

CRUZAMIENTO NATURAL DE CHÍA (*Salvia hispanica* L.)

J. A. Hernández-Gómez^{1¶}; S. Miranda-Colín²;
A. Peña-Lomelí¹

¹Departamento de Fitotecnia, Universidad Autónoma Chapingo.
Km. 38.5 Carretera México-Texcoco. Chapingo, Estado de México,

C. P. 56230. MÉXICO. Correo-e: alhdezg2@hotmail.com ([¶]Autor responsable).

²Instituto de Recursos Genéticos y Productividad. Colegio de Postgraduados.
Km. 36.5 Carretera México-Texcoco. Montecillo, Estado de México, C. P. 56230. MÉXICO.

RESUMEN

La mayor diversidad genética de *Salvia hispanica* L. se encuentra en México. Actualmente, los derivados de su semilla han despertado interés comercial; sin embargo, se conoce poco acerca de su sistema reproductivo para iniciar su mejoramiento y conservar su germoplasma. Por tal motivo, se determinó el porcentaje de cruzamiento natural en *S. hispanica*, en Chapingo, México. Se utilizó el color de flor como marcador genético, considerando que el color morado es dominante sobre el color blanco y el azul. En 1999, se establecieron dos lotes de intercrucamiento; en el primer lote, se usó semilla de un cultivar de Jalisco y en cada surco, se alternaron plantas con flor morada y flor blanca; en el segundo, se sembró el anterior cultivar, con flor morada, alternándolo con un material silvestre, con flor azul, colectado en Sinaloa. En el 2000, se determinó el cruzamiento natural basándose en el porcentaje de plantas con flor morada en las progenies F₁ del cultivar con flor blanca y en las del tipo silvestre. El material cultivado de Jalisco presentó mayor cruzamiento natural (22.17 %) que el material silvestre de Sinaloa (1.59 %), lo que podría indicar que el sistema de apareamiento de *S. hispanica* se ha modificado bajo condiciones de cultivo. No existe aislamiento reproductivo cuando se intercrucan ambos genotipos, por lo que deberían ser considerados como subespecies o razas de *S. hispanica*. Los híbridos obtenidos son vigorosos, como el progenitor cultivado, y con frutos dehiscentes, como el progenitor silvestre.

PALABRAS CLAVE ADICIONALES: *Salvia hispanica* L., color de flor, sistema de apareamiento, híbridos intraespecíficos.

NATURAL OUTCROSSING OF CHIA (*Salvia hispanica* L.)

ABSTRACT

Mexico has the largest genetic diversity of chia (*Salvia hispanica* L.). Recently, chia seed derivatives have attracted commercial attention. However, too little is known about its breeding system to define a genetic improvement strategy and to preserve its germplasm. In this study, the percentage of natural outcrossing of *S. hispanica* was determined in Chapingo, Mexico. Flower color was used as the genetic marker, considering purple flowers dominant over white and blue flowers. Two cross-pollination plots were established in 1999. In the first plot, seeds of purple-flowered plants and white-flowered plants of a cultivated genotype from Jalisco were sown alternately in each row; in the other, the same cultivar were sown alternately with seeds of purple-flowered cultivated plants and blue-flowered wild plants collected in Sinaloa. Determination of natural outcrossing rate was based on the percentage of purple-flowered plants in both the F₁ progeny of white-flowered cultivated plants and of blue-flowered wild plants. Outcrossing was more frequent in the cultivated genotype (22.17 %) than in the wild genotype (1.51 %), which might indicate that the breeding system was modified under cultivation. Since there was no reproductive isolation, the cultivated and wild genotypes should be considered subspecies or races of *S. hispanica*. The resulting hybrids were vigorous, like the cultivated parent, and had dehiscent fruits, like the wild parent.

ADDITIONAL KEY WORDS: *Salvia hispanica* L., flower color, breeding system, intra-species hybrids.

INTRODUCCIÓN

Salvia hispanica L. es una especie vegetal que formó parte esencial de la cultura mesoamericana. Por su amplia distribución geográfica y porque la conocían y utilizaban diferentes grupos étnicos, parece que su cultivo se extendió

desde los períodos más antiguos de la fitodomeesticación; actualmente, se conserva como cultivo marginal; su semilla se utiliza en la elaboración de bebidas refrescantes y nutritivas, y su aceite en la preparación de lacas artesanales y pinturas (Bukasov, 1963).

El hecho de que *S. hispanica* esté ampliamente distribuida en México aunado a su diversidad genética y a su valor alimenticio e industrial, la convierte en un recurso vegetal promisorio. Cualquier programa futuro de valoración y utilización de esta especie requiere contar con el conocimiento básico de su sistema reproductivo.

La descripción de la morfología floral de *S. hispanica* fue abordada por Martínez (1959) y Ramamoorthy (1985) como sigue: Las flores pediceladas se encuentran reunidas en grupos de seis o más, en verticilos sobre el raquis de la inflorescencia. El cáliz es persistente, pubescente y bilabiado. La corola de color morado o azul es monopétala y bilabiada; el labio inferior se expande hacia afuera y abajo; el superior es ascendente y se arquea en forma de casco o gálea. Los estambres fértiles son dos y están unidos por un conectivo, el cual se articula a filamentos cortos que se insertan en la corola. El ovario es súpero, bicarpelar y tetralocular; en la base del ovario se encuentra un disco nectarífero. El estilo es glabro, glanduloso en la base y su estigma tiene dos ramificaciones; la más larga está exerta a la corola y la más corta se ubica entre las anteras. Tanto las anteras como el estigma están cubiertos y protegidos por la gálea.

No se conoce con precisión el mecanismo de polinización en *S. hispanica*. Se ha supuesto que es una especie alógama y entomófila por el color de los pétalos, por la forma de pista de aterrizaje del labio inferior de la corola, por la articulación de los estambres a la corola y por la presencia de néctar en la base del ovario (Martínez, 1959; Ramamoorthy, 1985). Mann (1959) asegura que la protandria en el género *Salvia* es el mecanismo responsable de evitar la autofecundación; por su parte Haque y Goshal (1981) registran plantas androestériles en *S. hispanica* que obligan a cierto cruzamiento natural o baja producción de semilla en ausencia de polinizadores. El mecanismo de polinización en especies entomófilas del género *Salvia* y descrito por Faegri y Pijl (1979) es el siguiente: Las abejas se posan sobre el labio inferior de la corola y presionan hacia el nectario; esto produce la inclinación de las anteras que depositan el polen en el dorso del insecto. El estigma es independiente de este mecanismo pero con cierta frecuencia, se inclina y frota el dorso del insecto visitador.

Otros autores refieren que la autofecundación puede estar presente en el género *Salvia*. Faegri y Pijl (1979) atribuyen la autofecundación a la cercanía del estigma y las anteras; Haque y Goshal (1981) indican que *S. hispanica* es autocompatible y que la autofecundación es debida a que las flores son muy pequeñas y homostílicas y porque se produce semilla aún en plantas aisladas; Cahill (2004) reporta un 0.24 % de cruzamiento natural entre una población silvestre y otra domesticada de *S. hispanica* y, aunque la hibridación intraespecífica en las silvestres es rara, las cruces controladas entre poblaciones silvestres y domesticadas producen prole completamente fértil.

Existen varios factores que influyen en el sistema de

apareamiento en especies vegetales. Schoen (1982) menciona que el mejor predictor floral de la frecuencia de cruzamiento es el grado de protandria; Wolff *et al.* (1988) indican que la presencia de plantas androestériles en una especie predominantemente autógena puede incrementar la frecuencia de cruzamientos y para Schemske y Lande (1985), la morfología floral y el grado de autocompatibilidad se relacionan con la frecuencia de cruzamientos. Los polinizadores parecen ser atraídos por flores de coloración más intensa (Ennos y Clegg, 1983); las flores pequeñas, con menos señales visuales u olfativas, están relacionadas con especies autógenas (Levin, 1971).

Las características del ambiente que influyen en el flujo de polen, y por lo tanto en la frecuencia de cruzamiento, son la densidad de población (Schemske y Lande, 1985; Wolff *et al.*, 1988) y la abundancia de los polinizadores (Clegg, 1980). El sistema de apareamiento, como otros atributos del sistema genético, es sensible a la selección; en *Nicotiana rustica*, Breese (1959) demostró que la morfología y el desarrollo de la flor pueden ser modificados por selección y afectar el sistema de apareamiento.

El color de flor en *S. hispanica* puede ser morado, azul o blanco. Aunque no existe información sobre la herencia del color de flor en esta especie, algunos resultados en otras especies vegetales señalan que el color de la flor es debido a la acción de un par de genes alelomórficos, en que el color morado o púrpura es completamente dominante sobre el blanco, como en *Vicia sativa* (Donnelly, 1958); en *Phaseolus vulgaris* (Miranda, 1969); en *Glicine sp.* (Weiss, 1949) y en *Vigna unguiculata* (Sangwan y Lodhi, 1998). Otros autores como Hartwig y Hinson (1963) y Clark y Donnelly (1964), quienes trabajaron en *Glycine sp.* y en *V. sativa*, respectivamente, afirman que los genes involucrados en la herencia del color de flor están ubicados en más de un locus, con diferente acción génica, y que el color morado domina al color azul y rosa y éstos dominan al blanco. Adicionalmente, Martin y Gerats (1993) han propuesto que además de los genes estructurales, que determinan el tipo de pigmento dominante en la flor, existen genes reguladores que controlan la cantidad y distribución de dicho pigmento, generando matices y tonalidades en la flor entre el color dominante y el color blanco. Para la estimación del tipo de polinización en condiciones de campo, es conveniente la utilización del color de flor como marcador genético, pues es una característica polimórfica, heredable, de tipo monogénico u oligogénico y su registro es fácil y rápido (Bretting y Widrechner, 1995).

El conocimiento del sistema reproductivo de una especie hace posible la elección de una estrategia efectiva de mejoramiento; permite seleccionar los procedimientos óptimos de mantenimiento del germoplasma y pureza varietal y ayuda a predecir su comportamiento evolutivo. Con la finalidad de generar información sobre el tipo de reproducción en chí y su comportamiento según la variedad, la localidad y la época del año, los objetivos del presente trabajo fueron: a) Determinar el porcentaje de cruzamiento natural dentro y

entre poblaciones de *S. hispanica*, utilizando como marcador el color de flor, bajo las condiciones ambientales de Chapingo, México y b) Caracterizar morfológicamente la progenie obtenida del cruzamiento natural entre una población de chíá silvestre y otra de chíá cultivada.

MATERIALES Y MÉTODOS

El material genético utilizado fue semilla de plantas con flor morada y con flor blanca de una variedad de chíá cultivada en Acatic, Jalisco y donada por el Ing. Guillermo Orozco de Rosas. Aunque se ha observado polimorfismo en varias características de la variedad en condiciones de cultivo, no se han evaluado las proporciones de segregación en el color de la flor. Lo que sí es cualitativamente observable es la predominancia del color morado de la flor en la variedad; el color blanco de la flor fue probablemente resultado de una mutación y la planta seleccionada fue mantenida aisladamente en reproducción. Se utilizó también la semilla de chíá de un material silvestre, con flores azules, de la colección de Howard Gentry de la Universidad de California, en Riverside, y colectada en Sta. Lucía, Sinaloa. En evaluaciones previas, los materiales se identificaron y se mantuvieron con el color de flor característico.

La investigación comprendió dos fases: La primera consistió en establecer dos lotes de polinización, en áreas distantes entre sí unos 600 m aproximadamente, dentro del Campo Agrícola Experimental de la Universidad Autónoma Chapingo (CAEUACH), durante el ciclo agrícola primavera-verano de 1999.

En los dos lotes de polinización se establecieron plantas de un mes de nacidas, las cuales germinaron y crecieron en charolas en invernadero y cuya semilla fue sembrada el 12 de mayo. La operación de trasplante se realizó el 12 de junio ubicando, en el primer lote, de forma alternada en surcos, plantas que darían flores de color morado con plantas que al florecer presentarían flores de color blanco, ambas de la población de chíá de Acatic. El lote de polinización incluyó ocho surcos de 9 m de largo, con separación entre surcos de 0.8 m y entre plantas de 25 cm. El mismo arreglo topológico se estableció en el segundo lote con la diferencia de que en éste se pusieron de forma alternada en surcos, plantas que se sabía tendrían flores moradas, del cultivar de chíá de Acatic, con otras que se conocía darían flores azules, de la población de chíá silvestre de Sinaloa. En un extremo de cada lote se colocaron dos cajas de abejas para asegurar un alto flujo de polen al momento de la floración.

La segunda fase se realizó en el lote SM-17 del CAEUACH, en el ciclo primavera-verano del 2000. De la semilla cosechada en los dos lotes de polinización del ciclo anterior, se seleccionó la de 50 plantas del genotipo de flor blanca y la de 42 plantas de flor azul de Sinaloa. El 6 de junio, de cada planta se sembraron, a "chorrillo", tres gramos de semilla por surco; éstos fueron de 8 m de largo y 0.8 m

de separación entre ellos. Con la finalidad de mantener la mayor cantidad de plantas que permitiera registrar los eventos de cruzamiento, aún en progenies de plantas con una escasa frecuencia de cruzamiento natural, no se realizó aclareo. A la floración, se registró el número total de plantas y el número de plantas de flor morada en cada surco. Por las referencias bibliográficas sobre la herencia del color de flor, se consideró el color morado como dominante sobre el color azul y blanco y, por lo tanto, como gene marcador.

Para precisar las diferencias en las características de la estructura floral entre poblaciones de chíá de diferente origen geográfico y su posible efecto en la frecuencia de cruzamiento natural; así como para la caracterización morfológica de la progenie obtenida del cruzamiento natural entre la población de chíá cultivada de Acatic, Jalisco y la población silvestre de Sinaloa, en una muestra de 22 plantas de cada uno de los dos progenitores y 22 plantas de su progenie, se registraron las siguientes variables: el diámetro del tallo (mm), medido a nivel del primer nudo; la longitud (L) y el ancho (A) del limbo (cm), en una hoja ubicada en el quinto nudo del tallo; la relación L/A del limbo de hoja y el número de inflorescencias en toda la planta. En dos flores de la parte media de la inflorescencia principal, de cada planta, se registró: la longitud total del cáliz (mm), medida a partir de la base del mismo; el color de la flor, la longitud total del tubo de la corola (mm); el ancho del labio inferior de la corola (mm); el largo y el ancho (mm) de las dos brácteas ubicadas en la parte basal del primer verticilo. A la inflorescencia principal de cada planta se le midió: la longitud (cm), el número de verticilos y el número de flores desarrolladas en el primer verticilo; se identificó el tipo de cáliz al madurar: abierto y que expulsa la semilla (dehiscente) o cerrado y que retiene la semilla (indehiscente). Finalmente, en dos muestras de cada planta se obtuvo el peso promedio de 100 semillas (g) utilizando una balanza electrónica marca Ohaus modelo TS400D con precisión de 0.001 g.

La estimación de la fecundación cruzada natural se hizo mediante el registro de la frecuencia de fenotipos dominantes (flor morada) en progenies de plantas recesivas (flor blanca en la variedad cultivada de Acatic o flor azul en el material silvestre de Sinaloa). Las frecuencias de cruzamiento obtenidas fueron agrupadas en clases para observar la variación entre las progenies. Las variables medidas en el cultivar de Acatic, en el material silvestre de Sinaloa y en sus híbridos se analizaron formando dos contrastes (contraste 1: híbrido vs. progenitor silvestre; contraste 2: híbrido vs. progenitor cultivado) utilizando una prueba de t con 0.01 de probabilidad (Infante y Zárate de Lara, 1986).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cruzamiento natural intrapoblacional

El rango de cruzamiento natural en la chíá de Acatic, observado en el color de flor, varió de 10.54 a 42.74 %, con una media general de 22.17 % (Cuadro 1). El 36 % de las

progenies de plantas con flor blanca presentaron un intervalo de cruzamiento natural de 10.54 a 20 %; mientras que la mayoría de las progenies (64 %) presentaron valores mayores al 20 %, con un máximo de 42.74 %.

La media y el rango de cruzamiento natural obtenidos indican que el tipo de fecundación, en la variedad cultivada de *S. hispanica* de Acatic, es del tipo intermedio o mixto; en este tipo de apareamiento la autofecundación ocurre dentro de un intervalo de cruzamiento natural que varía de 20 a 80 % (Schemske y Lande, 1985) o de 10 a 90 % (Clegg, 1980).

En especies entomófilas como *S. hispanica* ciertas características del ambiente como la abundancia del polinizador, las fluctuaciones de la actividad del insecto y la densidad de plantas pueden influir en los patrones de flujo de polen y por tanto, en las frecuencias de cruzamiento como lo reportado por Clegg (1980); Schemske y Lande (1985) y Wolff *et al.* (1988). La frecuencia de cruzamiento natural en la población de chíá de Acatic obtenida en esta investigación es diferente a la que presenta en su zona de origen. A nivel experimental se estableció un arreglo uniforme entre plantas, que producen flores blancas y moradas alternadas a igual distancia y se le proporcionó una mayor abundancia de polinizadores (dos cajas de abejas en una superficie de 57.6 m²); en Acatic, Jalisco se ha estimado un porcentaje de cruzamiento natural entre 10 a 15 %, en siembras a "chorrillo" y con sus polinizadores nativos. En Acatic se utilizó el color de la testa de la semilla como marcador genético; el cruzamiento natural se estimó con el porcentaje de semilla de color negro en la progenie F₁ de plantas con semilla de color blanco, seleccionadas en las parcelas de cultivo y su semilla sembrada por separado.

La presencia de límites variables de cruzamiento natural en estos genotipos indica que la autocompatibilidad está presente en *Salvia hispanica* como lo sugieren Haque y Goshal (1981); en otras especies autocompatibles, ciertas características como la protandria (Mann, 1959; Schoen, 1982) o la presencia de plantas androestériles (Wolff *et al.*, 1988), pueden impedir la autofecundación. En *S. hispanica*,

la presencia de plantas androestériles determina una mayor frecuencia de cruzamiento natural o baja producción de semilla en ausencia de los polinizadores (Haque y Goshal, 1981).

La presencia de tres fenotipos (flor morada, azul y blanca) en la F₁ del cruzamiento de plantas que producen flor blanca con plantas que producen flor morada, ambas de la variedad cultivada de Acatic, no es consistente con la hipótesis de que el color de flor es monogénico, siendo el color morado completamente dominante sobre el color blanco, como lo reportan en otras especies Donnelly (1958), Miranda (1969), Weiss (1949) y Sangwan y Lodhi (1998). No pudo haber contaminación de polen de plantas de chíá tipo Sinaloa, de flores azules, ubicadas en el segundo lote de polinización; ya que, el distanciamiento establecido entre los dos lotes de polinización está dentro del límite de aislamiento recomendado para ciertas especies entomófilas como la alfalfa (*Medicago sativa*) (100-400 m) (SARH, 1980) y además, las plantas de flor azul que aparecieron en la F₁ presentaron las otras características morfológicas propias de la variedad cultivada de Acatic; entre ellas el carácter indehiscente, que es recesivo. Se sugiere, por lo tanto, que probablemente los genes que determinan el color de flor en *S. hispanica* pueden estar ubicados en más de un locus, con diferente acción génica, donde el color blanco de la flor es la expresión del homocigote recesivo, como lo sugieren Hartwig y Hinson (1963) y Clark y Donnelly (1964) para otras especies. Considerando el sistema de apareamiento mixto o intermedio que caracteriza al cultivar de chíá de Acatic, es probable que el genotipo de algunas plantas de flor morada, utilizadas en el lote de polinización, fuera heterocigótico para uno o más loci, y esto generó segregación, apareciendo plantas con flor azul en las progenies. Lo planteado hipotéticamente es posible confirmarlo a través de la cruce de plantas homocigóticas para color de flor, la autofecundación de la F₁ obtenida y la evaluación de las frecuencias fenotípicas en la progenie de la F₂.

Cruzamiento natural interpoblacional

Cuando la población de chíá tipo Sinaloa se sembró alternadamente con la población de chíá de Acatic, los límites

CUADRO 1. Frecuencia de fecundación cruzada natural entre dos genotipos de chíá (flor blanca x flor morada) de la variedad cultivada de Acatic, Jalisco, evaluada en 50 progenies de flor blanca.

| Número de progenies de plantas con flor blanca | Límites de fecundación cruzada (%) | Número total de plantas | | Promedio de fecundación cruzada (%) |
|--|------------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| | | Con flores blancas | Con flor azul o morada | |
| 5 | 10.54-15.00 | 1.798 | 277 | 13.35 ± 1.51 |
| 13 | 15.01-20.00 | 3.898 | 822 | 17.42 ± 1.81 |
| 13 | 20.01-25.00 | 2.356 | 670 | 22.14 ± 1.68 |
| 10 | 25.01-30.00 | 2.227 | 836 | 27.29 ± 1.51 |
| 5 | 30.01-35.00 | 926 | 446 | 32.51 ± 0.69 |
| 3 | 35.01-40.00 | 369 | 213 | 36.60 ± 0.91 |
| 1 | 40.01-42.74 | 71 | 53 | 42.74 |
| 50 | 10.54-42.74 | 11.645 | 3.317 | 22.17 ± 7.25 |

de fecundación cruzada en la chíá tipo Sinaloa fueron de 0 a 7.47 %, con una media general de 1.59 % (Cuadro 2). Los límites de cruzamiento natural en el 78.6 % de las progenies fueron de 0.1 a 3 % y sólo en cuatro progenies, no hubo indicios de fecundación cruzada. Cahill (2004) reporta, en *S. hispanica*, un 0.24 % de cruzamiento natural entre una población silvestre colectada en Cuescomapa, Guerrero y una domesticada procedente de Nicaragua. Los valores de cruzamiento menores al 10 % son característicos de poblaciones con un sistema de apareamiento principalmente autógeno (Clegg, 1980).

En el Cuadro 3 se observa que las plantas de chíá cultivada de Acatic presentan flores de mayor tamaño y un mayor número de inflorescencias con más verticilos y flores que las de chíá silvestre de Sinaloa; estas características indicarían una mayor producción de polen en la población de Acatic que debería haber generado mayor frecuencia de fecundación cruzada. Sin embargo, en el mismo cuadro se registra que las flores en la población de Sinaloa son más pequeñas y de color menos intenso; el labio inferior de la corola es más angosto, y la menor diferencia entre la longitud del tubo de la corola y la del cáliz indica que el cáliz envuelve más a la flor, lo que pudo haber propiciado un comportamiento preferencial del polinizador hacia las flores de la chíá de Acatic, favoreciendo una mayor frecuencia de autofecundación en las plantas de chíá de Sinaloa. Según Ennos y Clegg (1983), los polinizadores son atraídos por flores de coloración más intensa y para Levin (1971) las flores pequeñas, con menos señales visuales, están relacionadas con especies autógenas; en *S. hispanica*, Haque y Goshal (1981) afirman que la autofecundación se presenta en flores pequeñas y homostílicas.

El hábitat natural de las poblaciones silvestres de *S. hispanica* es el bosque de pino (*Pinus* spp.), de encino (*Quercus* spp.) o de pino-encino de la Sierra Madre Occidental, del Eje Neovolcánico Transversal y de la Sierra Madre del Sur. Las grandes diferencias orográficas y climáticas que caracterizan al paisaje montañoso han dado origen a un aislamiento geográfico y genético de dichas poblaciones. Según Stebbins (1957) y Jain (1976) esta condición es un

CUADRO 3. Características morfológicas de la estructura floral de la población de chíá silvestre de Sinaloa y de la variedad de chíá cultivada de Acatic.

| Característica morfológica | Poblaciones de chíá ² | |
|--|----------------------------------|---------------|
| | Sinaloa | Acatic |
| Longitud de cáliz (mm) | 6.46 ± 0.59 ^{NS} | 6.65 ± 0.48 |
| Longitud del tubo de la corola (mm) | 7.21 ± 0.33* | 8.99 ± 0.42 |
| Ancho del labio inferior de la corola (mm) | 2.97 ± 0.30* | 5.96 ± 0.44 |
| Número de inflorescencias | 48.32 ± 20.51* | 70.00 ± 23.89 |
| Número de verticilos en inflorescencia | 16.14 ± 0.89* | 21.36 ± 1.92 |
| Número de flores en primer verticilo | 12.10 ± 1.31* | 15.77 ± 2.29 |
| Color de flor | azul | morado |

²Las medias de la chíá silvestre de Sinaloa con (*) son diferentes y con ^{NS} son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.01$ a las medias de la variedad cultivada de Acatic.

factor ambiental que favorece la autofecundación y para Ramamoorthy y Elliot (1998), la fragmentación geográfica y la autofecundación ha conducido a la diversificación y evolución de las especies de *Salvia*. En condiciones naturales no existe hibridación intraespecífica entre la chíá silvestre y cultivada porque desarrollan en regiones geográficas diferentes; en cambio, las cruces controladas entre ellas producen progenie fértil (Cahill, 2004).

En el Cuadro 4 se presentan algunas características morfológicas comparativas entre los híbridos y sus progenitores. El tamaño del cáliz es la única característica en la que no existen diferencias significativas entre el híbrido y sus progenitores; en cambio, el híbrido presenta valores intermedios y diferentes ($P \leq 0.01$) a los de sus progenitores en la longitud y ancho del limbo de la hoja, la longitud de la corola, el ancho del labio inferior de la corola y el peso de la semilla. El híbrido no se diferencia de su progenitor cultivado en el diámetro del tallo, el color de la flor, la longitud de la inflorescencia, las flores en el primer verticilo y el número de inflorescencias; pero el cáliz al madurar es abierto (dehiscente) como su progenitor silvestre.

Ladizinsky (1985) menciona que la autofecundación es una barrera para el intercambio genético entre un cultivo

CUADRO 2. Frecuencia de fecundación cruzada natural en dos poblaciones de chíá (Silvestre de Sinaloa, flor azul x Cultivada de Acatic, flor morada), evaluada en 42 progenies de chíá de flor azul.

| Número de progenies de plantas con flor azul | Límites de fecundación cruzada (%) | Número total de plantas | | Promedio de fecundación cruzada (%) |
|--|------------------------------------|-------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| | | Con flores azules | Con flores moradas | |
| 4 | 0.00 | 1.148 | - | 0.00 |
| 19 | 0.01-1.50 | 5.969 | 56 | 0.93 ± 0.43 |
| 14 | 1.51-3.00 | 3.453 | 77 | 2.18 ± 0.49 |
| 3 | 3.01-4.50 | 1.016 | 40 | 3.79 ± 0.45 |
| 1 | 4.51-6.00 | 108 | 6 | 5.26 |
| 1 | 6.01-7.47 | 161 | 13 | 7.47 |
| 42 | 0.00-7.47 | 11.855 | 192 | 1.59 ± 1.25 |

CUADRO 4. Características morfológicas de los híbridos en progenies de plantas de la población de chíá silvestre de Sinaloa cruzada en forma natural con la población de chíá cultivada de Acatic, Jalisco.

| Característica morfológica | Poblaciones de chíá evaluadas ^z | | |
|----------------------------------|--|----------------------|-----------------------------|
| | Progenitor silvestre | Híbrido | Progenitor cultivado |
| Longitud de limbo (cm) | 7.90 ± 0.57* | 9.61 ± 0.72 | 11.74 ± 1.22* |
| Ancho de limbo (cm) | 4.38 ± 0.37* | 5.28 ± 0.51 | 6.06 ± 0.65* |
| Relación L/A de limbo | 1.80 ± 0.06 ^{NS} | 1.82 ± 0.11 | 1.94 ± 0.22 ^{NS} |
| Longitud de cáliz (mm) | 6.46 ± 0.59 ^{NS} | 6.83 ± 0.45 | 6.65 ± 0.48 ^{NS} |
| Longitud de la corola (mm) | 7.21 ± 0.33* | 8.12 ± 0.31 | 8.99 ± 0.42* |
| Labio inferior de la corola (mm) | 2.97 ± 0.30* | 4.16 ± 0.45 | 5.96 ± 0.44* |
| Longitud de bráctea (mm) | 10.84 ± 0.78* | 11.65 ± 0.89 | 11.13 ± 0.84 ^{NS} |
| Ancho de bráctea (mm) | 4.71 ± 0.37* | 5.27 ± 0.68 | 5.36 ± 0.62 ^{NS} |
| Diámetro de tallo (mm) | 9.90 ± 1.65* | 12.29 ± 2.45 | 11.91 ± 2.44 ^{NS} |
| Número de inflorescencias | 48.32 ± 20.51* | 68.05 ± 25.3 | 70.00 ± 23.89 ^{NS} |
| Verticilos en inflorescencia | 16.14 ± 0.89* | 19.64 ± 1.84 | 21.36 ± 1.92* |
| Flores en primer verticilo | 12.10 ± 1.31* | 14.18 ± 2.08 | 15.77 ± 2.29 ^{NS} |
| Longitud de inflorescencia (cm) | 11.28 ± 2.04* | 13.00 ± 3.11 | 13.20 ± 1.75 ^{NS} |
| Peso de 100 semillas (g) | 0.105 ± 0.0029* | 0.117 ± 0.0025 | 0.141 ± 0.0033* |
| Color de flor | azul | morada | morada |
| Cáliz al madurar (dehiscencia) | Abierto (dehiscente) | Abierto (dehiscente) | Cerrado (indehiscente) |

^zSe plantearon dos contrastes: chíá silvestre de Sinaloa vs. híbrido y chíá cultivada de Acatic vs. híbrido. Las medias de cada característica con (*) son diferentes y con (^{NS}) son iguales de acuerdo con la prueba de Tukey a una $P \leq 0.01$ con respecto a la media del híbrido.

y sus parientes silvestres. Cuando la hibridación tiene lugar, existe un mayor efecto sobre la población silvestre. La selección natural actúa en favor de la dehiscencia del fruto y de la dormancia de la semilla, que aseguran adaptación en los ambientes naturales; pero también hacia características del progenitor cultivado, como el vigor de la planta y la producción de progenie abundante y de rápido crecimiento que confieren adaptabilidad a hábitats artificiales. El principal resultado de este proceso puede ser la formación de razas con alto potencial de dispersión y colonización de áreas naturales diferentes a su ambiente original; algunas de estas razas pueden ser seleccionadas artificialmente y mantenerse bajo cultivo.

El mayor promedio de cruzamiento natural observado en el cultivar de chíá de Acatic, en comparación con la población de chíá silvestre, podría indicar que el sistema de apareamiento de *S. hispanica* se ha modificado bajo condiciones de cultivo; en *Nicotiana glauca*, Breese (1959) demostró que es posible modificar por selección la morfología y el desarrollo de la flor y en consecuencia afectar el sistema reproductivo. La obtención experimental de híbridos de chíá, aunque escasos, indica que los progenitores son subespecies o razas de *S. hispanica*, sin mecanismos de aislamiento reproductivo intraespecíficos, por lo que, el intercambio genético es posible aún entre genotipos silvestres y cultivados de origen geográfico diferente. Por lo mismo y siendo subespecies de tipo alopátrico, se puede decir que su separación evolutiva es relativamente reciente. Para Harlan *et al.* (1973) la evolución bajo domesticación raramente conduce a la formación de nuevas especies; las

diferencias genéticas entre razas cultivadas y silvestres no son grandes, porque sólo pocos genes están implicados en el proceso de domesticación.

El intercambio genético entre tipos de chíá pudo haber sido más intenso en la época prehispánica, cuando, dada la importancia de esta planta en la cultura mesoamericana, los genotipos silvestres y cultivados pudieron convivir a lo largo de la zona de distribución natural de esta especie. Aunque en la época colonial se incrementó el deterioro del germoplasma y del conocimiento tecnológico de la chíá, es probable que en ambientes naturales o artificiales hayan permanecido los individuos segregantes de las constantes hibridaciones y hayan dado origen, por selección, a ciertos materiales cultivados que se utilizan en la actualidad.

Finalmente, para ampliar el conocimiento sobre el tipo de polinización de la especie es conveniente desarrollar investigación sobre la estructura floral de las poblaciones, el grado de protandria o de androesterilidad en los genotipos, el comportamiento del insecto polinizador y el efecto bajo condiciones de cultivo.

CONCLUSIONES

Considerando las condiciones experimentales y ambientales de este trabajo, las conclusiones fueron:

Los genotipos de *Salvia hispanica* de Acatic presentan un sistema de apareamiento intermedio o mixto, con un

promedio de cruzamiento natural de 22.17 % y límites de fecundación cruzada de 10.54 a 42.74 %.

Es probable que el color de flor en el cultivar de Acatic, esté controlado por más de un par de genes con acción génica diferente a la dominancia completa.

Cuando la población silvestre de *S. hispanica*, tipo Sinaloa, se cruzó con la población cultivada de Acatic, se estimó una media de fecundación cruzada natural de 1.51 % y un intervalo de 0.0 a 7.47 %, lo que indica un sistema de apareamiento principalmente autógamo en la silvestre.

No existe aislamiento reproductivo entre la chíá silvestre de Sinaloa y el cultivar de Acatic, Jalisco, de diferente origen geográfico y grado de domesticación, lo cual indica que se trata de subespecies o razas pertenecientes a *Salvia hispanica*.

Los híbridos obtenidos entre las dos subespecies son vigorosos y de alta capacidad reproductiva, como su progenitor cultivado, pero presentan frutos dehiscentes, como el progenitor silvestre.

AGRADECIMIENTOS

Al ingeniero Guillermo Orozco de Rosas, Departamento de proyectos, Fundación Produce, Jalisco por habernos donado el material de chíá de flor blanca de Acatic.

LITERATURA CITADA

- BREESE, E. L. 1959. Selection for differing degrees of out-breeding in *Nicotiana rustica*. *Annals of Botany*, N.S. 23(90): 331-344.
- BRETTING, P. K.; WIDRLECHNER, M. P. 1995. Genetic markers and plant genetic resource management, pp. 11-86. *In: Plant Breeding Reviews*. Volume 13. JANICK, J. (ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- BUKASOV, S. M. 1963. Las plantas cultivadas de México, Guatemala y Colombia. Publicación miscelánea # 20. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA. Zona Andina, Lima, Perú. pp. 193-194.
- CAHILL, J. P. 2004. Genetic diversity among varieties of chia (*Salvia hispanica* L.). *Genetic Resources and Crop Evolution* 51: 773-781.
- CLARK, E. M.; DONNELLY, E. D. 1964. *Vicia*. Inheritance of plant color and recessive epistasis in flower color. *Crop Science* 4: 661-662.
- CLEGG, M. T. 1980. Measuring plant mating systems. *BioScience* 30(12): 814-818.
- DONNELLY, E. D. 1958. Inheritance of white flower color in common vetch, *Vicia sativa*. *Agronomy Journal* 50: 763-764.
- ENNOS, R. A.; CLEGG, M. T. 1983. Flower color variation in the morning glory, *Ipomoea purpurea*. *The Journal of Heredity* 74: 247-250.
- FAEGRI, K.; VAN DER PIJL, L. 1979. *The Principles of Pollination Ecology*. Tercera edición revisada. Pergamon press. London. 244 p.
- HAQUE, M. S.; GHOSHAL, K. K. 1981. Floral biology and breeding system in the genus *Salvia* L. *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.* B47 (5): 716-724.
- HARLAN, J. R.; DE Wet, J. M. J.; PRICE, E. G. 1973. Comparative evolution in cereals. *Evolution* 27: 311-325.
- HARTWIG, E. E.; HINSON, K. 1963. Inheritance of flower color of soybeans. *Crop Science* 3: 152-153.
- INFANTE, G. S.; ZÁRATE DE LARA, G. P. 1986. *Métodos Estadísticos*. Segunda reimposición, Editorial Trillas, México. 643 p.
- JAIN, S. K. 1976. The evolution of inbreeding in plants. *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 7: 469-495.
- LADIZINSKY, G. 1985. Founder effect in crop-plant evolution. *Economic Botany*. 39(2): 191-199.
- LEVIN, D. A. 1971. The origin of reproductive isolating mechanisms in flowering plants. *Taxon* 20(1): 91-113.
- MANN, P. 1959. *Systematics of flowering plants*. Methuen and Co. Ltd. London. pp. 254-255.
- MARTIN, C.; GERATS, T. 1993. The control of flower coloration, pp. 219-255. *In: The Molecular Biology of Flowering*. B.R. JORDAN (ed.). C.A.B. Internacional, UK.
- MARTÍNEZ, M. 1959. *Plantas Útiles de la Flora Mexicana*. Ediciones de Botas. México. pp. 198-202.
- MIRANDA COLÍN, S. 1969. Estudio sobre la herencia de tres caracteres de frijol. *Agrociencia* 4(1): 115-122.
- RAMAMOORTHY, T. P. 1985. *Salvia* L., pp. 298-310. *In: Flora Fanerógama del Valle de México*. Volumen II (Dicotiledóneas). RZEDOWSKI, J.; DE RZEDOWSKI, G.C. (eds.). Instituto Politécnico Nacional. México.
- RAMAMOORTHY, T. P.; ELLIOT, M. 1998. Lamiaceae de México: diversidad, distribución, endemismo y evolución, pp. 501-526. *In: RAMAMOORTHY, T.P.; BYE, R.; LOT, A.; FA, J. (eds.)*. Diversidad Biológica de México: Orígenes y Distribución. Primera edición en español. Universidad Autónoma de México, México, D. F.
- SANGWAN, R. S.; LODHI, G. P. 1998. Inheritance of flower and pod colour in cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). *Euphytica* 102: 191-193.
- SARH. 1980. Normas para la certificación de semillas. Dirección General de Agricultura, México. 91 p.
- SCHEMSKE, D. W.; LANDE, R. 1985. The evolution of self-fertilization and inbreeding depression in plants. II. Empirical observations. *Evolution* 39(1): 41-52.
- SCHOEN, D. J. 1982. The breeding system of *Gilia achilleifolia*: Variation in floral characteristics and outcrossing rate. *Evolution* 36(2): 352-360.
- STEBBINS, G. L. 1957. Self-fertilization and population variation in the higher plants. *Amer. Natur.* 91: 337-354.
- WEISS, M. G. 1949. Soybeans. *Advances in Agronomy* 1: 77-157.
- WOLFF, K.; FRISO, B.; VAN DAMME, J. M. M. 1988. Outcrossing rates and male sterility in natural populations of *Plantago coronopus*. *Theor. Appl. Genet.* 76: 190-196.