



Selección de cultivares de papa (*Solanum tuberosum* L.) resistentes a sequía y heladas en Bolivia

Julio Gabriel Ortega¹; Jury Magne Calizaya^{2*}; Ada Angulo Fernández³;
Silene Veramendi Torrico⁴

Resumen

Fueron evaluados en campo e invernadero cultivares y clones de papa con el objetivo de seleccionar los mejores cultivares por su resistencia al estrés hídrico por sequía y heladas. Las variables de respuesta evaluadas fueron: severidad, capacidad de recuperación, volumen de raíz, biomasa de raíz, biomasa de follaje, contenido de clorofila, ganancia de biomasa, eficiencia de uso de agua, volumen tubérculo, Número de Tubérculos y peso tubérculo. Sobre la base de las variables evaluadas fueron seleccionados cinco cultivares: Aurora, Victoria, Jaspe, Salomé y Chota Ñawi, con mayor resistencia a estrés hídrico por sequía y nueve cultivares: Jaspe, Aurora, Victoria, Salomé, Yungueña, India, Puyjuni Imilla, Blanca y Chota Ñawi, con mayor recuperación al estrés hídrico por sequía. Hubo una alta correlación negativa significativa de la variable severidad versus biomasa de follaje y contenido de clorofila. Los cultivares 00-216-3 Victoria, P'alta Chola e Isabel fueron identificados como los más resistentes a heladas.

Palabras claves adicionales: Severidad, recuperación, biomasa, clorofila, volumen.

* Autor para correspondencia. E-mail: jurymaca@gmail.com

¹ Julio Gabriel Ortega. Fundación PROINPA, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador.

² Jury Magne Calizaya. Instituto Nacional de Investigación Agrícola y Forestal, Cochabamba, Bolivia.

³ Ada Angulo Fernández. Consultora independiente, La Paz, Bolivia.

⁴ Silene Veramendi Torrico. Consultora Profesional en Biotecnología, Cochabamba, Bolivia.



Selection of potato cultivars (*Solanum tuberosum* L.) resistant to drought and frost in Bolivia

Summary

Potato cultivars were evaluated in the field and greenhouse in order to select the best cultivars for their resistance to water stress due to drought and frost. The response variables evaluated were: severity, recovery capacity, root volume, root biomass, foliage biomass, chlorophyll content, biomass gain, water use efficiency, tuber volume, Number of Tubers and tuber weight. On the basis of the evaluated variables, five cultivars were selected: Aurora, Victoria, Jaspe, Salomé and Chota Ñawi, with greater resistance to water stress due to drought and nine cultivars: Jaspe, Aurora, Victoria, Salomé, Yungueñita, India, Puyjuni Imilla, Blanca and Chota Ñawi, with greater recovery from water stress due to drought. There was a high significant negative correlation of the severity variable versus foliage biomass and chlorophyll content. The cultivars 00-216-3 Victoria, P'alta Chola and Isabel were identified as the most resistant to frost.

Additional keywords: Severity, recovery, biomass, chlorophyll, volume.

Introducción

Desde hace algún tiempo, Bolivia siente los impactos del aumento en frecuencia e intensidad de los eventos climáticos como sequías, inundaciones, deslizamientos, granizadas, heladas, incendios y temperaturas extremas, situación que ha agravado los factores internos de vulnerabilidad existentes en el país (INE, 2008; Gonzáles y Escobar, 2010; CEPAL-BID, 2014).

Solo el fenómeno El Niño de los años 1982-83 –uno de los más fuertes registrado en las últimas cuatro décadas – afectó a siete de nueve departamentos, 38% del total del territorio, un total de 1,6 millones de afectados, causó una pérdida de 2.821 millones de dólares, 250.000 unidades productivas se han visto damnificadas y el impacto sobre el Producto Interno Bruto nacional fue del 7% (PNUD, 2011). En las últimas décadas, los impactos del fenómeno El Niño/La Niña generaron pérdidas por un valor de entre 400 y 500 millones de dólares anuales (Gonzales & Escobar, 2010; PNUD, 2011).

En función de la seguridad alimentaria en Bolivia, el cambio climático puede golpear significativamente si no se cuenta con opciones tecnológicas, financieras y de hábitos de consumo que permitan sustituir cultivos por otros más resistentes, implementar riego deficitario y soportar estos cambios con programas de investigación (PNCC, 2009; PNUD, 2011).

Las investigaciones existentes acerca de cambio climático son embrionarias y requieren mayor apoyo a través de políticas públicas, así como mayor coordinación entre los actores involucrados para avanzar en una agenda de cambio climático y seguridad alimentaria (CEPAL-BID, 2014).

Por otra parte, en Bolivia la papa es un cultivo básico y de seguridad alimentaria para el 30% al 40% del total de los campesinos del país. Es de resaltar que el consumo ha disminuido dramáticamente a 35,96 kg/hab/año en el 2009, frente a la cifra de 1995 que fue de 45,2 k/hab/año (Zeballos *et al.* 2009). La papa es producida en zonas con altitudes que oscilan entre 2.300 y 3.600 msnm. Anualmente se cultivan una superficie aproximada de

113.375 ha, representando la principal fuente de ingresos de 125.000 personas (Thiele *et al.*, 2008), con un valor que alcanza los 150.000 millones de dólares (Torrez y Foronda, 2008).

Sin embargo, los rendimientos de papa en Bolivia son bajos y están entre 5 a 7 t.ha⁻¹. En Europa y Norte América, los rendimientos de papa alcanzan un promedio de entre 17 a 44,6 t.ha⁻¹ (FAO, 2008). Aparte de los factores agronómicos y económicos, la producción de papa en Bolivia está limitada por factores abióticos como heladas, sequías y baja fertilidad de los suelos (Pino y Chen, 2016) y factores bióticos como las plagas y enfermedades (Hooker, 1982).

A los problemas mencionados se debe reconocer que hasta el día de hoy hay un conocimiento insuficiente de los mecanismos de herencia de la resistencia a la sequía y las heladas, a la cual se suman la complejidad de la herencia de la resistencia, las cuales han sido descritas que tienen una baja heredabilidad, un control poligénico, epístasis, una interacción significativa del genotipo y el ambiente y los caracteres cuantitativos y el ambiente (Estrada, 2000; Cattivelli, 2008; Asfaw, 2012). En los ambientes difíciles donde la mayoría de los agricultores de los países en desarrollo cultivan, los mecanismos de resistencia a los factores abióticos son fisiológicamente complejos, debido a que estos interactúan con otros factores ambientales, como la alta temperatura, baja fertilidad de los suelos, acidez de los suelos, salinidad, enfermedades y plagas. Por lo tanto, la expresión de la resistencia es afectada por una alta interacción del genotipo con el ambiente. Como resultado la valiosa resistencia a los factores abióticos puede ser enmascarada por una pobre adaptación a un ambiente específico (Beebe *et al.*, 1998; 2013). Esta complejidad en ambientes adversos y el rango de mecanismos que las

plantas usan para la adaptación hace difícil identificar estrategias y criterios de selección que contribuyan a rendimientos altos y estables bajo condiciones de no estrés y estrés hídrico por ejemplo (Asfaw, 2012).

La resistencia a la sequía de un cultivo hace referencia a su capacidad para crecer satisfactoriamente en zonas con déficit hídrico. Las modificaciones que tienen lugar en la estructura y función de las plantas para aumentar la probabilidad de sobrevivir y reproducirse en un ambiente determinado se llama adaptación (Charco, 2002). Las respuestas adaptativas al estrés pueden clasificarse en: a) control de la homeostasis, que incluye homeostasis iónica y la osmótica, b) el control del daño y la reparación o detoxificación y c) control del crecimiento. Estos mecanismos actúan conjuntamente ya que la señal de homeostasis regula negativamente la respuesta de detoxificación; entonces ambas respuestas inducen la tolerancia al estrés, el cual regula negativamente la inhibición del crecimiento provocada por la aparición de las condiciones ambientales adversas.

El artículo sistematiza investigaciones realizadas en campo e invernadero, con el objetivo de seleccionar los mejores cultivares por su resistencia al estrés hídrico por sequía y heladas.

Materiales y métodos

Resistencia a las heladas en campo

Este experimento fue realizado en la comunidad de Waylla Pujru, provincia Tiraque del departamento de Cochabamba, ubicada a 17° 27' 98" de longitud Sud, 65° 39' 33" de latitud Oeste a una altura de 3601 msnm, con temperatura min de 7 °C, máxima de 20°C y promedio de 13,0 °C.

La ocurrencia de heladas en la zona es irregular e impredecible. Por lo que, para garantizar el éxito del ensayo se simuló el

efecto del daño y la pérdida de follaje por heladas a través del corte follaje de las plantas siguiendo las recomendaciones de Fairlie y Ortega (1995), considerando que el 80% de las pérdidas de rendimiento por heladas es por la pérdida de follaje y el restante por otros efectos (comunicación personal con el Dr. Bruno Condori).

La parcela fue implementada en diseño experimental de bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas en franjas con tres repeticiones (Gabriel *et al.*, 2017a). Cada unidad experimental estuvo constituida por un surco de 1,5 m de largo

por 0,7 m de ancho con cinco plantas. Los tratamientos fueron la combinación de dos factores: Factor A: 22 cultivares (Tabla 1) y Factor B: tres niveles de corte de follaje (B1: 0%, B2: 50% y B3: 100%). Las parcelas principales estuvieron constituidas por los cultivares y las subparcelas por los niveles de corte del follaje. Los testigos fueron los cultivares Huaycha (*Solanum andigena*) y Désirée (*Solanum tuberosum*), Huaycha puede soportar temperaturas de -4°C (Siñani, 2013) y Désirée no soporta temperaturas menores a 5°C.

Tabla 1. Cultivares mejorados de papa tetraploide ($2n = 4x = 48$) y su genealogía.

N°	Cultivar/clon	Genealogía	
		Femenino	Masculino
1	00-207-6a	sto	Desirée
2	00-210-9	Huaycha	Bol 3147
3	00-216-3	Bol 3372	Bol 3738
4	00-218-24	Bol 3147	Polonia
5	00-218-7	Bol 3147	Polonia
6	00-219-19	Bol 3147	Bol 3738
7	00-219-5	Bol 3147	Bol 3738
8	00-330-14	Huaycha	Bulk adg
9	Aurora	India (I-1039)	Huaycha
10	Blanca	sto	Desirée
11	Chota ñawi	380073.2	[(sto x pls)]
12	Isabel	82-222-2	Jaspe
13	Jaspe	(sto x pls)	(tbr x phu)
14	P'alta Chola	India (I-1039)	Robusta
15	Puyjuni Imilla	India (I-1039)	Huaycha
16	RunaToralapa	tbr (I-1058)	adg (700764)
17	Salomé	[tbr x (stoxpls)]	(phu + gon)
18	Tempranera	Perla (tbr)	Désirée
19	Victoria	86-40-3	Puquina (720049)
20	Yungueñita	O.P.Yungay	
21	Huaycha	adg	
22	Désirée	tbr	

sto: *Solanum stoloniferum*; pls: *S. palustre*; tbr: *S. tuberosum*, adg: *S. andigena*, phu: *S. phureja*, gon: *S. goniocalyx* (Fuente: Gabriel *et al.* 2011)

Se realizó un aporque y deshierbe a los 45 días después de la siembra cuando las plantas tenían una altura de 0,25 a 0,30 m.

Los cortes se realizaron al inicio de la tuberización (75 días después de la siembra) (Fairlie y Ortega, 1995). La cosecha se

realizó cuando las plantas llegaron a su madurez fisiológica y los tubérculos fijaron la piel. Las variables de respuesta evaluadas fueron: número de tubérculos (NT) y rendimiento (Y en t.ha⁻¹).

Resistencia a estrés hídrico por sequía en campo

Este experimento fue realizado en la comunidad de Caña Cota, municipio de Tiraque en Cochabamba, ubicada a 17° 20' 10" latitud sur y 65° 52' 15" longitud oeste a 3309 msnm, con temperatura mínima de 7°C, máxima de 20°C y promedio de 13,5 °C.

Los tubérculos fueron sembrados en cuatro surcos de 3 m de largo, a una distancia entre surcos de 0,7 m y 0,30 m entre plantas. La superficie total de la parcela fue de 600 m². La parcela experimental fue implementada en un diseño experimental de bloque completamente aleatorios al azar en arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones (Gabriel *et al.*, 2017a). Se considero dos factores: Factor A: 1, 2, 3, ... 22 cultivares de papa (Tabla 1) y Factor B: niveles de sequía (B1: Con sequía, B2: Sin sequía).

El tratamiento de estrés hídrico por sequía se realizó al inicio de la emergencia hasta los 60 días. Luego se cubrió parte de la parcela con plástico hasta la cosecha, después del cual se evaluó la severidad al estrés hídrico por sequía (S) utilizando la escala sugerida por Gabriel *et al.* (2017b); así como el rendimiento (Y en t.ha⁻¹).

Resistencia a estrés hídrico por sequía en invernadero

Para este experimento, fueron sembrados en macetas de 1 kg de capacidad, 22 cultivares de papa (Tabla 1) en diseño de bloques completamente aleatorios con tres repeticiones (Gabriel *et al.*, 2017a). Se aplicaron dos tratamientos de sequía (T1: 10 días sin riego y T2: 20 días sin riego) junto a un testigo (riego normal) y se

evaluaron *parámetros fisiológicos* como severidad de daño por sequía (S), capacidad de recuperación (R) (Gabriel *et al.*, 2017b) y contenido de clorofila (CC) (SPAD 502 y cromatografía) (González, 2009); *morfológicos* como volumen de raíz (VR), biomasa de raíz (BR) y biomasa de follaje (BF) y ganancia de biomasa (GB); *mecanismos integrados de resistencia* como la eficiencia del uso de agua (WUE) y los *componentes de rendimiento* como el número de tubérculos (NT), el volumen de tubérculos (VT) y el peso de tubérculos (PT).

Análisis estadístico

Los datos de cada una de las variables de respuesta en cada experimento que satisficieron o aproximaron a los supuestos de distribución normal y homogeneidad de varianzas, se analizaron de acuerdo con el modelo estadístico planteado (Gabriel *et al.*, 2017a).

Sobre la base del modelo aplicado se realizaron análisis de varianza para probar hipótesis acerca de los efectos fijos y comparaciones de medias mediante la comparación múltiple de Tukey al Pr<0,05 de probabilidad, para probar contrastes de un grado de libertad a fin de determinar los cultivares más resistentes. El análisis de varianza también sirvió para estimar los componentes de varianza para los efectos aleatorios. Los análisis indicados fueron realizados utilizando el Proc Mixed de SAS (SAS, 2004).

Resultados y discusión

Resistencia a heladas en campo

El análisis de varianza para rendimiento y número de tubérculos (Tabla 2), mostró diferencias altamente significativas (Pr<0,01) entre cultivares para número de tubérculos y rendimiento (Tabla 2). Por otra

parte, solo hubo diferencias significativas (Pr<0,05) entre niveles de corte e interacción cultivar*corte (Pr<0,05) para rendimiento, pero no así para número de tubérculos (Pr=0,084 y Pr=0,634).

Tabla 2. Análisis e varianza para número de tubérculos y rendimiento para genotipos evaluados en dos niveles de corte de follaje.

FV	gl	Cuadrados medios	
		NT	Y (t/ha)
Bloque	2	0,99	0,32
Cultivar	21	1,91**	0,76**
Corte	2	1,57	4,19**
Bloque*Cultivar	35	0,35	0,20
Bloque*Corte	4	0,32	0,18
Cultivar*Corte	42	0,08	0,10*
C.V.		11,87	15,38
R ²		0,73	0,69

*,**: Diferencias significativas y altamente significativas a Pr<0,01 de probabilidad. NT: Número de tubérculos, Y: Rendimiento.

Los clones 00-219-19 y 00-218-7 fueron menor Y con los niveles de corte 50% y superiores en NT (Figura 1). Se obtuvo 100% que el testigo (0% de corte).

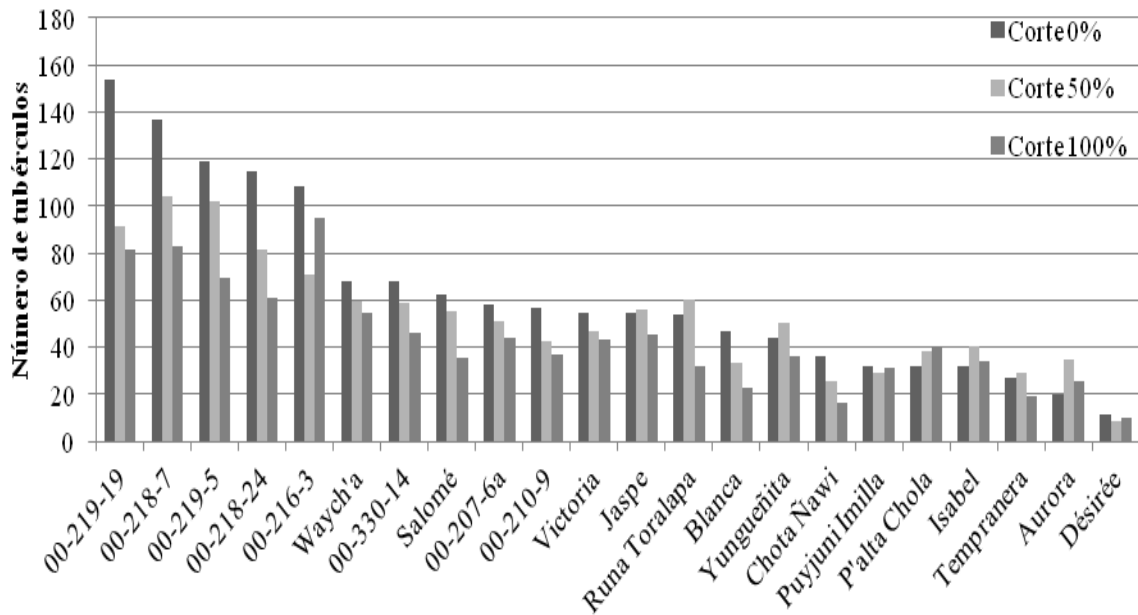


Figura 1. Número de tubérculos para genotipos de papa sometidas a tres cortes de follaje.

La disminución en Y fue estadísticamente la misma bajo ambos cortes (Figura 2). Esto significa que el Y se vio afectado con el corte de follaje.

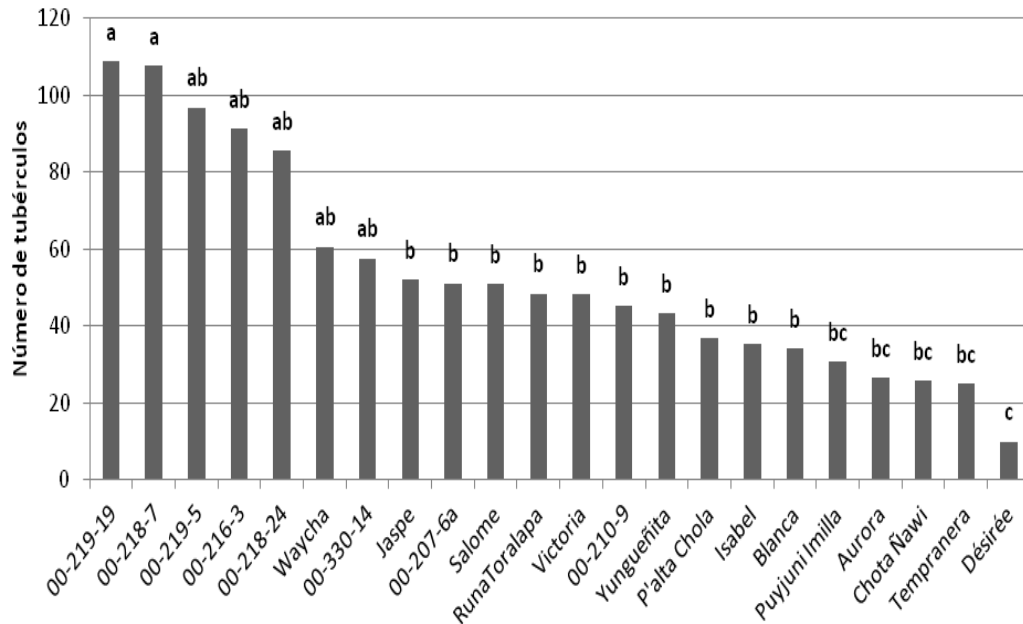


Figura 2. Promedio para número de tubérculos en genotipos sometidos a tres niveles de corte de follaje. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

Para la interacción cultivar*corte se hizo una comparación de los Y de cada uno de los genotipos bajo los tres niveles de corte (Figura 3) y aquellos que no mostraron una reducción significativa del Y con respecto al testigo se consideraron como los más resistentes, aspecto que fue observado por Faurlie y Ortega (1995).

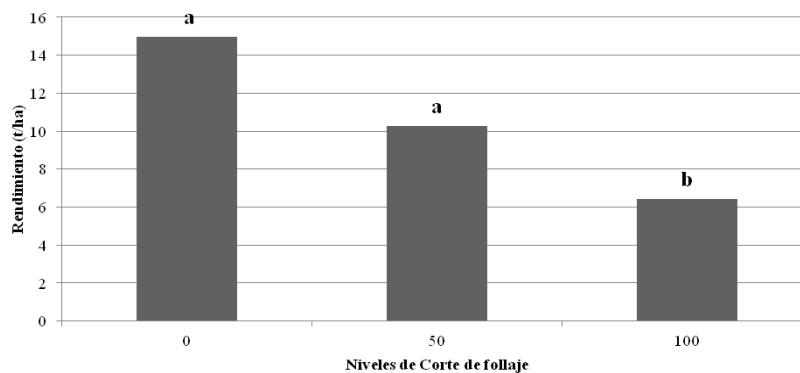


Figura 3. Rendimiento ($t \cdot ha^{-1}$) bajo tres niveles de corte de follaje en genotipos de papa evaluados. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

El clon 00-216-3 y los cultivares Victoria, P'alta Chola, Isabel, Chota Nawi y Désirée mostraron el mismo Y bajo los tres niveles de corte (Figura 4). Sin embargo, los dos últimos obtuvieron Y bajos para condiciones normales (0% de corte); por tanto, no podrían ser consideradas como tolerantes sino como de baja performance en general. Por otra parte, 00-216-3, Victoria, P'alta Chola e Isabel mostraron Y moderados bajo condiciones normales. Entre los cultivares de alto rendimiento en condiciones normales, Huaycha, 00-219-5 y Yungueñita fueron los materiales que

presentaron la mayor tolerancia a la pérdida de follaje. Sus rendimientos en condiciones normales fueron estadísticamente iguales a los de 50% de corte de follaje. Sin embargo, los rendimientos al 100% de corte de follaje fueron inferiores. Esto significa que los cultivares de alto Y son las más afectadas bajo pérdida de follaje, esto se evidencia en el caso de los clones 00-218-7, 00-330-14 y 00-219-19 que fueron las de mayor Y en condiciones normales. Para los niveles de corte sometidos, estos tres clones mostraron reducciones de sus rendimientos bajo condiciones normales.

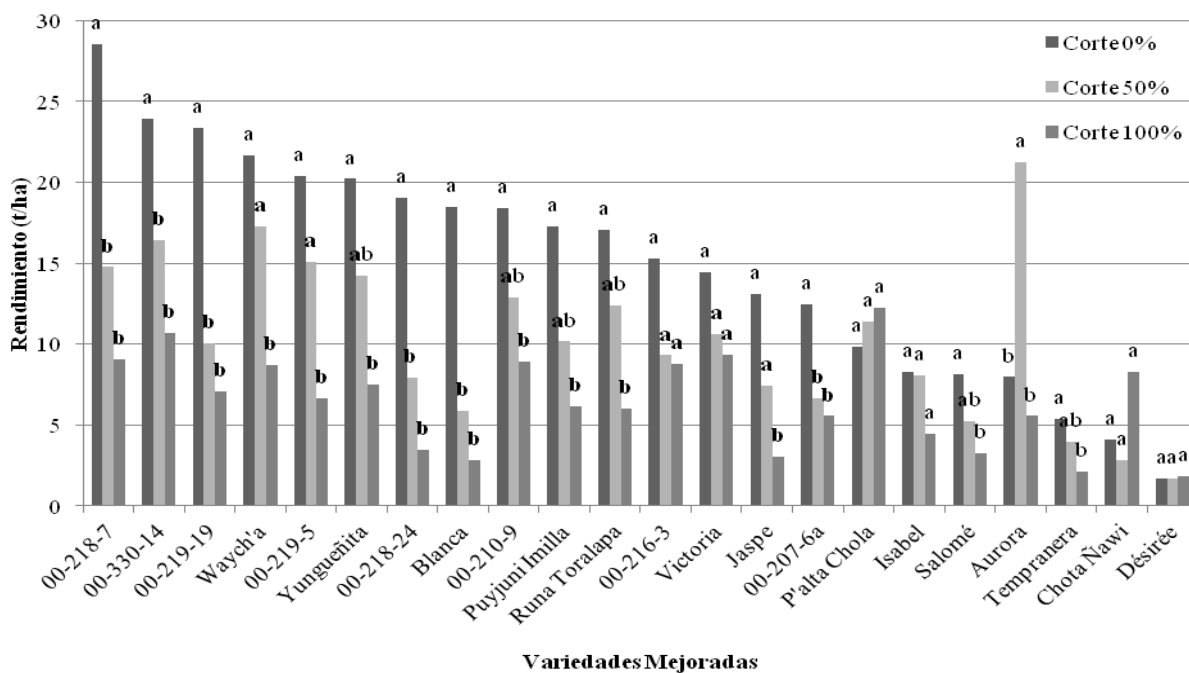


Figura 4. Rendimiento ($t \cdot ha^{-1}$) para genotipos de papa sometidas a tres niveles de corte de follaje. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

Se debe comprender que, además de las pérdidas en rendimientos y del daño foliar, las heladas inducen la formación de cristales de hielo a temperaturas de congelación. Se pueden formar cristales de hielo dentro del protoplasma causando el

rompimiento y muerte celular, o también en los espacios extracelulares produciendo severa deshidratación celular (Palta y Li, 1980; Toivio-Kinnican *et al.*, 1981; Steponkus, 1984).

Resistencia a estrés hídrico por sequía en campo

El efecto de bloques y bloques*riego son mayores a cero, demostrando que el diseño experimental de parcelas divididas en bloques completos al azar fue eficiente en controlar la variación existente entre unidades experimentales.

El análisis de varianza para Y (Tabla 3), mostró diferencias significativas ($Pr < 0,05$)

para estrés hídrico por sequía, sugiriendo que el Y fue diferente en al menos uno de los tratamientos; así mismo, el efecto de cultivares también mostró diferencias altamente significativas ($Pr < 0,01$), indicando que el Y fue diferente en al menos uno de los cultivares. Por tanto, existen genotipos con buena resistencia al estrés hídrico por sequía.

Tabla 3. Análisis de varianza para rendimiento de genotipos de papa sometidos a estrés hídrico por sequía.

FV	gl	Y (t.ha ⁻¹)
Bloque	2	2,83
Bloque*estrés hídrico	2	1,90
Estrés hídrico	1	1,21*
Cultivar	21	0,95**
Estrés hídrico*cultivar	21	0,11
R ²		0,64
C.V.		21,97

*,** Significativo y altamente significativo al $Pr < 0,05$ y $Pr < 0,001$ de probabilidad respectivamente, Y: rendimiento.

La comparación del rendimiento entre los dos tratamientos de estrés hídrico (Figura 5), mostró diferencia altamente significativa ($Pr < 0,01$) entre el tratamiento con estrés y el tratamiento sin estrés, donde este último

presenta los valores más altos de Y, sugiriendo que el estrés hídrico por sequía fue lo suficientemente intenso para identificar los cultivares resistentes a estrés hídrico por sequía.

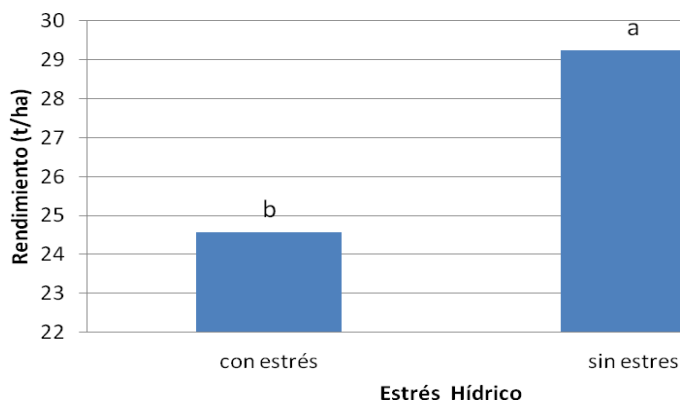


Figura 5. Comparación de medias de rendimiento sometidos a estrés hídrico por sequía. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

La comparación de medias de Y (Figura 6), mostró que los genotipos como Isabel, Yungueñita, India, 00-219-19, 00-218-7, 00-330-14, Runa Toralapa y 00-219-5

fueron superiores a los demás, por lo que estos serían altamente resistentes al estrés hídrico por sequía en la zona de Caña Cota.

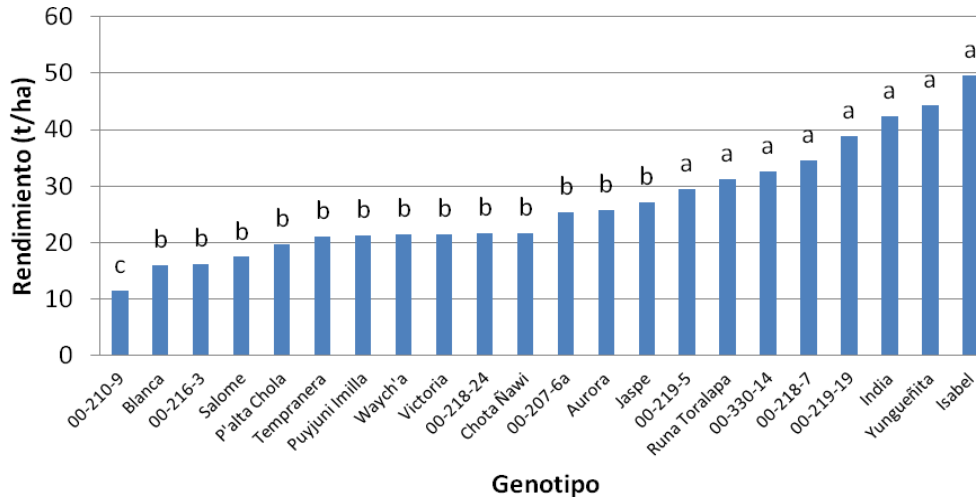


Figura 6. Comparación de medias de rendimiento en genotipos de papa sometidos a estrés hídrico por sequía. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

Resistencia a sequía en invernadero

El análisis de varianza de S, R, VT, NT y PT (Tabla 4), mostró que el efecto del estrés hídrico por sequías y genotipo fueron significativos al $Pr < 0,01$ de probabilidad, indicando que las variables S, R, VT, NT y PT presentaron un valor diferente con un nivel de estrés hídrico por sequía y al

menos un cultivar. Así mismo, la interacción sequía * cultivar fue significativo, sugiriendo que el efecto de los niveles de sequía sobre las diferentes variables de respuesta fue diferente en al menos un genotipo, por lo que sería posible encontrar genotipos con una alta resistencia a sequía.

Tabla 4. Análisis de varianza para severidad, recuperación, volumen de tubérculos, número de tubérculos y peso de tubérculos, de genotipos sometidos a dos niveles de estrés hídrico por sequía.

FV	gl	Cuadrados medios				
		S	R	VT	NT	PT
Bloque	2	2,77	1,51	5,959	0,07	7,593
Sequia	2	770,58**	77,10**	20,32**	1,80**	11,21**
Cultivar	20	4,35**	0,28**	8,21**	1,89**	2,95**
sequia*cultivar	39	1,62**	0,19**	2,57**	0,58*	1,37**

*,**: Significativo al 90%, 99% respectivamente, S: Severidad, R: Recuperación, VT: Volumen de tubérculos, NT: No. Tubérculos, PT: Peso de tubérculos.

La comparación de medias de S (Figura 7), muestra diferencias significativas entre los

dos niveles de sequías, donde el estrés hídrico por sequía por 20 días registro mayor severidad.

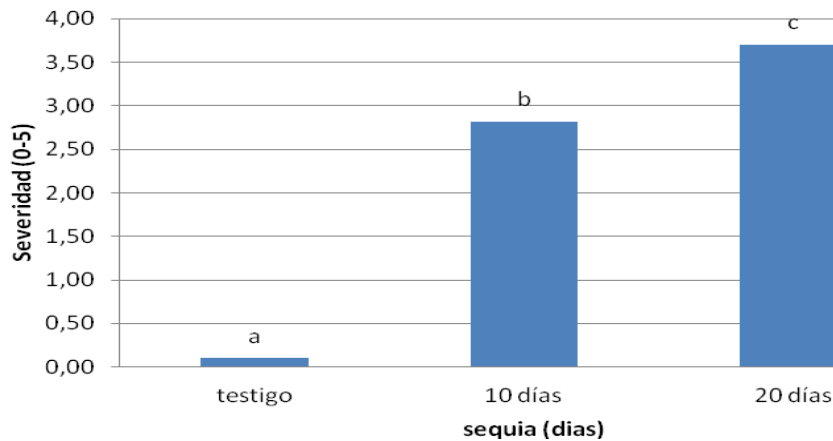


Figura 7. Comparación de medias de severidad en dos niveles de sequía. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

La comparación de medias de S entre genotipos (Figura 8), mostró una amplia variación frente al estrés hídrico por sequía, donde los cultivares con menor S

(marchitez) fueron Aurora, Victoria, Jaspe, Salomé y Chota Ñawi, sugiriendo que estos genotipos presentarían una alta resistencia al estrés hídrico por sequía.

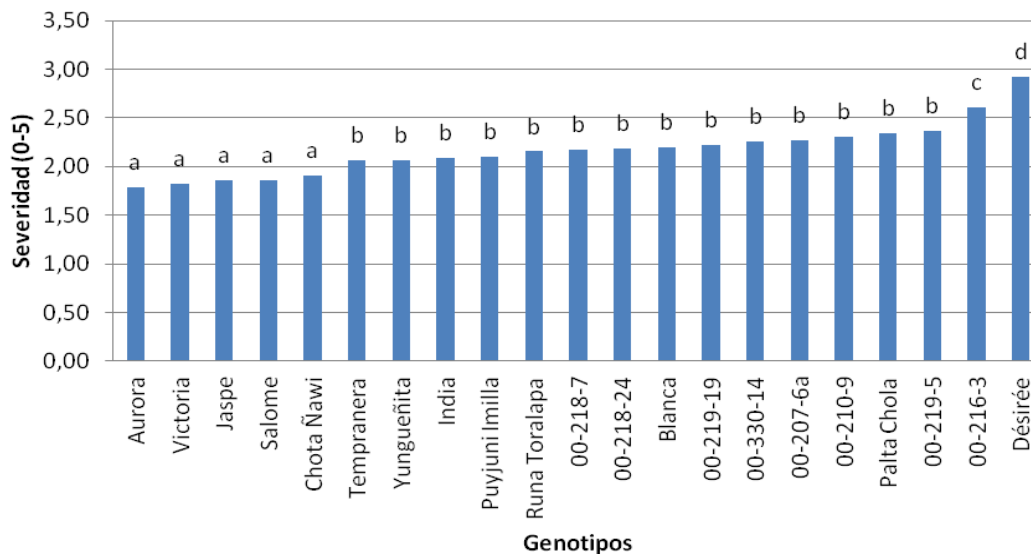


Figura 8. Comparación de medias de severidad de genotipos de papa. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

El análisis de medias (Figura 9), mostró una alta interacción entre los factores sequía * cultivar, donde Jaspe, Aurora, Victoria, Salomé, Yungueñita, India, Puyjuni Imilla, Blanca y Chota Ñawi presentaron los valores de S más bajos a los 20 días de

estrés hídrico. En cambio, Chota Ñawi, Salome, Victoria y Aurora presentaron valores de S más bajos a los 10 días de sequía, sugiriendo que el estrés corto de 10 días no es suficiente para identificar genotipos resistentes.

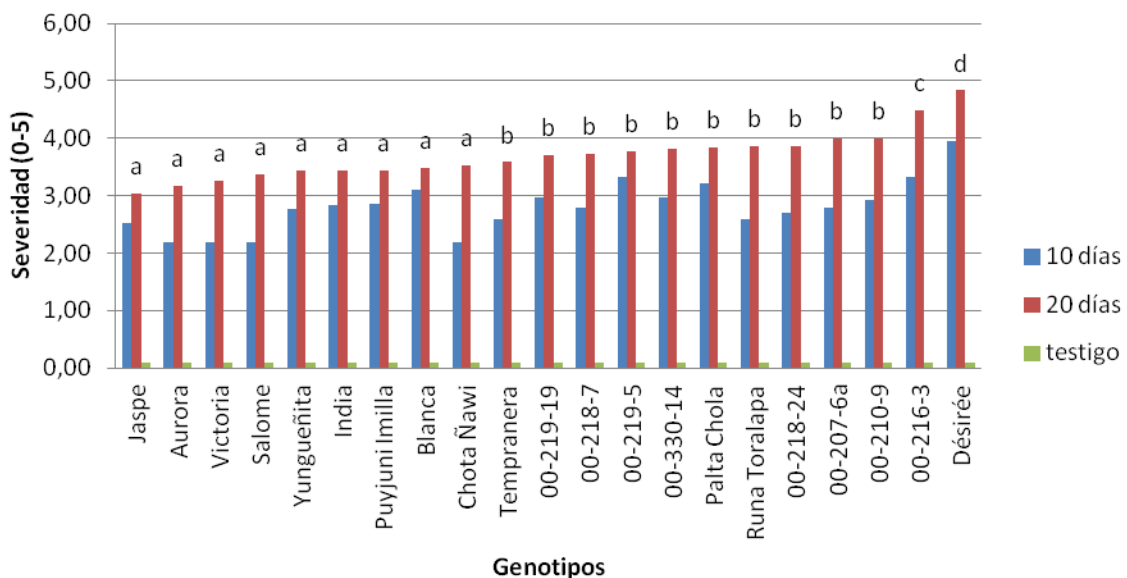


Figura 9. Efecto de los niveles de sequía sobre la severidad en genotipos papa. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

La comparación de media de R entre los tratamientos de estrés hídrico por sequía (Figura 10), mostró diferencias significativas entre los dos niveles de estrés, donde el estrés de sequía por 20 días

registro un mayor grado de R, sugiriendo que los genotipos de papa presentaron una mayor recuperación (grado de turgencia) cuando las plantas sufrieron una deficiencia de agua de 20 días.

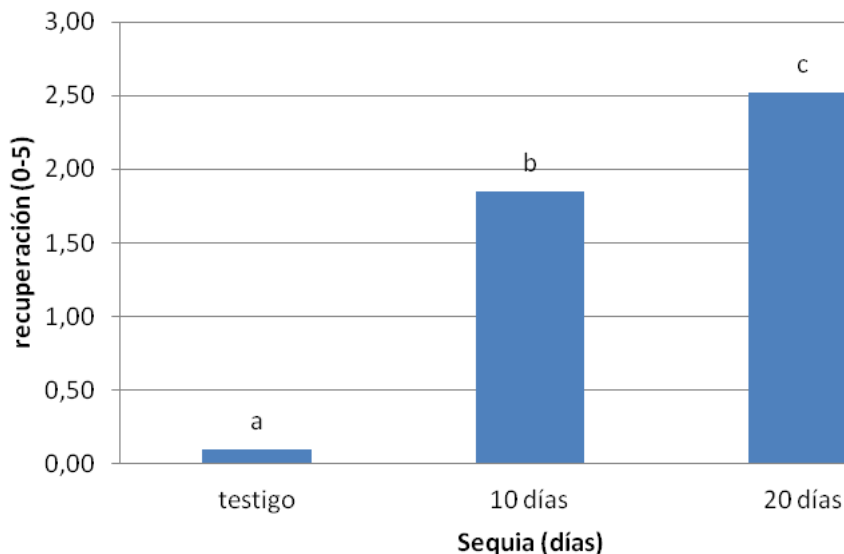


Figura10. Comparación de medias de recuperación a tres niveles de estrés hídrico por sequía. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

La comparación de medias de R de los genotipos (Figura 11), mostró una limitada diversidad de respuestas fenotípicas frente al estrés hídrico por sequía, donde los genotipos con mayor grado de recuperación fueron Victoria, 00-218-24, Aurora, 00-207-6a, India, Palta Chola, Yungueñita, Jaspe, Chota Ñawi, Puyjuni Imilla, Blanca, Tempranera y 00-210-9 sugiriendo que estos genotipos presentarían una alto grado de R respecto al estrés hídrico, por lo que,

pueden considerados para zonas agrícolas o épocas con mínima disponibilidad de agua. Por otra parte, se observó una interacción importante entre los dos factores, donde Victoria, Yungueñita, Aurora, 00-207-6a, India, Jaspe, Puyjuni Imilla, P'alta Chola, Blanca y Tempranera presentaron los valores más bajos de R a los 20 días de estrés hídrico por sequía. En cambio, 00-219-19, 00-218-24, Chota Ñawi, 00-218-7 y Salomé presentaron los valores más bajos de R a los 10 días del estrés hídrico por sequía.

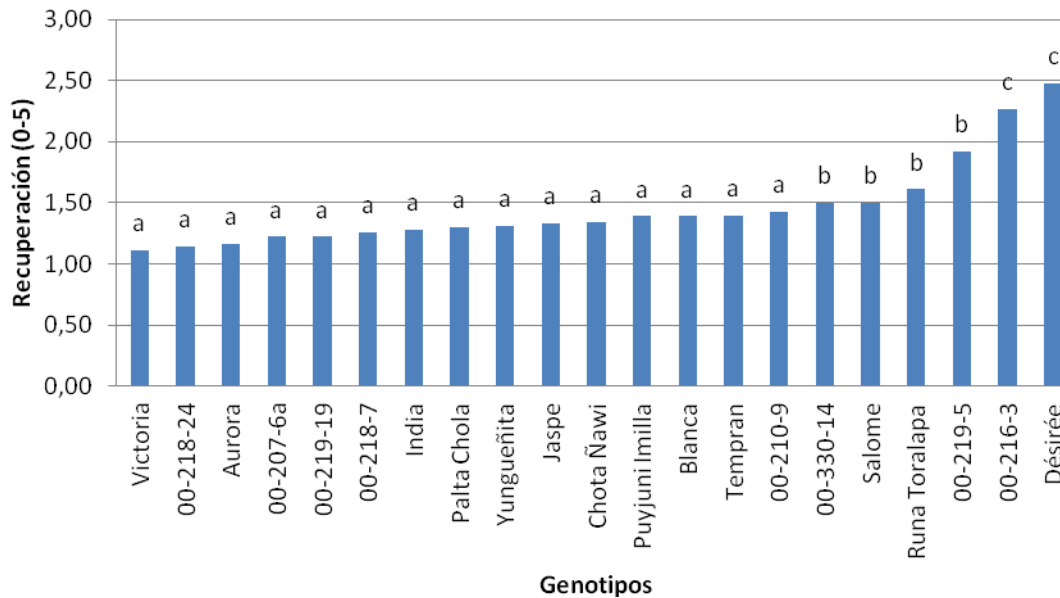


Figura 11. Comparación de medias de recuperación a estrés hídrico por sequía en genotipos de papa. Medias con de las mismas letras no son significativamente diferentes al nivel de $Pr < 0,05$ de probabilidad.

El análisis de correlación de S y R respectos a nueve variables (Tabla 5), mostró que las variables BF, CC, R, VR, BR y GB están altamente relacionadas con S. En cambio, las variables S y CC están relacionadas con

R, sugiriendo que cualquiera de estas variables puede utilizarse para seleccionar genotipos resistentes al estrés hídrico por sequía.

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson papa severidad y recuperación para genotipos de papa sometidas a dos niveles de sequía.

	S	R	VR	BR	BF	CC	GB	WUE	VT	NT	PT
S	1	-0,35	-0,31	-0,38	-0,66	-0,53	0,37	0,25	-0,29	-0,19	-0,23
R	-0,35	1	-0,18	-0,20	-0,14	-0,38	-0,09	-0,08	0,19	0,14	0,18

S=Severidad, R=Recuperación, VR=Volúmen de raíz, BR=Biomasa de raíz (g), BF=Biomasa de follaje (g), CC=Contenido de clorofila, (%), GB=Ganancia de biomasa (g), WUE=Eficiencia del uso de agua, VT=Volumen tubérculo (cc), NT=Numero de Tuberculos, PT=Peso tubérculo (g). Números en negrilla mostraron alta significancia al $Pr < 0,01$ de probabilidad.

Las variables contenido de CC con SPAD 502 y BF estuvieron negativa y altamente asociadas con la S. Las variables grado de R y VR estuvieron negativa y

moderadamente asociadas con la S. Por otra parte, las variables GB y WUE expresaron una correlación positiva y moderada con la S. Esto quiere decir que los genotipos más

resistentes (con menor severidad) expresaron mayor grado de R, mayor BF, mayor VR y mayor CC que los susceptibles. Los genotipos más susceptibles obtuvieron mayor GB y mayor WUE. Esto parece contradictorio, sin embargo, podría deducirse que los cultivares más resistentes casi no incrementaron biomasa durante el periodo de estrés, más bien utilizaron el agua en mantener la turgencia. En cambio, los cultivares susceptibles emplearon el agua en incrementar la biomasa y por este motivo perdieron turgencia al final del periodo de sequía.

Fue notorio observar que los genotipos más resistentes a los 20 días fueron aquellas con mayor grado de R, mayor BF, BR y mayor CC. Para el tratamiento de 10 días, la variable grado de R no mostró asociación significativa con ninguna de las variables a excepción del grado de S. Se observaron diferencias en la medición de clorofila mediante el SPAD 502 y la permeabilidad cuticular (cromatografía) (Zhang *et al.*, 2007), así por ejemplo con el último método se observó un incremento de la clorofila en el tiempo particularmente en cultivares susceptibles al estrés hídrico por sequía, lo cual fue reportado por Gabriel *et al.* (2013a).

En cambio, con el SPAD 502, hubo una correlación negativa alta y significativa de la S con el CC.

La sequía de 20 días causó mayor severidad que la sequía de 10 días en todas las variables estudiadas. La S está relacionada con las variables BF, CC, R, VR, BR y GB; la variable R está relacionada con las variables de S y CC. Los cultivares de papa más resistentes fueron Aurora y Victoria y la más susceptible fue el cultivar Désirée, que mostraron el mismo comportamiento en laboratorio (Gabriel *et al.* 2013a).

Es importante mencionar, que hay una complejidad importante en la resistencia al

estrés hídrico por sequía, al respecto Anithakumari *et al.* (2012), identificó 47 loci de rasgos cuantitativos (QTL), de los cuales 28 fueron específicos de sequía, 17 para recuperación y dos en condiciones de buen riego. Para nuestro conocimiento, este es el primer estudio QTL completo sobre el déficit hídrico y el potencial de recuperación de la papa; de hecho, están involucrados muchos genes de efectos aditivos (herencia poligénica de baja heredabilidad), tal como lo menciona Asfaw (2011).

Conflictos de intereses

El presente artículo no presenta conflictos de interés con la Fundación PROINPA.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Fundación PROINPA y al proyecto Fontagro - CLIPAPA (FTG/RF-1025-RG), por el financiamiento del presente trabajo de investigación.

Referencias citadas

[Anithakumari](#), A.M.; [Nataraja](#), K.N.; [Visser](#), R.G.F.; [van der Linden](#), C.G. (2012). Genetic dissection of drought tolerance and recovery potential by quantitative trait locus mapping of a diploid potato population. *Molecular Breeding* 30: 1413–1429. <https://doi.org/10.1007/s11032-012-9728-5>

Asfaw, A. 2012. Breeding for drought tolerance by integrative design: The case of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Ethiopia. Thesis Wageningen University, Wageningen, NL. 185 pages. Recuperado de <https://research.wur.nl/en/publications/bree>

ding-for-drought-tolerance-by-integrative-design-the-case-of-

Beebe, S.; Rao, I.M.; Blair, M.W.; Acosta-Gallegos, J.A. (2010). Phenotyping common beans for adaptation to drought. *Front Physiol.* 2013; 4: 35. doi: [10.3389/fphys.2013.00035](https://doi.org/10.3389/fphys.2013.00035)

Beebe, S.; Rao, I.M.; Cajiao, C.; Granales, M. (2008). Selection for drought resistance in common bean also improves yield in phosphorus limited and favorable environment. *Crop Sci* 48: 582-592. <https://doi.org/10.2135/cropsci2007.07.0404>

Cattivelli, L. 2008. Plant adaptation to abiotic stress conditions: An integrated view from breeding to genomics. Page 135-137. In: Carmen M Avila, Sergio G Atienza, José I Cubero, Maria T Moreno (eds); Actas de Horticultura. IV Congreso de mejora genética de plantas, 14 - 16 Octubre, 2008, Córdoba, España.

CEPAL-BID (2014). La economía del cambio climático en el Estado Plurinacional de Bolivia 2014. BID-CEPAL, La Paz, Bolivia. 92 P. Recuperado de <https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/La-econom%C3%ADa-del-cambio-clim%C3%A1tico-en-el-Estado-Plurinacional-de-Bolivia.pdf>

Charco J. (2002). Una introducción al estudio de la velocidad de regeneración natural del bosque mediterráneo y de los factores antropozoógenos que la condicionan. In: J. Charco García (ed.). La regeneración natural del bosque mediterráneo en la península Ibérica. ARBA & Ministerio de Medio Ambiente. Ciudad Real, España. p. 115-152. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=694608>

Estrada, N. (2000). La biodiversidad en el mejoramiento genético de la papa.

Fundación PROINPA, CID, CIP, Cochabamba, Bolivia. 372 p. Recuperado de https://books.google.com.ec/books?id=AcB7VJolocC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

FAO (2008). El Mundo de la papa; tesoro enterrado. Año internacional de la papa. Recuperado de <http://www.fao.org/potato-2008/es/lapapa/index.html>

Frary A, Göl D, Keleş D, Ökmen B, Pınar H, Ö Şığva HÖ, et al. Salt tolerance in *Solanum pennellii*: antioxidant response and related QTL. *BMC Plant Biol.* 2010; 10:58-74.

Gabriel Julio, Veramendi Silene, Angulo Ada, Magne Jury (2013). Respuesta de variedades mejoradas de papa (*Solanum tuberosum* L.) al estrés hídrico por sequía. *J Selva Andina Biosph.* 2013; 1(1): 33-44. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/pdf/jsab/v1n1/v1n1_a04.pdf

Gabriel, J.; Veramendi, S.; España, P. (2013b). Validación de marcadores moleculares para resistencia a sequía en trigo harinero (*Triticum aestivum* L.) bajo condiciones de invernadero. *J Selva Andina Res Soc.* 2013; 4(1):2-17. <https://doi.org/10.36610/j.jsars.2013.040100002>

Gabriel, J.; Ortuño, N.; Vera, M.; Castro, C.; Narváez, W.; Manobanda, M. (2017b) Manual para evaluación de daños de enfermedades en cultivos agrícolas. Grupo COMPAS, Universidad Estatal del Sur de Manabí, Jipijapa, Ecuador. 53 p. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/317356316_Manual_para_evaluacion_de_danos_de_enfermedades_en_cultivos_agricolas

Gabriel, J; Castro, C; Valverde, A; Indacochea, B. (2017a). Diseños

- experimentales: Teoría y práctica para experimentos agropecuarios. Grupo COMPAS, Universidad Estatal del Sur de Manabí (UNESUM), Jipijapa, Ecuador. 146 p. Recuperado de <http://142.93.18.15:8080/jspui/handle/123456789/116>
- Gonzáles, A. (2009). Aplicación del medidor portátil de clorofila en programas de mejora de trigo y cebada. *Agroecología* 4:111-116. Recuperado de <https://revistas.um.es/agroecologia/article/view/117241>
- Gonzáles, I.; J. Escobar. (2010). Estimaciones de los impactos de los eventos extremos, tendencia histórica, cambios en la frecuencia e intensidad y estimación de posible evolución futura en Sudamérica, Documento Interno CEPAL, Santiago de Chile.
- Hooker, W.J. (1982). Compendio de enfermedades de la papa. Trad. del Inglés por Teresa Ames de Icochea. Centro Internacional de la Papa, Lima, Perú. 165 p.
- Instituto Nacional de Estadística de Bolivia (INE). 2008. Bolivia: Eventos adversos de origen natural reportados, según tipo de evento, 2002–2008. <http://www.ine.gov.bo/indice/visualizador.aspx?ah=PC80601.HTM>.
- Palta, J. P., and Li, P. H. (1979). Frost-hardiness in relation to leaf anatomy and natural distribution of several *Solanum* species. *Crop Science*, 19(5), 665-671. <https://doi.org/10.2135/cropsci1979.0011183X001900050031x>
- Pino, M.T.; Chen, T. (2016). Efectos de las heladas en el cultivo de papa, y desafíos del mejoramiento genético. Páginas 130-340 in María Teresa Pino (ed.), estrés hídrico y térmico en papas, avances y protocolos. Boletín INIA 331, Santiago, Chile. Recuperado de https://agroavances.com/img/publicacion_documento/Estres%20Hidrico%20y%20Termico%20en%20Papas%20-%20Avances%20y%20Protocolos.pdf
- PNUD. (2011). Tras las huellas del cambio climático en Bolivia Estado del arte del conocimiento sobre adaptación al cambio climático Agua y seguridad alimentaria. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD. La Paz, Bolivia. 122 p. Recuperado de <https://www.preventionweb.net/publication/view/20803>
- Programa Nacional de Cambio Climático - PNCC (2009). Segunda Comunicación Nacional del Estado Plurinacional de Bolivia ante la Convención Marco de las Naciones Unidas frente al cambio climático. La Paz, Bolivia. 217 p. recuperado de http://euroclimaplus.org/intranet/_documentos/repositorio/02Comunicacion%20Bolivia%20ONU%20Cambio%20Climatico_2009.pdf
- SAS. Institute Inc. (2004). User's guide. Statistics. Version 9.2. SAS Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
- Sies H. (1991). Oxidative Stress: From Basic Research to Clinical Application. *Amer. J. Med.* 1991; 91, 31-38. [https://doi.org/10.1016/0002-9343\(91\)90281-2](https://doi.org/10.1016/0002-9343(91)90281-2)
- Siñani, T. (2013). Efectos de bioinsumos en la respuesta agronómica de variedades nativas de papa (*Solanum* sp.) para mitigar el efecto de las heladas en el Altiplano Norte. Tesis de grado Ing. Agronómica. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. 72 p. Recuperado de <https://repositorio.umsa.bo/bitstream/handle/123456789/4213/T-1901.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Steponkus, P. L. (1984). Role of the plasma membrane in freezing injury and cold acclimation. *Annual Review of Plant*

- Physiology, 35(1), 543-584. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp35.060184.002551>
- Thiele, G.; G. Hareau; V. Suarez; E. Chujoy; M. Bonierbale; L. Maldonado. 2008 Varietal change in potatoes in developing countries and the contribution of the International Potato Center: 1972-2007. International Potato Center (CIP), Lima, Peru. Working Paper 2008-6. 46 p. Recuperado de <http://cipotato.org/wp-content/uploads/2014/08/004721.pdf>
- Torrez, W.; Foronda, H. (2008). Producción de semilla de papa dentro del sistema nacional de certificación de semilla. Revista de Agricultura, Bolivia 43 (60): 3- 9.
- Toivio-Kinnucan, M. A., Chen, H. H., Li, P. H., and Stushnoff, C. (1981). Plasma membrane alterations in callus tissues of tuberbearing *Solanum* species during cold acclimation. *Plant Physiology*, 67(3), 478-483. <https://doi.org/10.1104/pp.67.3.478>
- Zeballos, H.; Balderrama, F.; Condori, B.; Blajos, J. (2009). Economía de la papa en Bolivia (1998-2007). Fundación PROINPA, Cochabamba, Bolivia. 129 p. recuperado de https://www.researchgate.net/publication/288834373_La_Economia_de_la_Papa_en_Bolivia
- Zhang, L., Xing, D., Wang, J. & Li, L. (2007). Rapid and noninvasive detection of plants senescence using a delayed fluorescence technique. *Photochem. Photobiol. Sci.* 6: 635 - 641. <https://doi.org/10.1039/b617893f>