

# Conceptos, métodos y técnicas para el mejoramiento genético de plantas cultivadas

\* Mini-curso para profesionales jóvenes y estudiantes de último año de las Ciencias Agrícolas.

## Contenido

- Conceptos generales de herencia cualitativa y cuantitativa.
- Mecanismos reproductivos y estructura genética de cultivos autógamos y alógamos.
- Diversidad genética de cultivos representativos.
- Métodos de selección de cultivos autógamos.
- Métodos de selección de cultivos alógamos.

## Introducción: Mejoramiento de plantas cultivadas

- Aplicación de conceptos y principios de genética.
- Herencia de caracteres cualitativos: simple, pocos genes.
- Herencia cuantitativa: compleja, genes múltiples, influenciados por el ambiente (factores no-genéticos).
- Métodos para cultivos de autopolinización difieren de los de polinización cruzada (diferentes estructuras genéticas).
- En cultivos de autopolinización la variedad es una línea pura o mezcla de líneas puras.
- En cultivos de polinización cruzada la variedad es una población o un híbrido de la cruce de 2-4 líneas puras.

## Caracteres de herencia cualitativa

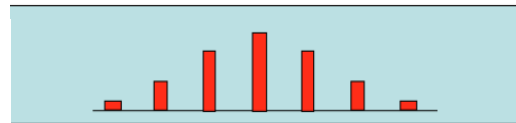
- Cruza entre padres contrastantes segregan en clases genotípicas y fenotípicas en la F2.
- Un solo gen: Dominancia completa de Mendel (**3:1** arveja), dominancia incompleta (**1:2:1** Don Diego de Noche).
- Interacción de 2 genes: **9:7** (rojo en tomate), **12:3:1** (pelaje en perros), **9:3:4** (color cebolla).
- Caracteres de herencia simple, patrones de segregación (fenotipos) predecibles en la F2.
- Altamente heredables (no efecto ambiental).



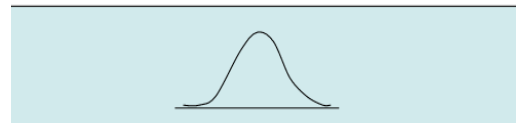
## Caracteres de herencia cuantitativa

- Cruza de padres contrastantes segregan en la F2 en una curva de variación continua (forma de campana).
- Variación fenotípica **cuantitativa**.
- Control genético de **alelos aditivos**.
- Clasificados como caracteres **poligénicos**.
- Expresión influenciada por **factores ambientales**.

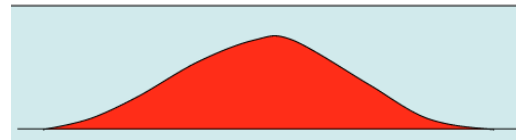
Varianza genética ( $V_g$ )



Varianza ambiental ( $V_e$ )



Varianza total o  
fenotípica =  $V_g + V_e$



## Caracteres de herencia cuantitativa

- Expresión de caracteres cuantitativos influenciada por los factores externos-ambientales- (**no genéticos**).
- Ejemplo: Rendimiento de un mismo genotipo varía según factores de ambiente (clima, suelo, fertilización, riego).
- **Heredabilidad**: Relación de efectos de **factores genéticos** y **no-genéticos** en la expresión del carácter (fenotipo).
- Predicción del **valor genético** (genotípico) de un padre para el mejoramiento y la superioridad de su descendencia.

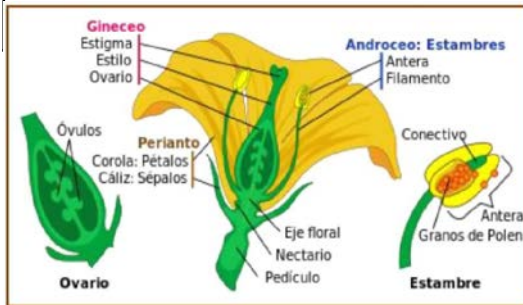
$$H = V_g / V_f \quad V_f \text{ o } V_t = V_g + V_e$$

Hereditabilidad	Frijol	Maíz
<p><b>Baja</b> <b>(&gt;0.0- 0.30)</b></p>	<p>Rendimiento, mosaico dorado, mustia hilachosa, sequía, tolerancia a bajo P.</p> <hr/> <p><b>Selección en generaciones avanzadas usando repeticiones (estimación y control del error experimental).</b></p>	<p>Rendimiento, acame, tolerancia a sequía, baja fertilidad del suelo.</p> <hr/> <p><b>Selección en generaciones tempranas usando técnicas confiables.</b></p>
<p><b>Media</b> <b>(0.31-0.60)</b></p>	<p>Bacteriosis, añublo del halo, mancha angular, madurez fisiológica, tamaño de semilla.</p> <hr/> <p><b>Selección en generaciones tempranas usando técnicas confiables.</b></p>	<p>Número, longitud y diámetro de mazorca, peso de grano, longitud de brácteas, diámetro del raquis.</p> <hr/> <p><b>Selección en generaciones tempranas usando técnicas confiables.</b></p>
<p><b>Alta</b> <b>(0.61-1.0)</b></p>	<p>Hábito de crecimiento, características morfológicas, antracnosis, mosaico común.</p>	<p>Días a floración, altura de planta y 1ra mazorca, número de macollos, hileras/mazorca.</p>

# Mecanismos reproductivos y arquitectura genética

## Plantas cultivadas autóгамas (autopolinización)

<b>Mecanismo reproductivo</b>	<b>Arquitectura genética</b>
<p>Hermafroditas: órganos reproductores masculino y femenino en la misma flor, y la polinización en flor cerrada (cleistogamia).</p>	<p>Genotipo (línea pura o mezcla) altamente homocigota.</p> <p>Variabilidad entre familias e individuos durante selección.</p> <p>Heterocigocidad residual (raleos en producción de semilla).</p>



- Mejoramiento genético (hibridación y selección).
- Producción comercial de semilla.



# Plantas cultivadas alógamas (polinización cruzada)

<b>Mecanismo reproductivo</b>	<b>Arquitectura genética</b>
<p>Hermafroditas: <b>polinización en flor abierta</b> (chasmogamia), barreras como <b>autoincompatibilidad</b> (hercogamia) o polen infértil (<b>esterilidad masculina</b>).</p> <p><b>Separación espacial de órganos</b> (monoicas: maíz) o <b>temporal de la actividad</b> (dicogamia: protandría y protogínea).</p>	<p>Genotipos <b>altamente heterocigotas</b> (población).</p> <p>Frecuencia de genes y genotipos basados en <b>Ley equilibrio de Hardy-Weinberg</b>.</p> <p>La frecuencia de alelos (<b>A</b> y <b>a</b>) permanece constante: <math>p + q = 1</math>.</p> <p>La frecuencia de genotipos será constante:</p> $p^2 (\mathbf{AA}) + 2pq (\mathbf{Aa}) + q^2 (\mathbf{aa}).$

- Mejoramiento genético.
- Producción comercial de semilla.

# Diversidad genética de los cultivos

<b>Frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.)</b>	<b>Maíz (<i>Zea mays</i> L.)</b>
<p>Reservorios genéticos: Andino (razas Nueva Granada, Perú y Chile) y Mesoamericano (razas Durango, Jalisco y Mesoamérica).</p> <p>Parientes: <i>P. v. aborigineus</i> (ancestro silvestre), <i>P. coccineus</i>, <i>P. dumosus</i>, <i>P. acutifolius</i>, <i>P. lunatus</i> y otros.</p>	<p>Razas (aprox. 220 en A. Latina): 64 (México) en 7 grupos o complejos raciales.</p> <p>Parientes: domesticación a partir de los “teocintles” (silvestres), especies del género <i>Tripsacum</i>.</p>



# MEJORAMIENTO DE CULTIVOS AUTÓGAMOS

- Cultivos autógamos (frijol, tomate, soya, trigo, arroz, papa, girasol, durazno y otros) son altamente homocigotas.
- Genes homocigotas (AA o aa) se mantienen y los heterocigotas (Aa) segregan en progenies homocigotas (AA y aa) y heterocigotas (Aa), en proporciones iguales.
- A través de la autofecundación (autogamia) se alcanza alta homocigocidad y se fija el genotipo.

## Cambios de heterocigocidad a homocigocidad a través de la autofecundacion (%)

Generación	Heterocigocidad	Homocigocidad
F1	100.0	0.0
F2	50.0	50.0
F3	25.0	75.0
F4	12.5	87.5
F5	6.25	93.75
F6	3.125	96.875
F7	1.5625	98.4375
Fx	$\geq 0$	$\leq 100$

La heterocigocidad es reducida a la mitad en cada generación de autofecundación. La homocigocidad aumenta proporcionalmente y es alcanzada en  $\geq 6$  generaciones de autofecundación.

# Métodos de Mejoramiento de Cultivos Autógamos (autopolinización)

## Hibridación:

- Recombinación de gametos de dos (o más) padres para desarrollo de poblaciones compuestas por individuos que combinan diversos caracteres (genes) de los padres.
- Poblaciones genéticamente variables (segregantes) donde se aplican los procesos de selección.

## Selección:

- La identificación y multiplicación de genotipos superiores (individuos o grupos) de poblaciones segregantes.
- Efectividad de selección con base en la variabilidad genética identificable y distinguible de las variaciones ambientales.

## Tipos de hibridación (cruzamiento)

<b>Tipo</b>	<b>Generación (G)</b>	<b>G 1</b>	<b>G 2</b>	<b>Uso</b>
<b>Simple</b>	1	P1 x P2	--	Combinar las características de 2 genotipos
<b>Doble</b>	2	P1 x P2 P3 x P4	(P1 x P2) x (P3 x P4)	Combinar varias fuentes de genes de características poligénicas
<b>Triple</b>	2	P1 x P2	P3 x (P1 x P2)	Combinar 3 fuentes de genes con el 50% de un padre (P3)

P1 =Padre 1 ....

➤ **Métodos de selección- Cultivos autógamos:**

Masal\*

Pedigrí o Genealógica\*

Pedigrí Modificado (DSI)\*

Líneas Puras

Poblaciones Compuestas

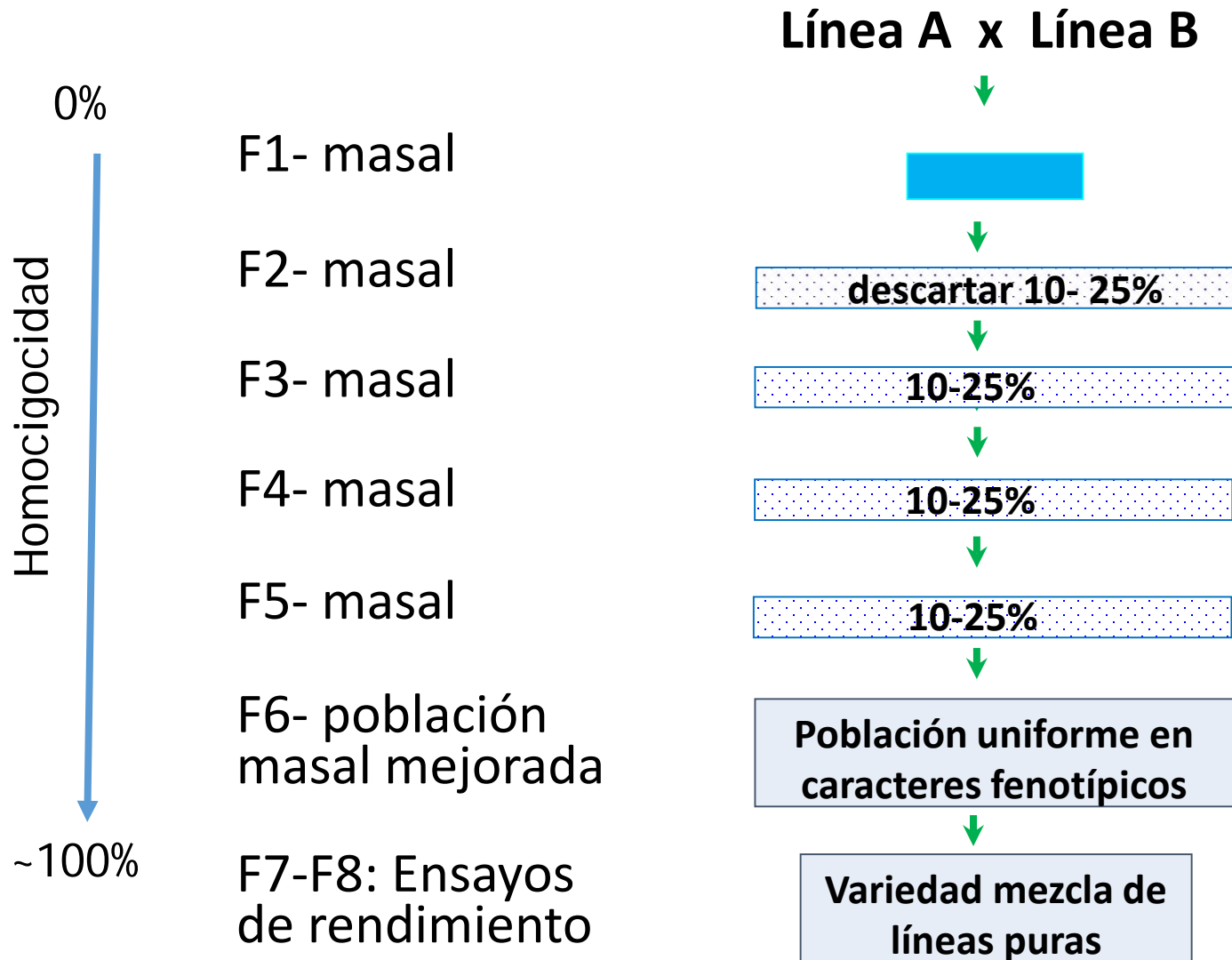
Retrocruza\*

Retrocruza/autofecundación\*

Gametos

Recurrente

# Método de Selección Masal

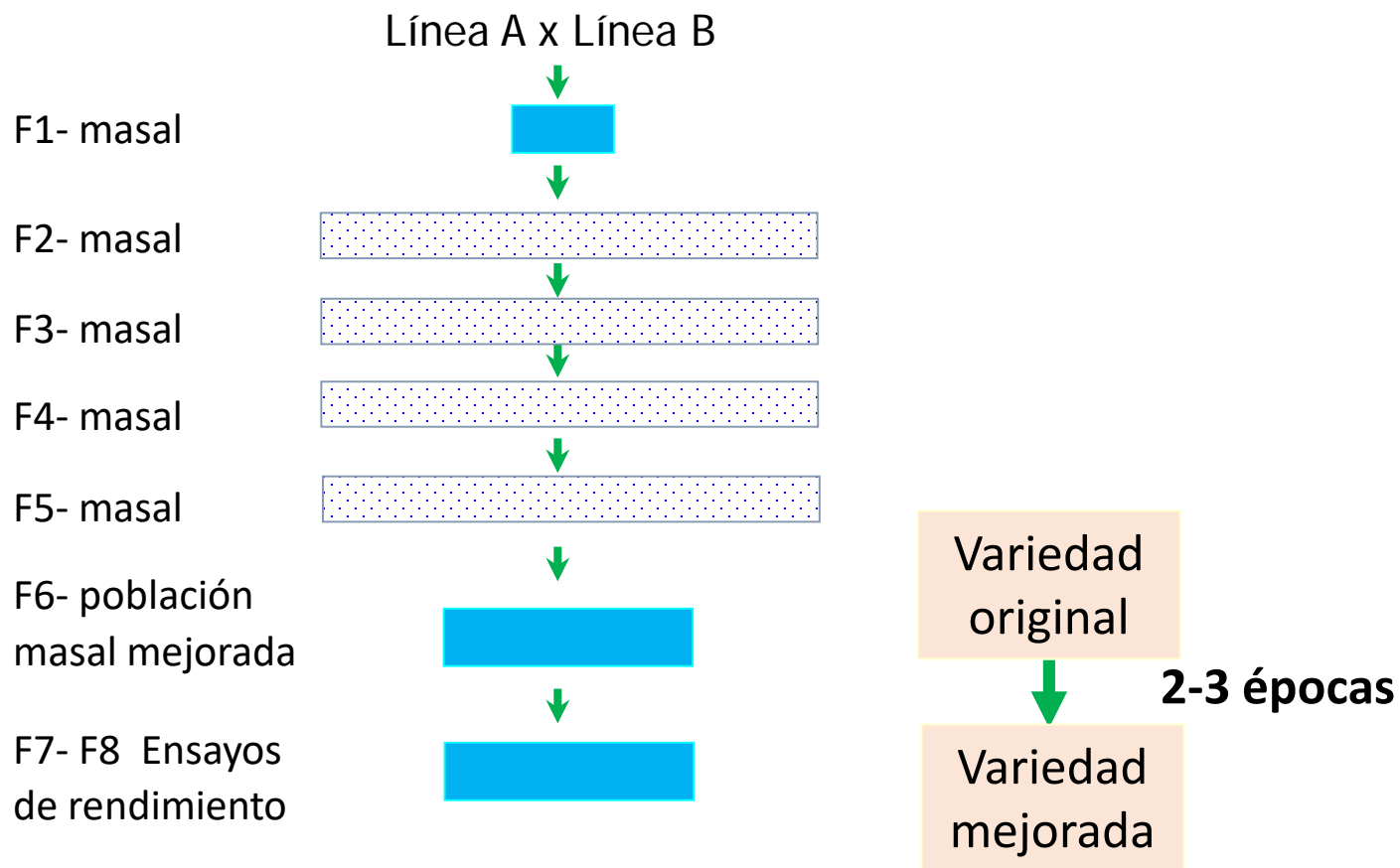




## Método de Selección Masal

- **Objetivo:** Mejorar el comportamiento general de una población mediante selección y multiplicación de genotipos superiores.
- **Selección:** plantas con apariencia (fenotipo) similar y cosecha masal (compuesto) de semillas.
- Importante en mejora de **variedades criollas** y producción de **semilla pura**.
- Variabilidad genética provee estabilidad en ambientes diversos.
- Variedad uniforme para las características físicas (fenotípicas), pero constituida por diferentes genotipos (**líneas puras**).

# Método de Selección Masal en Variedades

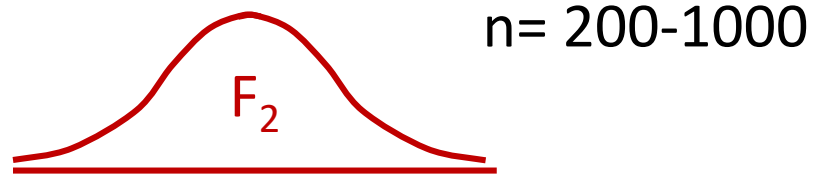


## SELECCIÓN POR PEDIGRÍ O GENEALÓGICA

- **Objetivo:** combinar genes deseables de 2 o más genotipos en una variedad superior a ambos padres.
- **Selección de padres:** según su potencial de mejoramiento, caracteres complementarios y número (2-4).
- **Cruza de padres:** Simple (A x B), triple [A x F1 (B x C)] y doble [F1 (A x B) x F1 (C x D)].
- **Selección:** identificación y mantenimiento de genotipos superiores con base en **registros de relaciones padres-descendientes** durante las generaciones segregantes (F<sub>2</sub> a F<sub>6</sub>).

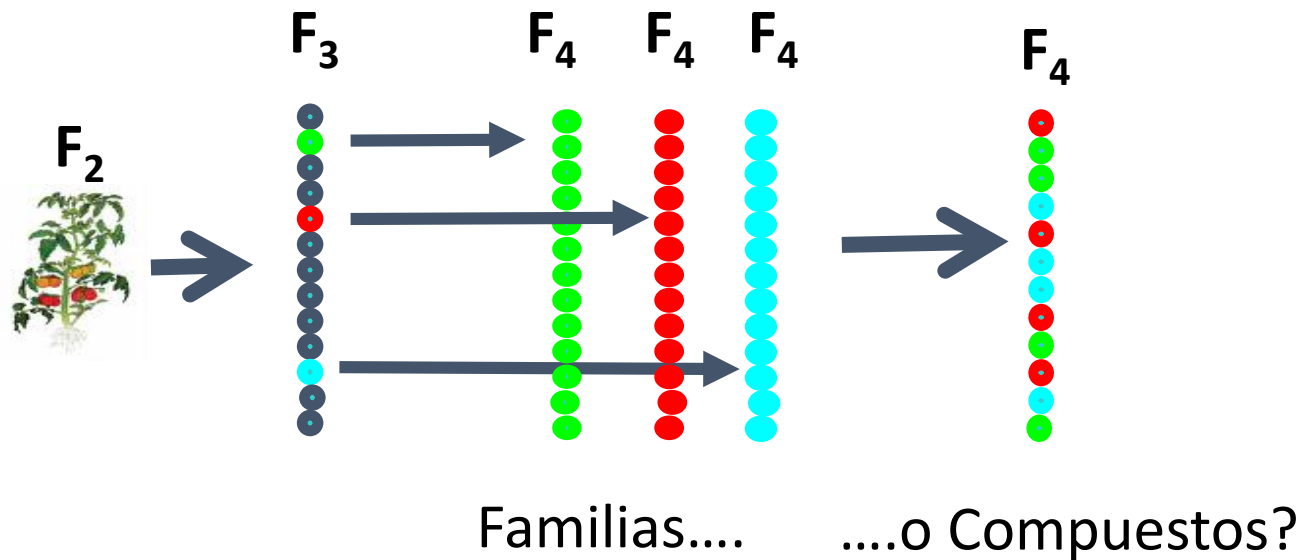
## Selección en la $F_2$ :

- 1ra. oportunidad de selección de individuos que darán las mejores progenies (descendencias).
- Máxima segregación (transgresiva) de cruza entre padres contrastantes para los caracteres de interés.
- Eliminación de plantas con genes mayores indeseables.



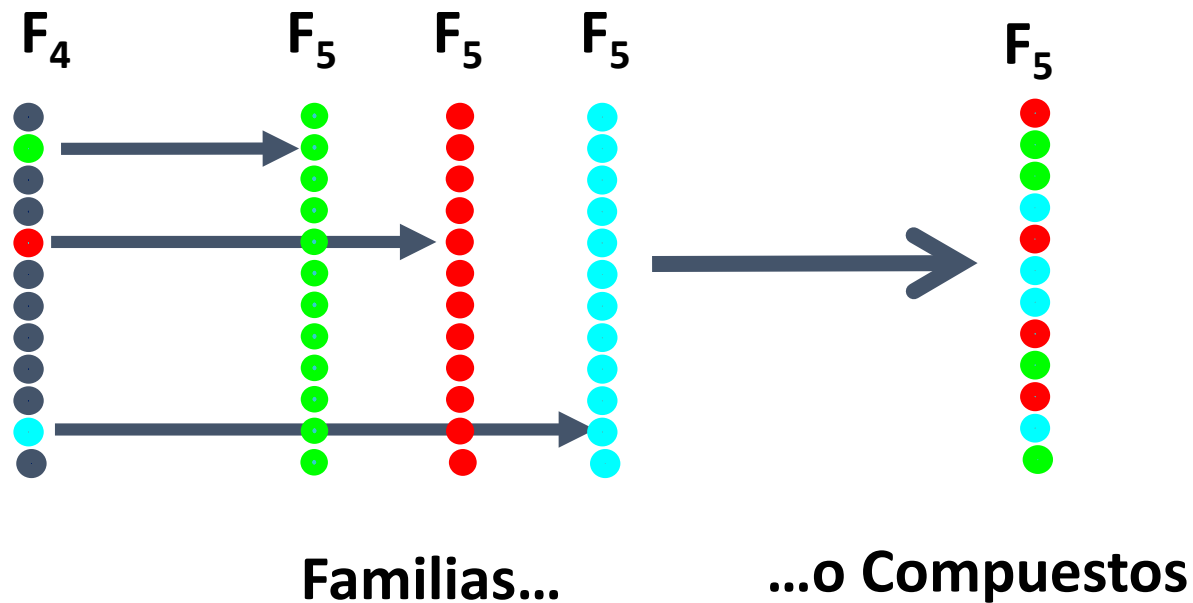
## Generación $F_3$ :

- Tamaño: >30 plantas/familia y  $\geq 50$  familias/población.
- Diferencias entre y dentro de familias (25% heterocigocidad).
- Selección: mejores plantas (3-5) de las mejores familias.



## Generaciones $F_4$ - $F_5$ :

- Mayoría de genes homocigotas:  $F_4$  (87.5%) y  $F_5$  (93.8%).
- Manejo y selección usando compuestos de familias.
- Selección entre familias (mayores diferencias).



# Método de Selección por Pedigrí o Genealógica

Cruza

Línea A x Línea B

F1- compuesta



F2- espaciada



F3- familias



F4- familias



F5- familias



F6- familias



F7- Viveros adaptación



F8-F10 Ensayos rendimiento



Selección y registro genealógico (pedigrí)

## **SELECCIÓN POR PEDIGRÍ MODIFICADA (DESCENDENCIA DE SEMILLA INDIVIDUAL- DSI)**

- Cruza de dos padres homocigotas para producir la F1.
- Autofecundación de la F1 para obtener población F2.
- Avance de 1-2 semillas de cada familia por DSI a partir de las plantas individuales F2.
- DSI hasta la homocigocidad (F6-F7) sin selección: líneas endogámicas recombinantes.
- Selección de líneas avanzadas con repeticiones (mejor control del error experimental).
- Mayor eficiencia que SP para caracteres de baja H.



# Método de Selección por Pedigrí Modificado (DSI)

Cruza

Línea A x Línea B

F<sub>1</sub>- compuesta



F<sub>2</sub>- DSI



F<sub>3</sub>- DSI



F<sub>4</sub>- DSI



F<sub>5</sub>- DSI



F<sub>6</sub>- líneas



F<sub>7</sub>- Adaptación



F<sub>8</sub>-F<sub>10</sub> Rend.

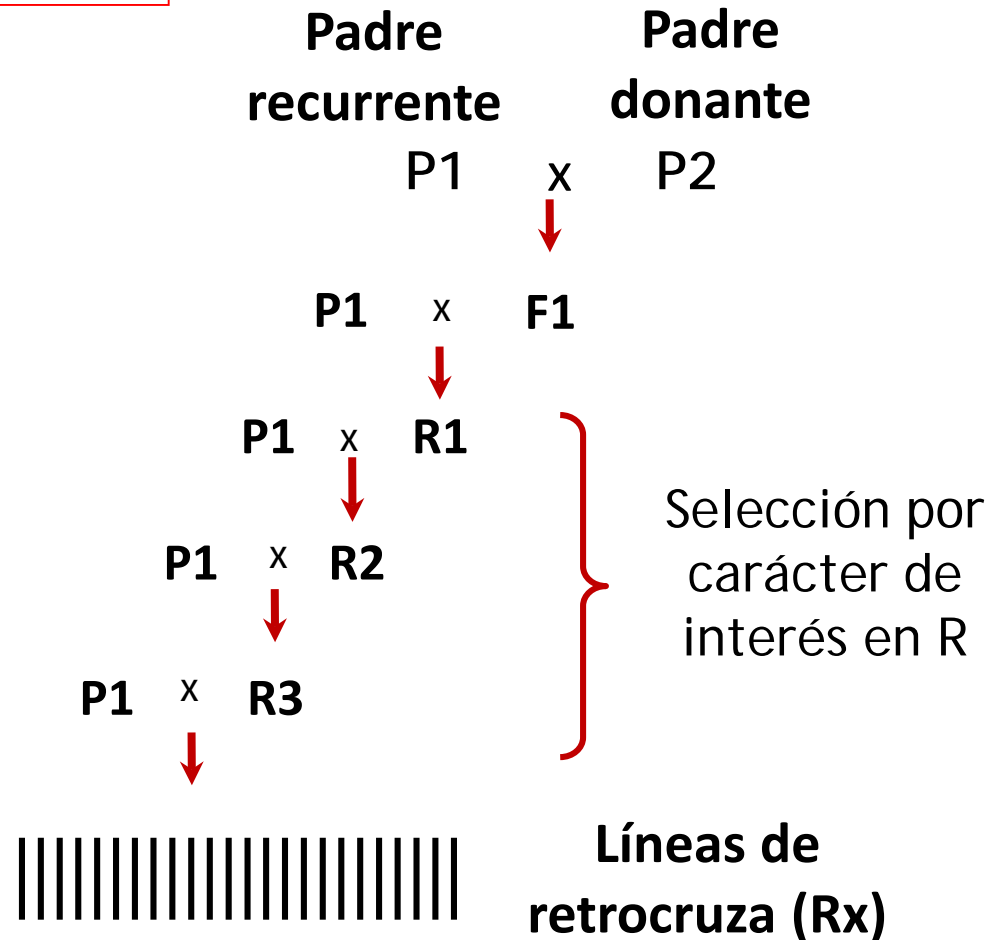


Avance por DSI  
sin selección

Selección con  
repeticiones de  
líneas endogámicas  
recombinantes

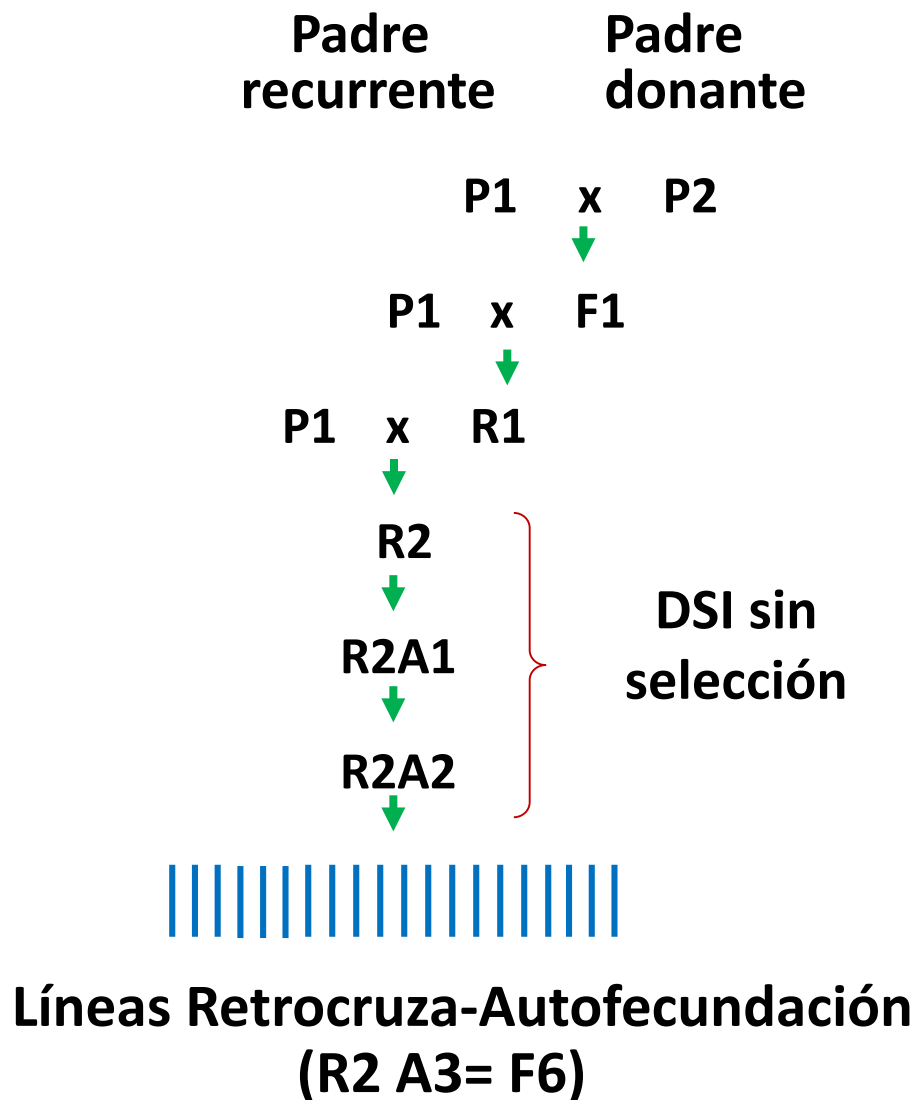
# MÉTODO DE RETROCRUZA

- Alto control genético.
- Variedad descrita anticipadamente.
- Variedad puede ser reconstruida.
- No requiere pruebas extensivas rendimiento.
- Menor toma de datos.
- Menor interacción G x A.
- Baja recombinación.
- Líneas iso-génicas cercanas.



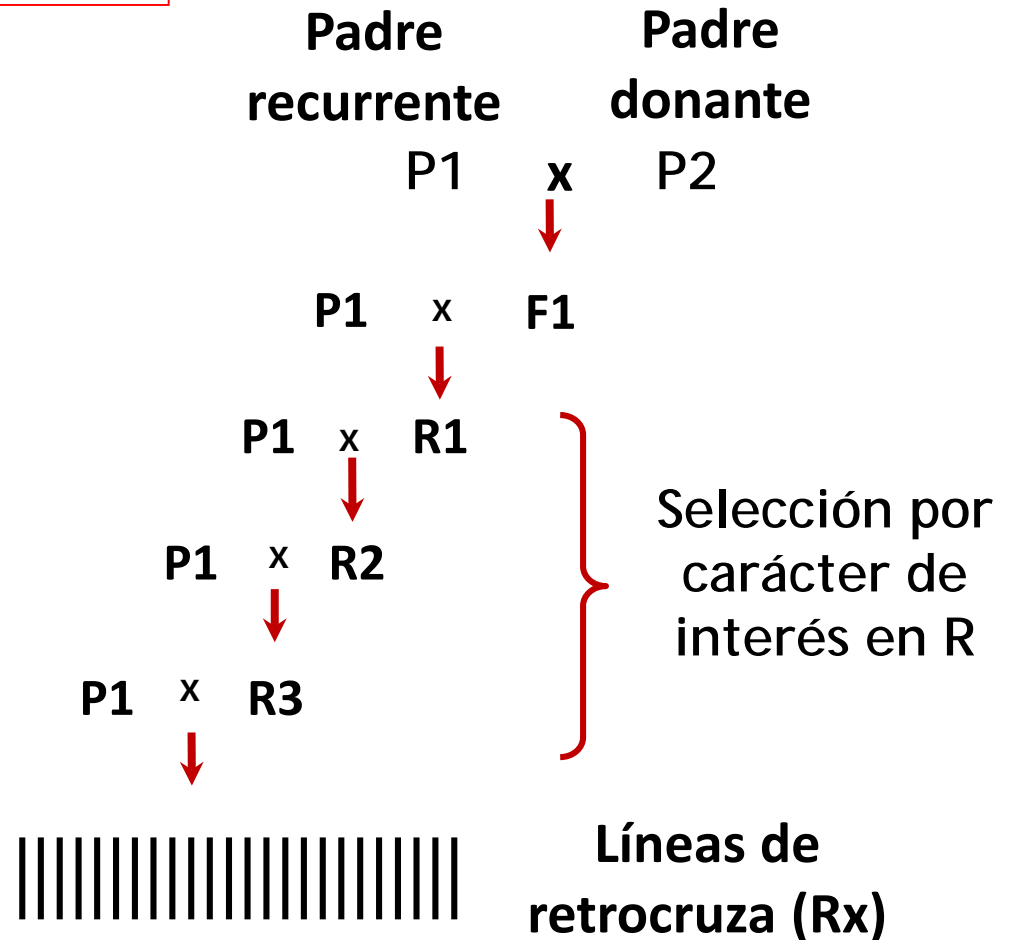
## Método de Retrocruza-Autofecundación

- Identificar genes mayores de caracteres cuantitativos.
- Incrementar recombinación en líneas de retrocruza.
- Mejorar caracteres de baja heredabilidad.
- Transferir germoplasma inadaptado al cultivado.
- Mejorar líneas puras y variedades criollas.



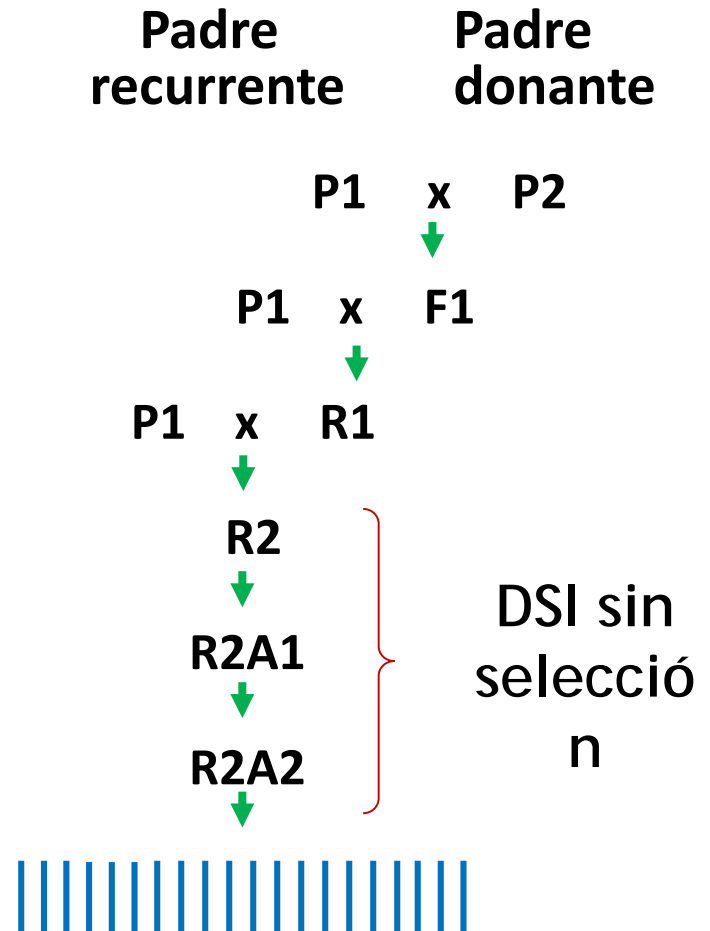
# MÉTODO DE RETROCRUZA

- Alto control genético.
- Variedad descrita anticipadamente.
- Variedad puede ser reconstruida.
- No requiere pruebas extensivas rendimiento.
- Menor toma de datos.
- Menor interacción G x A.
- Baja recombinación.
- Líneas isogénicas.



## Método de Retrocruza-Autofecundación

- Identificar genes mayores de caracteres cuantitativos.
- Incrementar recombinación en líneas de retrocruza.
- Mejorar caracteres de baja heredabilidad.
- Transferir germoplasma inadaptado al cultivado.
- Mejorar líneas puras y variedades criollas.



Líneas Retrocruza-Autofecundación  
(R2 A3= F6)

# MEJORAMIENTO DE CULTIVOS ALÓGAMOS (polinización cruzada o abierta)

- Maíz, sorgo, algodón, remolacha azucarera, gramíneas y leguminosas forrajeras.
- En cultivos de **polinización cruzada** se explota la naturaleza **heterocigota** de las plantas individuales.
- Cada planta contiene *loci* (genes) homocigotas y heterocigotas; pero los **heterocigotas** le confieren su estructura genética.
- En cada generación se produce un **reordenamiento** y **reagrupamiento** de genes por polinización cruzada normal (No. ilimitado de combinaciones).



- Se aplica la **Ley de Hardy-Weinberg** de equilibrio genético con respecto a cualquier *locus* (gen).
- Factores que afectan equilibrio H-W:
  - Apareamiento controlado (selección)
  - Mutaciones (naturales o espontáneas)
  - Migraciones (polen de lotes vecinos)
  - Selección natural
- El mejoramiento se inicia con colecciones o poblaciones desarrolladas por hibridación (**poblaciones fuentes**).
- Mejoramiento de poblaciones por **incremento de la frecuencia de genes (alelos) favorables** en lugar de selección de plantas individuales.

# SELECCIÓN MASAL

- Plantas seleccionadas por caracteres deseables (**fenotipos superiores**) se cosechan en compuestos masales.
- Siguiete generación manejada sin evaluar las progenies de las plantas seleccionadas.
- Practicado por agricultores: selección de mazorcas.
- Efectiva para caracteres con **alta heredabilidad**.
- Nueva variedad: no difiere mucho de la variedad original en su adaptación.
- **Debilidades:**
  - Falta de control sobre fuente de polen.
  - Poco efectiva para caracteres de **baja heredabilidad** (selección basada en **fenotipo**).



# Mejoramiento por Selección Masal

1<sup>ra</sup>  
época

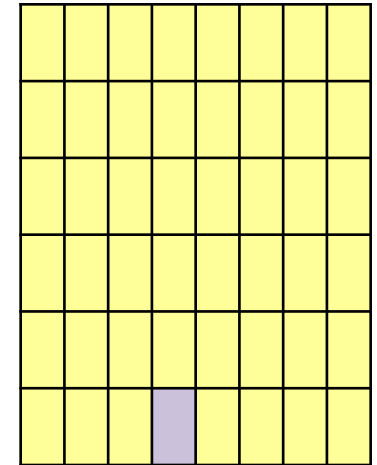
Población Fuente  
(polinización abierta)

Selección de plantas con  
fenotipos superiores (>200-400)

2<sup>da</sup>  
época

Nueva población  
(compuesto de semilla de  
plantas seleccionadas)

Nuevo ciclo de selección

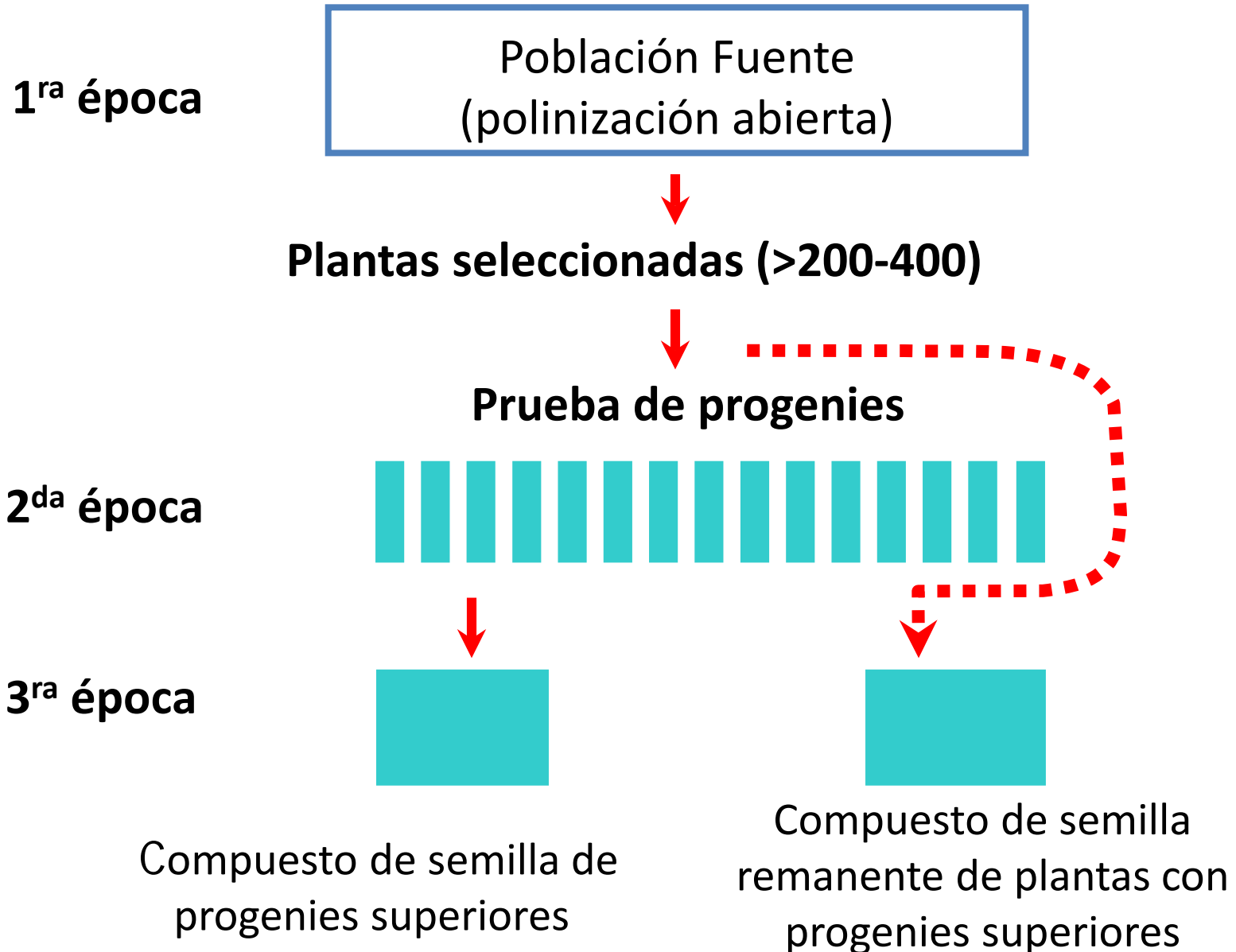


Selección  
estratificada

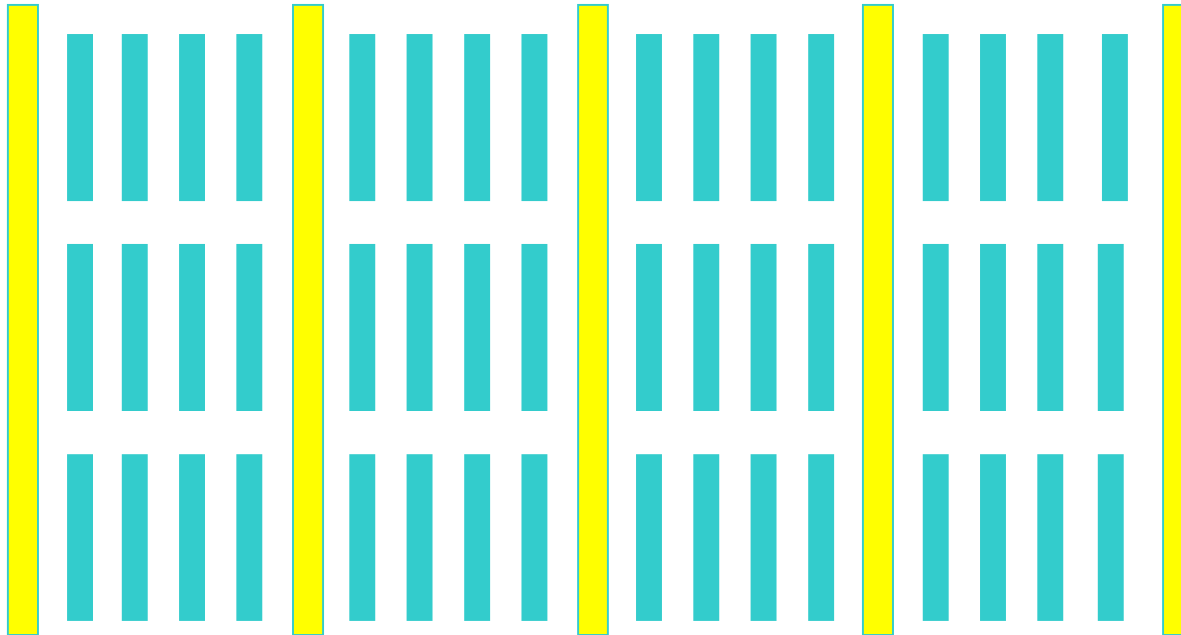
# SELECCIÓN DE MEDIO-HERMANOS CON PRUEBA DE PROGENIES


- Comportamiento de las **progenies** en lugar de la apariencia fenotípica de individuos: **valor genético** de los padres.
- **Compuestos** en aislamiento y bajo polinización cruzada para obtener nuevas combinaciones y equilibrio H-W.
- Variedad mejorada por **selección M-H (progenie)**:
  - Nueva variedad de polinización abierta.
  - Población fuente para nuevo ciclo de selección o para obtener líneas puras.
- En mejoramiento de maíz: **surco por mazorca**.
- Maíz y cultivos con suficiente semilla para **ensayos de rendimiento con repeticiones**.


# Selección Medio-Hermanos con Pruebas de Progenies



## Prueba de progenies (2da. Época)



 Mezcla de semilla de plantas seleccionadas (macho común).

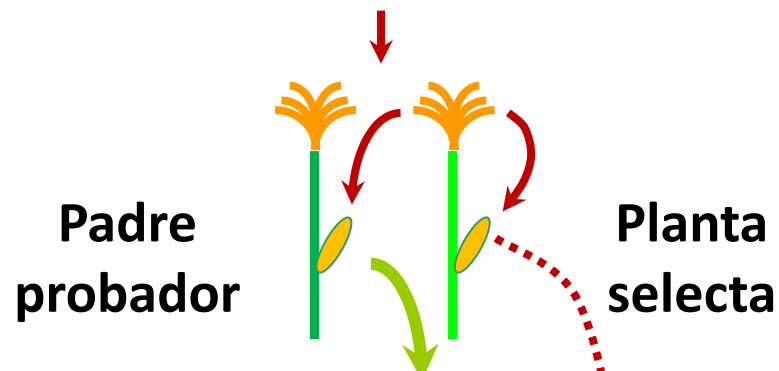
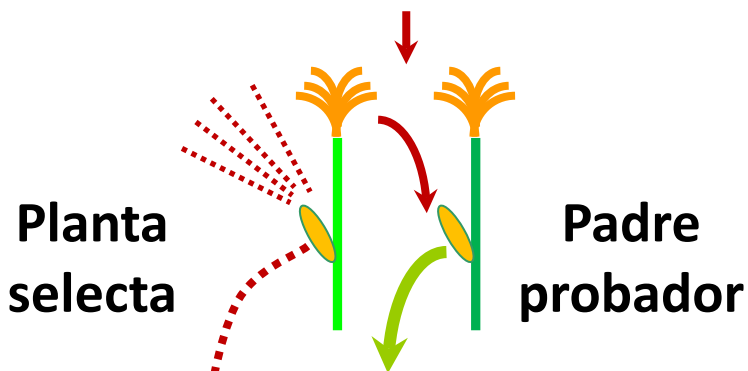
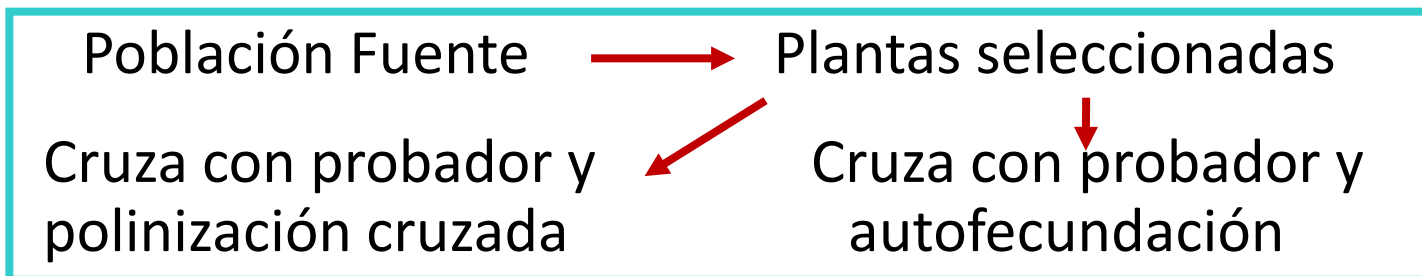
 Progenies de >200-400 plantas seleccionadas se despanojan (hembra).

# SELECCIÓN DE MEDIO-HERMANOS CON PRUEBAS DE CRUZA

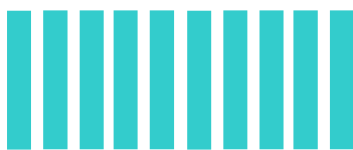
- Basada en **prueba de cruza** (“testcross”) en lugar del comportamiento de progenies.
- **Mejor control de padres:** evaluación más precisa de genotipos seleccionados (que prueba de progenie).
- **Padre probador:** variedad que combina bien para la prueba de cruza.
- Maíz y cultivos de polinización cruzada con suficiente semilla para ensayos con repeticiones.

# Selección de Medio-Hermanos con Pruebas de Cruza

1<sup>ra</sup> época



2<sup>da</sup> época



3<sup>ra</sup> época



Semilla de polinización abierta de progenies superiores

Semilla de autofecundación de progenies superiores

## SELECCIÓN DE HERMANOS- COMPLETOS

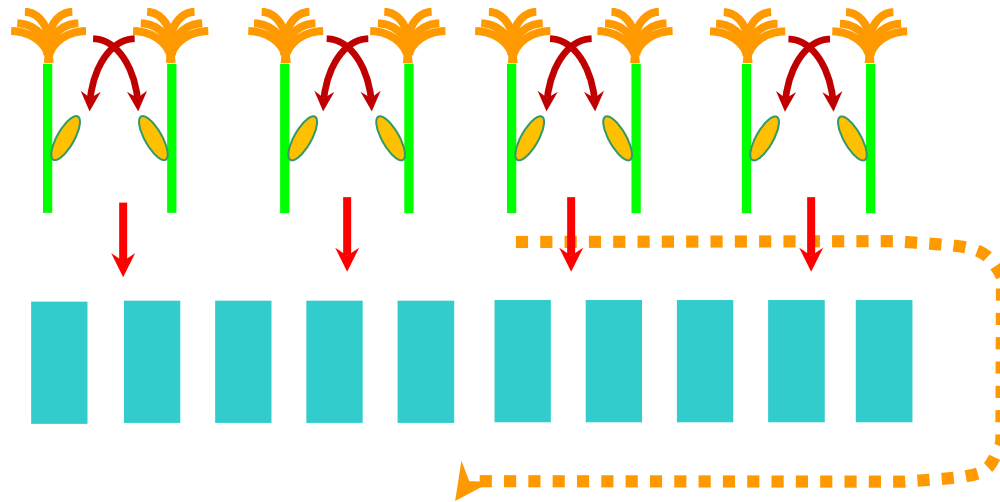
- **Selección M-H:** pruebas de progenie o de cruza, y las poblaciones se reconstituyen con semilla de polinización abierta o de autofecundación de las plantas madres.
- **Selección de H-C:** cruzas entre pares de plantas seleccionadas, y la semilla se usa para pruebas de progenies y la reconstitución de la nueva población.

# Selección de Hermanos Completos

1<sup>ra</sup> época

Población fuente (polinización abierta)

Cruza de pares de plantas seleccionadas (>100-200)



2<sup>da</sup> época

3<sup>ra</sup> época

Compuesto de semilla remanente de cruza de pares de plantas con progenies superiores (>20-40)



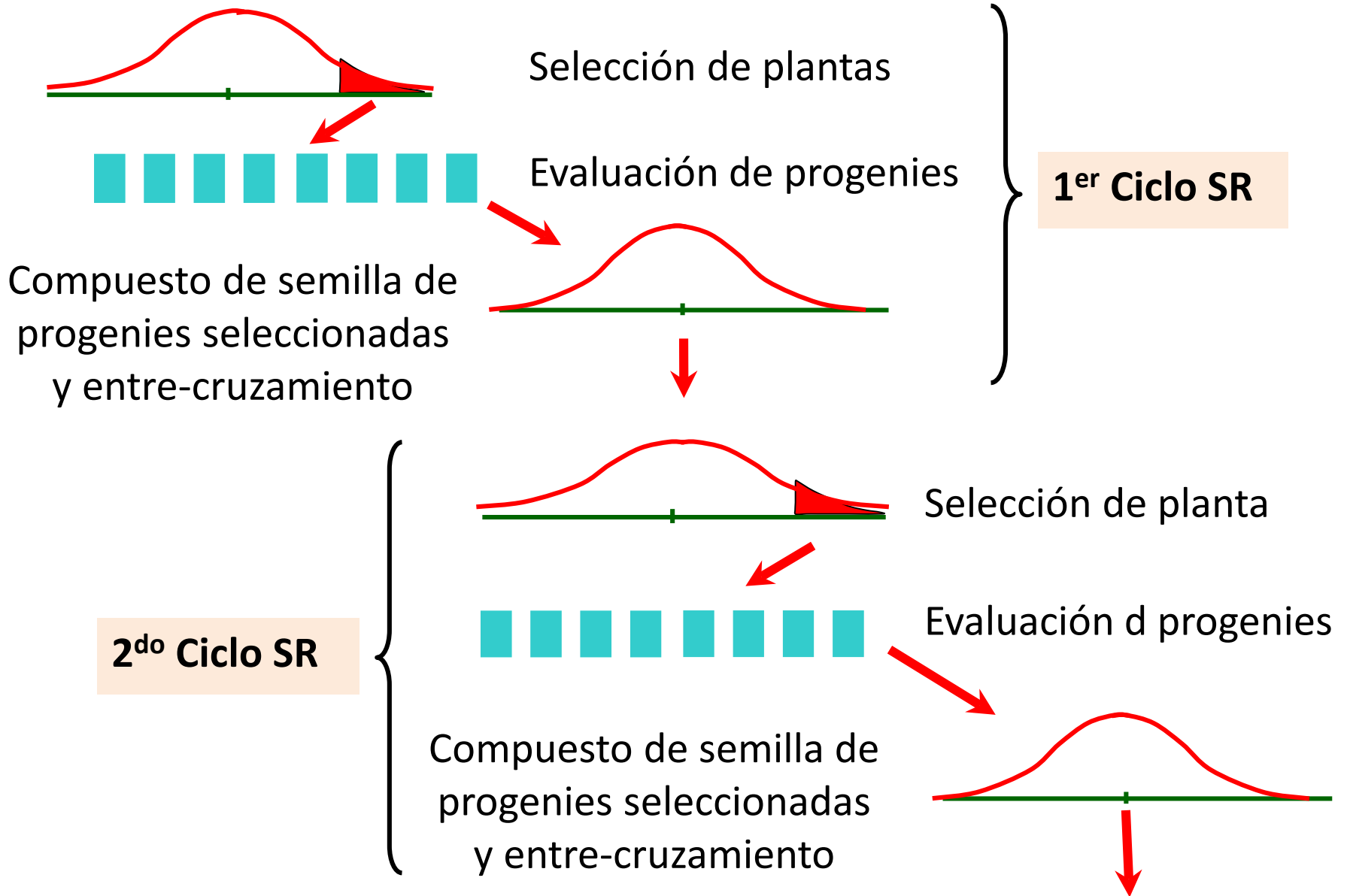
# Efectividad de Métodos de Mejoramiento para Cultivos Alógamos

Método	Selección	Valor genético
Masal	Fenotípica	Desconocido
Medio-Hermanos	Prueba de progenies	Hembra conocida Macho desconocido
Medio-Hermanos	Prueba de cruza con padre probador y polinización cruzada o autopolinización	Hembra conocida (contribución parcial o total a la nueva población) Macho conocido (no aporta a la nueva población).
Hermanos-Completos	Cruza entre pares de plantas seleccionadas	Hembra y macho conocidos (ambos aportan a la nueva población)

# SELECCIÓN RECURRENTE

- Incremento de frecuencia de genes cuantitativos mediante **ciclos repetidos de selección**.
- **Un ciclo de selección**: identificar genotipos superiores y entrecruzar para obtener nuevas combinaciones de genes.
- **Ciclos de selección**: se repiten conforme se genere genotipos superiores (variabilidad genética presente).
- **Caracteres cuantitativos**: proteína o aceite (maíz), resistencia de fibra (algodón), azúcar (remolacha) o rendimiento (varios).
- Caracteres complejos: **habilidad combinatoria** en poblaciones fuentes para extraer líneas puras de maíz.
- Incluir **pruebas de progenie** o de **crusa** usando principios de selección recurrente.

# Selección Recurrente con Pruebas de Progenie





# Selección Recurrente Recíproca

- Mejoramiento simultáneo de habilidades combinatorias general (**HCG**) y específica (**HCE**).
- **Selección recurrente por HCG:** emplea probador con base genética amplia (**VPA o sintético**) e identifica efectos genéticos aditivos.
- **Selección recurrente por HCE:** emplea probador con base genética estrecha (**línea pura**) e identifica efectos genéticos aditivos y no-aditivos (dominantes y epistáticos).

# Selección Recurrente Recíproca

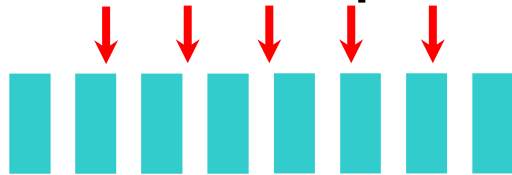
Población A



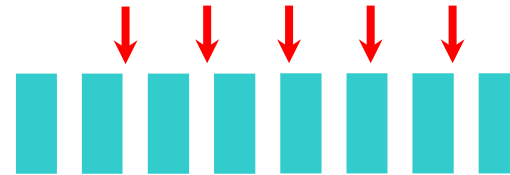
Población B



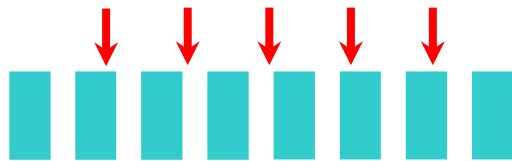
HCG: Plantas A x Comp. Polen B



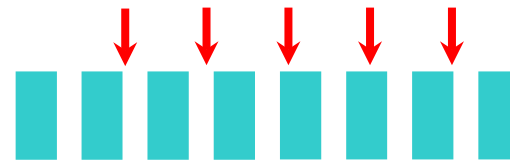
Plantas B x Comp. Polen A



HCE: Plantas A x Línea Pura B



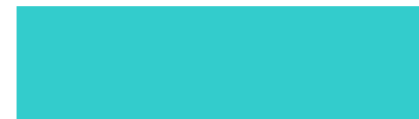
Plantas B x Línea Pura A



Semilla autofecundada de plantas seleccionadas (HCG o HCE)



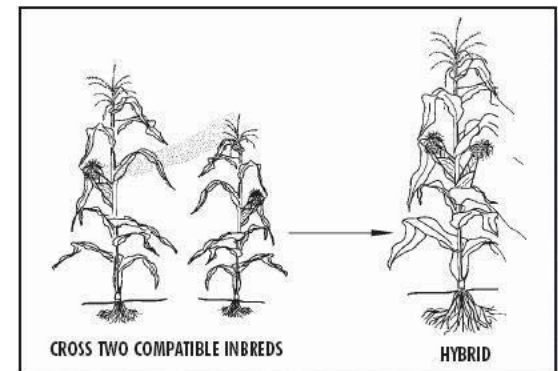
Nueva población A



Nueva población B

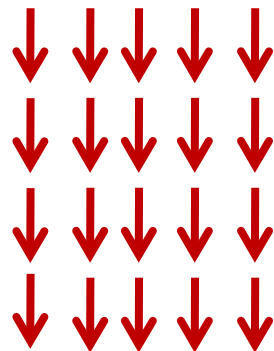
# VARIETADES HÍBRIDAS

- Basadas en **vigor híbrido o heterosis**: aumento de vigor con relación a los padres (número de frutos en pepino o tamaño de mazorca en maíz).
- **Maíz híbrido**: combinación de **líneas puras** desarrolladas por autofecundación (endocría o endogamia).
- **Heterosis** asociada con reducción de vigor por cruzamiento continuo de individuos relacionados (endocría o endogamia): **depresión endogámica**.
- **Híbridos**: Cruzas simples (**A x B**), dobles [(**A x B**) x (**C x D**)] o triples [**A x (B x C)**].

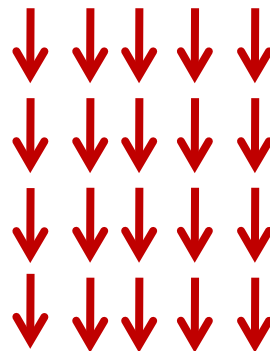


# Desarrollo de líneas puras e híbridos

**Población  
A**



**Población  
B**



**Líneas A x B**



**Poblaciones  
fuentes no-  
relacionadas**



**Autofecundación y  
selección (líneas  
puras)**



**Pruebas de HCG  
y HCE**



**Evaluación de  
híbridos**



Líneas	1A	2A	3A	....	....	49A	50A	HCG-B
1B								$\bar{X}_{1B}$
2B					HCE			$\bar{X}_{2B}$
3B								$\bar{X}_{3B}$
...								...
...			HCE					...
...								...
49B						HCE		$\bar{X}_{49B}$
50B								$\bar{X}_{50B}$
HCG-A	$\bar{X}_{1A}$	$\bar{X}_{2A}$	$\bar{X}_{3A}$	...	...	$\bar{X}_{49A}$	$\bar{X}_{50A}$	

**Prueba de HCG y HCE de 50 líneas puras de la Población A y 50 de la Población B.**

# VARIETADES SINTÉTICAS

- Cruzamiento de genotipos (líneas puras) seleccionados por **buena HC** y mantenimiento por polinización abierta.
- **Usos:** Estructura floral del cultivo dificulta la polinización, costo de la semilla híbrida es muy alto, áreas comerciales muy reducidas, mejor adaptación en áreas marginales, fuente de nuevo germoplasma.
- Poblaciones derivadas del entrecruzamiento de líneas puras, mantenidas por selección masal en siembras aisladas.
- Comportamiento de las variedades sintéticas: superior a variedades de polinización abierta porque las líneas puras son seleccionadas por HC.

Predicción del sintético:  $\bar{F}_2 = \bar{F}_1 - [(\bar{F}_1 - \bar{P}) / n]$

$\bar{F}_2$  = rendimiento  $\bar{X}$  del sintético.

$\bar{F}_1$  = rendimiento  $\bar{X}$  de las cruza simples.

$\bar{P}$  = rendimiento  $\bar{X}$  de las líneas puras.

n = número de líneas puras.

F3 en adelante: Equilibrio según Ley de Hardy-Weinberg.