

Trabajo Final de Intensificación

Efecto del ambiente térmico y lumínico en la inducción floral de *Brassica rapa* L.



Fernando Dillon

Tutor

Ing. Agr. Dr. Alejandro Presotto

Consejeros

Ing. Agr. Dr. Claudio E. Pandolfo

Ing. Agr. Mg. Paola A. Fernandez

Asesora externa

Biol. Denise Simian



Departamento de Agronomía - Universidad Nacional del Sur
2025

ÍNDICE GENERAL

- Índice de tablas.....	3
- Índice de figuras.....	3
- Agradecimientos.....	4
- Resumen.....	5
- Introducción.....	6
- Hipótesis.....	10
- Objetivos.....	10
- Materiales y Métodos.....	11
- Resultados.....	15
- Discusión.....	19
- Conclusiones.....	21
- Bibliografía.....	22
- Anexo.....	24

ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1. Biotipos de *Brassica rapa* L. analizados en el ensayo.

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Relaciones genéticas entre especies de *Brassica*.
- Figura 2. Planta de *Brassica rapa* L. Lote de cebada infestado con *Brassica rapa* L.
- Figura 3. Siembra de biotipos.
- Figura 4. Estado de plántula.
- Figura 5. Plantas en estado de floración. En la imagen de la izquierda se diferencian los tres biotipos, de izquierda a derecha (BAL 19, BAL08 Y SCB).
- Figura 6. Grados día acumulados a floración para los Biotipos BAL08, BAL19 y SCB.
- Figura 7. Porcentaje final de plantas florecidas.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos que me acompañaron en todo el camino.

A mi mujer que es mi gran sostén y compañera.

A mis tutores, consejeros y asesores por su guía durante el trabajo.

A todo el departamento de Agronomía.

RESUMEN

Brassica rapa L, comúnmente conocida como nabo silvestre, es una maleza anual o bienal perteneciente a la familia de las Brassicaceae y se encuentra presente en la mayoría de los cultivos. Actualmente, en Argentina, se encuentra mayormente en el centro y sur de la provincia de Buenos Aires y su presencia se ha incrementado debido a la aparición de numerosos biotipos resistentes a múltiples herbicidas. Además, la especie posee diversos mecanismos de adaptación a los diferentes ambientes, lo que aumenta las posibilidades de supervivencia ante condiciones adversas. Uno de estos mecanismos es la vernalización que consiste en un requerimiento de horas de frío para evitar desarrollarse en un ambiente adverso, el cual pondría en peligro su éxito reproductivo y supervivencia. Otra de las señales ambientales importante en la regulación del momento de floración es la respuesta al fotoperíodo. La duración del día (cantidad de horas luz), influye en el desarrollo de las plantas, y dependiendo de su respuesta a este factor, se pueden clasificar como plantas con respuesta a días cortos, largos o neutras.

Para comprender cómo las condiciones ambientales de luz y temperatura afectan la floración en *Brassica rapa*, se utilizaron tres biotipos con floración contrastante BAL08, BAL19 y SCB, los cuales provienen de diferentes ambientes. Se establecieron dos regímenes de luz para simular días cortos y largos: 12 y 16 horas de luz, respectivamente. Además, se aplicaron dos tratamientos de vernalización, a 10°C y con un fotoperíodo de 10 horas de luz, con duraciones de 3 y 9 semanas y un control sin vernalización.

Los resultados arrojaron interacciones significativas entre biotipos, vernalización y fotoperíodo, indicando que la influencia de cada factor varió en cada biotipo acelerando o retardando el tiempo a floración (requerimiento de mayor o menor acumulación de °C día) y, en algunos casos, provocando que algunos individuos no florezcan. Sin embargo, el factor que más influencia tuvo en los tres biotipos fue el fotoperíodo, al ser una especie de “día largo”, presentó mayor respuesta al régimen de 16 horas de luz. El biotipo que se vio más influenciado con éste factor fue BAL08 seguido de BAL19 y SCB.

INTRODUCCIÓN

Se entiende por agricultura a la actividad humana dedicada al cultivo sistemático de plantas con el fin de obtener alimentos, fibras y otros productos. La misma ha sido un pilar fundamental en el desarrollo de las civilizaciones a lo largo del tiempo. Desde sus orígenes en el Neolítico, la domesticación de especies vegetales permitió el asentamiento de las poblaciones humanas y el surgimiento de estructuras sociales más complejas (Anjum et al., 2018). A lo largo de la historia, la agricultura ha evolucionado incorporando conocimientos científicos, tecnologías y prácticas de manejo que han incrementado la productividad, pero también han generado nuevos desafíos ambientales y económicos (Bortoloti & Baron, 2022).

En el contexto global actual, la agricultura enfrenta múltiples problemáticas que afectan la sostenibilidad de los sistemas productivos. Entre ellas se destacan el cambio climático, la degradación del suelo, la presión por el uso del agua, la pérdida de biodiversidad y, particularmente, el gran uso de agroquímicos para el control de malezas (Anjum et al., 2018).

Las malezas, al competir por recursos con los cultivos, pueden reducir significativamente los rendimientos y afectar la calidad de la cosecha. Además, muchas especies de malezas tienen gran capacidad de adaptación y tolerancia a condiciones adversas, incluyendo tolerancia o resistencia a los principios activos de los agroquímicos, esto genera una problemática a la hora de su control debido a que esta tolerancia o resistencia provoca que se deba aplicar una mayor dosis de químicos para obtener un mismo resultado, o que no se pueda realizar el control (Juan et al., 2016).

El control de malezas es una tarea esencial en cualquier sistema agrícola. Desde 1945 se han utilizado herbicidas para su manejo, aunque en las últimas décadas se ha observado una creciente aparición de malezas resistentes, lo cual obliga a repensar estrategias integradas de control (Bortoloti & Baron, 2022). Entre las familias botánicas que generan mayores problemas para la agricultura, se encuentran las brasicáceas o crucíferas (Diez de Ulzurrun et al., 2024).

La familia de las brasicáceas, también conocida como crucíferas, constituye un grupo de angiospermas dicotiledóneas con amplia distribución mundial. Incluye aproximadamente 370 géneros y más de 4000 especies (Anjum et al., 2018; Al-Shehbaz, 2025). Se estima que esta familia tuvo su origen hace 30-40 millones de años, probablemente en regiones templadas de Eurasia (Huang et al., 2020). La expansión de las brasicáceas ha estado vinculada a su notable capacidad de adaptación a diversos hábitats, incluyendo zonas áridas, ambientes alpinos y sistemas agrícolas intensivos (Jackson et al., 2024).

Desde el punto de vista evolutivo, la familia Brassicaceae ha sido objeto de numerosos procesos de hibridación y poliploidía, lo cual ha dado origen a complejos genómicos, como el llamado “Triángulo de U”, que describe las relaciones genéticas entre especies de *Brassica* diploides y sus híbridos alopoliploides (McAlvay et al., 2021). Este fenómeno ha favorecido la gran diversidad morfológica y fisiológica de la familia, lo que se traduce en una amplia plasticidad ecológica (Lu et al., 2022).

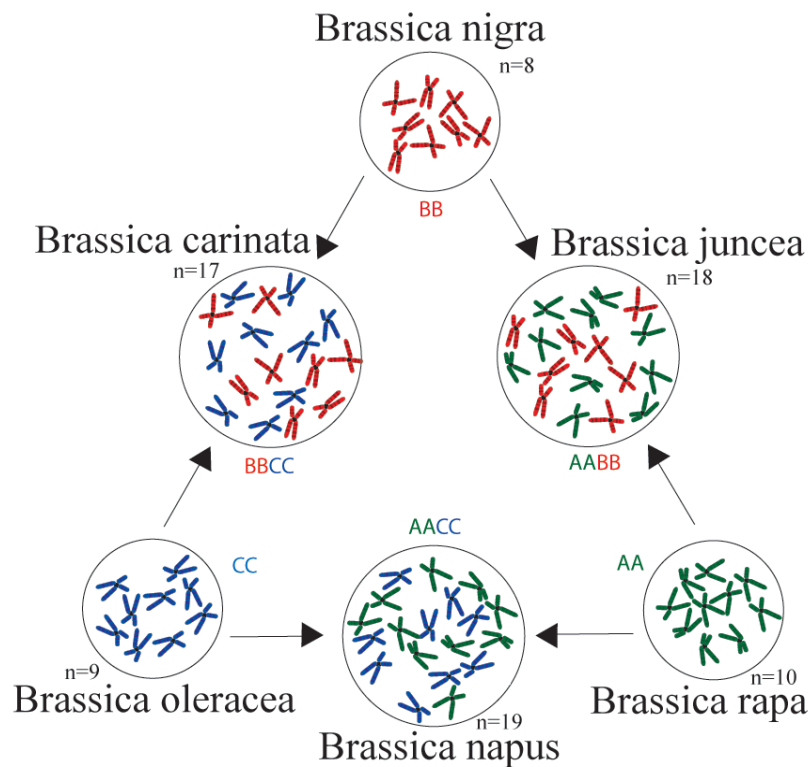


Figura 1: Relaciones genéticas entre especies del género *Brassica*.

La estructura floral de las brasicáceas es uno de sus rasgos más distintivos. Poseen flores hermafroditas, actinomorfas y tetrámeras, con cuatro sépalos, cuatro pétalos dispuestos en forma de cruz (de ahí el nombre “crucíferas”), y seis estambres, de los cuales cuatro son largos y los otros dos más cortos (tetradínamos). El gineceo está compuesto por dos carpelos soldados que forman un ovario súpero, que tras la fecundación da lugar a un fruto característico llamado silicua o silícula, según su morfología. Este tipo de estructura floral está altamente conservada dentro de la familia, lo que facilita su identificación (Al-Shehbaz, 2025).

Desde el punto de vista ecológico, estas especies presentan un conjunto de adaptaciones que favorecen su éxito en distintos tipos de ambientes. Sus semillas son pequeñas y con alto poder germinativo (De Souza Maia et al., 2006), aunque poseen mecanismos de dormición que prolongan su persistencia en el banco de semillas del suelo

(Pelliza et al., 2023). Suelen tener ciclos de vida rápidos, en su mayoría anuales o bianuales, lo que les confiere ventajas competitivas en ambientes perturbados. Algunas liberan compuestos alelopáticos capaces de inhibir la germinación de otras especies y muchas toleran condiciones de estrés como salinidad, sequía o bajas temperaturas, lo que explica su capacidad para colonizar zonas marginales (Bortoloti y Baron, 2022).

Estas características explican por qué dentro de la familia coexisten tantas especies cultivadas de alto valor agronómico como: *Brassica oleracea* (repollo, brócoli), *B. napus* (colza), *B. rapa* (nabos), y especies que actúan como malezas problemáticas en los agroecosistemas (Juan et al., 2016; McAlvay et al., 2021). La coexistencia de ambos grupos plantea desafíos para el manejo agronómico y para los programas de mejoramiento genético, debido a la posibilidad de cruzamientos espontáneos, transferencia de genes y competencia en el campo (Torres Carbonell et al., 2017).

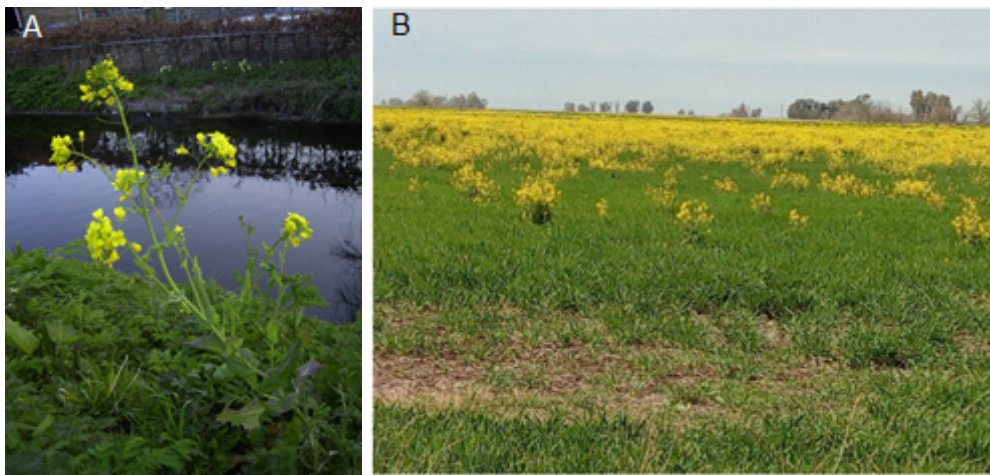


Figura 2. A. Planta de *Brassica rapa* L. y B. Lote de cebada infestado con *Brassica rapa* L.

La vernalización constituye un proceso fisiológico mediante el cual la exposición prolongada a bajas temperaturas acelera o hace posible la transición de la fase vegetativa a la fase reproductiva en la planta. Es un mecanismo de adaptación que asegura que la floración se desarrolle en condiciones ambientales favorables, evitando una inducción floral prematura durante el invierno (Amasino, 2004; Kim, Hyun y Sung, 2017). De este modo, las especies que requieren vernalización presentan una estrategia evolutiva ventajosa en climas templados y fríos, maximizando sus probabilidades de éxito reproductivo y persistencia en el ambiente (Chouard, 1960).

Por otro lado, el fotoperíodo constituye una señal ambiental fundamental en la regulación del desarrollo vegetal. Se refiere a la duración relativa de las fases de luz y oscuridad a lo largo del día, cuya percepción es mediada principalmente por fotorreceptores como filocromos y criptocromos (Andrés & Coupland, 2012). Según la respuesta que

presentan al fotoperíodo, las especies se clasifican en plantas de día largos, cortos o neutras, lo que determina en qué época del año se produce la floración (Thomas & Vince-Prue, 1997). Este mecanismo asegura la sincronización del ciclo reproductivo con condiciones ambientales óptimas para la polinización y el establecimiento de la descendencia. Debido a la importancia de estos dos factores, la interacción entre ambos representa un eje central en la ecología y fisiología de muchas especies cultivadas y silvestres, incluyendo a las brasicáceas (Srikanth & Schmid, 2011).

En este contexto, el presente trabajo se enfoca en analizar la interacción entre fotoperíodo y vernalización sobre la floración en tres biotipos de *Brassica rapa* L., con el objetivo de comprender cómo responden distintos genotipos a las señales ambientales que regulan su desarrollo. Esta información es clave tanto para optimizar el cultivo de especies de interés como para anticipar el comportamiento de especies relacionadas que pueden actuar como malezas agrícolas (Kim et al., 2009; Fan et al., 2022).

HIPÓTESIS

Los biotipos de *Brassica rapa* difieren en sus requerimientos para la inducción floral, algunos responden principalmente al fotoperíodo, otros requieren además un periodo de vernalización para alcanzar la floración. Por tanto, la vernalización aumentará la proporción de plantas que florezcan y reducirá el tiempo a floración en los biotipos dependientes de frío.

OBJETIVO

Objetivo general: Evaluar el efecto del fotoperíodo y la vernalización en tres biotipos de *Brassica rapa* L.

Objetivos específicos:

- Determinar la interacción entre fotoperíodo, vernalización y biotipo.
- Comparar la sensibilidad a la vernalización entre los biotipos.
- Establecer diferencias en los requerimientos de grados día acumulados a floración.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ensayo de vernalización y fotoperíodo

Se realizó un ensayo en condiciones controladas de laboratorio para evaluar el efecto del fotoperíodo y la vernalización sobre la floración, utilizando tres biotipos (Tabla 1) con floración contrastante (observaciones de un ensayo previo a campo). Se establecieron dos regímenes de luz para simular días cortos y largos: 12 y 16 horas de luz, respectivamente. Además, se aplicaron dos tratamientos de vernalización a 10°C y con un fotoperíodo de 10 horas de luz, con duraciones de 3 y 9 semanas: momento 1 y momento 2, respectivamente. Para cada biotipo se incluyó un grupo control, sin vernalización, expuestos únicamente a los dos fotoperíodos anteriormente mencionados.

Para la obtención de las plantas, se sembraron semillas de cada biotipo en macetas de plástico de 280 cm³, bajo un fotoperíodo de 10 horas de luz. En total se produjeron 109 plantas: 37 del biotipo BAL19, 38 del biotipo BAL08, y 34 del biotipo SCB. Las plantas de cada biotipo fueron asignadas de manera aleatoria a cada tratamiento una vez que tuvieron las dos primeras hojas verdaderas completamente desarrolladas. El riego se realizó de manera manual, cada 2-3 días, manteniendo un nivel adecuado de humedad, evitando el exceso o la falta de agua.

El día 16 de agosto se dio comienzo al ensayo, los individuos control fuera de cámara y los de momento 1 y 2 dentro de la misma, a la espera de que se cumplan los plazos estipulados para cada tratamiento. El día 6 de septiembre se sacaron las plantas pertenecientes al momento 1 (3 semanas de vernalización) y se colocaron con los controles anteriormente mencionados. Mismo procedimiento se realizó el día 18 de octubre con las pertenecientes al momento 2 (9 semanas de vernalización).

Descripción de los biotipos

Tabla 1. Biotipos analizados en el ensayo.

Población	Origen	Año	Estatus biológico	Observaciones	Coordenadas
BAL08	Balcarce, Buenos Aires	2008	Silvestre	Establecimiento “La Isaura”. Linderas a lote colza Nexera.	37°35'25"S 58°31'59"W
SCB	Bariloche, Río Negro	2017	Silvestre	Borde del lago Nahuel Huapi, en Puerto Pañuelo.	41°3'13.4"S 71°31'52.8"W
BAL19	Balcarce, Buenos Aires	2019	Silvestre	Borde de lote. Misma ubicación que BAL 08.	37°35'25"S 58°31'59"W



Figura 3. Siembra de los biotipos BAL19, BAL08 y SCB.



Figura 4. Estado de plántula de la especie *Brassica rapa* L.



Figura 5. Plantas en estado de floración. En la imagen de la izquierda se diferencian los tres biotipos, de izquierda a derecha (BAL08, SCB, BAL19).

Análisis de Datos

Para el análisis de datos, se asignaron valores de grados día acumulados a floración (GDA) a las plantas que no alcanzaron la floración durante el período de observación, con el fin de mantener el tamaño muestral y alcanzar la potencia estadística necesaria para el ajuste de los modelos. El criterio adoptado consistió en asignar, a cada planta no florecida, el mayor valor de GDA registrado en plantas florecidas del mismo biotipo.

En primera instancia, se ajustó un modelo lineal general (GLM) para evaluar el efecto de tres factores sobre la variable respuesta, GDA a floración: fotoperíodo (12 horas de luz y 16 horas de luz), vernalización (0, 3 y 9 semanas) y biotipo (BAL19, BAL08 y SCB). El análisis de varianza se realizó mediante un ANOVA de tipo III, dado que este enfoque es más conservador frente al desequilibrio en el número de observaciones entre tratamientos. Dada la presencia de una interacción significativa de orden triple entre biotipo, vernalización y fotoperíodo, se procedió a realizar análisis separados para cada biotipo, utilizando también GLMs con los factores fotoperíodo y vernalización como variables explicativas.

En todos los casos, se comprobaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza (homocedasticidad). Los GLMs se realizaron utilizando el paquete *nlme* y la función *lme*. La función *lsmeans* del paquete *lsmeans* se utilizó para evaluar las diferencias significativas entre tratamientos y sus interacciones a través del test a posteriori LSD. Los análisis estadísticos se realizaron en R versión 4.5.1.

Para realizar una interpretación más realista de los resultados, se incluyó un gráfico con los porcentajes finales de plantas florecidas por biotipo dentro de cada tratamiento.

RESULTADOS

Análisis general

El análisis de varianza indicó que el fotoperíodo fue el factor de mayor peso estadístico ($F = 68,59$ y $p < 0,001$), sugiriendo que la duración del día influye de manera considerable en la inducción floral. Asimismo, se observó un efecto significativo del biotipo ($F = 41,95$ y $p < 0,001$), lo que evidencia la existencia de variabilidad genética en la respuesta a los tratamientos. El tratamiento de vernalización también resultó significativo ($F = 32,99$ y $p < 0,001$), aunque con un efecto menor en comparación con los factores anteriores. Además, se detectaron interacciones significativas de primer, segundo y tercer orden, destacándose especialmente la triple interacción Biotipo $\times$ Fotoperíodo $\times$ Vernalización ($F = 5,0941$ y $p = 0,00094$).

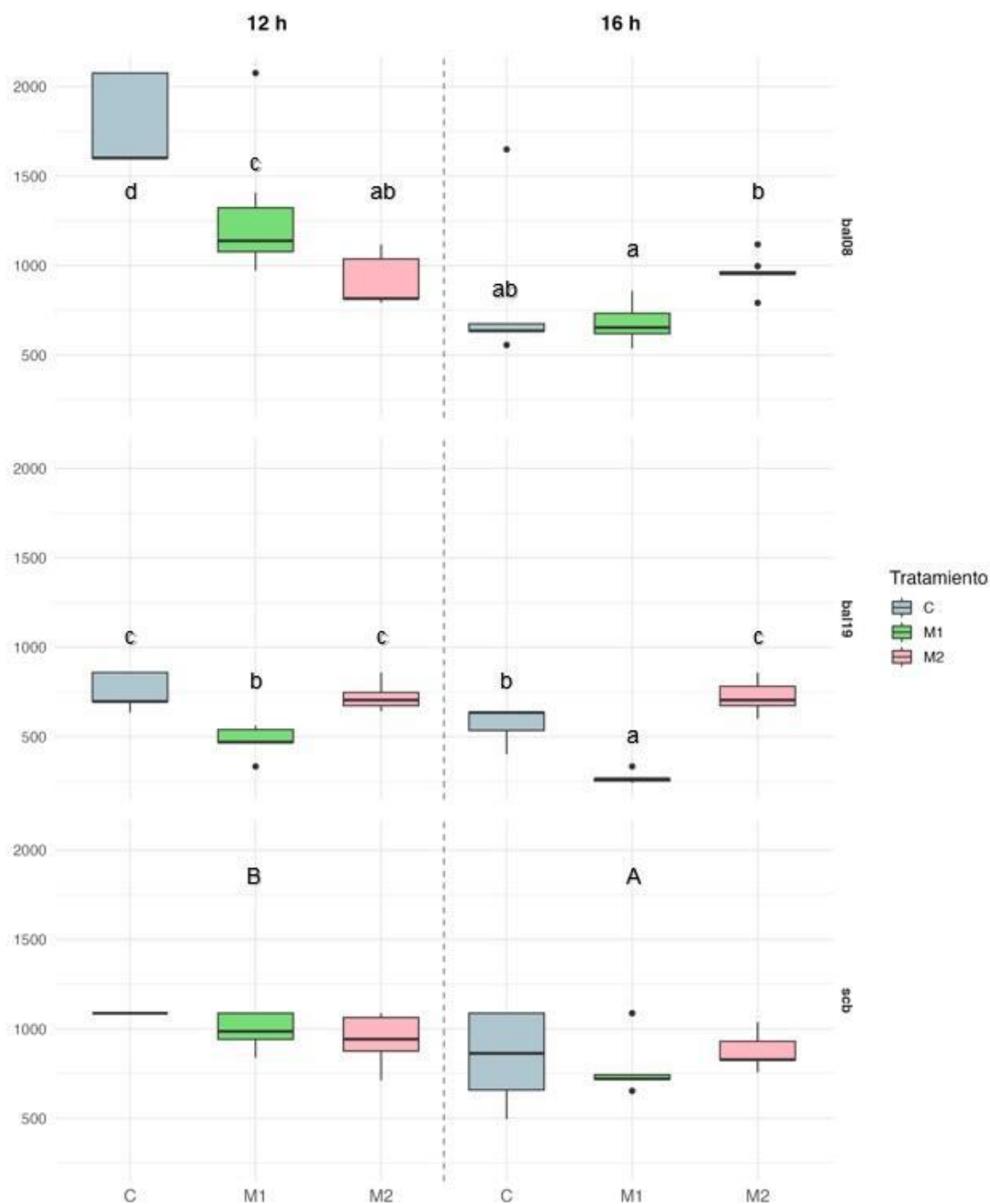


Figura 6. Grados día acumulados a floración para los biotipos BAL08, BAL19 y SCB en los fotoperiodos de 12 horas luz y 12 horas oscuridad y 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad, para los tratamientos: sin vernalización (C: Control), 3 semanas de vernalización (M1) y 9 semanas de vernalización (M2). Distintas letras indican diferencias significativas ($p < 0,05$; test post hoc LSD) entre tratamientos. Letras minúsculas indican diferencias significativas en los niveles de factor de la interacción entre los factores fotoperiodo y vernalización; letras mayúsculas indican diferencias significativas entre los niveles de factor fotoperiodo.

Análisis por biotipo

BAL08: Los grados día acumulados a floración (GDA) se vieron significativamente afectados por la interacción entre vernalización y fotoperíodo ($F = 12,08$; $p < 0,001$). Este biotipo presentó un efecto marcado de la vernalización bajo el fotoperíodo de 12 horas de luz, exhibiendo diferencias significativas en los GDA a floración. El control presentó los mayores valores, seguido por el tratamiento de 3 semanas de vernalización (*i.e.*, momento 1) y, por último, el tratamiento de 9 semanas de vernalización (*i.e.*, momento 2). Este patrón no se observó bajo el fotoperíodo de 16 horas de luz, donde el tratamiento de vernalización de 3 semanas (*i.e.*, momento 1), no presentó diferencias significativas con respecto al control ($p = 0,9184$), y el tratamiento de 9 semanas de vernalización (*i.e.*, momento 2) incrementó los GDA a floración. En términos generales, se observa que el fotoperíodo de 16 horas de luz disminuyó los GDA a floración, observándose que los valores de GDA bajo este fotoperíodo son significativamente menores que los presentados por los individuos control y momento 1 bajo el fotoperíodo de 12 horas de luz.

BAL19: Los grados día acumulados a floración (GDA) se vieron significativamente afectados por la interacción entre vernalización y fotoperíodo ($F = 6,253$; $p = 0,005$). Los menores valores se presentaron bajo el tratamiento de 3 semanas de vernalización (*i.e.*, momento 1) combinado con un fotoperíodo de 16 horas de luz. Mientras que, los mayores valores se registraron en el tratamiento control bajo fotoperíodo de 12 horas de luz. Asimismo, los individuos bajo el tratamiento de 9 semanas de vernalización (*i.e.*, momento 2) tendieron a incrementar los valores de GDA a floración. Este aumento fue significativo bajo el fotoperíodo de 16 horas de luz ($p = 0,0377$), mientras que bajo el de 12 horas no se detectaron diferencias significativas respecto al control ($p = 0,9922$).

Biotipo SCB: Los grados día acumulados a floración (GDA) se vieron afectados significativamente por el fotoperíodo ($F = 6,9331$; $p = 0,0138$). Las plantas expuestas a fotoperíodo de 16 horas de luz, acumularon menos GDA que las plantas colocadas bajo el fotoperíodo de 12 horas de luz ($p = 0,0029$). Sin embargo, la vernalización resultó fundamental para este biotipo (véase porcentaje de floración).

Porcentaje de floración

No todos los individuos del ensayo lograron llegar a floración (Figura 7), para el análisis estadístico se asignaron valores a las plantas que no florecieron, lo cual permitió efectuar las comparaciones entre tratamientos. No obstante, esto redujo el efecto de la vernalización y el fotoperíodo.

Los individuos controles (sin vernalización) de los tres biotipos, bajo fotoperíodo de 12 horas de luz, presentaron los menores porcentajes de floración. Los biotipos BAL19 y BAL08 presentaron el 60 % de plantas florecidas, mientras el biotipo SCB no floreció. En contraste, bajo el fotoperíodo de 16 horas de luz, todas las plantas de los biotipos BAL19 y BAL08 florecieron, mientras que el biotipo SCB obtuvo el 60 % de plantas florecidas.

El biotipo SCB fue el único que exhibió diferencias en los porcentajes de floración tras la vernalización, alcanzando los valores más altos tanto con 3 como con 9 semanas de tratamiento de frío, bajo el fotoperíodo de 16 horas de luz.

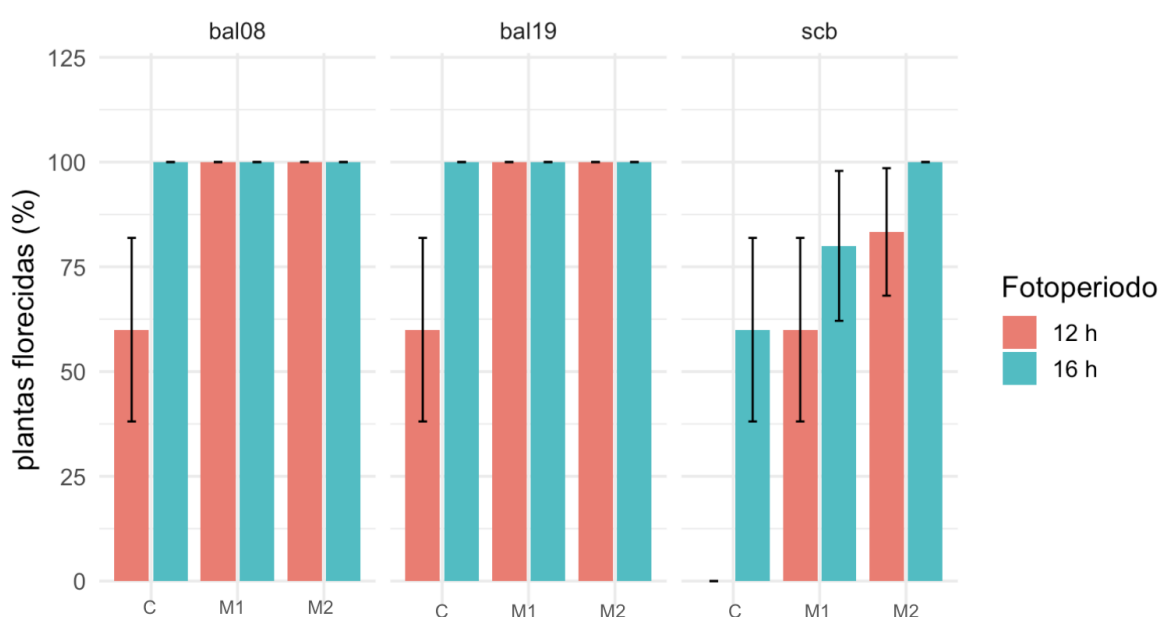


Figura 7. Porcentaje final de plantas florecidas (media $\pm$ EE) de los biotipos BAL08, BAL19 Y SCB, bajo dos fotoperíodos (12 y 16 horas de luz) y tres momentos de vernalización (control C, tres semanas de vernalización M1 y nueve semanas de vernalización M2).

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos en este estudio muestran que el proceso de inducción floral en *Brassica rapa* L. está fuertemente influenciado por factores ambientales como el fotoperíodo y la vernalización, pero que esta influencia no es homogénea entre biotipos diferentes, lo que evidencia una alta variabilidad genética intraespecífica (McAlvay et al., 2021; Torres Carbonell et al., 2017).

El fotoperíodo largo (16 h de luz) fue el principal factor que redujo los Grados Día Acumulados (GDA) necesarios para alcanzar la floración. Este resultado concuerda con estudios previos que describen a muchas especies de *Brassica* como plantas de días largos facultativas, en las que la exposición prolongada a la luz activa mecanismos asociados a la floración (Nelson et al., 2014; Fan et al., 2022).

La interacción entre fotoperíodo y vernalización mostró un efecto significativo en los biotipos BAL19 y BAL08. En BAL08, bajo días cortos, una exposición prolongada al frío acortó el tiempo hasta la floración; en contraste, bajo días largos, la vernalización perdió importancia e incluso llegó a retrasar el inicio reproductivo. En BAL19, una breve exposición al frío actuó como señal inductora de la floración, mientras que períodos más prolongados tendieron a retrasarla, independientemente de la longitud del día. Este patrón coincide con observaciones de campo, donde plantas de este biotipo trasplantadas en otoño florecieron durante el invierno (julio/agosto). En el biotipo SCB, aunque el efecto de la vernalización no fue estadísticamente significativo, el porcentaje de plantas florecidas reveló su importancia. Durante el ensayo se registraron individuos no vernalizados que crecían sin inducir la floración o que incluso morían sin llegar a florecer.

Estos resultados indican que los tres biotipos presentan una respuesta combinada a señales térmicas y lumínicas, pudiendo ser interpretada como una estrategia adaptativa a climas templados donde el frío invernal y el alargamiento de los días primaverales actúan en conjunto para garantizar la floración en un momento adecuado del año, aumentando sus posibilidades de supervivencia y persistencia en el ambiente (Kim et al., 2009; Fan et al., 2022; Dai et al., 2021).

La triple interacción significativa entre biotipo, fotoperíodo y vernalización evidencia que no es posible generalizar la respuesta floral dentro de la especie *Brassica rapa* L. sin tener en cuenta la variabilidad genética. Esta heterogeneidad tiene importantes implicancias agronómicas y ecológicas. Por un lado, permite seleccionar biotipos adaptados a diferentes ambientes o modificar las estrategias de manejo. Por otro, representa un riesgo en contexto de presencia de malezas con capacidades de hibridación, ya que estas diferencias pueden facilitar la persistencia o expansión de ciertos individuos (Torres Carbonell et al., 2017; Anjum et al., 2018).

Además, los resultados destacan la plasticidad fenotípica de *B. rapa* L., es decir, su capacidad de modificar el desarrollo en función del ambiente (Lu et al., 2022; Jackson et al., 2024). Esta plasticidad puede ser beneficiosa desde el punto de vista evolutivo, pero representa un desafío para el manejo agronómico en el caso de presentarse en forma de maleza dentro del cultivo o en programas de mejoramiento, donde la estabilidad de los caracteres fenológicos es clave (Bortoloti y Baron, 2022).

Desde una perspectiva de manejo, comprender los requerimientos de floración permite anticipar el comportamiento de las brasicáceas como malezas y planificar una estrategia de control efectiva. Los biotipos con menores requerimientos de vernalización y que responden rápidamente al fotoperíodo largo (BAL19 y BAL08), tienen mayor potencial de convertirse en especies problemáticas en regiones templadas o subtropicales.

Finalmente, los resultados de este trabajo refuerzan la importancia de integrar enfoques ecofisiológicos a la hora de la planificación agrícola. En un contexto de constante cambio climático, donde los patrones térmicos se ven alterados (Anjum et al., 2018), contar con información detallada sobre la floración de los cultivos, sus parientes silvestres o malezas permite diseñar sistemas más resilientes y sostenibles en el tiempo.

CONCLUSIONES

- La exposición a días largos (16 horas de luz) redujo significativamente los Grados Día Acumulados (GDA) a floración en los tres biotipos estudiados, lo que evidencia el rol determinante del fotoperíodo en la inducción floral. Este patrón es coherente con el carácter de planta facultativa de día largo de la especie.
- En BAL19 y BAL08, el fotoperíodo resultó ser el factor más influyente en la reducción de los GDA a floración. A su vez, su interacción con la vernalización exhibió efectos significativos en ambos biotipos, lo que sugiere que la combinación de señales lumínicas y térmicas maximizan la respuesta floral.
- En el biotipo SCB, la vernalización resultó ser el factor más influyente, si bien no se vio reflejado estadísticamente, durante el ensayo se observaron plantas no vernalizadas que no indujeron floración o murieron sin florecer.
- Los tres biotipos presentan respuesta combinada a señales térmicas y lumínicas, esto puede interpretarse como una estrategia de adaptación a diferentes condiciones climáticas.
- La triple interacción significativa entre biotipo, fotoperíodo y vernalización confirma que la respuesta floral es altamente dependiente del biotipo, existiendo una marcada variabilidad genética intraespecífica, por lo que no se deben generalizar los requerimientos de la especie sin un análisis previo de cada material.
- La identificación de biotipos con distintos requerimientos de floración permite diseñar estrategias de siembra adaptadas a las condiciones ambientales de cada región. Esto es particularmente útil para escalonar cosechas, evitar pérdidas por floración anticipadas o, en sistemas hortícolas, programar la producción según la época de demanda. En el caso del control de malezas permite establecer correctamente el momento de una aplicación de control y que la misma resulte eficiente y eficaz.
- Comprender la respuesta combinada a fotoperíodo y vernalización es clave para seleccionar parentales y generar variedades adaptadas a nuevos escenarios climáticos. En este sentido, los biotipos BAL19 y BAL08 representan un recurso genético valioso para zonas con inviernos suaves, mientras que SCB podría aprovecharse en regiones con inviernos más marcados.
- La variabilidad en los requerimientos de floración tiene implicancias para el control de brasicáceas como malezas. Biotipos de baja o nula dependencia de vernalización, como BAL19 y BAL08, podrían convertirse en invasores al adaptarse a un rango más amplio de condiciones, por esta razón la identificación del material será un factor clave a la hora de la planificación de un control.

BIBLIOGRAFÍA

- Al-Shehbaz, I. A. (2025).** The Brassicaceae then and now: Advancements in the past three decades, a review. *Annals of Botany*. <https://academic.oup.com/aob/advance-article/doi/10.1093/aob/mcaf055/8095356?searchresult=1&login=false>
- Amasino, R. (2004).** Vernalization, competence, and the epigenetic memory of winter. *The Plant Cell*, 16(suppl_1), S255–S264.
- Andrés, F., & Coupland, G. (2012).** The genetic basis of flowering responses to seasonal cues. *Nature Reviews Genetics*, 13(9), 627–639.
- Anjum, N. A., Gill, S. S., Dhankher, O. P., Jimenez, J. F., & Tuteja, N. (2018).** Editorial: The Brassicaceae—Agri-Horticultural and Environmental Perspectives. *Frontiers in Plant Science*. <https://www.frontiersin.org/journals/plant-science/articles/10.3389/fpls.2018.01141/full>
- Bortoloti, G. A., & Baron, D. (2022).** Phytoremediation of toxic heavy metals by Brassica plants: A biochemical and physiological approach. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666765722000400>
- Chouard, P. (1960).** Vernalization and its relations to dormancy. *Annual Review of Plant Physiology*, 11(1), 191–238.
- Dai, Y., Sun, X., Wang, C., Li, F., Zhang, S., Zhang, H., Li, G., Yuan, L., Chen, G., Sun, R., & Zhang, S. (2021).** Gene co-expression network analysis reveals key pathways and hub genes in Chinese cabbage (*Brassica rapa* L.) during vernalization. *BMC Genomics*. <https://bmcbgenomics.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12864-021-07510-8>
- De Souza Maia, M., Maia F.C., & Pérez M.A. (2006).** *Soil seed banks*. *Agriscientia* XXIII (1): 33-44.
- Diez de Ulzurrun, P., Gigón, R., & Yanniccari, M. (2024).** *Brasicáceas o crucíferas: Bases para su manejo y control en sistemas de siembra directa*. Aapresid. <https://www.aapresid.org.ar/blog/brasicaceas-o-cruciferas>
- Fan, S., Liu, H., Liu, J., Hua, W., & Li, J. (2022).** *BnGF14-2c Positively Regulates Flowering via the Vernalization Pathway in Semi-Winter Rapeseed*. *Plants*, 11(17), 2312. <https://www.mdpi.com/2223-7747/11/17/2312>
- Huang, X.-C., German, D. A., & Koch, M. A. (2020).** *Temporal patterns of diversification in Brassicaceae demonstrate decoupling of rate shifts and mesopolyploidization events*. *Annals of Botany*, 125(1), 29–47. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6948214/>
- Jackson, A. C., Carine, M. A., & Chapman, M. A. (2024).** Genomics of ecological adaptation in Canary Island *Descurainia*. *Ecology and Evolution*. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ece3.70144>
- Juan, V. J., Ciolli, S., Saint André, H., Núñez Fré, F., & Fernández, R. (2016).** *Brassica rapa* (Nabo). Blog de Aapresid, Asociación Argentina de Productores en Siembra Directa. Disponible en <https://www.aapresid.org.ar/blog/brassica-rapa-nabo>

- Kim, D. H., Doyle, M. R., Sung, S., & Amasino, R. M. (2009).** Vernalization: winter and the timing of flowering in plants. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 25, 277–299. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/15831380/>
- Kim, D. H., Hyun, Y., & Sung, S. (2017).** Vernalization: Winter and the timing of flowering in plants. *Annual Review of Cell and Developmental Biology*, 33, 491–513.
- Lu, Z., Ma, C., Xie, Y., Zeng, Y., Peng, J., Zhou, D., & Wu, J. (2022).** Understanding the brassinosteroid-dependent environmental adaption in Brassicaceae plants. *Plants*. <https://www.mdpi.com/2223-7747/14/10/1554>
- McAlvay, A. C., Ragsdale, A. P., Mabry, M. E., Qi, X., Bird, K. A., Velasco, P., An, H., Pires, J. C., & Emshwiller, E. (2021).** *Brassica rapa* domestication: Untangling wild and feral forms and convergence of crop morphotypes. *Molecular Biology and Evolution*, 38(8), 3358–3372. <https://academic.oup.com/mbe/article/38/8/3358/6261082>
- Nelson, M. N., Rajasekaran, R., Smith, A., Chen, S., Beeck, C. P., Siddique, K. H. M., & Cowling, W. A. (2014).** Quantitative trait loci for thermal time to flowering and photoperiod responsiveness discovered in summer annual-type *Brassica napus* L. *PLOS ONE*. <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371%2Fjournal.pone.0102611>
- Pelliza, Y.I., Souto, C.P., & Tadey M. (2023).** *Estrategias de germinación en distintos tipos sucesionales de especies del Monte Patagónico*. *Ecología Austral*, 33:757-772.
- Srikanth, A., & Schmid, M. (2011).** Regulation of flowering time: all roads lead to Rome. *Cellular and Molecular Life Sciences*, 68(12), 2013–2037.
- Thomas, B., & Vince-Prue, D. (1997).** Photoperiodism in plants (2nd ed.). Academic Press.
- Torres Carbonell, F. J., Presotto, A. D., & Ureta, M. S. (2017).** *Flujo génico diferencial en híbridos Brassica napus L. × B. rapa L.* [Resumen de congreso, XLVI Congreso Argentino de Genética; IV Jornada Regional NOA]. *Journal of Basic and Applied Genetics*. Sociedad Argentina de Genética. ISSN 1852-6233. Disponible en <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/262713>

ANEXO

Análisis exploratorio inicial en base a modelo lineal, utilizando como variable respuesta GDA y como variables explicativas a: fotoperíodo (12 horas de luz y 16 horas de luz), tratamiento (control=sin vernalización; momento 1= 3 semanas de vernalización y momento 2= 9 semanas de vernalización) y biotipo: BAL19, BAL08 Y SCB.

Coeficiente	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1791.06	82.03	21.835	< 2e-16 ***
Biotipo BAL19	-1041.59	116.00	-8.979	3.49e-14 ***
Biotipo SCB	-703.13	116.00	-6.061	3.02e-08 ***
Tratamiento momento 1	-506.85	107.40	-4.719	8.53e-06 ***
Tratamiento momento 2	-872.49	107.40	-8.124	2.12e-12 ***
Fotoperiodo 16	-960.73	116.00	-8.282	9.95e-13 ***
BAL19 × Tratamiento momento 1	235.61	154.50	1.525	0.130727
SCB × Tratamiento momento 1	407.43	158.08	2.577	0.011565*
BAL19 × Tratamiento momento 2	844.23	151.88	5.558	2.69e-07 ***
SCB × Tratamiento momento 2	725.25	154.50	4.694	9.41e-06 ***
BAL19 × Fotoperiodo 16	780.09	164.05	4.755	7.40e-06 ***
SCB × Fotoperiodo 16	711.92	164.05	4.340	3.69e-05 ***
Tratamiento momento 1 × Fotoperiodo 16	356.18	151.88	2.345	0.021195 *
Tratamiento momento 2 × Fotoperiodo 16	1002.32	149.89	6.687	1.80e-09 ***

BAL19 × Tratamiento momento 1 × Fotoperiodo 16	-386.03	216.65	-1.782	0.078116
SCB × Tratamiento momento 1 × Fotoperiodo 16	-310.40	223.57	-1.388	0.168399
BAL19 × Tratamiento momento 2 × Fotoperiodo 16	-817.73	213.59	-3.832	0.000234 ***
SCB × Tratamiento momento 2 × Fotoperiodo 16	-816.37	215.26	-3.792	0.000268 ***

Salida del análisis Anova tipo III.

	Sum Sq	Df	F value	Pr(>F)
(Intercept)	16039469	1	476.7783	< 2.2e-16 ***
Biotipo	2823097	2	41.9587	1.223e-13 ***
Tratamiento	2220317	2	32.9998	1.671e-11 ***
Fotoperiodo	2307512	1	68.5915	9.955e-13 ***
Biotipo:Tratamiento	1380520	4	10.2591	6.683e-07 ***
Biotipo:Fotoperiodo	933350	2	13.8721	5.515e-06 ***
Tratamiento:Fotoperiodo	1637863	2	24.3430	3.404e-09 ***
Biotipo:Tratamiento:Fotoperiodo	685490	4	5.0941	0.0009482 ***
Residuals	3061363	91		

En esta primera aproximación podemos ver que el factor que tiene más peso (f value mayor) es el fotoperiodo, seguido por biotipo y luego el tratamiento de vernalización. Además, las interacciones entre los factores son significativas.

Análisis por biotipo:

Salida Modelo lineal BAL19:

Coefficiente	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1291.388	189.065	6.830	1.18e-07 ***
Tratamiento momento 1	-181.697	252.985	-0.718	0.47800
Tratamiento momento 2	-582.039	247.544	-2.351	0.02525 *
Fotoperiodo	-45.160	13.369	-3.378	0.00198 **
Tratamiento momento 1 × Fotoperiodo	-7.462	17.805	-0.419	0.67803
Tratamiento momento 2 × Fotoperiodo	46.148	17.504	2.636	0.01297 *

Salida Anova tipo III BAL19:

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	F	Pr(>F)
(Intercept)	333536	1	46.6543	1.185e-07 ***
Tratamiento	43650	2	3.0528	0.061628 .
Fotoperiodo	81576	1	11.4107	0.001984 **
Tratamiento × Fotoperiodo	89409	2	6.2532	0.005230 **
Residuals	221622	31		

En los datos obtenidos del biotipo BAL19 observamos que hay una interacción significativa entre tratamiento y fotoperíodo.

Salida modelo lineal BAL08:

Coeficiente	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	4673.25	582.19	8.027	2.92e-09 ***
Tratamiento momento 1	-1575.40	762.26	-2.067	0.0467 *
Tratamiento momento 2	-3879.44	755.08	-5.138	1.23e-05 ***
Fotoperiodo	-240.18	41.17	-5.834	1.57e-06 ***
Tratamiento momento 1 × Fotoperiodo	89.05	53.90	1.652	0.1080
Tratamiento momento 2 × Fotoperiodo	250.58	53.19	4.711	4.32e-05 ***

Salida Anova tipo III BAL08:

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	F	Pr(>F)
(Intercept)	4367859	1	64.434	2.916e-09 ***
Tratamiento	1884790	2	13.902	4.174e-05 ***
Fotoperiodo	2307512	1	34.040	1.571e-06 ***
Tratamiento × Fotoperiodo	1637863	2	12.081	0.0001157 ***

Residuals	2237011	33		
-----------	---------	----	--	--

Al igual que en el biotipo anterior, en BAL08 hay una interacción significativa entre tratamiento y fotoperíodo.

Salida modelo lineal SCB:

Coeficiente	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1834.36	334.09	5.491	8.18e-06 ***
Tratamiento momento 1	-236.76	472.48	-0.501	0.6204
Tratamiento momento 2	-705.09	447.04	-1.577	0.1264
Fotoperiodo	-62.20	23.62	-2.633	0.0138 *
Tratamiento momento 1 × Fotoperiodo	11.45	33.41	0.343	0.7346
Tratamiento momento 2 × Fotoperiodo	46.49	31.46	1.477	0.1511

Salida Anova tipo III SCB:

Fuente	Suma de Cuadrados	gl	F	Pr(>F)
(Intercept)	672977	1	30.1468	8.177e-06 ***
Tratamiento	58954	2	1.3205	0.28371
Fotoperiodo	154769	1	6.9331	0.01383 *

Tratamiento × Fotoperiodo	54800	2	1.2274	0.30888
Residuals	602730	27		

En el caso del biotipo SCB, las salidas estadísticas nos arrojan que sólo está afectado por el fotoperíodo.