

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**Efecto de la disponibilidad de agua en el suelo sobre la producción de quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) y sus antioxidantes, en el genotipo Morado**

**FELIPE CALQUÍN VALENZUELA**

PROYECTO DE TÍTULO  
PRESENTADO A LA FACULTAD DE  
INGENIERÍA AGRÍCOLA DE LA  
UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL AGRÍCOLA.

**CHILLÁN – CHILE**

**2021**

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL  
SUELO SOBRE LA PRODUCCIÓN DE QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA*  
WILLD) Y SUS ANTIOXIDANTES, EN EL GENOTIPO MORADO.**

Aprobado por:

Jorge Jara Ramírez  
Ingeniero Agrónomo, Mg. Cs., Ph.D.  
Profesor Asociado

---

Profesor Guía

Susana Fisher Ganzoni  
Ingeniera Agrónomo, Dr. Cs.  
Profesor Asociado

---

Profesor Asesor

Walter Valdivia Cea  
Ingeniero Agrónomo, Mg. Cs., Dr.(c)

---

Asesor Externo

Nicole Uslar Valle  
Ingeniero Civil Agrícola, Ph.D.  
Profesor Asistente

---

Directora de Departamento

María Eugenia Gonzáles  
Ingeniero Agrónomo, Ph.D.  
Profesor Asociado

---

Decana

## ÍNDICE DE MATERIAS

|                                                        | Página |
|--------------------------------------------------------|--------|
| RESUMEN.....                                           | 1      |
| SUMMARY .....                                          | 3      |
| 1. INTRODUCCIÓN.....                                   | 4      |
| 2. OBJETIVOS.....                                      | 7      |
| 2.1.    Objetivos generales.....                       | 7      |
| 2.2.    Objetivos específicos.....                     | 7      |
| 3. ANTECEDENTES GENERALES.....                         | 8      |
| 3.1.    Área de estudio .....                          | 8      |
| 4. MATERIALES Y METODOS.....                           | 9      |
| 4.1.    Diseño experimental.....                       | 9      |
| 4.2.    Manejo de los experimentos.....                | 10     |
| 4.3.    Variables a medir.....                         | 11     |
| 5. RESULTADOS Y DISCUSION .....                        | 15     |
| 5.1.    Humedad de suelo .....                         | 15     |
| 5.2.    Potencial hídrico foliar .....                 | 16     |
| 5.3.    Resistencia estomática.....                    | 20     |
| 5.4.    Rendimiento y capacidad de antioxidantes ..... | 21     |
| 6. CONCLUSIONES .....                                  | 24     |
| 7. LITERATURA CITADA .....                             | 26     |

## ÍNDICE DE TABLAS

| En el texto                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Página |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Tabla 1. Características de capacidad de campo ( $\Theta_{cc}$ ), punto de marchitez permanente ( $\Theta_{pmp}$ ) y Densidad aparente (Da).....                                                                                                                                                                                         | 8      |
| Tabla 2. Rendimiento y calidad de grano (antioxidantes) de quinoa, genotipo Morado, para cinco tratamientos de riego (T0, T20, T40, T70 y T100) dentro del periodo fenológico entre llenado de grano y madurez fisiológica, donde cada tratamiento representa el porcentaje de humedad aprovechable en el suelo antes de cada riego..... | 22     |



## ÍNDICE DE FIGURAS

| En el Texto:                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | Página |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Figura 1. Temperatura máxima diaria (Tmax), temperatura mínima diaria (Tmin) y precipitación diaria (PP) para la temporada 2015-2016.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 10     |
| Figura 2. Esquema de bomba de presión tipo Scholander.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 13     |
| Figura 3. Porómetro AP4.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 14     |
| Figura 4. Evolución de agua disponible para la planta en el perfil de suelo (AW), respecto a los días del año (DDA) en el periodo fenológico de llenado de grano a madurez fenológica, para cinco tratamientos de riego: T0, T20, T40, T70 y T100 (riego cuando AW alcance niveles de 0, 20, 40 y 70% en el perfil de suelo en la zona de raíces de 60 cm de profundidad). T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de agua.....                                           | 16     |
| Figura 5. Potencial hídrico foliar (PHF) del genotipo Morado al medio día solar y en sus respectivos días de medición (DDA día del año). Cada punto es un promedio de 4 mediciones en cada tratamiento de riego: T0, T20, T40, T70 y T100 (riego cuando AW alcance niveles de 0, 20, 40 y 70% en el perfil de suelo en la zona de raíces. T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de agua) .....                                                                          | 17     |
| Figura 6. Evolución del potencial hídrico foliar promedio (PHF) del genotipo Morado desde el amanecer hasta el atardecer (27 de diciembre del 2015, DDA 361). Barras verticales indican $\pm$ una desviación estándar. cada medición es el promedio de 4 repeticiones para cada tratamiento de riego: T0 y T100 (T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de humedad aprovechable en el suelo y T0 es el tratamiento donde solo hubo agotamiento hídrico en el suelo)..... | 18     |

- Figura 7. Evolución del potencial hídrico foliar promedio (PHF) del genotipo Morado desde el amanecer hasta el atardecer (4 enero 2016, DDA 4). Barras verticales indican  $\pm$  una desviación estándar. cada medición es el promedio de 4 repeticiones para cada tratamiento de riego: T0 y T100 (T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de humedad aprovechable en el suelo y T0 es el tratamiento donde solo hubo agotamiento hídrico en el suelo) ..... 19
- Figura 8. Resistencia estomática medida a medio día solar del genotipo morado respecto al día de medición para los tratamientos T0 y T100. Cada valor es un promedio de las mediciones. Las barras indican  $\pm$  una desviación estándar. Tratamientos de riego: T0 y T100 (T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de agua y T0 es el tratamiento donde solo hubo agotamiento hídrico en el suelo) ..... 20



## ÍNDICE DE ECUACIONES

| En el texto:                                                                          | Página |
|---------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Ecuación 1. Ecuación para determinar el agua aprovechable en el suelo (AW).....       | 9      |
| Ecuación 2 resistencia a la difusión de vapor de agua de la epidermis de la hoja..... | 14     |



# **EVALUACIÓN DEL EFECTO DE LA DISPONIBILIDAD DE AGUA EN EL SUELO SOBRE LA PRODUCCION DE QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD) Y SUS ANTIOXIDANTES, EN EL GENOTIPO MORADO.**

EVALUATION OF THE EFFECT OF WATER AVAILABILITY IN THE SOIL ON THE PRODUCTION OF QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD) AND ANTIOXIDANTS, IN THE MORADO GENOTYPE.

**Palabras clave:** Quinoa, rendimiento de grano, capacidad antioxidante, potencial hídrico foliar, humedad del suelo, resistencia estomática.

## **RESUMEN**

Con el propósito de observar el efecto de disponibilidad de agua en el suelo en rendimiento y características fisiológicas de la planta, se realizó un ensayo con quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd), genotipo Morado, en la Universidad de Concepción campus Chillán, en la temporada 2015-2016. El genotipo fue sometido a cinco niveles de disponibilidad de agua aprovechable en el suelo para la planta (AW) previo al riego (100%, 70%, 40%, 20%, 0%) en el periodo fenológico de inicio de llenado de grano a madurez fisiológica. En el estudio se evaluó el rendimiento en grano y su capacidad antioxidante, potencial hídrico foliar, humedad de suelo y resistencia estomática para el genotipo Morado. Se observó que el mayor rendimiento en grano se obtuvo para el tratamiento que mantuvo un 100 % de AW (T100), donde se lograron 3,69 t ha<sup>-1</sup>, un 26,8 % mayor respecto al tratamiento que no recibió riego durante el periodo de estudio (T0), y que obtuvo el menor rendimiento. Respecto al análisis de capacidad de antioxidantes en el grano, hubo una mayor cantidad de antioxidantes para el tratamiento que previo al riego alcanzaba un 20 % de



AW (T20), donde se obtuvo 19,6  $\mu\text{mol/g}$ . El punto de equilibrio entre rendimiento y calidad se logró con el tratamiento de 40% de AW (T40), con un rendimiento en grano de 3,58  $\text{t ha}^{-1}$  y cantidad de antioxidantes de 16  $\mu\text{mol g}^{-1}$ .



## **EVALUATION OF THE EFFECT OF WATER AVAILABILITY IN THE SOIL ON THE PRODUCTION OF QUINOA (*CHENOPODIUM QUINOA* WILLD) AND ITS ANTIOXIDANTS, IN THE MORADO GENOTYPE.**

**Keywords:** Quinoa, grain yield, antioxidant capacity, foliar water potential, soil moisture, stomatal resistance.

### **SUMMARY**

In order to observe the effect of water availability in the soil on the yield and physiological characteristics of the plant, a test was carried out with quinoa (*Chenopodium quinoa* willd), Morado genotype, at the University of Concepción, Chillán campus, 2015 -2016 season. The genotype was subjected to five levels of availability of usable water in the soil for the plant (AW) prior to irrigation (100%, 70%, 40%, 20%, 0%) in the phenological period from the beginning of grain filling to physiological maturity. The study evaluated grain yield and its antioxidant capacity, foliar water potential, soil moisture and stomatal resistance for the Morado genotype. It was observed that the highest grain yield was obtained on the treatment that maintained 100% AW (T100), where 3.69 t ha<sup>-1</sup> were achieved, 26.8% higher than the treatment that did not receive irrigation during the study period (T0) and obtained the lowest performance. Regarding the analysis of antioxidant capacity in the grain, there was a greater amount of antioxidants for the treatment that before irrigation reached 20% AW (T20), where 19.6  $\mu\text{mol g}^{-1}$  was obtained. The equilibrium point between yield and quality was achieved with the treatment of 40% AW (T40), with a grain yield of 3.58 t ha<sup>-1</sup> and rate of antioxidants of 16  $\mu\text{mol g}^{-1}$ .

## 1. INTRODUCCIÓN

Existe un interés general en el mundo por producir alimentos de calidad. Además, el agua se ha vuelto un recurso con muy baja disponibilidad en algunos lugares, por lo que resulta importante seleccionar cultivos agrícolas que puedan crecer bajo estas condiciones. La quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un cultivo sobre el cual hay un creciente interés, ya que constituye un alimento con alto valor nutricional. Es uno de los pocos alimentos de origen vegetal libre de gluten que posee todos los aminoácidos esenciales, además de oligoelementos y vitaminas. Una de las ventajas más importantes que tiene la quinoa como cultivo es ser una planta rústica, que se adapta a distintas condiciones edafoclimáticas. Crece en ambientes con humedades relativas entre el 40 % y 88 % y, además, se adapta a un rango amplio de temperaturas que va desde los 4°C hasta los 38°C (PROINPA, 2011). La ONU definió el año 2013 como el año internacional de la quinoa con el eslogan “*un futuro sembrado hace miles de años*”, haciendo alusión a la importancia de este grano ancestral para el futuro alimentario en el mundo.

Los fenoles en las plantas cumplen la función de compuestos antioxidantes y corresponden a un grupo de moléculas que protegen al cuerpo de la formación de radicales libres, los que dañan las moléculas de ADN (Repo de Carrasco et al., 2008). La quinoa se reconoce como una fuente alimenticia, por lo que es de interés analizar su comportamiento respecto a rendimiento y capacidad de antioxidantes.

Los rendimientos de cualquier cultivo están asociados a un buen manejo agrícola; es por eso que el riego cumple un rol fundamental para el desarrollo de las plantas y que se ve reflejado en la producción. Además, existe una necesidad mundial de disponer de cultivos que presenten bajos costos de producción y que, además, tengan un importante aporte nutricional. Es aquí donde toman relevancia estudios sobre el desarrollo de la quínoa, donde se muestra su resistencia a niveles de estrés a la sequía y diferentes condiciones climáticas para distintas variedades y genotipos (Bazile et al., 2016).

El riego es un factor relacionado directamente con el rendimiento y la capacidad de antioxidantes en la quínoa, es determinante para producciones óptimas, pero tiene costos altos tanto por el lado económico como por la necesidad de contar con un recurso tan escaso como el agua. Es por esto que el riego deficitario se hace tan relevante, ya que puede ahorrar cantidades considerables de agua y junto con ello mejorar la producción (Razzaghi et al., 2012). Es por ello que se han desarrollado metodologías y formas de riego para optimizar el uso del agua y, de esta forma, fomentar las buenas prácticas agrícolas. García et al. (2003) estudiaron el efecto del estrés hídrico en algunos periodos fenológicos de la quínoa en el altiplano de Bolivia, una zona donde existe poca disponibilidad de agua. Los autores citados observaron que, bajo condiciones de déficit hídrico en el suelo, la planta mostró que puede seguir creciendo con normalidad. Aun cuando la quínoa se cultiva en condiciones de secano, diversos estudios muestran una respuesta positiva

respecto al uso de agua sobre el rendimiento y contenido de antioxidantes. Al respecto, se han observado incrementos de hasta un 70% en rendimiento para quinoa creciendo en suelos que mantienen desde 20 a 95% de disponibilidad de agua aprovechable para la planta en la zona de raíces (Fischer et al., 2013).

Este tipo de estudios es relevante, ya que puede entregar indicadores de manejo del riego para la obtención de mayores rendimientos y contenidos de antioxidantes.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivos generales**

- Evaluar el comportamiento en rendimiento y capacidad antioxidante, resistencia estomática y potencial de agua en la planta quinoa, genotipo Morado, sometida a riego deficitario controlado en el periodo fenológico que va desde llenado de grano a madurez fisiológica.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Evaluar el rendimiento y capacidad antioxidante del grano de la quinoa, genotipo Morado, sometido a riego deficitario en el periodo fenológico de llenado de grano a madurez fisiológica, cuando el nivel de humedad en el suelo para la planta alcanza un 100%, 70%, 40%, 20% y 0% de disponibilidad para la planta en el perfil de la zona de raíces (AW).
- Cuantificar el nivel de estrés hídrico alcanzado por el genotipo Morado y su relación con el potencial de agua en la planta y resistencia estomática.
- Analizar las relaciones contenido de humedad de suelo, potencial hídrico de la planta, resistencia estomática, rendimiento y capacidad antioxidante del genotipo Morado.

### 3. ANTECEDENTES GENERALES

#### 3.1. Área de estudio

El estudio se realizó en la Estación Experimental El Nogal (36° 35' 43.2" S, 72° 04' 39.9" O y 140 m.s.n.m.) de la Universidad de Concepción – Campus Chillán, Provincia de Diguillín, Región de Ñuble, Chile, en la temporada 2015-2016 bajo condiciones de campo. La zona de estudio presenta una precipitación promedio anual de 1000 mm, concentrado entre los meses de mayo a agosto, y un periodo seco de cuatro a cinco meses (Stolpe, 2006). El clima de la zona corresponde a mediterráneo, con una temperatura media anual de 13,1° C, una temperatura promedio máxima de 28,6° C en enero, y temperatura mínima promedio de 3,0° C en julio (del Pozo y del Canto, 1999).

El suelo en el lugar del experimento corresponde a la familia media térmica de los *Humic Haploxerands*, de la serie Arrayán, plano, de textura franco limoso, muy profundo, con buen drenaje externo e interno. Las características físico-hídricas del suelo utilizado en el experimento se muestran en la Tabla 1.

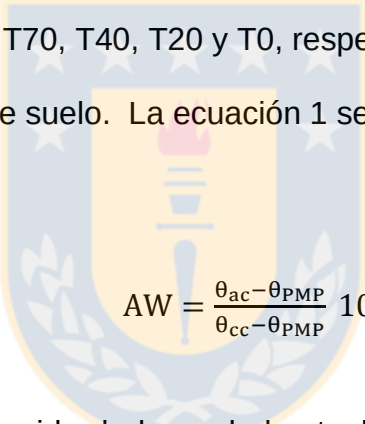
**Tabla 1.** Profundidad de estrata de suelo, capacidad de campo ( $\Theta_{cc}$ ), punto de marchitez permanente ( $\Theta_{pmp}$ ) y densidad aparente (Da).

| Estrata<br>(cm) | $\Theta_{cc}$<br>(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | $\Theta_{pmp}$<br>(m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) | Da<br>(Mg m <sup>-3</sup> ) |
|-----------------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------|
| 00-30           | 39,53                                              | 17,31                                               | 1,31                        |
| 30-60           | 39,57                                              | 21,95                                               | 1,33                        |
| 60-90           | 32,78                                              | 20,41                                               | 1,29                        |
| 90-120          | 36,36                                              | 20,46                                               | 1,22                        |

## 4. MATERIALES Y METODOS

### 4.1. Diseño experimental

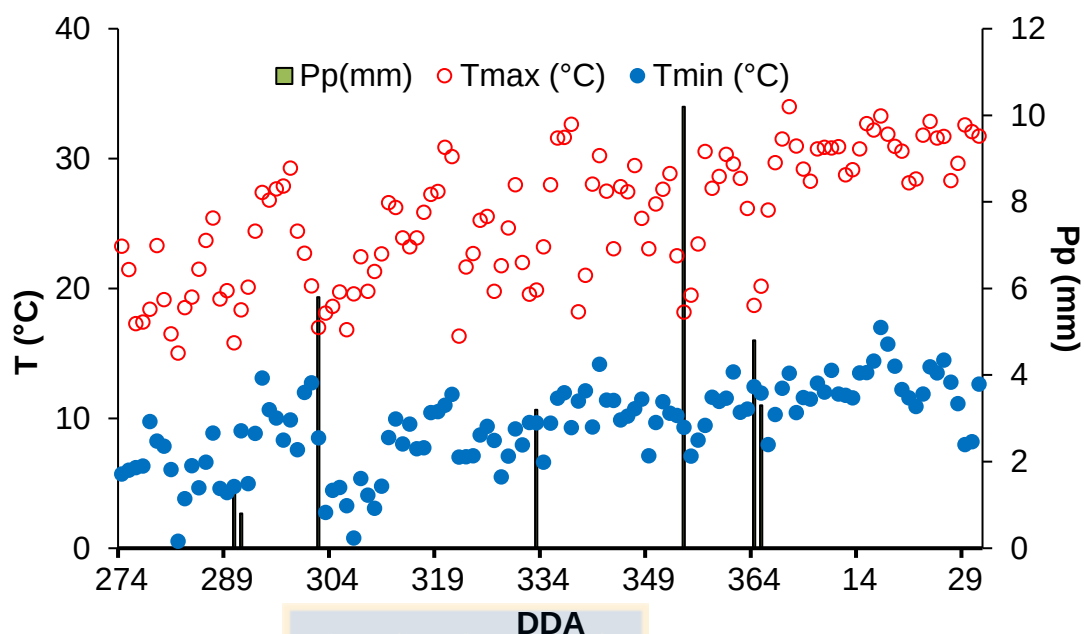
Se adoptó un diseño experimental de bloques completos al azar, con cinco tratamientos de riego y cuatro repeticiones para el genotipo Morado. El tratamiento de riego correspondió al nivel de agua disponible para la planta (AW) en la zona de raíces antes del riego, desde la etapa de llenado de granos hasta madurez fisiológica. Se establecieron cinco tratamientos de riego, con aplicaciones de agua cuando el suelo alcanzaba el 100 %, 70 %, 40 %, 20 % y 0 % de AW (T100, T70, T40, T20 y T0, respectivamente) en los primeros 60 cm de profundidad de suelo. La ecuación 1 se usó para determinar AW:


$$AW = \frac{\theta_{ac} - \theta_{PMP}}{\theta_{cc} - \theta_{PMP}} 100 \quad [1]$$

donde  $\theta_{ac}$  es el contenido de humedad actual en el suelo ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\theta_{cc}$  es el contenido de humedad a capacidad de campo ( $m^3 m^{-3}$ ) y  $\theta_{PMP}$  es el contenido de humedad a punto de marchitez permanente ( $m^3 m^{-3}$ ).

Durante el transcurso de la experiencia, se registró la temperatura del aire y precipitación en la estación meteorológica de la Facultad de Ingeniería Agrícola (DataloggerThiesClimamodelDLx-Met, AdolfThiesGmbH& Co., Göttingen, Deutschland) ubicada a 500 m del ensayo (Figura 1).





**Figura 1.** Temperatura máxima diaria (Tmax), temperatura mínima diaria (Tmin) y precipitación diaria (Pp) para la temporada 2015-2016. DDA representa los días del año. Fuente: Elaboración propia.

#### 4.2. Manejo de los experimentos

El 5 de octubre de 2015 se realizó la siembra con una dosis de  $15 \text{ kg ha}^{-1}$ . Cada unidad experimental consistió en 4 hileras de 5 m de largo, espaciadas a 0,5 m entre ellas. Una vez que se alcanzó las 6 hojas verdaderas, se realizó un raleo de plántulas dejando 12 plantas por metro lineal.

La aplicación de fertilizantes se calculó acorde al análisis de suelo. El fósforo y potasio se incorporaron al momento de la preparación de suelo a 4 cm de profundidad en el último laboreo antes de la siembra, a razón de  $100 \text{ kg}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $50 \text{ kg}$  de  $\text{K}_2\text{O}$   $\text{ha}^{-1}$ . La aplicación de nitrógeno fue a razón de  $160 \text{ kg N}$

ha<sup>-1</sup>, a la forma de urea en dos parcialidades: el 50 % en estado de segunda hoja y el otro 50 % en estado de inicio de etapa reproductiva.

El sistema de riego se instaló después de la emergencia de las plantas, y se utilizó una cinta de goteros incorporados espaciados a 10 cm. El caudal de agua de la cinta fue de 5 L m<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> a una presión de 0,7 bar. Desde la siembra hasta el comienzo del estado fenológico de llenado de grano (18 de diciembre de 2015), el ensayo fue regado cada vez que la humedad del suelo alcanzaba el 70 % de AW en la profundidad de raíces. Para homogenizar el contenido de humedad del suelo en las parcelas, antes del inicio del estado fenológico de llenado de grano, se regó por surcos el suelo de todo el ensayo al contenido de humedad de capacidad de campo hasta 1,0 m de profundidad de suelo.

Dos semanas después de que el cultivo alcanzó madurez fisiológica (13 de enero del año 2016), se cosecharon 2 m de las dos hileras centrales de cada parcela y se dejaron secar al aire durante una semana, para luego trillar con una trilladora estacionaria (Bill'sWelding Pullman, WA, USA).

#### **4.3. Variables a medir**

**Humedad de suelo.** La humedad en el suelo fue monitoreada cada 3 días en promedio mediante neutrómetro (CPN, 503-DR Hydroprobe, Campbell Pacific Nuclear International, California, USA), a intervalos de 30 cm hasta los 120 cm de profundidad. Para ello, se instalaron tubos de acceso de aluminio de 50 mm de diámetro entre las hileras centrales de cada unidad experimental. Una vez

que el sistema quedó operativo, se registraron los cambios de humedad y el nivel de riego deficitario al cual era sometida la planta.

**Potencial hídrico en la planta.** Cuando la planta alcanzó el estado fenológico de llenado de grano, se comenzaron las lecturas de potencial hídrico escogiendo hojas enteras en buen estado expuestas al sol, con un tallo definido del tercio medio superior de la planta, cubriendo la hoja con una bolsa plástica y papel aluminio para evitar la pérdida de agua de la hoja, hasta introducirla en la cámara Scholander (Eijkelkamp 3000) (Figura 2). Esto se realizó tres veces por semana al medio día solar (14:00 hora civil) hasta madurez fisiológica. En el periodo de estudio, en dos ocasiones, se midió potencial hídrico desde el amanecer hasta la puesta del sol, a intervalos de dos horas. La hoja fue sometida a un aumento de presión constante con gas nitrógeno a una tasa de  $8 \text{ kPa s}^{-1}$  hasta observar el humedecimiento del xilema en el corte del tallo, lo que indicaba que se había alcanzado la presión de equilibrio sobre la hoja, equivalente al potencial hídrico de la hoja.



1 - Cámara de acceso para hoja.  
3- Valvula reguladora de presión.

2-Manometro.  
4- Conexión de nitrógeno para la bomba.

**Figura 2.** Esquema de cámara de presión tipo Scholander. Elaboración propia.

**Porometría.** La apertura estomática es el factor dominante en la conductancia de difusión gaseosa en la superficie de las hojas, que controla tanto la pérdida de agua de hojas de la planta como la absorción de  $\text{CO}_2$  para la fotosíntesis. Las mediciones de conductancia estomática, por tanto, son indicadores importantes del estado hídrico de la planta y proporcionan información sobre el crecimiento vegetal y adaptación de las plantas a las variables ambientales.

El procedimiento para medir porometría en quinoa debe considerar que la hoja posee estomas en el haz y envés. La expresión utilizada para obtener  $l(r_{vs})$  corresponde a:

$$r_{vs} = \frac{r_{ab} \cdot r_{ad}}{r_{ab} + r_{ad}} \quad [2]$$

en donde  $r_{ab}$  es la resistencia en el envés de la hoja y  $r_{ad}$  es la resistencia en el haz de la hoja. Se realizaron dos mediciones por unidad experimental en hojas expuestas al sol. Se escogía al azar una planta y una hoja de la parte superior y otra de la parte inferior, ambas expuestas al sol, y luego se promediaban ambas lecturas. El porómetro utilizado fue el AP4 (Delta-T, Inglaterra) (Figura 3).



**Figura 3.** Porómetro AP4. Elaboración propia.

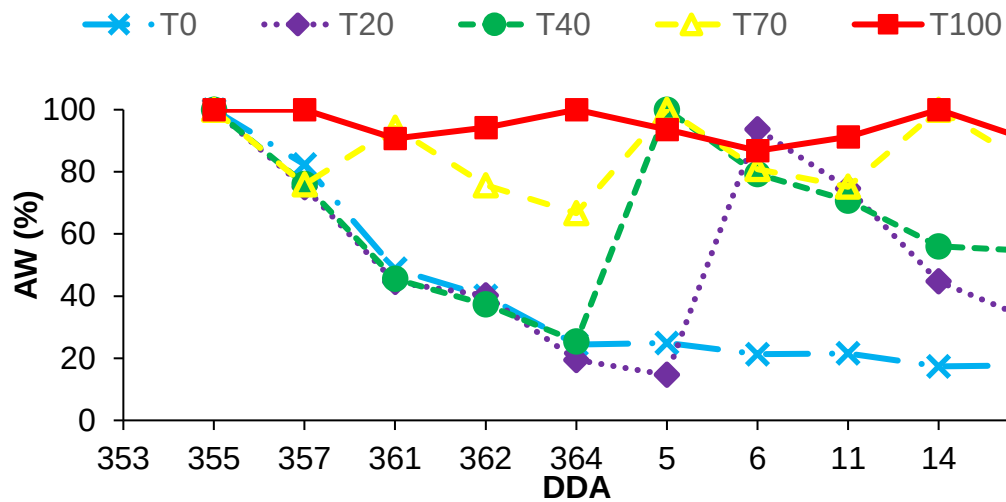
**Rendimiento y capacidad antioxidantes.** La cosecha se efectuó en las dos hileras centrales, cosechando 2 m lineales de cada parcela. El grano fue posteriormente secado al aire libre, a la sombra por dos semanas, a una temperatura promedio diaria de 19°C, hasta la obtención de peso constante. Por otro lado, el análisis de calidad del grano se realizó mediante el método

ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity, o Capacidad de Absorción de Radicales de Oxígeno), que consiste en medir la cantidad de antioxidantes y, además, cuantifica la capacidad que éstos tienen para neutralizar radicales libres causantes de la oxidación biológica.

## **5. RESULTADOS Y DISCUSION**

### **5.1. Humedad de suelo**

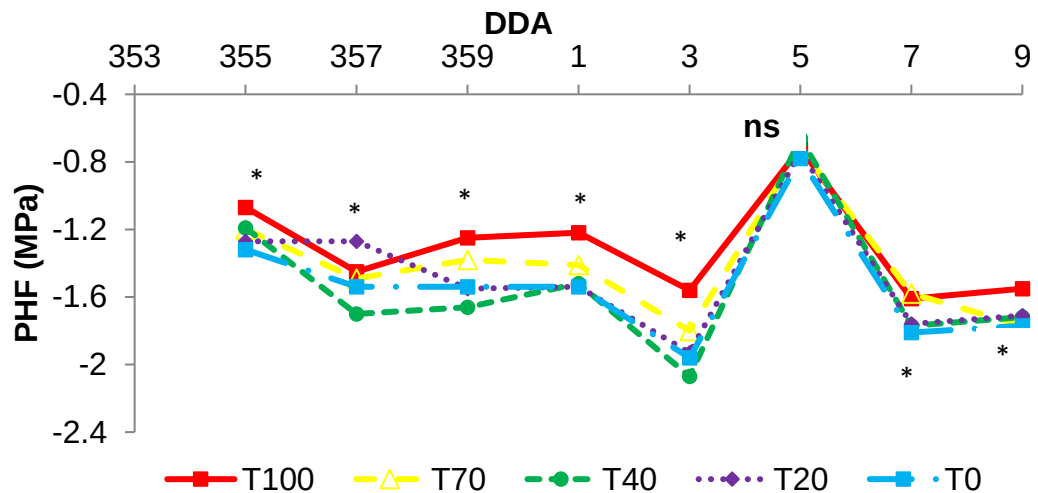
El efecto en la disponibilidad de agua en el suelo de los cinco tratamientos de riego impuestos a la quinoa en el periodo fenológico de llenado de grano se observa en la Figura 4. Los niveles alcanzados de agua disponible en el suelo para la planta fueron los planteados para cada tratamiento. Destaca la estabilidad en la humedad de suelo a capacidad de campo en el tratamiento que mantuvo la humedad del suelo en un rango cercano al 100 % AW. Por otra parte, el tratamiento T0 (que se regaría cuando se alcanzara el 0 % de AW) mantuvo una disminución constante de la humedad hasta el día de año (DDA) 362, con un cambio posterior en la tasa de extracción de agua en el perfil de suelo analizado a partir de esa fecha, por lo que no fue necesario el riego. Así, el T100 recibió seis riegos en los 26 días evaluados, el T70 recibió tres riegos, mientras que el T40 y T20 recibieron sólo un riego para dicho periodo fenológico.



**Figura 4.** Evolución de agua disponible para la planta en el perfil de suelo (AW), respecto a los días del año (DDA) en el periodo fenológico desde llenado de grano a madurez fenológica, para cinco tratamientos de riego: T0, T20, T40, T70 y T100 (riego cuando AW alcance niveles de 0, 20, 40, 70 y 100% en el perfil de suelo en la zona de raíces de 60 cm de profundidad). T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de agua. Elaboración propia.

## 5.2. Potencial hídrico foliar

La Figura 5 muestra, a partir del DDA 357, una estabilidad de potencial hídrico foliar a lo largo del periodo evaluado, lo que indicaría una adaptabilidad al estrés hídrico en el periodo fenológico en estudio.



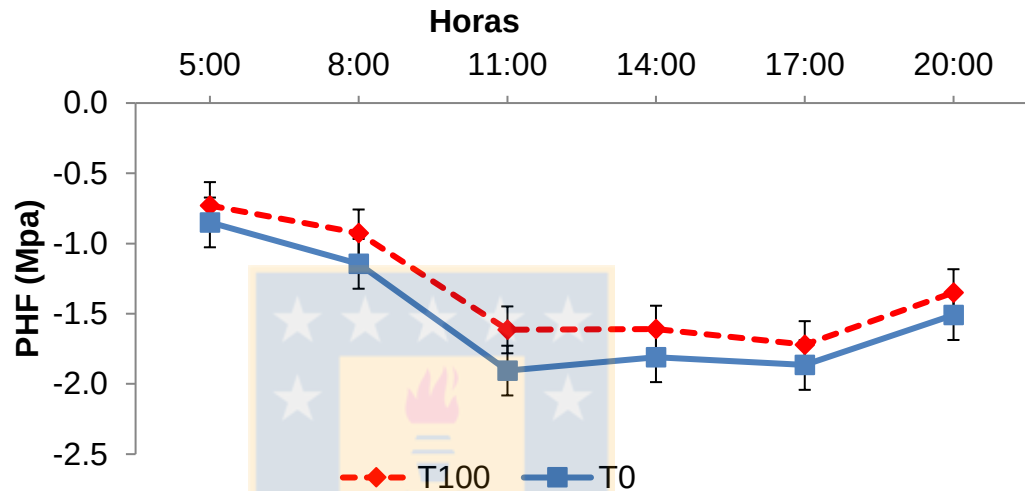
**Figura 5.** Evolución del potencial hídrico foliar (PHF) del genotipo Morado al medio día solar y en sus respectivos días de medición (DDA día del año). Cada punto es un promedio de 4 mediciones en cada tratamiento de riego: T0, T20, T40, T70 y T100 (riego cuando el porcentaje de agua disponible, AW, alcance niveles de 0, 20, 40 y 70% en el perfil de suelo en la zona de raíces). T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de agua. \*diferencias significativas entre tratamientos para el día de medición. ns (no hay diferencias significativas). Elaboración propia.

Para las mediciones de PHF hubo diferencias estadísticas en el día 355 de T100 con T20 y T0, patrón que se repite con excepción de los días 357 y 9. Por otra parte, se observa que el día 5 no existen diferencias significativas (ns) entre los tratamientos respecto al potencial hídrico foliar.

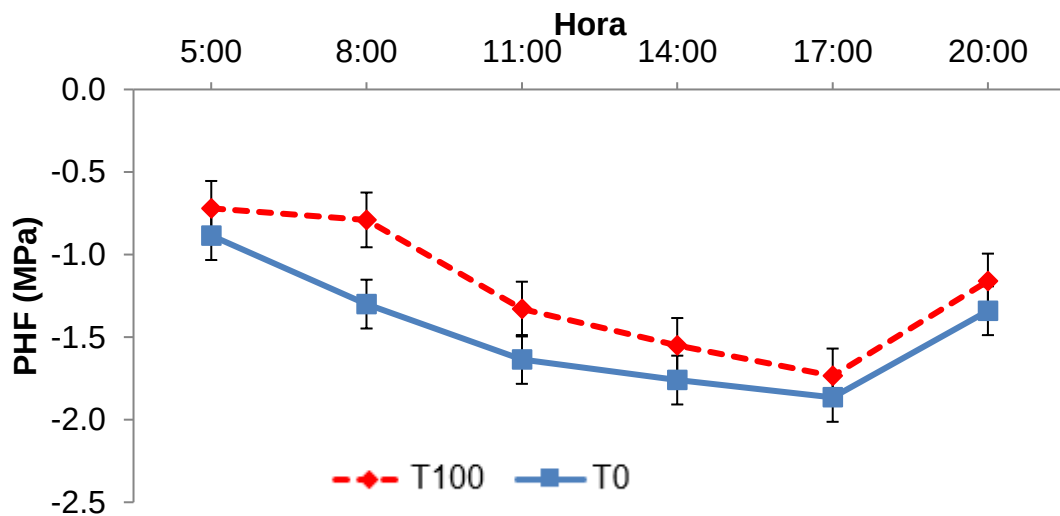
El efecto del nivel de estrés hídrico alcanzado en la planta se refleja en el potencial hídrico foliar a través de las horas del día (Figuras 6 y 7). Sólo para algunas horas alrededor del mediodía se detectó diferencias entre el



tratamiento regado constantemente (T100) y el que no se regó durante el periodo fenológico de estudio (T0), mostrando un comportamiento similar en las curvas. Los valores de PHF de T100 mayores a T0 se atribuyen a los mayores niveles de agua disponible en el suelo en dicho tratamiento.



**Figura 6.** Evolución horaria del potencial hídrico foliar (PHF) del genotipo Morado (27 diciembre 2015, DDA 361). Barras verticales indican  $\pm$  una desviación estándar. Cada medición es el promedio de 4 repeticiones para cada tratamiento de riego: T100 y T0 (T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de humedad aprovechable en el suelo y T0 es el tratamiento de no riego). Elaboración propia.



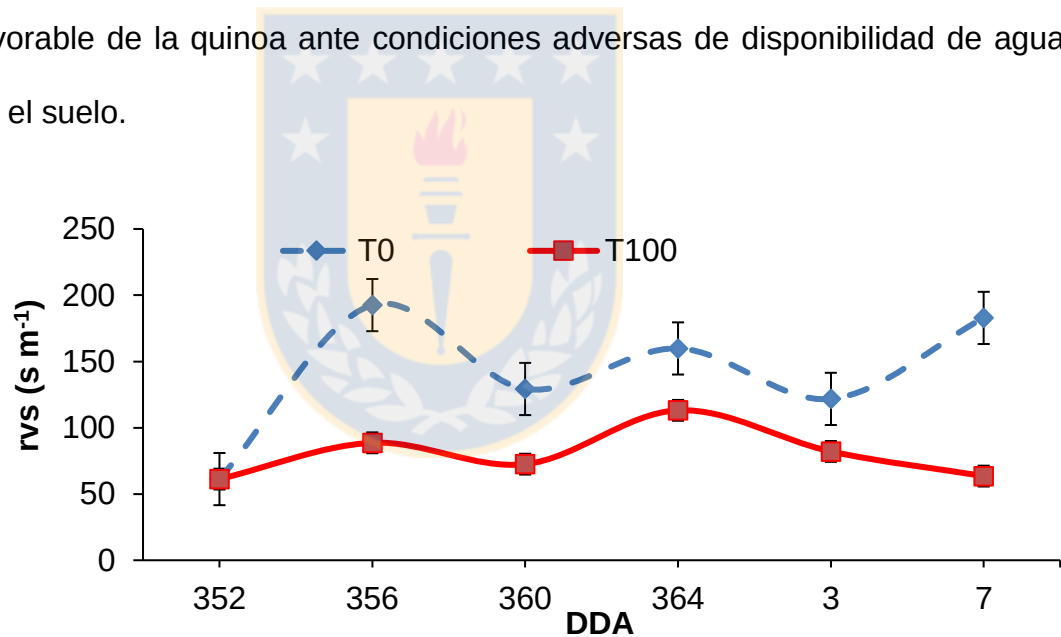
**Figura 7.** Evolución del potencial hídrico foliar promedio (PHF) del genotipo Morado desde el amanecer hasta el atardecer (4 enero 2016, DDA 4). Barras verticales indican  $\pm$  una desviación estándar. Cada medición es el promedio de 4 repeticiones para cada tratamiento de riego: T100 y T0 (T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de humedad aprovechable en el suelo y T0 es el tratamiento de no riego). Elaboración propia.

Se observó un comportamiento similar para ambos tratamientos extremos, donde comenzando el día la planta muestra valores de PHF más elevados que al medio día. Esta situación se atribuye a que antes del amanecer la planta se encuentra en mejor condición hídrica, pero, con el transcurso del día aumenta el estrés hídrico proporcionalmente en T0 y T100. Posteriormente, a partir de las 17 horas, comienza la recuperación del estatus hídrico del tejido vegetal y así disminuye el nivel de estrés, lo que se refleja en el aumento del potencial hídrico foliar (PHF).

Para la quinoa, los valores obtenidos de PHF al medio día se corresponden a los -1,5 a -3,0 MPa informados por García et al. (1992). Lo anterior demuestra que, a pesar de enfrentar condiciones de mayor sequía, esta planta presenta capacidades de mantener turgencia y firmeza en las hojas (Mujica et al., 2010).

### 5.3. Resistencia estomática

La resistencia estomática mostró diferencias en la respuesta del genotipo Morado (Figura 8) sólo para los tratamientos extremos de riego (T100 y T0). Esta diferencia en valores de resistencia estomática indicaría una respuesta favorable de la quinoa ante condiciones adversas de disponibilidad de agua en el suelo.



**Figura 8.** Evolución de la resistencia estomática ( $r_{vs}$ ) al medio día solar en el genotipo Morado, medida desde inicio de llenado de grano a madurez fenológica, para los tratamientos T0 y T100 (T100 es el tratamiento control de plena disponibilidad de agua y T0 es el tratamiento de no riego). Cada observación es un promedio de 4 mediciones para cada tratamiento. Las barras verticales indican  $\pm$  una desviación estándar. Elaboración propia.

Los valores de resistencia estomática en quinoa informados en otros experimentos de campo en el altiplano, oscilan entre 400 s m<sup>-1</sup> bajo condiciones de riego y 900 s m<sup>-1</sup> en seco (García et al., 1992), donde valores más altos de resistencia estomática implicarían una mayor probabilidad de cierre de estomas. Sin embargo, valores de resistencia estomática derivados desde González et al. (2011) para 10 variedades de quinoa creciendo en el altiplano en condiciones de campo y de sequía, y desde Jensen et al. (2000), para el cv. Kankolla creciendo en maceteros a nivel de mar, varían entre 40 s m<sup>-1</sup> y 220 s m<sup>-1</sup>, valores que son más cercanos a los obtenidos en el presente estudio. En la Figura 8 se observa que las plantas de T0 aumentaron sus valores de resistencia estomática, mostrando que al no recibir agua durante el periodo de estudio sus estomas fueron cerrándose al disminuir el agua aprovechable en el suelo (Figura 4). En contraste, las plantas de T100 muestran valores de resistencia estomática que se mantienen en el rango de 50 a 100 s m<sup>-1</sup>, valores significativamente menores a los del tratamiento no regado.

#### **5.4. Rendimiento y capacidad de antioxidantes**

El rendimiento en grano de la quinoa, genotipo Morado, se muestra proporcional al contenido de humedad de suelo en el periodo fenológico de llenado de grano a madurez fisiológica, en donde los tratamientos con menor disponibilidad de agua (T0 y T20) obtienen los menores rendimientos (Tabla

2). Sin embargo, dichas diferencias en rendimiento no alcanzaron a ser significativas, lo que se podría explicar por la alta capacidad de retención de agua del suelo en que se realizó el ensayo y/o adaptación de la planta a un periodo de estrés hídrico en la etapa fenológica en estudio. Los rendimientos en grano obtenidos fueron comparables a los obtenidos por Garrido et al. (2013), en donde para nueve genotipos se obtuvieron rendimientos del orden de 0,75 hasta los 2,03 t ha<sup>-1</sup>. Por otra parte, Fischer et al. (2013) en los genotipos Regalona, B080 y AG2010, en condiciones agroecológicas semejantes a la del presente estudio, muestra rendimientos de 3,6, 3,8 y 4,3 t ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Estos resultados dan cuenta de la variabilidad y potencial de rendimiento de la quinoa, dependiendo del genotipo en estudio y del manejo del cultivo.

**Tabla 2.** Rendimiento y cantidad de antioxidantes del grano de quinoa, genotipo Morado, para cinco tratamientos de riego (T0, T20, T40, T70 y T100) dentro del periodo fenológico entre llenado de grano y madurez fisiológica.

| Tratamiento | Rendimiento<br>(t ha <sup>-1</sup> ) | Antioxidantes<br>(umol g <sup>-1</sup> ) |
|-------------|--------------------------------------|------------------------------------------|
| T0**        | 2,91 ± 0,53*                         | 15,4 ± 5,3                               |
| T20         | 2,97 ± 0,47                          | 19,6 ± 4,8                               |
| T40         | 3,58 ± 0,55                          | 16,0 ± 1,7                               |
| T70         | 3,32 ± 0,32                          | 14,1 ± 4,1                               |
| T100        | 3,69 ± 0,85                          | 16,9 ± 1,2                               |

\*± una vez la desviación estándar. \*\*Cada tratamiento (T) representa el porcentaje de humedad aprovechable en el suelo antes de cada riego.

En relación a la cantidad de antioxidantes, no se observaron diferencias estadísticas entre tratamientos, así como tampoco una tendencia relacionada

a la humedad de suelo en el periodo de estudio. Sin embargo, la mayor producción de antioxidantes se obtuvo con T20, lo que coincide con lo obtenido por Fischer et al. (2013) en un ensayo similar de estrés hídrico realizado con los genotipos Regalona, B080 y AG. Adicionalmente, se destaca el rendimiento y cantidad de antioxidantes que obtuvieron las plantas regadas con el T40. Lo anterior confirmaría la necesidad de estudiar con mayor detalle la respuesta diferencial en calidad de grano de los genotipos de quinoa ante eventos de riego deficitario controlado.



## 6. CONCLUSIONES

Aún y cuando no se observaron diferencias significativas tanto en rendimiento como en calidad de grano de quinoa, genotipo Morado, se observó una respuesta positiva en rendimiento de grano a condiciones de incremento de humedad de suelo en el periodo fenológico comprendido entre el inicio de llenado de grano a madurez fisiológica. En cambio, la calidad de grano medida por la presencia de antioxidantes, no evidenció una tendencia entre los distintos tratamientos de humedad de suelo.

El potencial hídrico foliar tuvo un comportamiento similar en quinoa regada con un rango de 0 a 100% de disponibilidad de agua en el suelo a lo largo del periodo evaluado. Se registró una tendencia a mayores potenciales en el tratamiento con mayor disponibilidad de agua.

La resistencia estomática mostró un comportamiento diferencial entre los tratamientos extremos de manejo de humedad de suelo (T0 y T100), con menores resistencias en el tratamiento con mayor disponibilidad de agua.

El ensayo entregó información de que el riego deficitario controlado, en el periodo desde inicio de llenado de grano a madurez fisiológica, puede ser efectivo como estrategia de manejo para lograr ahorro de agua sin disminuir rendimiento, incluso mejorando la calidad, medida en la cantidad de antioxidantes que aporta el grano. La quinoa, genotipo Morado, al ser un cultivo resistente a condiciones adversas de disponibilidad de agua en el suelo,

muestra que puede mantener producción y calidad en condiciones de estrés hídrico en las etapas fenológicas finales (periodo en que disminuye la disponibilidad hídrica), lo que lo hace recomendable como alternativa en la rotación de cultivos.





## 7. LITERATURA CITADA

1. Bazile, D., C. Pulvento, A. Verniau, M.S. Al-Nusairi, D. Ba, J. Breidy, L. Hassan, M.I. Mohammed, O. Mambetov, M. Otambekova, N.A. Sepahvand, A. Shams, D. Souici, K. Miri and S. Padulosi. 2016. Worldwide evaluations of quinoa: Preliminary results from post international year of quinoa FAO projects in nine countries [en línea]. Front. Plant. Sci. 7: 850(Art. No.). <<https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00850>>. [Consulta: 29 enero 2021].
2. Fischer, S., R. Wilckens, J. Jara and M. Aranda. 2013. Controlled water stress to improve functional and nutritional quality in quinoa seed. Bol. Latinoam. Caribe Plantas Med. Aromát. 12(5): 457-468.
3. García, M., J.J. Vacher y J. Hidalgo. 1992. Estudio comparativo del comportamiento hídrico de dos variedades de quinua en el altiplano central. En: D. Morales y J.J. Vacher (Eds.). Actas del séptimo congreso internacional sobre cultivos andinos. 04-08 febrero, 1991. ORSTOM. IBTA. CRDI. La Paz, Bolivia.
4. García, M., D. Raes and S.E. Jacobsen. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. Agric. Water Manag. 60(2): 119-134.
5. Garrido, M., P. Silva, H. Silva, R. Muñoz, C. Baginsky y E. Acevedo. 2013. Evaluación del rendimiento de nueve genotipos de quinua

- (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo diferentes disponibilidades hídricas en ambiente mediterráneo. *Idesia* 31(2): 69-76.
6. Geerts, S., D. Raes, M. Garcia, J. Vacher, R. Mamani, J. Mendoza, R. Huanca, B. Morales, R. Miranda, J. Cusicanqui and C. Taboada. 2008. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Eur. J. Agron.* 28(3): 427-436.
7. González, J.A., M. Bruno, M. Valoy and F.E. Prado. 2011. Genotypic variation of gas exchange parameters and leaf stable carbon and nitrogen isotopes in ten quinoa cultivars grown under drought. *J. Agron. Crop Sci.* 197(2): 81-93.
8. Jensen, C.R., S.-E. Jacobsen, M.N. Andersen, N. Núñez, S.D. Andersen, L. Rasmussen and V.O. Mogensen. 2000. Leaf gas exchange and water relation characteristics of field quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd) during soil drying. *Eur. J. Agron.* 13(1): 11-25.
9. Miján de la Torre, A. 2002. Técnicas y métodos de investigación en nutrición humana. Glosa. Barcelona, España.
10. Pozo, A. del, P. del Canto. 1999. Áreas agroclimáticas y sistemas productivos en la VII y VIII regiones. Serie Quilamapu N°113. INIA Quilamapu. Chillán, Chile.

11. PROINPA (Bolivia). 2011. Contexto general. pp: 3-6. En: La quinua: cultivo milenario para contribuir a la seguridad alimentaria mundial. FAO. Roma, Italia.
12. Razzaghi, F., F. Plauborg, S.-E. Jacobsen, C.R. Jensen and M.N. Andersen. 2012. Effect of nitrogen and water availability of three soil types on yield, radiation use efficiency and evapotranspiration in field-grown quinoa. *Agric. Water Manag.* 109: 20-29
13. Repo de Carrasco, R., C.R. Encina. 2008. Determinación de la capacidad antioxidante y compuestos fenólicos de cereales andinos: quinua (*Chenopodium quinoa*), kañiwa (*Chenopodium pallidicaule*) y kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Rev. Soc. Quím. Perú* 74(2): 85-99.
14. Stolpe, N.B. 2006. Descripciones de los principales suelos de la Octava Región de Chile. Publicaciones del Departamento de Suelos y Recursos Naturales N°1. Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía. Chillán, Chile.