

Evaluación de la eficiencia de uso de agua en quince genotipos de papa (*Solanum tuberosum L.*) bajo condiciones de sequía controlada.

Lozano-Isla, Flavio^{*}; Farfan, Evelyn; Gutiérrez, Raymundo; Blas, Raúl¹

Resumen

La papa (*Solanum tuberosum L.*) es un cultivo sensible a la sequía debido a que posee un sistema radicular poco profundo y requiere disponibilidad constante de agua en el suelo para asegurar su máximo rendimiento y calidad en el tubérculo. La eficiencia de uso de agua (EUA) se define como la producción por unidad de agua consumida, esta variable es considerada importante para determinar el rendimiento bajo condiciones limitadas de agua. Si logramos entender la relación entre EUA y el rendimiento bajo condiciones de estrés puede ayudarnos a encontrar estrategias que nos ayuden a minimizar la perdida de rendimiento debido a la disponibilidad de agua y asegurar una alta producción. Se llevó acabo un experimento en invernadero con condiciones controladas, para caracterizar la respuesta y entender la relación entre la EUA, el rendimiento y la tolerancia en 15 genotipos de papa de la población avanzada de mejoramiento del Centro Internacional de la Papa (CIP). El experimento fue llevado acabo bajo el diseño experimental de parcelas divididas teniendo como factor principal dos tipos de riego, sequía regulada y riego normal y como factor secundario los quince genotipos. A través del experimento se evaluaron variables morfológicas y fisiológicas tales como contenido relativo de clorofila (SPAD), área foliar (AF), transpiración y parámetros de rendimiento tales como el peso de la biomasa, índice de cosecha (IC) e índice de tolerancia a la reducción de agua (TRA). Los resultados de la investigación muestran diferencias significativas entre tratamientos, las plantas sometidas a limitaciones de agua muestran un rendimiento menor, existiendo una reducción en la biomasa y el área foliar. Existe una correlación alta entre la EUA y el IC ($r = 0.98$), indicando que este último puede ser una herramienta útil para la selección prematura de genotipos con buen rendimiento y tolerante al estrés por sequía. Los genotipos CIP398190.89, CIP397077.16, CIP392797.22, CIP398208.620 mostraron una mayor eficiencia en el uso de agua bajo condiciones de sequía sin que esto produzca una reducción drástica en su rendimiento.

Palabras Claves

Papa — Eficiencia de uso de agua — Índice de cosecha — Tolerancia a la sequía

¹ Departamento de Fitotécnia, Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú

*Correspondencia: F.lozano@outlook.com

Introducción

La papa es el tercer cultivo más importante después del trigo y el arroz a nivel mundial. Sin embargo, poco se conoce de la importancia que tiene este tubérculo para la salud y la alimentación humana. El consumo de 100 g de papas al día, puede cubrir el requerimiento de hasta el 50 % de las necesidades de vitamina C para el ser humano (INIA, 2014). Además, es la base de la alimentación de la zona andina y es producido por 600 mil pequeñas unidades agrarias. La siembra promedio es de 274,411 hectáreas en 19 regiones del Perú. Puede desarrollarse desde el nivel del mar hasta los 4,200 m.s.n.m.; pero mayormente prospera en climas semitemplados. El rendimiento promedio nacional es de 13.3 t/ha. En costa el promedio alcanza a 25 t/ha. Esto también depende de la variedad de papa, niveles de fertilización y condiciones de riego. El Perú es el país con mayor diversidad

de papas cultivadas en el mundo, al contar con 8 especies nativas domesticadas y 2600 de las más de 4000 variedades que existen en Latinoamérica. Además, nuestro país posee 91 de las 200 especies que crecen en forma silvestre en casi todo nuestro continente (MINAG, 2014).

La falta de agua o déficit hídrico se representa como la tensión o estrés que actuaría sobre las plantas, y toda tensión produce dos tipos de respuesta en los organismos: respuestas que tienden a evitar o prevenir la tensión (mecanismos evitadores) y mecanismos o adaptaciones que permiten soportar o resistir el estrés (mecanismos de tolerancia). Mientras todas las estrategias de tolerancia conllevan una limitación mayor o menor del crecimiento, solo la estrategia de ahorro de agua conlleva un crecimiento limitado en el caso de la evitación del estrés. Las especies que derrochan agua son en general más productivas y tienen mecanismos que les

permiten una eficaz extracción del agua del sustrato y una elevada conductividad hidráulica interna para abastecer con rapidez toda la parte aérea de la planta. Esto les confiere una gran competitividad, pero no es siempre una estrategia viable en medios secos, particularmente cuando la carencia de agua es crónica. En estas condiciones predominan las especies tolerantes del estrés hídrico (Valladares et al., 2004).

Para rendimientos altos, el requerimiento de agua del cultivo para plantaciones de 120 a 150 días es de 500 a 700 mm dependiendo del clima. La relación entre la máxima evapotranspiración (ETm) y la evapotranspiración de referencia (ETo) es dada por el coeficiente del cultivo (Kc). Durante su etapa inicial el Kc del cultivo de papa es 0.4 - 0.5 (20 a 30 días), en la etapa de desarrollo es 0.7 - 0.8 (30 a 40 días) en la media estación de 1.05 a 1.2 (30 a 60 días), en la etapa tardía de 0.85 - 0.95 (20 a 35 días) y en la madurez 0.7 - 0.75. En condiciones de secano se ha observado que una precipitación de 600 a 800 mm distribuidos regularmente durante el periodo vegetativo del cultivo de la papa es adecuada para obtener un buen rendimiento (Barrantes, 1993). El cultivo de papa es particularmente sensible a la sequía (Yuan et al., 2003) en consecuencia requiere un adecuado riego para mantener el rendimiento y la calidad de los tubérculos (Porter et al., 1999; Fabeiro et al., 2001). Para optimizar el rendimiento total del agua disponible en el suelo no debe ser agotado por más de 30 a 50 %. El agotamiento de la cantidad total de agua disponible en el suelo durante el período de crecimiento de más del 50 % da como resultados rendimientos más bajos. El déficit de agua durante el período de estolonización e iniciación del tubérculo y la formación de rendimiento tienen el mayor efecto adverso en el rendimiento, mientras que la maduración y la etapa vegetativa temprana son períodos menos sensibles. Un buen rendimiento del cultivo de papa de 120 días en climas templados y subtropical es de 25 a 35 t/ha de tubérculos frescos y en climas tropicales los rendimientos son de 15 a 25 t/ha. La eficiencia de utilización del agua para la producción cosechada de tubérculos que contienen de 70 a 75 por ciento de humedad es de 4 a 7 kg/m³ (FAO, 2014).

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar distintos parámetros fisiológicos y morfológicos para relacionarlo con la eficiencia de uso de agua y el rendimiento del cultivo y seleccionar los genotipos de papa que presenten tolerancia al estrés hídrico por sequía con rendimientos aceptables. Para evaluar la eficiencia de uso de agua en los 15 genotipos de estudio, se utilizó la metodología del lisímetro, que permite calcular la transpiración o consumo de agua neta de las plantas. Durante el desarrollo del experimento se realizaron evaluaciones morfológicas y fisiológicas para observar los mecanismos que utilizan las plantas de papa para tolerar el estrés por sequía. Los datos extraídos se correlacionaron con los rendimientos para determinar cuáles de las variables presentan mayor respuesta a la sequía.

1. Materiales y Métodos

1.1 Material biológico

Se utilizaron quince (15) genotipos de papa provenientes de poblaciones de mejoramiento del Centro Internacional de la Papa. Los cuales fueron evaluados y seleccionados por sus buenas características agronómicas y bromatológicas. Dentro del grupo de genotipos empleados se usaron 2 variedades de papa (UNICA y Achirana) que fueron evaluados bajo condiciones de sequía en experimentos anteriores por lo que se tiene conocimiento de su tolerancia al estrés por sequía. Los genotipos presentan distintas características en su precocidad y madurez fisiológica (Tabla 1).

1.2 Localización y condiciones ambientales

El presente trabajo de investigación se desarrolló en el invernadero del Centro Internacional de la papa. El experimento se llevó acabo en la estación de invierno (Mayo a Agosto de 2013). Las temperaturas promedio máxima y mínima del invernadero fueron de 24 y 15 °C respectivamente. La humedad relativa promedio fue de 80 %. No hubo uso de luz artificial.

1.3 Establecimiento de experimento

La desinfección de los materiales usados en la siembra, se realizó con 30 g de hipoclorito de calcio en 120 litros de agua. Se sumergieron los materiales para su desinfección (macetas, tutores de bambú y mallas plásticas). Luego se procedió a enjugar y ponerlos a secar para su uso posterior. Se utilizó una mezcla de sustrato SOGEMIX SM-2 (75 % Musgo de turba, perlita, vermiculita, y la piedra caliza) mezclada con tierra de chacra proveniente de la estación experimental de Huancayo. La desinfección del sustrato se realizó con vapor de agua (100 °C) por 8 horas y luego se dejó a la intemperie para su enfriado, luego de 48 horas se procedió a realizar un muestreo del sustrato para su análisis. Cada maceta fue tarada y se colocó 2 Kg de sustrato con una malla plástica en la base para evitar la pérdida de sustrato. La fertilización se fraccionó en dos, a la siembra y a los 40 días después de la siembra (DDS) en una dosis 170 - 60 - 270 de nitrato de amonio, superfosfato triple y sulfato de potasio respectivamente (CIP, 2014). Los tubérculos fueron propagados en la estación experimental de Huancayo. Los tubérculos aun no brotados, fueron sometidos aun un tratamiento químico con RINDITE en una dosis de 200 ml en una cámara de 1 m³ bien sellada por 72 horas, para romper la dormancia y luego se ponen los tubérculos en cámara caliente para favorecer el brotamiento de las yemas. Una vez que las semillas (tubérculo) estuvieron bien brotados se llevaron a cámara de luz difusa para suberificar las yemas y proceder a sembrarlas.

1.4 Tratamiento de riego

Las plantas se regaron interdiariamente hasta el inicio del tratamiento. A los 30 DDS las macetas se saturaron con agua y se dejaron drenar durante la noche para eliminar el exceso de agua, las macetas fueron selladas con bolsas de polietileno

Table 1. Información agronómica de los 15 genotipos de papa evaluados

Genotipos	Adaptabilidad	Tolerante a Calor	Precocidad	Rendimiento (kg/planta)	Materia Seca (%)
CIP392797.22	Tierras bajas y Trópicos altos		Medio	0.96	21
CIP397077.16	Tierras bajas tropicales		Medio	0.81	20
CIP398098.119	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.65	26
CIP398180.612			Medio		
CIP398190.89	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.7	21
CIP398192.213	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.71	22
CIP398192.592	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.61	21
CIP398201.510	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	1.16	20
CIP398203.244	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.97	20
CIP398203.5	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.84	13
CIP398208.219	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.98	22
CIP398208.33	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.81	21
CIP398208.620	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	1.01	21
CIP398208.704	Trópico de mediana elevación	Tolerante	Medio	0.75	24
CIP720088			Temprano		19

para evitar la pérdida de agua por evaporación de la superficie del suelo, se realizó el peso interdiario de las macetas hasta los 45 DDS para calcular los parámetros iniciales para la aplicación de los tratamientos (Fig. 2). El tratamiento de sequía regulada se inició a los 45 DDS, con la metodología de lisímetro. Se pesaron las macetas cada 2 días por las tardes (entre 13:00 y 15:00 horas) según la metodología descrita en Bhatnagar-Mathur et al. (2007). Con el fin de exponer a una sequía progresiva a las plantas en sequía controlada, se les redujo 150 ml de agua en cada riego, y las plantas con tratamiento de riego normal se le proveía de agua de acuerdo a su demanda de transpiración, el cálculo se realizó en base a la diferencia de pesos. La disminución del agua en el sustrato se puede graficar en base a los cálculos de la fracción transpirable del suelo (Fig. 1). Siendo el peso inicial de la maceta después de saturación la base para reponer el agua (capacidad de campo).

1.5 Variables evaluadas

Componentes del rendimiento Se separó la planta en cuatro componentes (raíz, tallo, hojas y tubérculos) a la cosecha se procedió a pesar la biomasa fresca (g), luego se puso a la estufa a 80 °C por 3 días, y se realizó los pesos secos (g) por cada componente.

- Biomasa seca (g)** Se determinó como la suma de los cuatro componentes: raíz, tallo, hojas y tubérculos.
- índice de cosecha** Se calculó en base al peso seco de los componentes. Es la relación del peso seco del tubérculo

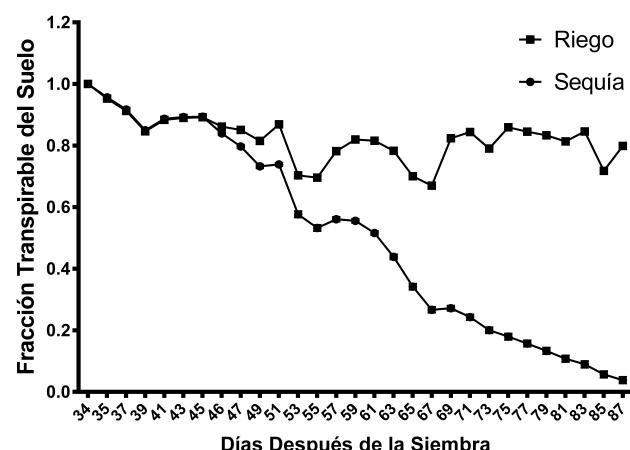


Figure 1. Fracción transpirable del suelo durante el tratamiento de sequía controlada

en relación al peso de la biomasa

Potencial osmótico Para esta medición se seleccionó un folíolo de la tercera hoja extendida desde el ápice de la planta y luego utilizando un sacabocado de 5 mm de diámetro, se extrajeron dos discos de dicho folíolo. Estos se colocaron en viales criogénicos (NALGENE) de 1.0 ml, e inmediatamente se guardaron en nitrógeno líquido. Se realizaron las lecturas del potencial osmótico utilizando un microvoltímetro HR-33T (Wescor Inc., Logan, UT, USA) y cámaras



Figure 2. Sellado de macetas para evitar pérdidas de agua por evaporación

psicrométricas C52 (Wescor Inc., Logan, UT, USA). Las muestras permanecieron durante 30 minutos en las cámaras psicrométricas hasta alcanzar el equilibrio del punto de rocío; y en ese instante se procedió a la lectura del dato.

Transpiración Total Transpiración de las plantas se calculó bajo la metodología del lisímetro y se determina como la diferencia de pesos de las macetas, más el agua añadida en la evaluación anterior. La diferencia entre el peso inicial y final de la maceta permite estimar la transpiración total de agua del suelo disponible en cada maceta. Esta información es utilizada para determinar la fracción transpirable del suelo y calcular la cantidad de agua a reponerse en cada maceta. El cálculo de la fracción transpirable del suelo (FTS) fue calculada usando la siguiente formula:

$$FTS = \left(\frac{1 - PIM - PDM}{PIM - PFM} \right)$$

Donde:

- FTS: Fracción Transpirable del Suelo
- PIM (g): Peso Inicial de la Maceta
- PDM (g): Peso Diario de la Maceta
- PFM (g): Peso Final de la Maceta

Área foliar El área foliar representa la superficie total de la hoja en cm^2 . Se realizó a los 90 DDS, al término del experimento, la evaluación de realizó en cada unidad experimental. Las hojas cosechadas se colocaron sobre una superficie y se tomó una foto perpendicular a la superficie captando todas las hojas, luego se procedió a su análisis en el Software SisCop v1.0 (Embrapa Instrumentacao Agropecuaria, 2003)

Eficiencia de uso de agua El uso eficiente de agua está definido como proporción de biomasa acumulada, expresada como dióxido de carbono asimilado por el cultivo por cantidad de agua consumida, expresada como transpiración, evapotranspiración o total de agua ingresada al sistema (Sinclair et al., 1984). Para el caso de este estudio se utilizará la eficiencia de uso de agua en tubérculos (EUA_{tuberculos}) y biomasa total (EUA_{biomasa}).

$$EUA = \left(\frac{PS_{biomasa}}{TT} \right)$$

Donde:

- PS_{biomasa} (g): Peso Seco de Tubérculo y/o biomasa total
- TT (ml): Transpiración Total

Contenido relativo de clorofila Es el contenido relativo de pigmentos fotosintéticos medido con un equipo de desarrollo analítico de suelos y plantas (soil plant analytical development, SPAD). El análisis de las clorofilas da a conocer el estado de desarrollo de la planta y permite la determinación del estado fisiológico de la planta, con lo cual se puede detectar posibles estreses (Ferri et al., 2004). Para realizar esta medición, se usó el clorofilómetro (Konica Minolta Sensing, Inc., Osaka, Japan). Se seleccionaron tres foliolos un impar y los dos pares cercanos a este, de la tercera hoja extendida desde la parte apical de la planta. En los cuales se realizó tres lecturas o muestreos, por cada folíolo y se promediaron dichas lecturas por cada unidad experimental. Las unidades de medición son característica del equipo, las cuales figuran como unidades SPAD (por sus siglas en inglés: Soil Plant Analyzer Device) las cuales representan o equivalen al contenido relativo de clorofila en la hoja de la planta.

Índice de tolerancia a la reducción de agua El índice de sequía, Tolerancia a la Reducción de Agua (TRA), es usado para caracterizar la respuesta de cada genotipo sometido a condiciones de sequía. Es calculado como el peso seco tubérculo en condiciones de sequía en relación al peso seco del tubérculo en condiciones de riego (Deblonde & Ledent, 2001). El índice de tolerancia a la reducción de agua depende no solo del rendimiento bajo sequía y riego, sino también de la intensidad del estrés. Este valor depende altamente de las condiciones ambientales. Valores menores a la unidad son considerados tolerantes a la sequía, ya que la reducción en condiciones de sequía es más pequeña que el rendimiento promedio de todo los genotipos evaluados Cabello et al. (2013). El TRA se calcula mediante la expresión:

$$TRA = \frac{1 - \left(\frac{Y_s}{Y_p} \right)}{1 - \left(\frac{Y_{ms}}{Y_{mp}} \right)}$$

Donde:

- TRA : Tolerancia a la reducción del agua.
- Y_s : Rendimiento bajo sequía.

- Y_p : Rendimiento bajo condiciones de riego.
- Y_{ms} : Rendimiento promedio de los genotipos bajo sequía.
- Y_{mp} : Rendimiento promedio de los genotipos bajo condiciones de riego.

1.6 Diseño y análisis estadístico

El diseño experimental utilizado fue de Parcelas Divididas, lo cual es adecuado para la características de la evaluación (Montgomery, 1999). La unidad experimental fue de una planta y/o maceta. Los factores por analizar fueron dos: los genotipos de papa y los tipos de riego. El factor genotipos constó de 13 clones avanzado y 2 variedades comerciales de papa (UNICA y Achirana). El factor de tipo de riego tuvo dos tratamientos: riego normal y sequía controlada. Las unidades experimentales fueron cinco por tratamiento las que fueron distribuidas al azar. Los datos fueron procesados y analizados en el software Estadístico R v.3.0.3 (The R Foundation for Statistical Computing). Los datos previos a su análisis fueron sometidos a detección de “valores atípicos” usando el paquete “car”, para los análisis de variancia (ANVA) y correlación de Pearson en el paquete “Agricolae”. El análisis de componentes principales con “FactoMineR”. Los Análisis de regresión lineal y figuras se realizó con el software estadístico GraphPad Prism 6 (GraphPad Software, Inc.).

2. Resultados

2.1 Clones con tolerancia al estrés por sequía en base al rendimiento

Los resultados muestran que no existe interacción entre los tratamientos con los genotipos. Pero si existe diferencias significativas entre los tratamientos, siendo el tratamiento de riego controlado el que presentó mayor rendimiento (40.61 g/planta) con respecto a las plantas en sequía regulada (23.87 g/planta) (Fig. 4). Los genotipos que presentaron mayor rendimiento fueron CIP398208.620 con 53.15 g; CIP398098.119 con 50.18 g y el CIP398208.219 con 43.83 g. Mientras que los genotipos contrastantes fueron CIP720088 con 19.35 gr; CIP398201.510 con 18.68 g y el CIP398203.244 con 8.59 g (Fig 3).

2.2 Contenido Relativo de Clorofila

El contenido relativo de clorofila a los 29 DDS son similares en entre los tratamientos entre plantas bien regadas y plantas sometidas a estrés, esto hace referencia a que las plantas aun no son sometidas al tratamiento de estrés y no muestran diferencias entre las mediciones del contenido relativo de clorofila (Fig. 5). Más si existe diferencia entre los genotipos debido que el verdor de las hojas esté asociado a características propias de cada genotipo (Thomas & Smart, 1993). A los 83 DDS (38 DDT), se puede notar una disminución general del contenido relativo de clorofila en los 15 genotipos (Fig. 5) posiblemente debido a la senescencia de la planta producto de la translocación de nutrientes. También

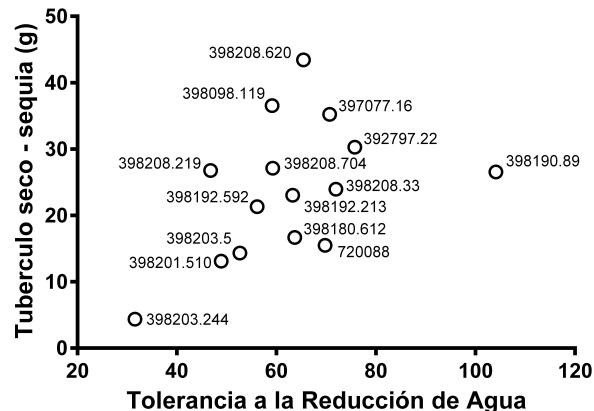


Figure 3. Selección de clones en base al peso seco de tubérculos e índice de tolerancia al estrés

existe diferencia significativa entre la interacción genotipo por tratamiento ($P < 0.05$). Siendo el tratamiento de sequía regulada el que mantiene valores más altos (44.09 SPAD) que las plantas bajo riego (39.71 SPAD).

2.3 Transpiración total y área foliar

La transpiración total presenta una interacción genotipo con tratamiento ($p = 0.018$) lo que indica que existe influencia del efecto de la sequía regulada sobre las plantas en donde las plantas que presentaron mayor transpiración fueron las plantas bien regadas. Los clones con mayor transpiración bajo condiciones de riego fueron los genotipos CIP398098.119 con 10.43 l ; CIP398208.219 con 9.99 l y CIP398192.592 con 9.54 l. Y los genotipos que tuvieron una tasa mayor de transpiración en sequía regulada fueron los genotipos CIP398098.119 con 6.29 l; CIP398208.620 con 5.47 l y CIP398192.592 con 5.33 l. También se observa un comportamiento atípico del genotipo CIP720088, que tanto en condiciones de riego y de sequía controlada posee una tasa baja de transpiración, 3.37 l y 2.33 l respectivamente (Fig. 7). En el análisis de área foliar, se observa una interacción significativa del tratamiento sobre los genotipos estudiados ($p < 0.001$). Lo que nos indica que las plantas de papa responden a la sequía con cambios en el área foliar. Los genotipos en riego que presentaron mayor área foliar fueron CIP398098.119 con 10287.8 cm^2 ; CIP398208.219 con 9669 cm^2 y CIP398208.704 con 8878.8 cm^2 . Y el genotipo CIP720088 presenta un comportamiento atípico ya que su área foliar en sequía regulada como riego presenta área foliar reducida 680.6 y 1374 cm^2 respectivamente (Fig. 8).

2.4 Eficiencia de Uso de Agua en la biomasa y tubérculos

De acuerdo a los resultados no que existe diferencia significativa entre tratamientos ($p = 0.08$) para la eficiencia de uso de agua en tubérculo (EUA_T) mas si entre genotipos con ($p < 0.001$) (Anyia, 2004) . Los genotipos que presentaron mayor EUAT fueron CIP397077.16 con 7.95 g/l ;

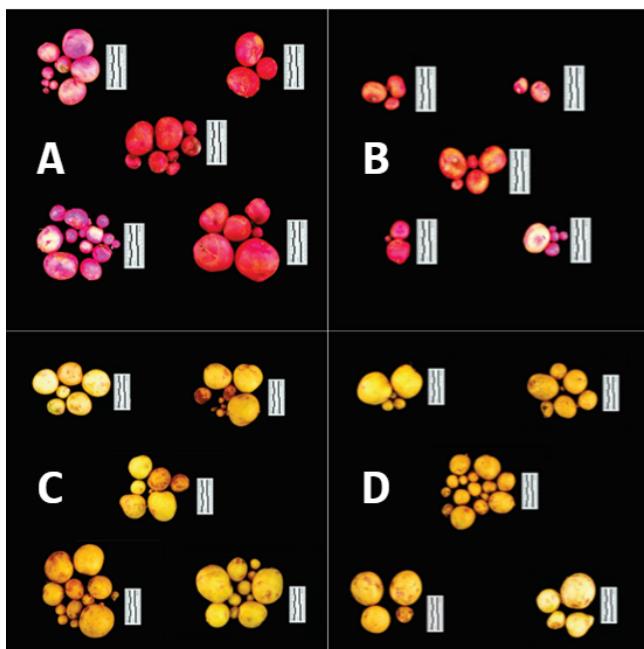


Figure 4. Comparación del rendimiento entre los genotipos CIP398203.244 y CIP398190.89. (A)(C) Plantas sin estrés; (B)(D) Plantas con estrés

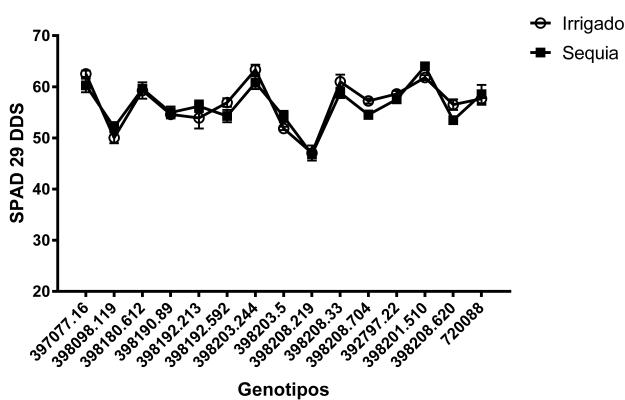


Figure 5. Contenido relativo de clorofila a los a los 29 DDS.

CIP398208.620 con 7.34 g/l y CIP392797.22 con 7.31 g/l. Los genotipos que presentaron los valores más bajos en EUAT fueron CIP398201.510 con 3.54 g/l ; CIP398180.612 con 3.19 g/l y CIP398203.244 con 1.53 g/l (Fig. 9). Para la eficiencia de uso de agua en relación a la biomasa, existe diferencia significativa tanto para los tratamientos y los genotipos con $p = 0.002$ y $p < 0.001$ respectivamente . El promedio para el tratamiento de sequía regulada fue 11.12 g/l y 9.41 g/l para las plantas bien regadas. Los genotipos que presentaron mayor EUA fueron los genotipos CIP397077.16 con 12.51 g/l; CIP392797.22 con 12.04 g/l y CIP398208.620 con 11.51 g/l y los genotipos que presentaron los valores más bajos fueron CIP720088 con 9.37 g/l ; CIP398201.510 con 9.29 g/l y CIP398180.612 con 9.17 g/l Fig. 10).

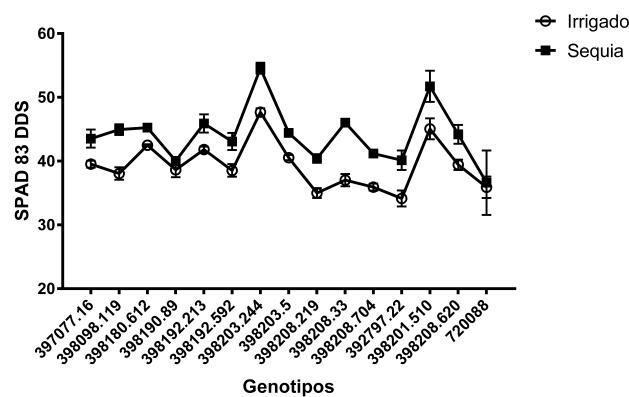


Figure 6. Contenido relativo de clorofila a los a los 83 DDS.

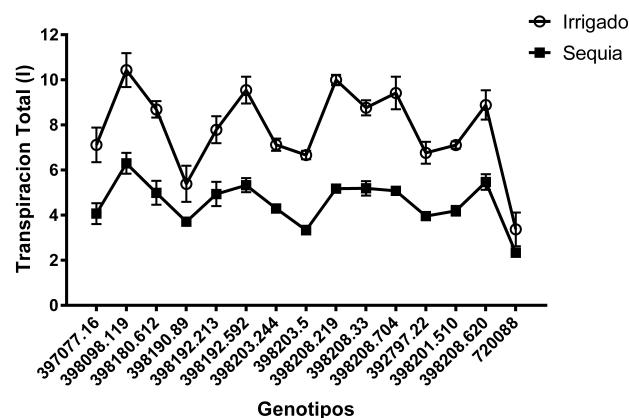


Figure 7. Transpiración Total

2.5 Eficiencia de Uso de Agua en tubérculos e índice de Cosecha

La eficiencia de uso de agua en tubérculos (g/l) posee una correlación alta con el índice de cosecha ($r = 0.912$) (Fig. 11) . Adicionalmente el peso seco de la biomasa tiene correlación alta con la transpiración total $r = 0.928$ ($p < 0.001$).

3. Discusión

El rendimiento bajo condiciones manejadas de estrés puede predecir el rendimiento en condiciones naturales (campo). Ganancia bajo esta selección ha sido demostrado con anterioridad (IRRI, 2014). El efecto de la sequía en el rendimiento dependerá del estado de desarrollo del cultivo la intensidad y duración al estrés por reducción del agua (Kumar et al., 1994). En la agricultura de subsistencia, un rendimiento estable es más importante que un rendimiento alto en ambientes favorables. En la agricultura comercial, altos rendimientos son altos ingresos lo cual es el objetivo deseado (Rosielie & Hamblin, 1981). La combinación de altos rendimientos estables y altos rendimientos en sequía, ha sido propuesto como un criterio de selección para caracterizar el desempeño del genotipos bajo distintos grados de variación en la sequía (Ahmad et al., 2003), ya que la sequía es un

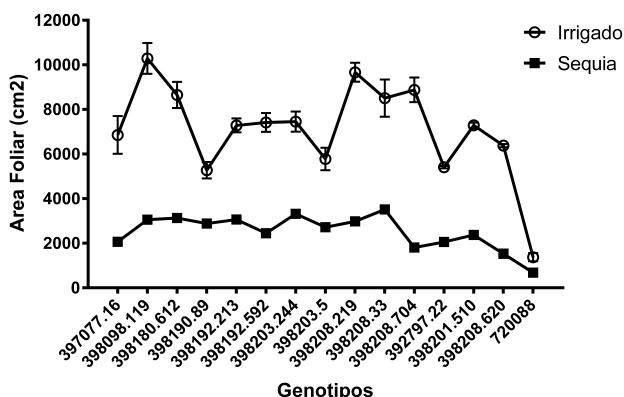


Figure 8. Área Foliar

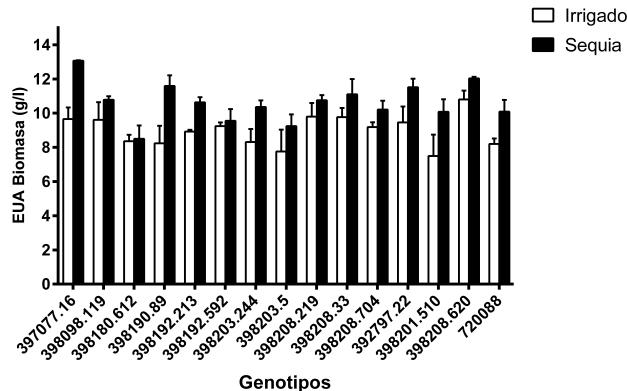


Figure 10. Eficiencia de uso de agua en biomasa

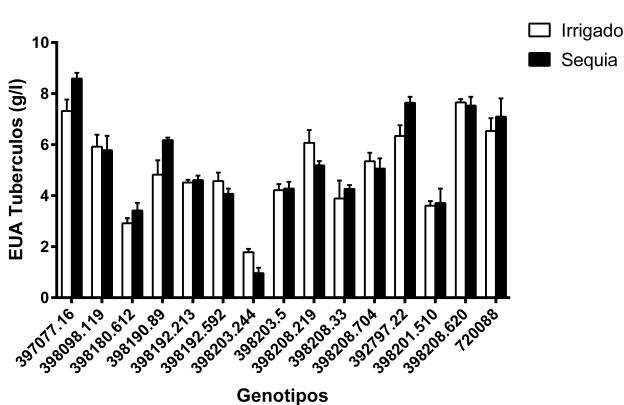


Figure 9. Eficiencia de uso de agua en tubérculos

fenómeno errático e impredecible, el objetivo de los mejoradores es mejorar la capacidad de las plantas a la tolerancia al estrés por sequía mientras mantengan a su vez un rendimiento alto (Spitters & Schapendonk, 1990).

Los genotipos en sequía tengan mayor eficiencia fotosintética reflejada en el aumento del rendimiento, como lo denomina, Hörtensteiner (2009) “verde cosmético”, que al parecer está más relacionado a la aceleración de la senescencia que a la actividad fotosintética. No se presenta ningún indicio o tendencia en el contenido relativo de clorofila con la tolerancia a la sequía, más si nos muestra que existe diferencia entre tratamientos. Según Ramírez et al. (2014) existe diferencia en la concentración de contenido relativo de clorofila entre tratamientos de plantas con sequía y plantas bien regadas durante la etapa de senescencia en experimentos de campo, el cual tiene una correlación negativa con los resultados de rendimiento. Según los análisis de correlación de Pearson para el presente estudio existe cierto grado de asociación inversa del SPAD con los componentes del rendimiento a los 83 DDS (Cosecha 85 DDS) con índice de Cosecha ($r = -0.83$), peso seco de tubérculo ($r = -0.47$), Eficiencia de uso de agua en tubérculos ($r = -0.7$) y al índice de tolerancia a la reducción del agua ($r = -0.56$).

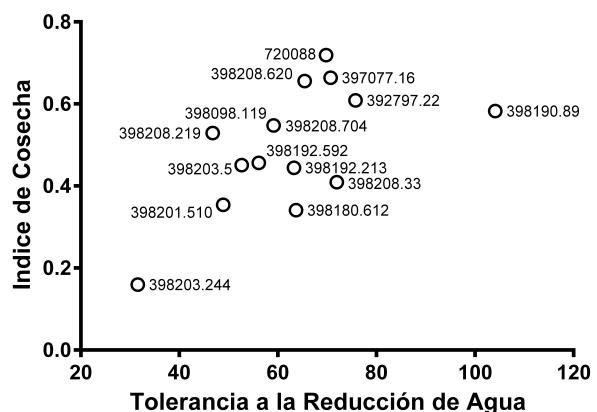


Figure 11. Clones con tolerancia al estrés por sequía en base al índice de cosecha

La transpiración de los genotipos tiene una correlación alta con el área foliar ($r = 0.88$) y la biomasa total ($r = 0.93$) y con el peso seco de tubérculo ($r = 0.75$). La reducción del área foliar y la aceleración de la senescencia son respuestas comunes del estrés por sequía. El área foliar contribuye al rendimiento pero al mismo tiempo es el factor de la supervivencia de la planta bajo déficit hídrico (Ludlow & Muchow, 1990). La pérdida de cobertura de la planta es causada por el marchitamiento de la hoja, lo que conlleva a la pérdida de turgencia durante la senescencia (Nilsen & Orcutt, 1996), relacionado también a la reducción del contenido relativo de agua. El vigor prematuro (desarrollo rápido del área foliar) es una adaptación importante en trigo y cebada para tolerancia al estrés abiótico. Lo que convierte un objetivo de los programas de mejoramiento, para encontrar parentales con crecimiento foliar prematuro (Condon et al., 2004). Sin embargo, una de las complicaciones es que las plantas con área específica baja, está asociado con un bajo índice de cosecha (Wright et al., 1993). También la tendencia a la selección de individuos con área foliar alta debe ser evitada durante la selección ya que no significa que estas plantas tengan mayores rendimientos.

La eficiencia de uso de agua bajo condiciones de estrés es

uno de las variables más prometedoras para mejorar y estabilizar el rendimiento de los cultivos antes deficiencias de agua intermitentes (Bhatnagar-Mathur et al., 2007). La eficiencia de uso de agua en papa es un factor ampliamente variable, dependiendo de las condiciones medioambientales y su magnitud espacial y temporal (Monneveux et al., 2013). Para los fisiólogos, la unidad básica de la producción está dado por los moles de carbono ganado en la fotosíntesis en el intercambio de agua usada en la transpiración. Por eso la definición fisiológica puede ser representada en los niveles más básicos como la eficiencia de uso de agua instantánea durante intercambio de gases de la hoja. Para los agricultores y agrónomos, la unidad de producción está más asociada al rendimiento de la cosecha en relación a la cantidad de agua disponible para el cultivo durante su periodo vegetativo (Condon et al., 2004). La eficiencia de uso de agua en tubérculos (g/l) posee una correlación alta con el índice de cosecha ($r = 0.912$). Adicionalmente el peso seco de la biomasa tiene correlación alta con la transpiración total $r = 0.928$ ($p < 0.001$). Con lo que se puede sugerir que el uso del índice de cosecha es una variable promisoria para la selección de genotipos tolerantes a estrés por sequía

4. Conclusiones

De las variables estudiadas, el índice de cosecha es fácil de ser calculada y muestra una correlación alta con la eficiencia de uso de agua en tubérculos, por lo que podría ser utilizado como criterio de selección para genotipos que presenten tolerancia a la sequía. La metodología del lisímetro para calcular eficiencia de uso de agua es un método muy preciso para experimentos fisiológicos sin embargo es costoso, poco práctico y dificulta su uso en campo. Los genotipos, CIP398190.89 , CIP397077.16 , CIP392797.22 , CIP398208.620 mostraron una mayor eficiencia en el uso de agua bajo condiciones de sequía sin que esto produzca una reducción drástica en el rendimiento.

Agradecimientos

Al Centro Internacional de la Papa quien hizo posible el desarrollo de esta investigación con el soporte técnico, científico y financiero. Al Ing. Raúl Eyzaguirre por su ayuda y enseñanzas durante el proceso de análisis estadístico. A mi gran amigo Omar Benites por su apoyo constante, su soporte informático y enseñanzas de programación en R. Al Ing. David Saravia y Tec. Jorge Vega por sus consejos y apoyo durante la fase experimental de esta investigación. A mi alma máter la Universidad Nacional Agraria la Molina quien me ha permitido adquirir los conocimientos, identidad y ética como persona y profesional.

References

Ahmad, R., Qadir, S., Ahmad, N., & Shah, K. H. (2003). Yield potential and stability of nine wheat varieties under water stress conditions. *Int. J. Agric. Biol.*, 5(1).

- Anyia, A. (2004). Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. *European Journal of Agronomy*, 20(4), 327–339.
- Barrantes, J. G. (1993). *Estudio del efecto del déficit hídrico y de la fertilización potásica en algunas características morfo-fisiológicas y en el rendimiento de plantas de papa provenientes de semilla sexual*. PhD thesis.
- Bhatnagar-Mathur, P., Devi, M. J., Reddy, D. S., Lavanya, M., Vadez, V., Serraj, R., Yamaguchi-Shinozaki, K., & Sharma, K. K. (2007). Stress-inducible expression of At DREB1A in transgenic peanut (*Arachis hypogaea L.*) increases transpiration efficiency under water-limiting conditions. *Plant cell reports*, 26(12), 2071–82.
- Cabello, R., Monneveux, P., Mendiburu, F., & Bonierbale, M. (2013). Comparison of yield based drought tolerance indices in improved varieties, genetic stocks and landraces of potato (*Solanum tuberosum L.*). *Euphytica*, 193(2), 147–156.
- CIP (2014). Manejo de fertilizantes.
- Condon, a. G., Richards, R. a., Rebetzke, G. J., & Farquhar, G. D. (2004). Breeding for high water-use efficiency. *Journal of experimental botany*, 55(407), 2447–2460.
- Deblonde, P. & Ledent, J. (2001). Effects of moderate drought conditions on green leaf number, stem height, leaf length and tuber yield of potato cultivars. *European Journal of Agronomy*, 14(1), 31–41.
- Fabeiro, C., Olalla, F. M. d. S., & de Juan, J. A. (2001). Yield and size of deficit irrigated potatoes. *Agricultural Water Management*, 48, 255–266.
- FAO (2014). Crop Water Information: Potato.
- Ferri, C. P., Formaggio, A. R., & Schiavinato, M. A. (2004). Narrow band spectral indexes for chlorophyll determination in soybean canopies [Glycine max (L .) Merril]. *Braz. J. Plant Physiol.*, 16(3), 131–136.
- Hörtенsteiner, S. (2009). Stay green regulates chlorophyll and chlorophyll binding protein degradation during senescence. *Trends in Plant Science*, 14, 155–162.
- INIAP (2014). Las papas nativas y su importancia en la salud y la alimentación.
- IRRI (2014). Drought tolerance: Screening methods.
- Kumar, a., Singh, D., & Singh, P. (1994). Influence of water stress on photosynthesis, transpiration, water-use efficiency and yield of *Brassica juncea* L. *Field Crops Research*, 37(2), 95–101.
- Ludlow, M. M. & Muchow, R. C. (1990). A critical evaluation of traits for improving crop yields in water-limited environments. *Advances in Agronomy*, 43.
- MINAG (2014). Papa.
- Monneveux, P., Ramírez, D. a., & Pino, M.-T. (2013). Drought tolerance in potato (*S. tuberosum L.*): Can we learn from drought tolerance research in cereals? *Plant science : an international journal of experimental plant biology*, 205-206, 76–86.
- Montgomery, D. C. (1999). Experimental Design for Product and Process Design and Development. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B (Statistical Methodology)*, 57(1), 27–53.

- Statistical Society: Series D (The Statistician), 48(2), 159–177.
- Nilsen, E. T. & Orcutt, D. M. (1996). Physiology of plants under stress. Abiotic factors.
- Porter, G. A., Bradbury, W. B., Sisson, J. A., Opena, G. B., & McBurnie, J. C. (1999). Soil Management and Supplemental Irrigation Effects on Potato: I. Soil Properties, Tuber Yield, and Quality. *Agronomy Journal*, 91(3), 416.
- Ramírez, D., Yactayo, W., Gutiérrez, R., Mares, V., De Mendiburu, F., Posadas, a., & Quiroz, R. (2014). Chlorophyll concentration in leaves is an indicator of potato tuber yield in water-shortage conditions. *Scientia Horticulturae*, 168, 202–209.
- Rosielle, A. A. & Hamblin, J. (1981). Theoretical Aspects of Selection for Yield in Stress and Non-Stress Environment. *Crop Science*, 21(6), 943.
- Sinclair, T. R., Tanner, C. B., & Bennett, J. M. (1984). Water-Use Efficiency in Crop Production. *BioScience*, 34, 36–40.
- Spitters, C. J. T. & Schapendonk, A. H. C. M. (1990). Evaluation of breeding strategies for drought tolerance in potato by means of crop growth simulation. *Plant Soil*, 123, 151–161.
- Thomas, H. & Smart, C. M. (1993). Crops that stay green. *Annals of Applied Biology*, 123(1), 193–219.
- Valladares, F., Vilagrosa, A., Peñuelas, J., Ogaya, R., Julio, J., Corcuera, L., & Sisó, S. (2004). Estrés hídrico : ecofisiología y escalas de la sequía, 163–190.
- Wright, G. C., Hubick, K. T., Farquhar, G. D., Nageswara, R. C., Ehleringer, J. R., & Hall, A. E. (1993). Genetic and environmental variation in transpiration efficiency and its correlation with carbon isotope discrimination and specific leaf area in peanut. In *Stable isotopes and plant carbon-water relations.*, (pp. 247–267). Academic Press Inc.
- Yuan, B.-Z., Nishiyama, S., & Kang, Y. (2003). Effects of different irrigation regimes on the growth and yield of drip-irrigated potato. *Agricultural Water Management*, 63(3), 153–167.

Abstract

The potato (*Solanum tuberosum* L.) is a sensitive crop to drought because it has a shallow root system and requires constant availability of water in the soil to ensure maximum performance and quality in the tuber. The water use efficiency (EUA) is defined as production per unit of water consumed, this variable is considered important in determining the performance under limited water conditions. If we understand the relationship between the EUA and yield under stress conditions may help us find strategies that help to minimize the loss of yield due to water availability and ensure high production. It was performed an experiment in greenhouse with controlled conditions, to characterize the response and understanding the relationship between the EUA, performance and tolerance in 15 potato genotypes from advanced breeding population of the International Potato Center (CIP). The experiment was carried in a split plot experimental design with the main factor the two types of irrigation, drought and normal watering and as a secondary factor the fifteen genotypes. Through the experiment morphological and physiological variables were evaluated such as relative chlorophyll content (SPAD), leaf area (AF), transpiration and yield parameters such as the weight of biomass, harvest index (IC) and tolerance index (TRA). The research results show significant differences between treatments, plants subjected to water shortages show a lower yield, and there was a reduction in the biomass and leaf area. There was a high correlation enters the EUA and IC ($r = 0.98$), indicating that the IC can be a useful tool for early selection of genotypes with good performance and tolerant to drought. Genotypes CIP398190.89, CIP397077.16, CIP392797.22, CIP398208.620 showed greater efficiency in the use of water under drought conditions without producing a drastic reduction in yield.

Keywords Potato — Water use efficiency — Harvest Index — Drought Tolerance