

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO FOLIAR EN
QUINUA A TRAVÉS DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES
TÉRMICAS”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO AGRÍCOLA**

RODOLFO JUAN CHUCHON REMON

**LIMA – PERÚ
2021**

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual de la UNALM)**

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“OBTENCIÓN DE UN ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO FOLIAR EN QUINUA
A TRAVÉS DEL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TÉRMICAS”**

Presentado por:

CHUCHON REMON RODOLFO JUAN

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO
AGRÍCOLA**

Sustentado y aprobado ante el siguiente jurado:

**Dr. Nestor Montalvo Arquíñigo
PRESIDENTE**

**Mg. Sc. Jorge Luis Díaz Rimarachín
MIEMBRO**

**Ing. José Santiago Falconi Palomino
MIEMBRO**

**Dra. Lía Ramos Fernández
ASESORA**

Lima – Perú

2021

DEDICATORIA

A Dios, a mis padres Eusebia y Clemente, a mis hermanos Francisco, Quintín, Jaime, Nelson e Isabel y a mi novia Arelys, por su apoyo incondicional y aliento para salir adelante. Los amo.

A mis vecinos y amigos del barrio que fue “Las Casitas REX”, lugar donde pasé los mejores momentos de mi infancia.

A todos mis amigos y profesores del colegio Virgen de la Puerta 2090, por la enseñanza brindada en los años de escuela.

Al Sr Ronald, al Sr Miranda, y al Sr Loly, ex trabajadores de la empresa Nissan, y al Sr Pedro de la empresa Kemoly, por todo el apoyo brindado en la infancia .

AGRADECIMIENTO

A la UNALM por haberme aceptado y así poder formarme profesionalmente.

A todos mis profesores por enseñarme lo que sé, por guiarme en lo profesional, pero sobre todo por enseñarme a ser una mejor persona.

A la Facultad de Ingeniería Agrícola, su personal administrativo y en especial a los catedráticos de cada departamento de estudio que con su trabajo permite que podamos formarnos en la carrera.

Al programa de investigación de cereales y granos nativos liderado por la Dra. Luz Gómez Pando y a todo su equipo de trabajo en especial a la Sra. Ruth, Sr. Oswaldo, Sra. Carmen, Sr Pedro y Sra. Juana por apoyarme en el manejo agronómico del cultivo de quinua en el campo experimental.

A mis buenos amigos de la UNALM Brian Mendoza, Gerson Chamorro Ferrer, Vivian Salgado Farro, María Chaucca Carrasco, Christian Llimpe Contreras, Christiand Olortegui Artica y Rosario Cardenas, por el apoyo en las evaluaciones de riego, manejo del cultivo y mediciones en campo.

*A Deyse Constant, por ser una gran amiga, y por el tiempo dedicado para enseñarme
Portuguez*

Al Proyecto “Uso de sensores remotos para determinar índice de estrés hídrico en el mejoramiento del manejo de riego de arroz (Orayza Sativa) en zonas áridas, para enfrentar al cambio climático”. Convenio N° 008-2016-INIA-PNIA/UPMSI/IE.

A mi asesora Dra. Lía Ramos Fernández, por toda la orientación, apoyo y confianza para sacar adelante esta investigación y al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura” por permitirme ser parte de ustedes, aprender en equipo, y dar inicio a la pasión por la investigación agrícola.

A la profesora Margareth Del Pielago Vásquez, quien desde mi primer ciclo logró inspirarme y darme confianza para creer en un mejor futuro.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos.....	3
II. Revisión bibliográfica	4
2.1. Antecedentes.....	4
2.2. Cultivo de quinua y estrés abiótico.....	5
2.3. Índice de estrés hídrico foliar (CWSI).....	7
2.3.1. Déficit de presión de vapor.....	10
2.3.2. Sensor térmico infrarrojo.....	10
2.3.3. Sensor térmico de termopar.....	11
III. MATERIALES Y MÉTODOS	13
3.1. Lugar del experimento.....	13
3.2. Materiales, herramientas y equipos.....	14
3.3. Diseño experimental.....	15
3.4. Procedimiento.....	18
3.4.1. Correlación de la temperatura infrarroja en función a sensores térmicos de termopar (STT).....	19
3.4.2. Temperaturas umbrales de mínimo y máximo estrés.....	23
3.4.3. Índice de estrés hídrico foliar (CWSI).....	24
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	26
4.1. Corrección de la temperatura de las imágenes térmicas de cámara FLIR.....	26
4.2. Temperaturas umbrales de mínimo y máximo estrés.....	30
4.3. Índice de estrés hídrico foliar (CWSI).....	36
V. CONCLUSIONES	38
VI. RECOMENDACIONES	39
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA	40
VIII. ANEXOS	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Materiales, equipos y herramientas computacionales	14
Tabla 2: Tratamientos del diseño experimental.....	16
Tabla 3: Parcela experimental	17
Tabla 4: Calibración de parámetros termográficos para la obtención de la temperatura reflejada en cada imagen térmica	23
Tabla 5: Fenología del cultivo de quinua variedad Mutante de Amarilla Maranganí, según FAO, Mujica y Quillatupa	26
Tabla 6: Valores promedio y desviación estándar de la biomasa del cultivo de quinua	28
Tabla 7: Valores promedio y desviación estándar del rendimiento del cultivo de quinua ..	28
Tabla 8: Valores promedio y desviación estándar del índice de cosecha.....	29
Tabla 9: Peso 1000 granos (g)	29
Tabla 10: Eficiencia y uso del agua (EUA) por tratamiento	29
Tabla 11: Pendiente e intercepto de las líneas bases inferiores según etapa del cultivo	33
Tabla 12: Biomasa aérea de la quinua ($t\ ha^{-1}$)	48
Tabla 13: Rendimiento de la quinua ($t\ ha^{-1}$)	48
Tabla 14: índice de cosecha del cultivo de quinua (%)	48
Tabla 15: Análisis de la relación lineal simple entre la temperatura medida por cámara térmica y termopar.....	49
Tabla 16: Análisis de la relación lineal simple entre ($T_c - T_a$) y el DPV, bajo condiciones de mínimo estrés en la etapa inicial del cultivo.....	49
Tabla 17: Análisis de la relación lineal simple entre ($T_c - T_a$) y el DPV, bajo condiciones de mínimo estrés en la etapa intermedia del cultivo	49
Tabla 18: Análisis de la relación lineal simple entre ($T_c - T_a$) y el DPV, bajo condiciones de mínimo estrés en la etapa final del cultivo	49
Tabla 19: DPV en función de la T_{aire} ($^{\circ}C$) y HR(%) de acuerdo a la ecuación de Monteith & Unsworth, (2013) y temperatura foliar de los dos tratamientos usando imágenes termográficas	50
Tabla 20: CWSI del tratamiento T0 y T1	51
Tabla 21: Calendario de actividades.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación del DPV y $T_c - T_a$	9
Figura 2: Linealización de temperatura respecto al voltaje para cada tipo de Termopar	12
Figura 3: Mapa de Ubicación	13
Figura 4: Campo experimental del cultivo de quinua del programa de cereales y granos nativos de la UNALM	16
Figura 5: Curva de calibración de la lectura del sensor TDR-300 Field scout y el porcentaje de humedad volumétrica real del suelo usando el método gravimétrico y densidad aparente.....	19
Figura 6: Panel del programa Flir Tool, con parámetros modificables para la obtención de la temperatura reflejada del cultivo de quinua variedad mutante de Amarilla Marangani a los 40 DDS en la fase desarrollo del cultivo.	21
Figura 7: Panel del programa FLIR Tools con parámetros calibrados de la imagen para cálculo de temperatura foliar del cultivo de quinua variedad mutante de Amarilla Marangani a los 40 DDS en la fase desarrollo del cultivo.....	22
Figura 8: Duración en días de las fases fenológicas acorde a clasificación FAO para los tratamientos T0 y T1	27
Figura 9: Barras del promedio de biomasa aérea seca y rendimiento seco y la desviación estándar.....	28
Figura 10: Relación de la temperatura foliar medida con una cámara FLIR E60, y con sensor termopar OMEGA TT-T36-SLE-500 en el cultivo de quinua	30
Figura 11: Variación horaria de la temperatura foliar y del aire medido con 06 sensores de termopar (STT) a los 109, 113 y 115 DDS.....	31
Figura 12: Variación de la temperatura foliar y del aire para el cultivo de quinua y el déficit de presión de vapor del aire (DPV) según etapa inicial (a); etapa media (b); y etapa final (c).....	32
Figura 13: Variación en el tiempo (DDS) de la temperatura foliar con estrés, sin estrés, temperatura del aire y humedad relativa (a); precipitación diaria y eventos de riego durante el desarrollo del cultivo (b).....	34
Figura 14: Líneas bases de máximo y mínimo estrés, según relación entre la $(T_c - T_a)$ y el DPV durante las etapas de crecimiento del cultivo	35
Figura 15: Variación del CWSI del tratamiento T0 y T1 respecto a los DDS	37
Figura 16: Relación entre el índice de estrés hídrico foliar (CWSI) y humedad del suelo para valores menores y mayores a 0.46.....	37

Figura 17: Resultado de caracterización del suelo, incluyendo parámetros como capacidad de campo y punto de marchitez permanente en porcentaje en peso.....	45
Figura 18: Resultados del análisis del suelo, densidad aparente y real del suelo.....	46
Figura 19: Análisis de agua	47
Figura 20: Material genético de la variedad de quinua Mutante de Amarilla Marangani...	52
Figura 21: Instalación de parantes de madera con círculos de aluminio.....	52
Figura 22: (a) Captura de imágenes a un metro de elevación sobre el dosel del cultivo, (b) imagen infrarroja térmica, (c) imagen de verdadero color	53
Figura 23:(a) Mediciones de temperatura con cámara térmica, (b) mediciones de temperatura con termopar	54
Figura 24: Desarrollo del cultivo en el campo experimental.....	55
Figura 25: Toma de datos de humedad volumétrica con el medidor TDR-300 Field Scout.....	56
Figura 26: Trillado y venteo de los granos de quinua después de su cosecha.....	56

LISTA DE ABREVIATURAS

ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
CC	Capacidad de campo
CIC	Capacidad de Intercambio Catiónico del suelo
CWSI	Índice de Estrés Hídrico Foliar
DDS	Días después de la siembra
DPV	Déficit de presión de vapor
ETc	Evapotranspiración del cultivo
EUA	Eficiencia de uso del agua
Hr	Humedad relativa promedio del aire (%)
KPa	Kilopascal
LI	Línea base inferior
LR	Lamina de riego (mm)
LS	Línea base superior
PMP	Punto de Marchitez Permanente
Pp	Precipitación (mm)
RD	Riego deficitario
RDR	Riego deficitario regulado
RGB	Rojo, verde y azul
SPR	Secado parcial de raíces
STT	Sensores Térmicos de Termopar
T0	Tratamiento sin estrés
T1	Tratamiento con estrés
Ta	Temperatura del aire (°C)
Tc	Temperatura del foliar del cultivo (°C)
TDR	Reflectometría de dominio de tiempo
TIR	Imágenes térmica infrarroja
ε	Emisividad
θ	Humedad volumétrica del suelo
θ_{cc}	Humedad volumétrica del suelo a capacidad de campo
θ_{pmp}	Humedad volumétrica del suelo a punto de marchitez
α	Nivel de significancia

RESUMEN

El estrés por déficit hídrico o por sequía se produce en las plantas en respuesta a un ambiente escaso de agua, donde los estomas se cierran, la transpiración disminuye, y la temperatura foliar aumenta, alcanzando valores superiores a la temperatura del aire. Por otro lado, las plantas no estresadas pueden alcanzar temperaturas inferiores a la del aire. El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), se basa en la teoría del balance de energía, en que para determinadas condiciones meteorológicas, un rango de diferencias de temperaturas foliares del cultivo (T_c) con respecto a la del aire (T_a), existen dentro de un límite inferior (transpiración sin estrés hídrico), y un límite superior (máximo estrés hídrico donde no hay transpiración). De lo anterior, el objetivo de este ensayo fue evaluar la variación del CWSI de la línea mutante de quinua derivada de la variedad comercial Amarilla Marangani, vía la temperatura foliar por termografía infrarroja (IR), y su relación con la humedad volumétrica del suelo ($\theta\%$). Se tuvieron dos tratamientos, T0 (con riego igual a la ET_c) y T1 (riego con reducciones escalonadas del 50, 75 y 100 % de la ET_c), ambos bajo riego por goteo. Se utilizó una cámara térmica IR, marca FLIR E60, y parámetros climáticos, para estimar la línea base superior (LS) y línea base inferior (LI), en tres etapas representativas del crecimiento del cultivo. Las evaluaciones de CWSI se realizaron entre los 44 y 120 DDS, entre las 13 y 14 horas. Se encontró una relación lineal y significativa ($P < 0.05$) entre el CWSI y la humedad del suelo ($\theta\%$). De dichos resultados se recomienda programar el riego del cultivo en un rango de CWSI de 0.38 a 0.6, siendo 0.38, un valor que se relaciona con la humedad del suelo a capacidad de campo; y 0.6, un valor que corresponde al máximo CWSI antes del inicio del corte de riego.

ABSTRACT

Stress due to water deficit or drought occurs in plants in response to a water-scarce environment, where stomata close, transpiration decreases, and leaf temperature increases, reaching values higher than air temperature. On the other hand, unstressed plants can reach temperatures below air. The crop water stress index (CWSI) is based on the theory of energy balance, in that for certain meteorological conditions, a range of differences in the leaf temperature of the crop (T_c) with respect to that of the air (T_a), they exist within a lower limit (transpiration without water stress), and an upper limit (maximum water stress where there is no transpiration). From the above, the objective of this trial was to evaluate the variation of the CWSI of the cultivation of quinoa mutant variety of Amarilla Marangani, via the leaf temperature by infrared thermography (IR), and its relationship with the volumetric soil moisture ($\theta\%$). There were two treatments, T0 (with irrigation equal to ET_c) and T1 (irrigation with step reductions of 50, 75 and 100% of ET_c), both under drip irrigation. An IR thermal camera, FLIR E60 brand, and climatic parameters were used to estimate the upper baseline (LS) and lower baseline (LI), in three representative stages of crop growth. The CWSI evaluations were performed between 44 and 120 DDS, between 13 and 14 hours. A linear and significant relationship ($P < 0.05$) was found between CWSI and soil moisture ($\theta\%$). From these results, it is recommended to program the irrigation of the crop in a CWSI range of 0.38 to 0.6, with the value of 0.38, corresponding to soil moisture at field capacity; and 0.6, value that corresponds to the maximum CWSI before the start of the irrigation cut.

I. INTRODUCCIÓN

La agricultura requiere aumentar su producción de acuerdo con el crecimiento de la población mundial, donde la disponibilidad de agua es cada vez menor. Por ello es necesario que en zonas con restricción hídrica se seleccionen especies o genotipos capaces de producir bajo condiciones de estrés (Garrido *et al.*, 2013).

La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) es un pseudocereal cultivada, principalmente en Perú y Bolivia. Son de gran importancia debido al buen contenido nutricional y efectos sobre la salud, siendo su crecimiento posible debido a los diferentes pisos ecológicos de los Andes y el Altiplano, adaptándose a condiciones climáticas adversas, como bajas y altas temperaturas, lluvias, suelos con bajo contenido de humedad y sequías.(Huamanchumo, 2020).

Khorsandi *et al.* (2018) mencionan que desde el punto de vista agrícola, el estrés hídrico del cultivo ocurre cuando la cantidad de agua proporcionada a través de la lluvia y el riego no es suficiente para satisfacer las necesidades de evapotranspiración de la planta. El estrés hídrico influye en una gran cantidad de reacciones fisiológicas, bioquímicas y moleculares de las planta. Por esa razón existen varios métodos para monitorear el estrés hídrico de los cultivos que se pueden clasificar como: mediciones de suelo y plantas. Entre estos métodos, los sensores de humedad del suelo, las cámaras de presión y los porómetros de difusión de hojas se han utilizado ampliamente para medir la humedad del suelo, el potencial hídrico foliar y la conductancia estomática de la hoja, respectivamente. Sin embargo, estas técnicas no son adecuadas para el monitoreo automático del estrés hídrico de los cultivos, ya que son destructivas, laboriosas y requieren mucho tiempo.

Desde la fisiología de la planta, si una planta experimenta estrés hídrico, los estomas tienden a cerrarse, lo que lleva a una transpiración reducida y a un aumento de la temperatura de la hoja (Ballester *et al.*, 2013). Por lo tanto, el aumento de la temperatura del dosel que puede ser medido a través de cámaras térmicas, puede ser un buen indicador de estrés hídrico foliar (Khorsandi *et al.*, 2018).

El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), ha recibido más atención que cualquier otro índice de estrés hídrico, dada la utilidad práctica que tiene para la programación de riego en cultivos agrícolas. El CWSI es derivado del balance energético donde, para determinadas condiciones meteorológicas, un rango de diferencias de temperaturas foliares con respecto a las del aire existen dentro de un límite inferior (donde no hay estrés hídrico) y de un límite superior (estrés hídrico completo donde no hay transpiración). La medición de la diferencia de temperaturas entre la hoja y el aire deberá caer dentro de estos límites, donde un valor cero indica no estrés hídrico y un valor de uno indica un estrés hídrico completo (Pérez *et al.*, 2013) . El CWSI se ha usado en la detección del estrés hídrico de manera no destructiva para la programación de la irrigación de cultivos, además con la aparición reciente de las cámaras infrarrojas térmicas, combinado al análisis automatizado de las imágenes, ha logrado que este método sea más fácil (Khorsandi *et al.*, 2018)

En base a lo expuesto, se propuso la presente investigación, para determinar el índice de estrés hídrico foliar (CWSI) en función de las temperaturas del dosel obtenidas mediante una cámara termográfica, calibrado mediante sensores térmicos de termopar(STT), con el objetivo de correlacionarlo con la humedad volumétrica del suelo, durante el crecimiento de la línea mutante de quinua Amarilla Marangani bajo riego por goteo, entre el mes de agosto y diciembre de 2017, realizado en el Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

1.1. Objetivos

El objetivo general es evaluar la variación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) de quinua en la línea mutante derivada de la variedad comercial Amarilla Marangani, mediante la medición de la temperatura foliar vía termografía infrarroja, mejorada y calibrada con sensores térmicos de termopar (STT), en relación a la humedad volumétrica del suelo, trabajo desarrollado en el Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Para ello se plantean los siguientes objetivos específicos:

- i. Calibrar la temperatura infrarroja en función a la temperatura obtenida con sensores térmicos de termopar (STT).
- ii. Obtener temperaturas umbrales de mínimo y máximo estrés a partir del déficit de presión de vapor del aire y temperatura foliar.
- iii. Estimar el índice de estrés hídrico foliar (CWSI).

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Antecedentes

En las regiones semiáridas la escasez de agua es una de las mayores limitaciones de la producción agrícola. La escasez de recursos de agua dulce y la distribución desigual e irregular de las lluvias y el cambio climático tienen un efecto significativo en la agricultura. Por lo tanto, la gestión eficiente de cultivos tolerantes a la sequía como la quinua aparece como factores importantes para una producción agrícola sostenible en regiones con escasez de agua. La quinua (*Chenopodium quinoa* Willd.) ampliamente cultivado en la región andina de América del Sur, ha ganado una atención especial en todo el mundo debido a sus beneficios nutricionales para la salud y su capacidad para adaptarse a condiciones desfavorables como la sequía y salinidad, destacándose así como un cultivo tolerante al estrés hídrico (Bhargava & Srivastava, 2013) y podría contribuir a la seguridad alimentaria en el mundo (Bozkurt *et al.*, 2021).

Bozkurt *et al.* (2021) mencionan que la escasez de agua y los altos costos del riego ha generado el desarrollo del riego de precisión con estrategias para ahorrar y minimizar el uso de agua en la producción de cultivos, entre estas estrategias se encuentran el riego deficitario (RD), riego por secado parcial de raíces (SPR) y riego deficitario regulado (RDR) que se han desarrollado para gestiones de riego limitadas. El riego deficitario convencional (RD) es una práctica bien aceptada para optimizar el uso del agua y, por lo tanto, ahorrar costos, al permitir que los cultivos soporten un estrés hídrico leve con una disminución mínima o nula en el rendimiento y la calidad. El secado parcial de la zona de la raíz (SPR) es un desarrollo posterior al RD. El SPR es una técnica de riego basada en mantener húmeda y seca al mismo tiempo las partes opuestas del sistema de raíces de la planta. El riego deficitario regulado (RDR) recientemente se ha identificado como una técnica clave para el ahorro de agua en la agricultura. RDR es otra forma de RD. El RDR se define generalmente como una práctica de riego mediante la cual un cultivo se riega con una cantidad de agua por debajo del requisito total para el crecimiento óptimo de la planta en etapas de crecimiento no críticas sin causar una reducción significativa del rendimiento.

Una estimación cuantitativa del estrés hídrico inminente de las plantas es un requisito fundamental previo para la programación eficiente de riegos. Idealmente, la advertencia de estrés debería provenir de los mismos cultivos, sin la necesidad de información precisa sobre el agua disponible en el suelo, la distribución de raíces y la demanda evaporativa de la atmósfera (Jones, 2007). Sin embargo, la programación del riego basada en el estado hídrico de los cultivos puede ser más ventajosa, ya que los cultivos responden tanto al suelo como al medio aéreo (Yazar *et al.*, 1999).

El método del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), es una medida de la transpiración que ocurre en una planta en el tiempo de medición, mediante el registro de la temperatura de la planta y el déficit de presión de vapor del agua (DPV). Este enfoque metodológico es necesario para la correcta programación del riego en cultivos agrícolas en campo abierto. Las mediciones del estrés hídrico de los cultivos combinado con sistemas eficientes de riego permiten maximizar el rendimiento a través de un manejo eficiente del riego (López *et al.*, 2009).

La quinua tiene una excepcional capacidad para crecer en suelos con deficiencia de agua debido a su inherente bajo requerimiento de agua y la capacidad de reanudar su tasa fotosintética y mantiene su área foliar después de un período de sequía (Jacobsen *et al.*, 2009). Varios estudios informaron que la quinua ha respondido positivamente al riego deficitario en varios lugares experimentales donde el rendimiento de grano apenas se vio afectado (Yazar *et al.*, 2015). Siendo las etapas de floración y grano de leche de la quinua las más sensible a la sequía (Geerts *et al.*, 2008).

2.2. Cultivo de quinua y estrés abiótico

La quinua (*Chenopodium quinoa*, Wild) es una especie dicotiledónea de la familia Amaranthaceae que produce frutos de aquenios (granos de quenópodos) con una semilla redondeada de 1,5 a 4 mm (Alandía *et al.*, 2020). Es un pseudocereal ya que no son verdaderos cereales al no pertenecer a la familia de las gramíneas, fueron domesticadas y cultivadas desde tiempos ancestrales comprendida entre 5°N (Colombia) a 40°S (Chile y Argentina), y desde el nivel del mar hasta los 4000 m.s.n.m., en zonas con precipitaciones de 0 a 1000 mm, en suelos de diferentes texturas y con un rango de pH que fluctúa de 4 a 9. En un rango de temperaturas debajo de cero a más de 30 °C, dando origen a una amplia variabilidad genética (Gómez & Aguilar, 2016).

Alandia *et al.* (2020) mencionan que la quinua ha ganado importancia a nivel mundial debido a su alto valor nutricional. Siendo el balance de aminoácidos esenciales, ácidos grasos, micronutrientes, vitaminas y antioxidantes de alta calidad en comparación con los principales cereales destacándose así como un cultivo estratégico para la seguridad alimentaria y nutricional. La difusión de la quinua en todo el mundo se basa en su gran adaptabilidad a diferentes condiciones de cultivo agrícola dado que puede crecer en diversas zonas agroecológicas (costeras, valles, tierras altas, salares y subtropicales) y es tolerante a las heladas, salinidad y sequía.

Según Bhargava & Srivastava, (2013) la productividad agrícola en varias regiones se ve gravemente afectada por muchas tensiones abióticas y bióticas que son perjudiciales para el crecimiento de las plantas y afectan grandes áreas de potenciales tierras agrícolas. El estrés abiótico se define como cualquier condición ambiental, aparte de la acción de otros organismos, que reduce el crecimiento, la supervivencia y/o la fecundidad de las plantas. Así, un factor ambiental que limita la productividad de los cultivos o provoca una reducción en la biomasa se denomina estrés. Los factores ambientales abióticos incluyen la temperatura, la humedad, la intensidad de la luz, el suministro de agua, la disponibilidad de minerales y el CO₂, todos los cuales determinan el crecimiento de una planta. Las plantas, al ser sésiles (no se desplazan de un lugar a otro), no pueden escapar de factores de estrés abiótico y están continuamente expuestas a diferentes factores sin ninguna protección. Los estreses abióticos afectan adversamente el crecimiento y la productividad desencadenando una serie de cambios morfológicos, fisiológicos, bioquímicos y moleculares en las plantas. El estrés causado por factores abióticos altera el metabolismo de las plantas, lo que conduce a efectos negativos sobre el crecimiento, el desarrollo y la productividad. Si el estrés se vuelve severo o continúa durante un largo período, puede conducir a una carga metabólica insostenible sobre las células, un crecimiento reducido y, en última instancia, la muerte de la planta. El estrés de la planta puede variar de cero a severo a través de niveles leves y moderados. En la naturaleza, las plantas pueden no estar totalmente libres de estrés y se espera que experimenten cierto grado de estrés por cualquier factor o factores. Todas las principales plantas de cultivo, así como la mayoría de las especies silvestres, son muy sensibles a las condiciones de estrés abiótico. El proceso de domesticación y el desarrollo posterior de los cultivos mediante la cría selectiva de caracteres como el rápido crecimiento, la acumulación de biomasa y la producción de frutos y semillas no han mejorado la tolerancia al estrés. Se ha observado generalmente que las especies domesticadas son probablemente

más sensibles al estrés que sus antepasados silvestres, ya que la inhibición del crecimiento vegetativo y el desarrollo reproductivo es la primera y más general respuesta al estrés de las plantas, que invierten todos sus recursos (energía, precursores metabólicos) para sobrevivir a las condiciones ambientales adversas. Sin embargo, hay plantas naturalmente adaptadas a las condiciones de estrés. A pesar de las condiciones desfavorables a las que están sometidos, estas plantas especializadas pueden sobrevivir y completar su ciclo de vida en sus respectivos entornos (Bhargava & Srivastava, 2013).

2.3. Índice de estrés hídrico foliar (CWSI)

El agua que transpiran los cultivos funciona como un estabilizador de temperatura de las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. A partir de esto, (Jackson *et al.*, 1981) presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y el calor latente que incide en la transpiración. Cuando el cultivo está sometido a estrés hídrico, las estomas se cierran, la transpiración disminuye y la temperatura foliar del cultivo aumenta alcanzando valores superiores a la del aire. Por otro lado las plantas no estresadas alcanzan temperaturas inferiores a la del aire. El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), se basa en la determinación de la tasa de transpiración actual de un cultivo mediante la medición de la temperatura del dosel (cubierta vegetal) y el déficit de presión de vapor (DPV) (López *et al.*, 2009).

Colaizzi *et al.* (2012) manifiestan que el CWSI es derivado del balance de energía donde, para determinadas condiciones meteorológicas, un rango de diferencia de temperaturas foliares del cultivo con respecto a las del aire, existen dentro de un límite inferior (LI) y un límite superior (LS). El límite inferior (LI), representa un estado óptimo del cultivo (transpiración del cultivo sin estrés hídrico), donde el CWSI es 0; mientras que el límite superior (LS), representa un estado crítico del cultivo (máximo estrés hídrico sin transpiración), donde el CWSI es 1, ver Figura 1. Este índice se ha desarrollado e implementado con éxito utilizando imágenes térmicas infrarrojas (TIR) que miden las temperaturas del dosel para determinar las necesidades de riego (Mangus *et al.*, 2016).

El cálculo del CWSI puede determinarse mediante la ecuación empírica desarrollada por Idso *et al.* (1981) y sugerida por Bozkurt *et al.* (2021). Ver Ecuación 1.

$$CWSI = \frac{(Tc - Ta)_D - (Tc - Ta)_{LI}}{(Tc - Ta)_{LS} - (Tc - Ta)_{LI}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, Tc es la temperatura real de la hoja del cultivo, Ta es la temperatura del aire, y el subíndice D denota la diferencia medida entre dichas temperaturas. El subíndice LI (límite inferior) denota la diferencia entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración no está restringida por la disponibilidad del agua (situación sin estrés hídrico del cultivo), de modo que en este caso la Tc es el valor más bajo para las condiciones del clima. Mientras que el subíndice LS (límite superior) denota la diferencia hipotética entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración es cero como resultado de la falta de disponibilidad de agua en el sistema suelo, planta, y atmosfera.

Idso *et al.* (1981) demostró que el límite inferior (LI) del CWSI es una función lineal del déficit de presión de vapor (DPV) para diversos cultivos. Ver Ecuación 2.

$$(Tc - Ta)_{LI} = aDPV + b \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde a (pendiente) y b (intercepto), son parámetros de ajuste de los datos en la regresión lineal simple, mientras que LS representa la máxima variación de la temperatura foliar del cultivo estresado respecto de la temperatura del aire, registrado entre las 13 y 14 horas desde el inicio hasta el final de los tratamientos. Siendo dicha variación máxima (k) una función constante que no depende del déficit de presión de vapor (DPV) para todas las etapas fenológicas como se sugirió en estudios anteriores (Khorsandi *et al.*, 2018; Mangus *et al.*, 2016). Ver Ecuación 3.

$$(Tc - Ta)_{LS} = K \quad \text{Ecuación 3}$$

López *et al.* (2009) mencionan que el CWSI puede representarse de manera gráfica determinando la distancia relativa entre la línea base inferior que representa las condiciones sin estrés y la línea base superior que representa la situación de máximo estrés, como muestra la Figura 1. La línea inclinada es la línea base sin estrés hídrico conocido como límite inferior (LI), es decir, la diferencia entre temperatura del dosel bien regado y la temperatura del aire a diferentes DPV. La línea horizontal es la línea base superior conocido como límite superior (LS), es decir, la diferencia de la temperatura del dosel cuando no existe

transpiración y la temperatura del aire. Esta línea es constante a diferentes DPV. Por lo tanto la Ecuación 1 representado gráficamente es equivalente a la siguiente relación. Ver Ecuación 4.

$$CWSI = \frac{AC}{BC} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde el punto A es la diferencia entre las temperaturas de la hoja y la del aire ($T_c - T_a$) en el momento de medición, el punto B es la diferencia de temperatura máxima entre la hoja y el aire (límite superior) y el punto C, la diferencia mínima (límite inferior) en las condiciones de DPV en las cuales se realizó la medición de temperatura de la hoja y aire.

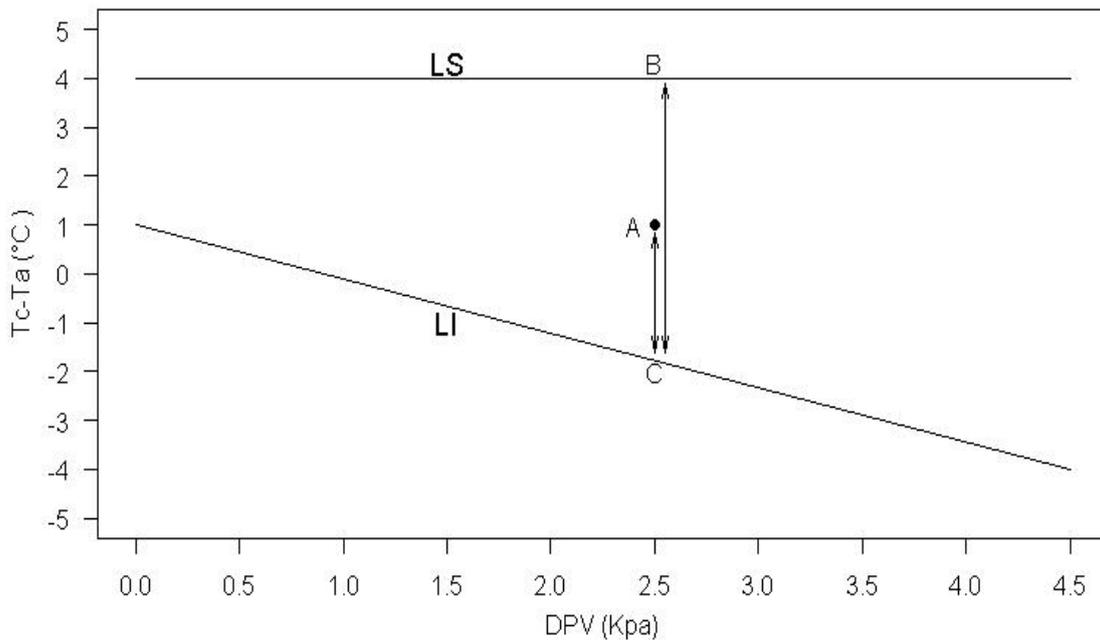


Figura 1: Relación del DPV y Tc-Ta

FUENTE: Elaborado con información de López et al. (2009)

2.3.1. Déficit de presión de vapor

El déficit de presión de vapor (DPV) es una medida de valor que puede ser expresada tanto en Kilopascal (kPa) u otra medida de presión. Este valor se obtiene mediante la diferencia entre la presión saturación de vapor y la presión real de vapor. El DPV permite relacionar la tensión actual a la que se hallan sometidas las partículas de agua en el aire (vapor) con respecto a las condiciones térmicas en donde este se saturaría, produciendo la condensación (punto de rocío donde se produce la HR 100%) y permite caracterizar el clima. Puede utilizarse para prevención de enfermedades (Beluzan & Acuña, 2013).

López *et al.* (2009) mencionan que un DPV igual a cero indica que el aire sostiene el máximo vapor de agua posible (esto corresponde a una humedad relativa de 100%) y que la línea base inferior cambia en función de la presión de vapor del agua debido al DPV. Estos valores son usados para el cálculo del CWSI que varía entre 0 y 1, cuando las plantas se someten a condiciones apropiadas de riego y hasta condiciones totalmente de estrés hídrico.

El DPV se puede calcular a partir de la temperatura del aire (°C) y humedad relativa (HR%) para una radiación solar mayor de 100 w/m², dando como resultado el DPV en Kpá. Se puede calcular de la siguiente manera (Monteith & Unsworth, 2013). Ver Ecuación 5.

$$DPV = \left(1 - \left(\frac{HR}{100} \right) \right) \left(0.6108 \times 10^{\left(7.5 \times \frac{T_{air}}{237.3 + T_{air}} \right)} \right) \quad \text{Ecuación 5}$$

2.3.2. Sensor térmico infrarrojo

Los sensores de radiación infrarrojo (IR) son transductores que absorben energía infrarroja, siendo el software contenido en la cámara el que convierte esa energía en una señal eléctrica y lo relaciona a una determinada temperatura. Todos los materiales con temperaturas mayores al cero absoluto emiten energía en forma de radiación. La radiación infrarroja está comprendida en el espectro de longitud de onda que varía de 0.75 μm a 1000 μm, fuera del rango del ojo humano que detecta longitudes de onda entre 0.4 y 0.7 μm. Esta banda infrarroja se subdivide en cuatro regiones: infrarrojo cercano (0.75-3 μm), infrarrojo medio (3-6 μm), infrarrojo lejano (6-15 μm) e infrarrojo extremo (15-1000 μm). Las cámaras térmicas trabajan usualmente en dos bandas: de 2 a 5.6 μm y de 8 a 14 μm, las cuales se eligen porque la absorción atmosférica en estas longitudes de onda es menor (Flores &

Hongn, 2012). Una vez que el software de la cámara calcula una matriz de temperaturas, la transforma en una imagen visible, donde cada pixel de la imagen representa un punto de temperatura que aparece en la pantalla.

La emisividad (ϵ) tendrá un valor de 0.96 para coberturas vegetales (García *et al.*, 2018), Mientras que la temperatura reflejada puede ser estimada midiendo con la cámara térmica la temperatura de una pieza arrugada de papel de aluminio situado cerca del dosel de interés con una emisividad igual a 1 (Costa *et al.*, 2019). En cuanto a la temperatura del aire y humedad relativa éstas dependerán de las condiciones meteorológicas en el momento de la medición.

2.3.3. Sensor térmico de termopar

Un termopar es un dispositivo para la medición de la temperatura, basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en sus extremos y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura, que origina una fuerza electromotriz. La aparición de la corriente eléctrica (efecto Seebeck) solo depende de la variación de temperaturas entre las uniones (Alzate *et al.*, 2007). La dependencia entre el voltaje entregado por el termopar y la temperatura no es lineal, por ello el instrumento electrónico destinado a mostrar la lectura deberá efectuar la linealización, es decir, tomar el voltaje y según el tipo de termopar ver a que temperatura corresponde. La linealización se puede observar en la Figura 2.

Los termopares más comunes son los de tipo J, K, T, E, R, S y B el cual se diferencia por la aleación de metales que utilizan. Según OMEGA, fabricante de termopares, recomienda las de tipo T para ambientes con humedad, además presenta un error menor en la medición de temperaturas ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$). También es capaz de medir un amplio rango de temperaturas que varía entre -270 a $400\text{ }^{\circ}\text{C}$.

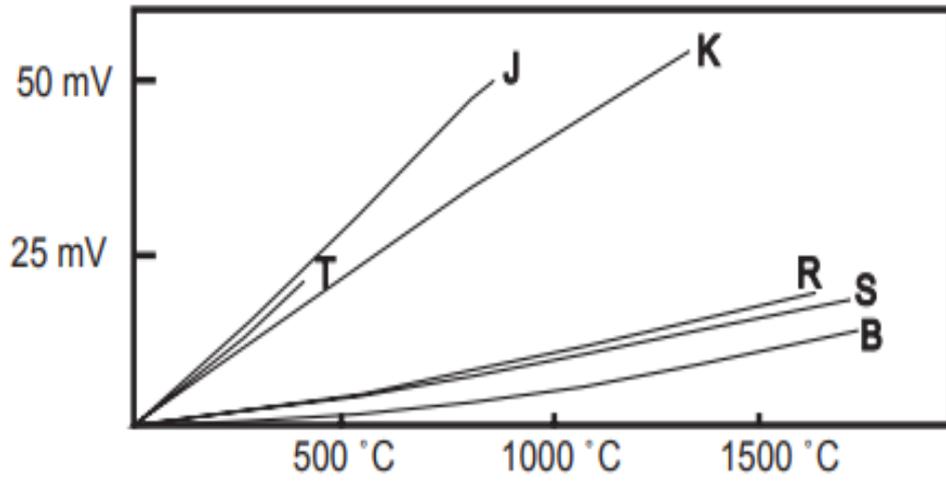


Figura 2: Linealización de temperatura respecto al voltaje para cada tipo de Termopar

FUENTE: Arian Control & Instrumentation

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar del experimento

Se llevó a cabo en el Programa de Cereales y Granos Nativos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, ubicado en el distrito de La Molina, Lima-Perú, durante los meses de agosto a diciembre del 2017, ubicada en la coordenada UTM WGS 84 zona 18 Sur : 288444.3 E , 8664033.3 N , a 251 msnm. Ver Figura 3.

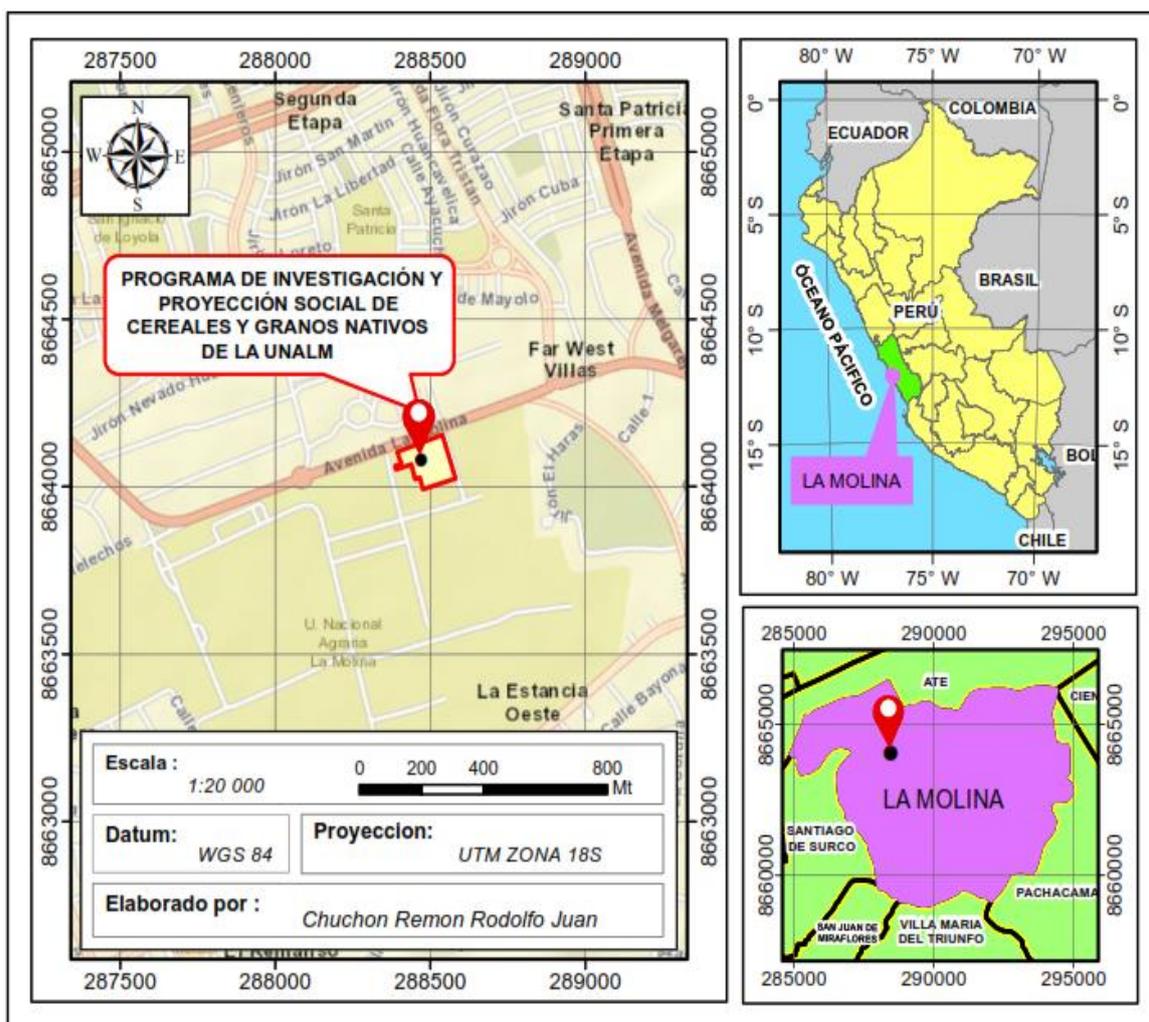


Figura 3: Mapa de Ubicación

3.2. Materiales, herramientas y equipos

En la etapa de campo se empleó sensores de temperatura, humedad volumétrica del suelo así como, insumos y materiales necesarios para el manejo del cultivo. Además, de los software empleados en la etapa de gabinete para el procesamiento de la información recolectada por los sensores (ver Tabla 1). El material genético usado es una línea mutante del cultivo de quinua obtenida de la variedad comercial Amarilla Marangani sometida a radiación gamma de 250 Gray (Gy) , desarrollada por el Programa de Cereales y Granos Nativos de la UNALM, las semillas se pueden apreciar en la Figura 20 (ANEXO 5), además la variedad Amarilla Marangani procede del distrito Marangani en Cusco, tiene un grano grande y de color anaranjado (2.5 mm), posee alto contenido de saponina, es resistente al mildiu (*Peronospora variabilis*) y presenta alto rendimiento (3500 kg/ha).

Tabla 1: Materiales, equipos y herramientas computacionales

Equipos/Materiales/Software		Características	Aplicación
Sensores térmicos	Cámara termográfica	FLIR, modelo E60 imagen óptica de 2048x1536 píxeles, imagen térmica de 320x240 píxeles, resolución horizontal y vertical de 72 ppp, tamaño de píxel de 0.35 mm, sensibilidad de 0.05°C, rango espectral 7.5 - 13 µm, rango de temperaturas -20°C – 650 °C	Obtener imágenes térmicas y ópticas (RGB). El lente amplificador permitió incrementa la dimensión de la imagen óptica.
	Sensores térmicos de termopar (STT)	OMEGA, modelo TT-T-36SLE-500, tipo "T" (cable positivo de Cu y cable negativo de constantán, unidos mediante soldadura de Sn); y colector de datos PC200W, marca Campbell Scientific.	Medición puntual de la temperatura foliar cultivo. Cinta auto adherible de fibra de vidrio, de 5cm x 45m, marca Superboard
Sensores de humedad volumétrica del suelo	TDR sensor de humedad volumétrica del suelo	FIELDSCOUT, modelo TDR 350, con precisión de +/-3 % con CE < 2mS cm ⁻¹ . con varillas de 12 a 20 cm con diámetro de 0.5	Medición puntual de humedad volumétrica del suelo
Insumos del cultivo	Semillas	Variedad MQ-AM 250-283: Línea mutante de quinua Amarilla Marangani (línea mejorada de la variedad comercial Amarilla Marangani). Siembra manual, chorro continuo.	18 gr por surco en hileras sobre lomo del surco y distancia de 1 m entre surcos
	Fertilizantes	Urea y fosfato diamónico, según: 40-60-0 y 40-0-0.durante la siembra y previo al aporque	Fertilización a los 0 y 54 DDS

«Continuación»

	Sistema presurizado de riego por goteo	Cabezal de riego con electrobomba monoblock y tablero de arranque directo de 2.5 HP, tuberías de conducción y portlaterales ; arco de riego con filtro de anillos, válvulas (aire, compuerta, bola), caudalímetro, cintas de riego de 16 mm.	Manejo de riego, cintas con goteros integrados de 1.4 L h ⁻¹ distancia entre goteros de 0.30 m y entre laterales de 0.60 m.
Soportes	Parantes de madera	8 parantes de madera de 0.04 x 0.03 x 1.2 m	Georreferenciar las imágenes térmicas IR respecto de las imágenes de verdadero color RGB
	Alambre galvanizado	Alambre galvanizado N°14, sujeto en los parantes de madera	
	Aluminio	Papel aluminio marca U-THIL, sostenido por cada alambre galvanizado	
Software	FLIR Tools	Desarrollado por la empresa fabricante, para análisis de imágenes térmicas.	Procesamiento y calibración de las imágenes térmicas
	Rstudio 3.6.3	Lenguaje de programación R, dedicado a la computación estadística y gráficos.	Elaboración de gráficas estadísticas personalizadas.

3.3. Diseño experimental

Se emplearon dos tratamiento de riego , un testigo (T0) con riego igual a la ETc y el tratamiento (T1) a un riego de reducción escalonada del 50%, 75% y 100 % de la ETc, realizadas a los 93, 100 y 109 DDS respectivamente (ver Tabla 2). Cada tratamiento fue replicado cuatro veces, estando distribuidas en campo como se muestra en la Figura 4, con dimensiones de parcela de 7 x 1.2 m, tal como se indica en la Tabla 3.

La variedad de quinua empleada fue la mutante de Amarilla Marangani, la siembra se realizó en forma manual y a chorro continuo en dos hileras con una separación de 0.6 m, siendo la densidad de siembra lineal de 18 gr de semillas por hilera. El recurso hídrico fue suministrado bajo un sistema de riego por goteo de 16 mm de diámetro interior con una descarga promedio de gotero de 1.4 l/h y distanciamiento entre goteros de 0.30m, tal como se aprecia en la Figura 4. Previo a la siembra se preparó el suelo de manera convencional (volteo, rastrado, surcado y aplicación de fertilizantes).

Tabla 2: Tratamientos del diseño experimental

Códigos	Tratamientos
T0	Mutante de Amarilla Maranganí con riego igual a la ETc.
T1	Mutante de Amarilla Maranganí con riego de reducción escalonada de la ETc. (50, 75, y 100% entre los 93 y 103 DDS).

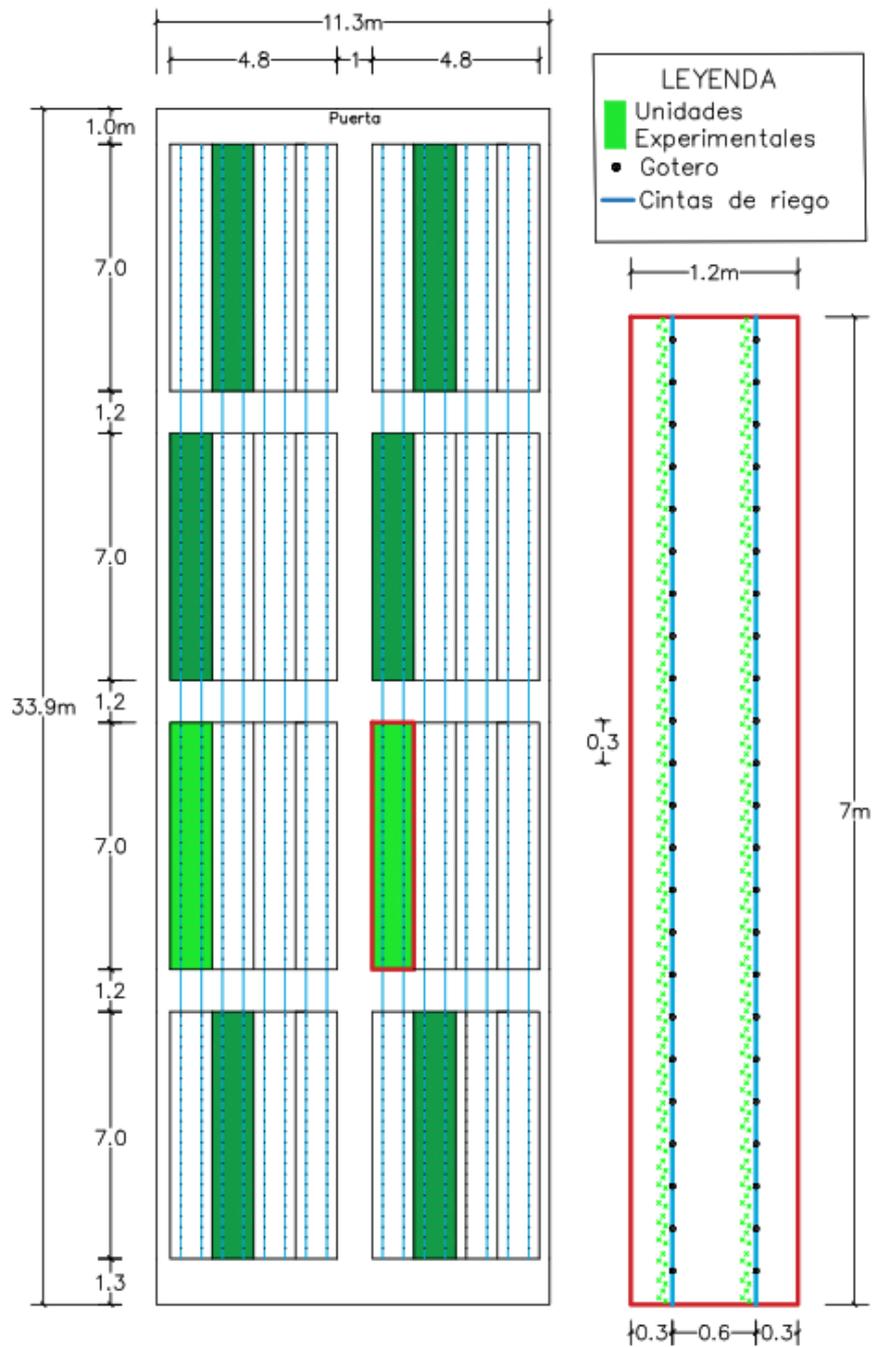


Figura 4: Campo experimental del cultivo de quinua del programa de cereales y granos nativos de la UNALM

Tabla 3: Parcela experimental

Parcela experimental (T0 Y T1)	
Área(m ²)	8.4
Longitud (m)	7
Ancho (m)	1.2
Número de hileras	2
Distancia entre hileras	0.6
Gramos de semilla por hilera (gr)	18

La caracterización fisicoquímica del suelo se realizó en el laboratorio de análisis de suelos, plantas, aguas y fertilizantes de la UNALM, cuyos resultados se muestran en la Figura 17 y Figura 18 (ANEXO 1). De acuerdo a los resultados, el suelo tiene una textura Franco Arcillosa Arenoso y una reacción ligeramente salina. El porcentaje de materia orgánica es bajo, por lo tanto el porcentaje de nitrógeno en el suelo también es limitado. Baja capacidad de intercambio catiónico (CIC), contenido medio de fósforo y potasio disponible. Siendo en general un suelo de baja fertilidad natural. El análisis del agua de riego se realizó en el laboratorio, de agua, suelo, medio ambiente y fertiriego de la UNALM, cuyos resultados indican una clasificación tipo C2-S1, con una conductividad eléctrica (CE) de 0.62 dS/m y un valor de pH de 8.16, que significa un bajo nivel de salinidad y sin peligro por concentraciones de sodio intercambiable, siendo apto para el riego del cultivo de quinua, ver Figura 19 (ANEXO 1). La dosis de fertilización fue de N-P-K, las fechas de aplicación y productos usados se indican en el calendario de actividades. Ver Tabla 21 (ANEXO 6).

La caracterización fenológica del cultivo de quinua se realizó según las propuestas de Mujica (2006), Quillatupa (2009) y la FAO, tal como se aprecia en la Tabla 5 y Figura 8. Bhargava & Srivastava, (2013) menciona que la fase más sensible de la quinua al corte del riego, es el de grano lechoso, motivo por el que se decidió en esa etapa, a los 93 DDS, empezar las reducciones escalonadas de riego con la finalidad de someter al cultivo con el paso del tiempo a una situación de máximo estrés hídrico debido al incremento de temperatura foliar ante la carencia del recurso hídrico.

Se usaron todas las repeticiones para comparar por medio del análisis estadístico de la varianza (ANOVA), las variables agronómicas como biomasa (Kg ha⁻¹), rendimiento (t ha⁻¹) e índice de cosecha (%), como se aprecia en la Tabla 12, Tabla 13 y Tabla 14 (ANEXO 2).

3.4. Procedimiento

Para el monitoreo de la temperatura del cultivo, se seleccionó una parcela representativa de las cuatro repeticiones por tratamiento, definiéndose un área rectangular delimitada en sus esquinas con parantes de madera, al que se acopló brazos de alambres galvanizados, forradas en papel de aluminio, para poder identificar con facilidad el área de estudio en la imagen y georeferenciar la imagen óptica o RGB, respecto de las imágenes térmicas o IR, tal como se observa en la Figura 21 (ANEXO 5). La toma de imágenes fue en dirección oeste-este, a una distancia de 1m sobre el dosel del cultivo con un ángulo de 90° (perpendicular al objeto a fotografiar) entre las 13 y 14 horas del día, en cada toma se obtuvo una imagen óptica de verdadero color y una imagen térmica, tal como se muestra en la Figura 22 (ANEXO 5). Con la imagen óptica de verdadero color identificó la cobertura de dosel del cultivo (área de interés) y con la imagen térmica se obtuvo las temperaturas de dicha cobertura. En forma inmediata a la captura de imágenes, se realizó la medición de humedades del suelo haciendo uso del sensor de humedad de suelo TDR-300.

Se elaboró una curva de calibración para convertir las lecturas del TDR-300 a humedad volumétrica real, tomando de referencia para su realización la metodología utilizada por Cabrera *et al.* (2018) acorde a Vargas *et al.*(2011). Para tal fin, se monitoreó durante 20 fechas el contenido de humedad en el suelo (θ_{vol}) aplicando método directo y haciendo uso del sensor de humedad TDR 300 Field Scout con varillas de 7.9 pulgadas (20 cm). Ver Figura 25 (ANEXO 5). Estas curvas de calibración se ajustan mejor a una ecuación de segundo grado y se recomiendan utilizarlas entre las profundidades de 0 a 40 cm y en el rango de agua útil para el cultivo para evitar extremos que originan imprecisiones. Por consiguiente, la Figura 5 es la curva de calibración obtenida con 25 muestras (n=25), ajustada a una ecuación cuadrática al igual que las elaboradas por Cabrera *et al.* (2018) y Vargas *et al.*(2011) en sus investigaciones.

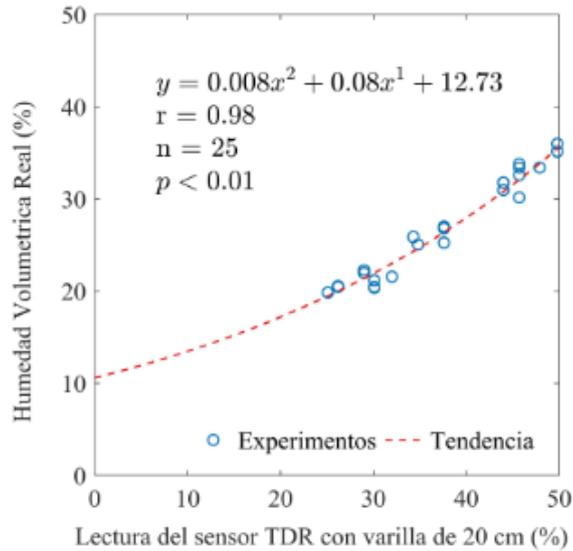


Figura 5: Curva de calibración de la lectura del sensor TDR-300 Field scout y el porcentaje de humedad volumétrica real del suelo usando el método gravimétrico y densidad aparente

3.4.1. Correlación de la temperatura infrarroja en función a sensores térmicos de termopar (STT)

El procesamiento de las imágenes IR capturadas por la cámara termográfica se realizó mediante el software Flir Tool. La Tabla 4 muestra los parámetros requeridos para la calibración de las imágenes IR. La temperatura reflejada se obtuvo como la media de la temperatura del papel corrugado de aluminio considerando una emisividad de 1, según procedimiento del manual de la cámara termográfica FLIR E60, véase el ejemplo de la Figura 6. Donde lo resaltado en circunferencia blanca muestra la selección del papel arrugado de aluminio y en la columna derecha de la imagen muestra las medidas de temperaturas de cada selección (19.9, 18.9, 19.9 y 18.6 °C), cuya temperatura promedio (19.33 °C) es la temperatura reflejada del aire, parámetro que se usó para el cálculo de la temperatura foliar en esa imagen capturada a los 40 DDS. Ver parámetros en la Figura 7.

Con la finalidad de validar las temperaturas registradas por la cámara termográfica FLIR E60, se usaron los sensores térmicos de termopar (STT) para hacer las comparaciones con estas mediciones puntuales e instantáneas. Se colectó información continua durante tres días, desde las 12 hasta las 14.5 horas cada 30 minutos. Del equipo STT se trabajó con 6 sensores de contacto adheridas cada una al envés de una hoja diferente (3 sensores para cada tratamiento), por medio de una cinta de fibra de vidrio, ver accesorios de termopar en

Tabla 1; con la cámara térmica, se registró información puntual promedio en los mismos puntos donde se instalaron los STT, ver Figura 23 (ANEXO 5); y se obtuvo la correlación y ecuación de ajuste como se aprecia en la Figura 10.

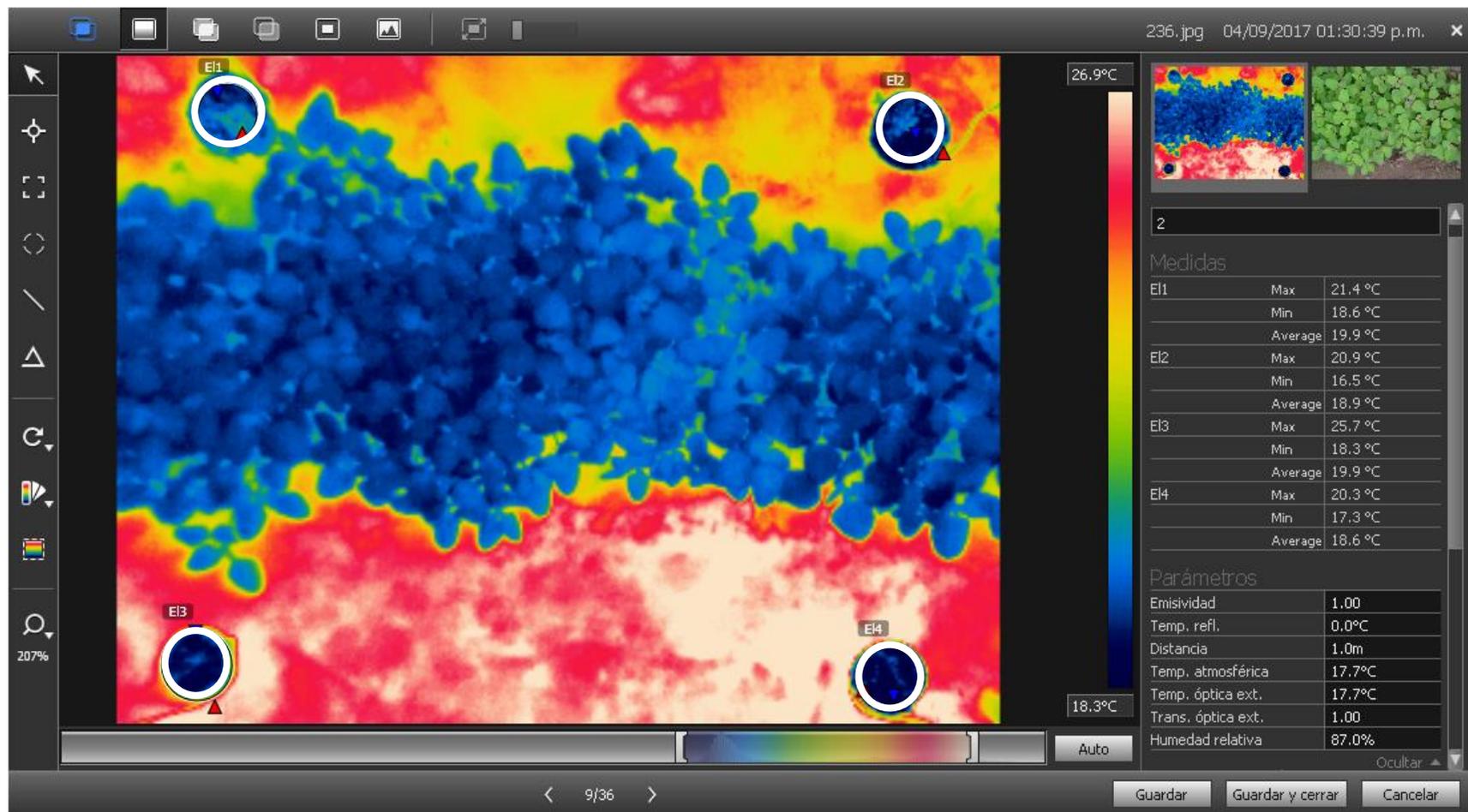


Figura 6: Panel del programa Flir Tool, con parámetros modificables para la obtención de la temperatura reflejada del cultivo de quinua variedad mutante de Amarilla Marangani a los 40 DDS en la fase desarrollo del cultivo

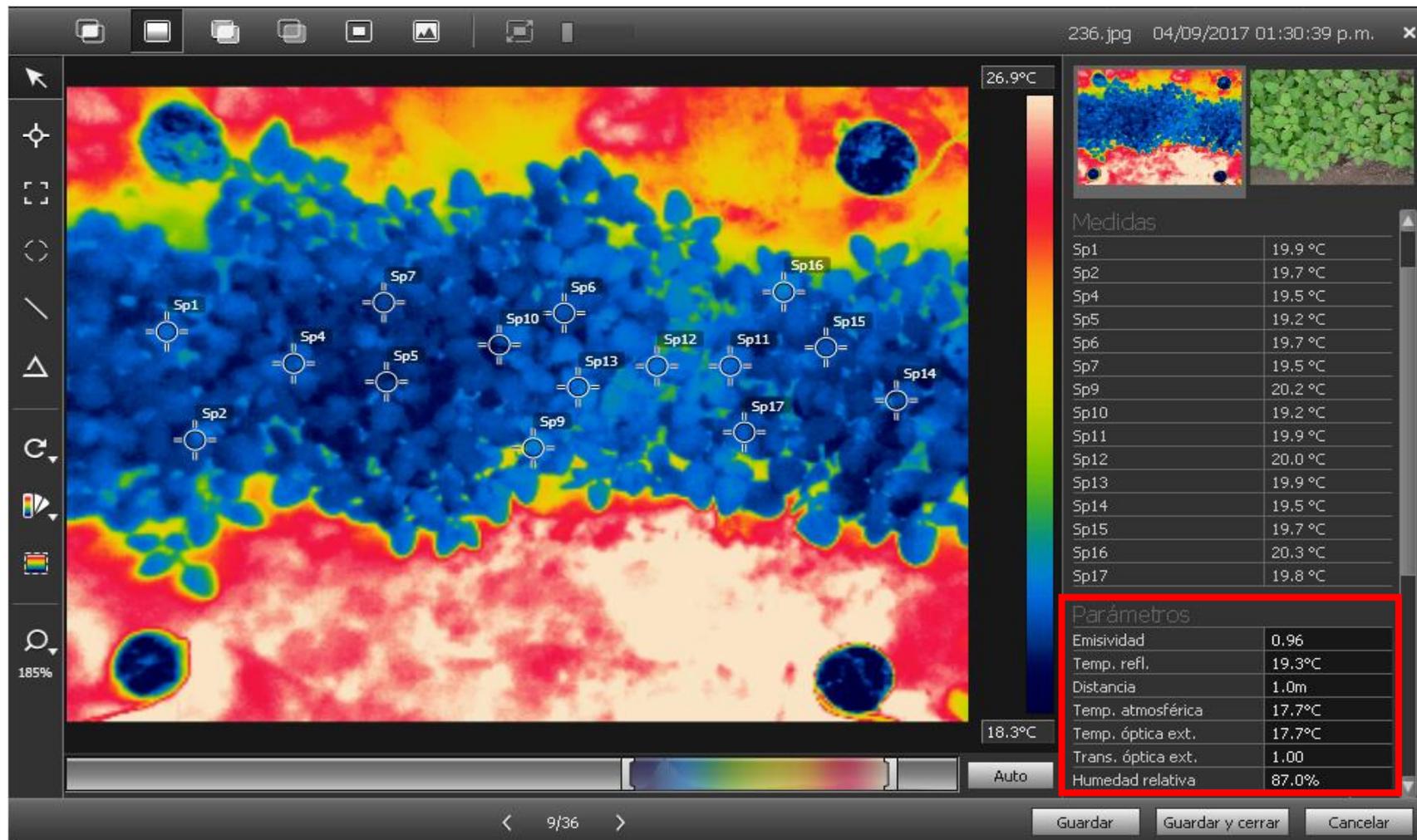


Figura 7: Panel del programa FLIR Tools con parámetros calibrados de la imagen para cálculo de temperatura foliar del cultivo de quinua variedad mutante de Amarilla Marangani a los 40 DDS en la fase desarrollo del cultivo.

Tabla 4: Calibración de parámetros termográficos para la obtención de la temperatura reflejada en cada imagen térmica

Parámetros	Obtención de Temperatura reflejada	Calibración de imagen térmica
Emisividad del dosel	1	0.96
Temperatura reflejada	0	usando la cubierta de platino
Distancia del sensor térmico a la superficie de la hoja	1	1
Temperatura óptica externa	Igual a la temperatura del aire	Igual a la temperatura del aire
Transmisividad óptica externa	1	1
Temperatura atmosférica	Depende del día y hora	Depende día y hora
Humedad relativa	Depende del día y hora	Depende día y hora

3.4.2. Temperaturas umbrales de mínimo y máximo estrés

Para el cálculo de las temperaturas umbrales que corresponden a estados de mínimo y máximo estrés hídrico, se determinó la línea bases inferior (LI) y línea base superior (LS) siguiendo la Ecuación 2 y Ecuación 3 del marco teórico.

La línea base inferior (LI), caracterizada por el mínimo estrés hídrico, se determinó a través del siguiente procedimiento: primero, se obtuvo la hora de mínimo estrés hídrico foliar del día, realizando un ensayo que consistió en encontrar el horario de coincidencia entre la temperatura del cultivo de quinua y la temperatura del aire, tal como se realizó en es estudios anteriores por Jones, (2004) y Aston, (1972), quienes mencionan que es aceptado asociar a la temperatura del cultivo que se produce durante las primeras horas de la mañana, horario en que finaliza el periodo de adormecimiento nocturno del cultivo, y la temperatura foliar se equipara a la temperatura del aire. Para ello se evaluó durante tres días (109, 113 y 115 DDS), desde las 9:00 hasta 17:00 horas cada 30 minutos la temperatura foliar del cultivo con sensores termopar (STT) y se comparó con la temperatura del aire registrada por la estación meteorológica Alexander Von Humboldt en ese periodo de tiempo. Del ensayo se obtuvo un horario de coincidencia a las 10 horas aproximadamente, ver Figura 11. Con esta información se consideró, para un día de evaluación, a la temperatura del aire de las 10 horas como la temperatura de mínimo estrés que tendría el cultivo entre las 13 y 14 horas. Segundo, se calculó durante todo el crecimiento del cultivo, la variación de temperaturas del cultivo de mínimo estrés y la del aire, registradas entre las 13 y 14 horas. Tercero, se calculó el DPV

en función de la temperatura y humedad relativa del aire, registrados para el mismo horario, datos que se obtuvieron de la estación meteorológica Alexander Von Humboldt de la UNALM. Finalmente, a través del modelo matemático de regresión lineal simple se relacionó LI (variable dependiente) con el DPV (variable independiente), obteniéndose la Ecuación 2: $LI = aDPV + b$, siendo a (pendiente) y b (intercepto). Siguiendo el procedimiento explicado, se calculó los coeficientes de la línea base inferior (LI) para tres etapas representativas: comenzando por la etapa de inicios de temporada (fase de desarrollo vegetativo, botón floral e inflorescencia; entre los 10 y 50 DDS); etapa de mediados de temporada (fase de floración y antesis; entre los 51 y 85 DDS); y etapa de final de temporada (fase de grano, entre los 86 y 128 DDS), tal como se aprecia en la Figura 12.

Para estimar la línea base superior (LS), caracterizada por el máximo estrés hídrico, la parcela del tratamiento T1 fue sometida a estrés hídrico, reduciéndose el riego escalonadamente de la ETc. (reducción del 50%, 75% y 100%, entre los 93 y 115 DDS), tal como se muestra en la Figura 13. Durante esos días de corte del recurso hídrico, se colectó temperaturas del cultivo estresado (T1) y temperaturas del aire (T_a) registradas entre las 13 y 14 horas, logrando así determinar las variaciones entre estas temperaturas. Siendo la máxima variación calculada durante ese periodo, la que representa a la línea base superior (LS), permitiendo la estimación de la Ecuación 3 : $LS = k$, siendo k un valor constante, independiente del DPV. Esta línea fue usada para todas las etapas fenológicas (ver Figura 14); similar a estudios realizados por Khorsandi *et al.* (2018) y Mangus *et al.* (2016) en el cultivo de ajonjolí y maíz respectivamente.

3.4.3. Índice de estrés hídrico foliar (CWSI)

El CWSI se calculó en base a la ecuación empírica sugerida por Bozkurt *et al.* (2021), como se muestra en la Ecuación 1, y representada de manera gráfica a través de la línea base inferior (LI) y superior (LS); correspondientes a $LI = aDPV + b$ y $LS = K$, según Ecuación 2 y Ecuación 3 respectivamente, explicadas en la revisión bibliográfica. Las evaluaciones de CWSI se realizaron entre los 44 y 120 después de la siembra (DDS), entre las 13 y 14 horas del día, horario donde se obtuvieron los mayores valores de CWSI, dado que se registraron los picos de las temperaturas del cultivo y del aire durante un día, tal como se aprecia en Figura 11. Al respecto Irmak *et al.* (2000) mencionan que el mejor horario del día para evaluar el CWSI es después del medio día solar, donde se registran los mayores valores de CWSI, periodo que coincide con los niveles más altos de DPV (temperatura del aire alta y

humedad relativa baja), por lo tanto, la programación de riego basada en CWSI debería utilizar los datos recopilados durante este período del día.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Corrección de la temperatura de las imágenes térmicas de cámara FLIR.

La Tabla 5 presenta la caracterización fenológica de la quinua variedad mutante de Amarilla Maranganí para los dos tratamientos (T0 y T1) según criterios de clasificación dados por la FAO, Mujica (2006) y Quillatupa (2009) en DDS. Ambos tratamientos tuvieron duraciones similares en el desarrollo de sus etapas fenológicas, logrando la madurez fisiológica a los 128 DDS, y una madures de cosecha a los 140 DDS.

Tabla 5: Fenología del cultivo de quinua variedad Mutante de Amarilla Maranganí, según FAO, Mujica y Quillatupa

Etapa (FAO)	Estados fenológicos		DDS	
	Fases (Mujica, 2006)	Subfases (Quillatupa, 2009)	T0	T1
Inicial	Siembra	Siembra	0	0
	Germinación	Emergencia	4	5
Desarrollo vegetativo		Hojas cotiledonales	5	6
	Desarrollo del cultivo	2 hojas verdaderas	10	8
Desarrollo del cultivo		4 hojas verdaderas	16	15
	Desarrollo del cultivo	6 hojas verdaderas	20	19
Desarrollo del cultivo		8 hojas verdaderas	24	23
	Desarrollo del cultivo	10 Hojas verdaderas	28	26
Desarrollo del botón floral		Botón floral visible	29	28
	Desarrollo del botón floral	Botón floral de 0.5m	33	32
Desarrollo del botón floral		Botón floral de 1cm	38	37
	Desarrollo de la inflorescencia	Inicio de piramidación	42	43
Desarrollo de la inflorescencia		Piramidación completa	49	50
	Mediados de temporada	Floración	Inicio de floración	51
Plena floración			66	65
Final de temporada	Antesis	Antesis	70	71
	Grano acuoso	Grano acuoso	86	84
Final de temporada	Grano lechoso	Grano lechoso	94	93
	Final de temporada	Grano pastoso	Grano pastoso suave	112
Final de temporada		Madurez fisiológica	Grano pastoso duro	121
	Madurez fisiológica		128	128

La Figura 8 muestra la duración en días de cada fase fenológica de acuerdo a la clasificación FAO correspondientes a cada tratamiento (T0 y T1). Se aprecia una similitud entre ambos tratamientos, siendo la fase inicial, la etapa más corta; y la fase final, la etapa más larga.

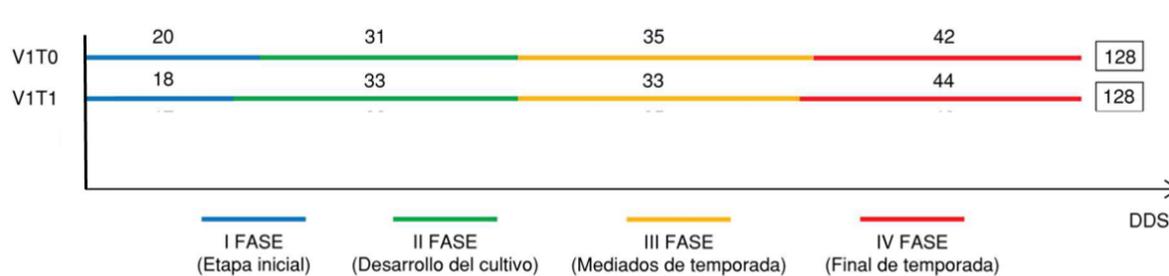


Figura 8: Duración en días de las fases fenológicas acorde a clasificación FAO para los tratamientos T0 y T1

Se compararon los promedios de biomasa (Tabla 6) y rendimiento del cultivo (Tabla 7) para los dos tratamientos (T0 y T1) mediante el análisis estadístico de la varianza (ANOVA). Los resultados demuestran que no existe diferencias significativas entre ambos tratamientos tanto en biomasa como en rendimiento, dado que tienen un p-valor superior al nivel de significancia ($\alpha = 0.05$), véase con más detalle la Tabla 12 y Tabla 13 (ANEXO 2); Esto se contradice con lo recopilado por Bhargava & Srivastava (2013) que mencionan como fase más sensible de la quinua al corte del riego, la fase de grano lechoso. Además, Fghire *et al.* (2017) aplicando una reducción de la ETc de 75%, 50% y 35% en toda la fenología, obtuvo diferencias significativas en el rendimiento y conductancia estomática, a partir del 50% de reducción. De lo anterior, la reducción del riego en la fase inicial de grano lechoso (93 DDS) hasta la cosecha, no resultó ser tan severo para reducir significativamente los rendimientos del cultivo; posiblemente porque la reducción del riego fue escalonada, dándole tiempo al cultivo para una adaptación. Además, se ha reportado que la alta humedad relativa favorece a que el oxalato de calcio presente en las hojas de quinua, sea capaz de absorber agua del medio ambiente manteniendo turgente la hoja y alta la tasa fotosintética (alta conductancia estomática) en condiciones de sequía, además se mantiene a niveles bajos las pérdidas por transpiración, mejorando así su tolerancia al estrés hídrico (Bhargava & Srivastava, 2013; Al-Khayri *et al.*, 2019).

Tabla 6: Valores promedio y desviación estándar de la biomasa del cultivo de quinua

Tratamiento	Biomasa promedio (t ha ⁻¹)	Desviación estándar (t ha ⁻¹)	Coefficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
T0	11.37	1.67	14.65	9.52	13.57
T1	10.12	1.21	11.92	8.33	10.95

Tabla 7: Valores promedio y desviación estándar del rendimiento del cultivo de quinua

Tratamiento	Rendimiento promedio (t ha ⁻¹)	Desviación estándar (t ha ⁻¹)	Coefficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
T0	2.47	0.15	5.91	2.26	2.60
T1	2.19	0.31	14.41	1.82	2.54

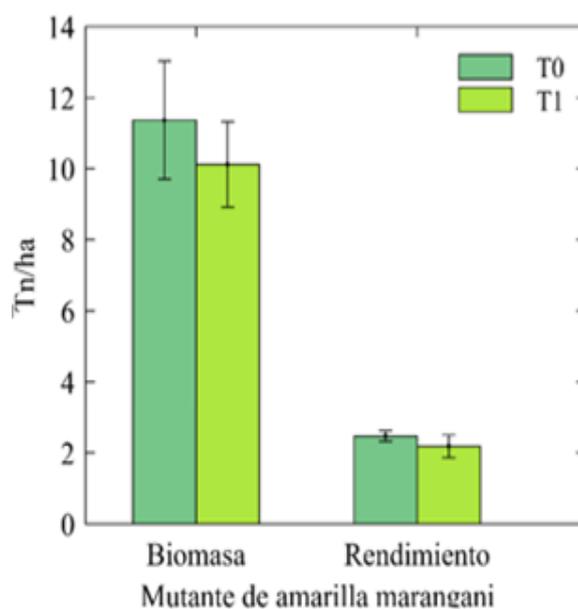


Figura 9: Barras del promedio de biomasa aérea seca y rendimiento seco y la desviación estándar

La Tabla 8 presenta el índice de cosecha, la desviación estándar y el coeficiente de variación (CV); con un valor de índice de cosecha de 21.6 % para los dos tratamientos (T0 y T1), además el CV varía entre 6.67 % y 18.99 %, no habiendo diferencias significativas entre tratamientos. Mayor detalle del análisis estadístico en la Tabla 14 (ANEXO 2).

Tabla 8: Valores promedio y desviación estándar del índice de cosecha

Tratamiento	Índice de cosecha promedio (%)	Desviación estándar (%)	Coefficiente de variación (%)	Mínimo	Máximo
T0	21.60	4.10	18.99	16.68	23.21
T1	21.60	1.44	6.67	19.7	23.21

La Tabla 9 muestra el peso de 1000 gramos (g) para cada tratamiento (T0 y T1), se obtuvo un peso de 3.27 g para el T0 y de 3.18 g para el T1, el cual demuestra una diferencia mínima entre ambos (0.09 g), siendo el T1 menor en 2.75 % del peso obtenido en T0.

Tabla 9: Peso 1000 granos (g)

Tratamiento	Peso 1000 granos (g)
T0	3.27
T1	3.18

La Tabla 10 muestra la reducción del volumen de agua aplicado en el T1, el cual permitió un incremento de 0.11 Kg m⁻³ de la EUAaplicada, que representa un incremento del 17.5 %; acorde con lo obtenido por Antezana (2019) en la misma variedad y campo experimental, con una reducción del 13.2 % de EUAaplicada. Estos resultados reafirman el efecto positivo que tiene la limitación del riego en el rendimiento de la quinua (Fajardo *et al.*, 2016).

Tabla 10: Eficiencia y uso del agua (EUA) por tratamiento

Tratamiento	Rendimiento promedio (kg ha ⁻¹)	Volumen de agua aplicada (m ³ ha ⁻¹)	EUA _{aplicada} (kg m ⁻³)
T0	2470	3928	0.63
T1	2190	2948	0.74

En la Figura 10 se muestra la relación lineal entre la temperatura foliar del cultivo de quinua medida con una cámara FLIR E60, y medida con sensores de termopar STT. Las evaluaciones se realizaron a los 109, 113 y 115 DDS entre las 12 y 14.5 horas, obteniéndose un coeficiente de determinación (r^2) de 0.941 y un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.970, significativo para un p-valor < 0.05 en la prueba F-Fisher, ver Tabla 15 (ANEXO 2), indicando que existe una alta correlación. Esta alta correlación permitió realizar las correcciones de todos los valores de temperaturas del cultivo registrados por la cámara

térmica a través de la ecuación de ajuste $y = 0.901x + 0.933$, siendo la variable independiente (x) los valores de temperaturas registradas por la cámara térmica FLIR y la variable dependiente (y) los valores ajustados de temperaturas según el termopar STT.

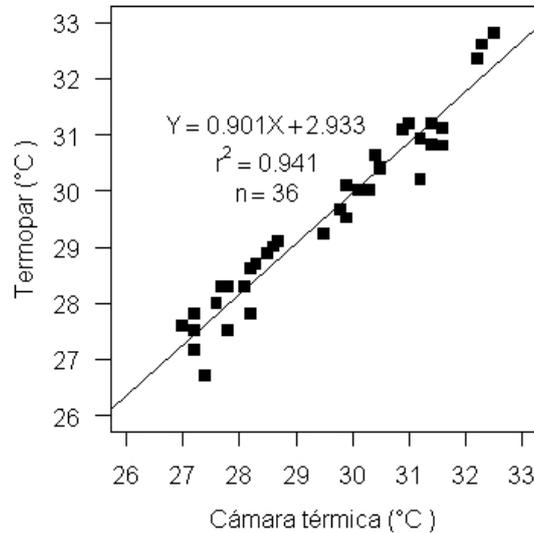


Figura 10: Relación de la temperatura foliar medida con una cámara FLIR E60, y con sensor termopar OMEGA TT-T36-SLE-500 en el cultivo de quinua

4.2. Temperaturas umbrales de mínimo y máximo estrés.

En la Figura 11 se muestra la variación horaria de la temperatura del aire (T_a), temperatura foliar del cultivo para el tratamiento sin estrés (T_o) y tratamiento con estrés (T_1) medidas con sensores de termopar a los 109, 113 y 115 DDS, entre las 9 y 17 horas. Se observa que para día cualquiera, las temperaturas del cultivo siguen una tendencia de curva de campana a medida que transcurren las horas. Siendo el pico máximo de temperaturas, las registradas entre las 13 y 14 horas aproximadamente. Irmak *et al.* (2000) mencionan que el mejor horario del día para evaluar el CWSI es aquel en donde se registra los mayores valores de temperatura del cultivo. Por tal motivo, en la presente investigación se realizó todas las evaluaciones del CWSI en el horario de las 13 y 14 horas. También se aprecia que a las 10 horas aproximadamente, la mediana de los datos de temperatura foliar y temperatura del aire coinciden, motivo por el que se consideró para un día de evaluación, a la temperatura del aire (T_a) de las 10 horas como la temperatura de mínimo estrés, que tendría el cultivo entre las 13 y 14 horas, similar a lo recomendado por Jones (2004) y Aston (1972).

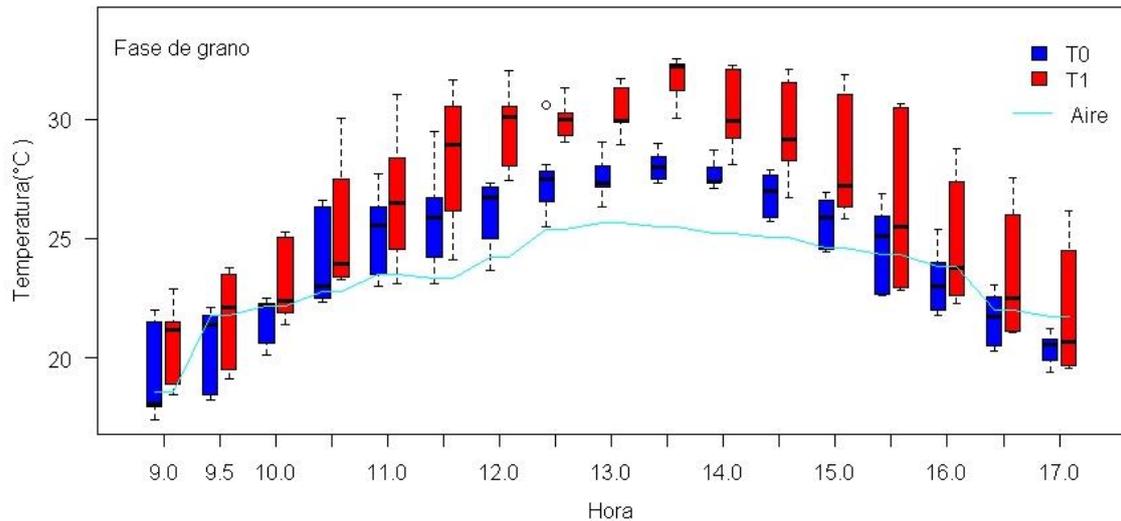


Figura 11: Variación horaria de la temperatura foliar y del aire medido con 06 sensores de termopar (STT) a los 109, 113 y 115 DDS

En la Figura 12, se muestra la relación de la $(T_c - T_a)$ y el DPV para el cultivo de quinua sin estrés hídrico, evaluadas entre las 13 y 14 horas del día, durante las diferentes etapas de crecimiento del cultivo, siguiendo el método empírico para la formación de líneas bases inferiores (LI), similar al desarrollado por Bozkurt *et al.* (2021). Se obtuvo, $LI = -2.521DPV - 0.291$ para la etapa inicial (fase vegetativa, botón floral e inflorescencia), $LI = -2.184DPV - 0.644$ para la etapa de mediados de temporada (fase de floración y antesis), y $LI = -2.192DPV + 0.114$ para la etapa final (fase de grano acuoso, lechoso y pastoso), obteniendo coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.79, 0.82 y 0.87 respectivamente, y con un p valor < 0.05 para cada caso, tal como se muestra en la Tabla 16, Tabla 17 y Tabla 18 (ANEXO 2); mostrando así una correlación alta y significativa. Estas ecuaciones tienen ligeros cambios en la pendiente e intercepto de la recta, por lo que puede resumirse en la ecuación siguiente: $LI = (-2.521 - 2.184) DPV + (-0.644 + 0.114)$. El déficit de presión de vapor (DPV) para todo el periodo de evaluación se mantuvo en un rango bajo, que varía de 0.18 a 1.60 KPa, el cual indica, que el aire es capaz de retener en el medio grandes cantidades de vapor de agua, generando así una humedad relativa (HR) elevada en el medio ambiente, tal como se puede apreciar en la Figura 13(a). Donde las humedades relativas promedio del aire (HR) variaron de 69 a 98 %, a lo largo de todo el periodo experimental (agosto a diciembre), abarcando estaciones de invierno y primavera.

López *et al.* (2009) mencionan que el CWSI no es recomendable para regiones húmedas, debido a que en estas condiciones generalmente no se presentan condiciones de sequía.

Tarqui *et al.* (2017) sugieren que el rango adecuado de DPV para definir la línea base inferior es de 1 a 6 Kpa. Sin embargo, pese a que el cultivo de quinua se desarrolló en un ambiente húmedo con valores inferiores a 1.6 Kpa de DPV, se logró obtener una alta correlación con la diferencia de la temperatura del cultivo no estresado y temperatura del aire $(T_c - T_a)_{LI}$. Al respecto (Mangus *et al.*, 2016) mencionan que las líneas bases inferiores son específicas del cultivo y están influenciadas por el clima.

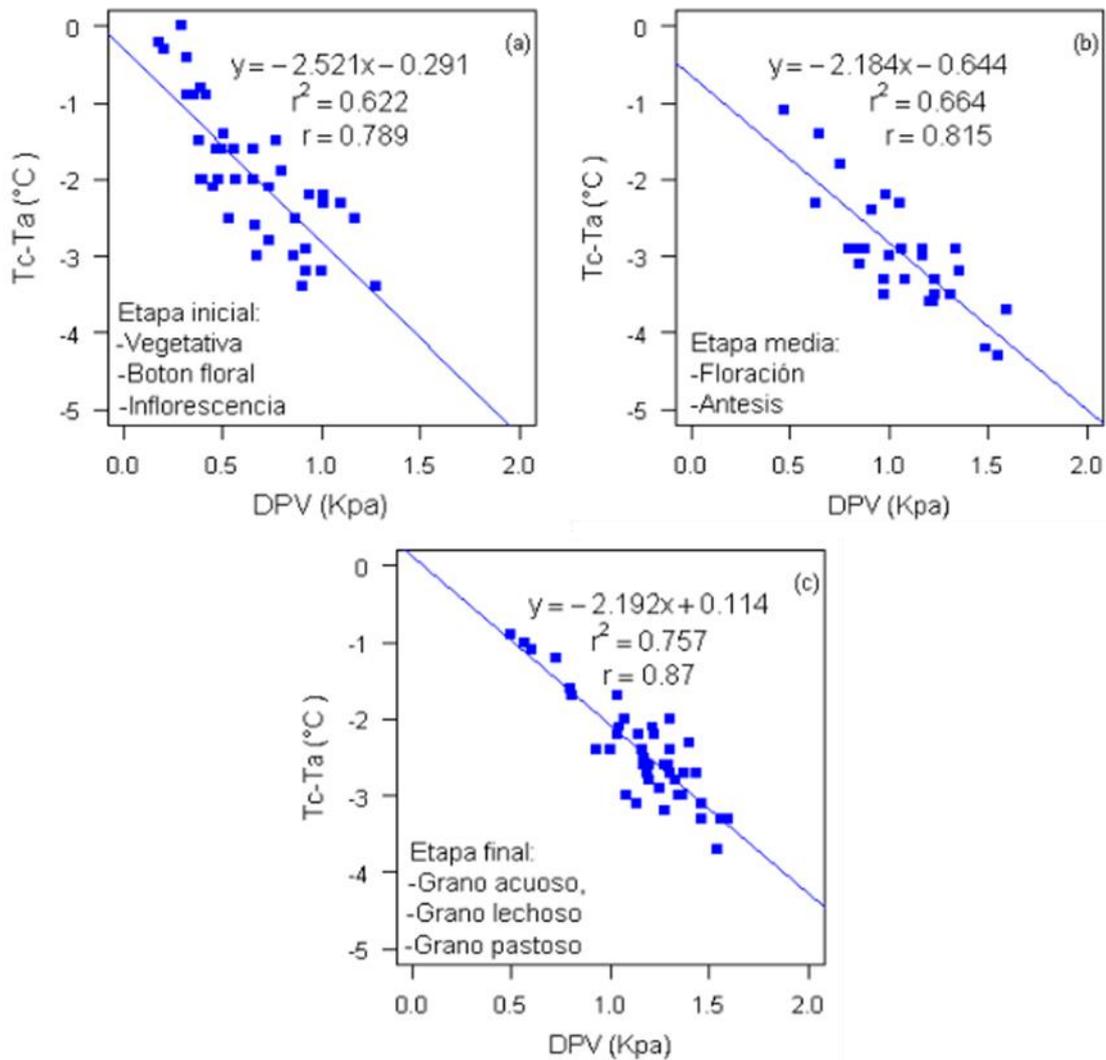


Figura 12: Variación de la temperatura foliar y del aire para el cultivo de quinua y el déficit de presión de vapor del aire (DPV) según etapa inicial (a); etapa media (b); y etapa final (c)

Tabla 11: Pendiente e intercepto de las líneas bases inferiores según etapa del cultivo

Etapa del cultivo	Línea base inferior	Pendiente (b)	Intercepto(a)	r
Inicios de temporada	Fase vegetativa	-2.521	-0.291	0.79
Mediados de temporada	Fase de floración	-2.184	-0.644	0.81
Final de temporada	Fase de grano	-2.192	0.114	0.87

La correlación encontrada en la presente investigación, apoya el uso del DPV para una predicción acertada del LI, usado posteriormente para el cálculo del CWSI, como se aprecia en la Figura 14.

En la Figura 13, se muestra la variación en el tiempo (11 a 120 DDS) de la temperatura foliar del cultivo (T_c), temperatura del aire (T_a), humedad relativa (HR %), lámina de riego (LR) y precipitaciones (Pp). Al cultivo del tratamiento con estrés (T1) se le aplicó una reducción de riego de manera escalonada (50, 75, 100 % del Etc) alcanzando una lámina de riego de 16.9, 8.8 y 0 mm respectivamente; realizadas a los 93, 100, y 109 DDS, tal como se aprecia en la Figura 13(b). En ese periodo de tiempo se aprecia un incremento notable de la temperatura foliar del T1 en comparación a la temperatura del aire, alcanzando un incremento máximo de 28.3 %. La variación máxima se registró a los 22 días después del primer corte de agua (después que el recurso hídrico se redujo al 100 %), momento donde se registró una temperatura foliar máxima para el cultivo de quinua (32.2 °C) superior a la temperatura del aire en 7.1 °C (máxima diferencia entre la temperatura foliar del T1 y T_a) tal como se aprecia en la Figura 13(a). Sin embargo una investigación similar realizada por Bozkurt *et al.*, (2021) en el cultivo de quinua, cv.Titicaca, determinó una temperatura umbral pico de 4.75 °C por encima de la temperatura del aire, lo que puede deberse a las diferencias propias de la variedad del cultivo, el entorno donde se realizó el experimento y las condiciones climáticas. Esta máxima diferencia encontrada (7.1°C), se consideró para el desarrollo de la línea base superior (LS), similar al procedimiento recomendado por otros autores (Khorsandi *et al.*, 2018).

Se aprecia que en los días siguientes al pico máximo de la variación entre la temperatura foliar y del aire (113 DDS), esta disminuye de 7.1 a 5.4 °C, pese a estar en una situación más crítica ante la carencia del recurso hídrico. Al mismo tiempo se observa que la humedad relativa del aire (HR%) incrementa de 82 % a 91 %. Dicha disminución de la temperatura del cultivo es posible, dado la propiedad higroscópica del oxalato de calcio en la hoja de

quinua que le permite captar vapor de agua a través de estomas de la hoja acelerando su capacidad fotosintética y de transpiración (Geerts et al., 2008).

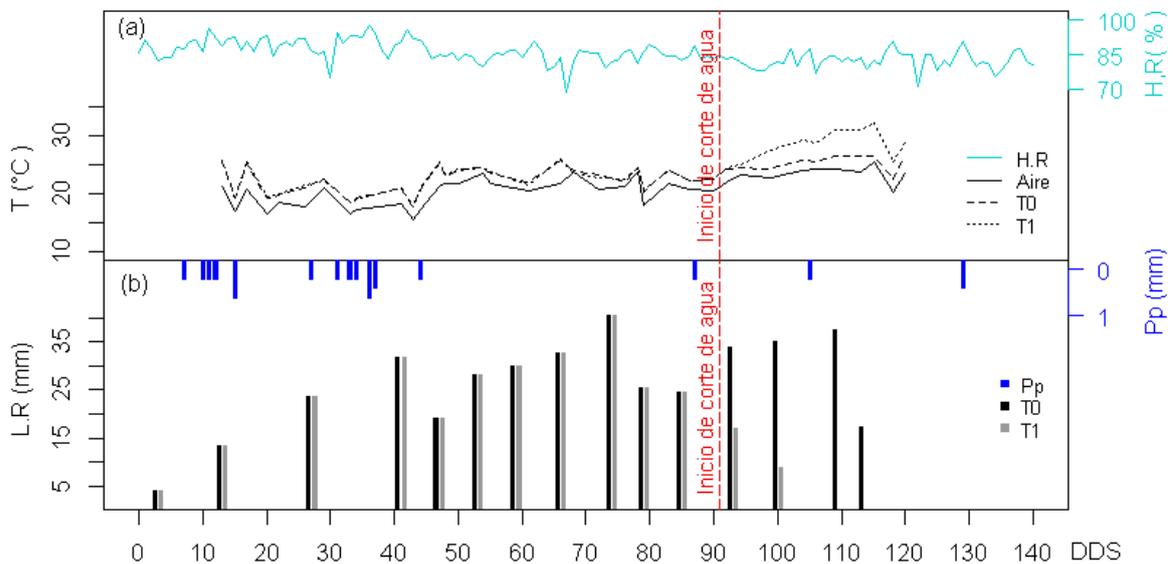


Figura 13: Variación en el tiempo (DDS) de la temperatura foliar con estrés, sin estrés, temperatura del aire y humedad relativa (a); precipitación diaria y eventos de riego durante el desarrollo del cultivo (b)

En la Figura 14 se muestra las ecuaciones de línea base superior (LS) e inferiores (LI) necesarios para el cálculo del CWSI desarrollado de acuerdo al enfoque empírico recomendado por Bozkurt *et al.* (2021). Se obtuvo un límite superior $LS = 7.1$, el cual representa a la diferencia entre la temperatura foliar y la temperatura del aire cuando no existe transpiración del cultivo (máximo estrés). Esta línea es una función constante motivo por el que no depende del DPV. También se obtuvo líneas bases inferiores, dependientes del DPV, correspondientes a 3 etapas representativas del crecimiento: Para la etapa de inicios de temporada (fase vegetativa, botón floral e inflorescencia) se obtuvo un $LI = - 2.521DPV - 0.291$, para la etapa de mediados de temporada (fase de floración y antesis) un $LI = - 2.184DPV - 0.644$, y para la etapa final (fase de grano) un $LI = - 2.192DPV + 0.115$. Bozkurt *et al.* (2021) reportó una ecuación similar para todas las fases fenológicas del cultivo de quinua ($LI = - 1.4952DPV + 1.351$). Sin embargo, muchos investigadores indican que la variedad del cultivo y las condiciones climáticas podrían impactar en la relación de línea base causando diferenciación (Emekli *et al.*, 2007). Estos resultados demostraron que los parámetros de la ecuación de línea base inferior para las 2 primeras etapas del cultivo de quinua (inicio y mediado de temporada) variaron ligeramente motivo por el que se puede proponer una sola ecuación que las represente,

$LI = (- 2.521 - 2.184)DPV + (- 0.644 - 0.291)$, mientras que la ecuación de la tercera etapa (fase de grano), muestra una diferencia notable en su gráfica al sobreponerse a las otras. Aquello indica que en la fase de grano, para un determinado déficit de presión de vapor (DPV), la temperatura del cultivo de mínimo estrés será mayor en comparación a las otras etapas. Al respecto Bhargava & Srivastava, (2013) mencionan que la fase más sensible de la quínoa al corte del riego, es la etapa de formación del grano. Por tal motivo, en esa etapa (desde los 93 a120 DDS), al tratamiento sin estrés (T0) se le aplicó una lámina de riego mayor (en promedio 35.5 mm) tal como se aprecia en la Figura 13b.

La diferencia de la temperatura real del cultivo y temperatura del aire, se encuentran ubicados dentro de los límites inferior (LI) y límite superior (LS). Obteniendo así toda la información necesaria para el cálculo del índice de estrés hídrico (CWSI).

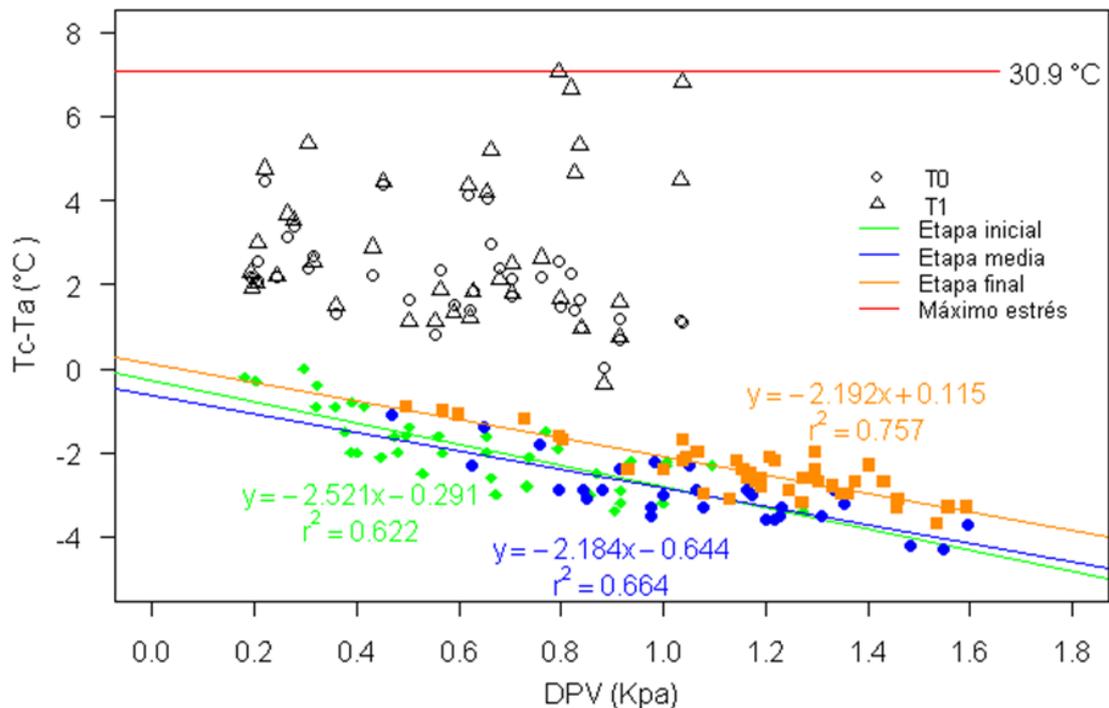


Figura 14: Líneas bases de máximo y mínimo estrés, según relación entre la $(T_c - T_a)$ y el DPV durante las etapas de crecimiento del cultivo

4.3. Índice de estrés hídrico foliar (CWSI)

La figura 15, muestra la variación del CWSI respecto a los días después de la siembra (DDS) para los dos tratamientos (T0 y T1). Se aprecia que antes de los 93 DDS (inicio del corte de riego, fase de grano lechoso), ambos tratamientos siguen una tendencia similar de CWSI; y desde los 93 DDS, en que ocurre el corte de riego, se observa un incremento del CWSI en el tratamiento con estrés (T1), dadas las reducciones escalonadas del riego del 50%, 75% y 100% de la ETc; realizadas a los 93, 100 y 109 DDS respectivamente. Con registro del CWSI igual a 1 (máximo estrés), a los 22 días después del inicio de corte de agua, correspondiente al T1, mientras que el CWSI del T0 fue de 0.495. Este máximo CWSI, ocurre cuando se registra la máxima variación entre la temperatura del cultivo (Tc) y el aire (Ta), correspondientes a 32.2 °C y 25.1 °C respectivamente, siendo la variación máxima 7.1 °C. Entre los 115 DDS y 118 DDS, se aprecia una disminución del CWSI para el tratamiento con estrés (T1), esto posiblemente se deba a un incremento de la humedad atmosférica del 82 al 91% (ver Figura 13a), incremento de humedad que podría ser captada por la hoja de quinua, lo que le permitiría reducir su temperatura y en consecuencia reducir su CWSI. Al respecto, Geerts *et al.*, (2008), indican que la presencia del oxalato de calcio en la hoja de quinua, le permite captar humedad atmosférica.

En la Figura 16 se muestra la relación entre el índice de estrés hídrico (CWSI) y la humedad volumétrica del suelo (θ %). Se observa que valores de CWSI < 0.46, se corresponden con valores de θ % > 21.82, siendo la relación θ % = 42.849 - 45.709CWSI ($r^2 = 0.713$, $r = 0.844$ con p valor < 0.05), mientras que para valores de CWSI > 0.46, se corresponden con valores θ % < 21.82 %, siendo la relación θ % = 27.184 - 12.829CWSI ($r^2 = 0.848$, $r = 0.921$ con p valor < 0.05), demostrándose en ambos casos una correlación inversa y significativa.

De los valores obtenidos, se recomienda realizar el riego en un rango de CWSI de 0.38 a 0.6, siendo 0.46 un buen indicador para la activación del riego; el valor de 0.38 corresponde a una humedad del suelo a capacidad de campo y 0.6 corresponde al máximo valor de CWSI antes del inicio del corte de riego (ver zona achurada de Figura 16).

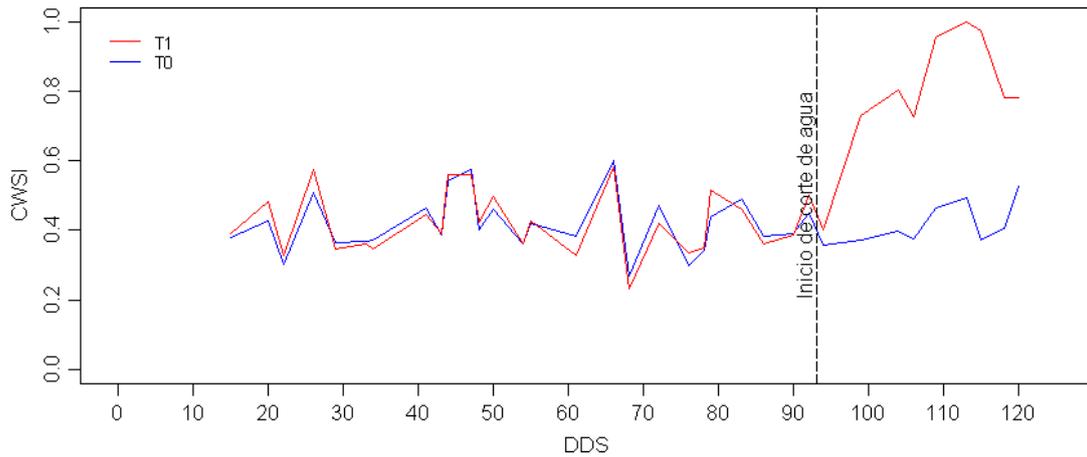


Figura 15: Variación del CWSI del tratamiento T0 y T1 respecto a los DDS

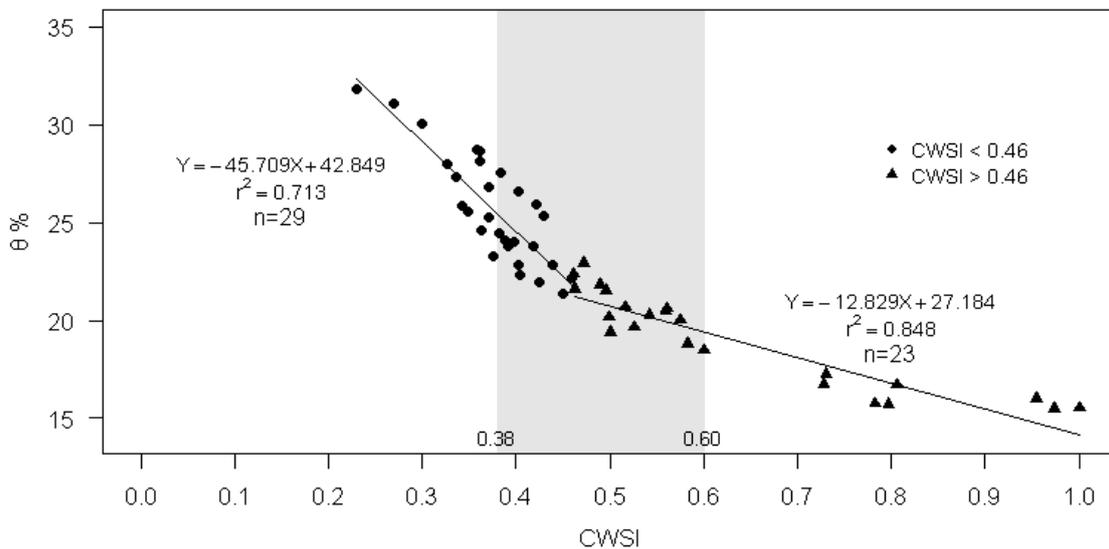


Figura 16: Relación entre el índice de estrés hídrico foliar (CWSI) y humedad del suelo para valores menores y mayores a 0.46

La relación entre el CWSI y la θ % demuestran la validez del uso de la detección térmica sin contacto para medir indirectamente la humedad del suelo (Mangus *et al.*, 2016), por lo que, se recomienda el uso de técnicas de programación de riego basadas en el CWSI, acorde con Mangus.*et al* (2016) y Yesim *et al.*(2020).

V. CONCLUSIONES

1. El método del CWSI, a través de la medición de la temperatura foliar del cultivo de quinua mutante de Amarilla Marangani, vía termografía infrarroja es un método práctico, no destructivo y confiable para monitorear la humedad volumétrica del suelo.
2. Existe una relación entre la temperatura foliar del cultivo de quinua obtenidas con una cámara térmica (x), y con termopar (y), con un coeficiente de correlación de Pearson (r) de 0.970, significativo para un $p < 0.05$; y con una ecuación de ajuste $y = 0.901x + 0.93$.
3. Las temperaturas umbrales de mínimo estrés (LI) y máximo estrés hídrico (LS) fueron representadas por las siguientes ecuaciones: $LI = - 2.52DPV - 0.291$ para la fase vegetativa, $LI = - 2.184DPV - 0.644$ para la fase de floración y $LI = - 2.192DPV + 0.644$ para fase de grano, con coeficientes de correlación de Pearson (r) de - 0.79, -0.81 y -0.87 respectivamente, significativo para un p valor < 0.05 en cada caso; siendo $LS = 7.1$ para todas las etapas de crecimiento del cultivo de quinua.
4. Se obtuvo dos relaciones entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo, para valores de $CWSI < 0.46$, se obtiene $\theta \% = 42.849 - 45.709CWSI$ mientras que para valores de $CWSI > 0.46$, $\theta \% = 27.184 - 12.829CWSI$ con coeficientes de correlación de Pearson (r) de - 0.844 y - 0.921 respectivamente, significativo para un p valor < 0.05 en cada caso.
5. Un valor de CWSI igual a 0.46 es un indicador de activación del riego, siendo $\theta \% = 42.849 - 45.709CWSI$ ($CWSI < 0.46$) y $\theta \% = 27.184 - 12.829CWSI$ ($CWSI > 0.46$, $\theta \%$) con coeficientes de correlación de Pearson (r) de - 0.844 y - 0.921 respectivamente significativo para un p valor < 0.05 en cada caso.

VI. RECOMENDACIONES

1. Medir la emisividad (ϵ) del cultivo de quinua en campo empleando un espectroradiómetro para mejorar la calibración de imágenes térmicas.
2. Validar los resultados en parcelas de mayor tamaño, con más tratamientos de reducción de lámina de riego superiores al 30 % en unidades experimentales (parcelas) independientes y con más repeticiones.
3. Para caracterizar con mayor detalle la línea base superior aplicar un tratamiento con corte total de riego (reducción del 100% de la ETC) realizada en la fase de botón floral, floración y de grano.
4. Para determinar con más precisión el horario de coincidencia de las temperaturas del cultivo y del aire, fijar un termopar que registre las temperaturas del cultivo cada 30 minutos, las 24 horas del día durante todas las etapas fenológicas del cultivo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICA

- Alandia, G., Rodriguez, J. P., Jacobsen, S. E., Bazile, D., & Condori, B. (2020). Global expansion of quinoa and challenges for the Andean region. *Global Food Security*, 26, Article 10429. <https://doi.org/10.1016/j.gfs.2020.100429>
- Alzate, E. J., Montes, J. W., & Silva, C. A. (2007). Medición de temperatura: Sensores termoeléctricos. *Scientia Et Technica*, 1(34).
<https://doi.org/10.22517/23447214.5509>
- Arian Control & Instrumentation. (s. f.). Nota técnica 2. Recuperado 26 de enero de 2021, de <http://www.arian.cl/espanol/support.htm>
- Aston, A. R., & Van Bavel, C. H. M. (1972). Soil Surface Water Depletion and Leaf Temperature1. *Agronomy Journal*, 64(3), 368-373.
<https://doi.org/10.2134/agronj1972.00021962006400030034x>
- Ballester, C., Jiménez, M. A., Castel, J. R., & Intrigliolo, D. S. (2013). Usefulness of thermography for plant water stress detection in citrus and persimmon trees. *Agricultural and Forest Meteorology*, 168, 120-129.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.08.005>
- Beluzan, F. J., & Acuña, R. A. (2013). *Déficit de presión de vapor (DPV) y factores microclimáticos, como herramientas de pronóstico de Botrytis cinerea Pers. Ex Fr., en Lactuca sativa L. Bajo invernadero* [UACH].
<http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2013/egb453d/doc/egb453d.pdf>
- Bhargava, A., & Srivastava, S. (2013). *Quinoa: Botany, Production and Uses*. CABI.

- Bozkurt, Y., Yazar, A., Alghory, A., & Tekin, S. (2021). Evaluation of crop water stress index and leaf water potential for differentially irrigated quinoa with surface and subsurface drip systems. *Irrigation Science*, 39(1), 81-100.
<https://doi.org/10.1007/s00271-020-00681-4>
- Cabrera, S., Concepción, N., Batista, O. J., & Palmero, I. (2018). Calibration of TDR probe for the estimation of moisture in typical red Ferrallitic soils. *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, 27(3).
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2071-00542018000300005&lng=es&nrm=iso&tlng=en
- Colaizzi, P., O'Shaughnessy, S., Evett, S., & Howell, T. (2012). Using plant canopy temperature to improve irrigated crop management. *Publications from USDA-ARS / UNL Faculty*. <https://digitalcommons.unl.edu/usdaarsfacpub/1820>
- Costa, J. M., Egipto, R., Sánchez-Virosta, A., Lopes, C. M., & Chaves, M. M. (2019). Canopy and soil thermal patterns to support water and heat stress management in vineyards. *Agricultural Water Management*, 216, 484-496.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.001>
- Emekli, Y., Bastug, R., Buyuktas, D., & Emekli, N. Y. (2007). Evaluation of a crop water stress index for irrigation scheduling of bermudagrass. *Agricultural Water Management*, 90(3), 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2007.03.008>
- Flores, S. E., & Hongn, M. E. (2012). Termografía infrarroja en la edificación: Aplicaciones cualitativas. *Avances En Energías Renovables y Medio Ambiente*, 16(1), 25-32.
- García, I. F., Rubio, A. E., Viñuela, I., Hernández, A., Gutiérrez, S., Rodríguez, C. R., & Durán, V. H. (2018). Thermal imaging at plant level to assess the crop-water status

- in almond trees (cv. Guara) under deficit irrigation strategies. *Agricultural Water Management*, 208, 176-186. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.06.002>
- Garrido, M., Silva, P., Silva, H., Muñoz, R., Baginsky, C., & Acevedo, E. (2013). Evaluación del rendimiento de nueve genotipos de quinua (*Chenopodium quinoa* Willd) bajo diferentes disponibilidades hídricas en ambiente mediterráneo. *Idesia (Arica)*, 31(2), 69-76. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292013000200010>
- Geerts, S., Raes, D., Garcia, M., Vacher, J., Mamani, R., Mendoza, J., Huanca, R., Morales, B., Miranda, R., Cusicanqui, J., & Taboada, C. (2008). Introducing deficit irrigation to stabilize yields of quinua (*Chenopodium quinoa* Willd). *European Journal of Agronomy*, 28(3), 427-436. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2007.11.008>
- Gómez, L., & Aguilar, E. (2016). *Guía de cultivo de la quínoa* (Segunda Edición). <http://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/411552/>
- Huamanchumo, W. (2020). *Pseudocereales andinos: Valor nutritivo y aplicaciones para alimentos libres de gluten* [Universitat Politècnica de València]. <https://riunet.upv.es/handle/10251/151184>
- Idso, S. B., Jackson, R. D., Pinter, P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45-55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- Irmak, S., Haman, D. Z., & Bastug, R. (2000). Determination of Crop Water Stress Index for Irrigation Timing and Yield Estimation of Corn. *Agronomy Journal*, 92(6), 1221-1227. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.9261221x>
- Jackson, R. D., Idso, S. B., Reginato, R. J., & Pinter, P. J. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17(4), 1133-1138. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>

- Jacobsen, S. E., Liu, F., & Jensen, C. R. (2009). Does root-sourced ABA play a role for regulation of stomata under drought in quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd). *Scientia Horticulturae*, 122(2), 281-287.
<https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.05.019>
- Jones, H. G. (2004). Application of Thermal Imaging and Infrared Sensing in Plant Physiology and Ecophysiology. En *Advances in Botanical Research* (Vol. 41, pp. 107-163). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2296\(04\)41003-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2296(04)41003-9)
- Jones, H. G. (2007). Monitoring plant and soil water status: Established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *Journal of Experimental Botany*, 58(2), 119-130. <https://doi.org/10.1093/jxb/erl118>
- Khorsandi, A., Hemmat, A., Mireei, S. A., Amirfattahi, R., & Ehsanzadeh, P. (2018). Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. *Agricultural Water Management*, 204, 222-233. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.04.012>
- López, R., Arteaga, R., Vázquez, M. A., López Cruz, I., & Sánchez, I. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura técnica en México*, 35(1), 97-111.
- Mangus, D. L., Sharda, A., & Zhang, N. (2016). Development and evaluation of thermal infrared imaging system for high spatial and temporal resolution crop water stress monitoring of corn within a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 149-159. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.12.007>
- Monteith, J., & Unsworth, M. (2013). *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere*. Academic Press.
- Mujica, A. (2006). Descriptores para quinoa (*Chenopodium quinoa* Willd.) y sus parientes silvestres. *INIEA*, 64.

- OMEGA Engineering. (s. f.). *Códigos de color de los cables y límite de error*. Recuperado 26 de enero de 2021, de <https://www.omega.com/en-us/colorcodes>
- Pérez, E. C., C, P. L. A., Corona, J. S. S., & Padilla, S. B. (2013). Diferencia entre temperatura foliar de la alfalfa y del aire influenciada por el déficit de presión de vapor en la comarca lagunera. *Agrofaz: publicación semestral de investigación científica*, 13(1), 33-38.
- Quillatupa, C. R. (2009). *Caracterización de las fases fenológicas, determinación de unidades de calor y rendimiento de 16 genotipos de quinua (Chenopodium quinoa willd) en condiciones de La Molina* [Universidad Nacional Agraria La Molina]. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2534>
- Vargas, J. G., España, R., & Guerrero, J. (2011). Calibración de la sonda TDR-300 para mediciones de humedad del suelo en San Rafael de Onoto, estado Portuguesa. *Revista Unellez de Ciencia y Tecnología*, 29, 89-93.
- Yazar, A., Howell, T. A., Dusek, D. A., & Copeland, K. S. (1999). Evaluation of crop water stress index for LEPA irrigated corn. *Irrigation Science*, 18(4), 171-180. <https://doi.org/10.1007/s002710050059>
- Yazar, A., Incekaya, Ç., Sezen, S. M., & Jacobsen, S. E. (2015). Saline water irrigation of quinua (*Chenopodium quinoa*) under Mediterranean conditions. *Crop & Pasture Science*, 66(10), 993-1002.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
 FACULTAD DE AGRONOMIA - DEPARTAMENTO DE SUELOS
 LABORATORIO DE ANÁLISIS DE SUELOS, PLANTAS, AGUAS Y FERTILIZANTES



ANÁLISIS DE SUELOS : CARACTERIZACIÓN

Solicitante: LIA RAMOS FERNANDEZ

Departamento: LIMA
 Distrito: LA MOLINA
 Referencia: H R. 59644-091SC-17

Provincia: LIMA
 Predio:
 Fecha: 21/07/17

Bolt. 599

Lab	Número de Muestra	pH (1:1)	C.E (1:1) dS/m	CaCO ₃ %	M.O. %	P ppm	K ppm	Análisis Mecánico			Clase Textural	CIC	Cationes Cambiables meq/100g					Suma de Cationes	Suma de Bases	% Sat. De Bases
								Arena %	Limo %	Arcilla %			Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺ + H ⁺				
6636	Claves	8.10	0.67	1.00	1.51	27.6	137	51	26	23	Fr.Ar.A	15.36	13.21	1.37	0.49	0.30	0.00	15.36	15.36	100

A = Arena A.Fi = Arena Franca Fr.A. = Franco Arenoso Fr = Franco Fr.L = Franco Limoso L = Limoso Fr.Ar.A = Franco Arcillo Arenoso Fr.Ar = Franco Arcilloso;
 Fr.Ar.L = Franco Arcillo Limoso Ar.A = Arcillo Arenoso Ar.L = Arcillo Limoso Ar = Arcilloso

Lab	Número de Muestra	Claves	Capacidad de Campo y Punto de Marchitez	
			C.C. %	P.M. %
6636			20.34	11.20

Av. La Molina s/n Campus UNALM - Telf. 614-7800 Anexo 222 Teléfono Directo: 349-5622 e-mail: labsuelo@lamolina.edu.pe

Figura 17: Resultado de caracterización del suelo, incluyendo parámetros como capacidad de campo y punto de marchitez permanente en porcentaje en peso



INFORME DE ANALISIS ESPECIAL EN SUELO

SOLICITANTE BRIAN MENDOZA MARQUEZ
PROCEDENCIA LIMA/ LIMA/ LA MOLINA/ PROGRAMA DE CEREALES Y GRANOS NATIVOS
REFERENCIA H.R. 60023
BOLETA 667
FECHA 18/08/2017

Lab	Número Muestra		D.A. g/cc	D.R. g/cc
	Claves			
6108			1.25	2.65

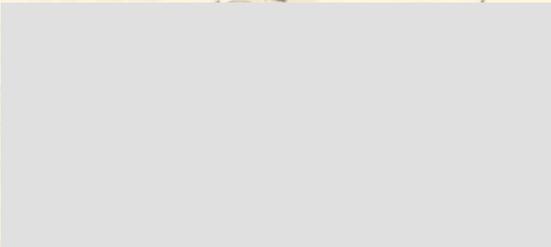


Figura 18: Resultados del análisis del suelo, densidad aparente y real del suelo



Nº 009022

ANÁLISIS DE AGUA - RUTINA

SOLICITANTE : GERARDO FRISANCHO LARICO
PROYECTO : " EFECTO DEL MANEJO DEL RIEGO BAJO INUNDACIÓN Y SECAS EN LA EMISIÓN DE GASES DE INVERNADERO DEL ARROZ EN EL ADRYD"
PROCEDENCIA : Reservorio - Campo Ferial
RESPONSABLE ANÁLISIS : Ing. Nora Arévalo Flores
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 31 de octubre de 2018

N° LABORATORIO	9022
N° DE CAMPO	Agua
CE mmhos/cm	0.62
pH	8.16
Calcio meq/l	4.53
Magnesio meq/l	0.66
Sodio meq/l	0.83
Potasio meq/l	0.13
SUMA DE CATIONES	6.14
Cloruro meq/l	0.92
Sulfato meq/l	3.38
Bicarbonato meq/l	1.73
Nitratos meq/l	0.01
Carbonatos meq/l	0.00
SUMA DE ANIONES	6.04
SAR	0.51
CLASIFICACION	C2-S1
Boro mg/l.	0.11

Agua	0.11	0.11	0.11
Agua	0.11	0.11	0.11
Agua	0.11	0.11	0.11
Agua	0.11	0.11	0.11

Figura 19: Análisis de agua

ANEXO 2: ANALISIS DE VARIANZA (ANOVA)

Tabla 12: Biomasa aérea de la quinua (t ha⁻¹)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: TRATAMIENTO	3.12500	1	3.125	1.45	0.3152
B: BLOQUE	6.22225	3	2.07408	0.96	0.5127
RESIDUOS	6.47570	3	2.15857		
TOTAL(CORREGIDO)	15.8230	7			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.
 Valor-P >0.05: Todos los tratamientos producen el mismo efecto.

Tabla 13: Rendimiento de la quinua (t ha⁻¹)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: TRATAMIENTO	0.163265	1	0.1632650	4.42	0.1263
B: BLOQUE	0.250750	3	0.0835832	2.26	0.2600
RESIDUOS	0.110838	3	0.0369459		
TOTAL(CORREGIDO)	0.524853	7			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.
 Valor-P >0.05: Todos los tratamientos producen el mismo efecto.

Tabla 14: índice de cosecha del cultivo de quinua (%)

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFECTOS PRINCIPALES					
A: TRATAMIENTO	0.66125	1	0.66125	0.13	0.7441
B: BLOQUE	40.4837	3	13.4946	2.61	0.2254
RESIDUOS	15.4838	3	5.16125		
TOTAL(CORREGIDO)	56.6288	7			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual.
 Valor-P >0.05: Todos los tratamientos producen el mismo efecto.

Tabla 15: Análisis de la relación lineal simple entre la temperatura medida por cámara térmica y termopar

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	83.4018	1	83.4018	540.19	0.00000
Residuo	5.24941	34	0.154394		
Total (Corr.)	88.6512	35			

Tabla 16: Análisis de la relación lineal simple entre (Tc-Ta) y el DPV, bajo condiciones de mínimo estrés en la etapa inicial del cultivo

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	19.1108	1	19.1108	60.89	0.0000
Residuo	11.6123	37	0.313846		
Total (Corr.)	30.7231	38			

Tabla 17: Análisis de la relación lineal simple entre (Tc-Ta) y el DPV, bajo condiciones de mínimo estrés en la etapa intermedia del cultivo

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	9.97282	1	9.97282	51.33	0.0000
Residuo	5.05146	26	0.194287		
Total (Corr.)	15.0243	27			

Tabla 18: Análisis de la relación lineal simple entre (Tc-Ta) y el DPV, bajo condiciones de mínimo estrés en la etapa final del cultivo

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	13.1935	1	13.1935	121.19	0.0000
Residuo	4.24597	39	0.108871		
Total (Corr.)	17.4395	40			

ANEXO 3: TEMPERATURAS Y HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE DURANTE EL EXPERIMENTO

Tabla 19: DPV en función de la Taire (°C) y HR(%) de acuerdo a la ecuación de Monteith & Unsworth, (2013) y temperatura foliar de los dos tratamientos usando imágenes termográficas

Fecha	hora	Taire (°C)	HR (%)	DPV (Kpa)	T °C	
					T0	T1
22/08/2017	13-14	21.2	82	0.45316731	25.6	25.6
24/08/2017	13-14	17	90	0.19376501	19.2	19.3
26/08/2017	13-14	20.8	91	0.22108457	25.3	25.6
29/08/2017	13-14	16.5	89	0.20648113	19.1	19.5
31/08/2017	13-14	18.4	83	0.35978488	19.7	19.9
04/09/2017	13-14	17.7	87	0.26328773	20.8	21.4
07/09/2017	13-14	21	75	0.62172042	22.4	22.2
11/09/2017	13-14	16.4	89	0.20517116	18.5	18.4
12/09/2017	13-14	17.1	90	0.19499631	19.2	19.0
19/09/2017	13-14	18.3	85	0.31547294	21.0	20.8
21/09/2017	13-14	15.4	86	0.24495752	17.6	17.6
22/09/2017	13-14	17.3	86	0.27647127	20.7	20.8
25/09/2017	13-14	21.2	74	0.654575	25.3	25.4
26/09/2017	13-14	21.6	69	0.79980652	23.1	23.3
28/09/2017	13-14	21.8	73	0.70516911	23.9	24.3
02/10/2017	13-14	23.5	71	0.83965763	24.5	24.5
03/10/2017	13-14	21.8	73	0.70516911	23.5	23.6
09/10/2017	13-14	20.4	79	0.50330581	22.0	21.5
14/10/2017	13-14	21.6	76	0.61920505	25.7	26.0
16/10/2017	13-14	23.8	70	0.88443597	23.8	23.4
20/10/2017	13-14	20.8	77	0.5649939	23.1	22.7
24/10/2017	13-14	21.2	78	0.55387116	22.0	22.3
26/10/2017	13-14	23.8	69	0.91391717	24.5	24.5
27/10/2017	13-14	17.9	79	0.43070143	20.1	20.8
31/10/2017	13-14	21.8	74	0.67905174	24.2	23.9
03/11/2017	13-14	20.8	76	0.58955885	22.3	22.1
07/11/2017	13-14	20.5	74	0.62699623	22.4	22.3
09/11/2017	13-14	21.9	71	0.76203967	24.1	24.5
11/11/2017	13-14	23.3	68	0.91541269	24.5	24.9
16/11/2017	13-14	22.7	70	0.82761428	24.1	27.3
21/11/2017	13-14	24	72	0.83544995	25.6	29.3
23/11/2017	13-14	24.3	66	1.03288568	25.5	28.8
26/11/2017	13-14	24.3	73	0.82023275	26.5	31.0
30/11/2017	13-14	23.8	73	0.79599237	26.4	30.9
02/12/2017	13-14	25.4	68	1.03803211	26.5	32.2
05/12/2017	13-14	20.1	87	0.30584875	22.5	25.5
07/12/2017	13-14	23.4	77	0.66193361	26.4	28.6

**ANEXO 4: TEMPERATURAS DE LINEA BASE INFERIOR (LI), SUPERIOR (LS)
Y Tc-Taire PARA EL CÁLCULO DEL CWSI EN EL TRATAMIENTO T0 Y T1.**

Tabla 20: CWSI del tratamiento T0 y T1

Fecha	hora	T0				T1			
		LI	LS	Tc-Ta	CWSI	LI	LS	Tc-Ta	CWSI
22/08/2017	13-14	-1.4	7.1	4.4	0.7	-1.4	7.1	4.4	0.7
24/08/2017	13-14	-0.8	7.1	2.2	0.4	-0.8	7.1	2.3	0.4
26/08/2017	13-14	-0.8	7.1	4.5	0.7	-0.8	7.1	4.8	0.7
29/08/2017	13-14	-0.8	7.1	2.6	0.4	-0.8	7.1	3.0	0.5
31/08/2017	13-14	-1.2	7.1	1.3	0.3	-1.2	7.1	1.5	0.3
04/09/2017	13-14	-1.0	7.1	3.1	0.5	-1.0	7.1	3.7	0.6
07/09/2017	13-14	-1.9	7.1	1.4	0.4	-1.9	7.1	1.2	0.3
11/09/2017	13-14	-0.8	7.1	2.1	0.4	-0.8	7.1	2.0	0.4
12/09/2017	13-14	-0.8	7.1	2.1	0.4	-0.8	7.1	1.9	0.3
19/09/2017	13-14	-1.1	7.1	2.7	0.5	-1.1	7.1	2.5	0.4
21/09/2017	13-14	-0.9	7.1	2.2	0.4	-0.9	7.1	2.2	0.4
22/09/2017	13-14	-1.0	7.1	3.4	0.5	-1.0	7.1	3.5	0.6
25/09/2017	13-14	-1.9	7.1	4.1	0.7	-1.9	7.1	4.2	0.7
26/09/2017	13-14	-2.3	7.1	1.5	0.4	-2.3	7.1	1.7	0.4
28/09/2017	13-14	-2.1	7.1	2.1	0.5	-2.1	7.1	2.5	0.5
02/10/2017	13-14	-2.5	7.1	1.0	0.4	-2.5	7.1	1.0	0.4
03/10/2017	13-14	-2.2	7.1	1.7	0.4	-2.2	7.1	1.8	0.4
09/10/2017	13-14	-1.7	7.1	1.6	0.4	-1.7	7.1	1.1	0.3
14/10/2017	13-14	-2.0	7.1	4.1	0.7	-2.0	7.1	4.4	0.7
16/10/2017	13-14	-2.6	7.1	0.0	0.3	-2.6	7.1	-0.4	0.2
20/10/2017	13-14	-1.9	7.1	2.3	0.5	-1.9	7.1	1.9	0.4
24/10/2017	13-14	-1.9	7.1	0.8	0.3	-1.9	7.1	1.1	0.3
26/10/2017	13-14	-2.6	7.1	0.7	0.3	-2.6	7.1	0.7	0.3
27/10/2017	13-14	-1.6	7.1	2.2	0.4	-1.6	7.1	2.9	0.5
31/10/2017	13-14	-2.1	7.1	2.4	0.5	-2.1	7.1	2.1	0.5
03/11/2017	13-14	-1.9	7.1	1.5	0.4	-1.9	7.1	1.3	0.4
07/11/2017	13-14	-1.5	7.1	1.9	0.4	-1.5	7.1	1.8	0.4
09/11/2017	13-14	-1.8	7.1	2.2	0.4	-1.8	7.1	2.6	0.5
11/11/2017	13-14	-2.1	7.1	1.2	0.4	-2.1	7.1	1.6	0.4
16/11/2017	13-14	-1.9	7.1	1.4	0.4	-1.9	7.1	4.6	0.7
21/11/2017	13-14	-1.9	7.1	1.6	0.4	-1.9	7.1	5.3	0.8
23/11/2017	13-14	-2.4	7.1	1.2	0.4	-2.4	7.1	4.5	0.7
26/11/2017	13-14	-1.9	7.1	2.2	0.5	-1.9	7.1	6.7	1.0
30/11/2017	13-14	-1.9	7.1	2.6	0.5	-1.9	7.1	7.1	1.0
02/12/2017	13-14	-2.4	7.1	1.1	0.4	-2.4	7.1	6.8	1.0
05/12/2017	13-14	-0.8	7.1	2.4	0.4	-0.8	7.1	5.4	0.8
07/12/2017	13-14	-1.6	7.1	3.0	0.5	-1.6	7.1	5.2	0.8

ANEXO 5: PANEL FOTOGRÁFICO



Figura 20: Material genético de la variedad de quinua Mutante de Amarilla Marangani



Figura 21: Instalación de parantes de madera con círculos de aluminio

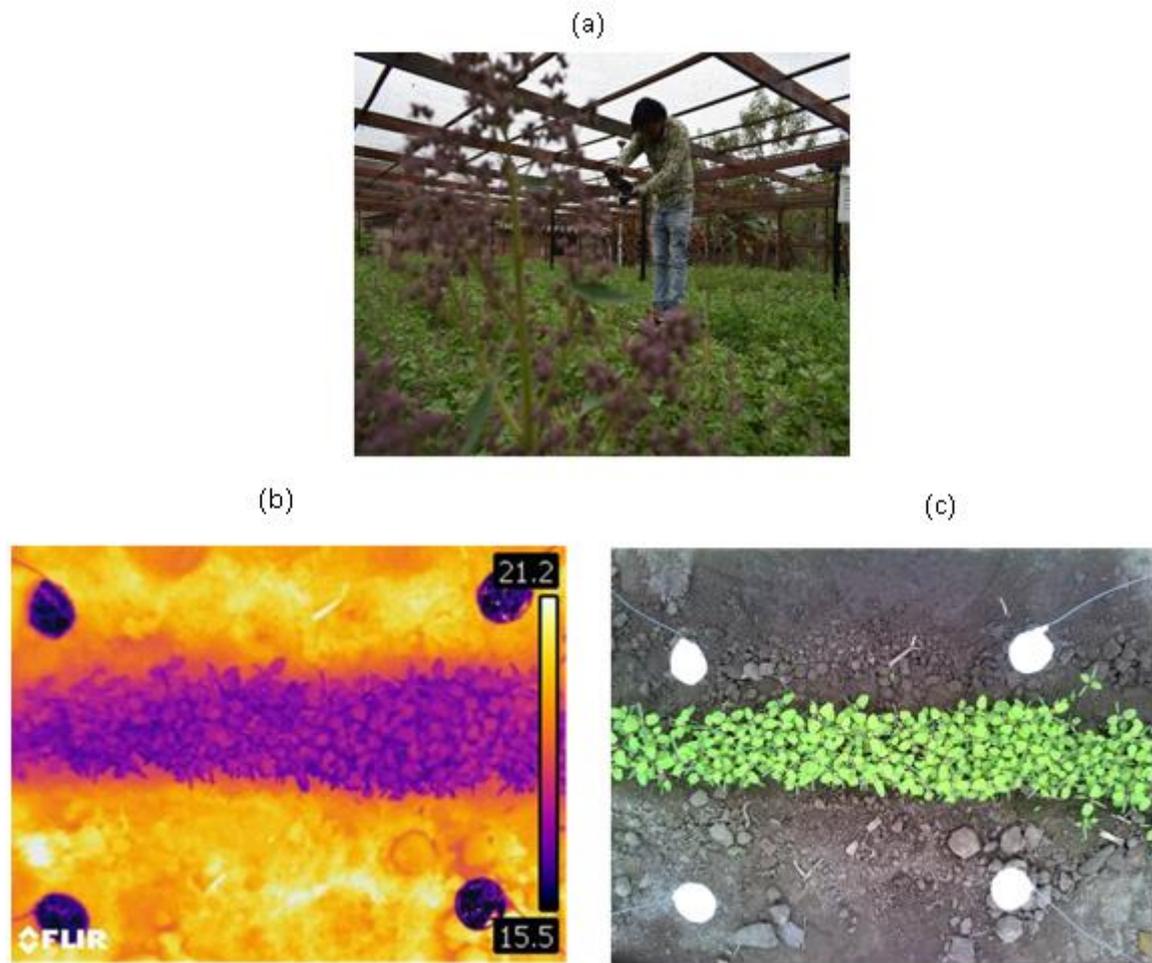


Figura 22: (a) Captura de imágenes a un metro de elevación sobre el dosel del cultivo, (b) imagen infrarroja térmica, (c) imagen de verdadero color

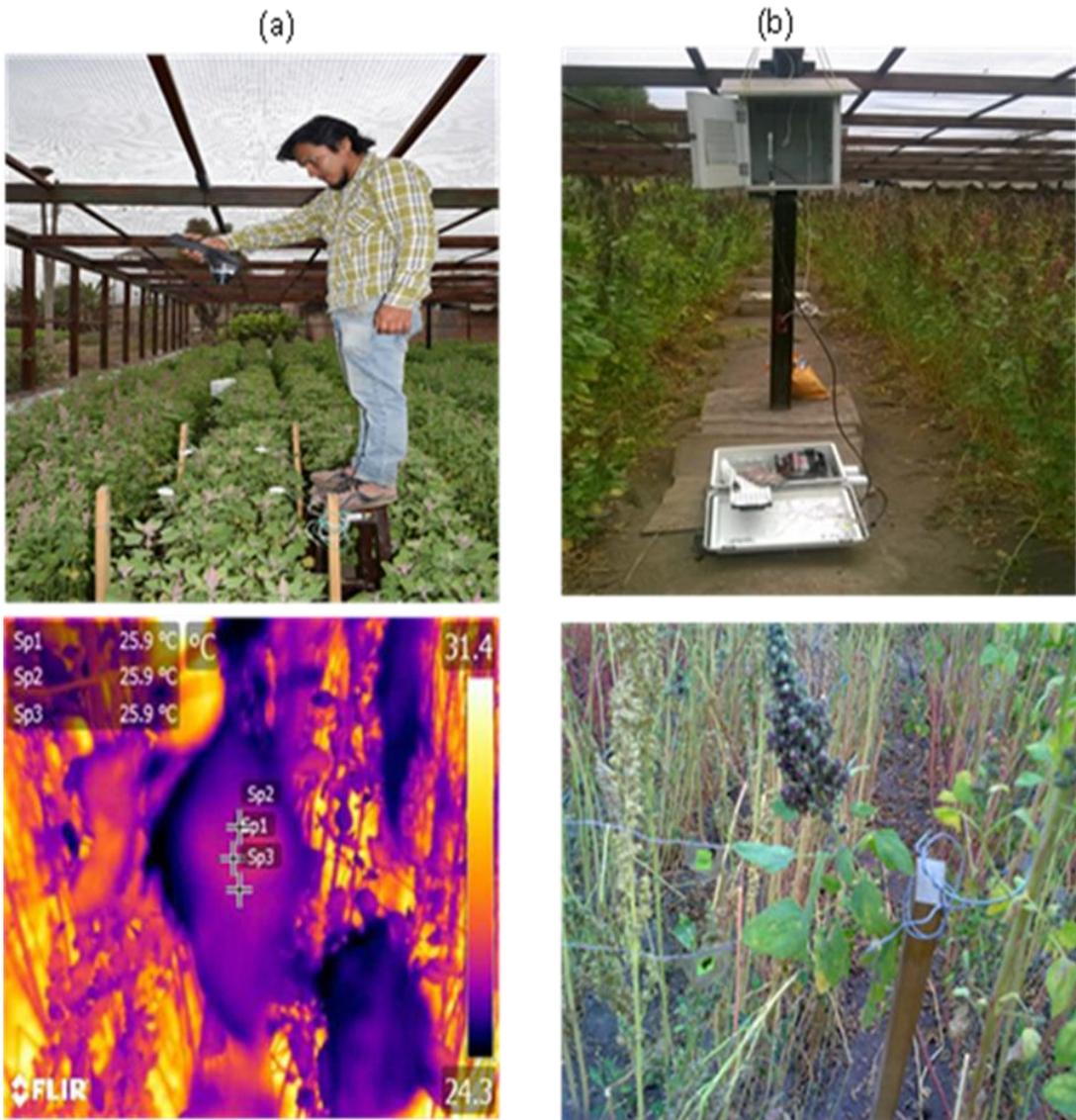


Figura 23:(a) Mediciones de temperatura con cámara térmica, (b) mediciones de temperatura con termopar

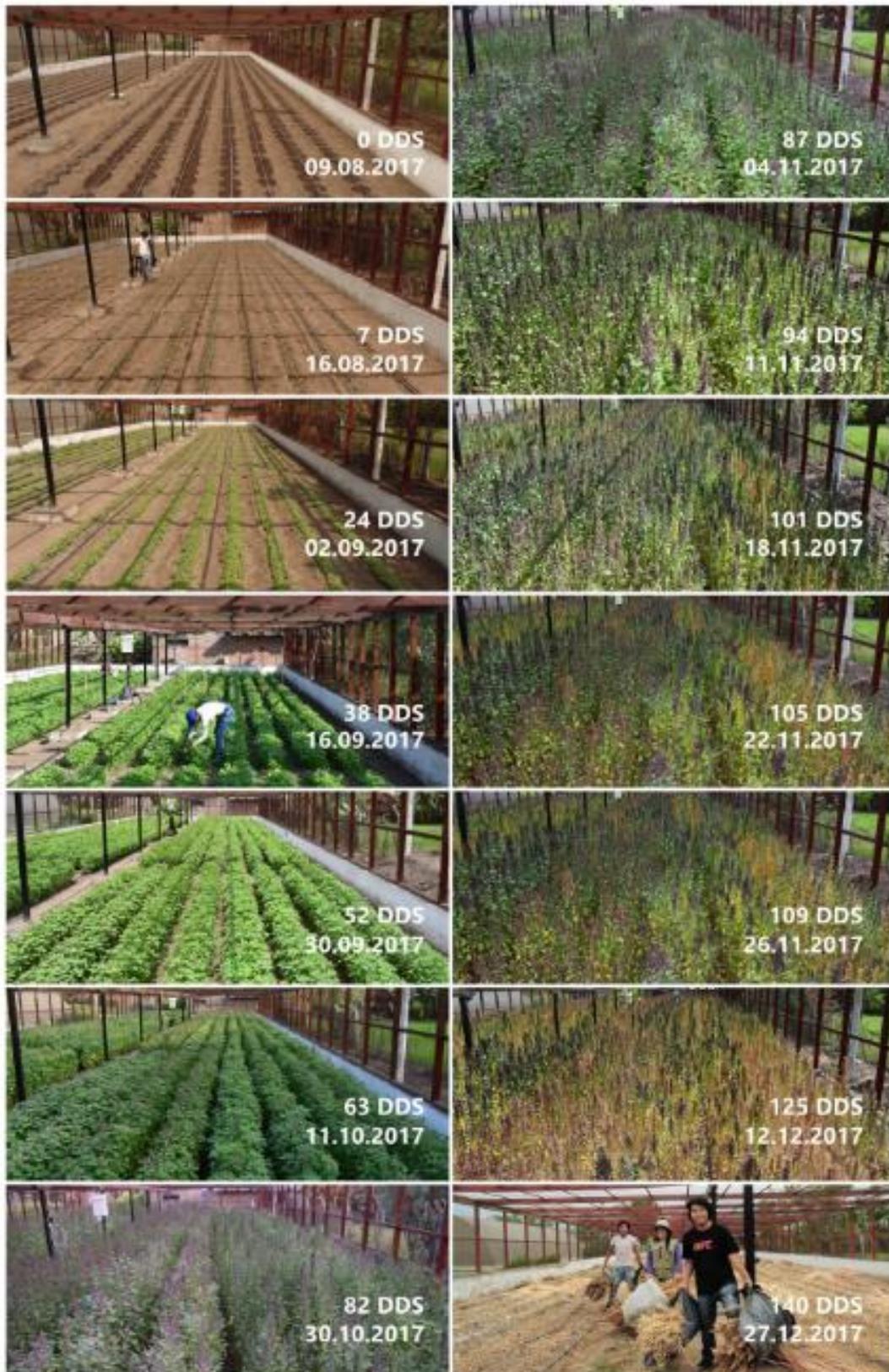


Figura 24: Desarrollo del cultivo en el campo experimental



Figura 25: Toma de datos de humedad volumétrica con el medidor TDR-300 Field Scout



Figura 26: Trillado y venteo de los granos de quinua después de su cosecha

ANEXO 6: PROGRAMA DE ACTIVIDADES

Tabla 21: Calendario de actividades

Fecha	DDS	Labor	Descripción
31/07/2017	-9	Preparación del terreno (Rotura, Mullido y surcado)	El surcado se realizó manualmente a 60 centímetros entre surcos
24/07/2017	-16	Muestreo de suelo	Toma de muestra a 0.40 m de profundidad para análisis en laboratorio.
24/07/2017	-16	Prueba del coeficiente de uniformidad	Se realizó al sistema de riego por goteo instalado para determinar su eficiencia en el campo.
08/08/2017	-1	Primer control fitosanitario	Aplicación de Vitavax® (10-15gr/l) a las semillas
09/08/2017	0	Primera fertilización de NPK y Siembra	Se incorporó urea y fosfato diamónico a la dosis de 40 - 60 - 0 y se sembró 18 gramos de semillas por surco.
09/08/2017	0	r1	Primer riego y único a machaco
14/08/2017	5	Segundo control fitosanitario	Aplicación de Botrizim (15ml/15Lt)
22/08/2017	13	r2	Segundo riego
05/09/2017	27	r3	Tercer riego
19/09/2017	41	r4	Cuarto riego
25/09/2017	47	r5	Quinto riego
01/10/2017	53	r6	Sexto riego
02/10/2017	54	Aporque	Se realizó cuando las plantas alcanzaron una altura de 40 – 60 cm.
02/10/2017	54	Segunda fertilización	Se agregó 40 de nitrógeno
07/10/2017	59	r7	Séptimo riego
09/10/2017	61	Desahije Manual	Se extrajo las plantas débiles y se dejó aproximadamente 5 cm de distancia entre planta y planta.
14/10/2017	66	Tercer control fitosanitario	Aplicación de Infinito® (56 ml/15 Lt) y Acid color® (200 ml/200 Lt)
14/10/2017	66	r8	Octavo riego
22/10/2017	74	r9	Noveno riego
27/10/2017	79	r10	Decimo riego
02/11/2017	85	r11	Onceavo riego
10/11/2017	93	r12 y corte de agua en T1	Doceavo riego reducido al 50% ETc al T1
17/11/2017	100	r13 y corte de agua en T1	Treceavo riego reducido al 75% ETc al T1
26/11/2017	109	r14 y corte de agua en T1	Catorceavo riego, no se regó T1
30/11/2017	113	r15 Corte de agua en T1	Quinceavo riego, no se regó T1
27/12/2017	140	Cosecha	Se realizó el peso de las parvas de quinua (Biomasa) ya sesgadas, luego se trillaron y ventearon para obtener solo los granos de quinua puestos en papel kraff para determinar el rendimiento.
28/12/2017	141	Medición de profundidad de raíz máxima	Se excavo a 0.50 m de profundidad despues de haberlas remojado la zona de raices a medir.