

CAPÍTULO 9

Mejoramiento genético del lino, la colza y el cártamo

Rodolfo Bezus, Lucrecia C. Gieco, Adriana M. Chamorro y Griselda E. Sánchez Vallduví

Introducción

El primer proceso de mejoramiento que sufrió todo cultivo es la domesticación y la selección que los propios agricultores fueron haciendo a través del tiempo, eligiendo las semillas de las plantas más productivas o adaptadas a las diferentes condiciones de crecimiento. Luego esa selección inicial se fue haciendo más precisa, buscando características agronómicas como longitud de ciclo, uniformidad y otras que favorecieran el proceso de producción. Posteriormente, para las distintas especies, se fueron desarrollando planes de mejoramiento genético, utilizando métodos y técnicas adaptadas a las características reproductivas de cada una y a los distintos objetivos planteados.

En este contexto, el **lino**, la **colza** y el **cártamo** sufrieron un proceso similar, pero con diferencias. La importancia que cada uno de ellos fue adquiriendo, a nivel mundial y nacional, incidió en las tareas de mejoramiento de las que fueron objeto. Así, si bien para los tres cultivos se han desarrollado planes de mejora en nuestro país, el más prolongado en el tiempo y que más resultados ha tenido en cuanto a número de materiales genéticos obtenidos y difundidos, es el programa de mejoramiento de lino, que se inició en la sede del INTA EEA Pergamino y, posteriormente, se trasladó al INTA EEA Paraná. El programa de cártamo, con sede en el INTA EEA Las Breñas, duró pocos años, y el de colza, con sede en el INTA EEA Paraná, hace relativamente poco tiempo que está en marcha. Como contrapartida, las actividades de mejora a nivel mundial han tenido mayor importancia en el cultivo de colza, que en el de lino o el de cártamo, lo que se relacionó con una necesidad genuina de algunos países de contar con una oleaginosa adaptada a climas templados o templado-fríos que produjera aceite comestible. Como, además se trataba de países desarrollados, tales como Canadá y Francia, fueron capaces de hacer la inversión necesaria para desarrollar planes de mejora de envergadura. De todos modos, en los tres cultivos las tareas continúan, habiéndose incorporado en las mismas técnicas modernas, basadas en la ingeniería genética, que facilitan o aceleran muchas de las actividades necesarias en el mejoramiento tradicional. Si bien muchos de los objetivos de mejora tradicionales se mantienen, también

se han ido incorporando otros, que inicialmente no se tomaban en consideración, como la obtención de materiales con calidades de aceite diferenciadas, y también mejoras en la calidad de los residuos de la extracción del aceite.

En este capítulo se presentan los principales objetivos y técnicas aplicadas en el mejoramiento genético de estos cultivos, los cuales han permitido ampliar las posibilidades de uso de los mismos y mejorar sus características agronómicas para favorecer su inclusión en los sistemas productivos. Estas actividades se vienen llevando a cabo en programas de mejoramiento de diversas instituciones estatales y privadas. Cabe resaltar la importancia que ha tenido y tiene la participación de los destinatarios en el proceso de formulación de los objetivos, de modo de buscar mejoras en aspectos de sus intereses. En los últimos tiempos, se ha valorizado, además, la necesidad de que en el mejoramiento se planteen objetivos que tiendan a un modelo de producción sustentable (Capítulos 1 y 10).

Mejoramiento genético de lino

El lino es una de las plantas cultivadas más antiguas, y es la única de importancia agrícola de la familia lináceas, familia que consiste en 13 géneros y 300 especies (Heywood, 1978). Su ascendiente más cercano sería el lino silvestre (*Linum angustifolium*), única especie con la cual se cruza fácilmente, la cual tiene el mismo número cromosómico ($2n=30$). Se originó en las regiones del Mediterráneo y el suroeste de Asia (Capítulo 3).

En Argentina se ha desarrollado mejoramiento genético del lino desde 1919, cuando el criadero Klein comenzó a trabajar en el desarrollo de cultivares. A partir de 1925, en la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino de INTA se dio comienzo a los trabajos en mejoramiento genético en una institución estatal.

Hasta la década del '80, en el país existían producciones comerciales de lino textil, situadas principalmente en la provincia de Buenos Aires. La progresiva desaparición de este destino de la producción provocó también el abandono de las líneas y variedades aptas para este fin. Las mismas, además de diferencias genéticas en la estructura de la planta, estaban apoyadas en una tecnología agronómica e industrial particular. Dado que la producción actual del cultivo en el país es de lino oleaginoso se hará referencia al mejoramiento genético para dicho destino.

Actualmente, la superficie cultivada es reducida en comparación con otros cultivos extensivos, pero se observa una demanda de este grano en dos mercados diferentes: el primero, como alimento con características nutraceuticas, ya sea como consumo humano directo o para la alimentación de animales de los cuales luego se aprovecharán sus productos y sub productos (huevos, carne, leche) y el segundo, en el uso de su aceite para la fabricación de pinturas, tintas para imprenta, linóleos, etc., productos demandados por su calidad industrial y su origen natural (Capítulo 2).

Hoy, la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Paraná del INTA continúa en el desarrollo de germoplasma, siendo el único lugar en Argentina que tiene programa de mejoramiento del

cultivo. El desarrollo de germoplasma se realiza para lograr un aumento del rendimiento de semilla y aceite por hectárea, mediante la obtención de variedades resistentes a las principales enfermedades, buena capacidad productiva bajo condiciones ambientales estresantes y de fácil cosecha. En los últimos 40 años, producto de las líneas de investigación llevadas adelante en el programa de mejoramiento de la EEA se han liberado al mercado numerosos cultivares: TEZANOS PINTO TARAGÜI (1980), PARANÁ INTA (1980), TAPE PARANÁ INTA (1980), PAISANO INTA (1988), PROINTA OMEGA (1998), PROINTA LUCERO (2000), PROINTA CARAPÉ (2003), CURUNDÚ INTA (2005), PANAMBÍ INTA (2006), CABURÉ INTA (2013) y AGUARÁ INTA (2013). Hoy el programa cuenta con germoplasma desarrollado próximo a su inscripción en los registros de INASE para su comercialización a través de convenios de transferencia de tecnología.

Objetivos de mejoramiento

Por lo mencionado anteriormente, el objetivo general del programa de mejoramiento actual de INTA es la obtención de cultivares (variedades) de lino (aunque también se ha trabajado en la obtención de híbridos) adaptados a las distintas regiones lineras del país que superen a los existentes en una o más de las siguientes características: rendimiento, sanidad, calidad y resistencia a factores abióticos. Los objetivos específicos que se persiguen son obtención de cultivares:

- de alto potencial de rendimiento
- resistentes al *Fusarium oxysporum* f.sp. *lini* (marchitamiento), *Septoria linicola* (pasma) y *Melampsora lini* (roya del lino)
- con alto contenido en aceite ($\geq 45\%$) de alta calidad industrial (el elevado contenido de ácido linolénico le otorga la propiedad de “secante” para la fabricación de pinturas y barnices), o apto para el consumo humano mediante la modificación del perfil de ácidos grasos (reducción del contenido de ácido linolénico (3%) e incremento del linoleico (72%))
- con madurez uniforme
- resistentes al vuelco, frío y otros factores abióticos

En Canadá se han obtenido variedades conocidas como LINOLA, con contenido reducido de ácido linolénico, que permitieron mejorar la estabilidad a altas temperaturas y bajo contenido de ceras en la semilla (atractivo para procesadores de alimentos para animales). Si bien estos logros en la modificación del perfil de ácidos grasos impactaron positivamente en la superficie cultivada, tanto en Australia como en Canadá, es importante estratégicamente mantener y desarrollar germoplasma tanto con las propiedades naturales secantes de uso industrial del aceite o como fuente para alimentos enriquecidos en omega3 (perfil de ácidos grasos normal) y como generar alternativas como las mencionadas (bajo linolénico), que permitan la diversificación por parte del productor y la industria.

La selección de semillas por color de tegumento claro, con el fin de hacerlas más atractivas para los consumidores es otro objetivo que se ha propuesto, sobre el cual se está trabajando en la actualidad en planes de mejora en la EEA Paraná, Argentina.

Obtención de variabilidad genética

Para cumplir con estos objetivos y obtener nuevos genotipos que superen a los existentes en una o más de estas características, es necesaria la creación de nuevas combinaciones genéticas y para ello se ha realizado la **introducción y evaluación de nuevo germoplasma**, de países que desarrollan trabajos de mejoramiento en lino (por ej. Canadá, Estados Unidos, Francia, Rusia), que posibilitaron ampliar la variabilidad genética, al usarlos como progenitores que poseen características agronómicas o industriales de interés. La **generación de variabilidad genética** se logra mediante la realización de cruzamientos forzados entre progenitores de diversos orígenes, siendo ésta la etapa inicial del proceso en un programa de mejoramiento genético. Los progenitores que participan del bloque de cruzamiento son seleccionados por poseer alguna de las características distintivas (potencial de rendimiento, resistencia a factores bióticos o abióticos, contenido de aceite y perfil de ácidos grasos) que se desean combinar con otras características presentes en otro progenitor e identificar luego en la progenie que estén presentes en un único genotipo. Los cruzamientos pueden ser biparentales o involucrar más progenitores para aumentar la posibilidad de combinar en nuevos genotipos todas las características deseadas.

El lino posee flor completa, hermafrodita. Es autógama, aunque se producen porcentajes variables de polinización cruzada. De acuerdo a Nichterlein (2003) esta especie tiene entre 5 y 10% de fertilización cruzada. Normalmente las flores se abren por la mañana, se produce la fecundación y, hacia el mediodía, los pétalos caen (Capítulo 3).

Para realizar los cruzamientos, una vez elegidos los progenitores se procede a castrar a la planta madre, lo cual se realiza al atardecer, eligiendo algunos pimpollos que vayan a abrir al día siguiente (se deben ver los pétalos enrollados en el extremo de los pimpollos). La flor castrada se rotula para identificarla y la polinización con el polen de la planta padre se realiza a las ocho o nueve horas (a la mañana siguiente) con la flor abierta la que será tapada con una bolsa de papel. Un retardo en la polinización puede determinar una baja producción de semilla, debido a que el polen se seca y deteriora rápidamente. A los tres o cinco días se comprueba si han cuajado las flores castradas.

Otra forma de lograr variabilidad genética es mediante un programa de **mutaciones**, en caso de no contar con la característica deseada en el germoplasma disponible a ser utilizado como progenitores (Green y Marshall, 1984; Rowland, 1991). Precisamente, mediante la inducción de mutaciones, se ha cambiado la composición del perfil de ácidos grasos del lino convencional, como es el caso de una empresa canadiense que ha obtenido con esta técnica genotipos denominados LINOLA™, los cuales poseen una proporción de ácido linoléico muy bajo (aproximadamente 2%). Su semilla es amarilla, con menos del 5% de ácido

linolénico, rica en fibra soluble, posee alta estabilidad oxidativa y su tallo de fibras ideales para producción de papel (resistente y liviana).

Conducción y selección de poblaciones segregantes

Los métodos de conducción y selección durante las generaciones de endocría puede ser cualquiera de los utilizados en los programas de mejoramiento de autógamias (Allard y Montoya, 1978; Fher, 1987; Cubero, 2013): pedigree, masal, SSD (descendencia por semilla única), retrocruzas, con las adaptaciones a las particularidades del lino y los objetivos perseguidos. Un esquema general de conducción de las diferentes generaciones, usado en la EEA Paraná, es el siguiente:

F1 (filial 1): Se cultivan mediante la siembra en surcos en ambientes con las mejores condiciones para poder producir la mayor cantidad de semillas por planta.

F2 (filial 2): Se siembran estas poblaciones en infectario de marchitamiento, caracterizado por una alta presión de inóculo del marchitamiento del lino (producido por *Fusarium oxysporum* f. sp. *lini*). Se realiza en esta generación una selección masal dirigida, entre las plantas sobrevivientes al marchitamiento, que tengan el mejor aspecto agronómico.

La resistencia a este hongo es de carácter poligénico y el método más utilizado es la selección de poblaciones segregantes en infectarios donde se siembra todos los años lino. El más antiguo de ellos es el desarrollado en North Dakota State University en Fargo, donde se siembra ininterrumpidamente lino desde 1894. En INTA EEA Paraná se cuenta con un infectario con monocultivo de lino desde hace más de 40 años.

F3 (filial 3): Se siembran en campo de rotaciones, en condiciones normales de cultivo. Se cosechan plantas individuales y se analizan los contenidos de aceite de cada muestra parcelaria, seleccionando más número de individuos en aquellas poblaciones cuya muestra presente mayor contenido de aceite.

F4 (filial 4): Se siembran nuevamente en infectario de marchitamiento. Se toman observaciones de resistencia a esta enfermedad. Se realiza una selección masal dirigida, entre las plantas sobrevivientes (o con pocos síntomas) de mejor aspecto agronómico.

F5 (filial 5): Se siembran en campo de rotaciones, en condición normal de cultivo, donde se cosechan plantas individuales y el resto, masalmente. Se realizan análisis de contenido de aceite. Simultáneamente se siembra una parcela en campo infectario para evaluar el comportamiento a marchitamiento.

F6 (filial 6) y filiales siguientes: Se siembran parcelas en campo de rotaciones y en infectario de marchitamiento. En las primeras se seleccionan plantas individuales o parcelas completas. Se realiza análisis de aceite.

Este esquema es dinámico y puede permitir modificaciones, especialmente para objetivos que tienen en cuenta aspectos de calidad.

Para el resto de las enfermedades de importancia para el lino, cuando las líneas son homocigotas se caracterizan en ensayos en condiciones normales de cultivo y en algunos casos se hacen inoculaciones para evaluar específicamente roya.

Evaluación del material avanzado e inscripción de nuevas variedades

A partir de F7 (cuando las líneas cuentan con más del 99% de homocigosis) las líneas seleccionadas de cada población se evalúan en ensayos comparativos de rendimiento, con un diseño estadístico apropiado y en diferentes fechas de siembra. Posteriormente, el germoplasma más avanzado, seleccionado por su desempeño en estos ensayos, será sembrado en ensayos regionales, en varias localidades para poder realizar, en base a sus rendimientos, adaptabilidad y características agronómicas generales, la definitiva selección para su eventual inscripción como nueva variedad.

Entre las características agronómicas que se tienen en cuenta para seleccionar las líneas que se ensayan, se debe mencionar que se pretende obtener genotipos con uniformidad a la madurez, que posibilite la cosecha directa sin corte e hilerado, con escaso o nulo rebrote. Los genotipos con esta característica (rebrotado) una vez que sus cápsulas alcanzan la madurez, continúan con la floración y producción de nuevas cápsulas, obteniendo un cultivo muy desuniforme en su fenología, por esto es que se busca que los cultivares no rebroten en estado avanzado de su desarrollo. En cuanto a la dehiscencia, se pretende una adecuada indehiscencia, es decir, que permita la trilla con facilidad pero que no sea excesivamente dehiscente y se produzca el desgrane en planta ante demoras en la cosecha. En cuanto al ciclo vegetativo, se está trabajando para obtener genotipos más precoces que los actualmente disponibles, para tener la opción, ante la necesidad, de liberar el lote más temprano, de acuerdo a la rotación prevista. En cuanto a la altura de plantas, característica que depende del ambiente, la fecha de siembra y densidad, además del genotipo, debe permitir alcanzar altos rendimientos por el desarrollo de la planta, pero evitando el riesgo de vuelco (60-80 cm).

Por su parte, para la inscripción de nuevas variedades se cumplirá con los requisitos exigidos por el Instituto Nacional de Semillas (INASE), para el registro de cultivares y el Registro de propiedad de cultivares.

Multiplicación de semilla de nuevas variedades

La multiplicación de los genotipos seleccionados se realiza desde el momento de la selección de los mismos para su evaluación en ensayos comparativos de rendimiento. De este modo, cuando el material esté listo para ser inscripto, simultáneamente se dispondrá de suficiente cantidad de semilla para entregar al multiplicador designado (mediante un convenio de transferencia de tecnología) para su posterior incremento y venta.

Para conservar la pureza varietal se puede proceder de acuerdo al siguiente esquema:

1. Se seleccionan 100 plantas que respondan a las características del cultivar. Se realiza en forma individual la trilla y limpieza de cada planta.
2. Se siembran 100 surcos de progenie y se cosechan individualmente los surcos cuyas plantas presentan características uniformes similares a la descripción original (descriptor presentado ante INASE).
3. Se siembra la semilla genética en parcelas individuales provenientes de los surcos seleccionados el año anterior y se realiza el control de pureza. Se cosechan las parcelas seleccionadas.
4. Se siembra la semilla prebásica, y se realiza control de pureza.
5. Se siembra la semilla fundadora y se realiza control de pureza. Se cosecha la semilla original.

Herramientas de biotecnología

Un programa de mejoramiento con técnicas convencionales, como el descrito arriba, puede ser asistido con herramientas de biotecnología para lograr mayor eficiencia. Dentro de estas herramientas, se pueden mencionar el cultivo de anteras, mediante el cual es posible obtener líneas homocigotas doble haploides en menor tiempo (1 a 2 generaciones) (Lassaga et al., 2004; Bretón et al., 2007; Lassaga et al., 2010). También, es posible lograr mayor eficiencia al realizar selección asistida por marcadores moleculares de ADN, identificando tempranamente (en plántula) y con precisión, genotipos portadores de una variante alélica asociada a la resistencia a un patógeno (Hausner et al., 1999^a; 1999b) o a una característica de calidad (Devinar et al., 2010).

A nivel mundial se encuentran disponibles marcadores moleculares de distintos tipos para caracterizar y seleccionar germoplasma, dentro de los cuales se puede mencionar: RAPD (*Random amplified polymorphic DNA*), RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphism*), AFLP (*Amplified Fragment Length Polymorphism*) y SSR (*Simple Sequence Repeat*).

Conservación de variabilidad genética en el mundo

La variabilidad genética de la especie se encuentra representada y conservada en Bancos de germoplasma en distintos países. Diederichsen (2007) lista en su publicación 33 instituciones que contribuyen a preservar el germoplasma. Estos bancos de germoplasma se encuentran en Rusia, Canadá, Etiopía, Estados Unidos, Rumania, China, República Checa, Alemania y Argentina, entre otros. El Instituto N. I. Vavilov en San Petersburgo contiene más de 3000 accesiones que representan variedades locales recolectadas antes de la Segunda Guerra Mundial (Diederichsen, 2007). En Argentina, la colección se encuentra en el Banco de germoplasma del Instituto de Recursos Biológicos del INTA (Castelar).

Mejoramiento genético de colza

Origen y difusión del cultivo

La colza pertenece al género *Brassica*, al cual, además de especies oleaginosas, también pertenecen otras especies de uso hortícola y aromático. La colza puede pertenecer a las especies botánicas *Brassica napus*, *Brassica campestris* (= *Brassica rapa*) o *Brassica juncea* (Giayetto, 1995).

Estudios realizados por U (1935) determinan que las especies con mayor número de cromosomas (*B. napus*, *B. juncea* y *B. carinata*) derivan por el camino de la anfiploidía de las especies diploides *B. nigra*, *B. campestris* y *B. oleracea* (Figura 9.1).

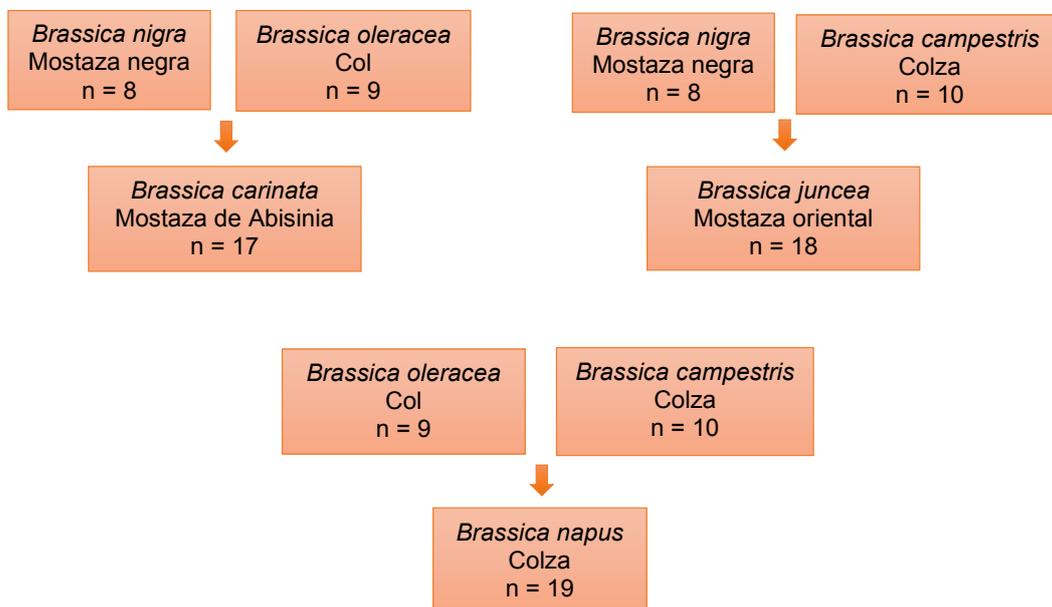


Figura 9.1: Relaciones filogenéticas entre las especies de *Brassica* que originaron la colza

Se ha determinado que *B. campestris* y *B. oleracea* tienen un origen común y diferente al de *B. nigra*.

Brassica campestris sería originaria del Himalaya, con centros secundarios de dispersión en Europa, Asia Central y Cercano Este. La forma oleaginosa parece tener un segundo centro de origen en Asia. Se cree que el cultivo de la forma oleaginosa comenzó en Europa en el siglo XIII, como fuente importante de aceite para lámparas. Sin embargo, se sabe que los romanos conocían la colza en el norte de Francia y probablemente ellos la introdujeron en Gran Bretaña, indicando que en Europa la colza existió mucho antes de que se empleara como oleaginosa.

Brassica napus al ser el cruzamiento interespecífico de *B. campestris* y *B. oleracea*, debió originarse donde las dos especies progenitoras crecieron en estrecha proximidad (Giayetto, 1995). Según distintos autores, esto pudo suceder en la región mediterránea o en el norte de Europa. Aunque las formas oleaginosas de colza se hallaban en Europa en la Edad Media, no

se sabe con certeza a qué especies pertenecían. Sin embargo, a principios del siglo XIX, se reconocía la existencia de la colza británica (*B. napus*) y de la colza continental (*B. campestris*).

Durante la segunda guerra mundial las principales fuentes de aceite sufrieron serios daños, especialmente en el Lejano Este, por lo que Inglaterra y Francia destinaron importantes esfuerzos en la búsqueda de nuevas fuentes. En esa época comienza la expansión del cultivo en el norte de Europa iniciando Inglaterra evaluaciones agronómicas en 1948, comenzando la producción comercial en 1950.

En Canadá, la producción de colza se inició en la década del '40. Semillas de *B. napus* provenientes de Argentina y de *B. campestris* proveniente de Polonia fueron la base de la expansión del cultivo en ese país (Canola Council of Canada, 2021a).

En la década de los '70, Canadá y Europa trabajaron en la selección de cultivares con bajos tenores de ácido erúxico, lográndose ese objetivo a fines de esa década. Las variedades mejoradas, con bajo contenido de ácido erúxico y glucosinolatos en la semilla, se denominaron "00" o "doble cero" en Europa, y CANOLA (CANadian Oil Low Acid) en Canadá.

En Argentina se realizaron trabajos para la introducción de este cultivo desde la década del '50 y hasta la actualidad a instancias de organismos estatales (INTA, Chacras experimentales Junta Nacional de Granos, Universidades) y privados (compañías semilleras), en la mayor parte de los casos con buenos resultados agronómicos, pero con limitaciones en la adopción del cultivo por parte de los productores.

Reseña del mejoramiento genético en colza

Las tareas de mejoramiento más importantes se realizaron, y se realizan actualmente, en Europa y Canadá, habiéndose incorporado recientemente Australia como centro importante. En las primeras etapas los planes se orientaron a objetivos agronómicos como rendimiento, resistencia a vuelco, tamaño de semilla, uniformidad de maduración, menor dehiscencia de silicuas y mayor contenido de aceite. Posteriormente y atendiendo al mercado más importante del aceite se comenzó a trabajar en aspectos vinculados a la calidad del aceite y de la harina. Así, el primer cultivar inscripto con bajo contenido en ácido erúxico se llamó Oro. Luego se liberó Tower que presentaba bajo ácido erúxico y bajo contenido de glucosinolatos (Anónimo, 1991). También se han obtenido cultivares con características particulares del aceite para usos específicos como son las de bajo contenido de ácido linolénico, o alto contenido en ácido oleico o láurico. Más recientemente se obtuvieron variedades tolerantes a diversos herbicidas como triazinas, glifosato y glufosinato de amonio (Canola Council of Canada, 2021a).

En Argentina se vienen utilizando variedades introducidas de Europa y Australia. En el año 2007 se inició en el INTA un programa de mejora de colza con el objetivo de obtener variedades de alto rendimiento adaptadas a diferentes zonas y con resistencia a enfermedades, en especial a *Phoma lingam* (Milisich et al., 2014). Como resultado en 2016 se registró la primera variedad de Argentina denominada Macacha INTA. Se trata de una variedad primaveral de ciclo

intermedio, buen comportamiento sanitario y calidad. En 2021 se inscribió el cultivar Delfina INTA, de ciclo más corto que la anterior.

Objetivos del mejoramiento

Los objetivos de la mejora en colza como en otros cultivos, se orientaron al logro de mayores rendimientos y calidad del aceite y de la harina. Para lograr la expresión de los rendimientos a campo, además, se han considerado aspectos relacionados con su adaptabilidad a los diferentes ambientes de cultivo. Algunos de los principales objetivos a los que se han abocado los programas de mejora han sido (Canola Council of Canada, 2021a):

- Selección por rendimiento y calidad
- Tolerancia al estrés hídrico
- Tolerancia al estrés por exceso de humedad
- Tolerancia a las heladas en implantación y floración
- Eliminación de semilla verde
- Eficiencia en el uso de nutrientes
- Bajo contenido de ácidos grasos saturados
- *B. napus* de ciclo corto
- Tolerancia a herbicidas
- Resistencia a enfermedades
- Resistencia a insectos
- Tolerancia de plántulas a temperaturas frías para mejorar la germinación y emergencia
- Híbridos de mayor rendimiento
- Tolerancia a la rotura y caída de las silicuas

Selección por rendimiento y calidad

Si bien al principio los trabajos se orientaron a mejorar las características relacionadas con la calidad (reducción de los contenidos de ácido erúrico y glucosinolatos), los ensayos permitieron seleccionar, al mismo tiempo, variedades con buenos potenciales de rendimiento (Canola Council of Canada, 2021a).

Para mejorar la productividad de la colza, la selección luego se orientó hacia el uso de variedades híbridas, pero debido a su autogamia predominante, su producción requirió el desarrollo de un control de la polinización, el cual se logró a través de la esterilidad genético citoplásmica. La macho esterilidad fue encontrada en *Raphanus sativus* y transferida a *Brassica oleracea* y *B. napus* (Bannerot et al., 1974; Pellan-Delourme y Renard, 1988). Se estima que los híbridos incrementan el rendimiento en un rango de entre 15% y 45% en comparación con las mejores variedades (Cailliez, 1991; Canola Council of Canada, 2021a).

Arnaud (1989) estableció que mejorar la productividad de la colza requiere también considerar el contenido de aceite de la semilla, buscando valores superiores a 47%, y el contenido de

proteína, buscando que los progenitores para este rasgo posean más de 49% de proteínas en la harina. Ambos caracteres cuentan con buena heredabilidad. El contenido de aceite y el contenido de las proteínas están correlacionados negativamente, por lo que debe considerarse una selección combinada (Grami et al., 1977). Las variedades actuales presentan contenidos de aceite superiores a 49% (Rebora et al., 2007).

Antes de la aparición de las variedades canola, el aceite de colza se caracterizaba, por su alto contenido de los ácidos erúcico (C20:1), erúcico (C22:1) y linolénico (C18:3) y por su bajo tenor comparativo de palmítico (C16:1) y linoleico (C18:2). Es conocido que el ácido erúcico favorece la deposición de grasa en músculos, además de provocar ciertas lesiones en el miocardio. Alto contenido de ácido linolénico no es problema desde el punto de vista nutricional, pero por su triple doble ligadura provoca oxidación y mal gusto en margarinas almacenadas (Perea Muñoz, 1992). Por otro lado, era deseable un aumento en el ácido linoleico, esencial para el consumo humano y, también del palmítico, muy importante para la estabilidad de las margarinas (Rakow et al., 1987). También se ha buscado mejorar el contenido de ácido oleico aplicando selección recurrente e incrementar el contenido de ácido palmítico utilizando haploidización.

La reducción del ácido erúcico desde un 40-50% en los materiales originales a alrededor de un 2%, generó paralelamente efectos en el porcentaje de los otros ácidos grasos. De este modo, se registró un aumento en los tenores de ácido oleico que pasó de 11-17 a 56-58% y también del ácido linoleico que se incrementó de 11-18 a 23% (Perea Muñoz, 1992).

Como resultado, hoy existen en el mercado cultivares caracterizados por diferentes calidades de aceite, obtenidas con las técnicas tradicionales de mejoramiento (Perea Muñoz, 1992).

La harina de colza tiene un alto tenor de proteína (40-43%) y su composición es complementaria a la de la soja por contener menos lisina y más metionina y cistina. Es importante tener en cuenta que el contenido proteico va acompañado de compuestos azufrados conocidos como glucosinolatos que forman parte de la fracción glucídica del grano y que no son deseables (Perea Muñoz, 1992; IASCAV, 1993).

El contenido de glucosinolatos inicialmente era del orden de 70 a 190 micromoles por gramo (o ppm). Con el descubrimiento de una variedad con 12 micromoles por gramo se realizaron cruzamientos para la transferencia de este carácter. Se logró que las variedades actuales de canola registren tenores inferiores a 30 micromoles por gramo (Perea Muñoz, 1992). Sin embargo, debe considerarse que esta característica tiene fuerte influencia ambiental y también puede ser modificada por distintos aspectos del manejo del cultivo (IASCAV, 1993).

Selección por adaptación al ambiente

Para el logro de la expresión del potencial genético en las líneas seleccionadas es necesario considerar y evaluar su comportamiento en relación al ambiente de cultivo y frente a los organismos reductores del rendimiento (Nabloussi, 2005).

En la mejora para la obtención de resistencia genética a las adversidades deben considerarse las **enfermedades** y la disponibilidad de variabilidad genética utilizable. Un ejemplo es el caso de la resistencia a la necrosis de la base del tallo (*Phoma lingam*). Para otras enfermedades,

como las producidas por *Alternaria* y *Sclerotinia*, la selección es menos eficiente (Brun et al., 1989). La selección se realiza generalmente en el campo con contaminación natural o con rastrojo en parcelas de prueba y en viveros.

En el caso de *Alternaria brassicae* la falta de variabilidad para la resistencia impulsó programas de cruzamientos interespecíficos con especies como *Sinapis alba* (Primard et al., 1988).

Para la resistencia a *Sclerotinia sclerotiorum*, algunos cultivares japoneses (Genkaï, Miyuki) muestran una resistencia parcial y se pueden utilizar como progenitores en programas de haplodiploidización.

La mejora genética para la adaptación al ambiente y manejo debe considerar el **vuelco** como una característica de importancia y para ello se ha trabajado en ideotipos de menor altura. Existe alta variabilidad para este carácter que es muy heredable. Además, se han encontrado genes de enanismo originados en mutaciones naturales o inducidas en colza (por acción química o por radiación). Por otro lado, se dispone de variabilidad y se ha trabajado en la adaptación de la planta a la **sequía** (Nabloussi, 2005).

Para contribuir al manejo de malezas se ha logrado la transferencia de **resistencia a herbicidas** en la búsqueda de resolver la siembra en lotes con malezas crucíferas, las cuales no pueden controlarse con herbicidas en cultivos de colza tradicionales. Primeramente, se logró la resistencia a las triazinas a partir de una mutación encontrada en *B. campestris*. Sin embargo, los rendimientos de las variedades resistentes a triazinas son alrededor de un 20% menor que los de las variedades convencionales.

En 1995, se registró la primera *Brassica napus* tolerante a imidazolinonas obtenida por mutagénesis. Luego se lograron las resistencias a glifosato, glufosinato de amonio y bromoxynil (Canola Council of Canada, 2021a).

Técnicas de mejoramiento

Brassica napus es considerada una especie autógena, aunque en la realidad se comporta como una especie de reproducción mixta (Soengas et al., 2013), con un porcentaje de fecundación cruzada que puede oscilar entre 20 y 40% (Canola Council of Canada, 2021b). Esta variabilidad se relaciona tanto con el genotipo como con el ambiente ya que, si bien la flor de colza es autofértil, en condiciones naturales puede ser polinizada por polen externo transportado por insectos y viento. Las flores abren a la mañana y a medida que los pétalos se despliegan por completo, el polen se desprende y dispersa tanto por el viento como por los insectos. Las flores permanecen receptivas al polen hasta tres días después de abrirse. Por la noche, la flor se cierra parcialmente y se abre de nuevo a la mañana siguiente. La fertilización ocurre en las 24 horas posteriores a la polinización. Después de la polinización y fertilización, la flor permanece parcialmente cerrada y los pétalos se marchitan y caen. Al día siguiente de la caída de los pétalos puede verse la pequeña silicua (Canola Council of Canada, 2021a).

Los principales avances en el mejoramiento de este cultivo han sido logrados a través de prácticas de mejoramiento tradicional para plantas alógamas. Sin embargo, en los últimos años también ha sido objeto de estudio por medio de técnicas más avanzadas a través del uso de marcadores moleculares y de la ingeniería genética.

En el **mejoramiento tradicional**, se recomienda la selección genealógica con autofecundación forzada con sobres de papel y aisladores de tela en cada generación. La endocría permite seleccionar genotipos homocigotos con las características deseadas. Esta técnica puede provocar, sin embargo, una disminución de las características deseables y es por eso que se cruzan líneas seleccionadas para dar origen a variedades sintéticas.

Para iniciar la selección genealógica es necesario generar variabilidad mediante hibridaciones emasculando las flores de plantas madres y polinizando con el polen de plantas padres.

Otra alternativa, usada sobre todo para la obtención de nuevos tipos de aceites, es la inducción de mutaciones para crear nueva variabilidad genética.

En la búsqueda de resistencia a enfermedades como *Leptosphaeria maculans/Phoma lingam* y *Sclerotinia sclerotiorum* se trabaja paralelamente en cámaras de crecimiento controlado y con evaluaciones a campo.

El comportamiento de los materiales logrados debe ser luego evaluado en ensayos comparativos de rendimiento en las áreas posibles de difusión.

Los trabajos de mejora además incluyen el manejo de poblaciones mediante selección masal o recurrente para mejorar aspectos relacionados a la adaptabilidad, ciclo y comportamiento agronómico.

Con el hallazgo de la esterilidad masculina citoplasmática en la década del '70 se comenzó a trabajar en la **obtención de híbridos**. Los primeros híbridos se obtuvieron en Australia en 1983, evaluándose tanto en Australia como en Canadá. En 1986 se obtuvieron los primeros híbridos que se comercializaron en Canadá siendo sus características más salientes: mayor vigor inicial y precocidad, floración y maduración más uniforme, mayor resistencia a la dehiscencia, mayor rendimiento, mayor resistencia a enfermedades, mayor índice de cosecha y menor tendencia al vuelco (Anónimo, 1991).

Los trabajos de producción de híbridos utilizaron métodos como la esterilidad masculina citoplasmática (CMS). Se halló el sistema de control de la fertilidad por una interacción entre el núcleo celular y el citoplasma. Los sistemas CMS para la hibridación de colza dependen de una mutación en ciertos cuerpos citoplasmáticos que resultan en una falla en el desarrollo funcional de polen o anteras. El uso de CMS permitió a los mejoradores contar con plantas que no producen polen, no liberan el polen o producen polen que no puede provocar la autofecundación. El sistema para la producción de híbridos tiene tres componentes: una línea A androestéril, una línea mantenedora B y una línea restauradora R (Figura 9.2). La línea materna se multiplica mediante el cruzamiento con la línea mantenedora. La restauradora asegura la fertilidad del híbrido al aportar los genes de restauración. A partir de la difusión del híbrido Hyola 40 este tipo de variedades ha crecido en la adopción.

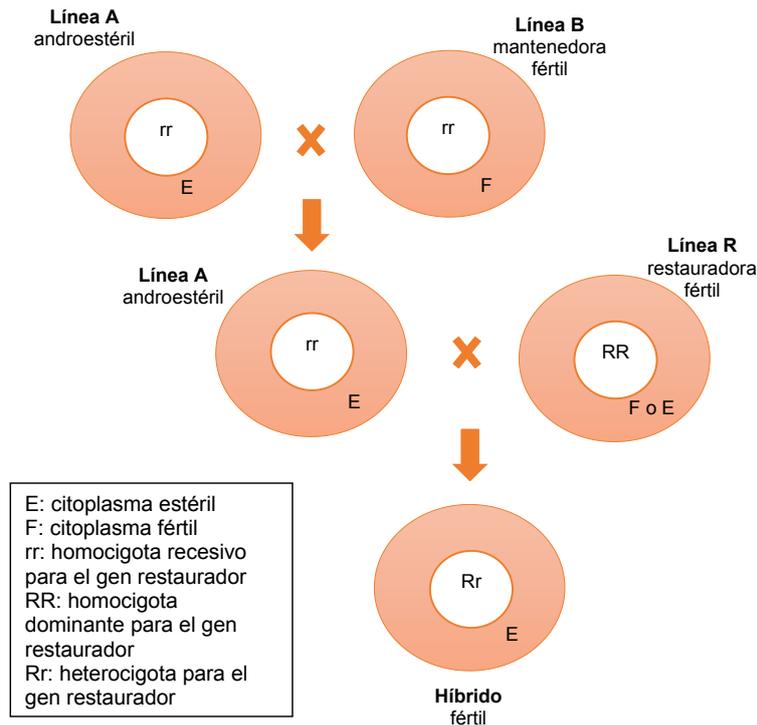


Figura 9.2: Esquema de producción de híbridos utilizando esterilidad masculina citoplasmática
 En cada línea y en el híbrido, el círculo blanco representa el núcleo y su constitución genética, y el de color representa el citoplasma y su información genética

Plant Genetic Systems en Bélgica desarrolló un nuevo sistema de hibridación mediante biotecnología. Este sistema usa una línea parental masculina estéril que no produce granos de polen viables, característica determinada por un gen que se ha insertado en la misma, obtenido de una bacteria del suelo. Paralelamente, utiliza otra línea parental a la cual se le incorporó otro gen de la misma bacteria que restaura la fertilidad, por lo que el híbrido es fértil. Con este sistema se crearon los híbridos llamados Liberty a los que, además, se les incorporó la resistencia a glufosinato de amonio (Canola Council of Canada, 2021a).

Otro tipo de cultivares que se han desarrollado en colza son las **variedades sintéticas** donde es posible un aprovechamiento de la heterosis. Este tipo de cultivares se genera mezclando semillas de varias líneas para generar una población que se utiliza como sintética certificada. Comúnmente se utilizan dos o tres líneas parentales. Las variedades sintéticas presentan, además de heterosis, una mejor estabilidad frente a la gama de condiciones ambientales en las que puede cultivarse.

Otra categoría de semillas comercializadas, sobre todo en Europa, son las conocidas como **asociación varietal**, que están compuestas mayoritariamente por un híbrido que se mezcla con un cierto porcentaje de semilla de otro genotipo que actúa como polinizador. Esto permite explotar el potencial genético de los híbridos aun cuando presenten problemas en la producción de polen.

El mejoramiento convencional está siendo asistido por **técnicas de biología molecular y biotecnológicas**. El uso de tecnología de RFLP (Restriction Fragment Length Polymorphism) ha

permitido conocer el genoma de la especie y manipularlo. En el caso de la colza se han desarrollado mapas de ligamiento RFLP para *B. napus* y para *B. campestris*.

Esta técnica permite también detectar genomas con mayores contenidos de padre recurrente luego de una retrocruza para un nuevo ciclo de retrocruza y la detección y seguimiento de caracteres difíciles de medir o cuantitativos como resistencia a enfermedades, autoincompatibilidad o tolerancia a estreses. Además, permite la caracterización genotípica de líneas o variedades. El cultivo de microsporas se utiliza para la producción de plantas doble haploides a partir de microsporas logrando una progenie de líneas puras.

La tecnología de transformación permite identificar, aislar y clonar genes para luego incorporarlos en plantas usando vectores y protocolos de transformación. En colza se usa con la finalidad de obtener resistencia a insectos (*Bacillus thuringiensis*), a herbicidas (glifosato, glufosinato de amonio), modificaciones en la composición del aceite de las semillas por manejo enzimático, y modificación en la composición proteica de la semilla (composición de aminoácidos alterada y bajo nivel de glucosinolatos).

Mejoramiento genético de cártamo

El cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) pertenece a la subtribu *Centaureinae*, tribu *Cardueae* (cardos), subfamilia *Tubuliflorae* y familia *Asteraceae* (Compositae) (Kumar, 1991). Se ha cultivado durante siglos desde China hasta la región del Mediterráneo y a lo largo del valle del Nilo hasta Etiopía (Singh y Nimbkar, 2005). Se trata de una oleaginosa cultivada por sus semillas y por sus flores. De las flores se extrae un colorante para uso industrial y culinario. El aceite es comestible, tiene aplicaciones medicinales y puede ser usado como biocombustible (Dajue y Mündel, 1996). Para el consumo humano, presenta un alto nivel nutricional al contar con una adecuada combinación de ácidos grasos (GRDC, 2017).

El cártamo se ha utilizado, inicialmente, para obtener cartamina de las flores. Este pigmento fue utilizado para colorear el algodón y la seda o alimentos (Dajue y Mündel, 1996; Ekin, 2005). Sus flores y aceite han sido utilizados con fines terapéuticos (Ekin, 2005; Emongor, 2010). A partir del conocimiento de la calidad del aceite se incrementó el interés por el cultivo (Capítulo 2).

El aceite de cártamo como comestible creció a partir de su valoración basada en su alta calidad nutricional (Mündel et al., 2004). La calidad del aceite se debe al alto contenido de ácido linoleico (77%) al que se agregan ácido oleico (15%) palmítico (8%) y esteárico (3%) (Baümler, 2002; Coşge et al., 2007). Se han obtenido, además, variedades alto oleico que producen un aceite comparable al de oliva (GRDC, 2017).

Origen

El género *Carthamus* posee muchas especies silvestres y malezas parientes de *Carthamus tinctorius* y aún hacen falta investigaciones para dilucidar aspectos del número de cromosomas original del género *Carthamus* y la distancia genética entre las especies silvestres (Kumar, 1991).

Knowles (1969) agrupó las especies utilizando "centros de similitud" para siete regiones que no son centros de diversidad u origen, sino de tipos de cártamo notablemente similares. Ashri (1973), estudió características morfológicas de 2000 accesiones de cártamo de 30 países, modificó la lista de Knowles (1969) y agregó otros tres centros. Más recientemente, López-González (1989) trabajó en una nueva clasificación del género en la cual los géneros *Carthamus* y *Carduncellus* son reemplazados por cuatro nuevos géneros: *Phonus*, *Lamottea*, *Carthamus* y *Carduncellus*. En esos géneros las respectivas especies tipo son: *Carthamus arborescens*, *Carthamus caeruleus*, *Carthamus tinctorius* y *Carduncellus monspeliensis*. Las especies de los géneros *Phonus*, *Lamottea* y *Carduncellus* son todos clasificados como perennes y tienen 24 cromosomas. Al género *Carthamus* lo componen especies anuales con 20, 22, 24, 44 y 64 cromosomas, incluidos varios alopoliploides.

El género *Phonus* se ubica España, Portugal y norte de África; *Lamottea*, en el Mediterráneo, *Carthamus* en el oeste y centro de Asia y el Mediterráneo y *Carduncellus* en la zona del Mediterráneo, norte de África, Egipto e Israel (Palestina).

Objetivos del mejoramiento

La mejora genética del cártamo se orientó a mejorar el rendimiento, el aceite y características agronómicas asociadas especialmente a la resistencia a enfermedades, insectos y estreses abióticos. Los trabajos de mejora se concentraron en aprovechar la variabilidad existente en los cultivos comerciales, pero también se trabajó con cruzamientos con otras especies (Ashri y Knowles, 1960). Especies silvestres como *Carthamus oxyacanthus*, de Afganistán y *Carthamus lanatus* o cardo azafrán, de Etiopía, han sido utilizados para la generación de germoplasma y variedades (Dajue y Mündel, 1996).

Por otro lado, las limitaciones para su cultivo dadas por la susceptibilidad a enfermedades y los caracteres que se relacionan a su adaptabilidad a los estreses hídricos y salinos se han considerado prioritarios. En su mejoramiento se han obtenido avances con la aplicación de métodos clásicos y, luego, con la utilización de técnicas biotecnológicas. Utilizando técnicas de ingeniería genética se ha logrado introducir resistencia a enfermedades como la mancha foliar producida por *Alternaria* (Matern y Kneusel, 1993). Otro ejemplo de la aplicación de esta técnica es el desarrollo de cártamo modificado genéticamente para producir quimosina bovina en sus semillas, aprobado en Argentina en 2017 (SENASA, 2017).

Los principales objetivos en los que se ha trabajado en el cártamo se enumeran a continuación y derivan de las principales limitantes que se presentan para su cultivo. Así, si bien

el rendimiento de semilla es el objetivo principal, es necesario contemplar características prioritarias como son el comportamiento frente a enfermedades, patrones de desarrollo, características morfológicas y tolerancia a estrés, ya que definen la probabilidad de llegar con éxito al término del cultivo.

- Rendimiento
- Resistencia a enfermedades e insectos
- Ciclo. Precocidad. Duración de la etapa de roseta
- Dormición de las semillas en la maduración
- Ideotipos: reducción de espinas, ángulo de las ramificaciones, espesor de la cáscara
- Resistencia al estrés: sequía, salinidad y frío
- Calidad del aceite
- Calidad de la harina
- Eliminación de sustancias tóxicas
- Cártamo doble propósito: oleaginoso y forrajero

Se conoce que existe variabilidad para mejorar el rendimiento. Golkar et al. (2011) demostraron esta afirmación realizando diseños genéticos que produjeron híbridos F1 de alto rendimiento mediante cruces dialélicos.

El cártamo es muy susceptible a diferentes patógenos como hongos, bacterias y nemátodos. Este cultivo proviene de especies silvestres del desierto o ambientes áridos por lo que es afectado por distintos patógenos cuando se lo traslada a ambientes con mayor humedad. Las principales enfermedades del cártamo podrían ser manejadas con la ayuda de la resistencia en combinación con adecuadas prácticas culturales (Mündel y Huang, 2003).

En las variedades de cártamo, puede encontrarse variabilidad a la respuesta del ataque de la mancha foliar producida por *Alternaria carthami*, y a la roya (*Puccinia carthami*). Otras enfermedades foliares que deben considerarse son *Botrytis cinerea*, *Cercospora carthami*, *Pseudomonas syringae* y *Ramularia carthami* (Dajue y Mündel, 1996).

En la búsqueda de resistencia, se ha trabajado en campos naturalmente infestados con enfermedades para aplicar selección masal. Como resultado se obtuvieron cultivares con resistencia mejorada a la mancha foliar producida por *Alternaria carthami* y al tizón bacteriano (*Pseudomonas syringae*). Estas líneas se cruzaron con cultivares comerciales y se obtuvieron cultivares como Girard, con buena resistencia a la *Alternaria* en condiciones de campo (Bergman et al., 1989).

Entre las enfermedades vasculares, son importantes a nivel mundial las producidas por varias especies de *Phytophthora*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *carthami* y *Verticillium dahliae* debido a la severidad de sus daños. La resistencia a estos patógenos debe ser estudiada en mayor detalle. No obstante ello, Rubis (1981) utilizó programas de selección recurrente en cártamo para obtener líneas altamente resistentes a la podredumbre de la raíz causada por *Phytophthora* spp. Este método fue desarrollado para crear una alta presión de selección con el fin de seleccionar nuevas recombinaciones genéticas con alta resistencia al patógeno.

También aparecen como prioritarios los trabajos que aborden modificaciones de los ideotipos en aspectos relacionados a los componentes de rendimiento (Dajue y Mündel, 1996).

Las semillas presentan un porcentaje de aceite de 25-37% y resulta importante la selección de líneas con cáscara fina que permita llevarlo a 46-47%. Además del espesor de la cáscara se considera la herencia para la presencia de pappus, pigmentación de cotiledones, control de la latencia, índice de iodo y contenido de fibra (Golkar, 2014).

La calidad del aceite, referida a la composición de ácidos grasos, se ha mejorado manipulando el proceso sintético de los ácidos oleico y linoleico. Si bien la composición original del aceite de cártamo se caracteriza por un alto contenido de ácido linoleico, entre otras causas para mejorar su estabilidad, se ha trabajado en la obtención de variedades con mayor contenido de ácido oleico. Es así como actualmente conviven dos mercados paralelos para las variedades “alto oleico” y “alto linoleico”. Se ha demostrado que los contenidos de ácido oleico, linoleico y esteárico están controlados por tres genes (*ol ol*, *li li* y *st st*, respectivamente), que son genes mayores recesivos ubicados en diferentes loci (Dajue y Mündel, 1996).

Entre las características de la planta que son objetivo de mejora, surgen como importantes el largo de la floración, el número de capítulos por planta, el número de ramificaciones primarias y secundarias y la longitud del ciclo del cultivo. Estas características se relacionan con el rendimiento y manejo del cultivo. La reducción de la altura ha sido otra de las características en las que se ha trabajado en la mejora. No se encontró correlación muy significativa entre rendimiento, altura y ciclo, lo que indica la posibilidad de trabajar con ciclos cortos y planta de baja altura (Montoya Coronado, 2010). La presencia de espinas en la planta es un carácter sobre el cual trabajar para mejorar la eficiencia de la tecnología de cultivo (Golkar, 2014).

Métodos de mejoramiento

El cártamo es una planta predominantemente autógama, pero puede llegar a un 50% de alo-gamia en determinadas condiciones y por la acción de insectos. La técnica para realizar cruza-mientos dirigidos requiere cuidados especiales por tratarse de una inflorescencia, en la cual las flores están encerradas dentro del capítulo. Se debe trabajar sobre botones florales ya avanza-dos, cortando la mitad de las brácteas para descubrir las flores y emasculando con pinzas espe-ciales. Los capítulos se cubren con sobres de papel para evitar la desecación y aporte de polen extraño y, al día siguiente, cuando los estigmas se elongan, se polinizan con el progenitor selec-cionado previamente y se vuelven a cubrir (Montoya Coronado, 2010).

Para la mejora se trabaja por lo general con el método de pedigree o genealógico y modifica-ciones a partir de poblaciones segregantes. Este método permite avances en caracteres como ciclo y resistencia a enfermedades. El método de retrocruza es muy utilizado para incorporar caracteres específicos como resistencia a enfermedades en las variedades comerciales.

Como ya se mencionó la selección masal, en campos naturalmente infectados con enferme-dades, y la selección recurrente, han sido utilizadas para mejorar resistencia a enfermedades.

La esterilidad masculina genética fue identificada por Heaton y Knowles (1982) fue considerada para la producción de híbridos en cártamo, pero la necesidad de eliminar las plantas fértiles masculinas lo hace muy costoso por lo que no prosperó. Los híbridos han superado ampliamente el rendimiento promedio de las variedades (127%) obteniendo también mayores niveles de aceite con valores que superan el 40% (Dajue y Mündel, 1996). Sin embargo, si bien se han identificado fuentes de androesterilidad citoplasmática aún no se ha podido generar un sistema eficiente para la producción de híbridos a gran escala (Deshmukh et al., 2014).

En Argentina, el INTA realizó trabajos de mejoramiento tratando de mejorar el rendimiento, la resistencia al frío y buscando alto contenido de ácido linoleico. Se obtuvieron líneas y variedades como Las Breñas GB77INTA, Iporá Guazú y Gila (Galván et al., 1988). Sin embargo, este programa se discontinuó y, actualmente, la mayoría de las variedades registradas en el INASE son de origen estadounidense (Lang, 2011).

Referencias

- Allard, R. W. y Montoya, J. L. (1978). *Principios de la mejora genética de las plantas*. Barcelona, Editorial Omega.
- Anónimo (1991). *ICIOLA. Canola híbrida. Manual técnico*. Argentina, ICI Semillas
- Arnaud, F. (1989). *Colza. Cahier technique*. Paris, CETIOM.
- Ashri, A. (1973). Divergence and evolution in the safflower genus, *Carthamus* L. Final Research Report, P.L. 480, Washington, DC, USA. Project No. A10-CR-18, Grant No. FGIs- 234, 180 p.
- Ashri, A. y Knowles, P. F. (1960). Cytogenetics of safflower (*Carthamus* L.) species and their hybrids. *Agronomy Journal*, 52, 11-17.
- Bannerot, H., Bouldard, L., Canderon, Y. y Tempe, J. (1974). Cytoplasmic male sterility transfer from *Raphanus* to *Brassica*. *Proceedings EUCARPIA, Crop Section Cruciferae*, 25, 52-54.
- Bäumler, E. R. (2002). *Estudio de la aptitud al descascarado de semillas de cártamo (Carthamus tinctorius L.)*. (Tesis de grado de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires).
- Bergman, J. W., Carlson, G., Kushnak, G., Riveland, N. R., Stallknecht, G., Welty, L. E. y Wichman, D. (1989). Registration of 'Girard' safflower. *Crop Science*, 29,828-829.
- Bretón, A., Dittrich, A., Castillo, N., Sosa, A. y Corona, M. V. (2007). Evaluación de la respuesta en la formación de callos regenerantes a partir del cultivo in vitro de epicótilos y entrenudos de lino (*Linum usitatissimum* L.) ante el incremento de la concentración de cobre en el medio de cultivo. *Revista Científica Agropecuaria*, 11 (2), 95-101.
- Brun, H., Renard, M., Tribodet, M., Plessis, J. y Tanguy, X. (1989). Apport de la lutte génétique contre les maladies du colza. *Phytoma*, 404, 36-41.
- Cailliez, B. (1991). Colza, en attendant les hybrides. *Cultivar*, 293, 35-37.
- Canola Council of Canada. (2021a). History of canola seed development. *Canola Encyclopedia*. Recuperado de: <https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia>

- Canola Council of Canada. (2021b). Canola growth stages. *Canola Encyclopedia*. Recuperado de: <https://www.canolacouncil.org/canola-encyclopedia>
- Coşge, B., Gürbüz, B. y Kiralan, M. (2007). Oil content and fatty acid composition of some safflower (*Carthamus tinctorius* L.) varieties sown in spring and winter. *International Journal of Natural and Engineering Sciences*, 1, 11-15.
- Cubero, J. I. (2013). *Introducción a la mejora genética vegetal*. 3ra ed. Madrid, Ed. Mundi-Prensa.
- Dajue, L. y Mündel, H. H. (1996). *Safflower. Carthamus tinctorius L. Promoting the conservation and use of underutilized and neglected crops*. 7. Rome, Italy, Institute of Plant Genetics and Crop Plant Research, Gatersleben/International Plant Genetic Resources Institute. Recuperado de: https://www.biodiversityinternational.org/fileadmin/_migrated/uploads/tx_news/Safflower_Carthamus_tinctorius_L_498.pdf
- Deshmukh, S. N., Wakode, M. M. y Ratnaparakhi, R.D. (2014). Cytoplasmic Male Sterility Development in Safflower. *Dr. Panjabrao Deshmukh Krishi Vidyapeeth, Akola, Research Journal*, 38(1), 1-3.
- Devinar, M.G., Lassaga, S.L., Milisich, H.J. y Green, A. (2010). Determinación molecular de dos mutaciones involucradas en la desaturación del ácido linoleico en *Linum usitatissimum*. *Revista Científica Agropecuaria*, 14 (1), 27-37.
- Diederichsen, A. (2007). Ex situ collections of cultivated flax (*Linum usitatissimum* L.) and other species of the genus *Linum* L. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 54, 661–678.
- Ekin, Z. (2005). Resurgence of Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) Utilization: A Global View. *Journal of Agronomy*, 4(2), 83-85.
- Emongor, V. (2010). Safflower (*Carthamus tinctorius* L.) the Underutilized and Neglected Crop: A Review. *Asian Journal of Plant Science*, 6, 299-306.
- Fehr, W. R. (1987). *Principles of cultivar development. Theory and technique*. New York, Ed. McGraw-Hill Inc.
- Galván, M. E., Juncosa, P., García, R. y Salas, J. (1988). Cártamo. Años agrícolas 1986-1987. *Panorama Agropecuario X* (38), 12-14.
- Giayetto, O. (1995). *Modelo de Simulación de la Colza (Brassica napus L. forma annua) en la región de Río Cuarto (Córdoba, Argentina)*. (Tesis de Maestría) Facultad de Agronomía, UBA, Argentina.
- Golkar, P. (2011). Inheritance of salt tolerance in safflower (*Carthamus tinctorius* L.). *Advances in Environmental Biology*, 5(11), 3694-3699.
- Golkar, P. (2014). Breeding improvements in safflower (*Carthamus tinctorius* L.): A review. *Australian Journal of Crop Science*, 8(7), 1079-1085.
- Grami, B., Baker, R. J. y Stefansson, B. R. (1977). Genetic of protein and oil content in summer rape: heritability, number of effective factors and correlation. *Canadian Journal of Plant Science*, 57, 937-943
- GRDC (Grain research and development corporation). (2017). *Grownotes Safflowers Northern*. Recuperado de: https://grdc.com.au/_data/assets/pdf_file/0031/238990/GRDC-GrowNotes-SafflowerNorthern.pdf?utm_source=website&utm_medium=download_button&utm_campaign=pdf_download&utm_term=North&utm_content=Safflower%20Northern%20Region%20-%20GrowNotes%E2%84%A2

- Green, A. G. y Marshall, D. R. (1984). Isolation of induced mutants in linseed (*Linum usitatissimum*) having reduced linolenic acid content. *Euphytica*, 33, 321–328.
- Hausner, G., Rashid, K. Y., Kenaschuk, E. O., Procnier, J. D. (1999a). The development of codominant PCR/RFLP based markers for the flax rust-resistance alleles at the locus. *Genome*, 42, 1-8.
- Hausner, G., Rashid, K. Y., Kenaschuk, E. O., Procnier, J. D. (1999b). The identification of a cleaved amplified polymorphic sequence (CAPS) marker for the flax rust-resistance gene M3. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 21, 187-192.
- Heaton, T.C. y Knowles, P. F. (1982). Inheritance of male sterility in safflower. *Crop Science*, 22, 520-522.
- Heywood VA (1978) *Flowering plants of the world*. London, Oxford University Press.
- Instituto Argentino de Sanidad y Calidad Vegetal (IASCAV) (1993). COLZA "00"/CANOLA Recopilación informativa, Parámetros de calidad.
- Knowles, P. F. (1969). Centers of plant diversity and conservation of crop germplasm. Safflower. *Economic Botany*, 23,324-329.
- Kumar, H. (1991). Cytogenetics of safflower. En: Tsuchiya, T. y Gupta, P. K. (Editores) *Chromosome engineering in plants: Genetics, Breeding, Evolution, Part B., Developments in Plant Genetics and Breeding, 2B*, (pp. 251-277), Amsterdam, Elsevier.
- Lang, M. (2011). El cultivo de cártamo (*Carthamus tinctorius* L.) en la región semiárida pampeana: ensayo comparativo de rendimiento. *Revista de la Facultad de Agronomía. UNLPam* 22, 32-36.
- Lassaga, S. L., Camadro, E. L., Bonell, M. L., Franzone, P. (2004). Diallel analysis of callus formation ability in linseed anther culture. *Plant Breeding*, 123, 502-504.
- Lassaga, S., Bretón, A., Gioco, L., Milisich, H. y Dittrich, A. (2010). Cultivo in vitro de anteras de lino (*Linum usitatissimum* L.). *Ciencia, Docencia y Tecnología*, XXI (40), 215-233.
- López-González, G. (1989). Acerca de la clasificación natural del género *Carthamus* L., s.l. *Anales del Jardín Botánico de Madrid* 47(1), 11-34.
- Matern, U. y Kneusel, R. E. (1993). The use of recombinant DNA techniques to confer resistance to the *Alternaria* leaf spot disease of safflower. En: Li Dajue y Han Yunzhou (Editores) *Proceedings of the Third International Safflower Conference*, (pp. 807-815), Beijing, China, Beijing Botanical Garden, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences.
- Milisich, H. J., Gioco, L., Acosta, M. G., Gallardo, M., Schutt, L., Bessone, V. (2014). Programa de mejoramiento genético de colza en el INTA. *1º Simpósio Latinoamericano de Canola*. Passo Fundo, Brasil.
- Montoya Coronado, L. (2010). *El cultivo de cártamo (Carthamus tinctorius L.) en México*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. México D.F. Recuperado de: https://www.academia.edu/31993954/El_cultivo_del_cartamo_carthamus_tinctorius_I_en_Mexico_pdf
- Mündel, H. H. y Huang, H. C. (2003). Control of major diseases of safflower by breeding for resistance and using cultural practices. En: Huang, H. C. y Acharya, S. A. (Editores) *Advances in Plant Disease Management. Research Signpost* (pp. 293–310). Kerala, India, Trivandrum.

- Mündel, H. H., Blackshaw R. E., Byers, J. R., Huang, H. C., Johnson, D. L., Keon, R., Kubik, J., McKenzie, R., Otto, B., Roth, B. y Stanford, K. (2004). *Safflower Production on the Canadian Prairies: Revisited in 2004*. Agriculture and Agri-Food Canada, Lethbridge Research Centre, Alberta. Recuperado de: <http://publications.gc.ca/site/eng/333269/publication.html>
- Nabloussi, A. (2005). Amélioration génétique du colza (*Brassica napus* L.): revue bibliographique et proposition d'une stratégie à adopter dans les conditions marocaines. *AL AWAMIA* 114, 2(2), 114-149.
- Nichterlein, K. (2003). Anther culture of linseed (*Linum usitatissimum* L.). En: Maluszynski M., Kasha K. J., Forster B. P. y Szarejko I. (Eds), *Doubled Haploid Production in Crop Plants* (pp 249-254). Dordrecht, Springer.
- Pellan-Delourme, R. y Renard, M. (1988). Cytoplasmic male sterility in rapeseed (*Brassica napus* L.): female fertility of restored rapeseed "Ogura" and cybrid cytoplasmns. *Genome*, 30, 234-238.
- Perea Muñoz, E. J. (1992). De colza a canola – colza "00". Evolución de la calidad de su aceite. *Revista OLEAGINOSOS*, 1, 20-22.
- Primard, C., Vedel, F., Mathieu, C., Pelletier, G. y Chevre, A. M. (1988). Interespecific somatic hybridization between *Brassica napus* and *Brassica hirta*. *Theoretical and Applied Genetics*, 75, 546-552.
- Rakow, G., Sringam, G.R. y McGregor, D. I. (1987). Breeding *Brassica napus* L. Canola with improved fatty acid composition, high oil content and high seed yield. *7 ème congrès international sur le colza*. Poznan. 1,27- 32.
- Rebora, C., Lelio, H., Gómez, L., Barros, A. (2007). Rendimiento de aceite de colza cultivada bajo riego: Mendoza (Argentina). *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 39 (2), 101-108.
- Rowland, G. G. 1991. An EMS-induced low-linolenic-acid mutant in McGregor flax (*Linum usitatissimum* L.). *Canadian Journal of Plant Science*, 71, 393–396.
- Rubis, D. D. (1981). Development of a root rot resistance in safflower by introgressive hybridization and thin-hull facilitated recurrent selection. En: Knowles, P. F. (Editor). *Proceedings First International Safflower Conference*, (pp. 205-209). Davis, California, USA.
- SENASA (2017). Documento de decisión. Evaluación de la aptitud alimentaria del evento de cártamo SPC IND-1ØØØ3-4 x IND-1ØØ15-7 y de los Eventos simples IND-1ØØØ3-4 e IND-1ØØ15-7. Recuperado de: http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/gmfp/docs/Documento%20decisi%C3%B3n%20C%C3%A1rtamo%20SPC.pdf
- Singh, V. y Nimbkar, N. (2005). Oil seed Crops. En: Singh, R. J. (Editor), *Genetic Resources, Chromosome Engineering and Crop Improvement*. Vol 4. (pp. 167-194), Boca Raton, Florida, CRC Press (Taylor & Francis Group).
- Soengas, P., Velasco, P., Vilar, M., Cartea, M. A. (2013). Mating system of *Brassica napus* and its relationship with morphological and ecological parameters in northwestern Spain. *Journal of Heredity*, 104(4), 491–499.
- U, N. (1935). Genome-analysis in *Brassica* with special reference to the experimental formation of *B. napus* and peculiar mode of fertilization. *Journal of Japanese Botany*, 7, 389-452.