

Cambios en los componentes fisiológicos y numéricos del rendimiento de canola ante reducciones en la radiación solar incidente

Gustavo García-Hernández¹
Rogelio Araujo Díaz¹
Gaspar Estrada-Campuzano^{2§}
Carlos Gustavo Martínez-Rueda²
Aurelio Domínguez-López²
Adriana Villanueva-Carbajal²

¹Maestría en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales-Universidad Autónoma del Estado de México. (koetesfwck@hotmail.com; wardndc@hotmail.com). ²Facultad de Ciencias Agrícolas-Universidad Autónoma del Estado de México. (cgmartinezr@uaemex.mx; adominguezl@uaemex.mx; adrcarvajal@hotmail.com).

§Autor para correspondencia: gestradac@uaemex.mx.

Resumen

En el presente trabajo se identificó el periodo de tiempo en el cual el rendimiento de canola es más sensible a cambios en la disponibilidad de recursos y se identificaron los componentes fisiológicos y numéricos que son afectados por reducciones en la radiación incidente en diferentes momentos del ciclo de cultivo. Se sembraron dos genotipos primaverales de canola, uno de ciclo corto y otro de ciclo intermedio, los cuales 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 tres repeticiones. Las reducciones más significativas del rendimiento de grano (33%) por efecto del sombreo para Bioaureo 2486 se observaron a partir de 140 °Cd y hasta 410 °Cd después del inicio de la floración, con un total de 550 °Cd. En Hyola 61 esta ventana de tiempo se presentó desde -45 °Cd y hasta 250 °Cd con un total de 295 °Cd, con una disminución en el rendimiento de hasta 40%. El componente numérico del rendimiento más afectado por reducciones en los niveles de radiación incidente fue el número de granos. Por otro lado, el número de granos por silicua y el número de silicuas por unidad de superficie explicaron en gran medida los cambios en el número de granos. Estos resultados permitirán orientar mejor las estrategias de mejoramiento genético y de manejo agronómico tendientes a incrementar el rendimiento potencial en este cultivo.

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

Recibido: marzo de 2020

Aceptado: junio de 2020

Introducción

La canola (*Brassica napus* L.) es una planta oleaginosa conocida mundialmente porque de ella se extrae aceite comestible cuyo contenido de grasas esenciales puede prevenir enfermedades del corazón (Kirkegaard *et al.*, 2016). Mundialmente la superficie sembrada de este cultivo es de 37 579 575 ha, con una producción de más de 75 millones de toneladas y rendimiento promedio de 1.9 t ha⁻¹ (FAOSTAT, 2018). En el año 2018 se cosecharon 2 058 ha, con una producción de 1 473 t y un rendimiento promedio de 0.715 t ha⁻¹ (CONASIPRO, 2019).

Los estados más sobresalientes en la producción de canola para el ciclo 2018 fueron Tamaulipas, Estado de México, Tlaxcala, Hidalgo y Jalisco, destacando Tamaulipas con 91% de la superficie sembrada y volumen de producción, sin embargo, ha presentado los rendimientos más bajos (0.6 t ha⁻¹), mientras que el estado de México e Hidalgo obtienen 2.5 t ha⁻¹ (CONASIPRO, 2019).

La expansión del cultivo de canola en los principales países productores se ha dado en aquellas áreas de clima templado en las cuales está bien adaptada; sin embargo, en regiones marginales y más secas ha prosperado adecuadamente lo que hace verlo como un cultivo tolerante al estrés hídrico y térmico (Dreccer *et al.*, 2018).

Por lo tanto, existe una necesidad creciente de entender los efectos de la intensidad, tiempo y duración de los diferentes tipos de estreses sobre la determinación del rendimiento, a fin de canalizar mejor tanto las estrategias de mejoramiento genético como aquellas del manejo agronómico tendientes a incrementar la productividad del cultivo.

En los cultivos de grano el rendimiento es generado durante todo el ciclo de cultivo; sin embargo, no todas las etapas fenológicas son igualmente importantes para definirlo (Estrada-Campuzano *et al.*, 2008). En numerosos estudios en otros cultivos (maíz, trigo, cebada) se ha encontrado que el número de granos es el componente numérico más importante para la determinación del rendimiento (Sadras, 2007; Peltonen-Sainio *et al.*, 2007; Fischer, 2008), de tal forma que las etapas fenológicas en donde este componente se está determinando son muy importantes para entender los cambios en el rendimiento de grano (Slafer *et al.*, 2005).

El conocimiento del periodo de tiempo en el cual el rendimiento de grano está siendo determinado podría ser importante para el desarrollo de estrategias que permitan incrementar el rendimiento ya sea mediante el mejoramiento genético o a través, de una mejora en las prácticas de manejo (Slafer, 2005). Por lo que respecta al cultivo de canola estudios previos usando tratamientos de sombreado (Iglesias and Miralles, 2014; Labra *et al.*, 2017) o defoliación combinado con riego (Zhang and Flottman, 2018), han sido usados para entender las relaciones fuente-demanda y también para analizar la plasticidad de los componentes del rendimiento.

Sin embargo, la defoliación o riego confunden los efectos sobre el rendimiento y los experimentos reportados usaron diferentes intensidades y tiempos de sombreado, en muchos casos los tratamientos de sombreado se extendieron sobre todo el periodo de floración. Recientemente Kirkegaard *et al.* (2018) realizaron la determinación del este periodo del cultivo más sensible a cambios en la disponibilidad de recursos, con un solo genotipo de canola contrastándolo en dos condiciones ambientales (localidades) diferentes. En este sentido, dado la existencia de genotipos que difieren

en cuanto a arquitectura de planta (número de ramas, silicuas por rama, etc.), sería interesante investigar si la sensibilidad de los genotipos depende de su arquitectura o duración del ciclo de cultivo.

Actualmente, se sabe que en el cultivo de canola la generación del rendimiento está determinado por diferentes factores. En este sentido, Sidlauskas y Bernotas (2003), observaron que en la etapa de floración las temperaturas por arriba de los 27 °C tienen un efecto negativo en el rendimiento de canola. Por otra parte, 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 20%, 50% y 75% de agua disponible en el suelo. No obstante, lo anterior, dichas investigaciones no tenían como objetivo la identificación de la ventana de tiempo durante el ciclo fenológico donde el rendimiento tiende a disminuir debido a la limitación de recursos.

Conocer la sensibilidad del cultivo a cambios en la disponibilidad de recursos es de gran importancia ya que se podría hacer coincidir las etapas fenológicas donde se generan los principales componentes del rendimiento, con condiciones de mayor oferta ambiental. Con base a lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue: i) determinar los cambios en el rendimiento de grano y sus componentes en canola por efecto de reducciones en los niveles de radiación solar incidente durante distintas fases del ciclo ontogénico.

Materiales y métodos

Ubicación del trabajo experimental

El experimento se llevó a cabo durante el ciclo invierno -primavera 2015-2016 en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, ubicada en la población de El Cerrillo Piedras Blancas, Toluca, México, a 19° 15' 33'' de latitud norte, 99° 39' 38'' longitud oeste, y a una altitud de 2 640 m. El clima predominante de acuerdo con García (1988) corresponde a un clima templado subhúmedo con lluvias en verano y escasa precipitación pluvial en invierno (5% de la total en el año), temperatura media anual de 12.8 °C y precipitación promedio anual de 900 mm (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%.

Tratamientos y diseño experimental

Los tratamientos estuvieron constituidos por una combinación de dos cultivares primaverales de canola (uno corto; Hyola 61 y uno intermedio; Bioaureo 2486) y tratamientos de sombreado de 10 días de duración (12 en total; incluyendo el testigo sin sombrear) aplicados desde la aparición de la 3^{ra} hoja verdadera hasta la madurez fisiológica. El sombreado fue logrado al colocar malla sombra 20 cm por arriba del dosel del cultivo, la cual redujo la radiación solar incidente en 80%. Los tratamientos (combinación de cultivares y periodos de sombreado) se establecieron en un arreglo de parcelas divididas, en donde la parcela grande estuvo conformada por los cultivares y los periodos de sombreado correspondieron a las sub-parcelas (12 por cada parcela grande), las cuales fueron distribuidas en un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones.

Condiciones generales del experimento

La siembra se realizó en parcelas de cinco hileras de 3 m de longitud y separadas entre sí a 0.3 m (4.5 m²). Se utilizó una densidad de siembra de 70 semillas por m², de las cuales después de la emergencia se dejaron solo 50 plantas por m². Para lograr lo anterior, en cada parcela se distribuyeron 315 semillas de manera uniforme en las cinco hileras de cada parcela experimental. El cultivo se mantuvo en capacidad de campo durante todo su ciclo mediante un sistema de riego por goteo y sin restricciones nutricionales por lo que se fertilizó con la fórmula 150-60-30.

Durante el ciclo de cultivo se registraron las principales etapas fenológicas, producción de biomasa, índice de cosecha, rendimiento de grano y sus componentes numéricos. Estas variables fueron sometidas a un 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 la prueba de la diferencia mínima significativa honesta (DMSH) a un nivel de significancia de 5% (Dean *et al.*, 2017), utilizando el paquete estadístico SAS versión 9.0.

Resultados y discusión

Condiciones climáticas

Las condiciones climáticas durante el experimento se presentan en la (Figura 1), para ambos genotipos el inicio del periodo reproductivo coincidió con condiciones de temperatura (media de 13.3 °C) y radiación (promedio diario de 23.2 MJ m⁻² s⁻¹) favorables. Sin embargo, la precipitación durante el periodo reproductivo fue muy escasa (14.8 mm entre BFV y IFr), pero esto no fue una limitante dado que el cultivo fue establecido bajo condiciones de riego (938 mm).

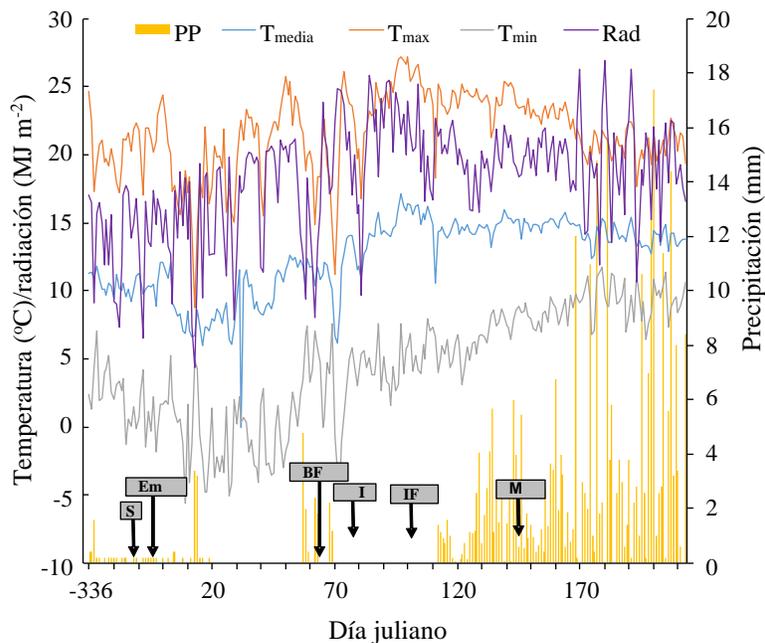


Figura 1. Condiciones agroclimáticas ocurridas durante la conducción del trabajo experimental. (S= siembra; Em= emergencia; BFV= botón floral visible; IF= inicio de la floración; IFr= inicio de la fructificación; MF= madurez fisiológica).

La comparación de ambos genotipos en el tratamiento testigo reveló que el genotipo Hyola 61 superó a Bioaureo 2486 en la mayoría de las variables, excepto en peso de 1 000 g. Sin embargo, Bioaureo 2486 superó en 11% a Hyola 61 en producción de biomasa (Cuadro 1).

Cuadro 1. Valores medios y significancia de los valores de F para las variables de los testigos de dos genotipos de canola, en Toluca, México.

Genotipos	Biom (g m ⁻²)	Rend (g m ⁻²)	IC	NG	P1000g (g)	NS	NGPS
Hyola 61	1 630.2 b	491.9 a	30.2 a	143 371 a	3.4 a	10 257 a	13.9 a
Bioaureo 2486	1 830 a	343.8 b	18.7 b	98 761 b	3.4 a	8 295 b	11.9 b
CV (%)	10.9	8	10.8	8.7	4.6	10.1	11

Medias unidas por la misma letra no difieren significativamente al 0.05 de la prueba de Tukey. Biomasa a madurez (Biom); rendimiento de grano (Rend); índice de cosecha (IC); número de granos por m² (NG); peso de 1 000 granos (P1000g); número de silicuas por m² (NS); y número de granos por silicua (NGPS).

La correlación entre el rendimiento y sus componentes para los dos genotipos de canola se observa en el (Cuadro 2), el rendimiento se correlaciona positiva y significativamente ($p < 0.01$) con la biomasa en ambos genotipos y con el peso de 1000 granos ($p < 0.05$) y número de granos por silicua ($p < 0.01$) en el cultivar Bioaureo 2486. Mientras que en Hyola 61 esta asociación fue observada de manera significativa para todas las variables a excepción de peso de 1 000 granos y número de granos por silicua.

Cuadro 2. Correlaciones fenotípicas para el rendimiento de grano y sus componentes en dos genotipos de canola sometidos a tratamientos de sombreo en Toluca, México.

	Biom (g m ⁻²)	IC	NG	P1000g (g)	NS	NGPS
Bioaureo 2486						
Rend	0.519**	0.127 ns	0.921 ns	-0.094*	0.25 ns	0.699**
Biom		-0.739**	0.433**	0.074 ns	0.343*	0.159 ns
IC			0.152 ns	-0.131 ns	-0.118 ns	0.252 ns
NG				-0.464**	0.356*	0.691**
P1000G					-0.331*	-0.199 ns
NS						-0.42**
Hyola 61						
Rend	0.617**	0.363*	0.934**	0.119 ns	0.735**	-0.008ns
Biom		-0.494**	0.548**	0.119 ns	0.763**	-0.44**
IC			0.379*	-0.02 ns	-0.04 ns	0.441**
NG				-0.234 ns	0.73**	0.084 ns
P1000g					-0.038 ns	-0.25 ns
NS						-0.603**

* = significativo al 0.05; ** = significativo al 0.01 y ns = no significativo; biomasa a madurez (Biom); rendimiento de grano (Rend); índice de cosecha (IC); número de granos por m² (NG); peso de 1 000 granos (P1000g); número de silicuas por m² (NS) y número de granos por silicua (NGPS).

Por otro lado, la biomasa se correlacionó negativa y significativamente con el IC en los dos genotipos, en tanto, que correlacionó positiva y significativamente ($p < 0.01$) con el número de granos y número de silicuas por unidad de superficie, mientras que la correlación fue negativa para el número de granos por silicua en el cultivar Hyola 61 (Cuadro 2). 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 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 1 000 granos.

Por otro 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 1 000 granos se correlacionó en forma negativa y significativa ($p < 0.01$) con el número de silicuas por unidad de superficie y finalmente esta variable estuvo asociada positiva y significativamente ($p < 0.01$) con el número de granos por silicua.

Efecto del sombreado sobre los componentes fisiológicos del rendimiento

Al analizar el efecto de los tratamientos de sombreado impuestos antes del inicio de floración se observó que para ambos genotipos el rendimiento fue explicado en mayor medida por el índice de cosecha ($r^2 = 0.77$, $p < 0.01$) (Figura 2b) que por la biomasa producida a madurez fisiológica ($r^2 = 0.32$, $p < 0.05$) (Figura 2a).

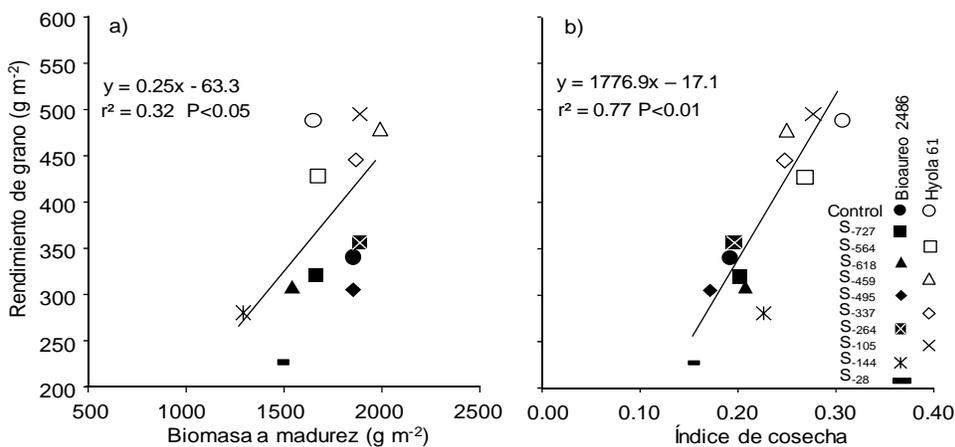


Figura 2. Relaciones entre el rendimiento de grano con la biomasa a madurez (a) y el índice de cosecha (b) para los tratamientos de sombreado aplicados antes del inicio de la floración en dos genotipos de canola, en Toluca, México.

Contrariamente, los tratamientos de sombreado impuestos después del inicio de floración mostraron que el rendimiento de grano de cada cultivar evaluado fue explicado en mayor medida por la producción de biomasa a madurez como se aprecia en la Figura 3a (Hyola 61: $r^2 = 0.52$, $p < 0.05$; Bioaureo 2486: $r^2 = 0.59$, $p < 0.05$) y no por el índice de cosecha, ya que en éste ambos genotipos se agruparon en una sola relación ($r^2 = 0.37$, $p < 0.05$) (Figura 3b).

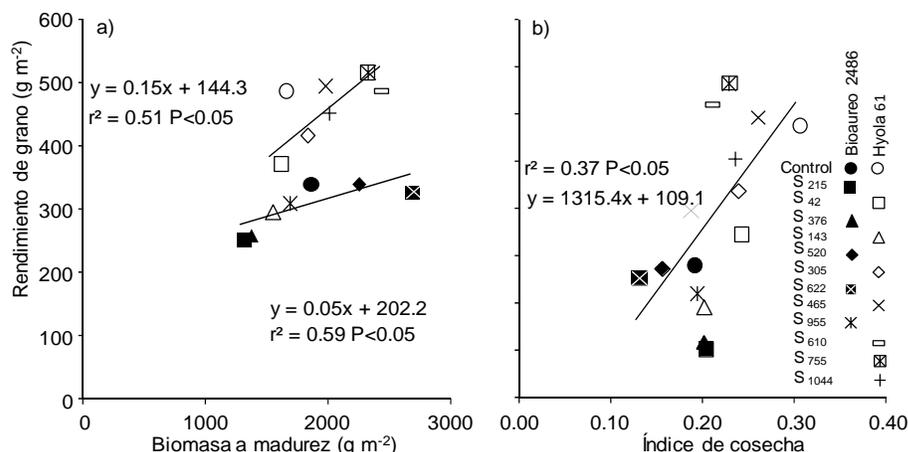


Figura 3. Relaciones entre el rendimiento de grano con la biomasa a madurez (a) y con el índice de cosecha (b) para los tratamientos de sombreado impuestos después del inicio de floración, en Toluca, México.

Al analizar los cambios en el rendimiento de grano por efecto de los tratamientos de sombreado aplicados en prefloración se pudo apreciar que los cambios en el número de granos por efecto del sombreado explicaron 97% de la variabilidad observada en el rendimiento de grano (Figura 4a). La variedad Hyola 61 obtuvo los rendimientos más altos (491.9 g m⁻², 43%) con respecto de Bioaureo 2486 (343.8 g m⁻²). En ambos cultivares los tratamientos de sombreado impuestos antes del inicio de la floración disminuyeron de manera significativa el rendimiento de grano (25% en promedio en ambos cultivares).

La relación entre el peso de grano y el número de granos no resultó significativa, sin embargo, existieron efectos compensatorios en el peso de grano siendo este efecto más marcado en Bioaureo 2486 en los tratamientos S₄₀ y S₅₁ (Figura 4b).

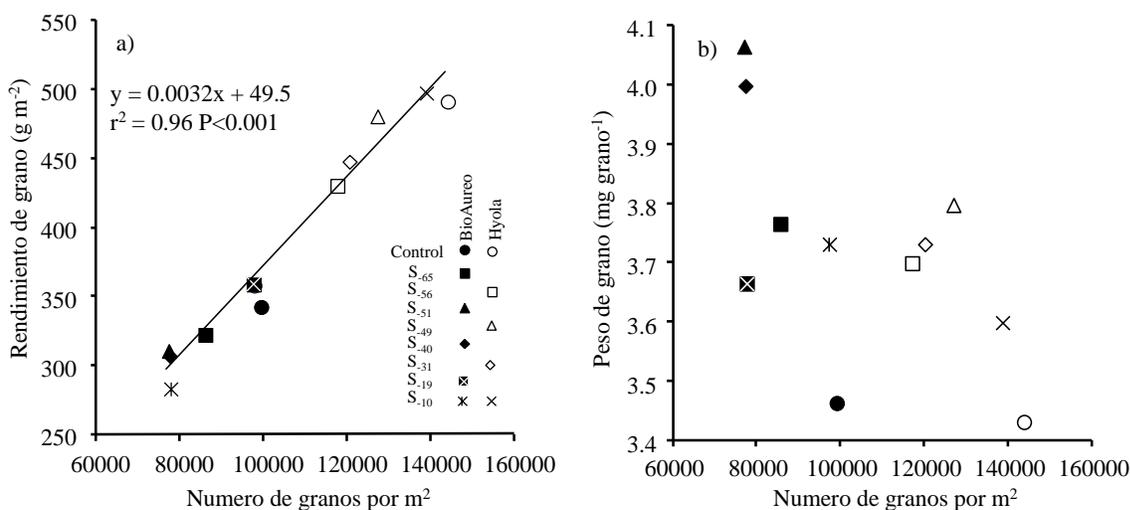


Figura 4. Relación entre el rendimiento de grano con el número de granos (a) y peso de grano con el número de granos (b) para los tratamientos de sombreado impuestos antes del inicio de la floración en dos cultivares de canola en Toluca, México.

Por otro lado, los cambios en los componentes del rendimiento de grano por efecto de los tratamientos de sombreo impuestos después del inicio de floración, se reflejó en una disminución significativa del número de granos principalmente en los tratamientos S₃ y S₂₂ (Figura 5a) en el cultivar Bioaureo 2486 con un incremento significativo en el peso de grano en los tratamientos en los mismos tratamientos (Figura 5b). Para el genotipo Hyola 61 los tratamientos de sombreo que redujeron en forma significativa el número de granos fueron S₁, S₁₁ y S₂₁ (Figura 5a), sin que se afectara el peso de grano (Figura 5b).

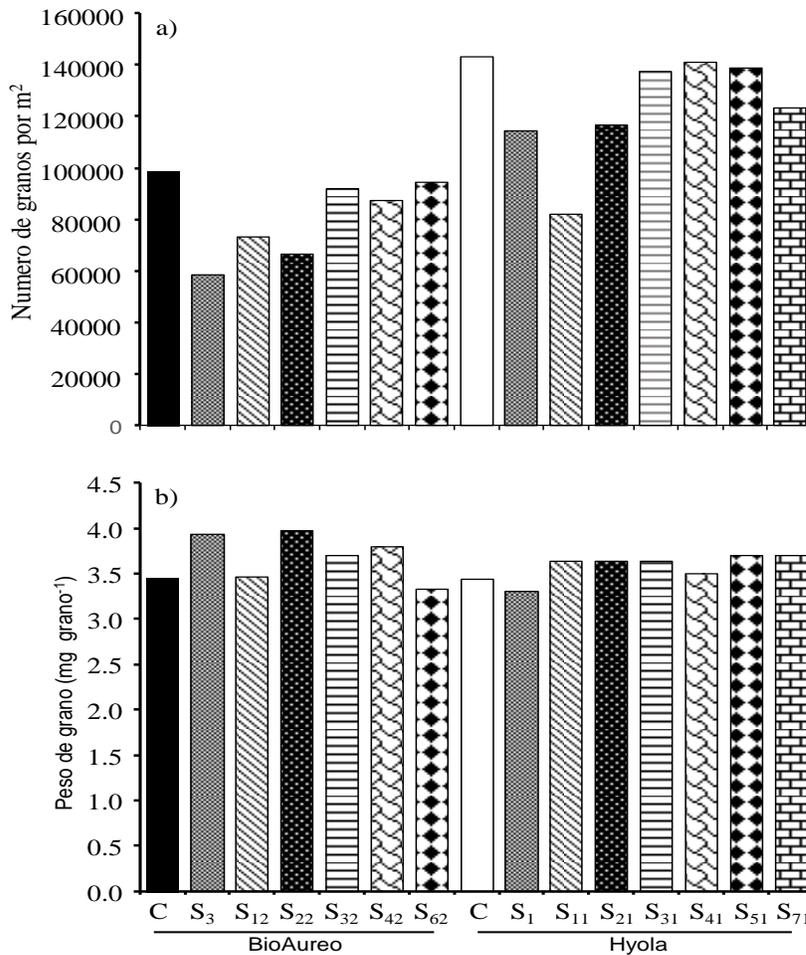


Figura 5. Relaciones entre el número de granos por m² (a) y el peso individual de grano; y (b) con respecto a los tratamientos de sombreo impuestos después del inicio de floración en dos genotipos de canola, en Toluca, México. El subíndice en cada tratamiento de sombreo indica el número de días desde el inicio de la floración.

Rendimiento de grano y sus componentes en términos relativos

La mayor sensibilidad del rendimiento de grano por efecto de reducciones en asimilados para el genotipo Bioaureo 2486 fue observada desde -140 °Cd y hasta 410 °Cd con un total de 550 °Cd, en este lapso el rendimiento disminuyó significativamente hasta 33%. Mientras que en el cultivar Hyola 61 este periodo abarcó desde - 45 °Cd y hasta 250 °Cd con un total de 295 °Cd, siendo las reducciones en el rendimiento de grano durante este lapso de 40% (Figura 6a).

Una tendencia similar se observó en el número de granos relativo, donde Bioaureo 2486 mostró una disminución significativa el número de granos de 43%, desde -160 °Cd y hasta 480 °Cd con un total de 640 °Cd. Mientras que en Hyola 61 el número de granos relativo disminuyó un 43% desde 10° Cd y hasta 310 °Cd con una duración de 320 °Cd. (Figura 6b). Por otra parte, el peso de grano relativo para los dos genotipos se mantuvo similar al control hasta la floración, en la cual Bioaureo 2486 mostró una compensación de 13% respecto al control en el tratamiento de sombreado más cercano al inicio de la floración (Figura 6c).

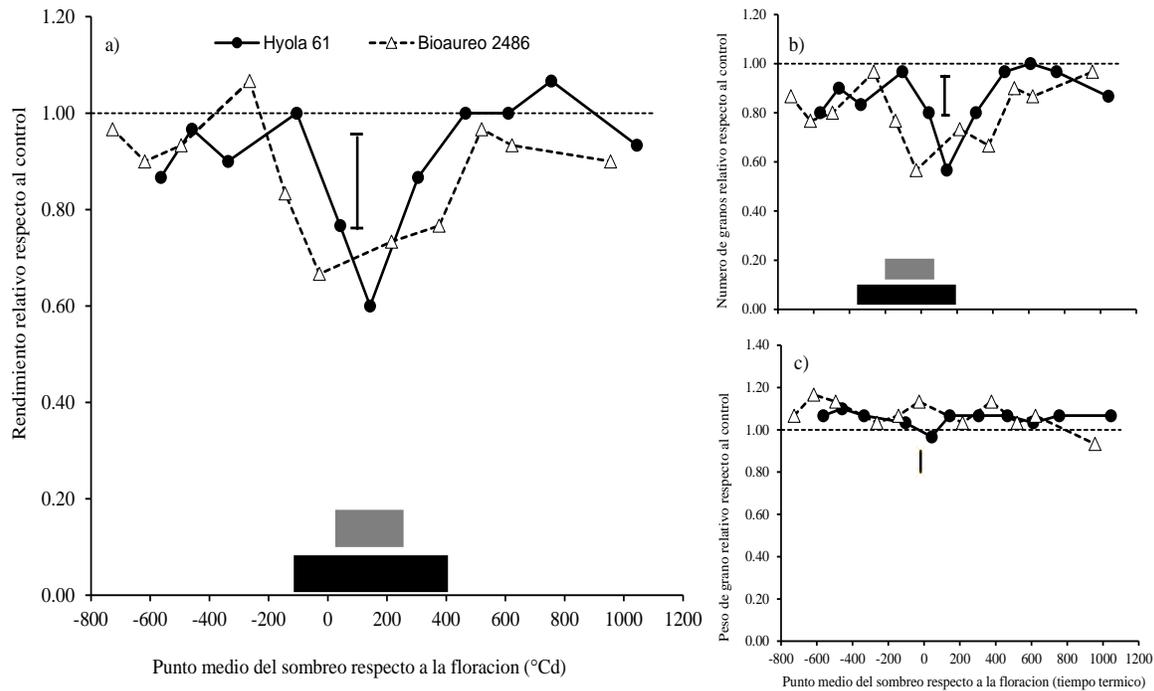


Figura 6. Relación entre el rendimiento relativo (a), y sus componentes número de granos por m² relativo (b), peso relativo de grano (c) y el punto medio del tratamiento de sombreado desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México. Las barras sobre el eje X indican la duración del periodo en donde las caídas en el rendimiento, número de granos y peso de grano fueron estadísticamente significativas para cada variedad (Gris: Hyola 61, Negro: Bioaureo 2486).

En la Figura 7, se muestra la relación entre el número de granos relativo, el número de silicuas por m² relativo, el número de granos por silicua y el punto medio del tratamiento de sombreado donde se aprecia que la caída en el número de granos relativo, para el genotipo Hyola 61 de debió principalmente a una disminución en el número de silicuas relativo m² de hasta 40% (Figura 7b), respecto al control en el periodo comprendido entre 42 °Cd y hasta 350 °Cd con un total de 308 °Cd, posteriormente se observó una compensación hasta de 27% respecto al control.

Mientras que para el genotipo Bioaureo 2486 esta variable fue relativamente poco afectada por los tratamientos de sombreado. Por otra parte, los cambios en el número de granos relativo también estuvieron asociados a la disminución del número de granos por silicua. Para el genotipo Hyola 61 esta variable solamente se mostró una disminución de 20% a los 610 °Cd, mientras que para el genotipo Bioaureo 2486 se redujo en 27% el número de granos por silicua (Figura 7c), en los tratamientos de sombreado que fueron impuestos alrededor del inicio de la floración que contempló un periodo de 620 °Cd.

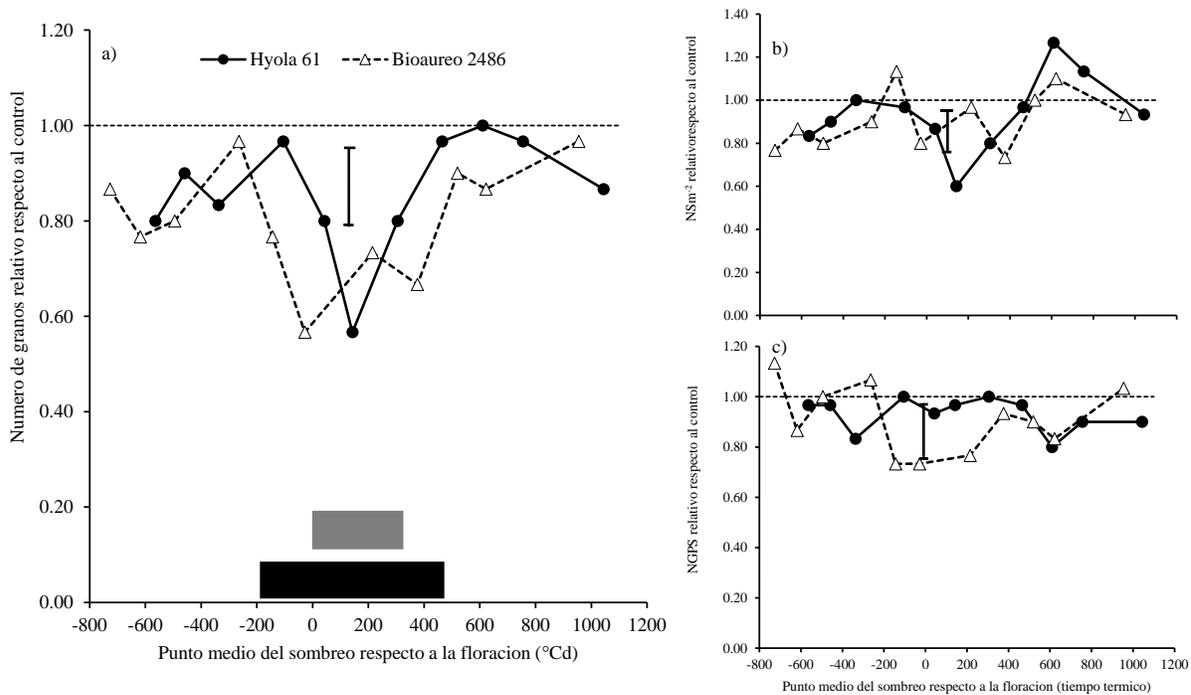


Figura 7. Relación entre el número de granos por m² relativo (a) y sus componentes número de silicuas relativo por m² (b), número de granos por silicua relativo (c) y el punto medio del tratamiento de sombreado desde el inicio de floración para dos genotipos de canola en Toluca, México. Las barras del eje X indican la duración del periodo de las caídas en número de granos fueron estadísticamente significativas para cada variedad (Gris: Hyola 61, Negro: Bioaureo 2486).

Discusión

El rendimiento generado, por los controles fue de 4.9 y 3.4 t ha⁻¹ para Hyola61 y Bioaureo 2486, respectivamente. Estos rendimientos muestran que el trabajo se ubicó en condiciones agroecológicas adecuadas. 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) (Madoni y de la Fuente, 2015), 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 a 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. La ventana de tiempo donde la planta de canola fue más sensible a cambios en la disponibilidad de asimilados y en la cual el rendimiento se redujo de manera significativa fue identificada para: Bioaureo 2486; a partir, de -140 °Cd y hasta 410 °Cd con un total de 550 °Cd con una disminución significativa en el rendimiento de hasta 33%.

Mientras que en Hyola 61 esta ventana de tiempo se presentó desde -45 °Cd y hasta 250 °Cd con un total de 295 °Cd y una disminución significativa en el rendimiento de hasta 40%. La mayor afectación en Hyola 61, pudo estar asociada a que presenta potencialmente un menor número de ramas comparativamente con Bioaureo 2486. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Kirkegaard *et al.* (2018) quienes identificaron el periodo crítico con un sólo genotipo de canola en dos sitios diferentes, utilizando sombreados desde los 30 y 48 días después de la siembra y hasta la madurez fisiológica.

Estos autores encontraron reducciones significativas en el rendimiento de canola a partir de 100 °Cd después del inicio de la floración (BBCH60: Biologische Bundesanstalt, Bundessortenamt and Chemical industry) (periodo comprende desde el 50% de plantas con una flor abierta en el tallo principal hasta que cesa la floración) y continuó hasta 500 °Cd después de BBCH60, este periodo fue el de mayor impacto en ambos sitios generando una reducción del 40 a 50% en rendimiento.

Por otro lado, estudios previos analizando otros factores ambientales (sequía y temperatura) diferentes a la radiación solar incidente han coincidido en señalar que el periodo alrededor de floración es el más sensible para la determinación del rendimiento en canola. Por ejemplo, Champolivier y Merrien (1996) concluyeron 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. Mientras que, Mc Gregor (1981); 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, lo cual es causado por un bajo potencial agua en el estigma reduciendo la capacidad de hidratar el polen y por ende el crecimiento del tubo polínico (Morrison, 1993). 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 asoció a la reducción en la intercepción de radiación durante la etapa de floración principalmente.

Por otro lado, en términos de componentes del número de granos por m² (número de silicuas por m² (NS) y numero de granos por silicua (NGPS)) los dos cultivares se comportaron diferencialmente, es así como en Hyola 61 el NGPS se redujo hasta 20% y el NS un 40%, con respecto al testigo y en Bioaureo 2486 el NGPS se redujo un 27% y el NS fue relativamente poco afectado (9%). Estos resultados concuerdan con Kirkegaard *et al.* (2018), quienes observaron reducciones entre 50 y 55% en el número de granos en dos ambientes estudiados.

Los autores atribuyeron las reducciones en el número de silicuas y numero de granos por silicua a una menor cantidad de asimilados disponibles cuando se alcanza el número máximo de botones florales y las primeras flores han abierto. En este sentido, los datos de nuestro estudio indican que Hyola 61 por ser de ciclo corto y poco ramificada basa el número de granos por unidad de superficie 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%). Lo anterior, deja de manifiesto que el número de granos es el componente del rendimiento más sensible a cambios en la disponibilidad de recursos, como ocurre en la mayoría de los cultivos de grano (Slafer *et al.*, 2014).

La compensación en el peso de grano observada en nuestro estudio coincide parcialmente con los resultados obtenidos por Champolivier y Merrien (1996), quienes afirmaron que el estrés hídrico en la floración afectó el número de granos por planta (31%) y el contenido de aceite, contrariamente observaron un efecto de compensación sobre el peso 1 000 granos, acompañado de un aumento significativo en la concentración final de glucosinato de las semillas (60%).

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 (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 comparada con Hyola 61, puede estar relacionado a un mayor número de ramas. Lo anterior, es importante tomando en cuenta que los progresos del rendimiento en el futuro pueden estar asociados con incrementos en la biomasa aérea (Shearman *et al.*, 2005; Miralles y Slafer, 2007).

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. La ventana de tiempo en la cual el rendimiento se afectado en mayor medida por la disponibilidad de asimilados en canola fue diferente en cada uno de los dos cultivares utilizados. En Bioaureo 2486 la ventana de disminución del rendimiento se presentó desde -140 °Cd y hasta 410 °Cd con una duración total de 550 °Cd, con reducciones de hasta 33%, respecto del tratamiento sin sombrear. En Hyola 61 la ventana de disminución del rendimiento se presentó desde 45 °Cd y hasta 250 °Cd con una duración total de 295 °Cd.

Los cambios en el rendimiento de grano por efecto del sombreo 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 2486 lo hizo a través del número de granos por silicua.

Agradecimientos

El autor G. García-Hernández desea agradecer a la Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT) por la beca que le permitió terminar sus estudios de ingeniero agrónomo. El presente trabajo fue parte del proyecto ‘Determinación del rendimiento en haba y canola afectado por reducciones en radiación interceptada en diferentes etapas fenológicas’ con clave 4731/2019CIB.

Literatura citada

- Champolivier, L. and 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. *Eur. J. Agron.* 5(3-4):153-160. doi.org/10.1016/S1161-0301(96)02004-7.
- CONASIPRO. 2019. Bases de datos oleaginosas mundial y nacional 1980-2018. http://www.oleaginosas.org/cat_69.shtml#51.
- Dean, D.; Raguljić, D. and Voss, D. 2017. Design and analysis of experiments. Springer International Publishing AG. Cham, Switzerland. 852 p.

- Estrada, C. G.; Miralles, D. J. and Slafer, G. A. 2008. Yield determination in triticale as affected by radiation in different development phases. *Eur. J. Agron.* 28(4):597-605. doi.org/10.1016/j.eja.2008.01.003.
- Fischer, R. A. 2008. The importance of grain or kernel number in wheat: a reply to Sinclair and Jamieson. *Field Crops Research.* 105(1-2):15-21. doi:10.1016/j.fcr.2007.04.002.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto Nacional de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). México. 246 p.
- González, A.; Sahagún, J.; Vázquez, L. M.; Rodríguez, J. E.; Pérez, D. J.; Domínguez, A.; Franco, O. y Balbuena, A. 2009. Identificación de variedades de maíz sobresalientes considerando el modelo AMMI y los índices de Eskridge. *Agric. Téc. Méx.* 35(2):189-200.
- Iglesias, F. M. and Miralles, D. J. 2014. Changes in seed weight in response to different sources: sink ratio in oilseed rape. *Inter. J. Agric. Res. Innov. Technol.* 4(1):44-52.
- Kirkegaard, A. J.; Lilley, M. J.; Brill, D. R.; Ware, H. A. and Walela, K. C. 2018. The critical period for yield and quality determination in canola (*Brassica napus* L.). *Field Crops Res.* 222(1):180-188. doi.org/10.1016/j.fcr.2018.03.018.
- Kirkegaard, A. J.; Lilley, M. J. and Morrison, M. J. 2016. Drivers of trends in Australian canola productivity and future prospects. *Crop Pasture Sci.* 67(4):i-ix.
- Labra, M. H.; Struik, P. C.; Evers, J. B. and Calderini, D.F., 2017. Plasticity of seed weight compensates reductions in seed number of oilseed rape in response to shading at flowering. *Eur. J. Agron.* 84(1):113-124.
- Madoni, G. A. y De la Fuente, E. B. 2015. ¿Qué se entiende por estructura del cultivo? *In: Satorre, H; Benech A. R. L; Slafer, G. A.; de la Fuente, E. B.; Miralles, D. J.; Otegui, M. E. y Savin, R. (Eds.). Producción de granos: bases funcionales para su manejo.* Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Argentina. 247-255 pp.
- Mc Gregor, D. I. 1981. Pattern of flower and pod development in rapeseed. *Canadian J. Plant Sci.* 61(2):275-282. doi.org/10.4141/cjps81-040.
- Miralles, D. J. and Slafer, G. A. 2007. Sink limitations to yield in wheat: how could it be reduced? *J. Agric. Sci. Cambridge.* 145(2):1-11. doi.org/10.1017/S0021859607006752.
- Morrison, M. J. 1993. Heat stress during reproduction in summer rape. *Can. J. Bot.* 71(2):303-308. doi.org/10.1139/b93-031.
- Peltonen-Sainio, P.; Kangas, A.; Salo, Y. and Jauhiainen, L. 2007. Grain number dominates grain weight in temperate cereal yield determination: Evidence based on 30 years of multi-location trials. *Field Crops Res.* 100(2-3):179-188.
- Sadras, V. O. 2007. Evolutionary aspects of the trade-off between seed size and number in crops. *Field Crops Res.* 100(2-3):125-138.
- Schwab, M. I. 2010. Comportamiento agronómico de Colza según fechas de siembra. Trabajo final, Universidad Católica Argentina, Facultad de Ciencias Agrarias, Argentina. <http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/comportamiento-agronomico-colza-fechas-siembra.pdf>.
- Shearman, V. J.; Sylvester, R.; Scott, R. K. and Foulkes, M. J. 2005. Physiological processes associated with wheat yield progress in the UK. *Crop Sci.* 45(1):175-185. Doi:10.2135/cropsci2005.0175.
- Sidlauskas, G. and Bernotas, S. 2003. Some factors affecting seed yields of spring oilseed rape (*Brassica napus* L.) *Agron. Res.* 1(2):229-243.
- Sinaki, J. M.; Majidi, H. E.; Shirani, R. A.; Nour, M. G. and Zarei, H. 2007. Los efectos del déficit hídrico durante las etapas de crecimiento de la canola (*Brassica napus* L.). *American-Eurasian J. Agric. Environ. Sci.* 2(4):417-422.

- Slafer, G. A.; Araus, J. L.; Royo, C. and García del Moral, L. F. 2005. Promising eco-physiological traits for genetic improvement of cereal yields in Mediterranean environments. *Annals Appl. Biol.* 146(1):61-70.
- Slafer, G. A.; Savin, R. and Sadras, V. O. 2014. Coarse and fine regulation of wheat yield components in response to genotype and environment. *Field Crops Res.* 157(1):71-83. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.004>.
- Zhang, H. and Flottmann, S. 2018. Source-sink manipulations indicate seed yield in canola is limited by source availability. *Eur. J. Agron.* 96(1):7076. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eja.2018.03.005>.