

Interacción genotipo-ambiente en el rendimiento de genotipos de papa

Víctor Vásquez Arce¹
Pablo Huerta Fernández^{2§}
Héctor Cabrera Hoyos³
Luis Jiménez Díaz⁴

¹Universidad Nacional de Cajamarca. Jirón Los Fresnos núm. 239, Urb. El Ingenio, Cajamarca, Perú. Tel. 976301328. (vvarce@hotmail.com). ²Universidad Nacional Agraria La Molina. Calle Madrid núm. 116, Depto. 101, Miraflores, Lima, Perú. Tel. 971129290. CP. 18. (apablohuerta@gmail.com). ³Estación Experimental Baños del Inca-INIA. Pasaje libertad 331, Barrio San Sebastián, Cajamarca, Perú. Tel. 974160067. (hach8@hotmail.com). ⁴Universidad Nacional Agraria La Molina. Pasaje Monteagudo núm. 154, Breña, Lima, Perú. Tel. 947019953. CP. 140104. (jdl@lamolina.edu.pe).

§Autor para correspondencia: apablohuerta@gmail.com.

Resumen

Se evaluaron ocho genotipos resultantes de cinco ciclos de selección recurrente de *Solanum tuberosum*, utilizando el diseño bloques completos al azar con tres repeticiones. Hay diferencias altamente significativas en el peso total y tubérculos totales de los diferentes genotipos en seis ambientes. El análisis combinado detectó diferencias significativas para ambientes, genotipos e IGE. Los efectos localidades, genotipos, genotipos x localidad y genotipos x ambiente fueron altamente significativos. Los mejores índices ambientales para peso de tubérculos y tubérculos totales se lograron en las localidades de: Santa Clotilde, La Púcara, Marcobamba y Santa Margarita. El genotipo 399062.115 fue considerado como el genotipo estable, consistente y con alto potencial de rendimiento 46.01 t ha⁻¹. Los genotipos: 396012.266 y 393377.159 con rendimientos de 42.01 t ha⁻¹ y 38.66 t ha⁻¹, respondieron mejor a condiciones desfavorables y consistentes.

Palabras clave: *Solanum tuberosum* L., Andina, producción.

Recibido: enero de 2021
Aceptado: marzo de 2021

Introducción

Un programa de mejoramiento genético de papa (*Solanum tuberosum* L.) se dirigirá al potencial de rendimiento, a la estabilidad y resistencia a *Phytophthora infestans*. El potencial de rendimiento considerado como una variable cuantitativa es un proceso fisiológico muy complejo que está determinado por el genotipo, el ambiente y la interacción genotipo x ambiente (Vásquez 1988; Pérez *et al.*, 2010). La estabilidad se refiere a la capacidad que tiene la planta para expresar su potencial de rendimiento en una amplia gama de ambientes (Vásquez 2013; Tirado *et al.*, 2019) y la resistencia estará dirigida al tipo horizontal (Rubio *et al.*, 2016). Un estudio sobre la interacción genotipo x ambiente (IGE) para rendimiento en papa mostró que todos los genotipos tuvieron una respuesta diferencial a los efectos ambientales (Vásquez *et al.*, 2019; Tirado *et al.*, 2018).

En la Región Cajamarca muchos genotipos (clones) son sembrados en diferentes condiciones ambientales, habiéndose observado efectos muy marcados del ambiente sobre la expresión fenotípica de ellos, por lo que la variabilidad genotípica que se aprecia es debido a la variación genética más el efecto del medio ambiente (IGE), por tanto debe trabajarse para disminuir el efecto de la IGE; a través, del uso de diseños experimentales adecuados y con un buen manejo agronómico oportuno (Vásquez *et al.*, 2019).

Los objetivos de la presente investigación fueron: determinar la existencia o no de la interacción genotipo x ambiente (IGE) y su efecto en el rendimiento de peso de tubérculo y número total de tubérculos y detectar genotipos estables usando el modelo sugerido por Eberhart y Russell (1966).

Materiales y métodos

De los seis ambientes estudiados, tres experimentos se establecieron en la provincia de Cajamarca, dos en la provincia de Chota ambos pertenecientes a la Región de Cajamarca y un experimento en la provincia de Sánchez Carrión (Región La Libertad). Todos instalados bajo condiciones de secano (campaña 2016-2017). Las características de los seis sitios se anotan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Características geográficas, climáticas y edáficas de los cinco ambientes donde se realizó la evaluación de los diez genotipos de papa.

	Localidad	Año	Latitud Longitud	Altitud (m)	Temperatura anual (°C)	Precipitación (mm)	Tipo de suelo
Cajamarca	Santa Clotilde	2016	-7.1443438 -78.322611	2 900	13.5	107	Franco arcilloso
	Santa Margarita	2016	-7.114251 -78.3041	2 950	13.2	110.5	Franco arenoso
Chota	Chucmar	2016	-6.409631 -78.577461	3 200	12.1	106	Franco arcillo arenoso
	Marcobamba	2016	-14.05948 -73.52772	3 036	14.3	95.5	Franco arcilloso
	La Púcara	2016	-15.97993 -71.45988	3 600	10.2	115.6	Franco
Sánchez Carrión	Chugay	2016	-7.7825 -77.8678	3 378	10	132.8	Franco arcillo arenoso

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología-SENAMHI (2017).

Se consideraron ocho genotipos de papa de la Estación Experimental Agropecuaria Baños del Inca-Cajamarca (INIA). Los genotipos representan lo más avanzado de las cruces de *S. andigena* x *S. andigena* y selección recurrente por cinco ciclos (B1C1 a C1B5) y la población resultante fue mejorada buscando resistencia a *P. infestans*, precocidad, adaptación, apariencia de tubérculos en formas más definidas, ojos superficiales y rendimientos de tubérculos comerciales superiores a sus parientes cercanos (Gastelo *et al.*, 2010). Los genotipos evaluados se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Genotipos de papa evaluados en el experimento.

Núm.	Genotipos	Pedigree	Grupo
1	399075.26	(387348.20x389746.2)	B3C1
2	399076.12	(387170.16x389746.2)	B3C1
3	396012.266	(391004.10x393280.58)	B3C2
4	399062.115	(395266.2(B1C4046.2)x(395235.8(B1C4015.8)))	B1C5
5	393377.159	(395285.5x395282.3)	B1C5
6	399058.12	(395274.1x395319.2)	B1C5
7	393077.54	(395285.5x395282.3)	B1C5
8	399062.108	(395266.2(B1C4046.2) x395282.3(B1C406.2.3))	B1C5

Para la evaluación de los ocho genotipos se usó un diseño de bloques completos al azar con tres repeticiones por ambiente. La parcela experimental constó de dos surcos de tres metros de longitud separados a 30 cm entre golpe y a 1 m entre surco. Se colocó una semilla brotada por golpe. A la cosecha se evaluó el peso de tubérculos totales y número de tubérculos totales.

Resultados y discusión

En los análisis de varianza individuales se encontraron diferencias altamente significativas entre genotipos ($p < 0.01$) para rendimiento total y número de tubérculos totales en los seis ambientes (Santa Clotilde, Santa Margarita, Chucmar, Marcobamba, la Púcara y Chugay). La prueba de Bartlett indicó que las varianzas fueron homogéneas y los supuestos de normalidad de los errores se cumplieron (Vásquez, 2014). Los coeficientes de variación oscilaron entre 5.23% a 2.93%, considerándose como buenos para darle precisión a los ensayos (Vásquez, 2013). Hubo significancia estadística ($p \leq 0.01$) para localidades, genotipos e interacción genotipo x ambiente (IGA) (Cuadro 3). La heterogeneidad entre ambientes estuvo relacionada con diferencias en altitud, tipo de suelo, temperaturas y precipitación durante los años de estudio (Cuadro 1).

Las diferencias para genotipos evidenciaron la existencia de variabilidad genética en rendimiento de peso total y número de tubérculos totales. Estos resultados concuerdan con los de Tirado *et al.* (2018) evaluaron papas con pulpa pigmentada en cuatro ambientes obteniendo significancia estadística para ambientes, genotipos e IGE. La IGA demuestra que los genotipos de papa tienen un comportamiento diferente en los diversos ambientes probados. Estos resultados son concordantes con los de Vásquez *et al.* (2019), quienes al evaluar adaptación y rendimiento de seis clones en ocho ambientes encontraron diferencias para genotipos y para la interacción genotipo por medio ambiente. Salomón *et al.* (2015), probó trece progenies de papa en dos ambientes, encontraron significación estadística al 1% de probabilidades para progenies y para la IGA.

La heterogeneidad entre ambientes estuvo relacionada principalmente con diferencias en altitud, tipo de suelo, temperaturas y precipitación durante los años de estudio (Cuadro 1). Se observó que, la relación de los cuadrados medios de genotipos con la de los cuadrados medios de la IGA es 57.22, lo cual indica la mayor importancia de los genotipos sobre la interacción (Cuadro 3). Esto demuestra la existencia de la variabilidad genética, que nos permite la selección de genotipos superiores (Vásquez, 1988).

Cuadro 3. Análisis de varianza combinado (cuadrados medios) para peso total y número de tubérculos totales.

Fuente de variación	Grados de libertad	Cuadrados medios	
		Peso total	Tubérculos totales
Localidad	5	4.2669**	173.7842
Rep/Loc	12	0.2132	1.4347
Genotipos	7	112.0806**	27.3993
Loc x genotipos	35	1.4734**	13.8199
Error	84	0.4168	3.556
Total	143		

$R^2 = 0.9608, 0.8392$; $CV(\%) = 3.47, 12.18$ $\bar{y}_{..} = 37.11, 12.63$.

De acuerdo, al Cuadro 3 el medio ambiente representó 2.38% de la variación del rendimiento total, el genotipo 87.65% y la interacción $G \times E$ de 5.76%. Sobre la base de la contribución relativa de suma de cuadrados, los genotipos tienen una mayor contribución, seguida de la interacción $G \times E$ y por último la contribución de los ambientes. Para el número total de tubérculos el ambiente representa 46.78%, los genotipos, refiere 10.31 y 25.99% de la variación representa a la IGA. Estos resultados difieren con lo mencionado por Tirado *et al.* (2018), Salomón *et al.* (2015) quienes hallaron que la mayor contribución de la IGE fue de 60.82 y 70.13%, la del genotipo de 26.03% y 10.3%.

El Cuadro 4, muestra que el mejor ambiente para la evaluación de los genotipos fue Chugay, Santa Clotilde y la Púcara con promedios de 38.66, 37.16 y 37.1 t ha⁻¹ respectivamente, superando estadísticamente a las cinco localidades restantes, así como al promedio de la región 14 t ha⁻¹ (MINAGRI 2017). No se encontró diferencias estadísticas entre las localidades de Marcobamba, Chucmar y Santa Margarita, cuyos rendimientos oscilaron entre 36.98 t ha⁻¹ hasta 36.24 t ha⁻¹ respectivamente.

Cuadro 4. Prueba de comparación múltiple (Duncan) de las medias para rendimiento (t ha⁻¹) de los genotipos en estudio por localidad sobre el índice ambiental (Ij).

Clave	Localidad	Peso total		Núm. total de tubérculos	
		(t ha ⁻¹)	Índice ambiental (Ij)	Núm. promedio	Índice ambiental (Ij)
6	Chugay	38.66 a	1.57	11.5388 d	-5.65
1	Santa Clotilde	37.16 b	0.01	17.3575 ab	2.8
5	La Púcara	37.1 b	0.01	13.8965 c	-3.31
4	Marcobamba	36.98 bc	-0.12	17.0406 b	2.2
3	Chucmar	36.5 bc	-0.59	14.2927 c	-1.55
2	Santa Margarita	36.24 c	-0.86	18.7654 a	5.5

El modelo de parámetros de estabilidad identificó como los mejores ambientes para rendimiento a la localidad de Chugay, Santa Clotilde y la Pucara, por los valores de sus índices ambientales (Ij) positivos; es decir, superiores a la media general (37.11 t ha⁻¹) y a los ambientes con mal comportamiento (Marcobamba, Chucmar y Santa Margarita), por tener índices ambientales negativos; es decir, menores a la media general. Para el número de tubérculos totales los mejores ambientes fueron Santa Clotilde, Marcobamba y Santa Margarita por tener sus índices ambientales positivos. Estos resultados son superiores a los obtenidos por Gastelo *et al.* (2010) quienes, al evaluar dichos genotipos en cuatro localidades de Puno, obtuvieron rendimientos promedios que oscilaron entre 18 a 28 t ha⁻¹.

Parámetros de estabilidad

Se encontró significación al 1% de probabilidades para genotipos y G x Amb (lineal) para peso de tubérculos y número total de tubérculos (Cuadro 5). No se encontró significación para la desviación conjunta para las dos variables en los ocho genotipos. Las diferencias entre genotipos permiten detectar aquellos con mejor potencial genético. La significancia de la interacción genotipo x medio ambiente (lineal), revela que existe una respuesta diferencial cambiante de los genotipos a través de ambientes para las variables respuesta estudiadas. Esto nos propone que es posible seleccionar genotipos con mejor potencial genético y estabilidad en una serie de ambientes como lo señalan Eberhart y Russell (1966). Cabe mencionar que, en el rendimiento promedio de los 8 genotipos, se observó variación en el potencial productivo. Este resultado considera la importancia de conducir experimentos en tiempo y espacio, para observar la repuesta de las variedades y genotipos en diferentes condiciones de prueba (Becker y León, 1988; Vásquez, 1988; Fikere *et al.*, 2008).

Cuadro 5. Análisis de la varianza (cuadrados medios) para la estabilidad según Eberhart y Russell (1966), de ocho genotipos de papa evaluados en seis localidades para peso y número totales de tubérculos.

Fuente de variación	Cuadrados medios		
	Grados de libertad	Peso de tubérculos	Núm. total de tubérculos
Total	143		
Genotipos	7	53.74**	9806.95**M3
Amb + (G x Amb)	40	0.87	7321.4
Amb (lineal)	1	10.24	292961.236
G x Amb (lineal)	7	10.24**M2	46.825**M2
Desviación conjunta	32	0.6562M1	4948.3324 M1
399075.26	4	1.1453*	3441.8992 ns
399076.12	4	0.2877	1294.6063 ns
396012.266	4	0.2336	15885.5058 ns
399062.115	4	0.1436	886.6341 ns
393377.159	4	1.3125**	9256.964 ns
399058.12	4	1.0756	1706.4922 ns
393077.54	4	0.7024	1348.9553 ns
399062.108	4	0.3746	5749.1537 ns
Error combinado	84	0.4168	3.4815

Interpretación de los parámetros de estabilidad

En la Cuadro 6, se presenta la clasificación de los genotipos de papa evaluados, considerando primeramente los criterios utilizados por Eberhart y Russell (1966), en donde se emplearon el comportamiento promedio del genotipo a través de ambientes, su coeficiente de regresión y la desviación de la regresión.

Cuadro 6. Rendimiento de peso total y número de tubérculos de ocho genotipos de papa, incluyendo los parámetros de estabilidad.

Núm.	Genotipos	Peso total			Número total de tubérculos		
		(t ha ⁻¹) ⁺	bi	S ² _{dj}	Tubérculos totales ⁺	bi	S ² _{dj}
1	399075.26	35.26 e	1.076**	1.001	16.77 b	1.2741	9.7718
2	399076.12	37.34 d	0.065	0.149	11.09 b	0.9165	3.0505
3	396012.266	38.63 c	1.01	0.095	16.77 a	0.6261	38.1428
4	399062.115	46 a	1.103**	0.005	11.45 a	1.0665	0.0892
5	393377.159	42.01 b	1.415	1.174	11.39 b	0.6578	20.7872
6	399058.12	32.3 g	0.617**	0.937	14.23 a b	1.2633	3.7924
7	393077.54	33.8 f	2.194	0.563	12.06 b	0.8699	1.6213
8	399062.108	31.43 h	0.582	0.236	12.89 b	1.2258	11.3696

⁺= medias con la misma letra son estadísticamente iguales (Duncan, 0.05); $\bar{y}_.$ = 37.11 t ha⁻¹; $\bar{y}_.$ = 12.63.

Para identificar y clasificar a los genotipos de papa por su estabilidad, con base en los estimadores de los coeficientes de regresión (bi) y desviaciones de regresión (S²_{di}) para las seis categorías propuestas por Carballo y Márquez (1970), se consideraron los siguientes escenarios con relación a los valores de los coeficientes de regresión bi= 1, bi< 1, bi> 1 y las desviaciones de regresión S²_{di}= 0, S²_{di}> 0, de estas se identificaron tres de los ocho posibles grupos (Cuadro 6), de la forma siguiente: 1) los genotipos 396012.266 (3) y 399062.115 (4) presentaron bi= 1; y S²_{di}= 0; es decir, son considerados como genotipos estables (Eberhart and Russell, 1966; Carballo y Márquez, 1970), cuyos rendimientos superan al rendimiento promedio (37.11 t ha⁻¹); 2) coeficientes de regresión bi< 1 y desviaciones de regresión S²_{di}= 0, el genotipo 399076.12 (2) responde con buena respuesta en ambientes desfavorables consistentes; y 3) el genotipo 393377.159 (5) presenta coeficientes de regresión bi> 1 y desviaciones de regresión S²_{di}> 0, es un genotipo con buena respuesta en ambientes favorables pero inconsistente.

En lo referente al número total de tubérculos (Cuadro 6) se identificaron dos grupos de los ocho genotipos evaluados: 1) los genotipos 399075.26 (1), 399062.115 (4), 399058.12 (6) y 399062.108 (8) presentaron coeficientes de regresión bi> 1 y desviaciones de regresión S²_{di}> 0 son de buena respuesta en ambientes favorables pero inconsistentes; y 2) los genotipos 3990 76.12 (2), 396012.266 (3), 393377.159 (5) y 393077.54 (7) con bi< 1 y la S²_{di}> 0, son aquellos genotipos con buena respuesta en ambientes desfavorables e inconsistentes.

Estos resultados son concordantes con los reportes de Pérez *et al.* (2007); Vásquez *et al.* (2019), quienes encontraron valores que caracterizan a genotipos con respuesta mejor en ambientes buenos, en condiciones desfavorables y consistentes, así como inconsistentes.

Para el número total de tubérculos, según el modelo de Eberhart y Russell (1966), los mejores ambientes para los genotipos en estudio fueron Santa Margarita, Santa Clotilde y Marcobamba, con 5.5, 2.8 y 2.2 tubérculos, por tener valores de los índices ambientales (I_j) positivos.

Conclusiones

Las diferencias altamente significativas que se observaron entre genotipos, entre localidades y en su interacción (IGA) sugieren que hay suficiente variabilidad genética para seleccionar genotipos sobresalientes, que los ambientes de la región Cajamarca son heterogéneos y que la IGA significativa dificulta la identificación de genotipos estables.

Los mejores índices ambientales para peso de tubérculos y número de tubérculos totales fueron en Santa Clotilde, La Púcara, Marcobamba y Santa Margarita, ubicados en Cajamarca y Chota. El modelo de Eberhart y Russell identificó a los genotipos: 399062.115 (4), 393377.159 (5) y 396012.266 (3). con 46.01 t ha^{-1} , 42.01 t ha^{-1} y 38.66 t ha^{-1} superiores al promedio (37.11 t ha^{-1}) y con $b_i = 1$, $s^2_{di} = 0$, considerados como genotipos estables. El genotipo 399062.115 (4) para número total de tubérculos presentó un coeficiente de regresión $b_i = 1$ y una desviación de regresión $s^2_{di} = 0$ considerado como genotipo estable.

Literatura citada

- Becker, H. C. and León, J. 1988. Stability analysis in plan breeding. *Plant Breed. Review.* 101(1):1-23.
- Carballo, C. A. y Márquez, S. 1970. Comparación de variedades de maíz del Bajío y la Mesa Central por su rendimiento y estabilidad. *Agrociencia.* 5(1):129-146.
- Eberhart, S. A. and Russell, W. A. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science.* 6(1):36-40.
- Fikere, M.; Tadesse, T. and Letta, T. 2008. Genotype - environment interactions and stability parameters for grain yield of faba bean (*Vicia faba* L.) genotypes grown in South Eastern Ethiopia. *Int. J. Sustain. Crop Prod.* 3(6):80-87.
- Gastelo, M.; Arcos, J.; Landeo, J. y Bonierbale, M. 2010. Nuevas variedades de papa *Solanum tuberosum* spp. andígena (B1C5), obtenidas a través de la selección participativa por los agricultores de las comunidades del altiplano, Puno-Perú. *In: I Congreso Internacional de Investigación y Desarrollo de papas nativas.* Quito-Ecuador. 137-138 pp.
- Márquez, Y.; Salomon, J. y Acosta, R. 2020. Análisis de la interacción genotipo ambiente en el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum* L.). *Cultivos Tropicales.* 4(1):1-14.
- MINAGRI. 2017. Características de la producción nacional y de la comercialización en Lima metropolitana. *Boletín producción nacional de papa-Perú.* 30 p.
- Pérez, L.; Vásquez, G. y Sahagún, J. 2007. Estabilidad del rendimiento de genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Rev. Fitotec. Mex.* 30(003):279-284.
- Pérez, D.; Gonzáles, A. Huerta, M.; Rivera, A.; Sahagún, J.; Balbuena, A.; Rubí, A. y Gutiérrez, F. 2010. Variabilidad genética, diversidad fenotípica e identificación de genotipos sobresalientes de papa. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 1(4):579-592.
- Rubio, C. O. A.; Cadena, H. M. A. y Flores, L. R. 2016. Comparación de la resistencia horizontal y vertical contra el tizón tardío de la papa en Toluca. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 7(4):755-766.

- Salomón, J.; Castillo, J.; Arzuaga, J. A.; Torres, W.; Caballero, A.; Varela, M. and Betancourt, V. M. H. 2015. Análisis de la interacción progenie-ambiente con minitubérculos a partir de semilla sexual de papa (*Solanum tuberosum* L.) en Cuba. Cultivos Tropicales. 36(2):83-89.
- SENAMHI. 2017. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Registros meteorológicos. Lima, Perú.
- Tirado, C.; Vásquez, V. y Narro, L. A. 2019. Estabilidad de rendimiento y adaptabilidad de híbridos de maíz tolerantes a suelos ácidos en base a las características del análisis GGE biplot. *Act. Avances*. 11(17):50-63.
- Tirado, R.; Tirado, L. y Mendoza, J. 2018. Interacción genotipo ambiente en rendimiento de papa (*Solanum tuberosum* L.) con pulpa pigmentada en Cutervo, Perú. *Chilean J. Agric. Anim. Sci., ex Agro-Ciencia*. 34(3):191-198.
- Vásquez, V. 1988. Mejoramiento genético de la papa. 1^{ra}. (Ed.). Amaru editores. Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica-CONCYTEC. Lima, Perú. 149-153 pp.
- Vásquez, V. 2013. Experimentación agrícola. 1^{ra}. (Ed.). Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica-CONCYTEC. Lima, Perú. 417-436 pp.
- Vásquez, V. 2014. Diseños experimentales con SAS. 1^{ra}. (Ed.). Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica-CONCYTEC, Fondo Nacional para el Desarrollo de la Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica-FONDECYT. Lima, Perú. 206-210 pp.
- Vásquez, V.; Cabrera, H.; Jiménez, D. y Colunche, A. 2019. Estabilidad del rendimiento de genotipos de papa (*Solanum tuberosum* L.). *Ecología Aplicada*. Dpto. Académico de Biología, Universidad Nacional Agraria La Molina. Lima-Perú. 18(1):59-65.