

Estudio preliminar para generar cruces entre siete progenitores de papa

Preliminary study to generate crosses among seven potato progenitors

¹Claudia Saavedra-Guevara, ^{2*}Delfina de Jesús Pérez-López, ²Andrés González-Huerta, ²J.

Ramón Pascual Franco-Martínez

¹Programa de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Autónoma del Estado de México, Carretera Toluca-Ixtlahuaca km 15.5, campus universitario "El Cerrillo", El Cerrillo Piedras Blancas, C. P. 50295, Toluca, Edo. de México, México. Correo electrónico: csaavedrag001@alumno.uaemex.mx ORCID <https://orcid.org/0000-0001-5519-6125>

²Centro de Investigación y Estudios Avanzados en Fitomejoramiento, Facultad de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca de Lerdo, Estado de México, México AP. 435. Correos electrónicos: djperez@uaemex.mx; agonzalez@uaemex.mx, jrfrancom@uaemex ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1621-5690>; <https://orcid.org/0000-0001-6055-7597>; <https://orcid.org/0009-0002-2139-6203>

*Autor para correspondencia

Recibido: 4 de octubre del 2023

Aceptado: 2 de septiembre del 2024

Publicado: 30 de septiembre del 2024

<https://doi.org/10.33064/iycuaa2024934753>
e4753

RESUMEN

Los planes de cruzamiento son un prerrequisito para caracterizar variedades de papa que son utilizadas en programas de mejoramiento genético, producción de semilla, así como para generar, validar, aplicar y transferir tecnología. El objetivo principal del presente estudio fue realizar todos los cruzamientos entre siete progenitores, pero sólo 26 cruces se realizaron y 12 de éstas produjeron fruto. Los mejores progenitores masculinos fueron Caesar, Fianna y Orquesta. La mejor cruce fue Atlantic x Cesar, seguida de Fianna x Cesar (147 y 135 semillas por fruto, respectivamente).

Palabras clave: *Solanum tuberosum* L.; floración; sistemas de apareamiento.

ABSTRACT

Mating systems are a prerequisite to characterize potato varieties that are used in breeding programs, seed production programs, as well as to generate, validate, apply and transfer technology. The main objective of the present study was to perform all the possible crossings among seven progenitors, but only 26 crosses were performed of which 12 produced fruit. The best male progenitors were Caesar, Fianna and Orquesta. The best cross was Atlantic x Caesar, followed by Fianna x Caesar (147 and 135 seeds per fruit, respectively).

Key words: *Solanum tuberosum* L.; flowering; mating systems.

INTRODUCCIÓN

La elección de progenitores sobresalientes en papa (*Solanum tuberosum* L.) es importante para aplicar un diseño de apareamiento apropiado que permita obtener cruces directas, autofecundaciones y retrocruzas. Sin embargo, esta actividad es difícil y laboriosa debido a la herencia tetrasómica y a la naturaleza heterocigótica que presenta esta especie (Gopal, 2015) ya que los efectos de dominancia y epistasia contribuyen considerablemente en su comportamiento; también se sabe poco de la estructura genética de diversos cultivares de papa, así como de sus progenies. El apareamiento entre progenitores tetraploides comerciales (4x x 4x) ha resultado ser la más apropiada y la más utilizada (Golmirzale y Mendoza, 1985; Mendoza, 1983), ya que genera homogeneidad y estabilidad genética (Bethke y Jansky, 2021). El valor del progenitor y de sus descendientes se puede estimar mediante la prueba de la progenie, línea x probador u otro método de cruzamiento (Plaisted Sandford, Federer y Kehr, 1962, y Gopal, 2008) como el diseño II de Carolina del Norte. La flor de la papa tiene una inflorescencia cimosa con flores hermafroditas, colores diversos y cinco estambres (Montaldo, 1984), pero en la polinización y durante la fecundación se presentan limitantes en la sincronización de la floración, en la posición de la inflorescencia (Almekinders y Wiersema, 1991), y en número de tallos por planta (Almekinders, 1991), así como ausencia de floración y en estructura de los órganos reproductores, si son fuertes o débiles, y si producen polen viable o no; todas estas características dependen del cultivar, de la longitud del día y de la temperatura (Gopal, 1994), entre otros. El uso de esquejes florales (Otazu y Amoros, 1991) ha resultado ser la técnica más eficiente para tener éxito en los cruzamientos y obtener mayor cantidad de frutos; la especie tiene un gineceo multiovular de 1000 a 2000 óvulos, de los cuales de 30 a 40 % son fertilizados y producen semilla (Upadhyya, Thaleur y Kadian, 1985).

La liberación de una variedad comercial requiere de 10 a 13 años, y la obtención de las cruces es la etapa inicial para lograr progenies sobresalientes. En el contexto anterior, el objetivo principal del presente trabajo fue realizar todos los cruzamientos a partir de siete progenitores tetraploides (4X x 4X) de papa, como un estudio preliminar para su caracterización agronómica y genética en condiciones de campo e invernadero.

Hipótesis: *Es posible obtener todos los cruzamientos con siete progenitores de papa.*

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo se hizo en 2022 en el invernadero núm. 1 de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma del Estado de México, con sede en el campus universitario "El Cerrillo", ubicado en el Cerrillo Piedras Blancas, Municipio de Toluca de Lerdo, Estado de México, México. Se sembraron los progenitores Agatha, Atlantic, Caesar, Fianna, Mondial, Orquesta y Paula en macetas de 20 cm de diámetro, el 4 de mayo y el 16 de junio. En cada fecha se utilizaron 20 tubérculos por variedad. El sustrato se hizo a base de agrolita y tierra negra; los tubérculos fueron desinfectados con una solución de Captan 20 g x 20 L⁻¹ de agua durante 10 minutos. La fórmula de fertilización por hectárea fue 189 N-200P-254K, y se utilizaron como fuentes a la Urea (46 N), al NH₄SO₄ (sulfato de amonio) y al KH₂PO₄ (fosfato monopotásico). Se aplicó un diseño de apareamiento completo utilizando los siete progenitores (p), por lo que p² sería igual a 49 cruzas posibles. Para coleccionar el polen se usó un vibrador eléctrico, se eligió al progenitor femenino en estado de botón floral, se emasculó, e inmediatamente se polinizó. La cosecha de los frutos se realizó 45 días después de la polinización manual. Las variables registradas fueron: inflorescencias por planta (NIP), flores por inflorescencia (NFI), inicio de floración (FIF), color de flor (CF), cantidad de polen (CP), polinizaciones realizadas (NPR), frutos por craza (NF), peso promedio del fruto (PPF), diámetro promedio del fruto (DPF) y semillas por fruto (NSF).

Los datos fueron concentrados en tablas con base en totales, medias aritméticas, desviaciones estándar, y coeficientes de variación. Para NF, NPF y NSF se hizo un análisis de varianza (no mostrado) y una comparación de medias entre cruzas aplicando la prueba de la Diferencia Mínima Significativa (DMS) de Fisher (p= 0.05). Las salidas se generaron con el paquete estadístico InfoStat, versión 2017. Se eligió un modelo de efectos fijos para un ensayo desbalanceado

RESULTADOS

Características de la floración. Agatha no produjo flores, pero las seis variedades restantes sí. El número de inflorescencias por planta varió entre dos y cinco, con promedio de 3.5; Orquesta tuvo cinco inflorescencias por planta. En flores por inflorescencia, Caesar (10), Fianna (8) y Paula (8), presentaron el mayor número. (Tabla 1 y 2).

Tabla 1
Características de la floración de siete progenitores de papa en 2022

Progenitor	TP	NIP	NFI	FIF	CF	CP	CV
Agatha	20	SF	SF	SF	SF	SF	SF
Atlantic	40	2	5	22/07/02	Bco-lila	Sin polen	Tardío
Caesar	40	2	10	20/06/22	Blanca	Abundante	Intermedio
Fianna	40	2	8	21/06/22	Blanca	Abundante	Intermedio
Mondial	40	3	3	16/06/22	Morada	Medio	Intermedio
Orquesta	30	5	4	20/06/22	Lila	Abundante	Intermedio
Paula	40	2	8	22/07/22	Blanca	Escaso	Tardío

TP= total de plantas observadas; NIP= Número de inflorescencias por planta; NFI= Número de flores por inflorescencia; FIF= Fecha de inicio de floración; CF= color de la flor; CP= cantidad polen; CV= ciclo vegetativo, en variedades precoces la floración ocurre 30 días después de la siembra, en variedades intermedias entre los 35 y 45 días y en las tardías entre 50 y 60 días (Molina, Santos y Aguilar 2004).
Elaboración propia.

Cruzamientos efectivos. Se realizaron 26 de las 49 cruzas posibles, y de las 348 polinizaciones realizadas solamente 48 (13.79%) produjeron frutos (tabla 2). No se obtuvieron todos los cruzamientos porque Agatha no floreció y Paula, aunque floreció no presentó sincronía en la floración y también produjo poco polen. Los progenitores masculinos efectivos fueron Caesar y Fianna y femeninos Orquesta y Mondial (tabla 3).

En la tabla 4 se muestran frutos cosechados, así como promedio aritmético, desviación estándar y coeficiente de variación para frutos por cruce, diámetro promedio del fruto, peso promedio del fruto y semillas por fruto.

Tabla 2
Total de polinizaciones realizadas en 2022

♀ \ ♂	Agatha	Atlantic	Caesar	Fianna	Mondial	Orquesta	Paula
Agatha	SF	SF	SF	SF	SF	SF	SF
Atlantic	SF	SP	9	5	2	3	3
Caesar	SF	SP	33	45	23	31	16
Fianna	SF	SP	10	24	11	20	0
Mondial	SF	SP	6	4	5	6	0
Orquesta	SF	SP	14	23	15	17	5
Paula	SF	SP	5	7	0	0	6

SF= sin flores; SP= sin polen; Total de cruzamientos= 26
Elaboración propia.

Tabla 3
Total de frutos de cada cruce

♀ \ ♂	Agatha	Atlantic	Caesar	Fianna	Mondial	Orquesta	Paula
Agatha	*	*	*	*	*	*	*
Atlantic	*	*	5	*	*	*	*
Caesar	*	*	7	5	*	*	*
Fianna	*	*	2	4	*	*	*
Mondial	*	*	*	2	2	2	*
Orquesta	*	*	3	6	5	6	*
Paula	*	*	*	*	*	*	*

Tabla 4
 Información de las cruza cosechadas

Cruza	N F		PPF (g)	DPF (mm)	NSF
1) Atlantic x Caesar	5	\bar{x}	6.7	24.2	147.0
		sd	1.2	1.7	29.5
		cv	18.2	6.9	20.0
2) Caesar x Caesar	7	\bar{x}	2.8	16.7	74.1
		sd	0.9	2.1	33.3
		cv	34.1	12.4	44.1
3) Caesar x Fianna	5	\bar{x}	2.9	17.2	88.2
		sd	1.4	3.4	54.5
		cv	48.3	19.7	61.1
4) Fianna x Caesar	2	\bar{x}	5.9	23.7	135.0
		sd	1.2	1.5	53.7
		cv	20.2	6.5	39.8
5) Fianna x Fianna	4	\bar{x}	4.3	18.4	123.2
		sd	3.2	8.7	131.2
		cv	74.3	47.3	106.4
6) Mondial x Fianna	2	\bar{x}	0.5	11.0	13.5
		sd	0.6	0.6	0.7
		cv	120.3	5.7	5.2
7) Mondial x Mondial	2	\bar{x}	1.3	13.0	115.5
		sd	0.7	1.6	23.3
		cv	57.6	12.4	20.2
8) Mondial x Orquesta	2	\bar{x}	1.0	11.2	86.0
		sd	0.2	0.5	19.8
		cv	24.3	4.4	23.0
9) Orquesta x Caesar	3	\bar{x}	1.2	11.9	105.0
		sd	0.7	3.1	83.2
		cv	58.4	25.1	79.2
10) Orquesta x Fianna	6	\bar{x}	1.1	11.4	35.0
		sd	0.7	2.2	37.8
		cv	66.5	19.7	105.2
11) Orquesta x Mondial	5	\bar{x}	0.7	10.7	107.2
		sd	0.3	1.9	49.8
		cv	38.2	18.4	46.5
12) Orquesta x Orquesta	6	\bar{x}	0.6	9.7	77.3
		sd	0.3	1.8	47.1
		cv	55.8	18.5	60.1

NF= número de frutos; PPF= peso promedio de frutos; DPF= diámetro promedio de frutos; NSF= Número de semillas por fruto; \bar{x} = media aritmética; sd= desviación estándar; cv= coeficiente de variación.
 Elaboración propia.

En la tabla 5 se presenta la comparación de medias entre cruza aplicando la prueba DMS de Fisher a PPF, DPF y NSF. Los mayores PPF se observan en Atlantic x Caesar, Fianna x Caesar y Fianna x Fianna, aun cuando estas fueron iguales estadísticamente (6.1, 5.9 y 5.8 g, respectivamente). Esta misma tendencia se observó también en DPF (valores de 23.50, 22.35 y 22.63 mm, respectivamente) y NSF (157.0, 134.54 y 164.33, en ese mismo orden).

Tabla 5. Comparación de medias de peso promedio del fruto (PPF), diámetro promedio del fruto (DPF), número de semillas por fruto (NSF) en 12 cruza de papa

Cruza	PPF	DPF	NSF
1) Atlantic x Caesar	6.10 a	23.50 a	157.00 ab
2) Caesar x Caesar	2.87 bc	17.67 c	73.33 bcd
3) Caesar x Fianna	3.57 b	18.60 bc	77.33 abcd
4) Fianna x Caesar	5.90 a	22.35 ab	130.54 abc
5) Fianna x Fianna	5.80 a	22.63 ab	164.33 a
6) Mondial x Fianna	0.45 d	10.80 d	9.04 d
7) Mondial x Mondial	1.30 cd	12.80 d	111.04 abcd
8) Mondial x Orquesta	0.97 cd	11.00 d	81.54 abcd
9) Orquesta x Caesar	1.20 cd	11.87 d	105.00 abcd
10) Orquesta x Fianna	1.59 cd	12.20 d	49.00 cd
11) Orquesta x Mondial	0.72 d	10.10 d	85.67 abcd
12) Orquesta x Orquesta	0.62 d	9.90 d	51.67 cd

Medias con la misma letra no son diferentes significativamente DMS (P = 0.05).



Fig. 1. Progenie de uno de los cruzamientos entre Atlantic x Caesar realizada el 27/07/2022. Elaboración propia.

DISCUSIÓN

La efectividad de los cruzamientos a partir de un diseño de apareamiento completo es compleja ya que intervienen factores genéticos, ambientales y de interacción entre ambas, como cultivar, longitud del día y temperatura (Gopal, 1994). Obtener las 49 cruza a partir de siete progenitores (p) de papa ($p^2=7^2$), fue complicado debido a problemas de sincronización en la floración; en teoría habría 21 cruza directas $[P(P-1)/2]$, siete autofecundaciones y 21 cruza recíprocas $[P(P-1)/2]$. En el contexto real sólo se realizaron el 53% de las cruza totales que correspondieron a 26 cruza, pero sólo 12 de éstas produjeron frutos (atlantic x caesar, caesar x fianna, mondial x orquesta, fianna x caesar,

mondial x fianna, orquesta x caesar, orquesta x fianna y orquesta x mundial, y cuatro autofecundaciones) (Tablas 3 y 4). La ausencia de floración en Agatha fue una limitante para tener éxito en todos los cruzamientos; NIVAP (2007) menciona la escasa producción de flores en esta variedad. Por otro lado, Atlantic no produjo polen, esto contradice lo reportado por Pérez *et al.* (2003), quienes mencionaron que esta variedad si produce polen, aunque poco. La abundancia de polen y flores en Caesar, Fianna y Orquesta facilitó el mayor número de polinizaciones, lo que permitió una fecundación exitosa y mayor prendimiento de frutos; también influyó el número de inflorescencias por planta.

Los apareamientos pueden ser difíciles de lograr dada la esterilidad e incompatibilidad entre progenitores (Bonierbale, Amoros, Salas y De Jong, 2020; Hanneman, 1999; Tai, 1976), como es el caso de la variedad Paula que floreció y presentó polen, pero no presentó efectividad en los cruzamientos. La esterilidad masculina se menciona que puede estar controlada por un gen dominante, por genes recesivos o genes de interacción citoplasmática (Grun, y Albertin, 1976; Howard, 1970). Por su parte Gopal (1994) mencionó que la mayor causa de esterilidad es la prematura abscisión de botones florales, así como la duración de la floración de 1 a 10 semanas, ambas presentan una correlación positiva y altamente significativa ($r=0.90$) con amarre de frutos.

El mecanismo de incompatibilidad en papas detiene el crecimiento del tubo polínico en la porción superior del estilo, impidiendo la fertilización de los óvulos; esto lo presentan las variedades tetraploides (Hanneman, 1999). Se obtuvieron cuatro autofecundaciones, a pesar de que el cultivo presenta depresión endogámica (Mendoza y Haynes, 1974; Gopal, 2015). El promedio de frutos por planta de las mejores cruces fue de 5 a 7, estos resultados contrastan con los obtenidos por Upadhyya *et al.* (1985) quienes mencionaron que entre 30 y 40% de los óvulos son fertilizados y producen semilla. El diámetro de fruto varió de 9.77 a 24.26; el número de semillas por fruto concuerda en parte con lo establecido por Anisimov, Simakov, Zhevora y Zebrin (2021) y Aksoy *et al.* (2021), que afirman que los frutos pueden contener de 150 a 300 semillas.

CONCLUSIONES

Utilizar un diseño de apareamiento completo para obtener todas las combinaciones es difícil, en parte por la ausencia y sincronización de la floración, por el grado de incompatibilidad que exista entre los progenitores, por los factores ambientales de intensidad de la luz y la temperatura y por el número de progenitores que se utilicen. Los

mejores progenitores femeninos fueron Orquesta, Mondial y Caesar y el mejor progenitor masculino fue Fianna, que produjeron cruces con mayor número de frutos y diámetro. Estos resultados preliminares sugieren seleccionar progenitores con mayor cantidad de polen viable y una mayor sincronización en floración.

REFERENCIAS

- Almekinders, C. J. M., and Wiersema, S. G. (1991). Flowering and true seed production in potato (*Solanum tuberosum* L.) 1. Effects of inflorescence position, nitrogen treatment and harvest date of berries. *Potato Research* 34:379-388.
- Almekinders, C. J. M. (1991). Flowering and true seed production in potato (*Solanum tuberosum* L.) 2. Effects of stem density and pruning of lateral stems. *Potato Research*. 34:365-377.
- Aksoy, E.; Demirel, U.; Bakhsh, A.; Zia, M.A. B.; Naeem, M.; Saeed, F.; Çalışkan, S. and Çalışkan, M. E. (2021). Recent advances in Potato (*Solanum tuberosum* L.) Breeding. In: Al-Khayri, J.M., Mohan J., S. and Johnsin, D.V. Ed. *Advances in plant breeding strategies: vegetable crops*. Volume 8: Bulbs, Roots and Tubers. (Pp. 409-488). Springer Nature Switzerland AG.
- Anisimov, B.V.; Simakov, E.A.; Zhevora, S.V. and Zebrin, S.N. (2021). Production of first and subsequent field generations/classes of original, elite, and reproduction potato seed: Potato breeding using true (botanic) seeds. In: Zhevora, S.V. and Anisimov, B.V. eds. *Potato seed production*. Pp. 49-60. Springer Nature, Switzerland.
- Bethke, P. C. and Jansky, S.H. (2021). Genetic and Environmental Factors Contributing to Reproductive Success and Failure in Potato. *American Journal of Potato Research*. 98:24-41.
- Bonierbale, M.W.; Amoros, W.R.; Salas, E. and De Jong, W. (2020). Potato breeding, In: Campos, H., Ortiz, O. (eds.). *The potato crop*. (pp. 163-217). Switzerland: Springer.
- Gopal, J. (1994). Flowering behavior, male sterility and berry setting in tetraploid *Solanum tuberosum* germplasm. *Euphytica* 72:133-142.
- Gopal, J.; Kumar, V. and Luthra, S. K. (2008). Top-cross vs. poly-cross as alternative to test-cross for estimating the general combining ability in potato. *Plant Breeding* 127: 441-445.
- Gopal, J. (2015). Challenges and way-forward in selection of superior parents, crosses and clones in potato breeding. *Potato Res*, 58:165-188.
- Golmirzaie, A. M. and Mendoza, H. A. (1985). Identification of parental lines for development of TPS population. *American Potato Journal*, 62: 427- 428.

- Grun, P. and Albertin, M.(1966).The inheritance and expression incompatibility in *Solanum*. *Heredity*, 21:131-138.
- Hanneman Jr., R. E. (1999). The reproductive biology of the potato and its implication for breeding. *Potato Research*, 42: 283- 312.
- Howard, H. W. (1970). *Genetics of the Potato Solanum tuberosum L.*, 125 p. London, Logos Press.
- Mendoza, H.A. and Haynes, F.L. (1974). Genetic basis of heterosis in the autotetraploid potato. *Theoretical and Applied Genetics*. 45:21-25.
- Mendoza, H. A. (1983). Selection of uniform progenies to use TPS in commercial potato production, In: Report 16 of Planning Conference on Present and Future Strategies for Potato Breeding and Improvement. pp:87-97. Lima, Peru, International Potato Center (CIP).
- Molina, J. de D.; Santos, B.M. y Aguilar, B. L. (2004). Guía MIP en el cultivo de la papa. Instituto Nicaragüense de Tecnología Agropecuaria. 7p.
- Montaldo, A. (1994). Cultivo y mejoramiento de la papa. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. San José. Costa Rica. 628 p.
- NIVAP (Nederlands Instituut voor Afzetvebordering van Potaardappelen – Netherlands Potato Consultative Foundation). (2007). Netherlands catalogue of potato varieties. 287 pp.
- Otazu, V. and W. Amoros. (1991). Potato Berry blackening and premature drop due to boron deficiency. *Am. Potato J.* 68:849-856.
- Pérez, L.D.J.; Rivera, P.A.; Sahagún C.J.; González, H.A.; Landeros, F.V.; Serrato, C.R.; Florentino, V. H.; Ortiz, A. M. (2003). *Ciencias Agrícolas Informa*. Facultad de Ciencias Agrícolas de la UAEM. (14): 23-28.
- Plaisted, R. L.; Sanford, L.; Federer, W.T.; Kehr, A.E.(1962). Specific and general combining ability for yield in potatoes. *American Potato Journal*, 39:185-197.
- Tai, G.C.C. (1976). Estimation of general and specific combining abilities in potato. *Canadian Journal of Genetic Cytology*, 18: 463- 470.
- Upadhyya, M. D.; Thakur, K.C. and Kadian, M.S. (1985). Influence of genotype and Environment on true potato seed (TPS) quality parameters CIP. Lima, Peru