



Capítulo 8
MANEJO DEL AGUA
DE RIEGO EN QUÍNOA

Rafael López-Olivari

8.1 Introducción

La intensidad y frecuencia de las precipitaciones han estado cambiando en Chile y desde la Región de La Araucanía hacia el sur han disminuido aproximadamente entre 20 y 30%, respecto a la pluviometría histórica entre septiembre y marzo, afectando directamente los períodos de crecimiento y desarrollo de la quínoa (López-Olivari, 2016). Esto conlleva a la necesidad de tomar medidas preventivas adelantándose con soluciones en este tema y optimizar el uso del recurso hídrico enfocado a incrementar el rendimiento y calibre del grano. A pesar que el cultivo de quínoa se cultiva bajo una condición de lluvia natural ("secano"), es necesario implementar un manejo del agua intra predial incorporando las cuatro preguntas básicas: ¿Por qué regar?, ¿Cómo regar?, ¿Cuándo regar? y ¿Cuánto regar?, y de esta manera acercarse al rendimiento potencial de la quínoa. Para aclarar adecuadamente estas preguntas es necesario conocer, entender y aplicar conceptos básicos de suelo, de planta, de clima y de agua de riego y sus interacciones. Una apropiada respuesta a dichas preguntas permite lograr y obtener buenos resultados al final de los procesos productivos. Además, ayuda a una buena gestión hídrica, pudiendo cuantificar la cantidad de agua que entra y sale del sistema (balances hídricos). Sin embargo, para realizar apropiadamente dichos manejos, es necesario cuantificar la cantidad óptima de agua que necesita la quínoa perteneciente al grupo "ecotipo de la costa" (Fuentes *et al.*, 2009), considerando características topoclimáticas y etapas fenológicas.

8.2 Antecedentes Generales

8.2.1 Ubicación y aspectos agronómicos

Para cuantificar la cantidad de agua de riego a aplicar al cultivo de quínoa se establecieron dos unidades experimentales en la localidad de INIA Carillanca (sector valle central, comuna de Vilcún, Chile: 38°41'34.25" S; 72°24'40.35" O; 189 m.s.n.m.) y en la localidad de Tranapunte (Sector costa, comuna de Carahue, Chile: 38°41'23.55" S; 73°21'11.62" O; 66 m.s.n.m.) durante 3 temporadas agrícolas (2015-2016, 2016-2017 y 2017-2018). Se utilizaron dos genotipos de quínoa: el genotipo CQU 386 y la variedad Regalona Baer. Además, la aplicación de nitrógeno fue parcializado (siembra, 4 y 6 hojas desplegadas), mientras que el fósforo fue aplicado todo a la siembra y el potasio fue parcializado (siembra y 4 hojas desplegadas). Adicionalmente, se incorporó magnesio, azufre y boro a la siembra. Finalmente, se aplicó un herbicida preemergente y durante el período de crecimiento y desarrollo de la quínoa se realizaron limpiezas manuales de las malezas. El cultivo fue sembrado con un espaciamiento entre hilera de 40 cm a una dosis de siembra de 10 kg/ha en ambas localidades. Las fechas de siembra para INIA Carillanca durante las tres temporadas fueron 2; 23 y 20 de septiembre para las temporadas 2015-2016; 2016-2017 y 2017-2018, respectivamente (Foto 1a). Para el caso de la variedad Regalona Baer la cosecha fue el 25 de febrero durante la temporada

2015/2016 y el 14 de febrero para las temporadas 2016-2017 y 2017-2018. Mientras que el genotipo CQU 386 fueron el 16 de marzo; 24 y 28 de febrero durante las temporadas 2015/16; 2016-2017 y 2017-2018, respectivamente. Para la localidad de Tranapunte las fechas de siembra fueron el 10; 13 y 15 de septiembre durante las temporadas 2015-2016; 2016-2017 y 2017-2018, respectivamente (Foto 1b). Así, para esta localidad la variedad Regalona Baer fue cosechada el 25 de febrero, 9 de febrero y 23 de marzo para las temporadas 2015-2016; 2016-2017 y 2017-2018, respectivamente. El genotipo CQU 386 fue cosechado el 16 de marzo; 27 de febrero y 23 de marzo para las temporadas 2015-2016; 2016-2017 y 2017-2018, respectivamente.



Foto 1. Momento de siembra del cultivo de quínoa para los ensayos de riego.
a) INIA Carillanca y b) Tranapunte.
Fuente: Rafael López-Olivari (INIA Carillanca)

8.2.2 Información de suelo

Antes de realizar la programación del riego en el cultivo de quínoa es necesario conocer las propiedades físico-hídricas del suelo como: textura, materia orgánica, densidad aparente y las curvas de retención de humedad gravimétrica (% p/p). Para ello, se debe extraer una muestra de suelo por cada estrata en el perfil y enviarlo a un laboratorio especializado. Lo anterior permite determinar la acumulación de humedad del suelo real en cada estrata y del perfil completo de cada lugar. Además, esta información es relevante para la calibración de los sensores de humedad de suelo y cálculo de las frecuencias de riego, usando el concepto de capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) hasta cierto umbral de agotamiento de la humedad de suelo en el perfil radicular (UR) (Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades físico-hídricas presentes en los suelos de cada localidad evaluada

Localidad	Textura	MO (%)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Da (g/cm ³)	CC (%θ)	PMP (%θ)	UR (%)
INIA Carillanca	Franco limoso	13,41	25,0	54,3	20,7	0,79	51,88	26,72	61
Tranapunte	Franco limoso	13,69	6,1	68,3	25,6	0,88	49,10	28,50	61

MO: materia orgánica; Da: Densidad aparente; CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; UR: Umbral de riego de acuerdo a García (2003).

A pesar que el suelo entre la localidad de INIA Carillanca y Tranapunte son similares, presentan un porcentaje de arena diferente. Esto puede influir potencialmente de manera directa en la frecuencia de los riegos del cultivo, ya que el suelo de INIA Carillanca presenta un porcentaje de arena mayor que el de Tranapunte, pudiendo requerir riegos con una mayor frecuencia. Así, conocer las propiedades físico-hídricas del suelo permitiría determinar la capacidad de estanque o de almacenamiento de humedad, requisito importante para realizar una adecuada programación de riego en el cultivo de quínoa.



Foto 2. Muestreo de profundidad efectiva y total de las raíces en un período de crecimiento y desarrollo del cultivo de quínoa en la localidad de INIA Carillanca. Fuente: Rafael López-Olivari (INIA Carillanca)

Finalmente, se aconseja realizar una calicata en el lugar antes de sembrar, con el propósito de observar en el perfil si existe más de una estrata y estimar potencialmente hasta qué profundidad llegarían las raíces del cultivo. Si hay más de una estrata de suelo en el perfil se aconseja realizar un análisis de las propiedades físico-hídricas por estrata (textura, densidad aparente, materia orgánica y curva de retención de humedad). Otra opción es sacar un análisis de suelo completo donde además incorpora información de los macro y micronutrientes que sirven para realizar una fertilización racionalizada. Adicionalmente, dentro del perfil de suelo es importante revisar hasta qué profundidad efectiva llegan las raíces de la quínoa durante su ciclo productivo. Ya que de esto depende hasta dónde se debe mojar el suelo para mantener una buena humedad en la zona de raíces. Durante las tres temporadas evaluadas el promedio de profundidad efectiva y total de raíces en las dos localidades fueron entre 25-30 y 35-40 cm, respectivamente (Foto 2).

8.2.3 Información de clima

Los registros de las variables meteorológicas fueron realizados usando una estación meteorológica automática (EMA) ubicada bajo un pasto verde en referencia con crecimiento activo de acuerdo a lo propuesto por Allen *et al.*, (1998). La EMA fue utilizada para la determinación de la evapotranspiración de referencia (ET_o), pluviometría total (P_p) y efectiva (P_{pef}) en las dos localidades (INIA Carillanca y Tranapunte). Los datos diarios de ET_o, P_p y P_{pef} fueron promediados para las tres temporadas evaluadas y se muestran en la Figura 1. Para la localidad de INIA Carillanca entre siembra (septiembre) y cosecha (febrero-marzo), se pudo observar 7 eventos de precipitación efectiva (Eventos diarios sobre 11 mm) (Figura 1a). Estos eventos son efectivos, ya que alcanzan a humedecer la profundidad efectiva de raíces, que en este caso alcanzó a los 25 cm dentro del perfil de suelo. Sin embargo, para la localidad de Tranapunte entre siembra (septiembre) y cosecha (febrero-marzo) se observaron 15 eventos diarios sobre los 11 mm (Figura 1b), alcanzando una profundidad efectiva de raíces de 30 cm dentro del perfil de suelo.

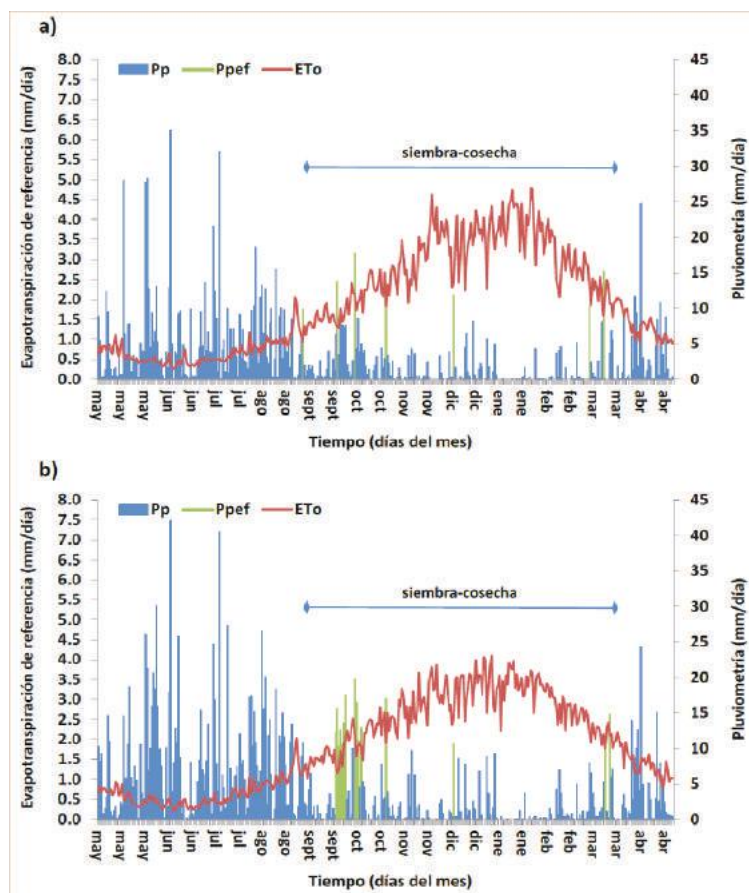


Figura 1. Valores promedio diarios de la evapotranspiración de referencia (ET_o), pluviometría efectiva y total de las tres temporadas evaluadas en la localidad de INIA Carillanca (a) y Tranapunte (b). Fuente: Rafael López-Olivari (INIA Carillanca)

La cantidad de lluvia promedio efectiva y total desde siembra a cosecha fue de 15 y 374 mm para las tres temporadas en la localidad de INIA Carillanca, respectivamente. Mientras que en la localidad de Tranapunte estos valores fueron de 37 y 425 mm, respectivamente. Así, los eventos de lluvia que no superen los 11 mm no se consideran como aporte de agua natural entre siembra a cosecha en ambas localidades.

Otro aspecto relevante es que la evapotranspiración de referencia (ET_o) en la localidad de INIA Carillanca fue mayor (4,78 mm/día) a la registrada en la localidad de Tranapunte (4,1 mm/día) (Figura 1a y 1b), alcanzando ambos los valores más altos en enero y coincidiendo con uno de los períodos críticos del cultivo (final del llenado de grano para INIA Carillanca y pleno llenado de grano para Tranapunte). La ET_o acumulada promedio desde siembra (septiembre) a cosecha (marzo) para las tres temporadas, fue de 546 mm en la localidad de INIA Carillanca, mientras que en la localidad de Tranapunte en el mismo período fue de 510 mm. Lo anterior indica que existe una mayor demanda hídrica en la localidad de INIA Carillanca (más seca) que en la localidad de Tranapunte (menos seca).

8.2.4 Fenología de la quínoa

La fenología es el período en la cual se van cumpliendo las diferentes etapas o fases de crecimiento y desarrollo de un cultivo. El ciclo de las plantas cambia con el genotipo y con los factores edafoclimáticos, es decir, las plantas de un mismo genotipo sembradas bajo diferentes condiciones ambientales pueden presentar desfases en los estados de desarrollo bajo un mismo tiempo cronológico. Así, el uso de escalas fenológicas se utiliza básicamente para realizar observaciones y hacer prácticas de manejo agronómico específicas en una etapa de desarrollo del cultivo para mejorar un determinado objetivo productivo. La fenología de la quínoa fue seguida desde siembra a cosecha con registro fotográfico durante las tres temporadas agrícolas y después fueron extrapoladas a la escala BBCH (Sosa-Zuñiga *et al.*, 2017). Las principales etapas de crecimiento y desarrollo de la quínoa se pueden observar en la figura 2, mientras que la descripción general de las etapas fenológicas para los dos genotipos evaluados en las localidades de INIA Carillanca y Tranapunte evaluadas para las tres temporadas agrícolas se muestran en el cuadro 2. En este contexto, el genotipo CQU 386 presenta un ciclo fenológico más largo que la variedad Regalona Baer, donde a partir del estado panoja emergida el genotipo CQU 386 empieza alargar su ciclo de desarrollo. Además, existe un traslape entre las etapas fenológicas de desarrollo de hojas-formación de yemas laterales y aparición de panícula. Así, el rango promedio del período fenológico completo de la variedad Regalona Baer y el genotipo CQU 386 fueron aproximadamente de 147 y 161 días, respectivamente. Por su parte, en la localidad de Tranapunte se observaron casi los mismos patrones que en la localidad de INIA Carillanca, donde el genotipo CQU 386 presenta un ciclo de desarrollo más largo comparado a la variedad Regalona Baer, alargando sus estados desde inicio de floración hacia adelante. Al comparar las dos localidades se puede observar que hubo un desfase de dos semanas aproximadamente

en las ocurrencias de las etapas fenológicas en ambos genotipos. Sin embargo, en la localidad de Tranapunte los estados de crecimiento vegetativo se concentraron principalmente en el mes de octubre, mientras que en la localidad de INIA Carillanca estuvieron entre octubre y noviembre. Por su parte las etapas de desarrollo de la quínoa se extendieron por más tiempo en la localidad de Tranapunte presentándose entre noviembre y enero, mientras que en la localidad de INIA Carillanca se concentraron principalmente entre la segunda semana de noviembre y casi todo el mes de enero. Lo anterior puede estar asociado a variables climáticas (temperatura y precipitaciones), fechas de siembra y fotoperíodo de los materiales (Lozano y Rubiano, 2007). Pero, específicamente el llenado de grano (entre cuajado y grano maduro o seco) en la localidad de INIA Carillanca ocurre aproximadamente desde la segunda semana de diciembre hasta la segunda semana de enero para la variedad Regalona Baer, mientras que para el genotipo CQU 386 esta etapa ocurre entre la tercera semana de diciembre y la primera semana de febrero.

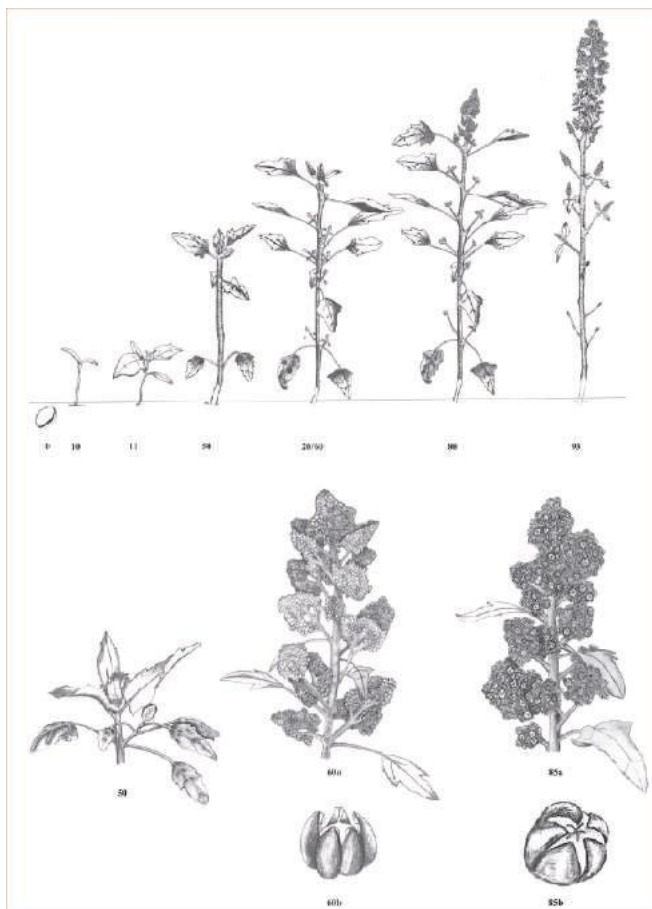


Figura 2. Etapas generales de crecimiento y desarrollo del cultivo de quínoa. 0: Germinación; 10: Cotiledones completamente emergidos; 11: Primer par de hojas visibles; 20: Yemas laterales visibles; 50: Inflorescencia presente pero envuelta por hojas; 60: Inicio antesis; 80: Maduración del grano (grano lechoso-seco); 85: Contenido de grano acuoso-pastoso; 93: Hojas de la primera mitad de abajo empiezan a caer. (Sosa-Zuñiga et al., 2017)

Lo anterior indica que el genotipo CQU 386 es más tardío que la variedad Regalona Baer en ambas localidades evaluadas. Para la localidad de Tranapunte el llenado de grano de la quínoa se encuentra aproximadamente entre la tercera semana de diciembre y la segunda semana de febrero para la variedad Regalona Baer. Sin embargo, para el genotipo CQU 386 esta etapa ocurre entre la cuarta semana de diciembre y la tercera semana de febrero. Así, los altos rendimientos observados en ambos genotipos de quínoa en la localidad de Tranapunte pudo deberse a la mayor duración entre las etapas de cuajado y grano maduro por las condiciones edafoclimáticas (menos seco), teniendo la planta más tiempo para llenar el grano comparado a la localidad de INIA Carillanca (más seco).

Cuadro 2. Rangos promedios mensuales de las principales etapas de crecimiento y desarrollo de la quínoa para la variedad Regalona Baer y el genotipo CQU 386 en las localidades de INIA Carillanca (Valle central) y Tranapunte (Costa)

		Meses																							
		Localidad de Catrillanca												Localidad de Tranapunte											
Genotipo	Descripción general	Sept			Oct			Nov			Dic			Ene			Feb			Mar					
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Regalona BAER	Siembra - emergencia																								
	Emergencia - desarrollo de hojas																								
	Desarrollo de hojas - formación de brotes																								
	Formación de brotes - panoja emergida																								
	Panoja emergida - Inicio de floración																								
	Inicio de floración - Cuajado																								
	Cuajado - grano lechoso																								
	Grano lechoso - grano maduro (listo para cosechar)																								
	Grano maduro - inicio senescencia (planta quínoa)																								
Ecotipo CQU 386	Siembra - emergencia																								
	Emergencia - desarrollo de hojas																								
	Desarrollo de hojas - formación de brotes																								
	Formación de brotes - panoja emergida																								
	Panoja emergida - Inicio de floración																								
	Inicio de floración - Cuajado																								
	Cuajado - grano lechoso																								
	Grano lechoso - grano maduro (listo para cosechar)																								
	Grano maduro - inicio senescencia (planta quínoa)																								

		MESES																							
		Localidad de Tranapunte												Localidad de Catrillanca											
Genotipo	Descripción general	Sept			Oct			Nov			Dic			Ene			Feb			Mar					
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
Regalona BAER	Siembra - emergencia																								
	Emergencia - desarrollo de hojas																								
	Desarrollo de hojas - formación de brotes																								
	Formación de brotes - panoja emergida																								
	Panoja emergida - Inicio de floración																								
	Inicio de floración - Cuajado																								
	Cuajado - grano lechoso																								
	Grano lechoso - grano maduro (listo para cosechar)																								
	Grano maduro - inicio senescencia (planta quínoa)																								
Ecotipo CQU 386	Siembra - emergencia																								
	Emergencia - desarrollo de hojas																								
	Desarrollo de hojas - formación de brotes																								
	Formación de brotes - panoja emergida																								
	Panoja emergida - Inicio de floración																								
	Inicio de floración - Cuajado																								
	Cuajado - grano lechoso																								
	Grano lechoso - grano maduro (listo para cosechar)																								
	Grano maduro - inicio senescencia (planta quínoa)																								

8.2.5 Programación de riego en quínoa

La programación del riego es una metodología que permite determinar el nivel óptimo de riego a aplicar durante todo el crecimiento y desarrollo de los cultivos. El fin, optimizar y ser eficaces en el uso del agua para maximizar la producción y calidad del objetivo productivo (principalmente rendimiento en grano). Para determinar de manera más precisa los requerimientos hídricos de la quínoa, es necesario obtener información específica del suelo, la planta, el clima y el método de riego (Figura 3). Una vez que se interacciona la información se puede definir la cantidad de agua a aplicar (tiempo de riego) y en qué momento aplicarla (frecuencia de riego), durante las diferentes etapas fenológicas de la quínoa.

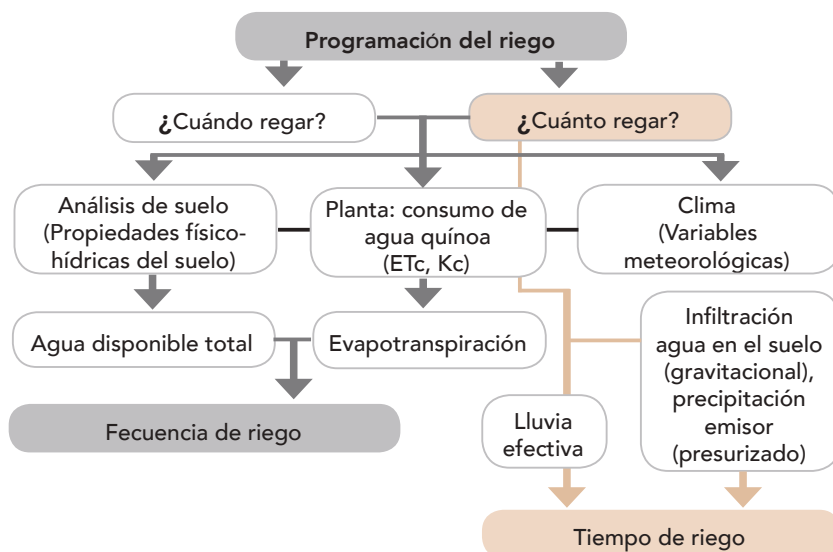


Figura 3. Diagrama de flujo programación de riego en el cultivo de la quínoa considerando la interacción del suelo-planta-clima, lluvia efectiva y método de riego. Fuente: modificado de López-Olivari, 2016.

La **frecuencia de riego** (Fr) se refiere al momento que debe ser aplicado el agua de riego o cada cuántos días regar el cultivo de quínoa. Para determinar el momento del riego hay que considerar el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) y la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo (Agua disponible total por las plantas), hasta profundidad efectiva de raíces. Lo anterior depende de variables climáticas (Temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar y precipitación), de cultivo (Períodos fenológicos de la quínoa), de suelo (Textura y propiedades físico-hídricas del suelo) y del manejo agronómico (Densidad de siembra, preparación de suelo, entre otros). Además de calcular la frecuencia de riego matemáticamente, existe la posibilidad de utilizar como un indicador sensores de humedad (Foto 3 a y b), instalados en la zona efectiva de raíces. Estos sensores fueron utilizados en las dos localidades para determinar las frecuencias de riego. Finalmente, la otra forma es verificar de una manera

visual o empírica a través del uso de un barreno o pala después de haber aplicado un riego o después de una lluvia intensa, observando si el agua aplicada (agua de riego o lluvia) ha llegado a la profundidad efectiva de raíces del cultivo.



Foto 3. Sensores de humedad de suelo instalados en los ensayos de riego. a) Tranapunte, b) INIA Carillanca. Fuente: Rafael López-Olivari (INIA Carillanca)

Los registros de los sensores de humedad de suelo instalados en las dos localidades para controlar las frecuencias de riego se pueden observar en el gráfico 2. Se puede apreciar que en la localidad de INIA Carillanca (Figura 4 a) se tuvo que realizar más cantidades de riego que en la localidad de Tranapunte (Figura 4 b), debido principalmente a condiciones edafoclimáticas. Adicionalmente, desde siembra a cosecha se registraron 9, 10 y 3 eventos de lluvia efectiva sobre 11 mm para INIA Carillanca durante las temporadas 2015-2016; 2016-2017 y 2017-2018, respectivamente. Mientras que para Tranapunte se registraron 10, 8 y 12 eventos sobre 11 mm para las temporadas 2015-2016; 2016-2017 y 2017-2018. Hay que considerar que las frecuencias de riego fueron variables en el tiempo, ya que dependen del agotamiento del agua en el suelo.

En general, las frecuencias de riego para quinoa estarían entre 5 – 8 días para la localidad de INIA Carillanca y entre 10 – 20 días para la localidad de Tranapunte, dependiendo de los aportes de agua lluvia en cada zona.

Al comparar los registros de la humedad presente en el suelo se puede observar claramente que a pesar de tener la misma textura de suelo en las dos localidades existe una mayor acumulación y persistencia de la humedad en el suelo para la localidad de Tranapunte, debido a que presenta menor cantidad de arena (Cuadro 1). En general, estos gráficos presentan variables que permiten manejar la frecuencia de los riegos con solo tener información de las propiedades físico-hídricas del suelo. En este caso se definió que cuando existiera una pérdida de humedad del suelo de un 61% de la humedad aprovechable total (HA), HA es la diferencia entre la humedad a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), correspondería regar el cultivo de quínoa. Este 61% de pérdida de la HA es el "Umbral de Riego o Criterio de riego" (Línea

punteada de las Figuras 4a y 4b). Esta gran pérdida de humedad está dada porque el cultivo de quínoa es una especie que se adapta bastante bien a la escasez hídrica, por lo que se acepta que estando en esta condición no habría estrés hídrico (García, 2003; Geerts *et al.*, 2008a; Geerts *et al.*, 2009). Adicionalmente, se puede decir que el cultivo de quínoa presenta una mejor respuesta en crecimiento y desarrollo en la localidad de Tranapunte comparado a la localidad de INIA Carillanca, debido probablemente a la interacción existente entre las relaciones de suelo-planta-clima.

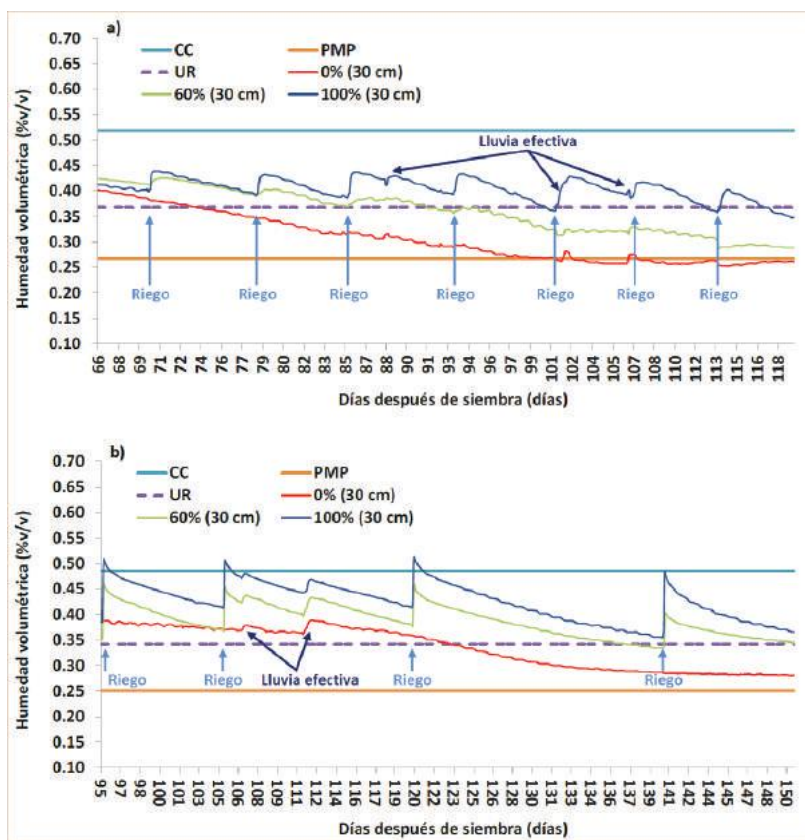


Figura 4. Extracto del comportamiento de la humedad volumétrica de suelo durante la temporada de crecimiento y desarrollo de la quínoa en las localidades de INIA Carillanca (a) y Tranapunte (b). CC: Capacidad de campo; PMP: Punto de marchitez permanente; UR: Umbral de riego; 100% (Bien regado); 60% (Aplicación 60% del bien regado) y 0% (Secano). Número entre paréntesis representa la profundidad efectiva de raíces. Fuente: Rafael López Olivari, 2016

El **Tiempo de Riego** (T_r) es el período de tiempo que debe permanecer el agua pasando por un surco de riego, goteando o asperjando sobre el suelo para que penetre hasta la profundidad efectiva de raíces. También se puede definir como el tiempo (número de horas o minutos) en que el agua debe escurrir sobre el suelo para que pueda infiltrar y mojar la zona radicular efectiva. Para las zonas en donde existe aporte de lluvias en los períodos de crecimiento y desarrollo de la quínoa deben ser

consideradas, ya que un porcentaje de los requerimientos de agua pueden ser suplidos por estas lluvias. Los tiempos de riego (T_r) pueden ser determinados utilizando varias expresiones o ecuaciones, dependiendo del tipo de método de riego que se utilice. Así, para calcular el tiempo de riego es necesario conocer los mm de agua que la quínoa pierde por la demanda atmosférica (evapotranspiración de cultivo; mm/día) o los mm de agua que se deben reponer a una profundidad efectiva de raíces (lámina bruta; mm) y dividirlo por la precipitación del equipo de riego en mm/h (considerar la eficiencia de aplicación del sistema).

Durante las tres temporadas agrícolas evaluadas se utilizó un sistema de riego por goteo, donde en cada hilera se instalaron líneas de riego con goteros auto-compensados (goteros que descargan lo mismo entre un rango de presión que se encuentra aproximadamente entre 1 a 3 bares) espaciados a 0,33 m. La descarga de los goteros usados fue de 2 y 1,2 l h⁻¹ para los tratamientos de bien regado y aplicación de un 60% del agua del bien regado, respectivamente. En este caso los tiempos de riego fueron fijos para reponer la cantidad de humedad perdida entre el umbral de riego (UR) y capacidad de campo (CC). Así, los T_r usados fueron de 2 horas y 50 min (aplicación de 37,7 mm) en la localidad de INIA Carillanca, mientras que 3 horas 10 min (43,2 mm) fue el T_r en la localidad de Tranapunte. Además, los T_r pueden ser determinados de manera empírica a través de la aplicación de agua de riego en una cantidad de tiempo específica y verificar con alguna herramienta de campo si el agua aplicada pudo humedecer o no la zona efectiva de raíces.

8.2.6 Requerimientos hídricos en el cultivo de quínoa

Las cantidades de agua que necesita el cultivo de quínoa no están bien definidas en el mundo dado que es un cultivo sembrado principalmente en secano. Sin embargo, como no se sabe las potenciales respuestas que pueda tener este cultivo a la aplicación de agua, especialmente en el sur de Chile, es necesario tener datos cuantificados de las necesidades hídricas. Así, la información presentada en este capítulo puede servir potencialmente como una guía para manejar y optimizar el agua de riego para los agricultores y productores que tengan acceso al riego en el cultivo de quínoa. En el cuadro 3 se muestra la cantidad de agua que ha sido aplicada por las lluvias efectivas, los riegos de acuerdo a los criterios entregados previamente y el requerimiento hídrico total por temporada. En general, las cantidades promedios de agua aplicada total (riego + lluvia efectiva) en el cultivo de quínoa en la localidad de INIA Carillanca para las tres temporadas evaluadas fueron de 2.808 y 1.860 m³ ha⁻¹ para los tratamientos de bien regado y 60% del bien regado, respectivamente. Sin embargo, las cantidades promedios de agua aplicada al cultivo para la localidad de Tranapunte fueron de 2.303 y 1.741 m³ ha⁻¹ para los tratamientos bien regado y 60% del bien regado, respectivamente. Adicionalmente, en la localidad de Tranapunte se aplicaron en promedio un 18 y 6,4% menos de agua para los tratamientos bien regado y 60% del bien regado comparado a INIA Carillanca, respectivamente.

Cuadro 3. Requerimientos hídricos totales de agua (riego + lluvia efectiva) según el balance hídrico de suelo durante todo el período de crecimiento y desarrollo del cultivo de quínoa para las localidades de INIA Carillanca y Tranapunte

Localidad/ temporada	Agua aplicada por riego (m ³ ha ⁻¹)	Agua aplicada por lluvia efectiva (m ³ ha ⁻¹)	Requerimiento hídrico total (m ³ ha ⁻¹)
INIA Carillanca			
2015-2016	2.045 (bien regado)	552	2.597
	1.227 (60% bien regado)	552	1.779
2016-2017	2.045 (bien regado)	696	2.741
	1.227 (60% bien regado)	696	1.923
2017-2018	3.018 (bien regado)	68	3.086
	1.811 (60% bien regado)	68	1.879
Tranapunte			
2015-2016	1.193 (bien regado)	1.173	2.366
	716 (60% bien regado)	1.173	1.889
2016-2017	1.295 (bien regado)	1.098	2.393
	777 (60% bien regado)	1.098	1.875
2017-2018	1.727 (bien regado)	422	2.149
	1.036 (60% bien regado)	422	1.458

Así, en un cultivo de quínoa en condiciones del altiplano se ha obtenido aplicaciones de agua de riego cercano a las 2.503 m³ ha⁻¹ bajo condiciones bien regadas (García *et al.*, 2003), mientras que en Turquía se han aplicado valores de agua de riego total entre 1.400 y 3.200 m³ ha⁻¹ (Kaya and Yazar, 2016) y entre 3.200 y 3.830 m³ ha⁻¹ (Lavini *et al.*, 2014) para una condición de bien regado. Sin embargo, en Egipto han encontrado buenos rendimientos con aplicaciones de agua por surco entre 3.955 y 6.921 m³ ha⁻¹ (Algozaibi *et al.*, 2017), mientras que en Bolivia han aplicado 5.480 m³ ha⁻¹ bajo condición de bien regado (Geerts *et al.*, 2008b). Así, las cantidades de agua de riego aplicada en los ensayos en ambas localidades estarían dentro de los promedios existentes en la literatura mundial.

Por otro lado, el agua aplicada por lluvia efectiva fue mucho más alta en la localidad de Tranapunte, por lo que el agua aplicada de manera artificial a través del riego fue bastante menor para ambos tratamientos, comparado a la localidad de INIA Carillanca. Lo anterior indica que en la localidad de Tranapunte se debe aplicar la mitad del agua de riego (sector costa) que en la localidad de INIA Carillanca (sector valle central) pero teniendo siempre en cuenta el aporte natural de las lluvias efectivas. Para la localidad de INIA Carillanca los riegos debieran comenzar a partir de noviembre (estado fenológico desarrollo de hojas) y terminar el riego aproximadamente entre 10 y 15 días antes del estado fenológico de grano maduro (Cuadros 2 y 4). En Tranapunte los riegos debieran empezar a fines de noviembre (estado fenológico panoja emergida – inicio floración) y terminar aproximadamente entre 10 y 15 días antes de la etapa grano maduro.

Cuadro 4. Número de riegos durante todo el crecimiento y desarrollo del cultivo de quínoa para las localidades de INIA Carillanca y Tranapunte

Localidad/ temporada	Número de riegos por mes						
	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo
INIA Carillanca							
2015-2016	-	-	-	2	3	-	-
2016-2017	-	-	1	3	1	-	-
2017-2018	-	-	1	4	3	-	-
Rango	-	-	0 a 1	2 a 4	1 a 3	-	-
Tranapunte							
2015-2016	-	-	-	1	2	1	-
2016-2017	-	-	-	2	1	-	-
2017-2018	-	-	-	2	1	1	-
Rango	-	-	-	1 a 2	1 a 2	0 a 1	-

8.2.7 Rendimiento de grano y riego deficitario en el cultivo de quínoa

Los rendimientos de grano para el cultivo de quínoa obtenidos para las diferentes temporadas agrícolas en la localidad de INIA Carillanca y Tranapunte se muestran en los cuadros 5 y 6. Así, en la localidad de INIA Carillanca y para una condición de bien regado (T1), déficit hídrico (T2) y seco (T3) se pueden obtener valores de rendimiento promedio de 3,8, 3,4 y 2,4 t ha⁻¹, respectivamente. Mientras que para la localidad de Tranapunte valores de rendimiento promedio de 5,2, 4,5 y 3,8 t ha⁻¹ para T1, T2 y T3, respectivamente. Así, los valores más altos en rendimiento fueron observados para la condición de bien regado y los valores más bajos fueron observados bajo una condición de agua de lluvia (secano) en ambos ambientes. Sin embargo, para la variedad Regalona Baer y el genotipo CQU 386 se pudo obtener para ambos genotipos un valor de rendimiento promedio de todos los niveles hídricos de 3,2 y 4,5 t ha⁻¹ para la localidad de INIA Carillanca y Tranapunte, respectivamente. Además, el rendimiento de grano podría ser el mismo o levemente inferior con un 40% menos de agua aplicada al cultivo de quínoa, siendo más marcado durante la temporada 2016-2017 (Cuadros 5 y 6).

Estudios de riego deficitario han mostrado que reduciendo el agua hasta un 50% del bien regado no tiene efecto sobre el rendimiento de la quínoa (Pulvento *et al.*, 2012; Razzaghi *et al.*, 2012). Respecto a la interacción entre los tratamientos de riego aplicados y los genotipos utilizados, no fueron estadísticamente significativos en ninguna de las tres temporadas agrícolas evaluadas en la localidad de INIA Carillanca, pero si hubo una interacción en la temporada 2015-2016 para la localidad de Tranapunte (Figura 5). Claramente, el genotipo CQU 386 presenta una mayor ganancia en rendimiento de grano en la localidad de Tranapunte, alcanzando porcentajes de 44, 26 y 24% comparado a la variedad Regalona Baer para los tratamientos T1, T2 y T3, respectivamente. Finalmente,

se puede observar que la variedad Regalona Baer fue más estable en el rendimiento de grano durante las tres temporadas agrícolas y para todos los tratamientos de riego aplicados comparado al Genotipo CQU 386 en ambas localidades. Este comportamiento de estabilidad fue observado en la zona central de Chile para materiales de quínoa del grupo "ecotipo de la costa" BAER y BAER II (Garrido *et al.*, 2013). Además, rendimientos entre 2 y 2,5 t ha⁻¹ se han alcanzado en Egipto bajo condiciones de riego (Algozaibi *et al.*, 2017). Así, García *et al.* (2003) y Geerts *et al.* (2008b) observaron valores entre 2,1 a 2,9 y 3,7 t ha⁻¹ en Bolivia para condiciones de bien regado y riego deficitario, respectivamente. En la zona central de Chile, se han obtenido rendimientos entre 1,9 y 2,2 t ha⁻¹ bajo condiciones de riego (Garrido *et al.*, 2013).

Cuadro 5. Rendimiento en grano a cosecha del cultivo de quínoa para los diferentes niveles hídricos y genotipos para la localidad de INIA Carillanca durante las tres temporadas agrícolas evaluadas

Tratamientos / riego promedio	Temporadas		
	2015-2016	2016-2017	2017-2018
Rendimiento (t ha ⁻¹)			
Niveles de humedad de suelo (NH)			
T1 (bien regado) / 2.808 m ³ ha ⁻¹	4,6 a	3,1 a	3,8 a
T2 (60% de T1) / 1.860 m ³ ha ⁻¹	3,9 ab	3,1 a	3,1 ab
T3 (secano) / 439 m ³ ha ⁻¹	3,6 b	1,8 b	1,8 b
Significancia	*	**	***
Variedad y genotipo (VE)			
CQU 386	4,5 a	2,6	2,5 b
Regalona Baer	3,6 b	2,7	3,4 a
Significancia	**	n.s.	***
NHxVE			
Significancia	n.s.	n.s.	n.s.

Promedios en una columna seguidos por la misma letra no difieren estadísticamente de acuerdo a la prueba Tukey con un nivel de confianza del 95% ($p \leq 0,05$). ANDEVA (* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; n.s.: no significativo).

Cuadro 6. Rendimiento en grano a cosecha del cultivo de quínoa para los diferentes niveles hídricos y genotipos para la localidad de Tranapunte durante las tres temporadas agrícolas evaluadas

Tratamientos / riego promedio	Temporadas		
	2015-2016	2016-2017	2017-2018 ^{&}
	Rendimiento (t ha ⁻¹)		
Niveles de humedad de suelo (NH)			
T1 (bien regado) / 2.303 m ³ ha ⁻¹	5,6 a	5,2 a	4,8
T2 (60% de T1) / 1.741 m ³ ha ⁻¹	4,7 ab	5,0 ab	3,9
T3 (secano) / 898 m ³ ha ⁻¹	3,9 b	4,5 b	2,9
Significancia	**	*	n.s.
Variedad y genotipo (VE)			
CQU 386	5,7 a	5,4 a	2,4 b
Regalona Baer	3,8 b	4,4 b	5,4 a
Significancia	***	***	***
NHxVE			
Significancia	*	n.s.	n.s.

Promedios en una columna seguidos por la misma letra no difieren estadísticamente de acuerdo a la prueba Tukey con un nivel de confianza $p < 0,05$. ANDEVA (* $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; n.s.: no significativo). &: Para el caso de la última temporada hubo problemas con la germinación de los genotipos.

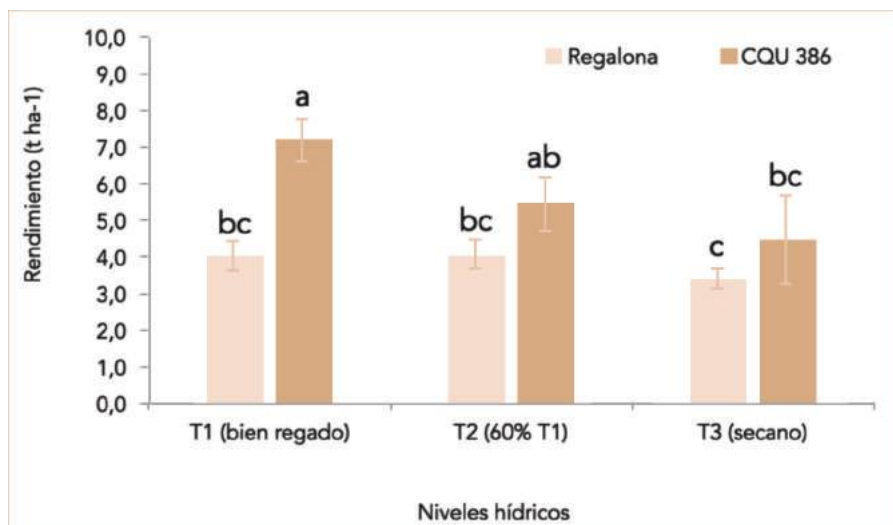


Figura 5. Respuesta del rendimiento de grano en el cultivo de quínoa entre los tratamientos de riego aplicados y los genotipos utilizados para la temporada 2015/2016 de acuerdo al cuadro 6 (López-Olivari y Díaz, 2017)

8.3 Conclusiones

Teniendo en cuenta estos antecedentes se puede concluir que para las condiciones de costa y valle central en la Región de La Araucanía, la quínoa presenta valores de rendimiento bajo condiciones de riego muy superiores a las observadas en algunas partes del mundo y en Chile central. Lo anterior indica que el cultivo bajo riego tiene un alto potencial de rendimiento en las condiciones edafoclimáticas estudiadas.

Referencias Bibliográficas

- Algozaibi., A.A., Badran, A.E., Almadini, A.M. & El-Garawany, M.M. 2017. The Effect of Irrigation Intervals on the Growth and Yield of Quinoa Crop and Its Components. *Journal of Agricultural Science*. 9(9), 182 – 192.
- Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. United Nations Food and Agriculture Organization, Irrigation and Drainage Paper 56. Rome, Italy, 300 p.
- Cortés, A. y Rubiano, A. 2007. Caracterización de tres ecotipos de Quinoa "*Chenopodium quinoa* Willd" mediante técnicas agroecológicas, en dos zonas agroclimatológicamente diferentes del Departamento de Cundinamarca. *Revista Inventum*, 4(2):89-101.
- Fuentes, F., Martínez, E. A., Hinrichsen, P. V., Jellen, E. N. and Maughan, P. J. 2009. Assessment of genetic diversity patterns in Chilean quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) germplasm using multiplex fluorescent microsatellite markers. *Conservation Genetics* 10(2), 369-377.
- García, M. 2003. Agroclimatic study and drought resistance analysis of quinoa for an irrigation strategy in the Bolivian Altiplano. *Dissertations de Agriculture, Faculty of Applied Biological Sciences, K.U. Leuven, Belgium*. 556. p. 184.
- García, M., Raes, D. and Jacobsen, S-E. 2003. Evapotranspiration analysis and irrigation requirements of quinoa (*Chenopodium quinoa*) in the Bolivian highlands. *Agricultural Water Management*. 60, 119-134.
- Garrido, M., Silva, P., Silva, H., Muñoz, R., Baginsky, C. y Acevedo, E. 2013. Evaluación del rendimiento de nueve genotipos de quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) bajo diferentes disponibilidades hídricas en ambiente mediterráneo. *IDESIA (Chile)*. 31(2), 69-76.
- Geerts, S., Raes, D., García, M., Mendoza, J. and Huanca, R. 2008a. Crop water use indicators to quantify the flexible phenology of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) in response to drought stress. *Field Crops Research*. 108, 150-156.
- Geerts, S., Raes, D., García, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., Cusicanqui, J. and Taboada, C. 2008b. Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.). *Europ. J. Agronomy*. 28, 427-436.
- Geerts, S., Raes, D., García, M., Miranda, R., Cusicanqui, J.A., Taboada, C., Mendoza, J., Huanca, R., Mamani, A., Condori, O., Mamani, J., Morales, B., Osco, V., Steduto, P., 2009. Simulating yield response of Quinoa to water availability with AquaCrop. *Agron. J.* 101, 499-508.

- Kaya, Ç. and Yazar, A. 2016. SALTMED model performance for quinoa irrigated with fresh and saline water in a Mediterranean environment. *Irrigation and Drainage*. 65, 29–37.
- Lavini, A., Pulvento, C., d'Andria, R., Riccardi, M., Choukr-Allah, R., Belhabib, O., Yazar, A., Incekaya, Ç., Metin Sezen, S., Qadir, M. and Jacobsen, S-E. 2014. Quinoa's Potential in the Mediterranean Region. *Journal of Agronomy and Crop Science*. 200, 344 – 360.
- López-Olivari, R. 2016. Manejo y uso eficiente del agua de riego intrapredial para el sur de Chile: conceptos y consideraciones básicas en métodos y programación de riego para optimizar el recurso hídrico. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Centro Regional Carillanca. 156 pp.
- López-Olivari, R. y Díaz, J. 2017. Respuesta de la Quínoa (*Chenopodium quinoa* Willd) al déficit hídrico en un clima templado del sur de Chile. In: MINAGRI (INIA, DGA), FAO, UNALM (Eds.), Resúmenes de exposiciones del VI Congreso Mundial de la Quínoa y III Simposio Internacional de Granos Andinos, Lima, Perú, 21-24 de marzo 2017, pp 30.
- Pulvento, C., Riccardi, M., Lavini, A., Iafelice, G., Marconi, E. and d'Andria, R. 2012. Yield and quality characteristics of quinoa grown in open field under different saline and non-saline irrigation regimes. *J Agro Crop Sci*. 198, 254–263.
- Razzaghi, F., Ahmadi, S.H., Jacobsen, S.E., Jensen, C.R. and Andersen, M.N. 2012. Effects of salinity and soil-drying on radiation use efficiency, water productivity and yield of Quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) *J. Agro Crop Sci* 198:173–184.
- Sosa-Zuñiga, V., Brito, V., Fuentes, F. and Steinfort, U. 2017. Phenological growth stages of quinoa (*Chenopodium quinoa*) based on the BBCH scale. *Ann Appl Biol*. 171, 117-124.