región (Reta et al., 2008; Reta et al., 2010).

En la actualidad, resulta muy importante optimizar las prácticas de manejo tendientes a incrementar el rendimiento potencial de los cultivos, por lo que es necesario lograr un mejor entendimiento de los mecanismos fisiológicos que determinan la generación del rendimiento de los cultivos durante su ciclo ontogénico. La determinación de las etapas de desarrollo más sensibles a cambios en la disponibilidad de recursos (periodo crítico) resulta ser un eslabón clave en la optimización del manejo de cultivos. A la fecha se han definido los

periodos críticos para la determinación del rendimiento en muchos cultivos tales como: trigo (Fischer, 1975, 1985; Savin y Slafer, 1991), maíz (Fischer y Palmer, 1984; Kiniry y Ritchie, 1985; Otegui y Andrade, 2000), girasol (Cantagallo et al., 1997), soya (Jiang y Egli, 1993; Board y Tan, 1995), cebada (Arisnabarreta y Miralles, 2008), triticale (Estrada-Campuzano et al., 2008) y avena (Mahadevan et al., 2016). Sin embargo, en el cultivo de canola aún no se ha identificado cual es el periodo de tiempo crítico para la determinación y generación del rendimiento. Con base en lo anterior, los objetivos del presente trabajo fueron: i) establecer los cambios en el rendimiento de canola por efecto de reducciones en los niveles de radiación solar incidente durante distintas fases del ciclo ontogénico y ii) Identificar los componentes del rendimiento que se afectan en mayor medida como consecuencia del estrés producido por la reducción en los niveles de radiación solar incidente.

II. REVISION DE LITERATURA

2.1. Importancia mundial

A nivel mundial se siembran alrededor de 36 millones de hectáreas de canola con una producción anual de más de 78 millones de toneladas con un rendimiento promedio de 2043.3 Kg ha⁻¹. Los principales productores son la Unión Europea, China, Canadá e India, que concentran más del 70% tanto de la superficie cultivada como de la producción, mientras que los rendimientos promedio más altos son obtenidos por países de la Unión Europea principalmente siendo en el medio oriente donde se obtienen los más bajos rendimientos. (Figura 1) (FAOSTAT, 2014).

2.2. Importancia nacional

En México, se tienen registros de siembra de canola a partir del 2000, la superficie sembrada y cosechada de esta planta exhibieron una tendencia ascendente hasta el 2006, cuando se reportaron 5,608.5 ha sembradas. En el año 2015 se cosecharon 10 429 ha, con una producción de 10 976 t y un rendimiento promedio de 1.05 t ha⁻¹ (SIAP, 2017). Las entidades más sobresalientes en la producción de canola para el ciclo 2015 fueron Tamaulipas, Hidalgo, Estado de México, Jalisco y Tlaxcala, destacando Tamaulipas con el 91% de la superficie sembrada a nivel nacional y por su volumen de producción, a pesar de tener los rendimientos más bajos (Cuadro 1) (Ochoa, 2014).

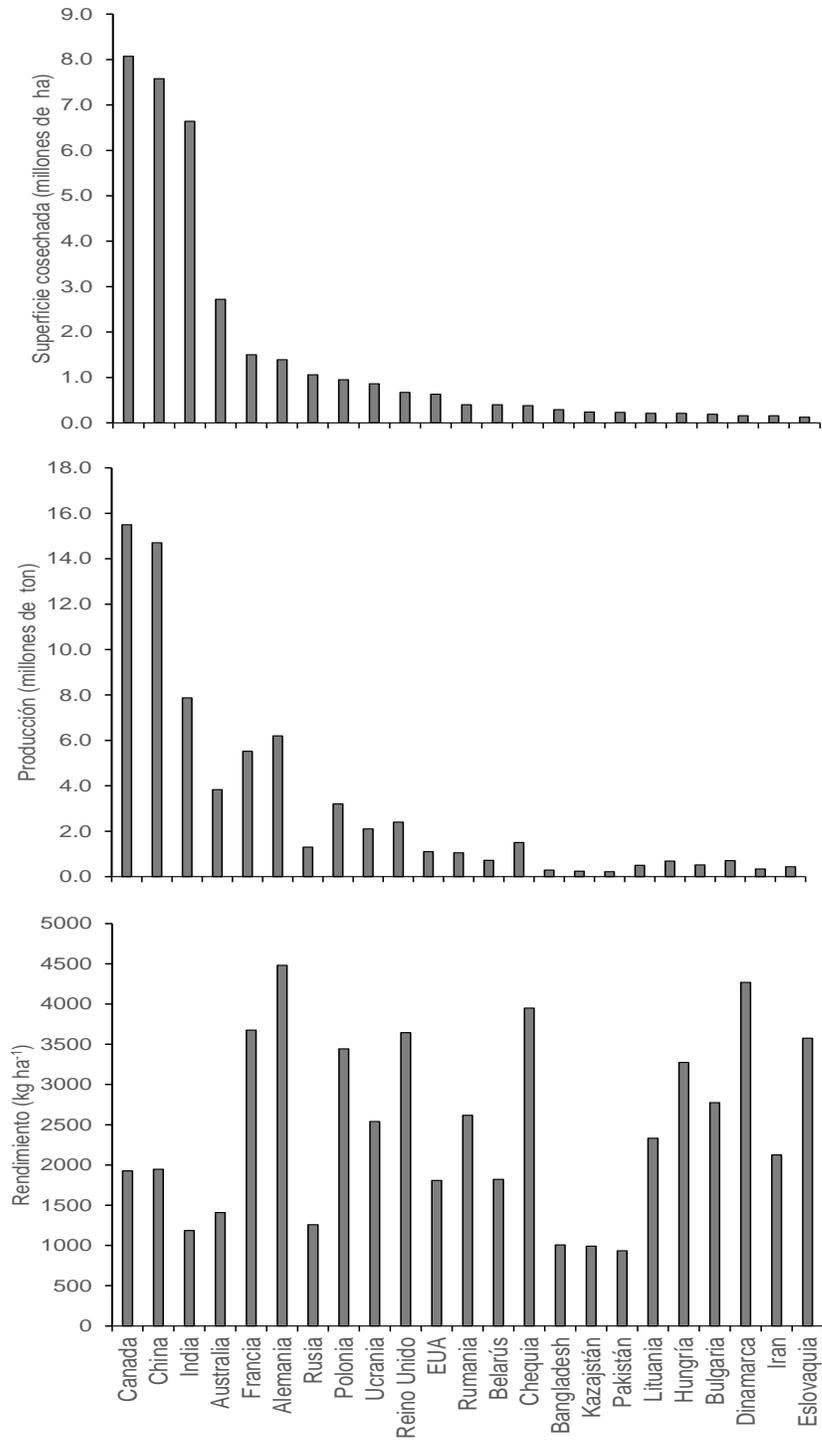


Figura 1. Superficie cosechada, producción y rendimiento promedio de los principales países productores de canola.

Cuadro 1. Superficie cosechada, producción y rendimiento promedio de los principales estados productores de canola. Fuente: SIAP, 2015.

Estado	Superficie Cosechada (ha)	Producción (t)	Rendimiento (t ha ⁻¹)
Tamaulipas	9,580	9411	0.98
Hidalgo	333	693	2.08
México	226	494	2.19
Jalisco	176	207	1.18
Tlaxcala	114	168	1.48

2.3. Importancia estatal

El rendimiento nacional de canola por hectárea es de 1.69 toneladas; los rendimientos más altos de producción por hectárea para ambos ciclos (otoño-invierno; OI y Primavera-verano; PV) se registran en el Estado de México y Michoacán, los cuales oscilan entre 2.5 t ha⁻¹ en PV y de 3.0 t ha⁻¹ en OI (Ochoa, 2014).

2.4. Origen de la canola como planta cultivada

El cultivo de colza se conoce desde la década de los años 30, en aquella época se comercializaban cultivares silvestres como *Brassica napus L.* y *B. campestris L.*, (nabo) que se encontraban como malezas en cultivos de trigo o lino o bien como producto de su cultivo (Gómez et al., 2018). Cabe mencionar que estos cultivares contenían altos niveles de ácido erucico y glucosinolatos. Para 1945 la colza se utilizó como combustible de barcos norteamericanos que se obtenía de

la producción canadiense y que hasta ese entonces había sido relativamente pequeña, pero debido a la situación que se vivía mundialmente se multiplicó para volverse poderosa en el proceso de producción, sin embargo, la producción de colza fue en decadencia al final de la guerra (Gifford, 2017). Debido a esto en 1978 la colza que se cultivaba se modificó obteniendo una variedad llamada L.E.A.R (Low Erucic Acid Rapeseed) Canola (Canadian Oil Low Acid) que genéticamente contenía menos del 2% de ácido erúxico en el aceite, y menos de 30 micromoles de glucosinolatos por gramo de pasta, lo que marcó el inicio de la industria de la canola a nivel mundial (García et al., 2013). A partir de entonces la colza modificada para uso alimenticio se incrementó en los mercados internacionales y despertó el interés en el mercado local de la industria aceitera. En Argentina tanto en el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) como en el Instituto Agroindustrial de Oleaginosas, los técnicos comenzaron a probar la adaptación de cultivares importados de Canadá. (Gómez et al 2018). En México a partir del ciclo 2003-2004 se inició el programa de mejoramiento genético de canola en el INIFAP con el objetivo de desarrollar variedades mexicanas adaptadas a las condiciones agroecológicas del país (García et al., 2013).

2.5. Morfología del cultivo de canola

La colza (*Brassica napus var. oleifera*) es una planta herbácea anual de la familia de las crucíferas que se utiliza como oleaginosa, con la finalidad de extraer aceite de sus semillas, dentro de esta familia está el género *Brassica* que engloba varias especies cultivadas tanto para usos hortícolas como forrajeros. Este género

engloba al grupo de mostazas, coles, coliflores, brócolis, nabos y nabinas. Presenta un tallo de porte erecto, de altura variable, entre los 0,9 m de las variedades de menor porte, a los 2 m de las variedades de porte alto. La raíz es pivotante, profundizando a niveles considerables y sus raíces secundarias ramifican fácilmente. El sistema radicular extrae nutrientes de niveles a los que no llegan los cereales y mejora la estructura del suelo al realizar en el terreno una labor de subsolado. Las flores son de color amarillo y se agrupan en racimos terminales. Los frutos son silicuas de 5-8 cm de longitud. La silicua tiene dos suturas y una fina lámina intermedia de separación donde se localizan alrededor de 20-25 semillas esféricas. Las silicuas maduras son dehiscentes, abriéndose las suturas con golpes o al secarse con el sol, cayendo los granos al suelo. La mejora genética está permitiendo obtener variedades que desgranar menos, en especial los híbridos. Si dejamos que el cultivo sobremadure en el campos todas las variedades se desgranar, para evitar eso, una vez la semilla madure, no tienen que estar más de 7 a 14 días sin cosechar (Syngenta, 2018).

2.6. Fenología del cultivo de canola

La colza es fundamentalmente un cultivo de invierno, aunque en el norte de España y Europa también se puede sembrar en primavera. El desarrollo de la colza tiene varias fases (Syngenta, 2018):

Emergencia: Es el período comprendido entre la germinación y la aparición de los dos cotiledones fuera de la tierra.

Roseta: En el período otoñal van apareciendo hojas verdaderas a nivel del suelo hasta un número de 6-8 pares. En el invierno, la planta permanece en el estado

de roseta y aparentemente no crece, aunque sí lo hace la raíz que es pivotante. Al final del invierno se producen más hojas verdaderas con un crecimiento rápido hasta cubrir todo el terreno.

Alargamiento del tallo: Las plantas emiten un tallo al final del cual se sitúan los botones florales. Este tallo puede ser ramificado o no, dependiendo de la densidad de siembra. El tamaño total de la planta oscila entre 0,9 - 2,0 m.

Floración: Se produce de una forma progresiva en sentido ascendente, durante el crecimiento de las inflorescencias. Este periodo es indeterminado en su duración y de él depende en gran medida la producción.

Maduración: Es el período de llenado de las silicuas que pasan a realizar la fotosíntesis debido a que la planta pierde todas sus hojas. Las silicuas contienen de 20 a 25 semillas inicialmente de color verde, que se oscurecen al madurar.

Conocer la ocurrencia de los distintos eventos ontogénicos en el cultivo de colza es el primer paso para establecer la adaptabilidad de los distintos genotipos y poder tomar decisiones de manejo (Gómez et al., 2018). Diversas escalas describen las etapas de desarrollo del cultivo, y una de las más usadas es la del CETIOM (Arnoud, 1989). En la Figura 2 se observa la fenología del cultivo de canola con base en dos escalas de desarrollo propuestas.

Escala FAUBA		Escala Cetiom	
Em: emergencia	CA: cambio de ápice	BFV: botón floral visible	IFl: inicio de floración
IFr: inicio de fructificación	MF: madurez fisiológica		
A	COTILEDONAR	Cotiledones visibles	
B1	PLANTULA	1 hoja verdadera desarrollada	
B2		2 hojas verdaderas desarrolladas	
B3 a B6	ROSETA	Hasta 6 hojas verdaderas desarrolladas	
C1		Aparición de hojas jóvenes	
C2	ELONGACION	Entrenudos visibles. Vestigios de ramificaciones principales	
D1		Inflorescencia visible	
D2		Botón cubierto. Inflorescencias secundarias visibles	
E		Botón separado	
F1	FLORACION	Primeras flores abiertas	
F2		Alargamiento rama floral. Numerosas flores abiertas	
G1	MADURACION	Caida de pétalos. 10 primeras silicuas de 2 cm de largo	
G3		Silicuas de + de 4 cm	
G4		Coloreado de granos	
G5		Coloreado de granos	

Figura 2. Escala Cetiom y FAUBA para el cultivo de canola.

2.7. Importancia del periodo crítico

El período crítico es aquella ventana de tiempo durante el ciclo del cultivo en la cual una limitación en recursos (radiación solar, disponibilidad de agua y nutrientes) puede afectar significativamente el rendimiento de cualquier cultivo de grano. En este sentido, Schwab (2010) comenta que en canola el periodo que media entre el inicio de floración y el comienzo de crecimiento de silicuas es particularmente importante en la fijación del número de silicuas y de granos por silicua que la planta puede sostener a fin de definir el rendimiento. En este sentido, el autor especula que este periodo se puede asumir como crítico para la

generación del rendimiento. En la actualidad diversos autores han definido los periodos críticos para la determinación del rendimiento en muchos cultivos tales como: trigo (Fisher, 1975, 1985), maíz (Fischer y Palmer, 1984), girasol (Cantagallo et al, 1997), soya (Jiang et al. 1993), cebada (Arisnabarreta and Miralles, 2007), triticale (Estrada-Campuzano et al., 2008) y avena (Mahadevan et al., 2016). Lo que se puede resaltar en estos estudios es que para cada especie las etapas de desarrollo más sensibles varían considerablemente, a pesar de que en su mayoría están asociadas con el inicio de la floración, por lo que lo observado en una especie no puede extrapolarse a otra. (Bertero y Ruiz, 2007).

2.8. Generación del rendimiento

El rendimiento de grano es el resultado de la interacción entre el genotipo y los factores ambientales, los insumos y el tipo de suelo, la fecha y el método de siembra, la densidad de siembra, nutrición y la disponibilidad de agua (Akbar et al., 2006). Sumado a esto es indispensable conocer la fenología del cultivo para ajustar la adaptabilidad genotípica, ya que esto permite identificar las etapas de desarrollo a lo largo del ciclo del cultivo y los factores del ambiente que la modulan (Agosti et al., 2011). Se sabe que el rendimiento de grano se genera a través de todo el ciclo del cultivo, a partir de sus componentes, por ejemplo, número de granos por m^{-2} , el peso de grano e índice de cosecha. Sin embargo, a lo largo de este ciclo es posible identificar una ventana de tiempo crítica para la generación del rendimiento donde una disminución de los recursos (radiación solar, disponibilidad de agua y nutrientes) o algún estrés térmico, producirá una

importante reducción del rendimiento final alcanzado, especialmente por cambios en el número de granos (Agosti et al., 2011).

Se sabe que el sombreado de cultivos ha hecho posible la identificación de etapas de desarrollo en las que la disminución de radiación es más crítica para el rendimiento de grano. Willey y Holliday (1971) y Fischer (1975) observaron que el sombreado en trigo de primavera durante los 30 días anteriores a la antesis, provocó una reducción significativa en el rendimiento de grano al reducir el número de granos por unidad de superficie. Por otro lado, Egli y Bruening (2005) al usar dos tratamientos continuos de sombreado de diferente intensidad en el cultivo de soya (60% y 90% a partir de floración hasta la madurez) encontraron una reducción significativa en el número de vainas. Por otro lado, observaron que el sombreado continuo redujo la producción de vainas en los dos experimentos (un promedio de 24% para el 60% de sombra y 71% para el 90% de sombra), concluyendo que el número de vainas maduras y semillas estaba directamente relacionado con la fotosíntesis durante período de floración y producción de vainas.

Por otro lado, en girasol (*Helianthus annuus* L.), al utilizar sombreado artificial para exponer al cultivo a diferentes condiciones de radiación solar y temperatura se pudo observar a gran dependencia de número de semillas por m⁻² de las condiciones térmicas y de radiación el durante período desde iniciación del flósculo hasta el final del establecimiento de la semilla, concluyéndose que existe diferente sensibilidad de la radiación entre las etapas de pre y postantesis, así como también inter e intra-anales en fechas de siembra (Cantallago et al., 1997).

Por otro lado, los efectos de reducciones en los niveles de radiación solar (sombreo) no siempre tienen el mismo impacto en genotipos de la misma especie y como resultado algunas se ven más afectadas que otras. En este sentido, Arisnabarreta & Miralles (2008), al evaluar el comportamiento de dos líneas isogénicas de cebada de dos y seis hileras usando tratamientos de sombreado durante el periodo comprendido entre la aparición de la hoja bandera y el espigamiento (20 días antes del espigamiento), observaron una disminución en el número de flósculos fértiles por espiga (20% para la línea de seis hileras y 11% para la línea de dos hileras). Es importante destacar que en los estudios en los cuales se ha utilizado el sombreado como un medio para determinar las etapas más sensibles del cultivo a cambios en la disponibilidad de asimilados, también es posible potencializar las oportunidades de incrementar el rendimiento de grano. Por ejemplo, Andrade et al. (2002), observaron que en maíz, girasol y soja el aumento del rendimiento de grano en respuesta al espaciado entre surcos estaba fuertemente relacionado con la mejora en la interceptación de luz durante el período crítico para la definición del número de granos.

En lo que se refiere al cultivo de canola se ha observado que la generación del rendimiento también se ha visto limitado por diferentes factores. En este sentido, Sidlauskas y Bernotas (2003), observaron que un aumento en el período vegetativo combinado con alta precipitación favorece un incremento en el rendimiento de semilla de canola mientras que un aumento en la temperatura tiene un efecto negativo. Contrariamente, a esto las temperaturas templadas y humedad adecuada favorecieron el desarrollo, peso y contenido de aceite del

grano (Sidlauskas y Bernotas, 2003; Ortegón et al., 2006). Mientras que Sinaki et al. (2007), observaron que dentro de los componentes del rendimiento, el más sensible al déficit hídrico fue el número de silicuas, cuando las plantas de canola fueron expuestas a diferentes niveles de agua subterránea equivalentes al 20%, 50% y 75% del agua disponible en el suelo.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1. Ubicación del trabajo experimental

El experimento se realizó en el ciclo invierno - primavera 2015 – 2016 en la Facultad de Ciencias Agrícolas dependiente de la Universidad Autónoma del Estado de México, localizada a 18 km al norte de la ciudad de Toluca, con coordenadas geográficas de 19°15'33" de latitud norte, 99°39'38" de longitud oeste y a una altitud de 2640 msnm. De acuerdo a la clasificación climática de Köpen, modificada por García (1988) el clima predominante es del tipo C (w2) (w) b (i) que corresponde a un clima templado subhúmedo, el más húmedo de los subhúmedos, con lluvias en verano y escasa precipitación pluvial en invierno (5%), poca oscilación térmica, temperatura media anual de 12.8°C y precipitación promedio anual de 900mm (González et al., 2009). El suelo de la región es un vertisol pélico de origen volcánico, presenta un horizonte mineral con un bajo contenido de materia orgánica que va del 1.01 a 2.36 %. El color del horizonte superficial en seco es café grisáceo oscuro o gris oscuro con contenidos de arcilla de 20 a 36.4 %. En el perfil del suelo se puede distinguir un horizonte con disturbios de labranza presentando compactaciones por piso de arado, la cantidad de materia orgánica es muy baja que va desde los 0.07 a 1.01 (Gil *et al.*, 2014).

3.2. Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos estuvieron constituidos por todas las combinaciones posibles de dos cultivares primaverales de canola (uno de ciclo corto; Hyola 61 y uno intermedio; Bioaureo 2486) y 14 periodos de sombreo artificial de 10 días de duración aplicados desde la aparición de la 3ra o 4ta hoja verdadera hasta la madurez fisiológica. En las dos variedades se consideró un tratamiento control (sin sombreo). Los tratamientos se establecieron en arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones, asignando a los cultivares en la parcela principal y los periodos de sombreo la sub-parcelas.

3.3. Condiciones generales del experimento

La siembra se realizó el 17 de diciembre del 2015 en parcelas de 5 hileras de 3.0 m de longitud y separadas entre sí a 0.30 m. Se utilizó una densidad de siembra de 70 semillas por m² para lograr al menos una densidad de 50 plantas establecidas por m². Para lograr lo anterior, para cada parcela se distribuyeron 315 semillas de manera uniforme en las 5 hileras de cada parcela experimental. El cultivo se mantuvo con humedad en capacidad de campo y sin restricciones nutricionales por lo que se fertilizó con la fórmula 150-60-30, utilizando como fuentes de nitrógeno a la urea, fósforo al superfosfato de calcio triple y al cloruro de potasio como fuente de este elemento. Tanto el fósforo como el potasio se aplicaron al momento de la siembra, mientras que el nitrógeno se fraccionó en tres momentos (siembra, botón floral visible y floración). El agua fue suministrada a través de riego por goteo, utilizando cintillas con goteros separados cada 10 cm. El experimento se mantuvo libre de plagas y enfermedades.

3.4. Variables evaluadas

3.4.1. Fenología

Se determinó la fenología del cultivo a lo largo del ciclo, registrándose la fecha de emergencia, inicio de elongación del tallo, botón floral visible, inicio de floración y madurez fisiológica. Todas las etapas fenológicas registradas se expresaron tanto en días como en tiempo térmico, utilizando como temperatura base 0°C (Kirkegaard et al., 2018).

3.4.2. Número final de hojas

Se marcaron tres plantas de los controles (sin sombrear) y se contó el número de hojas expandidas dos veces por semana.

3.4.3. Radiación interceptada

Se registró la radiación incidente (I_0) y transmitida (I_t) al menos dos veces por semana durante el desarrollo del cultivo, utilizando un ceptómetro lineal de 1.0 m de longitud (DECAGON, In). El registro de estos datos se realizó en días despejados cuando el sol se encontraba en su cenit. Para registrar el porcentaje de radiación interceptada por el dosel se colocó el ceptómetro entre los dos surcos centrales de cada parcela midiéndose la radiación en tres diferentes posiciones (izquierda, centro y derecha) y siguiendo el nivel de hojas muertas. El promedio de dichas mediciones se tomó como el valor de la radiación transmitida por el dosel del cultivo (Slafer et al., 1990).

La radiación incidente se midió en cada parcela colocando el sensor por arriba del dosel posterior a las mediciones de I_t y la proporción de radiación

fotosintéticamente activa interceptada (%RFAI) por el cultivo se calculó como $[I_0 - I_t]/I_0$. El %RFAI determinado en diferentes momentos se regresó en contra del número de días desde emergencia y los datos fueron ajustados mediante una función sigmoidea, descrita por la siguiente ecuación:

$$\%RFAI = \frac{a + b}{1 - \exp(-(x - c)/d)}$$

Donde x es el número de días luego de la emergencia del cultivo (para el caso del %RFAI pre-antesis) o el número de días posterior a la antesis (para el caso del %RFAI en post-antesis), y a , b , c y d son constantes del modelo.

3.4.4. Producción de biomasa

Después de madurez fisiológica se realizó el muestreo de cosecha usando 1 m lineal (o 2 muestreos de 50 cm como mínimo). Las plantas cosechadas se separaron en ramas y vara principal. La biomasa estuvo representada por el peso seco de las plantas por unidad de superficie después de haber sido secada la muestra por 72 horas a 60°C.

3.4.5. Rendimiento de grano

El rendimiento de grano por unidad de superficie fue estimado después de trillar las silicuas de las plantas cosechadas en madurez fisiológica una vez que el grano fue secado por 72 h a 60 °C.

3.4.6. Índice de cosecha

Esta variable fue estimada como el cociente del peso de grano y la biomasa producida por unidad de superficie.

3.4.7. Numero de granos por unidad de superficie

Se contó el número de granos obtenidos en la muestra cosechada en madurez fisiológica y se expresó por m².

3.4.8. Peso individual de grano

Una vez secado el grano en la muestra obtenida en madurez, se contaron 4 muestras de 100 granos por parcela, los cuales fueron pesados en una balanza analítica, se obtuvo el promedio de peso de las 4 muestras y se dividió entre 100 para obtener el valor de esta variable.

3.4.9. Numero de silicuas por m².

En la muestra cosechada en madurez, se contó el número de silicuas y estas fueron expresadas por m².

3.4.10. Numero de granos por silicua

En una muestra aleatoria de 50 silicuas por parcela se contó el número de granos en cada una de ellas.

3.5. Análisis estadístico

Las variables de respuesta del experimento fueron sometidas a un análisis de varianza de acuerdo al modelo que contempla el diseño utilizado (Littell *et al.*, 1996). Cuando la prueba de F de los análisis de varianza resultó significativa, se procedió a realizar la prueba de medias utilizando la prueba de la diferencia mínima significativa honesta (DMSH) a un nivel de significancia del 5% (Palaniswamy y Palaniswamy, 2006). Las relaciones entre variables se

estudiaron mediante análisis de regresión y se ajustaron a modelos lineales, bi-lineales, ó sigmoidales (TBL curve, Jandel Scientific, AISN Software) según la variable.

IV. RESULTADOS

4.1. Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas durante el desarrollo del experimento se presentan en la Figura 3, en la cual se observa que la emergencia ocurrió a los 8 días posteriores a la siembra. Por otro lado, se puede apreciar que el inicio del periodo reproductivo en ambos genotipos coincidió con condiciones de temperatura y radiación favorables para el cultivo. Cabe señalar que la precipitación durante el periodo reproductivo fue muy escasa, pero esto no fue una limitante dado que el cultivo fue establecido bajo condiciones de riego. Hacia la madurez fisiológica se observó un ascenso en los niveles de precipitación registrados, lo cual no repercutió de ninguna manera sobre el desarrollo del experimento. En general los factores como precipitación y temperatura no influyeron en el rendimiento y en la identificación del periodo crítico del cultivo de canola (Figura 3).

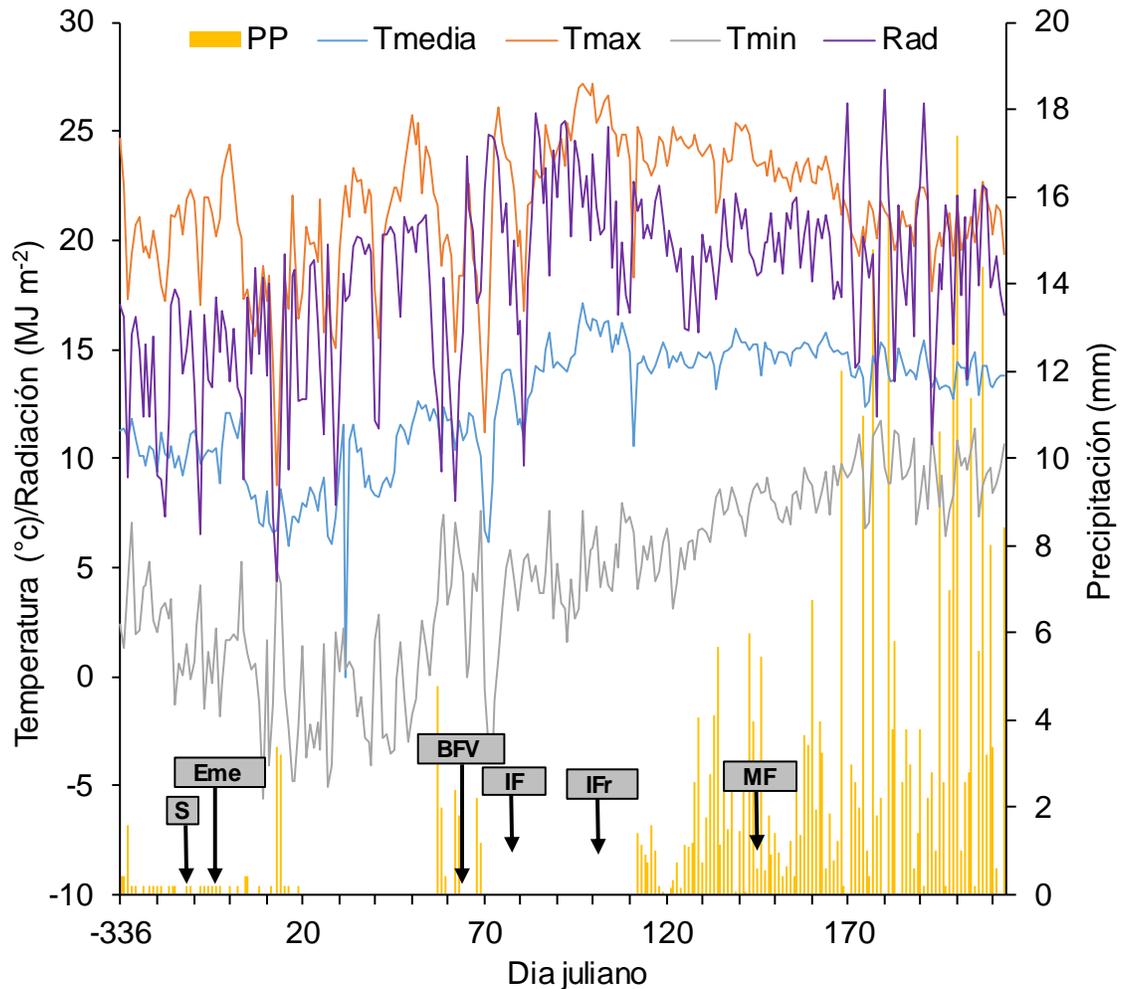


Figura 3. Condiciones agroclimáticas ocurridas durante la conducción del trabajo experimental.

4.2. Análisis de Varianza

Los resultados de los análisis de varianza para los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento de grano de canola en términos absolutos y relativos se muestran en el Cuadro 2. En este Cuadro se observa que para el caso de bloques no existieron diferencias significativas para ninguna de las variables estudiadas. Por otro lado, para el factor genotipo se observaron diferencias

significativas ($P < 0.05$), para las variables biomasa y número de granos por silicua, mientras que, para las variables rendimiento de grano, índice de cosecha, número de granos y número de silicuas por m^2 se observaron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$), en tanto que, para las variables peso de 1000 granos, y todas aquellas en términos relativos no se existieron efectos significativos estadísticamente. Para el caso de tratamientos de sombreo se observaron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) en todas las variables estudiadas. La interacción genotipo x periodo de sombreo resultó altamente significativa ($P < 0.01$), en la mayoría de las variables estudiadas a excepción del rendimiento relativo y peso de granos relativo, los cuales mostraron interacción significativa ($P < 0.05$). Finalmente, los coeficientes de variación oscilaron entre 4.6 y 11.4% que correspondieron al P1000g y al número de granos por silicua relativo, respectivamente (Cuadro 2).

Cuadro 2. Valores de F y su significancia estadística para Biomasa a madurez (Biom), rendimiento (Rend), índice de cosecha (IC), número de granos por m² (NG), peso de 1000 granos (P1000g), número de silicuas por m² (NS), número de granos por silicua (NGPS) , rendimiento relativo (Rend_{rel}), numero de granos relativo (NG_{rel}), numero de silicuas relativo (NS_{rel}) y número de granos por silicua relativo (NGPS_{rel}), para dos variedades sometidas a sombreado en diferentes momentos durante el ciclo, en Toluca, México.

Fuente de variación	g.l	Biom. (g m ⁻²)	Rend. (g m ⁻²)	IC	NG (m ⁻²)	P1000g (g)	NS (m ⁻²)	NGPS	Rend _{rel}	NG _{rel}	PG _{rel}	NS _{rel}	NGPS _{rel}
Bloque	2	3.4ns	0.6ns	2.9ns	0.0ns	0.1ns	2.1ns	0.0ns	0.2ns	0.8ns	0.3ns	0.2ns	1.0ns
Variedades (V)	1	24.3*	783.5**	212.9**	206.1**	4.7ns	454.2**	29.6*	0.1ns	1.6ns	0.0ns	0.3ns	0.2ns
Sombreado(s)	11	15.6**	14.5**	6.6**	13.5**	5.0**	9.0**	2.9**	10.6**	12.1**	4.4**	9.8**	2.9**
G x S	11	3.1**	3.1**	2.1**	2.7**	2.3**	5.1**	3.0**	2.1*	2.4**	2.3*	4.5**	3.0**
C.V (%)		10.9	8.0	10.8	8.7	4.6	10.1	11.0	9.3	9.6	4.7	10.3	11.4

*Significativo al 0.05; **Significativo al 0.01 y ^{ns}No significativo

Los análisis de varianza para las etapas fenológicas del cultivo de canola se muestran en el Cuadro 3, en el cual se puede apreciar que para bloques no existieron diferencias significativas para ninguna de las etapas fenológicas analizadas. Por otro lado, en el caso del factor variedades se observan diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) en la mayoría de las etapas fenológicas estudiadas a excepción de la etapa G3 la cual mostró diferencias significativas ($P < 0.05$). Por lo que respecta al factor periodos de sombreado no se observaron diferencias significativas en las etapas fenológicas, con excepción de inicio de la floración (F1) en la cual se observaron efectos altamente significativos ($P < 0.01$). La interacción periodo de sombreado x variedad no fue significativa para ninguna de las etapas fenológicas analizadas a excepción de la etapa de inicio de la floración (F1) donde se observaron efectos altamente significativos ($P < 0.01$). Los coeficientes de variación oscilaron entre 0.8% a 3.8% los cuales correspondieron a D1 y G3, respectivamente (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores de F y su significancia estadística para las etapas fenológicas del cultivo de canola D1 (Elongación inflorescencia visible), D2 (Elongación botón cubierto de inflorescencias secundarias visibles) , BFV (Elongación botón separado), F1 (Inicio de floración primeras flores abiertas, F2 (Floración alargamiento de rama floral numerosas flores abiertas), G1 (Floración caída de pétalos 10 primeras silicuas de 2cm de largo) , G3 (Maduración silicuas de más de 4cm), G4 (Maduración coloreado de granos) Y G5 (Maduración coloreado de granos). Para dos variedades sometidas a sombreado en diferentes momentos durante el ciclo, en Toluca, México.

Fuente de variación	g.l	D1	D2	BFV	F1	F2	G1	G3	G4	G5
Repeticiones	2	2.2ns	1.0ns	0.6ns	0.7ns	14.3ns	1.0ns	3.9ns	0.4ns	1.0ns
Variedades (V)	1	218.0**	104.0**	52.5**	354.3**	959.8**	153.4**	40.7*	226.9**	64.0**
Error a (CM)	2	1300.5	1762.9	3748.5	771.5	165.0	347.1	3413.2	710.9	2231.1
Sombreados (S)	11	1.0ns	0.7ns	0.6ns	3.7**	1.1ns	1.0ns	0.8ns	1.7ns	1.0ns
V X S	11	1.0ns	0.7ns	1.2ns	4.4**	1.4ns	1.0ns	1.0ns	1.5ns	1.0ns
Error b (CM)		38.4	219.7	490.6	411.0	400.4	253.9	1822.4	1051.9	405.6
C.V (%)		0.8	1.9	2.7	2.3	2.1	1.6	3.8	1.9	1.1

CM: Cuadrado medio; *Significativo al 0.05; **Significativo al 0.01 y ^{ns}No significativo

En el Cuadro 4, se muestra la comparación de medias para los testigos de ambos genotipos (sin sombreado) en el cual se observa que el rendimiento de grano de Hyola 61 fue estadísticamente superior en 30% al obtenido por Bioaureo 2486, lo cual fue el resultado de diferencias en la misma magnitud (31%) en el número de granos por m², ya que no se observaron cambios significativos en el peso individual de grano. La superioridad en el número de granos por unidad de superficie observado en Hyola 61 estuvo en concordancia con un 24% más en el número de silicuas por metro cuadrado comparado con Bioaureo 2486, Por último, el número de granos por silicua en Hyola 61 fue 17% superior a aquel obtenido por el cultivar Bioaureo 2486 (Cuadro 4). Contrariamente Bioaureo 2486 superó en un 11% en producción de biomasa a Hyola 61.

Cuadro 4. Valores medios para las variables biomasa a madurez (Biom), rendimiento de grano (Rend), índice de cosecha (IC), número de granos por m² (NG), peso de 1000 granos (P1000g), número de silicuas por m² (NSm²) y número de granos por silicua (NGPS) para los testigos de dos genotipos de canola, en Toluca, México.

	Biom. (g m ²)	Rend. (g m ²)	IC	NG	P1000g (g)	NS (x m ²)	NGPS
Hyola 61	1630.2 b	491.9 a	30.2 a	143371 a	3.4 a	10257 a	13.9 a
Bioaureo 2486	1830.0 a	343.8 b	18.7 b	98761 b	3.4 a	8295 b	11.9 b

La correlación entre el rendimiento y sus componentes para los dos genotipos de canola se muestra en el Cuadro 5, en el cual se observa que el rendimiento

presentó una correlación positiva y significativa ($P < 0.05$) con la biomasa a madurez en ambos genotipos y con el peso de 1000 granos y número de granos por silicua en el cultivar Bioaureo 2486. Mientras que el Hyola 61 esta asociación fue observada de manera significativa para todas las variables a excepción de peso de 100 granos y número de granos por silicua. Por otro lado, la biomasa a madurez se correlacionó negativa y significativamente con el IC en ambos genotipos, esta misma asociación fue observada para el número de granos por silicua en el Hyola 61 únicamente. Contrariamente fue observada una correlación positiva y significativa ($P < 0.05$) entre la biomasa a madurez con el número de granos y número de silicuas por unidad de superficie (Cuadro 5). El índice de cosecha se correlacionó positiva y significativamente con el número de granos por unidad de superficie y el número de granos por silicua, pero únicamente en el cultivar Hyola 61. De la misma manera, fue observada una asociación positiva y significativa entre el número de granos por unidad de superficie con el número de silicuas por m^2 y el número de granos por silicua para el cultivar Bioaureo, mientras en este mismo cultivar el NG se correlacionó negativamente con el peso de 1000 granos. Por otro lado, en el cultivar Hyola 61 solo se observó una asociación positiva del número de granos con el número de silicuas por m^2 . El peso de 1000 granos se correlacionó en forma negativa y significativa con el número de silicuas por unidad de superficie y finalmente esta variable estuvo asociada positiva y significativamente con el número de granos por silicua (Cuadro 5).

Cuadro 5. Correlación de rendimiento y sus componentes para dos genotipos de canola sometidos a tratamientos de sombreo en Toluca, México.

	Biom (g m ²)	I.C.	NG (x m ²)	P1000G (g)	NS (x m ²)	NGPS
Bioaureo 2486						
Rend	0.519**	0.127ns	0.921ns	-0.094*	0.250ns	0.699**
Biom		-0.739**	0.433**	0.074ns	0.343*	0.159ns
IC			0.152ns	-0.131ns	-0.118ns	0.252ns
NG				-0.464**	0.356*	0.691**
P1000G					-0.331*	-0.199ns
NSm ²						-0.420**
Hyola 61						
Rend	0.617**	0.363*	0.934**	0.119ns	0.735**	-0.008ns
Biom		-0.494**	0.548**	0.119ns	0.763**	-0.440**
IC			0.379*	-0.020ns	-0.040ns	0.441**
NG				-0.234ns	0.730**0	0.084ns
P1000G					-0.038ns	-0.250ns
NSm ²						-0.603**

*Significativo al 0.05; **Significativo al 0.01 y ns No significativo

4.3. Efecto del sombreado sobre los componentes fisiológicos del rendimiento

La relación del rendimiento de grano con sus componentes fisiológicos para los tratamientos de sombreado impuestos antes del inicio de la floración se aprecia en la Figura 4, en la cual se observa que para ambos genotipos el rendimiento fue explicado en mayor medida por el índice de cosecha ($r^2 = 0.77$ $P < 0.01$) que por la biomasa producida a madurez fisiológica ($r^2 = 0.32$ $P < 0.05$). Cabe señalar, que para los mismos niveles de biomasa producidos los rendimientos de Hyola 61 fueron superiores a aquellos obtenidos por Bioaureo 2486, debido principalmente a valores de índices de cosecha más altos. Por otro lado, se aprecia que el rendimiento de grano de Bioaureo 2486 se vio afectado por el sombreado prefloración y más marcadamente en aquellos sombreados impuestos inmediatamente antes de esta etapa.

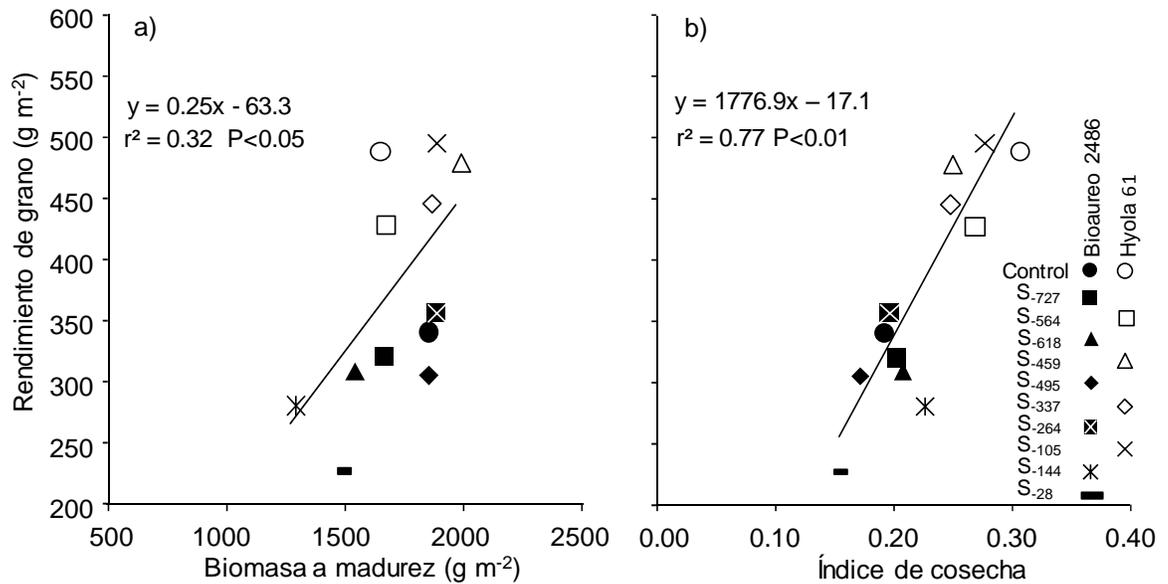


Figura 4. Relaciones entre el rendimiento de grano con la biomasa a madurez (a) y el índice de cosecha (b) para los tratamientos de sombreo aplicados antes del inicio de la floración en dos genotipos de canola, en Toluca, México.

De la misma manera que para los tratamientos prefloración, en la Figura 5, se presentan las relaciones entre el rendimiento de grano con sus dos componentes fisiológicos para los tratamientos de sombreo que fueron impuestos después del inicio de la floración. En esta Figura se puede apreciar que el rendimiento de grano de cada genotipo evaluado fue explicado en mayor medida por la producción de biomasa y no por el índice de cosecha, ya que en éste ambos genotipos se agruparon en una sola relación. Cabe señalar, que como fue observado en los tratamientos prefloración, para mismos niveles de biomasa producida en los tratamientos de sombreo postfloración los rendimientos de ambos cultivares fueron diferentes, asociado de igual manera a diferencia en el índice de cosecha.

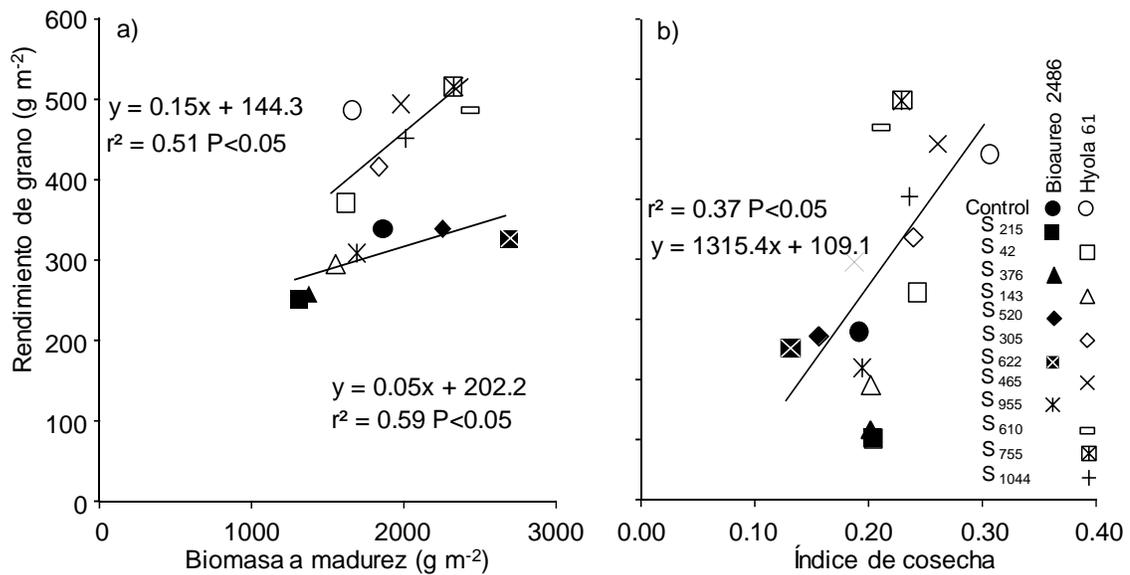


Figura 5. Relaciones entre el rendimiento de grano con la biomasa a madurez (a) y con el índice de cosecha (b) para los tratamientos de sombreo impuestos en postfloración, en Toluca, México.

Al analizar los cambios en el rendimiento de grano por efecto de los tratamientos de sombreo aplicados en prefloración en términos de sus componentes numéricos se pudo apreciar que los cambios el número de granos por efecto del sombreo explicaron el 97% de la variabilidad observada en el rendimiento de grano (Figura 6a), en donde la variedad Hyola 61 obtuvo los rendimientos más altos con respecto de Bioaureo 2486. Así mismo, se pudo observar que en ambos genotipos los tratamientos de sombreo impuestos inmediatamente antes del inicio de la floración disminuyeron de manera significativa el rendimiento de grano. La relación entre el peso de grano y el número de granos no resultó significativa, sin embargo, se puede apreciar que existieron efectos compensatorios en el peso de grano al disminuirse el número de granos por efecto de los tratamientos de sombreo, siendo este efecto más marcado en

Bioaureo 2486 (Figura 6b). Por otro lado, al analizar los cambios en los componentes numéricos del rendimiento de grano (número de granos y peso de grano) por efecto de los tratamientos de sombreo impuestos en postfloración, se pudo observar que el número de granos se vio afectado de manera significativa por aquellos tratamientos impuestos inmediatamente después del inicio de la floración (S₂₁₅ y S₃₇₆) en el cultivar Bioaureo 2486, mientras que para el genotipo Hyola 61 los tratamientos de sombreo que provocaron reducciones significativas en el número de granos fueron S₄₂, S₁₄₃ y S₃₀₅, no observándose diferencias significativas respecto a los testigos (C) en el resto de los tratamientos de sombreo en ambos cultivares (Figura 7a). Contrariamente, a lo observado en el número de granos, el peso de grano pareció no afectarse de manera significativa al menos en el genotipo Hyola 61, sin embargo, en Bioaureo 2486 se observó un incremento significativo en el peso de grano en los tratamientos de sombreo S₃₇₆, S₅₂₀ y S₆₂₀ (Figura 7b).

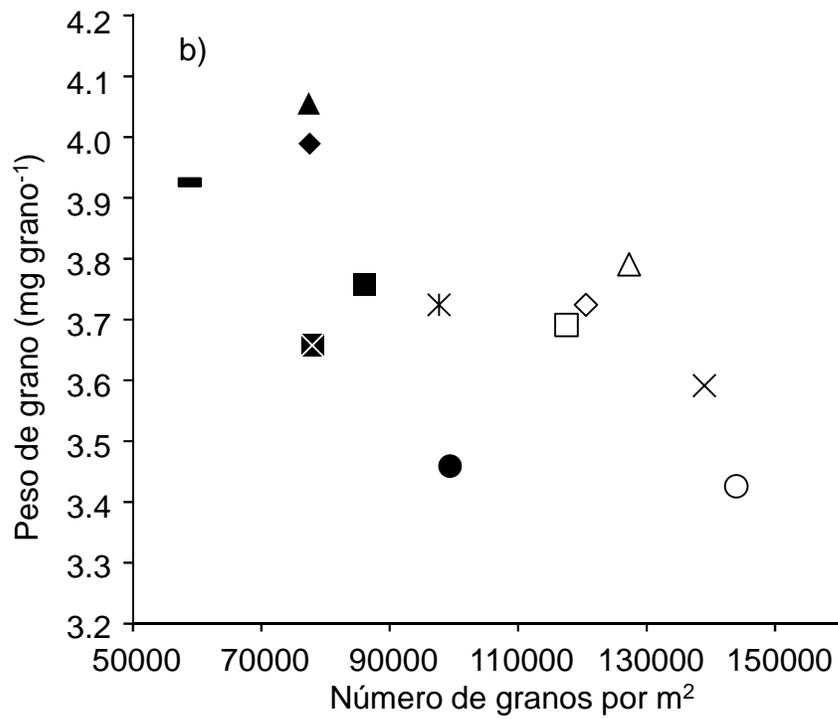
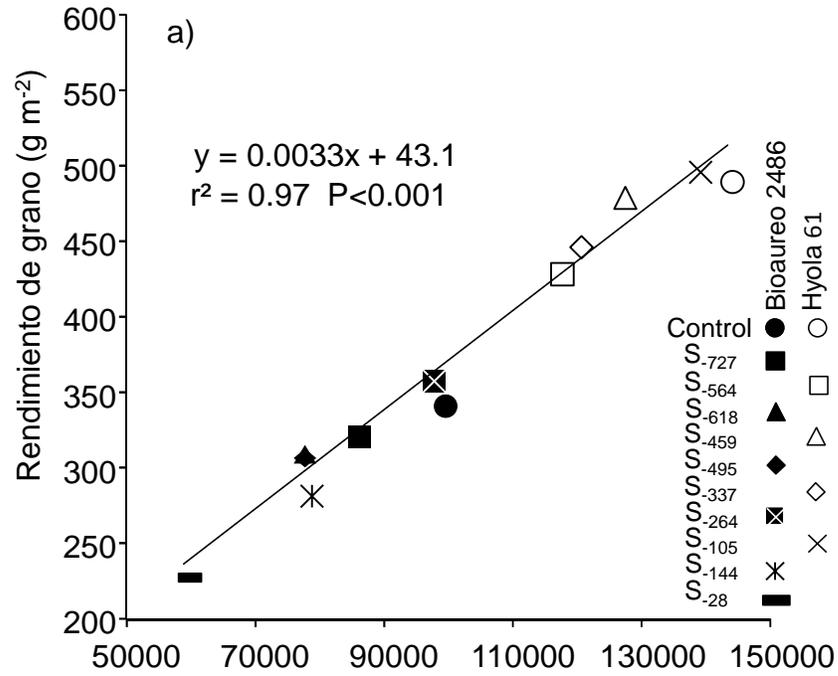


Figura 6. Relación entre el rendimiento de grano con el número de granos (a) y peso de grano con el número de granos (b) para los tratamientos de sombreo

impuestos antes del inicio de la floración (prefloración) en dos cultivares de canola en Toluca México.

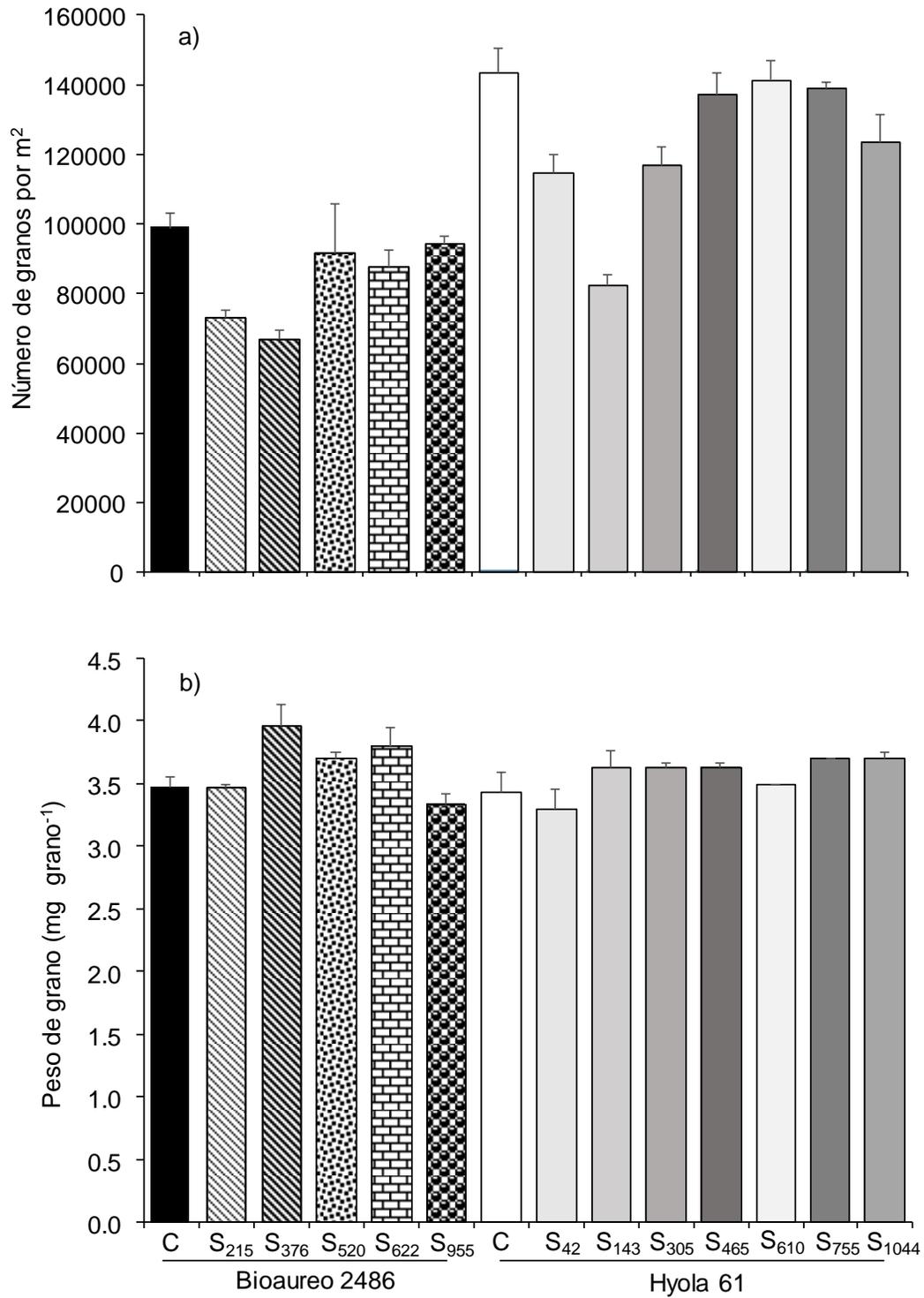


Figura 7. Relaciones entre el número de granos por m² (a) y el peso individual de grano (b) con respecto a los tratamientos de sombreo impuestos en postfloración en dos genotipos de canola, en Toluca México.

4.4. Rendimiento de grano y sus componentes en términos relativos

En la Figura 8, se muestra la relación entre el rendimiento de grano y el punto medio del tratamiento de sombreado desde floración, en la cual se observa que las reducciones en el rendimiento fueron diferentes en función del genotipo utilizado. En Bioaureo 2486 el periodo crítico se presentó desde -140°Cd (10 días antes del inicio de floración) y hasta 410°Cd (25 días después del inicio de la floración) con una duración total de 550°Cd (35 días). En este periodo el rendimiento disminuyó significativamente hasta 33%, respecto del tratamiento sin sombreado. Contrariamente, para el genotipo Hyola 61 el periodo crítico se presentó desde -45°Cd (3 días antes del inicio de la floración) y hasta 250°Cd (19 días después del inicio de la floración) con una duración total de 295°Cd (22 días). Durante este periodo de tiempo, el rendimiento se redujo hasta en un 40% respecto del control. Cabe señalar, que posteriormente al descenso del rendimiento, en ambos genotipos hubo una recuperación de este, en donde el genotipo Hyola 61 alcanzó 100%, mientras que para el caso de genotipo Bioaureo 2486 en el repunte alcanzó un 97%, respecto del control (Figura 8). Al analizar los cambios relativos en el número de granos por m^2 en función del punto medio del tratamiento de sombreado desde floración se pudo apreciar una tendencia similar a la observada en los cambios relativos del rendimiento de grano, donde en Bioaureo 2486 disminuyó el número de granos de manera significativa desde -160°Cd (13 días antes del inicio de la floración) y hasta 480°Cd (30 días después del inicio de la floración) con una duración de 640°Cd (43 días). Durante este lapso el número de granos por silicua relativo descendió hasta 43%, respecto al

control, mientras que para el genotipo Hyola 61 el número de granos por silicua relativo disminuyó 10⁰Cd (3 días antes del inicio de la floración) y hasta 310⁰Cd (23 días después del inicio de la floración) con una duración de 320⁰Cd (26 días). Durante este periodo el número de granos relativo disminuyó hasta 43%, respecto al tratamiento sin sombreado (Figura 9).

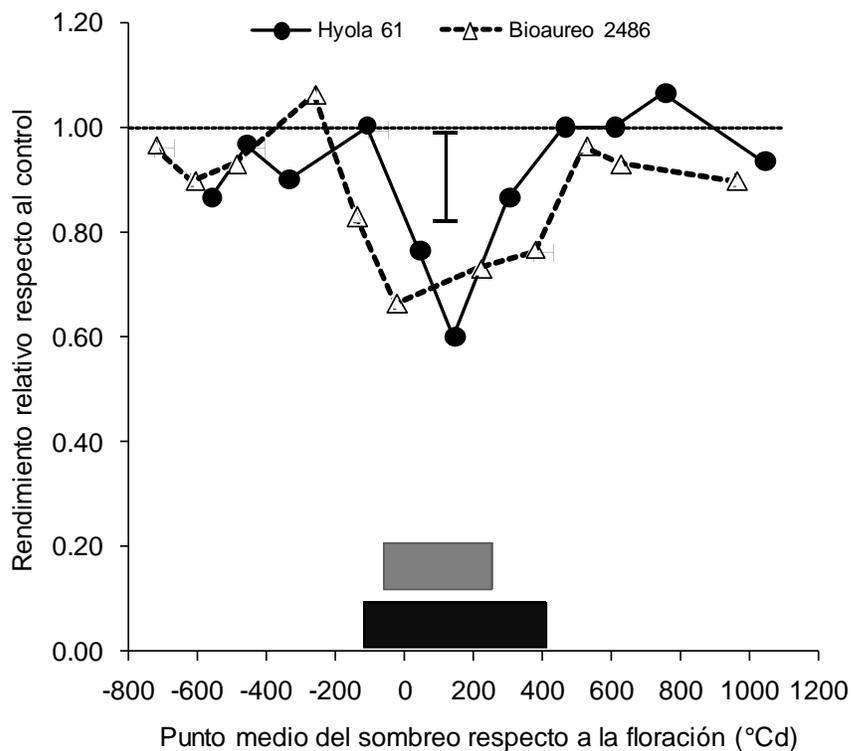


Figura 8. Relación entre el rendimiento relativo y el punto medio del tratamiento de sombreado desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México.

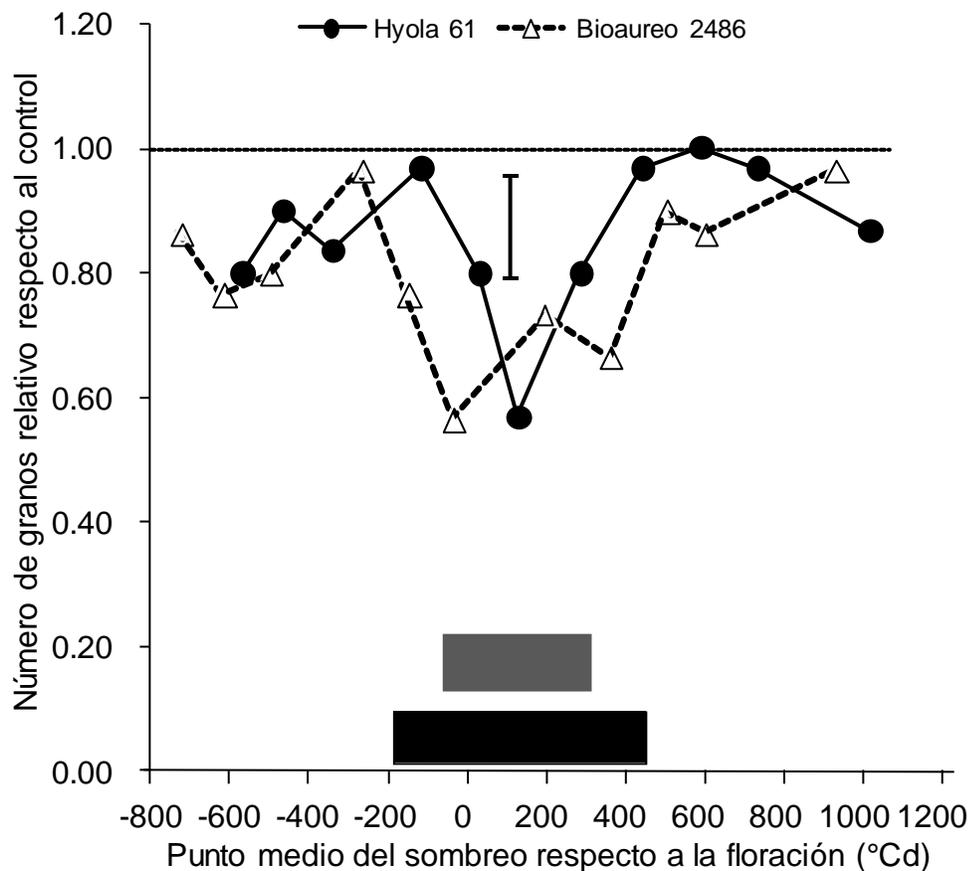


Figura 9. Relación entre el número de granos por m² relativo y el punto medio del tratamiento de sombreado desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México.

En la Figura 10, se muestra la relación entre el peso relativo de grano y el punto medio del tratamiento de sombreado desde floración, en esta Figura se observa que el comportamiento del peso de grano para los dos genotipos se mantuvo similar al control hasta la etapa de floración, en la cual el genotipo Bioaureo 2486 tuvo una compensación hasta del 13% respecto al control principalmente en el tratamiento de sombreado que estuvo más cercano al inicio de la floración. Por otro

lado, en el genotipo Hyola 61 no se observaron cambios significativos en el peso de grano por efecto de los tratamientos de sombreo.

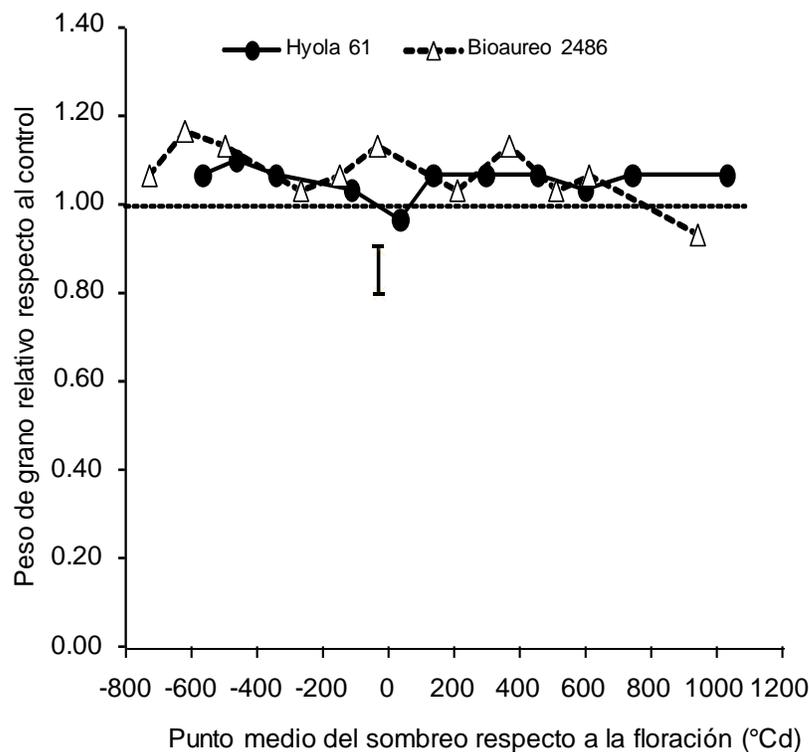


Figura 10. Relación entre el peso relativo de 1000 granos y el punto medio del tratamiento de sombreo desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México.

En la figura 11, se puede apreciar la relación entre el número de silicuas por m² relativo y el punto medio del tratamiento de sombreo desde floración, en donde se observa que en el genotipo Bioaureo 2486 esta variable fue relativamente poco afectada por los tratamientos de sombreo impuestos durante el ciclo de cultivo. A diferencia de lo observado en Bioaureo 2486 en el genotipo Hyola 61, el número de silicuas por m² se redujo hasta un 40% respecto del control y

principalmente entre el periodo comprendido entre 42 °Cd (3 días después del inicio de floración) y hasta 350 °Cd (22 días después del inicio de floración) con una duración de 308 °Cd (19 días), posterior a esto hubo una compensación hasta de 27% respecto del control.

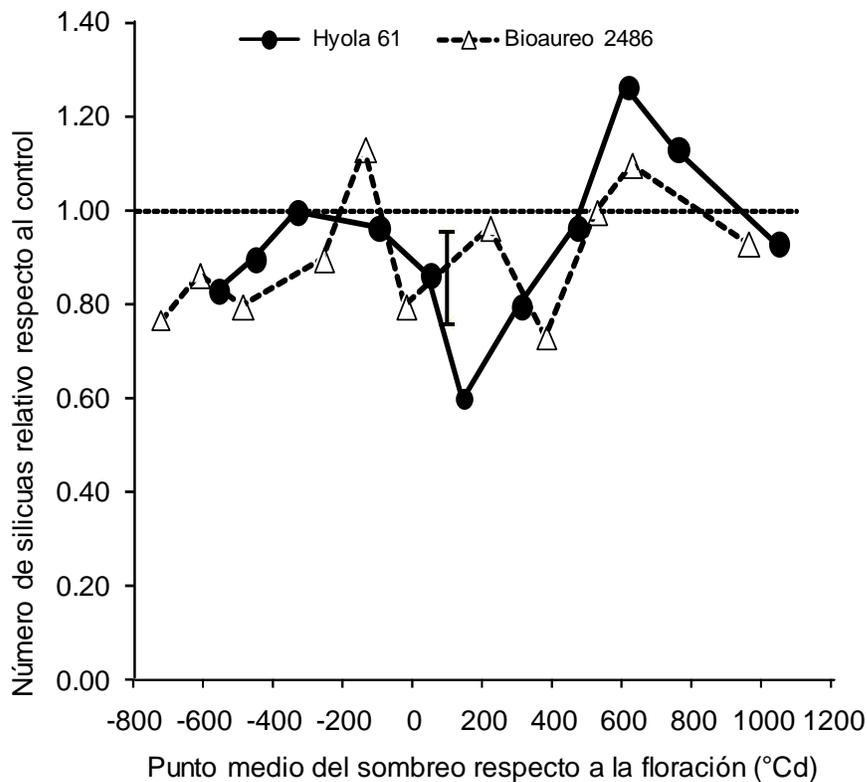


Figura 11. Relación entre el número de silicuas relativo por m² y el punto medio del tratamiento de sombreado desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México.

Al analizar los cambios relativos en el número de granos por silicua respecto al punto medio del tratamiento de sombreado desde floración, se pudo apreciar que el genotipo Bioaureo 2486 redujo en un 27% el número de granos por principalmente en los tratamientos de sombreado que fueron impuestos alrededor del inicio de la floración que contempló un periodo de 620 °Cd. En contraste en

el genotipo Hyola 61 los cambios observados en esta variable no resultaron significativos respecto del control, solamente se observó una disminución del 20% en el número de granos por silicua relativo a los 610°Cd (41 días después del inicio de floración) (Figura 12).

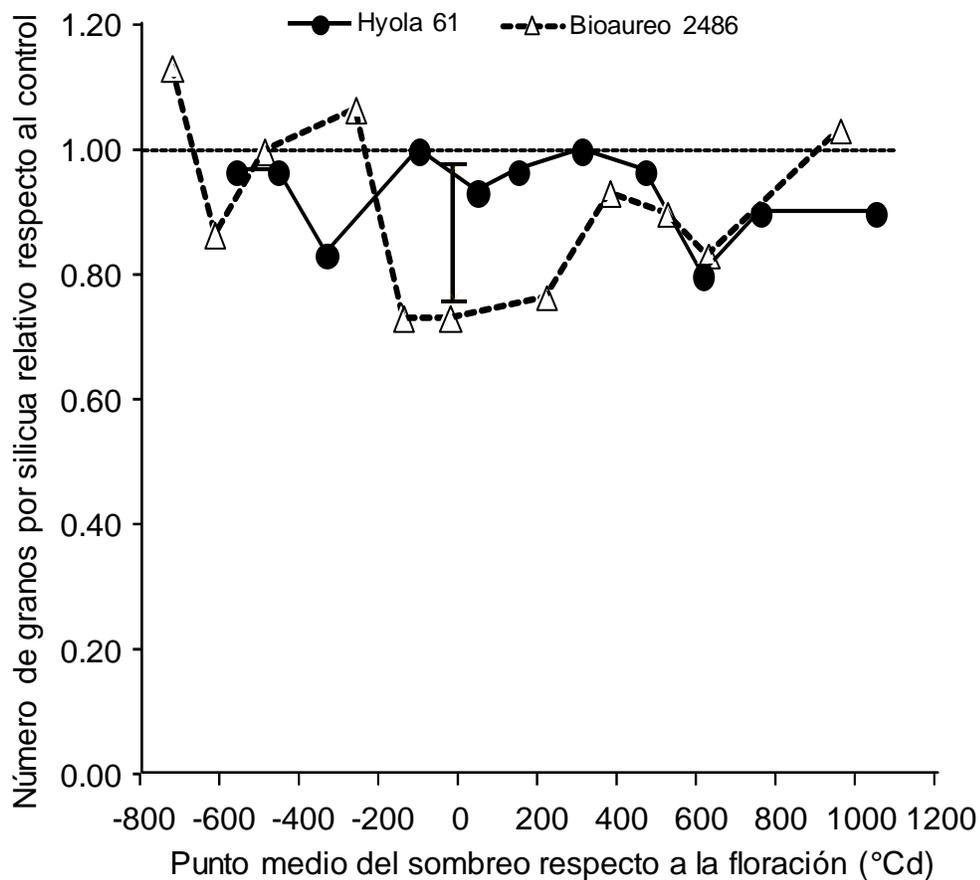


Figura 12. Relación entre el número de granos por silicua relativo y el punto medio del tratamiento de sombreado desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México.

V. DISCUSIÓN

En los análisis de varianza se observa el rendimiento generado, por los controles (sin sombreado) fue de 4.9 y 3.4 t/ha. Estos rendimientos muestran que el trabajo se ubicó en condiciones agroecológicas adecuadas para el cultivo comercial de canola. La interacción genotipo x tratamiento de sombreado resultó altamente significativa ($P < 0.01$), en la mayoría de las variables estudiadas para los dos genotipos, de diferente ciclo debido a esto la magnitud del periodo crítico fue diferente para cada uno. Se sabe que en la mayoría de los cultivos anuales a partir de la floración se produce una rápida reducción del índice de área foliar (IAF), el cual en el caso de la canola a pesar de ser compensado en parte por el área verde de las silicuas, crea un déficit de asimilados para la definición del rendimiento Schwab (2010). Con base en esto se podría asegurar que los tratamientos de sombreado previos a esta etapa y consecuentes a la misma fueron la causa de potencializar dicho déficit.

El periodo crítico fue identificado para: Bioaureo 2486 a partir de 140 °Cd (10 días antes del inicio de floración) y hasta 410 °Cd (25 días después del inicio de la floración) con una duración total de 550 °Cd (35 días) con una disminución significativa en el rendimiento de hasta 33%. Mientras que en Hyola 61 el periodo crítico se presentó desde -45 °Cd (3 días antes del inicio de la floración) y hasta 250 °Cd (19 días después del inicio de la floración) con una duración total de 295 °Cd (22 días) con una disminución significativa en el rendimiento de hasta 40%. Estos resultados concuerdan con los obtenidos por Kirkegaard *et al.* (2018)

quienes identificaron el periodo crítico con un solo genotipo de canola en dos sitios diferentes, utilizando sombreos a partir de 30 y 48 días después de la siembra y hasta la madurez fisiológica, encontrando reducciones significativas en el rendimiento a partir de 100 °Cd después de BBCH60 (este periodo comprende desde el 50% de plantas con una flor abierta en el tallo principal hasta que cesa la floración) y continuo hasta 500 °Cd después de BBCH60, este periodo fue el de mayor impacto en ambos sitios 40 a 50% de reducción en rendimiento. El presente trabajo también coincide en aspectos relacionados con la disminución en el rendimiento en la etapa de floración debido a otros factores como lo mencionado por Champolivier y Merrien (1996) quienes encontraron que el momento más sensible en canola a la sequía es la fase de floración y la etapa de crecimiento del grano conocida como G4 (período correspondiente a la transición entre la floración y el desarrollo de la silicua cuando se alcanza la longitud final de ésta) + 10 días.

Mc Gregor (1981) y Morrison (1993) coincidieron al indicar que las temperaturas por arriba de los 27 °C durante la floración, ocasionan reducciones en la fertilidad de las flores por esterilidad de los ovarios, infertilidad del polen y aborto de silicuas. En este sentido, las temperaturas máximas ocurridas durante la conducción del presente trabajo no alcanzaron los 27°C por lo que, es probable que la disminución en el número de granos se debiera a la reducción en la intercepción de radiación durante la etapa de floración principalmente.

La búsqueda del periodo crítico para el cultivo de canola se relaciona con estudios realizados en otras especies y coincide en algunos aspectos referentes al sombreo de cultivos que ha hecho posible la identificación de las etapas de

desarrollo en las que la disminución de radiación es más crítica para rendimiento de grano. Por ejemplo, Fischer (1975) observó que el sombreado en primavera para el trigo durante los 30 días anteriores a la antesis ocasiona un descenso apreciable en el rendimiento al reducir el número de granos. Por otro lado, Egli y Bruening (2005) al usar dos tratamientos continuos de sombreado (60% y 90% a partir de floración hasta la madurez) en el cultivo de soya encontraron una reducción significativa el número de vainas, el sombreado continuo redujo la producción de vainas en los dos experimentos (un promedio de 24% para el 60% de sombra y 71% para el 90% de sombra).

En cuanto a los componentes del número de granos, los dos genotipos se comportaron de manera distinta, para el caso del genotipo Hyola 61 el número de granos por silicua se redujo hasta un 20% respecto al testigo sin sombrear, mientras que en Bioaureo 2486 esta reducción fue del 27% en este mismo componente. Por otra parte, en el genotipo Hyola 61 el número de silicuas por m² se redujo hasta un (40%) respecto al testigo, mientras en el genotipo Bioaureo 2486 este componente fue relativamente poco afectado. Estos resultados concuerdan con Kirkegaard et al. (2018), quienes observaron reducciones entre 50 y 55% en el número de granos en dos ambientes estudiados. En el primer sitio esta reducción en el número de granos fue debida casi proporcionalmente por el número de silicuas y el número de granos por silicua, mientras que en segundo sitio la disminución se debió principalmente al número de grano por silicua, que indica en el presente trabajo que por ejemplo cultivares como Hyola 61 que son de ciclo corto y poco ramificadas basan su número de granos en el número de

silicuas, mientras que genotipos intermedios como Bioaureo 2486 dependen en mayor medida del número de granos por silicua.

Las reducciones en el rendimiento de grano de canola fueron explicadas principalmente por reducciones en el número de granos por unidad de área (43% para los dos genotipos) con evidencia de una compensación en el peso de grano siendo más notable para el genotipo Bioaureo 2486 (13%). En cierta medida esta compensación coincide con el resultado obtenido por Champolivier y Merrien (1996), quienes afirmaron que debido a que el estrés hídrico afectó la floración, el número de granos por planta se redujo (31%), así como el contenido de aceite, contrariamente a esto se presentó un efecto de compensación sobre el peso 1000 granos, acompañado de un aumento significativo en la concentración final de glucosinolato de las semillas (60%). En el presente estudio, el estrés hídrico no fue una limitante para el cultivo dado que siempre estuvo acompañado de riego sin embargo, en este trabajo aún se queda la incógnita de afirmar que los tratamientos de sombreo incrementen al mismo nivel la concentración de glucosinolato y como se correlaciona con el contenido de aceite y proteína dado que no se realizaron mediciones dirigidas a ese aspecto.

Los dos genotipos utilizados mostraron diferente estrategia en la generación del número de silicuas por m² uno de ellos Hyola 61 de porte bajo y con menor producción de biomasa y cuya producción de silicuas por m² se vio mayormente afectada en un (40%) en comparación con Bioaureo 2486 de porte alto pero con mayor producción de biomasa cuya producción de silicuas no se vio afectada por los tratamientos de sombreo prácticamente en todo su ciclo pero si en la producción del número de granos por silicua.

La superioridad en producción de biomasa y número de silicuas por parte del genotipo Bioaureo 2486 en comparación con Hyola 61, puede estar relacionado a un mayor número de ramas. Lo cual podría ser de gran valor para la búsqueda de posibles características para ser utilizadas como criterio de selección dentro de programas de mejoramiento, con el objetivo de incrementar el rendimiento. En este sentido, Schwab (2010), menciona que un incremento en la tasa de crecimiento del cultivo y/o una mayor duración de la etapa de floración, genera un aumento en la acumulación de biomasa, lo cual resultaría en un mayor número de flores y de silicuas por planta, generando un mayor número de granos y por consecuencia un mayor rendimiento. Lo anterior, es particularmente importante tomando en cuenta que los progresos en rendimiento en el futuro pueden estar asociados con incrementos en la biomasa aérea (Shearman et al., 2005; Miralles y Slafer, 2007).

VI. CONCLUSIONES

En esta investigación se utilizaron tratamientos de sombreo para la determinar el periodo de tiempo durante el ciclo del cultivo de canola en el cual un estrés por disponibilidad de asimilados limita el rendimiento de grano en este cultivo, así como también, que componentes del rendimiento son más afectados por efecto de reducciones en los niveles de radiación incidente. De acuerdo a lo anterior y a las condiciones prevalecientes durante el ciclo del cultivo se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- En términos de componentes fisiológicos, el rendimiento de grano fue explicado principalmente por cambios en el índice de cosecha y en menor medida por la producción de biomasa.
- El periodo crítico para la generación del rendimiento en canola fue diferente en cada uno de los dos cultivares utilizados.
- En Bioaureo 2486 el periodo crítico se presentó desde -140 °Cd (10 días antes de antesis) y hasta 410 °Cd (25 días después del inicio de antesis) con una duración total de 550 °Cd (35 días). En este periodo el rendimiento disminuyó significativamente hasta 33%, respecto del tratamiento sin sombrear.
- Para el genotipo Hyola 61 el periodo crítico se presentó desde 45 °Cd (3 días antes de antesis) y hasta 250 °Cd (19 días después del inicio de antesis) con una duración total de 295 °Cd (22 días).

- Los cambios en el rendimiento de grano por efecto del sombreado fueron explicados por el número de granos más que por el peso individual de grano.
- Los dos genotipos utilizados difirieron en su estrategia para generar el número de granos. Hyola 61 dependió más del número de silicuas, mientras que Bioaureo lo hizo a través del número de granos por silicua.
- La presente investigación aporta información muy valiosa para el manejo del cultivo de canola, así como también, para una mejor orientación de los programas de mejoramiento genético tendientes a incrementar el rendimiento potencial de grano

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Agosti, M.B., Gómez, N.B., Vilariño, P., Rodanini, D.P. & Miralles, D.J. (2011). Fenología y generación del rendimiento y la calidad de canola. Marzo 18, 2017, de Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires Sitio web: www.agro.uba.ar/noticias/files/u1/19_Agosti.doc
- Akbar, H., Mohammad, I., Ahmad, M.F., Arif, M. & Zakirullah, M. (2006). Dry weight of spike at anthesis determines grain weight of spike at maturity. *Journal of Agricultural and Biological Science*, 1, 55-61.
- Arisnabarreta, S. & Miralles, D.J. (2008). Critical period for grain number establishment of near isogenic lines of two- and six-rowed barley. *Field Crops Research*, 107, 196-202.
- Arnoud F. (1989). Colza: sélection, variétés. Cahier technique. CETIOM. París. Francia. 28p.
- Bertero, H.D. & Ruiz, R.A. (2007). Determination of seed number in sea level quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) cultivars. *European Journal Agronomy*, 28, 186-194.
- Board, J.E. & Tan, Q. (1995). Assimilatory capacity effects on soybean yield components and pod number. *Crop Science*, 35, 846-851.
- Cantagallo, J.E., Chimenti, C.A. & Hall, A.J. (1997). Number of Seeds per Unit Area in Sunflower Correlates Well with a Photothermal Quotient. *Crop science*, 37, 1780-1786.

- Champolivier, L. & Merrien, A. (1996). Effects of water stress applied at different growth stages to *Brassica napus* L. var. *oleifera* on yield, yield components and seed quality. *European journal of agronomy*, 5, 153-160.
- Díaz, A. & Ortegón, A.S. (2006). Efecto de inoculación con *Azospirillum brasilense* y fertilización química en el crecimiento y rendimiento de canola *Brassica napus*. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 29, 63–67.
- Egli, D. B. & Bruening, W. P. (2005). Shade and temporal distribution of pod production and pod set in soybean. *Crop Science*, 45, 1764-1769.
- Estrada, C.G., Miralles, D.J. & Slafer, G.A. (2008). Yield determination in triticale as affected by radiation in different development phases. *European Journal of Agronomy*, 28, 597-605.
- FAOSTAT (2014). Importancia mundial del cultivo de canola. Marzo 14, 2017, de FAO Sitio web: <http://www.fao.org/faostat/es/#data/QC>
- Fischer, K.S. & Palmer, A.F.E., (1984). Tropical maize. Goldsworthy, P.R. & Fischer, N.M., *The physiology of tropical field crops*. John Wiley y Sons Ltd. Chichester. pp. 213-248.
- Fischer, R.A. (1975). Yield potential in a dwarf spring wheat and the effect of shading. *Crop Science*, 15, 607-613.
- Fischer, R.A. (1985). Number of kernels in wheat crops and the influence of solar radiation and temperature. *Journal of Agricultural Science Cambridge*, 105, 447-461.
- García, M. K. P., González, A. A. & Castillo, T. N. (2013). Tecnología para producir canola de temporal en las sierras de Tapalpa y el Tigre en

Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco, México: Talleres Gráficos de Prometeo Editores, S.A. de C.V.

Gifford, D. (2017). The inconvenient truth about canola oil. Diciembre 12, 2018, de Small footprint family Sitio web: <https://www.smallfootprintfamily.com/the-inconvenient-truth-about-canola-oil>

Gómez, N.V., Miralles, D.J., Mantese, A.I., Menéndez, Y.C. & Rondanini D.P. (2018). Colza un cultivo con historia en la FAUBA. Revista de la Facultad de Agronomía UBA, 38, 23 -36.

González, A., Sahagún, J., Vázquez, L. M., Rodríguez, J. E., Pérez, D.J., Domínguez, A., Franco, O. & Balbuena, A. (2009). Identificación de variedades de maíz sobresalientes considerando el modelo AMMI y los índices de Eskridge. Agricultura técnica en México, 35, 189-200.

González, J. & Ortegón, A.S. (2006). Oleaginosas. In: Rodríguez del Bosque, L. (ed.). Campo Experimental Río Bravo: 50 Años de Investigación en el Norte de Tamaulipas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Centro de Investigación Regional Noreste, Campo Experimental Río Bravo, Río Bravo. Tamaulipas, México. pp. 109–132. (Libro Técnico Núm. 1)

Jiang, H. & Egli, D.B. (1993). Shade induced changes in flower and pod number and flower and fruit abscission in soybean. Agronomy Journal, 85, 221-225.

- Kiniry, J.R. & Ritchie, J.T. (1985). Shade-sensitive interval of kernel number of maize. *Agronomy Journal*, 77, 711-715.
- Kirkegaard, A. J., Lilley, M. J., Brill, D. R., Ware, H. A. & Walela, K. C. (2018). The critical period for yield and quality determination in canola (*Brassica napus* L.). *Field crops research*, 222, 180-188.
- Littell, R.C., Milliken, G.A., Stroup, W.W. & Wolfinger, R.D. (1996). *SAS® System for mixed models*. Cary, NC: SAS Institute Inc. pp. 633.
- Mahadevan, M., Calderini, D.F., Zwer, P.K. & Sadras, V.O. (2016). The critical period for yield determination in oat (*Avena sativa* L.). *Field Crops Research*, 199, 109-116.
- Mc Gregor, D. I. (1981). Pattern of flower and pod development in rapeseed. *Can. J. Plant Sci.*, 61, 275-282.
- Miralles, D.J. & Slafer, G.A. (2007). Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced?. *Journal of Agricultural Science Cambridge*. 145, 1-11.
- Morrison, M. J. (1993). Heat stress during reproduction in summer rape. *Can. J. Bot.* 71, 303-308.
- Ochoa, M.G. (2014). Colza o canola, un cultivo prometedor. Marzo 20, 2017, de Inforural Sitio web: <http://www.inforural.com.mx/colza-o-canola-un-cultivo-prometedor/>
- Ortegón, M. A. S., Díaz F. A., González, Q. J., & Garza, C. I. (2006). La temperatura en la etapa reproductiva del cultivo de canola (*Brassica napus* L.). *Agricultura técnica en México*, 32, 259-265.
- Otegui, M.E. & Andrade, F.A. (2000). New relationships between light interception, ear growth, and kernel set in maize. *Agronomy*,

C.S.S.o.A.a.A.S.o., Physiology and modeling Kernel Set in Maize. CSSA. Madison, pp.89-102.

Palaniswamy, U.R. & Palaniswamy, K.M. (2006). Handbook of statistics for teaching and research in plant and crop science. The Harworth Press, Inc., New York. 624 p.

Reta, D.G., Figueroa, U., Faz, R., Nuñez, G., Gaytan, A., Serrato, J.S. & Payán, J.A. (2010). Sistemas de producción de forraje para incrementar la productividad del agua. Revista Fitotecnia Mexicana, 33, 83-87.

Reta, D.G., Serrato, J.S., Figueroa, R., Cueto, J.A., Berumen, S. & Santamaria, J. (2008). Cultivos alternativos con potencial de uso forrajero en la Comarca Lagunera. Libro Técnico Núm. 3. INIFAP-CIRNOC-CELALA. Torreón, Coah. 268 p.

Savin, R. & Slafer, G.A. (1991). Shading effects on the yield of an Argentinean wheat cultivar. Journal of Agricultural Science, 116, 1-7.

Schwab, M. I. (2010). Comportamiento agronómico de Colza según fechas de siembra. Trabajo final, Universidad Católica Argentina, Facultad de Ciencias Agrarias, Argentina. Sitio web: <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/comportamiento-agronomico-colza-fechas-siembra.pdf>

Shearman, V.J., Sylvester, R., Scott, R.K. & Foulkes, M.J. (2005). Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. Crop Science 45, 175-185.

SIAP. (2015). Anuario estadístico de la producción agrícola. Marzo 25, 2017, de

SIAP

Sitio

web:

http://infosiap.siap.gob.mx/aagricola_siap_gb/ientidad/index.jsp

Sidlauskas, G. & Bernotas, S. (2003). Some factors affecting seed yields of spring oilseed rape (*Brassica napus* L.) *Agron. Res.* 12, 229–243.

Sinaki, J.M., Majidi, H. E., Shirani, R. A., Nour, M. G., & Zarei, H. (2007). Los efectos del déficit hídrico durante las etapas de crecimiento de la canola (*Brassica napus* L.). *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science*, 2, 417-422.

Slafer, G.A., Andrade, F.H. & Satorre, E.H. (1990). Genotypic improvement effects on pre-anthesis physiological attributes related to wheat grain-yield. *Field Crops Research*, 23, 255-263.

Syngenta (2018). El cultivo de la colza. Syngenta, España. 23 p.

Wylley, R.W. & Holliday, R. (1971). Plant population and shading studies in barley. *The Journal of Agricultural Science*. 77 445 – 452.