



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA
INSTITUTO DE HORTICULTURA

COEFICIENTE DE ENDOGAMIA INSESGADO DE
SINTÉTICOS DERIVADOS DE CRUZAS
TRILINEALES

TESIS

Que como requisito parcial para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

Presenta:

ALEJANDRO IBARRA SÁNCHEZ



Bajo la supervisión de:

JAIME SAHAGÚN CASTELLANOS, Ph. D.



Instituto de Horticultura

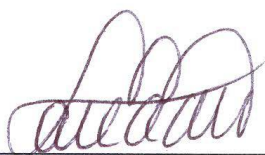
Chapingo, Estado de México, junio de 2017

COEFICIENTE DE ENDOGAMIA INSESGADO DE SINTÉTICOS DERIVADOS DE
CRUZAS TRILINEALES

Tesis realizada por **ALEJANDRO IBARRA SÁNCHEZ** bajo la supervisión del
Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial
para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN HORTICULTURA

DIRECTOR: _____



PH. D. JAIME SAHAGÚN CASTELLANOS

ASESOR: _____



DR. JUAN ENRIQUE RODRÍGUEZ PÉREZ

ASESOR: _____



DR. AURELEANO PEÑA LOMELÍ

CONTENIDO

1 RESUMEN.....	1
2 ABSTRACT.....	2
3 INTRODUCCIÓN.....	3
4 MÉTODOS Y MARCO TEÓRICO.....	4
5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	5
5.1 Coeficientes de endogamia con $F_L=1$ de las líneas progenitoras iniciales.....	5
5.2 Coeficiente de endogamia del $Sinc\tau$ para cualquier valor de F_L	7
5.3 Generalización de la fórmula de $FSinc\tau$ para cualquier valor de m	8
6 CONCLUSIONES.....	14
7 LITERATURA CITADA	15

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Probabilidad de generar alelos con genes idénticos por descendencia de las cruzas y autofecundaciones de los 8 genotipos de una cruza trilineal.....9

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre el tamaño de muestra de cada cruce trilineal (m) y el número de cruces intrapaternales que corresponden a cuadros que tienen autofecundaciones (N_2).....10

Figura 2: Relación entre el tamaño de muestra de cada cruce trilineal (m) y el número de cruces intrapaternales que corresponden a cuadros que no tienen autofecundaciones (N_3).....12

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Autónoma Chapingo por darme la oportunidad de realizar mis estudios a nivel licenciatura. Al Instituto de Horticultura por brindarme la oportunidad de continuar preparándome y por las facilidades para desempeñar las actividades necesarias.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por valioso apoyo otorgado para poder desarrollar mis estudios de posgrado.

Al Dr. Jaime Sahagún Castellanos por su gran apoyo, consejos, conocimiento, experiencia y paciencia durante la realización de la presente tesis y al resto de mi comité asesor: Dr. Juan Enrique Rodríguez Pérez, Dr. Aureliano Peña Lomelí, por su apoyo para la culminación de este trabajo.

A mis padres: Gloria Sánchez Jiménez y Francisco Ibarra Capetillo por darme la vida, inculcarme valores y por su completo apoyo en cualquier meta que me propongo.

A mis hermanos, especialmente a David y Evelina por apoyarme en todos los sentidos para que esta meta se concluyera.

A mis demás familiares y amigos que me apoyaron y que estuvieron ahí en los buenos y malos momentos dentro y fuera de la universidad.

A los profesores que han contribuido a mi formación académica y personal.

DATOS BIBLIOGRAFICOS

El autor nació en Colón, Querétaro, el 19 de julio de 1991. La educación media superior la realizó en el Centro de Bachillerato Tecnológico agropecuario N° 115 generación 2006-2009, en ésta misma institución obtuvo el Título de Técnico en Horticultura, Cédula profesional: 6341378. Los estudios de licenciatura los llevó a cabo en el Departamento de Fitotecnia en el programa de estudios de Agronomía en Horticultura Protegida de la Universidad Autónoma Chapingo, entre los años 2010-2014.

COEFICIENTE DE ENDOGAMIA INSESGADO DE SINTÉTICOS DERIVADOS DE CRUZAS TRILINEALES

INBREEDING COEFFICIENT OF SYNTHETICS DERIVED FROM THREE-WAY LINE CROSS HYBRIDS

1 RESUMEN

Las variedades sintéticas (VSs) son poblaciones generadas mediante el apareamiento aleatorio de sus progenitores. Estas poblaciones son altamente heterocigóticas, heterogéneas y tienen alta capacidad de adaptación a las diferentes condiciones ambientales. Esto las posiciona como una alternativa para los productores de cultivos como la cebolla y el maíz ya que la semilla producida por una variedad sintética debe ser genéticamente igual a la de la población que le dio origen. Por lo anterior, no sería necesario comprar semilla para cada ciclo de producción. Si bien comúnmente los progenitores de las VSs son líneas, en este estudio se abordó el caso de un sintético (Sin_{CT}) en que los progenitores son t cruzas trilineales (CTs) en lugar de $3t$ líneas. Con estas cruas se reduce el número de progenitores que se tiene que manejar para generar un sintético. El objetivo fue desarrollar una ecuación para el coeficiente de endogamia ($FSin_{CT}$) del Sin_{CT} . Este objetivo surgió de la consideración de que la contribución genética de las líneas de cada CT no es balanceada y, por ello, se incrementa el coeficiente de endogamia que, a su vez, tiende a reducir la media genotípica de la VS. Asimismo se consideró que en estudios previos además de información valiosa también se ha generado interrogantes y necesidades de un estudio más general y preciso. El desarrollo de la ecuación para el $FSin_{CT}$ se basó en la probabilidad clásica. Se supuso el uso de líneas progenitoras iniciales no emparentadas, con un coeficiente de endogamia igual a F_L ($0 \leq F_L \leq 1$), y cada progenitor se representó por m plantas. Se encontró que $FSin_{CT}$ es mayor que el coeficiente de endogamia del sintético formado con $3t$ líneas. Sin embargo, a diferencia de fórmulas derivadas previamente, $FSin_{CT}$ es incesgado y más general.

Palabras clave: Media genotípica, arreglo genotípico, híbrido, apareamiento aleatorio.

2 ABSTRACT

The synthetic varieties (SVs) are populations generated by randomly mating their parents. These populations are highly heterozygous, heterogeneous and have a great capacity to adapt to different environmental conditions. They are a good alternative to produce food, mainly by poor growers of crops as onion and maize as the seed produced by a synthetic variety must be genetically the same as that of the population that gave rise to it. Therefore, it would not be necessary to buy seed for each production cycle. Although commonly SVs progenitors are lines, in this study it has been studied the case of a synthetic ($SynTC$) whose parents are t trilinear crosses (TCs) instead of $3t$ lines. With these crosses, the number of progenitors that have to be handled to generate a synthetic decreases. The objective was to develop an equation for the inbreeding coefficient ($FSynTC$) of $SynTC$. This objective arose from the consideration that the genetic contribution of the lines of each TC is not balanced and, therefore, increases the inbreeding coefficient, which, in turn, tends to reduce the genotypic mean of the SV. It was also considered that previous studies besides valuable information have also generated questions and needs of a more general and precise study. The development of the equation for the $FSynTC$ was based on the classical probability. The use of initial parent lines unrelated whose inbreeding coefficient is F_L ($0 \leq F_L \leq 1$) was supposed, and each parent was represented by m plants. It was found that $FSynCT$ is larger than the inbreeding coefficient of the synthetic formed by $3t$ lines. However, opposite to results of previous studies, is more general and unbiased.

Key words: Genotypic mean, genotypic array, hybrid, random mating.

3 INTRODUCCIÓN

La producción de maíz (*Zea mays* L.) a nivel mundial se basa principalmente en el uso de híbridos convencionales, variedades nativas e híbridos transgénicos. Sin embargo, existen otros tipos de cultivares que por razones diversas, entre ellas el desconocimiento (incluso por parte de algunos agrónomos) son poco usadas, lo que implica el no aprovechamiento de las ventajas que podrían ofrecer estos otros tipos de cultivares en situaciones específicas.

En concreto, las variedades sintéticas (VS), también llamadas simplemente sintéticos, son poblaciones generadas por el apareamiento aleatorio de sus individuos. En general, esto produce una población altamente heterocigótica y heterogénea que se asocia a una mayor capacidad de adaptación a las diferentes condiciones ambientales, como sequía, bajas temperaturas, plagas, enfermedades, problemas de nutrición, etc. (Sahagún-Castellanos *et al.*, 2005). Una diferencia relevante de una VS respecto a un híbrido es que la semilla que se cosecha de una variedad sintética debe ser genéticamente igual a la de la población que le dio origen (Sahagún-Castellanos *et al.*, 2005; Márquez-Sánchez, 2008). Esto puede influir fuertemente en los costos de producción, debido a que no sería necesario comprar semilla al inicio de cada ciclo de producción, cuyo costo, en semilla híbrida, llega a representar hasta el 15% de la inversión en la producción de maíz en México (Márquez, 2010a).

Típicamente, los progenitores de VSs son líneas. No obstante, algunos estudios (Sahagún-Castellanos y Villanueva-Verduzco, 1997; Sahagún-Castellanos *et al.*, 2005; Márquez-Sánchez, 2007, 2008) han considerado el uso de cruza simples y cruza dobles, como progenitores de este tipo de variedades. Esta modificación puede reducir costos ya que se disminuye considerablemente el número de materiales genéticos que se tiene que formar y evaluar en experimentos de campo para estudiar las usualmente numerosas VSs que se pueden formar con un número dado de progenitores potenciales.

La formación de VSs requiere tiempo y recursos económicos, que suelen ser reducidos en los programas de mejoramiento genético. Una solución parcial a estos problemas es la predicción del rendimiento, que se relaciona inversamente con el coeficiente de endogamia (Busbice, 1970). Para una población panmíctica de individuos diploides, este coeficiente se puede entender como la probabilidad de que al extraer al azar un individuo, su genotipo esté formado por dos genes idénticos por descendencia, con relación a un locus. Estos dos genes pueden ser visualizados como una muestra de tamaño dos tomada al azar con reemplazo del espacio muestral formado por todos los genes de todos los individuos de la población (Sahagún-Castellanos *et al.*, 2013).

Esta investigación tiene como objetivo derivar ecuaciones insesgadas y generales para el coeficiente de endogamia de los sintéticos cuyos progenitores son cruza trilineales.

4 MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se basó en el modelo de un locus de una especie diploide que se reproduce por apareamiento aleatorio como el maíz (*Zea mays* L.), cebolla (*Allium cepa* L.), etc. De acuerdo con Sahagún-Castellanos (1994b), una VS se puede generar por el apareamiento aleatorio de sus progenitores. Según esta consideración, el coeficiente de endogamia de una VS es la probabilidad de que al extraer al azar un individuo de tal variedad éste tenga un genotipo compuesto por dos genes idénticos por descendencia.

En particular, si los progenitores son t cruza trilineales, y cada progenitor está representado por m individuos, de acuerdo con el modelo de un locus, el arreglo gamético de los progenitores de la VS está formado por los $2mt$ genes de los individuos que representan las t cruza trilineales. Así, el coeficiente de endogamia puede expresarse como la probabilidad de la ocurrencia de un evento de un espacio muestral en el contexto de la teoría de la probabilidad clásica (Sahagún-Castellanos *et al.*, 2013).

Para la derivación del coeficiente de endogamia de la VS se supuso que: 1) el coeficiente de endogamia de las líneas progenitoras iniciales es F_L ($0 \leq F_L \leq 1$); 2) estas líneas no tienen relación de parentesco; 3) que cada cruce trilineal está representada por m plantas. Así, la VS es la población resultante del apareamiento aleatorio de los mt individuos (Sin_{CT}). De acuerdo con estas consideraciones, al coeficiente de endogamia del Sin_{CT} ($FSin_{CT}$) sólo contribuirán las autofecundaciones y los apareamientos intrapaternales, únicas fuentes de genotipos constituidos por 2 genes idénticos por descendencia.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Derivación del $FSin_{CT}$ correspondiente al caso $F_L=1$

Según las consideraciones del marco teórico, el coeficiente de endogamia de una variedad sintética formada por t cruces trilineales, cada una de ellas representada por m individuos, es un cociente. El numerador es la suma de productos formados por el número de autofecundaciones y el de cruces intrapaternales, multiplicados por la probabilidad de que los dos genes de un individuo tomado al azar de su conjunto sean idénticos por descendencia. El denominador es la suma del número de autofecundaciones y los números de cruces intra e interpaternales que puede generar el apareamiento aleatorio de los progenitores.

En una población generada por el apareamiento aleatorio de t cruces trilineales donde cada una está representada por m individuos, el número de progenies generada por autofecundación es tm . Por otra parte, el número de cruces intrapaternales es $tm(m-1)$, debido a que cada miembro de los m que representan un progenitor se cruza directa y recíprocamente con cada uno de los $m-1$ miembros restantes. De acuerdo con lo anterior, el número de autofecundaciones más el número de cruzamientos intrapaternales en esta población es: tm^2 .

En una cruce trilineal cada uno de los individuos tiene en su genotipo, para cada locus, un gen de la línea progenitora; por ejemplo la línea A_1A_1 siempre aportará

un gen A_1 . Además, tendrá uno de los dos genes posibles de la cruce simple progenitora cuyo genotipo es de la forma A_2A_3 (generado por la cruce simple $A_2A_2 \times A_3A_3$) lo que hace que en una cruce trilineal existan dos posibles genotipos: A_1A_2 y A_1A_3 . Así mismo, los posibles cruzamientos de la cruce trilineal son: $A_1A_2 \times A_1A_2$, $A_1A_2 \times A_1A_3$ y $A_1A_3 \times A_1A_3$. El cruzamiento $A_1A_2 \times A_1A_2$ produce el arreglo genotípico: $(1/4)A_1A_1 + (1/2)A_1A_2 + (1/4)A_2A_2$; el cruzamiento $A_1A_2 \times A_1A_3$ genera el arreglo genotípico: $(1/4)A_1A_1 + (1/4)A_1A_3 + (1/4)A_1A_2 + (1/4)A_2A_3$; mientras que el otro posible cruzamiento, $A_1A_3 \times A_1A_3$, produce el arreglo genotípico: $(1/4)A_1A_1 + (1/2)A_1A_3 + (1/4)A_3A_3$. En conjunto, el arreglo genotípico de la cruce trilineal del ejemplo es: $(4/16)A_1A_1 + (4/16)A_1A_2 + (1/16)A_2A_2 + (4/16)A_1A_3 + (2/16)A_2A_3 + (1/16)A_3A_3$. Como puede observarse, en esta progenie hay tres genotipos homocigotos, A_1A_1 , A_2A_2 y A_3A_3 , con probabilidades (frecuencias relativas) de: $4/16$, $1/16$ y $1/16$, respectivamente, cuya suma es $3/8$. Por ello, la probabilidad de que se genere un individuo homocigoto en un apareamiento al azar entre los m individuos que representan una cruce trilineal es de $3/8$.

Como ya se mencionó, las líneas progenitoras iniciales de las cruces trilineales no tienen relación de parentesco. Por esta razón los cruzamientos interpaternales no pueden generar genotipos con dos genes idénticos por descendencia, y por lo tanto, no contribuyen al coeficiente de endogamia de la variedad sintética a desarrollar.

Para finalizar, sólo es necesario determinar el denominador del cociente del $FSinCT$. Este número es $(tm)^2$ puesto que cada uno de los tm individuos, además de autofecundarse se cruza con los individuos restantes.

De acuerdo con los resultados previamente obtenidos en este contexto, el coeficiente de endogamia de una variedad sintética formada por t cruces trilineales, cada una de ellas representada por m individuos, se puede expresar inicialmente de la siguiente manera:

$$FSin_{CT} = \frac{\left(\frac{3}{8}\right) * (tm^2)}{(tm)^2}$$

Y de una forma simplificada como:

$$FSin_{CT} = \frac{3}{8t}$$

Esta ecuación es únicamente aplicable para F_L igual a 1 y valores “grandes” de m , por ello se procederá a desarrollar ecuaciones que funcionen para cualquier valor de F_L y m .

5.2 Coeficiente de endogamia del Sin_{CT} para cualquier valor de F_L

Para derivar el coeficiente de endogamia para una crucea trilineal para cualquier valor de F_L de las líneas progenitoras iniciales es necesario generar el arreglo genotípico base, éste está formado por los ocho posibles genotipos para una CT. Para este desarrollo se tomará como genotipos A_1A_2 , B_1B_2 y C_1C_2 para las líneas A, B y C, respectivamente, donde los alelos 1 y 2, para cada línea, pueden ser idénticos por descendencia con una probabilidad igual a F_L .

Según las consideraciones anteriores, la crucea trilineal tendrá 8 posibles genotipos. Estos son: A_1C_1 , A_1C_2 , A_2C_1 , A_2C_2 , B_1C_1 , B_1C_2 , B_2C_1 , B_2C_2 . El apareamiento aleatorio de estos 8 genotipos genera un cuadro base para la derivación del coeficiente de endogamia. Este cuadro base permite derivar la probabilidad de obtener individuos con alelos idénticos por descendencia. Esta es $(6+6 F_L)/32$ que es igual a $(3/8) (1+F_L)/2$. Este resultado es congruente con el obtenido cuando se consideró líneas puras, ya que si el valor de F_L de las líneas progenitoras iniciales (LPIs) es igual a 1, la ecuación se reduce al valor calculado anteriormente, $3/8$.

Ahora bien, este resultado es válido sólo cuando la población está en completo equilibrio. Esto se logra únicamente cuando los 8 genotipos de la crucea trilineal antes descritos, A_1C_1 , A_1C_2 , A_2C_1 , A_2C_2 , B_1C_1 , B_1C_2 , B_2C_1 , B_2C_2 , se encuentran en la misma proporción, $1/8$ cada uno y la muestra es grande.

5.3 Generalización de la fórmula de $FSinCT$ para cualquier valor de m

Es de esperarse que el valor de $FSinCT$ sea mayor cuando las frecuencias alélicas en la población no sean iguales, ya que los alelos con mayor frecuencia formarán más genotipos con genes idénticos por descendencia, para esta diferencia entre las frecuencias es de gran relevancia el valor de m , ya que con valores grandes de m la probabilidad de encontrar diferencias significativas entre las frecuencias alélicas tiende a disminuir.

A continuación se considera cualquier valor de m para la derivación del $FSinCT$. Para esto es necesario clasificar los posibles genotipos generados por el apareamiento aleatorio entre los m representantes de una cruce trilineal en dos: los obtenidos por autofecundación y los obtenidos por cruces intrapaternales.

Se considera que cada individuo de la muestra puede autofecundarse. Las m autofecundaciones, denominadas en este estudio como: N_1 , contribuyen al $FSinCT$ ya que al ser genotipos heterocigotos todos los representantes de cada cruce, la probabilidad de que el genotipo de un individuo generado por autofecundación esté formado por dos genes idénticos por descendencia es $1/2$. Para la derivación de $FSinCT$ con esta metodología, se utilizará como referencia al Cuadro 1, generado por las posibles autofecundaciones y cruces intrapaternales entre los ocho genotipos de la cruce trilineal, al cual se ha denominado cuadro base.

Cuadro 1. Probabilidad de generar alelos con genes idénticos por descendencia de las cruzas y autofecundaciones de los 8 genotipos de la craza trilineal (A₁A₂ x B₁B₂) x C₁C₂.

	A ₁ C ₁	A ₁ C ₂	A ₂ C ₁	A ₂ C ₂	B ₁ C ₁	B ₁ C ₂	B ₂ C ₁	B ₂ C ₂
A ₁ C ₁	$\frac{2}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{2F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$
A ₁ C ₂	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{2F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$
A ₂ C ₁	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{2F_L}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$
A ₂ C ₂	$\frac{2F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$
B ₁ C ₁	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{2F_L}{4}$
B ₁ C ₂	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{2F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$
B ₂ C ₁	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{2F_L}{4}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$
B ₂ C ₂	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{F_L}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{2F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{1 + F_L}{4}$	$\frac{2}{4}$

Las cruzas intrapaternales del cuadro base, tienen en promedio una probabilidad de $(4+6F_L)/28$ de generar un genotipo con genes idénticos por descendencia. El número de individuos de estas cruzas intrapaternales de cuadros base con autofecundaciones (N₂) depende e incrementa de acuerdo a m . El incremento de N₂ con respecto a m se puede apreciar mejor en la Figura 1.

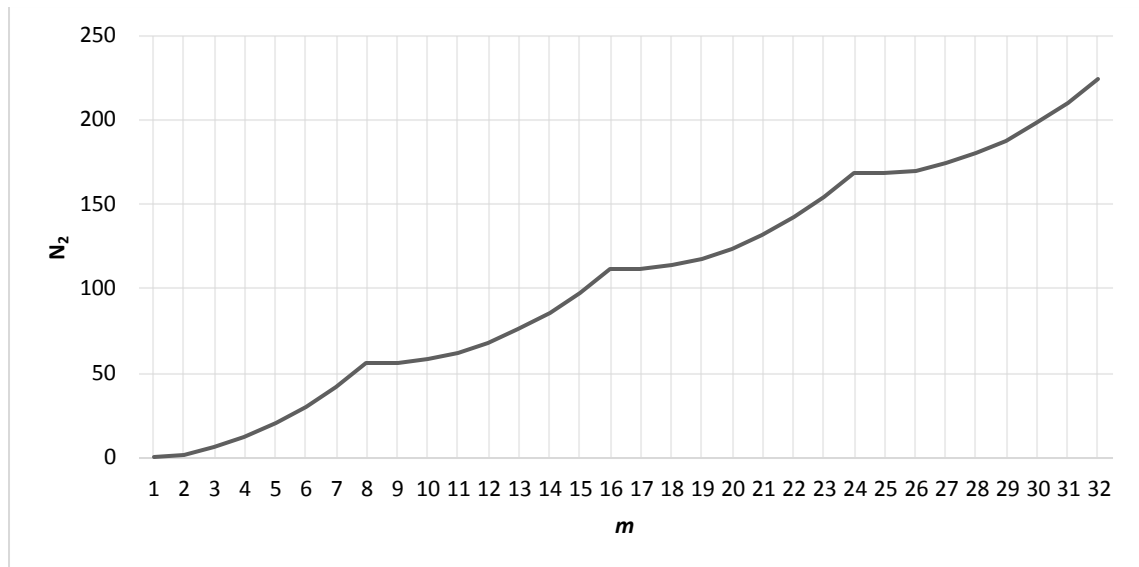


Figura 1: Relación entre el tamaño de muestra de cada cruce trilineal (m) y el número de cruces intrapaternales que corresponden a cuadros que tienen autofecundaciones (N_2)

Como puede observarse, cada que m se incrementa en ocho unidades N_2 crece en 56 individuos ($8^2 - 8$). Por ejemplo, si $m = 16$, se forman 4 cuadros base completos, pero sólo en dos existen autofecundaciones, de estos dos el número de cruces intrapaternales es $2(56) = 112$. Cuando el número de cuadros base formados es un valor entero (m es un múltiplo de ocho), la contribución a N_2 es $56 (m/8)$.

Cuando m no es un múltiplo de ocho, se formarán cuadros base completos e incompletos (si $m > 8$). En este caso, N_2 se puede calcular considerando, por una parte, los cuadros base completos que se forman. Esto se logra dividiendo el valor de m entre ocho y redondearlo hacia abajo, esta operación se expresa con:

$\lfloor \frac{m}{8} \rfloor$, lo que indica que el valor que esté dentro de este paréntesis se redondea hacia el número entero inferior más próximo, independientemente de los decimales que resulten. Una vez calculado el número de cuadros enteros formados se multiplica por 56, ya que cada cuadro entero contribuye con 56 individuos a N_2 . Para calcular el resto de individuos de N_2 , sólo es necesario determinar el número de progenies que forman el cuadro base incompleto (N_i), que resulta cuando m no es múltiplo de ocho, N_i se calcula con base en:

$\left(\frac{m}{8} - \left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor\right) \times 8$. Una vez calculado N_i , considerando que cuando m es menor o

igual a ocho, digamos n , el número de cruzas intrapaternales es: $n^2 - n$. Esto es útil para calcular el número de progenie que no se obtiene por autofecundación en un cuadro base incompleto. Ahora únicamente se sustituye n por $\left(\frac{m}{8} - \left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor\right) \times 8$. Con base en estos resultados, N_2 se puede calcular mediante la siguiente ecuación:

$$N_2 = \left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor \times 56 + \left[\left(\frac{m}{8} - \left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor \right) \times 8 \right]^2 - \left(\frac{m}{8} - \left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor \right) \times 8$$

El valor de N_2 se multiplica por su respectiva probabilidad, $(4+6FL)/28$, que es el coeficiente de endogamia promedio de las progenies producidas por las cruzas intrapaternales sujetas a discusión. El resultado es una de las tres contribuciones al $FSinCT$.

Sólo hace falta calcular lo correspondiente a cruzas intrapaternales faltantes, en las que en su cuadro base el lugar de autofecundaciones tienen progenies generadas por cruzas entre plantas cuyos genotipos son iguales. El coeficiente de endogamia de estas progenies es $(6 + 6 FL)/32$. El número de tales cruzas intrapaternales faltantes (N_3) se calcula según la ecuación siguiente:

$$N_3 = \left(\left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor^2 - \left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor \right) \times 64 + \left(\frac{m}{8} - \left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor \right) \times 8 \times 16 \times \left\lfloor \frac{m}{8} \right\rfloor$$

La relación entre m y N_3 se muestra en la Figura 2.

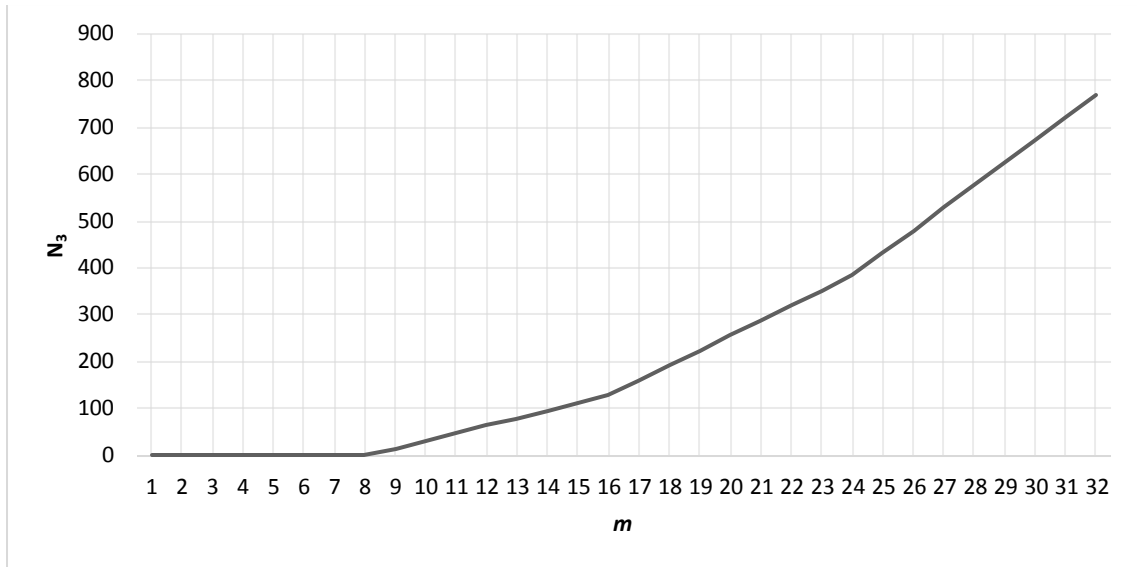


Figura 2: Relación entre el tamaño de muestra de cada cruce trilineal (m) y el número de cruces intrapaternales que corresponden a cuadros base que no contienen autofecundaciones (N_3).

Para un valor dado de m , cuando se conocen dos de estos valores (N_1 , N_2 o N_3), el restante puede obtenerse por diferencia, partiendo del hecho que: $N_1 + N_2 + N_3 = m^2$.

Para finalizar sólo es necesario multiplicar cada uno de los valores de N_1 , N_2 y N_3 por su respectiva probabilidad, obtener la suma de productos y dividirla entre el número total de casos (m^2). Este resultado es el coeficiente de endogamia de la población que resulta del apareamiento aleatorio de los m representantes de una cruce trilineal ($FSin_{CT}$). Cuando el número de cruces trilineales es cualquier entero positivo t sólo es necesario multiplicar $FSin_{CT}$ por $t(t)$, debido a que las líneas progenitoras iniciales de las cruces trilineales no tienen relación de parentesco. Así, el coeficiente de endogamia para el sintético formado por cruces trilineales ($FSin_{CT}$), se puede calcular de manera inicial mediante la siguiente ecuación:

$$FSin_{CT} = \left[\frac{m}{2} + N_2 \left(\frac{4 + 6F_L}{28} \right) + N_3 \left(\frac{6 + 6F_L}{32} \right) \right] \left[\frac{t}{(mt)^2} \right]$$

Un coeficiente de endogamia para una variedad sintética cuyos progenitores son cruza trilineales ($FSinCT$) hechas con líneas puras fue obtenido anteriormente por Márquez-Sánchez (2010). Según este autor, el coeficiente de endogamia mencionado es igual a $(3m+1)/(8tm)$. Al parecer, éste tiene el problema de que en la coancestría intrapaternal incluye la contribución debido a las autofecundaciones; es decir, tiene un sesgo positivo.

Por otra parte, al comparar el $FSinCT$ para una VS generada por cruza trilineales contra la VS cuyos progenitores son sólo líneas, se puede apreciar que el coeficiente de endogamia (CE) incrementa, por tanto la media genotípica debe ser menor. Lo que posicionaría a la VS generada por únicamente líneas como una mejor opción, en lo que sólo a rendimiento se refiere. Sin embargo, cuando se cuenta con híbridos de cruza trilineal, su uso como progenitores de un $SinCT$ puede disminuir considerablemente el número de progenitores sin un serio incremento de la endogamia, sobre todo si m es grande.

6 CONCLUSIONES

La ecuación para el $FSinCT$, a diferencia de una previamente desarrollada para el caso específico en que las líneas progenitoras iniciales son puras, es insesgada y general. Es general porque es aplicable al caso en que se usen líneas de cualquier nivel de endogamia. Por otra parte, las VSs generadas por sólo líneas presentan un menor coeficiente de endogamia que las obtenidas a partir de cruza trilineales, por lo que las primeras deben ser mejores. Sin embargo, cuando no se cuenta con líneas, el uso de híbridos de cruza trilineal existentes es una opción razonable para la formación de VSs.

7 LITERATURA CITADA

Busbice, T.H. (1970). Predicting yield of synthetic varieties. *Crop Science*, 10, 265-269.

Márquez-Sánchez, F. 1992. Inbreeding and yield prediction in synthetic maize cultivars made with parental lines: Basic methods. *Crop Science*, 32, 271-274.

Márquez-Sánchez, F. (2007). Predicción de sintéticos de maíz hechos con cruas simples. *Agrociencia*, 41 (6), 647-651.

Márquez-Sánchez, F. (2008). Endogamia y predicción de sintéticos de maíz de cruas dobles. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 31 (Núm. Especial 3), 1-4.

Márquez-Sánchez, F. (2010a). Epistasis en variedades sintéticas de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 33(4), 101-105.

Márquez-Sánchez, F. (2010b). Inbreeding coefficient and mean prediction of maize synthetics of three-way lines hybrids. *Maydica*, 55, 227-229.

Sahagún-Castellanos, J. (1994a). Componentes de varianza en variedades sintéticas. I. Componentes parentales no endogámicos ni emparentados. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 2(1), 145-148.

Sahagún-Castellanos, J. (1994b). Sobre el cálculo de coeficientes de endogamia de variedades sintéticas. *Agrociencia*, 5(2), 67-78.

Sahagún-Castellanos, J.; Villanueva-Verduzco, C. (1997). Teoría de las variedades sintéticas formadas con híbridos de cruas simples. *Revista Fitotecnia Mexicana*, 20, 69-79.

Sahagún-Castellanos, J.; Villanueva-Verduzco, C. (2003). Coeficiente de endogamia de las variedades sintéticas de cruas dobles. *Agrociencia*, 37(6), 641-655.

Sahagún-Castellanos, J.; Rodríguez-Pérez, J. E.; Peña-Lomeli, A. (2005). Desarrollo y predicción de sintéticos de cruzas dobles de maíz. *Agronomía mesoamericana*, 16(1), 19-28.

Sahagún-Castellanos, J. (2011). Inbreeding and yield of synthetic varieties derived from single and double cross hybrids. *Maydica*, 56(3), 265-272.

Sahagún-Castellanos, J.; Rodríguez-Pérez, J. E. (2011). Endogamia de sintéticos formados con líneas y cruzas simples. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 17(3), 107-115.

Sahagún-Castellanos, J.; Villanueva-Verduzco, C. (2012). ¿Variedades sintéticas derivadas de cruzas simples o de cruzas dobles?. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 18(2), 279-289.

Sahagún-Castellanos, J.; Rodríguez-Peréz, J. E.; Escalante-González J. L. (2013). Yield prediction and inbreeding of maize synthetics generated with lines and single crosses. Classic probability. *FCA UNCUYO*, 45(2), 75-84.

Wricke, G.; Weber, W. E. 1986. Quantitative Genetics and Selection in Plant Breeding. Walter de Gruyter. Berlin. New York. USA. 406 p.