

11. Diseño de una cruce dialélica parcial simétrica en maíz cacahuacintle



DOI: <https://doi.org/10.52501/cc.299.11>

GERARDO JASSO BOBADILLA*

ANDRÉS GONZÁLEZ HUERTA**§

DELFINA DE JESÚS PÉREZ LÓPEZ***

JOSÉ RAMÓN PASCUAL FRANCO MARTÍNEZ****

JAIME MEJÍA CARRANZA*****

FRANCISCO GUTIÉRREZ RODRÍGUEZ*****

Resumen

Las cruces dialélicas son una herramienta muy importante en el mejoramiento genético vegetal y animal. Se han usado para estimar el potencial de producción de cruces simples, al obtener los parámetros genéticos de los componentes del rendimiento de los progenitores que integran una cruce. Esta información es útil ya que permite elegir las mejores líneas endogámicas para formar un híbrido de dos o más progenitores. Para un experimento de cruces dialélicas completas hay p^2 combinaciones genéticas posibles que incluyen progenitores ($i=j$), $p(p-1)/2$ cruces directas (CD; $i<j$) y $p(p)/2$

§ Autor para correspondencia: agonzalezh@uaemex.mx

* Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales por la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-8357-0660>

** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6055-7597>

*** Doctora en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Profesora de tiempo completo de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1621-5690>

**** Doctor en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2139-6203>

***** Doctor en Genética y Biología de Estrés de Cultivos Vegetales. Profesor de tiempo de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3876-0788>

***** Doctor en Filosofía y Ciencias Técnicas. Profesor de tiempo completo en la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1464-0976>

cruzas recíprocas ($CR; i > j$), siendo impráctico al haber un incremento en el número de progenitores, lo que genera un mayor gasto en tiempo y recursos. Por lo que se diseñó un muestreo para un subconjunto de cruzamientos a partir del método 4 de Griffing, describiéndose una técnica para un dialélico incompleto generada con la metodología que proponen Kempthorne y Curnow formando 40 cruzamientos que se obtendrán a partir de la siembra de 16 variedades criollas de la raza Cacahuacintle en un lote de cruzamiento dividido en bloques incompletos al azar establecido siguiendo el paquete tecnológico de los productores de la zona de Calimaya de Díaz González así como el manejo agrónomico al mismo. El análisis y discusión de este experimento será abordado con algún paquete estadístico como Statistical Analysis System (SAS), Opstat o Genes, con alguna modificación en su código que permita el análisis para al menos un experimento.

Palabras clave: *parámetros genéticos, dialélico incompleto, paquete tecnológico, manejo agrónomico.*

Marco bibliográfico

Como ha sido mostrado en Saavedra et al. (2021), desde la década de la década de 1940 la cruce dialélica (CD), compuesta de todos los apareamientos simples que se pueden formar con un grupo de progenitores, se ha convertido en un plan común de investigación para el mejoramiento genético en plantas y animales. Su uso inició con el desarrollo de los conceptos de aptitud combinatoria general y específica (ACG y *ace*, respectivamente), acuñados por Sprague y Tatum (1942). La CD es empleada para estimar los componentes genéticos de la variación que existe entre los rendimientos de las cruzas que la conforman (Jinks y Hayman, 1953; Hayman, 1954a y 1954b; Griffing, 1956a y 1956b; Kempthorne, 1956 y 1957).

La CD también se ha utilizado para estimar el potencial de producción en cruzas simples formadas con n materiales genéticos. Esta información podría utilizarse para elegir las mejores líneas endogámicas que permitan formar un híbrido de dos, tres, cuatro o más progenitores. Aun cuando en la mayoría de los experimentos conducidos con CD no han sido estimados

los efectos maternos, podrían incluirse las cruzas recíprocas para realizar su estimación. Las grandes interrogantes que surgieron con relación al diseño y al análisis de una CD a través de los años o localidades, también denominados ambientes de evaluación, no fue posible resolverlas hasta que Singh (1972a y 1972b) desarrolló los procedimientos genético-estadísticos apropiados para su estimación en múltiples ambientes.

Sin cruzas recíprocas, que son las que resultarían de la autofecundación o del apareamiento realizado entre plantas de la misma línea, hay $n(n-1)/2$ cruzas diferentes que se pueden formar con esos n progenitores. Este número se incrementará significativamente al incluir más progenitores en el experimento de CD; con $n = 10, 20$ o 30 habrá 45, 190 o 435 cruzas entre dos líneas. Con restricciones económicas para evaluar las CD en varios ambientes, formados por la combinación de años, localidades o ambos, sólo será posible incluir pocos cruzamientos, pero la estimación de la varianza de ACG relacionada con la población formada con todas las líneas endogámicas disponibles estará sujeta a un mayor error de muestreo y muchas líneas con mayor potencial podrían no ser evaluadas. En este contexto sería más deseable considerar otro diseño genético que incluya más progenitores pero que permita muestrear sólo a un subconjunto de ellos, sin pérdida de eficiencia; la recomendación sería utilizar cruce por probador, para la formación de mestizos, o un dialélico incompleto.

En un experimento de cruzas dialélicas completo hay p^2 combinaciones genéticas que incluyen p progenitores ($i=j$), $p(p-1)/2$ cruzas directas (CD; $i<j$), y $p(p-1)/2$ cruzas recíprocas (CR; $i>j$) (Griffing, 1956). Este diseño ha sido ampliamente utilizado en fitomejoramiento (Saavedra et al., 2021), pero es impráctico cuando p aumenta debido a que CD y CR también se incrementan. Una situación similar se presentó cuando se diseñaron experimentos 2H, con H variando de 2 a 8, para ser analizados con InfoStat e InfoGen, pero si $H = 8$ habrá 256 tratamientos y 247 interacciones. Para ahorrar tiempo y recursos podría diseñarse un experimento factorial fraccionado que incluya sólo a un subconjunto de éstos (Pérez et al., 2021). Si 13 progenitores, 78 CD y 78 CR serán estudiados, aun para los diseños experimentales en Látice rectangular habría serias limitantes (González et al., 2007).

Cochran y Cox (1958), Gomez y Gomez (1984), y Martínez (1998), entre otros, mostraron los planes básicos para látice balanceado y parcial-

mente balanceado; se podrían aleatorizar hasta 144 tratamientos en un láctice triple 12×12 . Si en un ambiente se evalúa maíz (*Zea mays* L.) de la raza Cacahuacintle, en tres repeticiones, con parcelas de tres surcos de 5.0 m de longitud, cada hilera distanciada a 0.80 m, para evaluar esos 144 tratamientos serían necesarios casi 6 500 m² (repeticiones separadas a 2.0 m y bloques incompletos separados a 1.5 m). Este problema será mayor al considerar varios años, localidades o combinaciones de éstos. En el otro extremo, con cuatro progenitores, las estimaciones de aptitud combinatoria general serán sesgadas debido al pequeño tamaño de muestra utilizando.

La cruce dialélica parcial (CDP) fue sugerida por G. W. Brown en 1948 y fue usada por primera vez en la Universidad Estatal de Iowa, en Estados Unidos de Norteamérica (Jensen, 1959). En ésta, el mejorador asume que puede manejar $ns/2$ apareamientos, donde n y s son el número de progenitores y de veces que cada uno de estos es considerado en el plan de cruzamientos, pero si n es par, s debe ser non, y viceversa. Hinkelmann y Stern (1960), Kempthorne y Curnow (1961), Fyfe y Gilbert (1963) y Rojas (1973), entre otros, diseñaron metodologías para muestreo y análisis de un dialélico parcial en un diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA). Kempthorne y Curnow (1961) describieron una técnica dialélica incompleta a partir del método 4 de Griffing (1956); la precisión con la que se estiman los parámetros de interés para el fitomejorador depende de n y s . Murthy et al. (1966) y Chaudhary et al. (1977) precisaron que el sesgo es mayor cuando s es menor que $p/2$; con $s = p - 1$ se tendrá el método 4 de Griffing (1956).

Introducción al muestreo de las cruzas

El número de cruzas que serían muestreadas se calcula considerando p , s , y k . Los dos primeros fueron definidos previamente y k , un número entero, se calcula cómo:

$$k = ((p + 1 - s))/2$$

Los p progenitores, aleatorizados y numerados consecutivamente, generarán las cruzas:

Progenitor 1 \times progenitor $k + 1, k + 2, k + 3, \dots, k + s$

Progenitor $2 \times$ progenitor $k+2, k+3, k+4, \dots, k+1+s, \dots$

Progenitor $p \times$ progenitor $k+p, k+p+1, \dots, k+p-1+s$

Como ejemplo preliminar, si un fitomejorador dispone de ocho variedades criollas de maíz de la raza Cacahuacintle, que en lo sucesivo serán denominadas variedades de Cacahuacintle y, además, $s=5$ y $k=2$, las 20 cruzas por muestrear serán:

Variedad $1 \times$ variedades $2+1, 2+2, 2+3, 2+4, 2+5=1 \times 3, 1 \times 4, 1 \times 5, 1 \times 6, 1 \times 7$.

Variedad $2 \times$ variedades $2+2, 2+3, 2+4, 2+5, 2+6=2 \times 4, 2 \times 5, 2 \times 6, 2 \times 7, 2 \times 8$.

Variedad $3 \times$ variedades $2+3, 2+4, 2+5, 2+6, 2+7=3 \times 5, 3 \times 6, 3 \times 7, 3 \times 8$.

Variedad $4 \times$ variedades $2+4, 2+5, 2+6, 2+7, 2+8=4 \times 6, 4 \times 7, 4 \times 8$.

Variedad $5 \times$ variedades $2+5, 2+6, 2+7, 2+8, 2+9=5 \times 7, 5 \times 8$.

Variedad $6 \times$ variedades $2+6, 2+7, 2+8, 2+9, 2+10=6 \times 8$.

La variedad hembra identificada como 7 se cruzaría con los machos $2+7, 2+8, 2+9, 2+10$ y $2+11$, como estas son mayores que p se aplican múltiplos de 8 y se obtendrían las cruzas: $7 \times (9-8)=7 \times 1$; $7 \times (10-8)=7 \times 2$; $7 \times (11-8)=7 \times 3$; $7 \times (12-8)=7 \times 4$; $7 \times (13-8)=7 \times 5$. Sin embargo, estas se eliminan por ser CR. Este mismo criterio se aplica para las cruzas formadas con la variedad 8 (tabla 11.1).

Tabla 11.1. Las 20 cruzas que serían formadas si $p=8, s=5$ y $k=2$

| Variedad i (δ) | Variedad j (δ) | | | | | | | |
|---------------------------|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 |
| V1 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 |
| V2 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| V3 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 |
| V4 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 | 1 |
| V5 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| V6 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| V7 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| V8 | 0 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |

Nota: $a_{ij}=1$ o $a_{ij}=0$ si la craza ixj es o no muestreada, respectivamente. También se indican CR.

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Este tipo de metodologías también están relacionadas con los diseños circulantes que fueron discutidos por Kemthorne (1953) en éstos, cuando se han calculado los valores para la primera hilera de la matriz circulante, la siguiente hilera se genera simplemente desplazando esos valores a la siguiente columna (Jasso et al., 2022).

Aspectos metodológicos relevantes

Modelos genético-estadísticos

Para la evaluación de un dialélico completo se utilizan dos tipos de modelos: los estadísticos, que permiten determinar cuanta variabilidad existe entre familias, y los genéticos, que contribuyen al fraccionamiento de la variabilidad que existe entre éstas, en efectos o varianzas de aptitud combinatoria, así como en el tipo de acción génica predominante en el material evaluado. En ambos modelos frecuentemente se incluyen familias de autohermanos, medios hermanos y hermanos completos (Saavedra et al., 2020).

El modelo estadístico para analizar un diseño experimental de bloques completos al azar (DBCA) es:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}$$

Dónde: μ es la media aritmética de los tr datos, τ_i es el efecto del i -ésimo tratamiento, β_j es la contribución de la j -ésima repetición, y ε_{ij} es el error experimental o residual del modelo. τ_i corresponderá a las cruza formadas con las n líneas endogámicas de la raza Cónico (Jasso et al., 2022) o con las p variedades de polinización libre de Cacahuacintle que son consideradas en esta propuesta.

El modelo genético para analizar variables cuantitativas en un ensayo de cruza dialélicas parciales en un DBCA es (Kempthorne y Curnow, 1961):

$$Y_{ijk} = \mu + g_i + g_j + S_{ij} + \beta_k + \varepsilon_{ijk}$$

Dónde: μ , β_k , ε_{ijk} se definieron previamente; g_i y g_j son efectos de aptitud combinatoria general causados por ambos progenitores; S_{ij} son los efectos no aditivos vinculados a la aptitud combinatoria específica de la craza formada por los padres i, j . En este modelo se asume que g_i , S_{ij} y ε_{ijk} se distribuyen normal e independientemente, con media cero y varianzas σ_g^2 , σ_s^2 , y σ_e^2 , respectivamente. También se considera que cada variable analizada, como el rendimiento de grano o elote en maíz de la raza Cacahuacintle, en la craza identificada como ixj , consiste en un efecto de ésta, un efecto de la repetición, un error asociado a desviaciones aleatorias entre parcelas y, si la hubiera, al causado por segregación genética dentro de cada craza. En el modelo anterior, el efecto general causado por los tratamientos, T_{ij} , es igual a $T_{ij} = g_i + g_j + S_{ij}$ y la interacción de éstos con las repeticiones es igual al error experimental, cuando no hay epistasis.

Con relación a la estructura genética vinculada a un dialélico incompleto, las progenies de la misma craza son clasificados como hermanos completos y las de cruza diferentes con un progenitor común son medios hermanos. Si las líneas o los progenitores son una muestra aleatoria de una población grande, el efecto que se origine en cada craza puede representarse cómo:

$$T_{ij} = g_i + g_j + S_{ij}$$

Además:

$$\begin{aligned} \sigma_g^2 &= \text{Cov}(H. S.) \\ \sigma_s^2 &= \text{Cov}(F. S.) - 2 \text{Cov}(H. S.) \end{aligned}$$

Dónde: $H. S.$, y $F. S.$, son las covarianzas entre medios hermanos y hermanos completos, respectivamente. Si la población de referencia manifiesta apareamiento aleatorio, no es endogámica y existe ausencia de ligamiento factorial (Kempthorne y Curnow, 1961):

$$\begin{aligned} \text{Cov}(H. S.) &= (1/4) \sigma_A^2 + (1/16) \sigma_{AA}^2 + \dots \\ \text{Cov}(F. S.) &= (1/2) \sigma_A^2 + (1/4) \sigma_D^2 + (1/4) \sigma_{AA}^2 + \dots \end{aligned}$$

En estas covarianzas, sus componentes principales son varianzas aditivas, aditiva por aditiva y dominante.

Con $F=0$:

$$\begin{aligned}\sigma_g^2 &= (1/4) \sigma_A^2 + (1/16) \sigma_{AA}^2 + \dots, \\ \sigma_s^2 &= (1/4) \sigma_D^2 + (1/8) \sigma_{AA}^2 + \dots,\end{aligned}$$

En ausencia de epistasis, la proporción de la varianza aditiva con relación a la genética es:

$$\sigma_g^2 / (\sigma_g^2 + \sigma_s^2)$$

El grado de dominancia promedio es:

$$(2\sigma_s^2 / \sigma_g^2)^{(1/2)}$$

Si $F=0$, la varianza del error (σ_e^2) tendrá una componente debida a variabilidad genética dentro de cruzas; será igual a la varianza genética total menos la covarianza de hermanos completos. Esta última será igual a cero sólo si F , el coeficiente de endogamia, es igual a uno ($F=1$). La variabilidad ambiental relacionada con ε_{ijk} consistirá en la que exista entre parcelas y entre plantas, mientras que la competencia entre y dentro de éstas últimas también deberá considerarse en el modelo genético. El uso de submuestreo dentro de las unidades experimentales será de gran utilidad para determinar el error muestral (González et al., 2023), que es una de las componentes del modelo genético que permitiría probar con mayor precisión los efectos o varianzas de *ACG* y *ACE*.

Establecimiento del experimento en campo

Descripción del área de estudio

Este estudio podría realizarse en el año 2026 en un terreno de un agricultor cooperante del municipio de Calimaya de Díaz González, situado a 17 km de la capital mexicana. Sus colindancias con otros municipios son: al norte con Toluca, al sur con Tenango del Valle, al oriente con Mexicatzingo y Santa

María Rayón y al poniente con el volcán Xinantecatl. La cabecera municipal se localiza a 19°09'30" de latitud norte y 99°37'17" de longitud oeste del meridiano de Greenwich, a 2 650 msnm. Su clima predominante es templado subhúmedo con tendencia al frío, con temperatura media anual de 12.8°C, mínima y máxima de -4.0 y 26°C, respectivamente. Sus suelos son sueltos (tipo andosol), encontrándose desde el arcillo limoso hasta los franco-arenoso y arenoso, éstos últimos formados por el arrastre de materiales sedimentados hacia las partes más bajas, problema que las lluvias originan durante la época de máxima precipitación, cuyo cauce se originó en las partes altas aledañas al volcán Xinantecatl y que ha contribuido al aumento de la superficie erosionada. Los suelos son muy friables, derivados de cenizas volcánicas, pH ácido (entre 3.8 y 6.0) y descansa sobre un sustrato volcánico de pumicita suelta (tepojal) que se encuentra entre 40 y 100 cm, con condiciones particularmente benignas para el control natural de patógenos, especialmente pudriciones de mazorca y grano causadas por *Fusarium spp.* También se ha observado que las condiciones climatológicas frías del periodo invernal causan ausencia de plagas insectiles de los granos almacenados que afectan con mayor rapidez a los granos de textura suave y amilácea, como los de Cacahuacintle (Tarango, 1997; Ramos y Gerón, 1998; González et al., 1999; González et al., 2006).

Material biológico

Como progenitores serán consideradas 16 variedades criollas de maíz Cacahuacintle, las cuales podrían colectarse durante el invierno del 2025, 2026 y 2027 (diciembre-enero), en las localidades de Zaragoza de Guadalupe, San Marcos de la Cruz, San Lorenzo Cuauhtenco, Santa María Nativitas y Cabecera Municipal. Estas colectas serían elegidas aleatoriamente de un padrón de 30 agricultores cooperantes, quienes han participado voluntariamente en la realización de otros estudios en este municipio (González et al., 2006; Jasso et al., 2019). Las variedades criollas serían donadas por los agricultores cooperantes que se muestran en la tabla 11.2.

Tabla 11.2. *Relación de agricultores cooperantes*

| <i>Municipio de Calimaya de Díaz González</i> | |
|---|------------------------|
| <i>Nombre</i> | <i>Localidad</i> |
| Leobardo Jasso | Cabecera municipal |
| Miguel Romero | Cabecera municipal |
| Cosme Mendoza | Cabecera municipal |
| Esteban López | Cabecera municipal |
| Isaac Carmona | San Marcos de la Cruz |
| Pablo Bobadilla | San Marcos de la Cruz |
| Miguel Estévez | San Marcos de la Cruz |
| Federico Colín | San Lorenzo Cuauhtenco |
| Ubaldo Colín | San Lorenzo Cuauhtenco |
| Raúl Guadarrama | San Lorenzo Cuauhtenco |
| Ascensión Esquivel | Santa María Nativitas |
| Melitón Muciño | Santa María Nativitas |
| Pascual Rosales | Santa María Nativitas |
| Ariel Colín | Zaragoza de Guadalupe |
| Carmelo Delgado | Zaragoza de Guadalupe |
| Cupertino Delgado | Zaragoza de Guadalupe |

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Diseño genético

Las cruzas intervarietales serán generadas con la metodología propuesta por Kemthorne y Curnow (1961), para un dialélico incompleto simétrico sin apareamientos recíprocos. Con $n = p = 16$, $s = 5$ y $k = 6$, se formarían 40 cruzas (tabla 11.1). Adicionalmente, se diseña otra opción con $n = 15$ y $s = 4$ para generar 30 cruzas (tabla 11.2); en ambos cuadros se incluyen sus cruzas recíprocas, previendo algún problema para generar los cruzamientos directos.

Para asegurar 2.0 kg de semilla en cada craza se realizarán 40 polinizaciones; se estima una pérdida de 10 mazorcas en cada apareamiento y que cada mazorca cosechada rendirá 80 g de semilla de buena calidad.

Fecha de siembra

Para garantizar que todos los cruzamientos planificados sean realizables, se establecerán en un mismo terreno dos lotes de polinización. Con base en la disponibilidad de humedad residual en los suelos para esa región, las fechas propuestas serían entre 1º y 10, y 11 y 20 de abril del 2026, aislado de otros predios donde se establezca este u otro tipo de maíz.

Distribución de las variedades en campo

En la tabla 11.3 se muestra la aleatorización de las 16 variedades progenitoras de Cacahuacintle para la fecha 1. En el lote habrá 16 parcelas trazadas en dos bloques incompletos, con ocho variedades dentro de cada uno. Cada parcela estará conformada por ocho hileras de 10.0 m de longitud, distanciados cada una a 0.80 m. Los bloques incompletos estarán separados a 2.0 m y el ancho de cada uno de éstos será de 52.0 m. En los extremos de ambos lotes se sembrará maíz Cacahuacintle a 83 333 plantas por ha (distancia entre plantas igual a 15 cm), dejando 4.0 m a la izquierda y a la derecha y 6.0 m en las partes superior e inferior. Con estas medidas la dimensión aproximada de cada lote de cruzamientos será de 3 600 m². La fecha 2 se aleatorizará de manera independiente a la fecha 1. Se utilizará rafia para delimitar ambos bloques dentro de cada fecha de siembra; en sus extremos será colocada una estaca de madera de 60 cm de altura. Con cal agrícola se delimitará su perímetro, el área que corresponda a cada progenitor, y a los bloques incompletos.

Tabla 11.3. *Fecha de siembra 1*

| | | | | | | | |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 101 | 102 | 103 | 104 | 105 | 106 | 107 | 108 |
| C1 | C16 | C5 | C8 | C11 | C4 | C13 | C9 |
| 109 | 110 | 111 | 112 | 113 | 114 | 115 | 116 |
| C2 | C15 | C7 | C4 | C10 | C12 | C3 | C6 |

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

En la tabla anterior, las parcelas están numeradas consecutivamente, de izquierda a derecha; el primer número indica la fecha de siembra. Los cultivares de Cacahuacintle, aleatorizados dentro de cada fecha, se identificarían como C1, C2, C3, ..., C16.

Tabla 11.4. 40 cruzas en Cacahuacintle que serían muestreadas si $n = 16$, $s = 5$, y $k = 6$ ($CD, i < j$; $CR, i > j$)

| Variedad i (δ) | Variedad j (δ) | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------------------|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 | V15 | V16 |
| V1 | | | | | | | x | x | x | x | x | | | | | |
| V2 | | | | | | | | x | x | x | x | x | | | | |
| V3 | | | | | | | | | x | x | x | x | x | | | |
| V4 | | | | | | | | | | x | x | x | x | x | | |
| V5 | | | | | | | | | | | x | x | x | x | x | |
| V6 | | | | | | | | | | | | x | x | x | x | X |
| V7 | x | | | | | | | | | | | | x | x | x | X |
| V8 | x | x | | | | | | | | | | | | x | x | X |
| V9 | x | x | x | | | | | | | | | | | | x | X |
| V10 | x | x | x | X | | | | | | | | | | | | X |
| V11 | x | x | x | X | x | | | | | | | | | | | |
| V12 | | x | x | X | x | X | | | | | | | | | | |
| V13 | | | X | X | x | X | x | | | | | | | | | |
| V14 | | | | X | x | X | x | x | | | | | | | | |
| V15 | | | | | x | X | x | x | x | | | | | | | |
| V16 | | | | | | X | x | x | x | x | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

Manejo agronómico en el lote de polinización

La preparación mecánica del suelo se realizará con un implemento agrícola llamado rotor, para incorporar los residuos de tallos y hojas de maíz que aun permanezcan en el suelo desde el ciclo agrícola anterior. Posteriormente éste se arará y rastreará usando tractor; durante casi dos meses no habrá movimiento de tierra (enero-febrero). Con la llegada de las primeras lluvias se efectuará una última rastra, uno o dos días antes del surcado, con la finalidad de no perder humedad residual ya que en esta zona no hay riego. El surcado

Tabla 11.5. 30 cruzas en *Cacahuacintle* que serían muestreadas si $n = 15$, $s = 4$, y $k = 6$ ($CD, i < j$; $CR, i > j$)

| Variedad $i (\delta)$ | Variedad $j (\delta)$ | | | | | | | | | | | | | | |
|--------------------------|-----------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | V1 | V2 | V3 | V4 | V5 | V6 | V7 | V8 | V9 | V10 | V11 | V12 | V13 | V14 | V15 |
| V1 | | | | | | | x | x | x | x | x | | | | |
| V2 | | | | | | | | x | x | x | x | x | | | |
| V3 | | | | | | | | | x | x | x | x | x | | |
| V4 | | | | | | | | | | x | x | x | x | x | |
| V5 | | | | | | | | | | | x | x | x | x | x |
| V6 | | | | | | | | | | | | x | x | x | x |
| V7 | x | | | | | | | | | | | | x | x | x |
| V8 | x | x | | | | | | | | | | | | x | x |
| V9 | x | x | x | | | | | | | | | | | | x |
| V10 | x | x | x | x | | | | | | | | | | | |
| V11 | | x | x | x | x | | | | | | | | | | |
| V12 | | | x | x | x | X | | | | | | | | | |
| V13 | | | | x | x | X | x | | | | | | | | |
| V14 | | | | | x | X | x | x | | | | | | | |
| V15 | | | | | | X | x | x | x | | | | | | |

Fuente: Elaboración propia y obtenida de los datos de la investigación.

en la fecha 1 se hará a 0.80 m entre hileras. Inmediatamente se trazará el lote de cruzamientos y se sembrarán manualmente las 16 variedades criollas de *Cacahuacintle* (tabla 11.1). En la siembra o con el surcado, se aplicarán 73 unidades de nitrógeno (N), 184 de fósforo (P) y 0 de potasio (K). Sin fertilizante químico podrían aplicarse 3 500 kg por ha⁻¹ de gallinaza.

Como el distanciamiento entre plantas será de 20 cm, para manejar una densidad de población de 62 500 plantas por ha y, para ahorrar tiempo durante la siembra manual, se depositarán tres semillas por “golpe”; cuando las plántulas tengan entre 12 y 15 cm se eliminará la más débil en cada mata. En cada lote de cruzamiento se aplicarían 64 unidades de N, 46 de P y 60 de K, más 540 kg de materia orgánica, ésta última incorporada previamente.

En general, para una ha⁻¹, los agricultores contemplan en su paquete tecnológico una dosis de fertilización de 330 unidades de N, 368 de P y 120 de K, pero si se sustituye el fertilizante químico por la materia orgánica (3 500 kg) la dosis que utilizarían sería de 257 unidades de N, 184 de P y 120 de K. En siembra comercial esta dosis de fertilización variará, depen-

diendo de los recursos financieros de que dispongan los agricultores de esta región.

El control de maleza será manual, mecánico y químico; en este último serán aplicados 0.5 l y 0.3 kg de carfentrazone etil más ácido 2,4-diclorofenoxiacético, Gesaprim Calibre 90 y 0.2 kg de diurón; éstos serán mezclados físicamente para controlar maleza de hoja ancha. Para maleza de hoja angosta, como pastos, se aplicará paraquat en dosis de 0.5 l/ha. Éstos se aplicarán antes de los 95 días de haberse realizado la siembra. Para el control preventivo de insectos se aplicará 0.5 l de dimetoato y 200 ml de deltametrina. También, se utilizarán productos foliares de amplio espectro para favorecer el llenado de grano; se aplicará 0.5 l de Impulsor (bioestimulante) y 0.5 l de Sintek (inmunopotencializador), entre los 100 y 115 días de efectuada la siembra y previo a la floración femenina. Para un mejor llenado de grano se aplicará 1 kg de potasio por ha⁻¹. Estas aspersiones se harán cuando los estigmas aún están cubiertos por el totomoxtle para evitar daños durante la polinización y la fecundación. Ésta es una observación que pocos han identificado correctamente, llegándose a confundir con el efecto ocasionado por el daño de plagas o enfermedades.

La propuesta anterior está relacionada con un paquete tecnológico basado en la experiencia de los agricultores cooperantes que producen maíz raza Cacahuacintle en este municipio mexiquense. Las dosis que serán aplicadas en el lote de cruzamiento se calcularán a partir de la superficie sembrada considerando el ciclo vegetativo y reproductivo del maíz. Si hubiera algún daño extremo originado por insectos, enfermedades o por un factor abiótico se repetirían las dosis indicadas anteriormente.

Control manual de la polinización

Previo a esta actividad serán identificadas plantas que muestren competencia completa entre hileras y dentro de ellas; serán elegidas las de menor altura para facilitar la labor de referencia. Después del espigamiento se harán recorridos cada dos días en ambos lotes de cruzamiento para identificar plantas con anteras visibles que empiecen a derramar polen, inmediatamente se practicará el jiloteo introduciendo una bolsa de glassine entre el tallo y

el elote en desarrollo (jilote), esta bolsa de material encerado permanecerá sobre el jilote y cuando los estigmas tengan un desarrollo protuberante, con una longitud entre 2.0 y 2.5 cm, se colectará polen de varias plantas en una bolsa de papel de fondo automático del número 20, preferentemente entre las 9:00 y 11:00 am, y éste se trasladará a las parcelas que tengan en común a un progenitor. La bolsa de glassine será rota en su parte superior y al interior de esta se espolvoreará el polen, se hará una trenza en su extremo superior e inmediatamente se colocará una bolsa de papel del número 25. La bolsa de papel, colocada entre el jilote y el tallo, será engrapada por ambos extremos hacia su parte central. En su parte frontal se anotará, con marcador de cera, el tipo de cruce, la fecha en la que esta se realizó y un número consecutivo, comprendido entre 1 y 40. Durante toda la etapa de formación de grano, y previo a la cosecha manual, se harán recorridos diarios durante un mes y, cada cuatro días posteriormente, para verificar que las bolsas de papel no estén rotas, desengrapadas o desprendidas del tallo de las plantas; si éste fuera el caso, esas bolsas tendrían que reemplazarse.

Identificación de parcelas y de plantas dentro del lote de cruzamientos

En el lote de cruzamiento serán colocados dos tipos de etiquetas, entre mayo y junio del 2026. Al inicio de cada parcela se colocará una etiqueta grande (10 × 15 cm), en la parte central de la primera planta que sea la más visible. Posteriormente, en las hileras centrales de cada parcela, serán colocadas 40 etiquetas (3.5 × 7.0 m) por cruce y habrá en total 200 etiquetas por progenitor hembra. Los dos tipos de etiquetas serán rotulados con marcadores de cera.

Cosecha, secado, desgrane y selección de material

Las mazorcas provenientes de cada cruce serán cosechadas manualmente después de que éstas logren la madurez fisiológica, la cual se presentará en su mayor porcentaje al final de noviembre del 2026. Esta actividad se realizará por tipo de cruce entre el 5 y 15 de diciembre. Se utilizarán costa-

les de rafia o de henequén y las mazorcas serán trasladadas al invernadero núm. 1 de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México. Como opción, el material cosechado podría resguardarse en un cuarto o bodega en la cabecera municipal de referencia. Antes de desgranar cada una de las mazorcas cosechadas, en forma individual, éstas serán expuestas al sol, dentro del invernadero o fuera del cuarto o de la bodega, durante 15 días, para que el grano tenga entre 13 y 16% de humedad. Esta actividad evitará daños causados por hongos y bacterias. Preferentemente, se hará una selección visual de mazorcas sanas evitando desgranar la parte superior e inferior de cada una de estas debido a que el grano es más pequeño o grande, respectivamente, pero más heterogéneo que el que se produce en la parte central de la mazorca; si no hay suficiente semilla en algunas cruces, deberá practicarse selección visual adicional en los granos provenientes de ambos extremos de la mazorca. Después de mezclar el grano proveniente de las mazorcas cosechadas en cada parcela, éste será pesado y almacenado en recipientes de aluminio o de plástico o en bolsas de plástico de cierre automático. Dentro y fuera de cada una de estas se mostrará visiblemente su identificación; la rotulación se hará con marcador de tinta permanente.

Uso de software gratuito

Se han encontrado tres paquetes estadísticos para realizar análisis genético estadístico para un sólo experimento de cruces dialélicas parciales; en este contexto las opciones son: Statistical Analysis System (SAS), Opstat y Genes. De éstos, sólo los dos últimos se encuentran disponibles gratuitamente sin ninguna restricción, y SAS podría utilizarse con el mismo propósito en su versión académica de prueba o en su modalidad de SAS on Demand for Academics. Jasso et al. (2022) evaluaron ocho progenitores en un solo ambiente y Pérez et al. (2022) diseñaron algunos artificios para analizar una serie de experimentos. En ambas situaciones se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar aplicado a ocho líneas endogámicas de maíz de la raza Cónico con el uso de Opstat software. Esta misma situación podría abordarse si se utilizará el programa para SAS elaborado por Martínez (1991) con

una modificación en su código y con el diseño de algunos artificios, éste permitiría el análisis simultáneo de diversas variables en una serie de experimentos en tiempo, en espacio, o en ambos, pero esta última opción aun podría llevar más de un año debida a que una parte teórica para el análisis de este tipo de ensayos aún no ha sido desarrollada (Pérez et al., 2022).

Referencias

- Awata, L. A. O., Tongoona, P., Danquah, E., Efe, B. E., y Marchelo-Drugga, P. W. (2018). Common Mating Designs in Agricultural Research and Their Reliability in Estimation of Genetic Parameters. *IOSR Journal of Agriculture and Veterinary Science*, 11(7), 16-36.
- Christie, B. R., y Shattuck, V. I. (1992). The Diallel Cross: Design, Analysis, and Use for Plant Breeders. *Plant Breeding Reviews*, 9(1), 9-36.
- Chaudhary, B. D., Kakar, S. N., y Singh, R. K. (1977). Comparison of diallel and its modifications. *Silvae Genetica*, 26(1), 61-120.
- Fyfe, J. L., y Gilbert, N. (1963). Partial diallel crosses. *Biometrics*, 19(2), 278-286.
- Griffing, B. (1956). Concept of general and specific combining ability in relation to diallel crossing systems. *Australian Journal of Biological Sciences*, 9(4), 463-493.
- Gomez, K. A., y Gomez, A. A. (1984). *Statistical procedures for agricultural research*. (2ª ed.). John Wiley and Sons, Inc.
- González, H. A., Aguilar, L. B., Nájera, F. I., Calvo, G., Sahagún, J., Pérez, D. J., Landeros, V., y Serrato, R. (1999). Problemática ambiental y análisis económico de la agricultura del municipio de Calimaya de Díaz González, México. En UAQ-IPN (Coord.), Memoria del Primer Seminario Internacional Tecnología-Industria-Territorio.
- González, H. A., Sahagún, C. J., Pérez, L. D. J., Domínguez, L. A., Landeros, F. V., y Serrato, C. R. (2006). Diversidad fenotípica del maíz Cacahuacintle en el Valle de Toluca, México. *Revista Fitotecnía Mexicana*, 29(3), 255-261.
- González, H. A., Sahagún, C. J., y Pérez, L. D. J. (2007). Estudio de ocho líneas de maíz en un experimento dialélico incompleto. *Revista de Ciencias Agrícolas Informa*, 16(1), 3-9.
- Hinkelmann, K., y Stern, K. (1960). Kreuzungspläne zur selektionszüchtung bei waldbäumen. *Silvae Genetica*, 9(3), 121-133.
- Jasso, B. G., Pérez, L. D. J., González, H. A., Sangermán, J. D. M., Navarro B, A. (2019). Estudio Preliminar para determinar diferencias fenotípicas y tamaño de muestra en maíz Cacahuacintle. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 10(8), 1771-1782.
- Jasso, B. G., González, H. A., Pérez, L. D. J., Franco, M., J. R. P., Rubí, A. M., y Mejía, C. J. (2022). Uso de Opstat para validar resultados en un dialélico parcial con ocho líneas de maíz evaluadas en un ambiente. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13(1), 41-52.

- Kempthorne, O., y Curnow, R. N. (1961). The partial diallel cross. *Biometrics*, 17(2), 229-250.
- Martínez, G. A. (1991). Análisis de los experimentos dialélicos a través del procedimiento IML de SAS. Colegio de Postgraduados, Chapingo, Estado de México. *Comunicaciones en Estadística y Cómputo. Centro de Estadística y Cálculo*, 10(2), 1-36.
- Martínez, G. A. (1998). *Diseños experimentales: métodos y elementos de teoría*. Trillas.
- Miranda, F., J. B., y Vencovsky, R. (1999). The Partial Circulant Diallel Cross at the Inter-population level. *Genetics and Molecular Biology*, 22, 249-255.
- Muntaz, A., Zafar, F., Aamar, S.S. (2015). A Review on Mating Designs. *Nature and Science*, 13(2), 98-105.
- Murthy, B. R., Arunachalam, V., y Anand, I. J. (1966). Diallel and partial diallel analysis of some yield factors in *Linum usitatissimum*. *Heredity*, 22(1), 35-41.
- Pérez, L. D. J., Franco, M. J. R. P., Gutiérrez, R. F., Hernández, A. J., Balbuena, M. A., González, H. A. (2021). Diseño de experimentos factoriales $2n$ para su análisis con infoStat e infoGen. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 12(6): 1087–1099.
- Ramos, R. A., Gerón, X. F. (1998). Origen y Distribución Geográfica, Diversidad y Potencial Productivo de la Raza de Maíz Cacahuacintle. En *Memoria del Seminario Mesoamericano sobre Agrodiversidad en la Agricultura Campesina* (pp. 89-94). UAEMéx.
- Rojas, M. B. A. (1973). *Design and analysis of diallel crosses*. Department of Experimental Statistics. New Mexico State University.
- Tarango, M. V. M. (1997). *Plan de Desarrollo Municipal 1997-2000* (pp. 25-40). H. Ayuntamiento Constitucional de Calimaya de Díaz González.
- Saavedra, G. C., Pérez, D. J., González, A., Franco, J. R. P., Rubí, M., y Ramírez, J. F. (2021). Métodos de Griffing: revisión sobre su importancia y aplicación en fitomejoramiento convencional. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 12(7), 1275-1286.
- Shunmugathai, R., y Srinivasan, M. R. (2012). Robustness of PDC Plan using BIB Mating Designs against unavailability of One or More Observations. *International Journal of Mathematics and Scientific Computing*, 2(2), 32-40.
- Silva, C.M., Miranda, F. J.B., Mendes, U.C., y Reis, E. F. (2017). Partial Diallel Cross for Predicting Yield of Semiexotic Maize Populations. *Genetics and Molecular Research*, 16(1), 1-16.
- Singh, R. K., y Chaudhary, B. D. (1985). *Biometrical Methods in Quantitative Genetic Analysis. Revised*. Kalyani Publishers.

Agradecimientos

Se le agradece al programa de Investigadoras e investigadores Comecyt 2025, modalidad Cátedra de Investigación por el apoyo recibido para el envío y publicación del presente capítulo.