

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN RIEGO Y DRENAJE



**“ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO PARA LA DEFINICIÓN
DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE PAPA VARIEDAD
ÚNICA (*Solanum tuberosum*) VÍA TERMOGRAFÍA”**

Presentada por:

ANNY SHIRLEY FRANCO GALLO

TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO

MAGISTER SCIENTIAE EN RIEGO Y DRENAJE

Lima - Perú

2022

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

**ESCUELA DE POSGRADO
MAESTRÍA EN RIEGO Y DRENAJE**

**“ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO PARA LA DEFINICIÓN
DEL RIEGO EN EL CULTIVO DE PAPA VARIEDAD
ÚNICA (*Solanum tuberosum*) VÍA TERMOGRAFÍA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO DE MAESTRO
MAGISTER SCIENTIAE**

Presentada por:

ANNY SHIRLEY FRANCO GALLO

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

Ph.D. Absalón Vázquez Villanueva

PRESIDENTE

Dr. Abel Mejía Marcacusco

ASESOR

Mg.Sc. Luis Rázuri Ramírez

MIEMBRO

Mg.Sc. Miguel Sánchez Delgado

MIEMBRO

DEDICATORIA

A mi **Dios** padre santo, por brindarme salud, sabiduría, fortaleza y la oportunidad de seguir cumpliendo mis metas.

A mis queridos padres y hermanos por sus ánimos, paciencia y apoyo incondicional en este camino de superación profesional.

AGRADECIMIENTOS

- Al Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) por brindarme la beca académica en la Maestría de Riego y Drenaje en la Escuela de Postgrado de la Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Al Programa Nacional de Innovación Agraria (PNIA) con el proyecto N°: 016-2015-INIA-PNIA/UPMSI/IE “Uso efectivo del agua en el cultivo de papa en zonas áridas: Mejorando el manejo del riego mediante el monitoreo del estatus hídrico para enfrentar al Cambio Climático” por el apoyo financiero.
- A la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM), maestros y administrativos por contribuir a mi formación profesional.
- Al Lic. Javier Rinza por todo el apoyo durante el desarrollo de la investigación.
- A mi patrocinador de tesis Dr. Abel Mejía Marcacusco, por sus enseñanzas y asesoría en la culminación del presente trabajo de investigación.
- Al PhD. Absalón Vázquez Villanueva, Mg.Sc. Luis Ramón Razuri Ramírez y al Mg.Sc. Miguel Ángel Sánchez Delgado, por sus aportes académicos durante mi formación profesional y del presente trabajo de investigación.
- Al Mg.Sc. Miguel Ángel Sánchez Delgado, por la iniciativa de participar en el concurso de becas del PNIA, y continuar con los estudios de la Maestría.
- Agradecer a mis amigos; Ángel Cobeñas, Jesús Zamalloa, Paula Macedo y Yanet Suarez.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
1.1. Estrés hídrico del cultivo	2
1.1.1. Disponibilidad de agua en el suelo (ADT)	2
1.1.2. Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).....	3
1.2. Imágenes termográficas (IT) como método de detección de estrés hídrico	4
2.1.1. Índice de estrés hídrico del cultivo CWSI – TERMOGRAFIA	5
1.3 La Papa ÚNICA (código CIP N°392797.22)	6
III. MATERIALES Y MÉTODOS	8
3.1 Descripción del lugar de estudio.....	8
3.2 Condición Experimental y Mediciones.....	8
3.2.1 Experimento realizado en campo.....	12
3.3 Métodos.....	12
3.3.1 Determinación de umbrales de riego con el índice de estrés hídrico para el cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum l.</i>)	12
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
4.1 Umbrales de riego con el índice de estrés hídrico para el cultivo de la papa (<i>Solanum tuberosum l.</i>).....	18
4.2 Relación entre la humedad gravimétrica y el CWSI.....	22
V. CONCLUSIONES	28
VI. RECOMENDACIONES	29
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
VIII. ANEXOS	33

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág.
Cuadro 1: Principales formas de estimación de las temperaturas umbrales (seca y húmeda)	4
Cuadro 2: Características del campo experimental llevadas a cabo bajo riego por goteo, entre el 13 de junio del 2018 al 13 de setiembre del 2018.	9
Cuadro 3: Tratamientos desarrollados	13
Cuadro 4. Requerimiento Hídrico del cultivo de la papa, por cada tratamiento.....	26
Cuadro 5: Rendimientos del cultivo de la papa por cada tratamiento	27

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1: Coeficiente de estrés hídrico del suelo (Ks).....	3
Figura 2: Fenología del cultivo de la papa.	7
Figura 3: Área experimental, con trabajos previos de limpieza.	8
Figura 4: Distribución de bloques, parcelas y subparcelas del área experimental.	9
Figura 5: Esquema del diseño experimental de la parcela.....	10
Figura 6: Semillas del cultivo de la papa ÚNICA.	11
Figura 7: Se sembro un total de 2700 semillas del cultivo de la papa ÚNICA.	11
Figura 8: Distribución de las cintas de riego y goteros incorporados.	12
Figura 9: Estación meteorológica (HOBO U30, Onset Computer Corporation, Bourne, ...	14
Figura 10: Superficie de referencia artificial húmeda (SRAH).	15
Figura 11: Se observa la toma de imágenes térmicas del follaje del cultivo de la papa.....	15
Figura 12: Registro de la imagen térmica de la sub parcela C6.	16
Figura 13: (1) Imagen visible RGB y (2) imagen térmica, tomadas en el campo experimental del cultivo de papa ÚNICA.....	16
Figura 14: Página de inicio del programa TIPCIP v.1.3 (CIP, 2018).....	17
Figura 15: Comportamiento del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) a lo largo de la etapa vegetativa del cultivo de la papa, obtenidos para 15 parcelas	18
Figura 16: La diferencia de temperatura de la hoja y el medio, la cual está relacionada..... indirectamente con el CWSI mediante la temperatura seca.....	19
Figura 17: Relación de la cobertura de campo en (%) y el comportamiento del índice de estrés hídrico (CWSI); durante los días después de la siembra.....	20
Figura 18: Se aprecia la cobertura de campo durante todo el periodo CC (%) y el índice de estrés hídrico (CWSI) respecto a los días después de la siembra... ..	21
Figura 19 : Se muestra los valores y comportamiento de la humedad gravimétrica respecto al índice de estrés hídrico, en los tres tratamientos (T1, T2 y T3)... ..	22
Figura 20: Comparativo del índice de estrés hídrico (CWSI) y la humedad gravimétrica,..	23
Figura 21: La programación de riego para los diferentes tratamientos (T1; T2 y T3)	24
Figura 22: Se muestra la temperatura del follaje en grados centígrados (°C)	25
Figura 23: Diferencias acentuadas de los tratamientos T1, T2 y T3, cobertura vegetal del cultivo de la papa a los 91 DAP.....	26

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1: Análisis del perfil del suelo para determinar la (P_w) (%)	33
Anexo 2: Caracterización físico químico del suelo.	34
Anexo 3: Evaluación de las propiedades físicas del suelo (humedad volumétrica a capacidad de campo y densidad aparente).....	34
Anexo 4: Calculo de la humedad gravimetrica.....	35
Anexo 5: Características técnicas de la cámara térmica (FLIR, E60) y del termómetro infrarrojo (CEM DT-8865) usado en los 2 experimentos realizados.....	36
Anexo 6: Secuencia de imágenes térmicas y RGB de la sub-parcela C6, del tratamiento T2 del Bloque I, a partir de los 36 DAP hasta la senescencia.	37
Anexo 7: Resultados del cálculo de la Humedad Gravimétrica (%).	41
Anexo 8: Cálculos de CWSI, desde los 36 DAP.....	42
Anexo 9 : Resultados de la lámina de agua promedio en (mm) por cada tratamiento.....	44
Anexo 10: Proceso de las actividades desarrollas en el campo experimental de la UNALM, durante el trabajo de investigación realizado el año 2018.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS

CC	: Capacidad de campo
CIP	: Centro Internacional de la Papa
CWSI	: Índice de estrés hídrico del cultivo
CRA	: Contenido relativo de agua
CC1, 2 y 3:	Cobertura de Campo, para el tratamiento 1, 2 y 3
DAP	: Días después de la siembra
dT	: Diferencia de temperatura de la hoja y el aire
ET	: Evapotranspiración
ε	: Emisividad
Pw	: Humedad gravimétrica
θ_{cc}	: Humedad Volumétrica en (%)
Hr	: Humedad Relativa
Th	: Temperatura de hoja
Ta	: Temperatura del aire
PNIA	: Programa Nacional de Innovación Agraria
Tf	: Temperatura del follaje
Tf - Ta	: Diferencia de temperatura de follaje y el aire
Ts	: Temperatura de superficie de hoja seca, temperatura ambiente.
Tsh	: Temperatura de superficie húmeda o de línea de base no estresada de agua.
T1, T2 y T3	: Tratamientos
pH	: Potencial de Hidrógeno
SRAH	: Superficie de referencia artificial húmeda
VPD	: Déficit de presión de vapor
RGB	: Imagen visible
PAR	: Radiación fotosintética Activa

RESUMEN

La presente investigación trata de los aspectos teóricos y metodológicos, teniendo como objetivo determinar el índice de estrés hídrico de la papa (*Solanum tuberosum l.*) variedad única vía termografía, con fines de aplicación de riego en condiciones de la Molina. En el experimento se estableció tratamientos con restricción hídrica $T_2 = 40\%$ de CC y $T_3 = 70\%$ CC. El *CWSI* fue evaluado a partir de los 35 DAP, debido al inicio de la tuberización, por el método empírico, donde T_{sh} es la temperatura medida de una superficie de referencia artificial húmeda (SRAH), obtenida de cada imagen con el software FLIR Tools (modelo E-60) y procesadas mediante el programa TIPCIP v.1.3 (CIP, 2018) desarrollado por el Centro Internacional de la Papa (CIP). Una vez calculado el *CWSI*, para los tratamientos T_1 , T_2 y T_3 se define la programación de riego según el resultado de la humedad gravimétrica (P_w). A los 50 días DAP se puede lograr distinguir entre las temperaturas de follaje de cada tratamiento diferencias bien marcadas a los 70 días DAP en adelante hasta el final del periodo vegetativo. A los 91 DPA, el T_1 presenta un $CWSI_1$ de 0.41, el T_2 un $CWSI_2$ de 0.73 y el T_3 un $CWSI_3$ de 1.20. El aumento de la (d_T) se presenta a partir de los 72 días DAP. Los valores máximos de (d_T) para el tratamiento T3 es de 11 °C, el tratamiento T2 es de 7 °C y en el tratamiento T1 es de 5 °C, en los días finales del periodo vegetativo. La relación entre el *CWSI* y la humedad gravimétrica (P_w) muestra que a falta de agua la planta cierra sus estomas y evita la pérdida de agua. Esta es la relación de un buen indicador para saber cuándo y cuánto se debe regar y mitigar el efecto de marchitez de la planta. Durante el desarrollo de la investigación se buscó mantener valores de capacidad de campo constantes para el tratamiento de control $T1 = 1$, por lo cual según el cálculo de la humedad gravimétrica (P_w) se realizó un total de 16 riegos. Para $T2 = 0.4$, se hicieron 10 riegos, según la determinación del *CWSI*. En el $T3 = 0.7$ se hicieron 03 riegos, según la determinación del *CWSI*.

Palabras claves: Índice de estrés hídrico del cultivo, termografía, papa variedad única.

SUMMARY

The present investigation deals with the theoretical and methodological aspects, having as objective to determine the index of hydric stress of the potato (*Solanum tuberosum L.*) single variety via thermography, for the purpose of applying irrigation in La Molina conditions. In the experiment, treatments were established with water restriction $T_2 = 40\%$ de CC y $T_3 = 70\%$. CC. The *CWSI* was evaluated from 35 DAP, due to the beginning of tuberization, by the empirical method, where T_{sh} is the temperature measured from a wet artificial reference surface (SRAH), obtained from each image with the FLIR Tools software (model E-60) and processed through the TIPCIP v.1.3 program (CIP, 2018) developed by the International Potato Center (CIP). Once the *CWSI* has been calculated, for the treatments T_1 , T_2 and T_3 , the irrigation schedule is defined according to the gravimetric humidity (P_w) result. At 50 days DAP it is possible to distinguish between the foliage temperatures of each treatment well marked differences at 70 days DAP onwards until the end of the vegetative period. At 91 DPA, T_1 has a $CWSI_1$ of 0.41, T_2 a $CWSI_2$ of 0.73 and T_3 a $CWSI_3$ of 1.20. The increase in (d_T) occurs after 72 days DAP. The maximum values of (d_T) for treatment T3 is 11 °C, treatment T2 is 7 °C and in treatment T1 it is 5 °C, in the final days of the vegetative period. The relationship between *CWSI* and gravimetric moisture (P_w) shows that in the absence of water, the plant closes its stomata and prevents water loss. This is the ratio of a good indicator to know when and how much to water and mitigate the wilting effect of the plant. During the development of the research, it was sought to maintain constant field capacity values for the control treatment $T1 = 1$, therefore, according to the calculation of the gravimetric humidity (P_w), a total of 16 irrigations were carried out. For $T2 = 0.4$, 10 irrigations were made, according to the determination of the *CWSI*. In $T3 = 0.7$, 03 irrigations were made, according to the determination of the *CWSI*.

Keywords: Crop water stress index, thermography, potato, treatments.

I. INTRODUCCIÓN

La papa es el cuarto cultivo en importancia a nivel mundial y segundo en Perú. (<http://www.potatopro.com/world/potato-statistics> 2017). Debido a la importancia que representa el cultivo de la papa en nuestro país y en general, es necesario realizar un monitoreo constante de la oferta hídrica, cuya distribución y el deficiente aprovechamiento son grandes retos a solucionar.

Tanner (1963) usó termómetros infrarrojos para determinar la temperatura del cultivo en la papa, observando su potencialidad para determinar el estado hídrico del cultivo, esta metodología ha sido ampliamente estudiada buscando distintos índices que pudieran cuantificar el grado de estrés hídrico del cultivo. Los índices de estrés hídrico del cultivo *CWSI* basados en termografía infrarroja y el procesamiento de imágenes permiten un avance importante en la determinación del estrés hídrico (Jones 1999; Rud *et al.* 2014). La tolerancia al déficit hídrico ante diferentes condiciones hídricas a largo plazo, se han evidenciado y reportado por primera vez en el cultivo de papa (Ramírez *et al.* 2016).

La termografía en las últimas décadas se ha convertido en una herramienta muy útil en lo que hoy conocemos como agricultura de precisión, teniendo en cuenta que permite el análisis de grandes áreas de dosel, siendo más eficaz que la porimetría en la predicción del rendimiento y la precisión del riego. Por medio de imágenes termográficas se obtiene una imagen del dosel de la planta que presenta la información de la temperatura de las hojas, que puede ser normalizada a través del índice de estrés hídrico *CWSI*.

El *CWSI*, es un umbral de estrés hídrico al que está sometida la planta y un indicador de cuando regar (Wang *et al.* 2010; O'Shaughnessy *et al.* 2011). Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo determinar el índice de estrés hídrico de la papa (*Solanum tuberosum l.*) variedad única vía termografía, con fines de aplicación de riego en condiciones de la Molina. Es una herramienta de medición y apoyo en la toma de decisiones para el manejo óptimo de los recursos hídricos en la programación de riego.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO

El estrés hídrico es uno de los factores más importantes a los que se hayan expuestas las plantas. Todas las plantas durante el crecimiento y desarrollo experimentan de una u otra forma deficiencias en el suministro de agua; siendo los periodos definidos de sequía la causa principal por la cual se origina el estrés hídrico (Gindaba *et al.* 2004).

Una de las primeras manifestaciones morfológicas de los efectos del déficit hídrico en las plantas es la reducción en el área foliar, la cual causa una disminución en la cantidad de radiación interceptada por la planta, bajo contenido relativo de agua (CRA) y menor capacidad fotosintética. Esto conlleva a una disminución en la acumulación de materia seca en raíz, tallo, hojas y frutos (Chaves *et al.* 2002; Jefferies 1993).

2.1.1 Disponibilidad de agua en el suelo (ADT)

Es la capacidad de retener el agua disponible para las plantas. Después de una lluvia importante o riego, el suelo comenzará a drenar agua hasta alcanzar la capacidad de campo, el cual representa el contenido de humedad, que un suelo bien drenado retiene en contra de las fuerzas gravitatorias. El contenido de humedad en la zona radicular del cultivo se reducirá como resultado del consumo de agua por el cultivo.

Eventualmente, se alcanzará un punto donde el cultivo no podrá extraer el agua remanente en el suelo en este momento la extracción de agua será nula y se habrá alcanzado el punto de marchitez permanente, el cual se define como el contenido de humedad en el suelo en el cual las plantas se marchitan permanentemente.

Los efectos del estrés hídrico sobre el valor la ET del cultivo se reflejan mediante la reducción del valor del coeficiente del cultivo. Cuando la energía potencial del agua del suelo cae por debajo de cierto valor umbral, se dice que el cultivo se encuentra estresado. Los efectos del estrés hídrico son incorporados al multiplicar el coeficiente basal del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico, K_s . Cuando se producen limitaciones debido a la disponibilidad de agua en el suelo, $K_s < 1$ (Allen 2006)

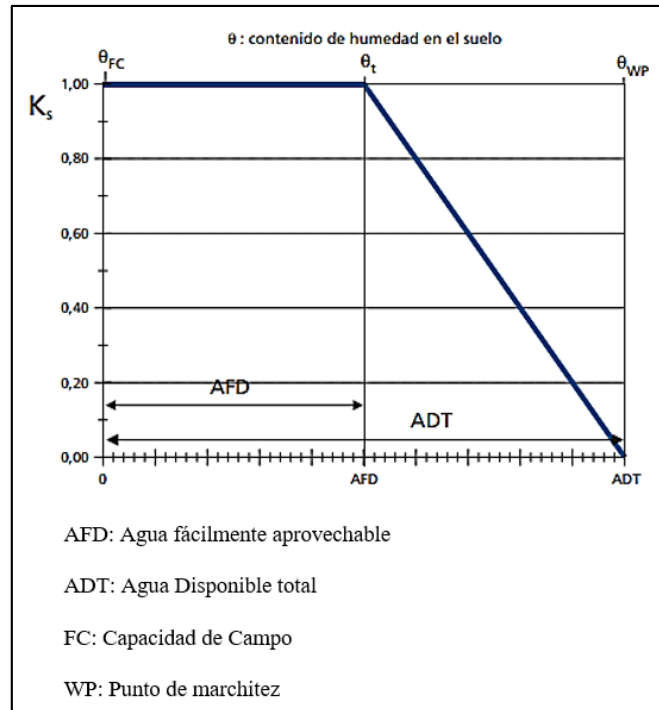


Figura 1: Coeficiente de estrés hídrico del suelo (K_s).
 Fuente: Allen (2006).

2.1.2 Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

El estrés hídrico, principalmente en la papa, reduce la productividad mediante la limitación de la expansión foliar, ocasionada por un aumento de la temperatura de la hoja. Esto resulta en un incremento de la tasa de senescencia y en la limitación de formación de nuevas hojas (Van Loon 1981; Lahlou *et al.* 2003).

Cuando el cultivo se somete a estrés hídrico, las estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta. Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo *CWSI* es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y supera la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ven drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo el *CWSI* es 1.

La temperatura de la hoja puede ser usada como indicador del estado hídrico de la planta (Jackson 1982; Turner 1990), ya que mediante la transpiración se produce un descenso de la

temperatura foliar con respecto a la del aire; por el contrario bajo un déficit hídrico los estomas se cierran produciéndose un aumento de la temperatura foliar que puede ser detectado con un termómetro de infrarrojos.

Cuadro 1: Principales formas de estimación de las temperaturas umbrales (seca y húmeda)

Método	Temperatura seca (T_s)	Temperatura húmeda (T_h)
Empírico	Cubrir con vaselina a las hojas de las plantas ($r_h = \infty$)(Jones 1999).	Rociado de agua a las hojas de las plantas ($r_h = 0$). Jones (1999) -Paño húmedo (Moller <i>et al.</i> 2006)
Estadístico	Promedio de valores superiores al percentil 95th. ($T_a + 7$ °C) y que cumpla con la relación de $T_a -10$ °C < T_f < $T_a +7$ en el caso del cultivo de papa (Rud <i>et al.</i> 2014). $T_a + 5$ °C: Uva, aceitunas, algodón (Moller <i>et al.</i> 2006). T_a = temperatura aire, T_f = temperatura del follaje; $T_a + 2$ °C: Ciruelo y $T_a + 4$ °C: Cítrico (Gonzalez-Dugo <i>et al.</i> 2014)	Promedio de los valores inferiores al 5% de la temperatura del follaje. (Rud <i>et al.</i> 2014)
Teórico	($T_s = T_f - T_a$) del balance de energía.	($T_{sh} = T_f - T_a$) del balance de energía (Jones 1999)

2.2 IMÁGENES TERMOGRÁFICAS (IT) COMO MÉTODO DE DETECCIÓN DE ESTRÉS HÍDRICO

Las mediciones del estrés hídrico de origen vegetal proporcionan una visión más directa del estado de la planta que los fundamentados en las medidas del suelo o de la atmósfera. La temperatura de la cubierta, medida por la termometría de infrarrojos, proporciona una técnica de monitorización de la planta no invasivo o no destructivo, que se puede realizar de forma automática a alta resolución de tiempo (Cohen *et al.* 2005).

La termografía infrarroja es una técnica que permite medir la temperatura de un objeto a distancia sin la necesidad de que exista un contacto físico. Su principio de funcionamiento

se basa en que todos los cuerpos deben tener una temperatura superior al cero absoluto (0 °K, -273 °C); emitiendo así energía infrarroja que se convierte en una señal eléctrica que es captada por un detector. Este detecta la energía infrarroja invisible que emiten los objetos y la transforma en una imagen termográfica (visión artificial), de la cual se puede obtener información directa del objeto en el momento o se puede correlacionar con una variable de análisis (Villa *et al.* 2011 y Belin *et al.* 2011).

El manejo y control de la temperatura de las hojas es clave, en muchos aspectos del desarrollo funcional de las plantas (Jones 1999). Su importancia en las relaciones hídricas del cultivo comenzó a ser reconocida en el siglo XX, donde se utilizó inicialmente en 1960 para la programación del riego a través de pruebas de censado de temperatura del dosel. Luego, en 1980 mediante imágenes infrarrojas de satélite se pudo detectar las necesidades hídricas de cultivos; más específico Mahey (1991), quien detectó el estrés hídrico de la planta como un indicador clave de las necesidades de agua del cultivo (Leuzinger *et al.* 2007). Igualmente, según Best *et al.* (2009), las primeras investigaciones asociadas a la termografía infrarroja para la detección de estrés hídrico se dieron el 1981, las cuales se concentraron en mediciones de la temperatura del dosel usando sensores manuales que generaban limitaciones por los equipos existentes en ese momento. Actualmente, la Temperatura del Dosel (TC) es reconocida por la relación con el estado hídrico de las plantas y el cierre estomático de las hojas. De ahí que, varios estudios han encontrado que existen significativas correlaciones entre el índice estrés hídrico medido a partir de equipos científicos de medición y el determinado por termografía infrarroja (Padhi *et al.* 2012).

2.2.1 Índice de estrés hídrico del cultivo CWSI – TERMOGRAFÍA

En relación a la detección de estrés hídrico de un cultivo, la termografía en las últimas décadas se ha convertido en una herramienta muy útil en lo que hoy conocemos como Agricultura de Precisión. Por medio de la termografía, se obtiene una imagen del dosel de la planta, de la cual se extrae, a través de técnicas de identificación de colores simples, el área de las hojas y la distribución de la temperatura en las mismas, desde las hojas más húmedas hasta las hojas más secas. Obteniendo así, el índice de estrés hídrico el cual ha sido un indicador en diferentes investigaciones de cuándo y cuánto se debe regar la planta.

De tal modo, la correlación de este indicador con la técnica termográfica permite encontrar, a partir de la temperatura media del dosel medida, el nivel de estrés hídrico al cual está sometida la planta por un mal manejo del recurso agua (Wang *et al.* 2010; O'Shaughnessy *et al.* 2011). Durante varios años de estudio, se han propuesto varios índices para transformar o normalizar los datos de temperatura del dosel respecto a la información sobre el estado hídrico de la planta.

Obtención del índice de estrés hídrico del cultivo *CWSI* por el método empírico, sabiendo que:

T_f : Temperatura del follaje

T_{sh} : Temperatura de superficie de hoja húmeda que actúa como una planta bien regada y

T_s : Temperatura de superficie de hoja seca, temperatura ambiente.

$$CWSI = \frac{T_f - T_{sh}}{T_s - T_{sh}} \quad (1)$$

Moller *et al.* (2006) describen un método empírico para determinar (T_{sh}) con una superficie de referencia artificial húmeda (*SRAH*), que simula la temperatura de una cubierta vegetal con los estomas completamente abiertos. Esta es una manera muy real de simular una planta en óptimas condiciones de disponibilidad de agua y otra en condiciones contrarias. En donde el índice varía de 0 para cultivos sin estrés y 1 para cultivos que presentan estrés severo. Además, la temperatura de superficie humedad (T_{sh}) se determina mediante el uso de una bandeja conteniendo tecnopor envuelto de una tela de algodón (Rinza 2018).

2.3 LA PAPA ÚNICA (CÓDIGO CIP N°392797.22)

Es una variedad que fue seleccionada, para esta investigación, por el CIP (Centro Internacional de la Papa). La variedad ÚNICA, tiene atributos de resistencia a virus, tolerancia al calor, es adecuada para climas fríos y con periodo vegetativo semi-precoz de 90 a 110 días después de la siembra para la costa (Gutiérrez *et al.* 2007). Tiene atributos de resistencia y precocidad que la hacen atractiva para los agricultores involucrados en el cultivo de papa. Este cultivo, requiere de 0.35 a 0.8 m^3 de agua para producir 1 kg de materia seca de tubérculo o 350 a 650 mm de requerimiento hídrico durante su etapa de crecimiento (FAO 2012). La adaptación de la ÚNICA a diferentes ambientes permite una amplia distribución geográfica, en regiones de la costa y sierra del Perú (Gutiérrez 2007).

La fase inicial desde la emergencia a floración incrementa rápidamente su área foliar, durante este periodo se han determinado el número de tallos y se ha iniciado el proceso de tuberización, los cuales definen el número potencial de tubérculos por metro cuadrado. Por otro lado, el inicio de la tuberización da inicio a la fase de llenado de tubérculos, la cual se mantiene hasta madurez fisiológica. En la segunda fase, el déficit hídrico acelera la pérdida del área foliar, acortando el ciclo del cultivo hasta en 15-20 días dependiendo del grado de estrés. Los cultivos de papa en seco, tampoco alcanzan su máximo desarrollo foliar debido al déficit hídrico entre emergencia y floración (Figura 2).

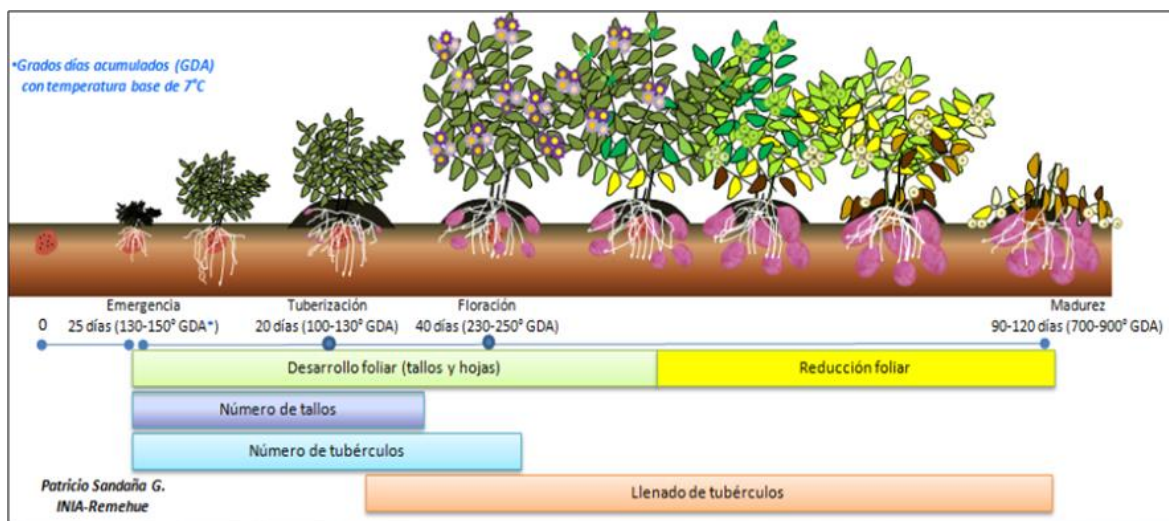


Figura 2: Fenología del cultivo de la papa.

Fuente: Patricio Sandaña (INIA-Remehue 2015)

Alves *et al.* (2000), distinguen tres etapas de desarrollo del cultivo como susceptibles al estrés hídrico, la primera va desde la siembra hasta el inicio de la tuberización, en los primeros estadios de desarrollo la planta depende de las reservas acumuladas del tubérculo que en condiciones óptimas de temperatura produce una rápida expansión del área foliar pudiendo llegar a cubrir totalmente el suelo, después de la emergencia. La segunda etapa va desde el inicio de la tuberización hasta el fin del crecimiento del follaje, en esta etapa, los asimilados disponibles se destinan al desarrollo de los tubérculos en detrimento del crecimiento del follaje, deteniéndose la ramificación y la aparición de hojas nuevas. La tercera etapa va desde el fin del crecimiento del follaje hasta el fin del crecimiento del cultivo que ocurre la senescencia del follaje.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 DESCRIPCIÓN DEL LUGAR DE ESTUDIO

La presente investigación se desarrolló en el Centro de Investigación y extensión en riego (CIER), de la Facultad de Ingeniería Agrícola, ubicada en el campus de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en el distrito de la Molina, provincia de Lima, región Lima, ubicado en una altitud de 238 msnm, latitud sur 12° 05' y longitud oeste 77° 00'



Figura 3: Área experimental, con trabajos previos de limpieza.

3.2 CONDICIÓN EXPERIMENTAL Y MEDICIONES

El trabajo experimental se desarrolló desde el 13 de junio al 13 de setiembre del 2018, en el área de investigación en la UNALM caracterizado por un suelo franco arenoso con 64.9%, 21.6% y 13.5% de arena, limo y arcilla respectivamente. Además, con un contenido de materia orgánica de 1.38%, densidad aparente de 1.62 (g/cm³), pH igual a 7.97 y conductividad eléctrica de 1.3 (dS m⁻¹). Estos resultados fueron obtenidos del análisis de suelo en el Laboratorio de Análisis de Agua, Suelo y Medio Ambiente – Departamento de Recursos Hídricos, Universidad Nacional Agraria La Molina (Anexo 1 y 2). Para obtener CC y da, dos semanas antes de la fecha de siembra se realizaron dos calicatas con dimensiones de 1x1.2 m², previamente saturadas la calicata 1, con 285 litros y la calicata 2, con 195 litros de agua y cubierta con plástico durante 7 días. Se extrajeron muestras de suelo usando cilindros muestreadores en los niveles de 0, 10, 25 y 40 cm en los dos perfiles de suelo por calicata, para ser luego rotulados y envueltos en papel

aluminio. Todas las muestras fueron codificadas y pesadas obteniendo peso húmedo, luego fueron secadas a 105 °C por 72 horas, con la finalidad de obtener el peso seco de las muestras, para luego obtener la diferencia de Peso de suelo húmedo -peso suelo seco (Anexo 3)

Cuadro 2: Características del campo experimental llevadas a cabo bajo riego por goteo, entre el 13 de junio del 2018 al 13 de setiembre del 2018.

Característica del campo	
Tipo de riego	Goteo
Dimensiones	92*18.9 m ²
Número de bloques	5
Número de parcelas	15
Número de sub parcelas	90
Número de plantas por sub parcela	30
Número de plantas por parcela	180
Número de plantas total	2700

Según la Figura 4, el diseño experimental ensayado fue de 5 bloques, por cada bloque 3 parcelas y cada parcela contaba con 6 subparcelas completamente al azar, se aplicó tres tratamientos con cinco repeticiones en un área de 71.1 m² por cada una de las repeticiones.

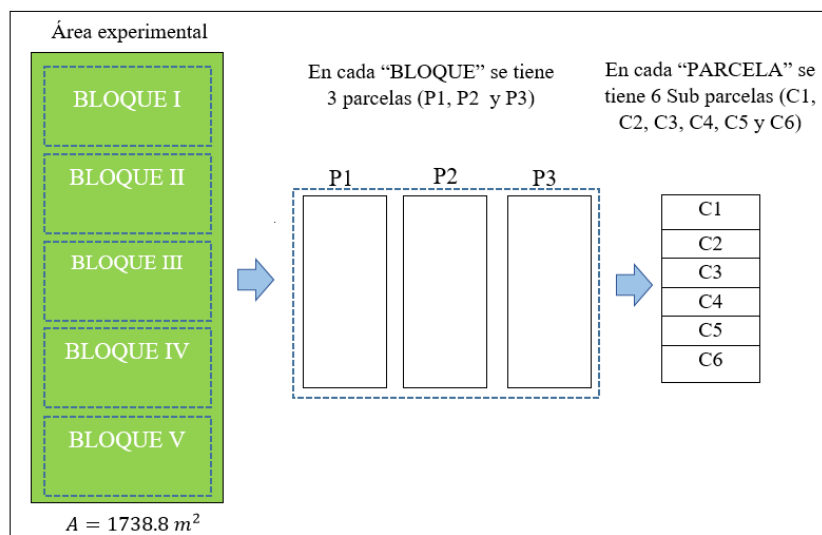


Figura 4: Distribución de bloques, parcelas y subparcelas del área experimental.
Fuente: Elaboración propia

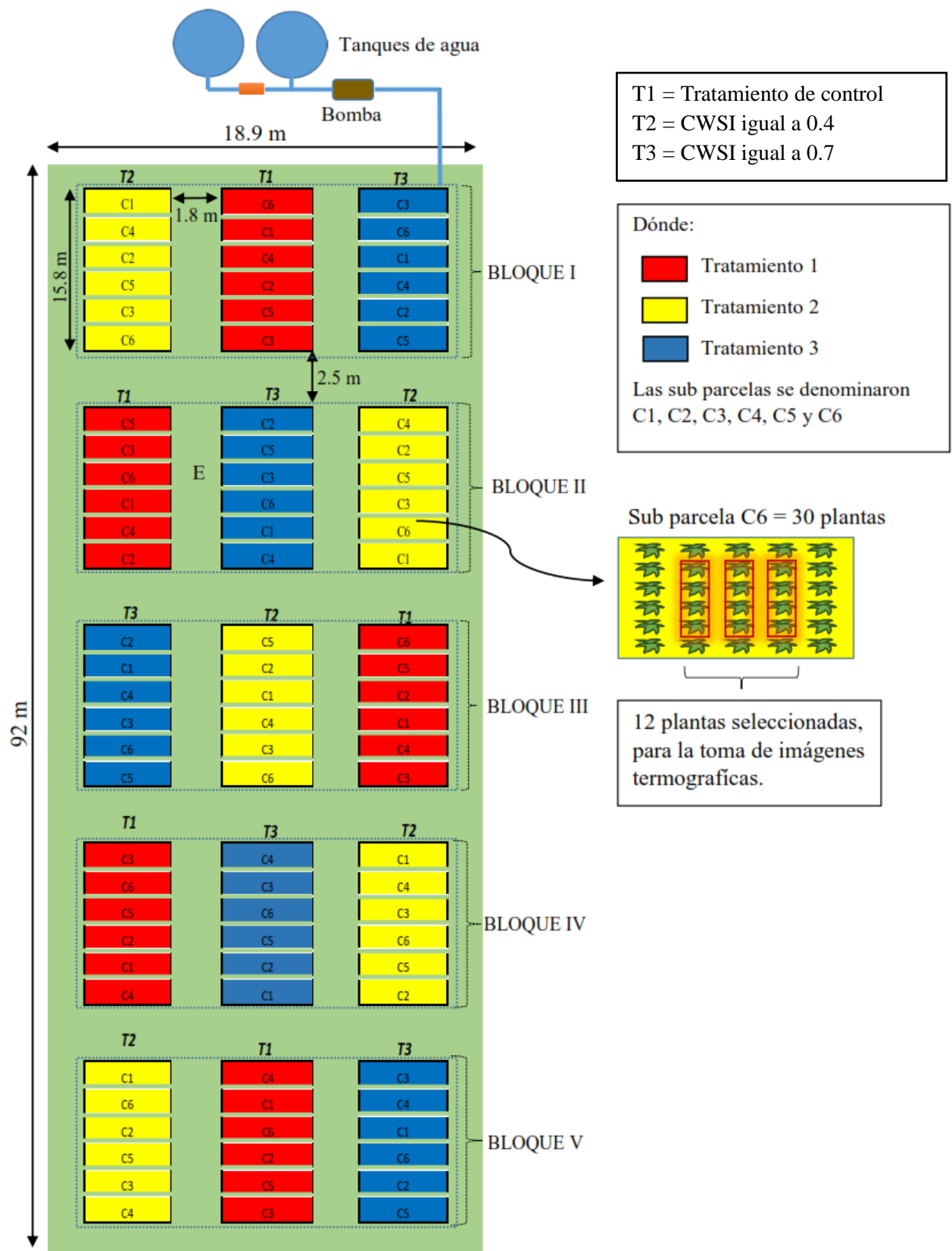


Figura 5: Esquema del diseño experimental de la parcela.
Fuente: Elaboración propia

El diseño experimental se desarrolló en un área total de 1738.8 m², donde se testaron tres tratamientos de riego distribuidos al azar y repetidos en cinco bloques bajo sistema de riego por goteo. E, es la ubicación de la estación meteorológica.

El 13 de junio del 2018, se dio inicio con la siembra de las semillas del cultivo de la papa ÚNICA.



Figura 6: Semillas del cultivo de la papa ÚNICA.

Las semillas de papa, que se empleó para la investigación es la ÚNICA (CIP código: 392797.22), la cual es caracterizada por su precocidad y por ser tolerante a los virus y a las altas temperaturas (Gutiérrez- Rosales *et al.* 2007). Bajo condiciones de restricción hídrica esta variedad ha presentado un alto rendimiento (Ramírez *et al.* 2015) debido a que muestra un alto uso eficiente de agua (Yactayo *et al.* 2013).



Figura 7: Se sembró un total de 2700 semillas del cultivo de la papa ÚNICA.

3.2.1 Experimento realizado en campo

El primer riego se realizó el 14 de junio del 2018, con un volumen aplicado de $0.49m^3$, para el funcionamiento de todo el sistema.



Figura 8: Distribución de las cintas de riego y goteros incorporados.

3.3 MÉTODOS


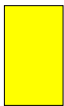

3.3.1 Determinación de umbrales de riego con el índice de estrés hídrico para el cultivo de la papa (*Solanum tuberosum L.*)

El índice de estrés hídrico *CWSI* fue calculado por el método empírico de superficie de referencia artificial húmeda (Moller *et al.* 2006) y en base a la temperatura radiométrica del follaje (T_f) obtenida por imágenes térmicas por parcela. Así mismo Rinza (2018), hace mención en su trabajo de investigación, que este método simula a una planta en óptimas condiciones de disponibilidad de agua y otra en condiciones contrarias. En esos casos el índice hídrico varía de 0 para cultivos sin estrés y 1 para cultivos que presentan estrés severo.

En la investigación realizada por Rinza (2018) recomendó llevar a cabo experimentos donde se propongan umbrales de 0.4 y 0.7 de *CWSI*, para condiciones óptimas de riego y de restricción hídrica en papa en un ambiente húmedo.

Teniendo en cuenta las recomendaciones se planteó y desarrolló los siguientes umbrales de tratamiento durante el experimento.

Cuadro 3: Tratamientos desarrollados

Tratamiento	Descripción
 T1	Tratamiento de control (testigo) en el cual se considera un riego normal a capacidad de campo.
 T2	Tratamiento con restricción de riego según el CWSI igual a 0.4, propuesto por Ramírez <i>et al.</i> (2016) y Rinza (2018).
 T3	Tratamiento con restricción de riego según el CWSI igual a 0.7, propuesto por Ramírez <i>et al.</i> (2016) y Rinza (2018).

3.3.1.1. Procedimiento para el cálculo del CWSI mediante la cámara térmica FLIR60.

En primer lugar se desarrollaron actividades para poder determinar la cantidad de agua en el suelo, mediante el muestreo de suelos de las subparcelas con tratamiento T1, T2 y T3 (Anexo 4). Luego, cada muestra fue pesada en una placa Petri, para obtener el peso de suelo húmedo (w_{sh}) y posteriormente se realiza el secado en un horno microondas (Modelo CQ1570, Samsung, Tailandia) durante 25 minutos a una temperatura de 105 °C, para obtener (w_{ss}) peso de suelo seco y finalmente se determinó la humedad gravimétrica (P_w) con la siguiente relación:

$$(P_w) = \frac{(W_{sh} - W_{ss}) \times 100}{w_{ss}} \dots \dots \dots (2)$$

Para el monitoreo de la data meteorológica se utilizó la estación (HOBO U30, Onset Computer Corporation, Bourne, USA), instrumento electrónico que almacena medidas de los sensores a través del tiempo, el cual se ubicó en el centro de la parcela experimental.



Figura 9: Estación meteorológica (HOBO U30, Onset Computer Corporation, Bourne, USA).

En la Figura 9, se muestra el momento de la programación, en el cual se usó una laptop en conexión a la caja registradora mediante el programa (HOBO U30) para su almacenamiento de la data meteorológica; con un intervalo de tiempo de 1 minuto respecto a la temperatura del aire en (°C) y la humedad relativa (HR) en (%).

La cámara térmica FLIR (E60, Systems Inc., USA) (Anexo 5) fue configurada con una emisividad (ϵ) de 0.96, siendo la temperatura aparente reflejada del cartón (T_{ref}), que fue medida cada 6 imágenes usando el método directo según FLIR (2016) y tomada a 3m de distancia del cultivo en una posición opuesta al sol (Jones *et al.* 2009; Kirkham 2014).

También se configuró los parámetros meteorológicos, como la temperatura del aire en (°C), humedad relativa (HR) en (%), registrada por la estación meteorológica automática HOBO. La superficie de referencia artificial húmeda (SRAH), se usó en cada sub parcela C6, de cada parcela y bloque correspondiente, con la finalidad de obtener la temperatura referencial húmeda (T_{sh}) respecto a la cobertura vegetal del cultivo y luego ser calculada mediante el software FLIR Tools (Versión 6.3, FLIR Systems).



Figura 10: Superficie de referencia artificial húmeda (*SRAH*).

La *SRAH* fue construida según Moller *et al.* (2006), con una tela blanca de algodón de 1 mm de espesor usada como material absorbente, que envuelve a un pedazo de poliestireno (“tecnopor”) que flota en una bandeja con agua de 0.32x0.22x0.10 m. Se tomaron las imágenes entre las 13:00 pm a 14:00 pm, con dirección opuesta al sol, por cada sub parcelas (*C6*) respecto a los tratamientos T1, T2 y T3. Cada sub parcela *C6*, está conformada por 30 plantas del cultivo de la papa.



Figura 11: Se observa la toma de imágenes térmicas del follaje del cultivo de la papa mediante la cámara FLIR E60.

La distancia diagonal de la posición del lente de la cámara FLIR E60, y la cobertura del follaje del cultivo fue de 3m, en el cual el campo visual de la cámara enfocaba a 12 plantas, como se muestra en la Figura 12.

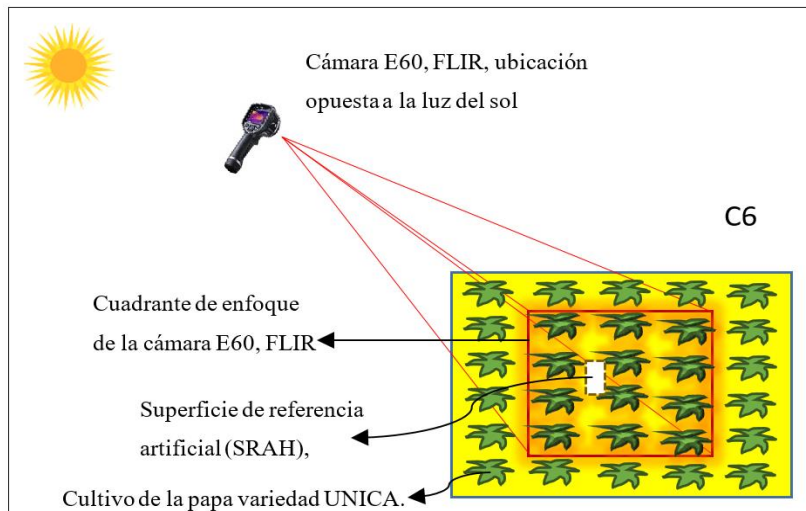


Figura 12: Registro de la imagen térmica de la sub parcela C6.

A partir de los 36 DAP, se realizó 15 tomas diarias de las 15 parcelas, de las cuales al descargar en el programa de la cámara FLIR E60, se obtiene una imagen visible RGB visible y una imagen térmica por cada toma, haciendo un total de 30 imágenes.



Figura 13: (1) Imagen visible RGB y (2) imagen térmica, tomadas en el campo experimental del cultivo de papa ÚNICA.

La imagen térmica (2), muestra la radiación térmica que emite la cobertura vegetal donde se puede observar el rango de tonalidades que indican los valores de temperaturas medidos dentro de su campo visual.

Son tratadas en el mismo software de la cámara FLIR E60, en el cual se define la temperatura promedio del follaje (T_f) y la temperatura de la superficie de referencia artificial húmeda (SRAH).

Para el procesamiento de alineación de las imágenes se usó del programa TIPCIIP v.1.3 (CIP, 2018) desarrollado por el Centro Internacional de la Papa (CIP), donde la imagen alineada fue convertida a una imagen binaria con el umbral lógico de 1 (negro) para el follaje y el resto cero (blanco), con la primera se obtuvo la máscara de follaje para obtener (T_f) de cada imagen.



Figura 14: Página de inicio del programa TIPCIIP v.1.3 (CIP 2018).

El $CWSI$ fue determinado usando la $Ec. (1)$, donde T_{sh} es la temperatura medida de una superficie de referencia artificial húmeda (SRAH), obtenida de cada imagen con el software FLIR Tools (Versión 6.3, FLIR Systems). La temperatura radiométrica del follaje (T_f) es obtenida por imágenes térmicas de cada sub-parcelas C6 (Anexo 6), (T_s) fue de $7^{\circ}C$.

Una vez calculado el $CWSI$, para los tratamientos T_1 , T_2 y T_3 se define la programación de riego según el resultado de la humedad gravimétrica (P_w) de acuerdo a la ecuación. $Ec. (2)$ Para luego determinar la Hv (%), Volumen de riego en surco, Volumen de riego en parcela y tiempo de riego (Anexo 7).

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 UMBRALES DE RIEGO CON EL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO PARA EL CULTIVO DE LA PAPA (*Solanum tuberosum l.*)

El índice de estrés hídrico *CWSI*, durante el periodo vegetativo de la papa ÚNICA (*Solanum tuberosum l.*) fue oscilante ya que dependió directamente de los indicadores climáticos tales como temperatura ($T^{\circ}C$), humedad relativa (*Hr*), radiación PAR y radiación solar lo cual indica si es un día despejado o nublado Rinza (2018).

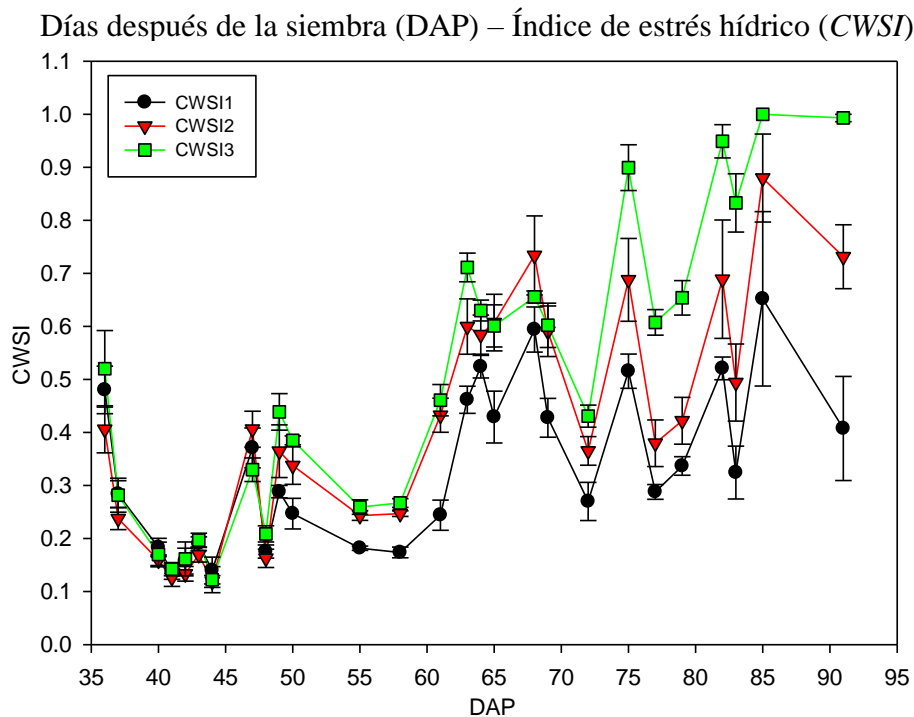


Figura 15: Comportamiento del índice de estrés hídrico del cultivo *CWSI* a lo largo de la etapa vegetativa del cultivo de la papa, obtenidos para 15 parcelas se testaron tres tratamientos (T1, T2 y T3), bajo riego por goteo.

De acuerdo a los datos tomados de la estación (HOBO U30, Onset Computer Corporation, Bourne, USA), en los días despejados los valores de radiación fotosintética activa PAR, fueron superiores de a 550 μE , radiación solar a 300 w/m^2 , de VPD a 0.3 kPa y de humedad relativa a 84% influyendo en la temperatura de la hoja y por lo cual se tuvo un umbral de índice de estrés hídrico elevado.

Como se muestra en la Figura 16, el *CWSI* se evaluó desde 36 DAP días después de la siembra hasta los 91 DAP, el cual presento valores sobre los umbrales establecidos para la programación de riego.

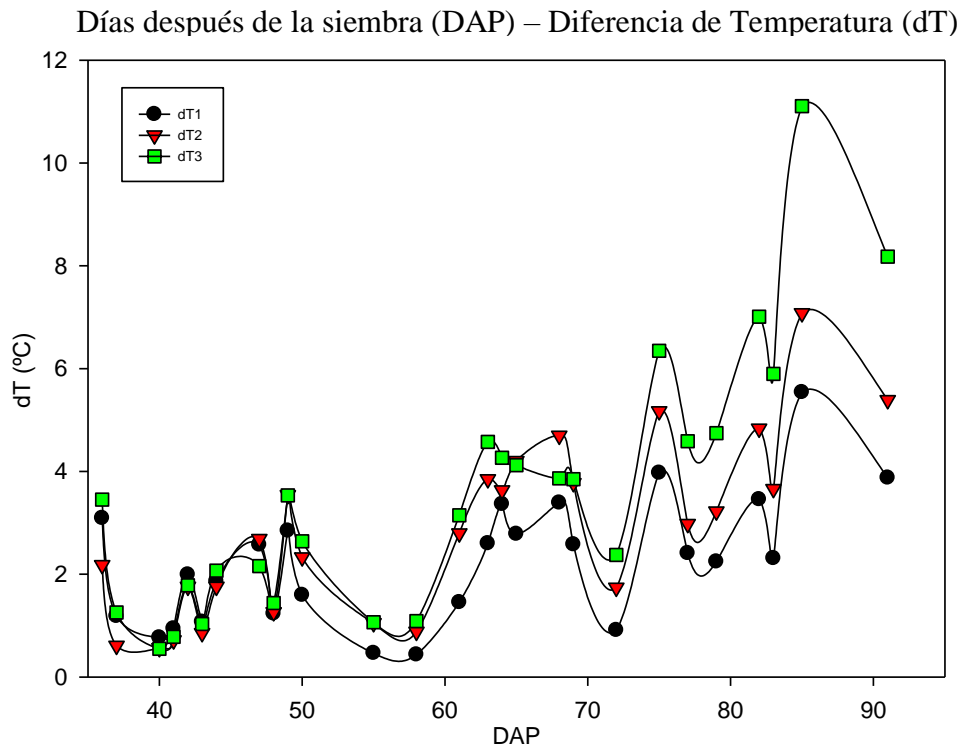


Figura 16: La diferencia de temperatura de la hoja y el medio, la cual está relacionada indirectamente con el *CWSI* mediante la temperatura seca.

El *CWSI* por su definición en la *Ec. (1)*, está relacionado indirectamente con la temperatura del follaje. Por lo tanto, a un incremento de temperatura habrá una variación en el *CWSI*.

El resultado mostrado en la Figura 16, muestra al igual que la Figura 17 una tendencia similar y la diferencia de temperatura (d_T), entre la temperatura del follaje y la temperatura del ambiente está relacionado con el estrés hídrico. En la diferencia de temperatura (d_T) mostrara un aumento en el *CWSI*. El aumento de la (d_T) se presenta a partir de los 72 días DAP. Los valores máximos de (d_T) para el tratamiento T3 es de 11 °C, el tratamiento T2 es de 7 °C y en el tratamiento T1 es de 5 °C, en los días finales del periodo vegetativo.

Antes de los 82 DAP, el valor máximo de la diferencia de temperatura, (d_T) entre los tratamientos (T1, T2 Y T3) fue de 7 °C, siendo así el valor empleado por (Ramírez *et al.* 2016), y determinado por (Jones 1999 ; Rud *et al.* 2014) en los trabajos de investigación realizados en el cultivo de la papa ÚNICA. Como resultado se tiene que la temperatura de follaje obtenido siempre presenta valores superiores a la temperatura ambiente.

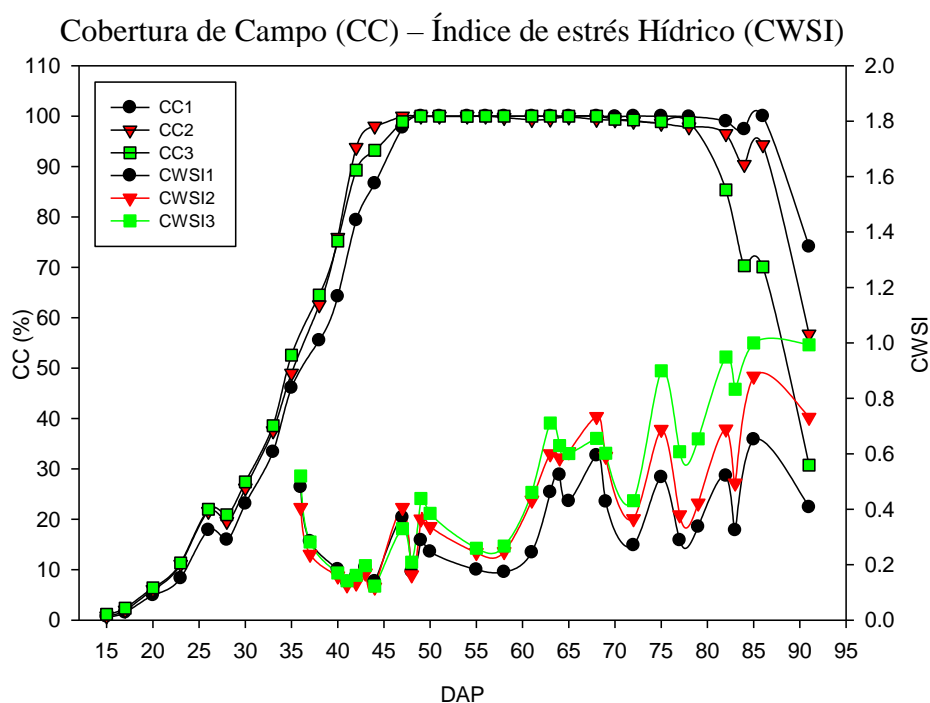


Figura 17: Relación de la cobertura de campo en (%) y el comportamiento del índice de estrés hídrico *CWSI*; durante los días después de la siembra

La cobertura de campo es otro indicador de *CWSI*, que fue ascendente hasta los 50 DAP, y manteniéndose constante en los tres tratamientos (T1, T2 y T3) llegando a un 100% de su cobertura, hasta los 72 DAP.

Según los resultados mostrados en la Figura 17, se observa que a inicios de la etapa vegetativa de la senescencia la cobertura desciende para CC1 a los 91 DAP representa un 74 %, CC2 un 56% y CC3 un 30%.

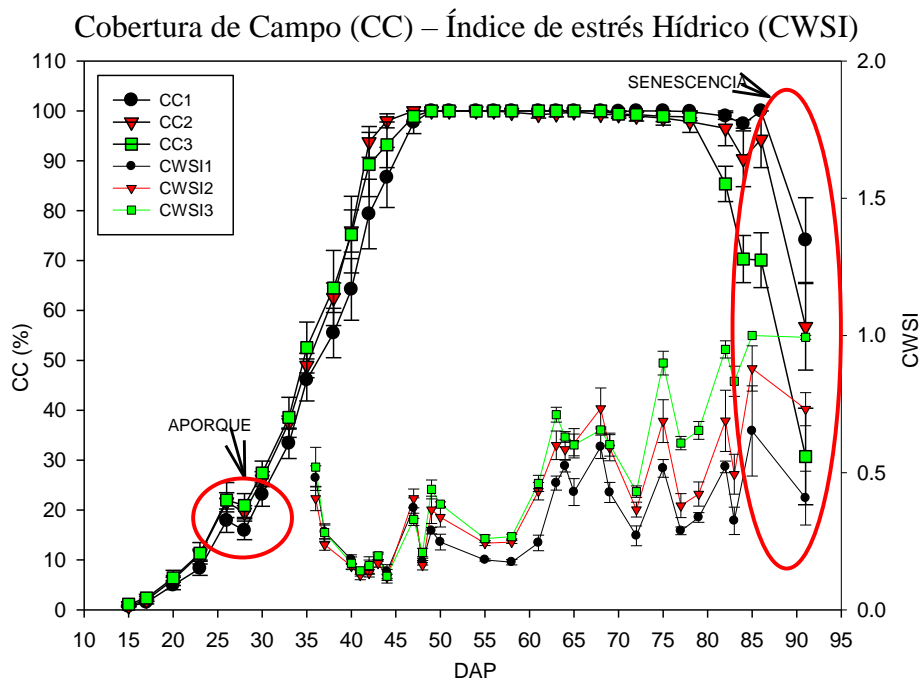


Figura 18: Se aprecia la cobertura de campo durante todo el periodo CC (%) y el índice de estrés hídrico *CWSI* respecto a los días después de la siembra.

La etapa de emergencia del cultivo de la papa inicio 10 días después de la siembra DAP, y el porcentaje de cobertura de campo se inició a monitorear a partir del día 12 DAP.

A los 28 DAP se observa un punto de quiebre, debido a la actividad realizada del aporque el cual alteró los valores de CC (%) de cada tratamiento. A los 75 - 80 DAP inicia la etapa de senescencia, en el cual se observa la disminución de cobertura vegetal. Esto evidenció que la cobertura influye en la determinación del *CWSI*, y como consecuencia, los valores de índice de estrés hídrico del cultivo aumentan drásticamente en los últimos días.

4.2 RELACIÓN ENTRE LA HUMEDAD GRAVIMÉTRICA Y EL CWSI

La relación entre la humedad gravimétrica y el índice de estrés hídrico del cultivo.

Índice de estrés hídrico *CWSI* – Humedad gravimétrica (P_w)

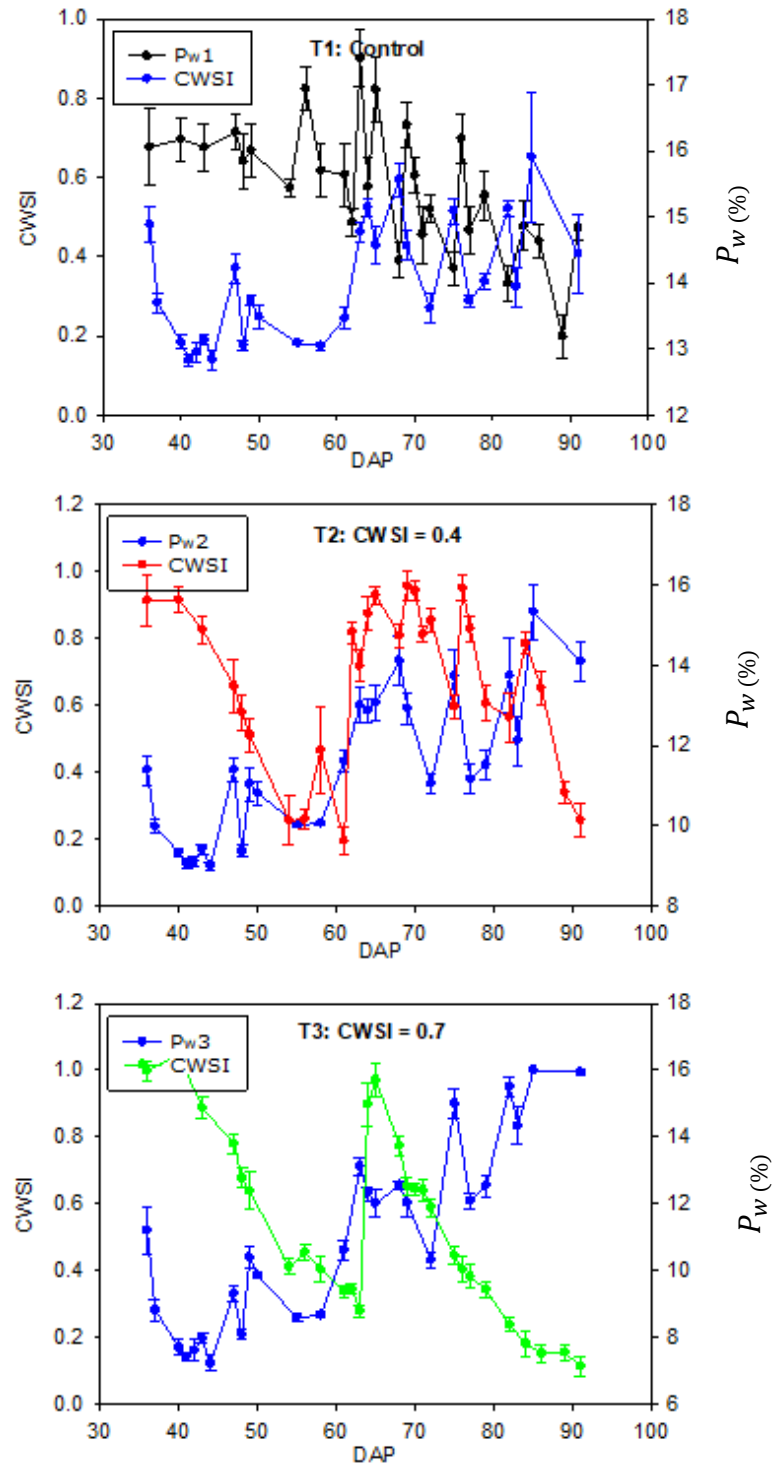


Figura 19 : Se muestra los valores y comportamiento de la humedad gravimétrica respecto al índice de estrés hídrico, en los tres tratamientos (T1, T2 y T3).

El porcentaje de humedad gravimétrica (P_w) evaluada muestra que para nuestro tratamiento control (T1) se mantuvo dentro del rango de 13-16 % de contenido de agua en el suelo. En el tratamiento (T2), el contenido de agua en el suelo, llegó a valores mínimos de hasta 10% en cinco ocasiones y T3 su valor aproximado más crítico, fue de 7% de contenido de agua en el suelo.

Las evaluaciones del $CWSI$ mostraron valores promedio de 0.334 ± 0.029 , 0.424 ± 0.044 y 0.558 ± 0.086 para los tratamientos T1, T2 y T3 respectivamente (Figura 20). Se observa que el $CWSI$ incrementa a partir de los 36 DAP.

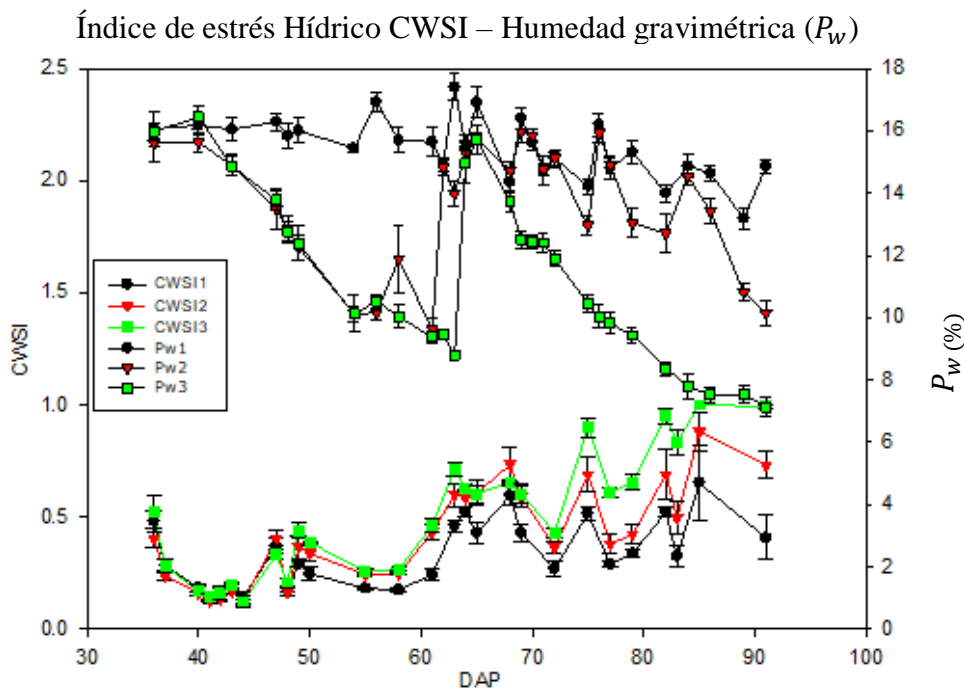


Figura 20: Comparativo del índice de estrés hídrico $CWSI$ y la humedad gravimétrica (P_w) durante la etapa vegetativa del cultivo.

De los resultados se observa que teniendo constantes los valores altos de humedad gravimétrica (P_w) no afecta el índice de estrés hídrico $CWSI$ del cultivo, ya que la planta se encontraría en su óptimo estado de humedad, y en caso contrario para valores bajos de la humedad gravimétrica (P_w) el índice de estrés hídrico $CWSI$ aumenta rápidamente por el déficit hídrico de las plantas (Anexo 8).

Índice de estrés Hídrico *CWSI* – Lámina de riego (L_r)

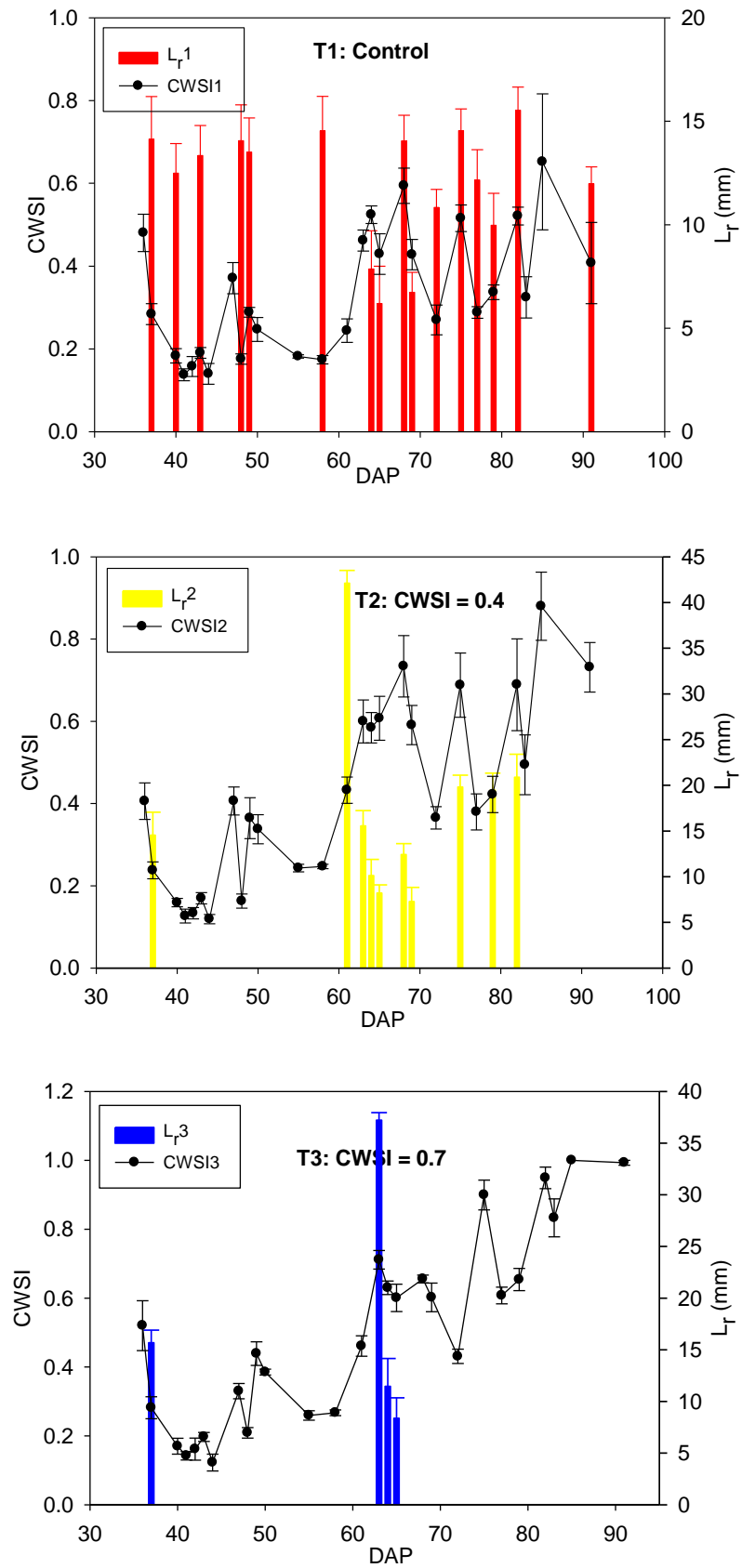


Figura 21: La programación de riego para los diferentes tratamientos (T1; T2 y T3)

La programación de riego se hizo mediante la determinación del *CWSI* para saber cuándo y cuánto regar, según la humedad gravimétrica calculada.

Durante el desarrollo de la investigación se buscaba mantener valores de capacidad de campo constantes para el tratamiento de control $T1 = 1$, por lo cual según el cálculo de la humedad gravimétrica (P_w) se realizó un total de 16 riegos. Para $T2 = 0.4$, se hicieron 10 riegos, según la determinación del *CWSI*. En el $T3 = 0.7$ se hicieron 03 riegos, según la determinación del *CWSI* (Anexo 9).

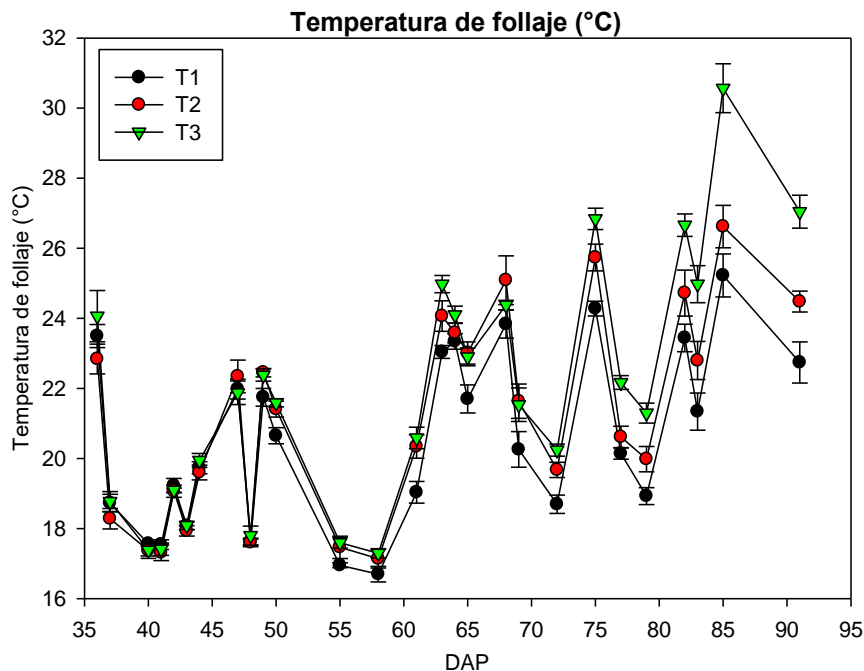


Figura 22: Se muestra la temperatura del follaje en grados centígrados (°C) durante la etapa vegetativa del cultivo de la papa.

El comportamiento de la temperatura del follaje es similar al comportamiento del *CWSI* y la diferencia de temperatura (d_T). Para los primeros días de restricción de agua en las parcelas de tratamiento definido por los umbrales de riego, la temperatura del follaje no varía entre los tratamientos T2 y T3 respecto al T1. A los 50 DAP se observa un aumento de la temperatura de follaje de los tratamientos T2 y T3 respecto al T1 de control, que se encuentran a capacidad de campo.

Desde los 70 DAP en adelante, se logra diferenciar las temperaturas del follaje que presentan las plantas de cada tratamiento. Como resultado se tiene que la temperatura de

follaje del tratamiento T3 es mayor respecto a la temperatura de follaje del T2 y a la vez estas dos temperaturas T2 y T3 son mayores a la temperatura del T1.

A los 91 DAP, se logra ver las diferencias acentuadas de cada tratamiento T1, T2 y T3, respecto a la cobertura vegetal como se muestran en las siguientes imágenes.



Figura 23: Diferencias acentuadas de los tratamientos T1, T2 y T3, respecto a la cobertura vegetal del cultivo de la papa a los 91 DAP.

Respecto al requerimiento hídrico durante la etapa vegetativa del cultivo de la papa variedad “ÚNICA” por tratamiento, se obtiene los siguientes resultados.

Cuadro 4. Requerimiento Hídrico del cultivo de la papa, por cada tratamiento.

Requerimiento Hídrico			
Tratamiento	T1	T2	T3
Nº De riegos	29	18	12
Lamina neta (mm)	263.25	183.64	114.45
Volumen de agua aplicado (m ³ .ha ⁻¹)	2632.48	1836.41	1144.46

Estos valores representan un ahorro de agua de 30.24 % y 56.52% por ciento respecto al volumen del tratamiento control T1. La eficiencia de riego fue de 90% dato que se tomó del Manual del cálculo de eficiencia para sistemas de riego MINAGRI (2015)

A los 92 DAP, se obtuvo el rendimiento de la papa variedad “ÚNICA”.

Cuadro 5. Rendimiento del cultivo de la papa, por cada tratamiento.

Rendimiento (t.ha ⁻¹)		
T1	T2	T3
49.53	44.30	30.09

Los valores son superiores a los registrados para la costa peruana: 32 t.ha⁻¹, y superan el rendimiento promedio nacional de 14.7 t.ha⁻¹ MINAGRI (2017).

V. CONCLUSIONES

- Mediante la termografía infrarroja se determinó el índice de estrés hídrico *CWSI* durante el periodo vegetativo del cultivo de papa ÚNICA, según los umbrales de índice de estrés hídrico *CWSI* de $T2 = 0.4$ y $T3 = 0.7$.
- Se determinó la temperatura del follaje del cultivo desde los 35 DAT hasta los 91 DAT, a través de imágenes térmicas, mediante algoritmos desarrollados por el Centro Internacional de la Papa CIP.
- La relación entre el *CWSI* y la humedad gravimétrica (P_w) muestra que a falta de agua, la planta cierra sus estomas y evita de perder agua. Esta es la relación de un buen indicador para saber cuándo y cuánto se debe regar y mitigar el efecto de marchitez de la planta. Según el cálculo de la humedad gravimétrica (P_w) se realizó un total de 16 riegos para el tratamiento de control T1, para el tratamiento con restricción de riego según el *CWSI* igual a 0.4, se hicieron 10 riegos y para el tratamiento con restricción de riego según el *CWSI* igual a 0.7 se hicieron 03 riegos.
- A los 91 DPA finalizó la etapa vegetativa del cultivo de la papa variedad ÚNICA; obteniendo para T1 un (*CWSI* = 0.41), el T2 un (*CWSI* = 0.73) y el T3 un (*CWSI* = 1.20), valores que están sobre los umbrales establecidos debido a la etapa final de senescencia del cultivo.

VI. RECOMENDACIONES

- Verificar la relación de la diferencia de temperatura dT y el VPD con otros experimentos, que se realizaron en zonas secas (VPD altos) y condiciones de cielo despejado (estación de verano).
- Llevar a cabo experimentos donde se propongan umbrales de 0.4 y 0.8 de *CWSI* para condiciones óptimas de riego y de restricción hídrica en el cultivo de la papa variedad ÚNICA en un ambiente húmedo.
- Para la estimación de la evapotranspiración de referencia se recomienda utilizar el tanque evaporímetro tipo A, por ser práctico, accesible y eficiente.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. & Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO riego y drenaje Manual 56. Roma.

Alves, I. and Santos, L. 2000. Non-water-stressed baselines for irrigation scheduling with infrared thermometers: A new approach. *Irrigation Science*. 19:101–106.

Belin É., Rousseau D., Rojas-Varela J., Demilly D., Wagner M.-H., Cathala M.-H., Dürr, C. 2011. Thermography as non invasive functional imaging for monitoring seedling growth, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 79, Issue 2, November, Pages 236-240, ISSN 0168-1699.

Best, S.; Gatica G. y León. L. 2009. Desarrollo de un modelo de evaluación del estrés hídrico de un viñedo basado en el uso de termografía infrarroja

Chaves MM, Pereira JS, Maroco J, Rodrigues ML, Ricardo CPP, Osório ML. 2002. Cómo las plantas se enfrentan al estrés hídrico en el campo: fotosíntesis y crecimiento, *Anales de Botánica*, vol. 89 (pg. 907-916)

Cohen, Y, Alchanatis, V, Meron, M, Saranga, Y y Tsipris, J. 2005. Estimation of leaf potential by thermal imagery and spatial analysis. *Journal of Experimental Botany*, 56, 1843-1852.

FAO 2012. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua en el suelo. Food and agriculture. Organization of the United Nations, Roma. 324pp.

Gindaba, J., Rozanov, A. y Negash, L. 2004. Photosynthetic gas exchange, growth and biomass allocation of two Eucalyptus and three indigenous tree species of Ethiopia under moisture deficit. *Forest Ecology and Management* 205: 127 - 138.

Gutiérrez-Rosales, R., Espinoza, J., Bonierbale, M., 2007. ÚNICA: variedad Peruana para mercado fresco y papa frita con tolerancia y resistencia para condiciones climáticas adversas. *Rev. Latinoam. Papa*. 14, 41–50.

Jackson, R.D. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation Research*, 1: 43–85.

Jefferies, R.A. 1993. Physiology of crop response to drought. In: Haverkort, A.J., MacKerron, D.K.L. (Eds.), *Potato Ecology and Modeling of Crops Under Conditions Limiting Growth*. Wageningen Academic Publishers, The Netherlands, pp. 61–74.

Jones. H.G. 1990. Plant water relations and implications for irrigation scheduling. *Acta Horticulturae*, 278 , pp. 67–76

Jones, H. G. 1999. Use of infrared thermometry for estimation of stomatal conductance as a possible aid to irrigation scheduling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 95, pp. 139–149

Jones, H.G., Serraj, R., Loveys, B.R., Xiong, L., Wheaton, A., Price, A.H., 2009. Thermal infrared imaging of crop canopies for the remote diagnosis and quantification of plant responses to water stress in the field. *Funct. Plant Biol.* 36, 978. <https://doi.org/10.1071/FP09123>.

Kirkham, M. B. 2014. Introduction. En *Principles of Soil and Plant Water Relations*, 572p.

Lahlou, O., Ouattar, S., and Ledent, J. F. 2003. The effect of drought and cultivar on growth parameters, yield and yield components of potato. *Agronomie*, 23(3), 257-268.

Leuzinger, Körner, C. 2007. Tree species diversity affects dosel leaf temperatures in a mature temperate forest, *Agricultural and Forest Meteorology*, Volume 146, Issues 1–2, 11 Septembe, Pages 29-37, ISSN 0168-1923.

Majey, R:K; Singh, R; Sidhu, S.S; Narang, R.S. 1991. The use of remote-sensing to assess the effects of water-stress on wheat. *Exp. Agric.*, 27, pp. 423–429

Moller, M., Alchanatis, V., Cohen, Y., Meron, M., Tsipris, J., Naor, A., Cohen, S. 2006. Use of thermal and visible imagery for estimating crop water status of irrigated grapevine. *Jour. of Exper Botan*, 58(4), 827-838.

O'Shaughnessy S., Evett S.R., P.D. Colaizzi, Howell, T.A. 2011. Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton, *Agricultural Water Management*, Volume 98, Issue 10, August 2011, Pages 1523-1535, ISSN 0378-3774, h

Padhi, J., Misra R.K., Payero J.O. 2012. Estimation of soil water deficit in an irrigated cotton field with infrared thermography, *Field Crops Research*, Volume 126, 14 February, Pages 45-55, ISSN 0378-4290.

Potato Pro. 2017 enlace web: (<http://www.potatopro.com/world/potato-statistics> 2017).

Ramírez, D.A., Rolando, J.L., Yactayo, W., Monneveux, P., Quiroz, R. 2015. Is Discrimination of 13 C in Potato Leaflets and Tubers an Appropriate Trait to Describe Genotype Responses to Restrictive and Well-Watered Conditions? *J. Agron. Crop Sci.* 201, 410–418.

Ramírez, D.A., Monneveux P., Quiroz, R., 2016b. Mitigando los efectos de la sequía en papa: Algunos alcances y retos, in: *Estrés hídrico y térmico en papa, avances y protocolos*. INIA No 331, Chile, pp. 115–129

Rinza 2018. “Temperatura radiométrica de follaje como indicador del estatus hídrico del cultivo de papa (*solanum tuberosum l.*) en la molina-Perú”

Rud, R., Cohen, Y., Alchanatis, V., Levi, A., Brikman, R., Shenderey, C., Nigon, T. 2014. Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Preci. Agric.*, 15(3), 273-289.

Sandaña P. 2015. Instituto Nacional de Investigacion Agraria - Remehue

Tanner, C. B. 1963. Plant temperatures. *Agronomy Journal*, 55, 210-211. (Van Loon, 1981; Lahlou 2003).

Turner, L. B. 1990. The Extent and Pattern of Osmotic Adjustment in White Clover (*Trifolium repens L.*) During the Development of Water Stress. *Annals of Botany*, 66, 721-727

Van Loon, C.D. 1981. The effect of water stress on potato growth, development, and yield. *Am. Potato J.* 58, 51–69.

Villa, H.; Hugalde, I. Di Filippo M. 2011. Estimación del potencial hídrico en vid por medio de medidas termográficas y eSPEKTRales. *Revista RIA - INTA –Vol. 37.*

Wang, X.; Yang, W.; Wheaton, A.; Cooley, N. and Moran, B. 2010. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: A first step towards automated plant water stress monitoring. *Computers and Electronics in Agriculture* 73 (2010). 74-83

VIII. ANEXOS

Anexo 1: Análisis del perfil del suelo para determinar la (Pw %)

Fecha de Evaluación: 23-04-2018

Según la aplicación hídrica:

A - B	Calicata 1	285 litros
C - D	Calicata 2	195 litros

Procedimiento:

C	H (cm)	M	P_H (gr)	P_C (gr)	P_A (g)	P_S (gr)	Mss (gr)	D (mm)	H (mm)	V (cm ³)	da (gr/cm ³)	θ _{cc} (%)
CALICATA 1	0	A1	256.82	81.51	3.11	225.53	140.91	49.86	51.03	99.64	1.41	31.40
	10	A2	267.49	79.95	3.09	236.91	153.87	49.58	50.75	97.98	1.57	31.21
	25	A3	268.26	79.90	3.03	245.62	162.69	49.86	50.65	98.89	1.65	22.89
	40	A4	241.52	80.03	3.10	228.95	145.82	49.69	50.68	98.28	1.48	12.79
	0	B1	267.42	79.99	3.08	238.19	155.12	49.97	50.71	99.45	1.56	29.39
	10	B2	269.91	80.02	3.06	242.17	159.09	49.74	50.86	98.83	1.61	28.07
	25	B3	272.34	80.00	3.07	250.06	166.99	49.86	50.78	99.15	1.68	22.47
	40	B4	244.40	80.07	3.04	232.29	149.18	49.79	50.88	99.07	1.51	12.22
CALICATA 2	0	C1	272.63	79.93	3.01	236.80	153.86	49.71	50.93	98.84	1.56	36.25
	10	C2	277.02	79.88	3.00	246.90	164.02	49.70	50.80	98.55	1.66	30.56
	25	C3	265.53	80.07	3.11	243.58	160.40	49.97	50.87	99.76	1.61	22.00
	40	C4	293.11	79.99	3.09	268.95	185.87	49.91	50.77	99.33	1.87	24.32
	0	D1	257.72	79.95	3.06	227.25	144.24	49.83	50.88	99.22	1.45	30.71
	10	D2	276.46	79.86	3.07	245.02	162.09	49.82	50.54	98.52	1.65	31.91
	25	D3	291.75	81.66	3.02	267.79	183.11	49.92	51.05	99.92	1.83	23.98
	40	D4	291.06	80.03	3.00	266.59	183.56	49.83	50.83	99.13	1.85	24.69

*C: Calicata, H: Altura en cm, P_H: Peso de suelo húmedo, P_C: Peso del cilindro, P_A: Peso del aluminio, P_S: Peso del suelo seco, Mss: Muestra seca, D: Diámetro del cilindro en (mm), H: Altura del cilindro (mm), V: Volumen del cilindro en (cm³), da: densidad aparente en (gr/cm³) y θ_{cc}: Humedad volumétrica (%). A continuación se muestra en el cuadro adjunto, los resultados de la humedad gravimétrica en %, de las 2 calicatas.

RESULTADOS			
H (cm)	da (gr/cm ³)	θ _{cc} (%)	Pw (%)
0	1.50	31.94	21.35
10	1.62	30.44	19.22
25	1.69	22.84	16.78
40	1.68	18.51	15.45
Prom	1.62	25.93	18.20
0-25	1.60	28.40	19.12

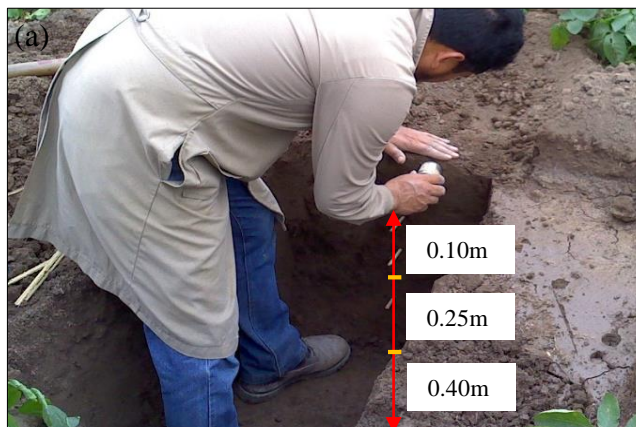
Anexo 2: Caracterización físico químico del suelo.

Número de muestra	CE	Análisis Mecánico				pH	M.O.	P	K	CaCO ₃	Cationes Cambiables					
	dS / m	Arena	Limo	Arcilla	Textura	Relación	%	ppm	ppm	%	CIC total	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺ +H ⁺
	Relación 1:1	%	%	%		1:1					Cmol (+) / Kg					
1	1.4	66.4	20	13.6	franco arenoso	7.97	1.38	17.77	220	4.02	10.06	8.56	1	0.11	0.39	...
2	1.35	64.4	22	13.6	franco arenoso	7.96	1.38	17.86	228	4.52	10.4	8.74	1.12	0.13	0.41	...
3	1.17	62.4	24	13.6	franco arenoso	7.99	1.21	19.8	258	3.6	9.68	8.12	1.1	0.06	0.4	...
4	1.27	66.4	20.4	13.2	franco arenoso	7.97	1.38	17.4	228	2.93	8.83	7.55	0.83	0.11	0.34	...

Fuente: Laboratorio de Suelos - UNALM – 2018

Anexo 3: Evaluación de las propiedades físicas del suelo (humedad volumétrica a capacidad de campo y densidad aparente).

En el área de investigación se inundó dos áreas de (1.2x1m²) y se cubrió con plástico durante 72 horas, luego se realizó la calicata de 0.5 m de profundidad para la obtención de muestras de suelo en un cilindro muestreador (a) y luego en los niveles de 0, 0.10, 0.25 y 0.40 m.



Muestras de suelo (b) obtenidas del perfil del suelo de la calicata “1” que fueron pesadas y luego llevadas al horno.



Anexo 4: Calculo de humedad gravimétrica

Se realizó la extracción de muestras de suelo húmedo (a) todos los días a primeras horas de la mañana; con el uso del tornillo muestrador y bolsas plásticas codificadas.



Fueron llevadas a laboratorio (b) y se procedió a pesar, secar en un horno microondas (Modelo CQ1570, Samsung, Tailandia) durante 25 minutos para obtener (Wss) peso de suelo seco de las 15 muestras. Se calculó la humedad gravimétrica en (%) de todas las parcelas extraídas.



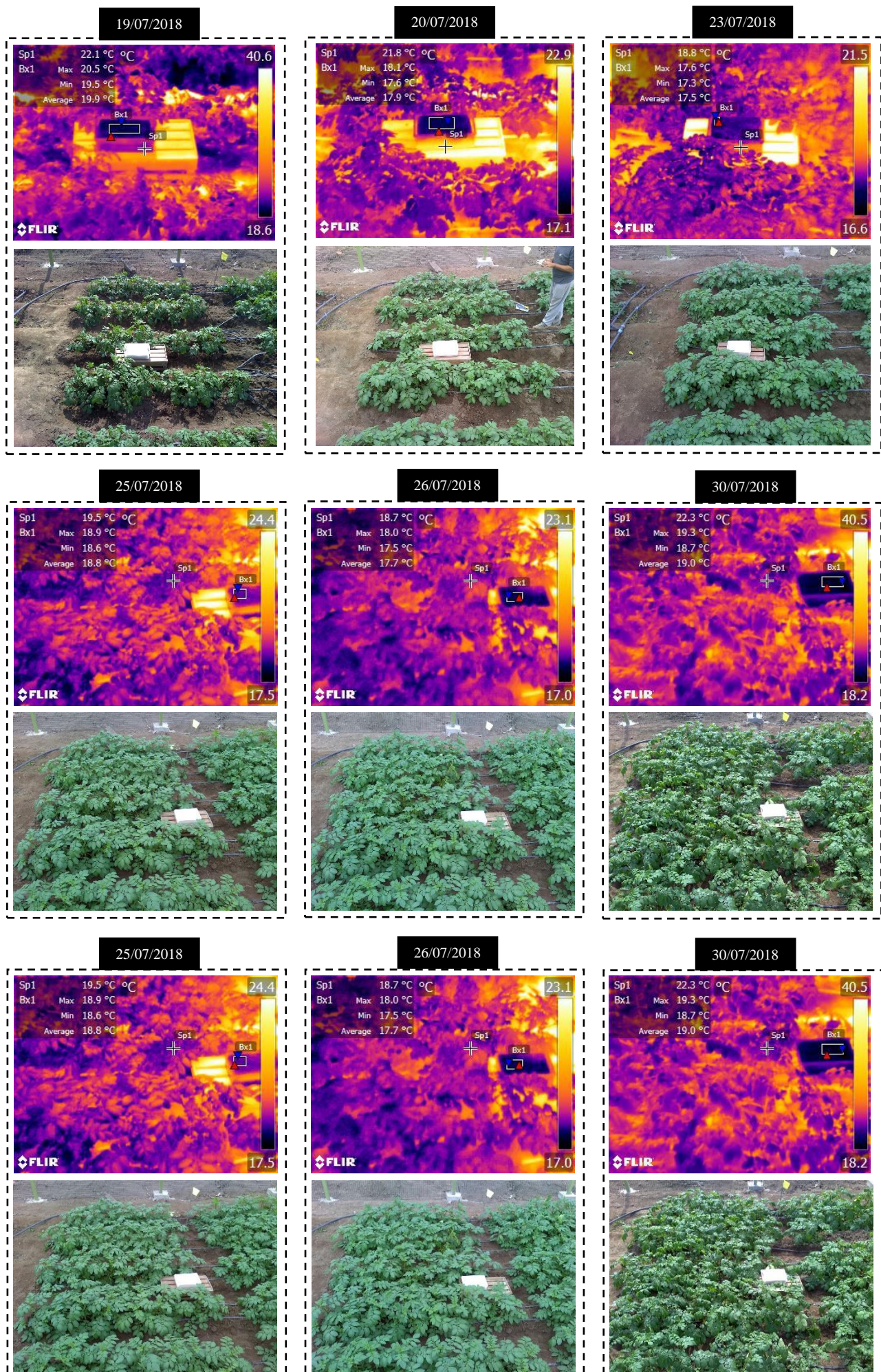
Con la finalidad de obtener el contenido de humedad volumétrica (%), volumen de agua en (m^3), tiempo de riego y lámina de riego.

Anexo 5: Características técnicas de la cámara térmica (FLIR, E60) y del termómetro infrarrojo (CEM DT-8865) usado en los 2 experimentos realizados.

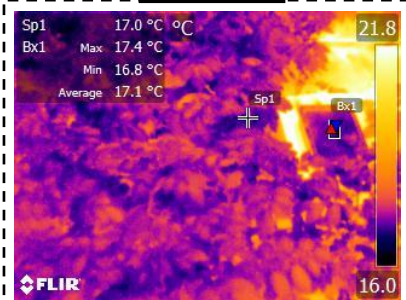


CARACTERISTICAS TECNICAS	FLIR E60
RESOLUCIÓN DE IR	320 x 240 pixeles
SENSIBILIDAD TÉRMICA	< 0.05°C a +30°C / 50 mK
CAMPO DE VISIÓN	25° x 19°
DISTANCIA MÍNIMA DE ENFOQUE	0.4 m
TIEMPO DE RESPUESTA	60 Hz de frecuencia de imagen
TIPO DE DETECTOR	Microbolómetro no refrigerado
RANGO ESPECTRAL	7.5 - 13µm
RANGO DE TEMPERATURA DE OBJETOS	-20°C a +120°C
PRECISIÓN	±2°C o ±2% de lectura para temperatura ambiente
CORRECCIÓN DE EMISIVIDAD	Corrección de emisividad
CORRECCIONES DE MEDICIÓN	Temperatura reflejada, transmisión de la óptica
CÁMARA DIGITAL INTEGRADA	3.1 Mpixeles / lente de 53°
TIPO DE LASER	Diodo láser semiconductor de AlGainP
BATERÍA	Recargable de ion litio, 4 hora de duración
RANGO DE TEMPERATURA / HUMEDAD DE FUNCIONAMIENTO	-15°C a +50°C / IEC 60068-2-30/24 h 95%, +25°C a +40°C / 2 ciclos
RANGO DE TEMPERATURA / HUMEDAD DE ALMACENAMIENTO	-40°C a +70°C / IEC 60068-2-30/24 h 95%, +25°C a +40°C
PESO CON BATERÍA	0.825 kg
DIMENSIONES (LONGITUD X ANCHO X ALTO)	246 × 97 × 184 mm

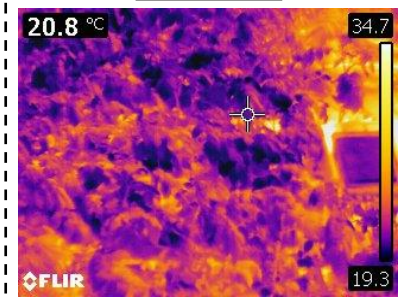
Anexo 6: Secuencia de imágenes térmicas y RGB de la sub-parcela C6, del tratamiento T2 del Bloque I, a partir de los 36 DAP hasta la senescencia.



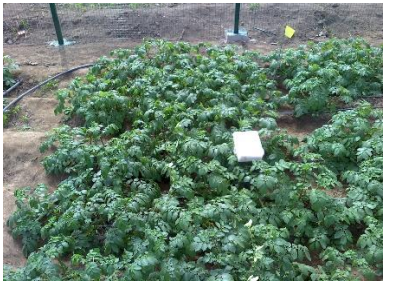
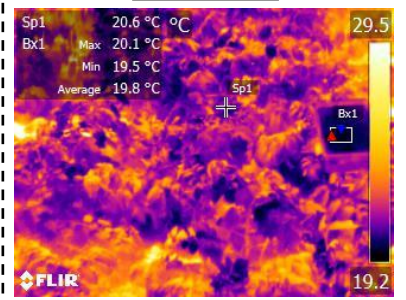
31/07/2018



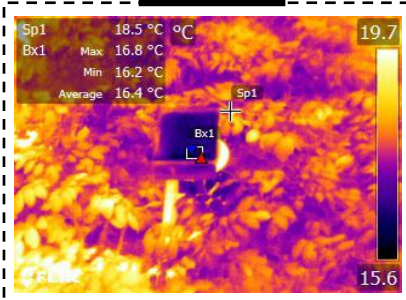
01/08/2018



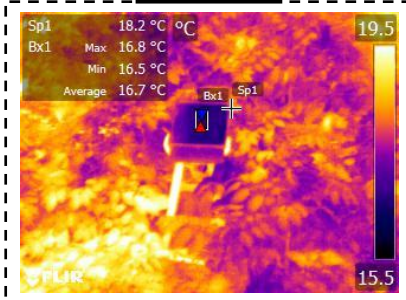
02/08/2018



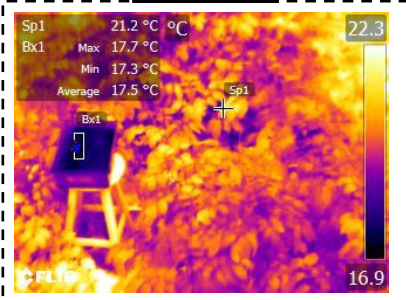
07/08/2018



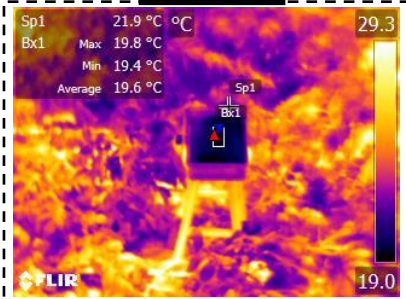
10/08/2018



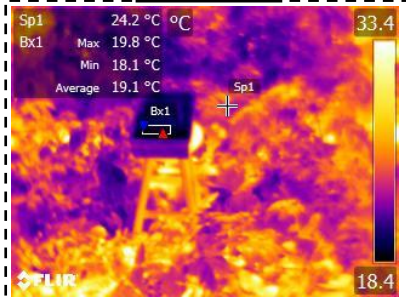
13/08/2018



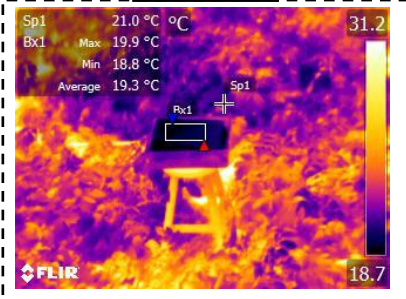
15/08/2018

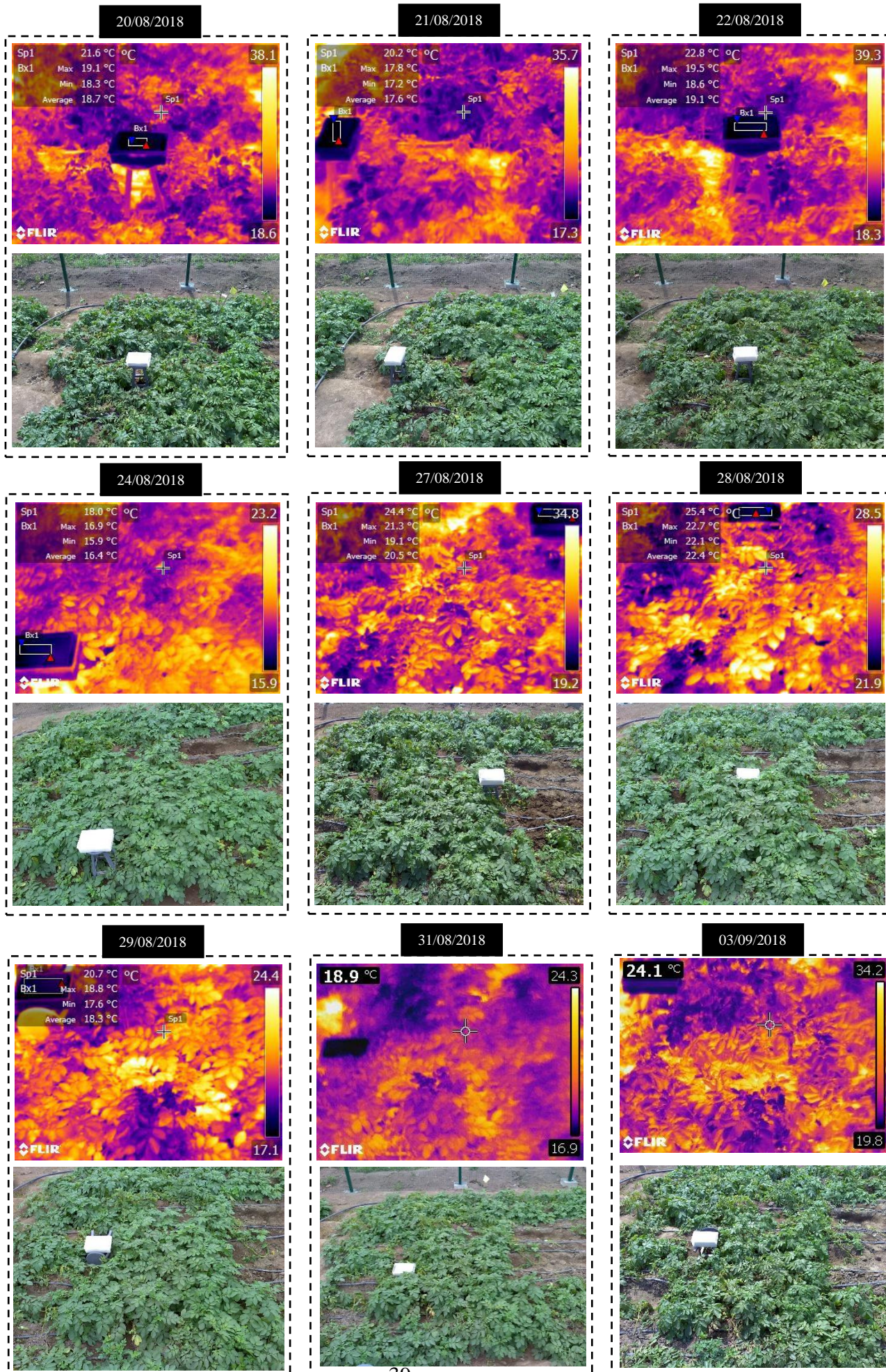


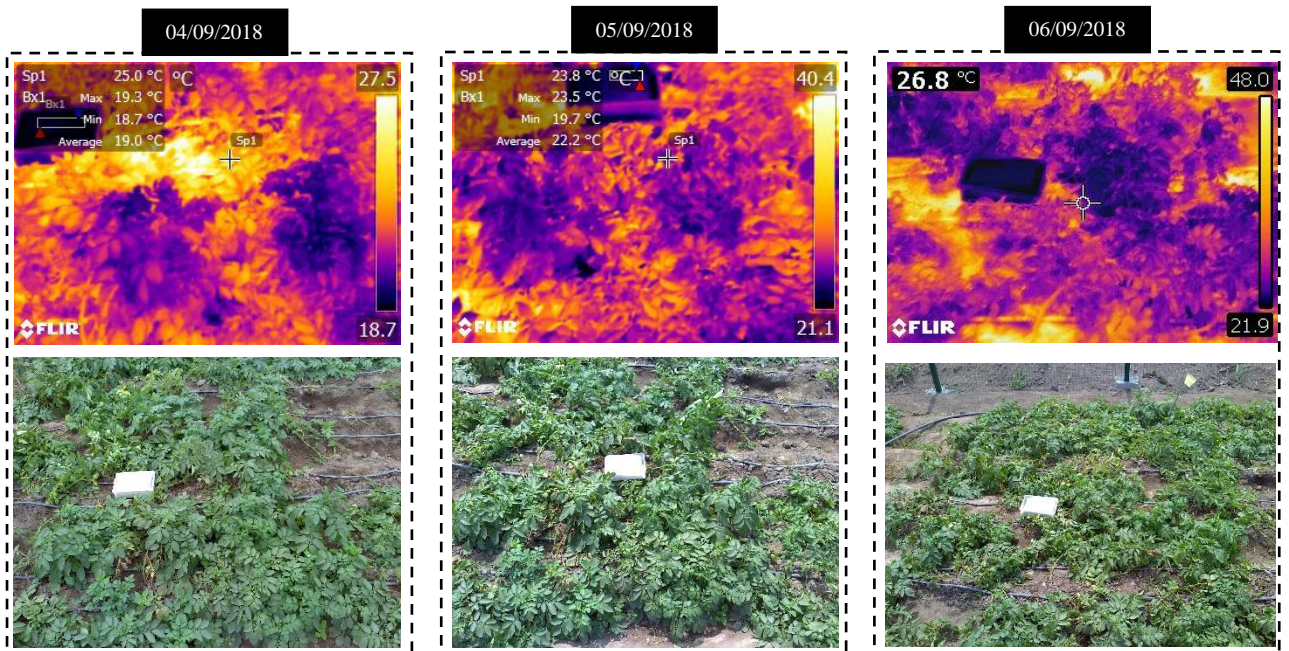
16/08/2018



17/08/2018

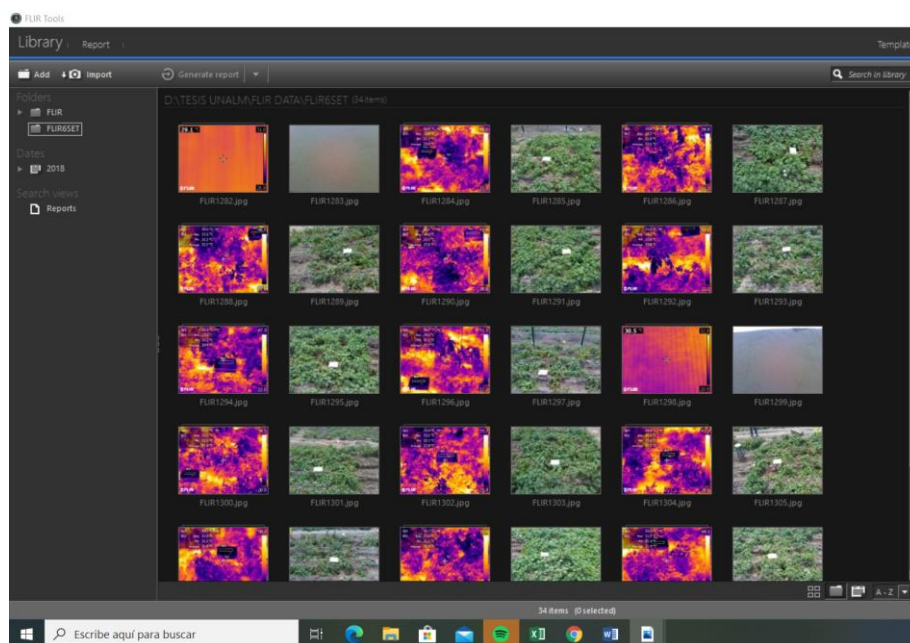






De la misma forma se registró las imágenes de todas las subparcelas C6, bajo tratamientos de T1, T2 y T3. Luego se procesó mediante el software FLIR E60 para determinar la temperatura promedio de la cobertura vegetal y la superficie de referencia.

Se muestra a continuación la página principal de del software FLIR Tools, en el cual se observan las imágenes capturadas de campo.



Los valores de temperatura obtenidos de cada imagen térmica, se registran en una hoja Excel teniendo en cuenta el número o codificación y la hora de captura de la imagen, estos datos se generan automáticamente en la memoria de la cámara durante su uso.

Anexo 7. Resultados del cálculo de la Humedad Gravimétrica Pw (%), durante el periodo vegetativo del cultivo.

Fecha	DAP	Pw (%)			Pwg (%)		
		T1	T2	T3	ET1	ET2	ET4
21-Jun	8	18.20	18.26	18.65	0.55	0.45	0.55
26-Jun	13	16.66	16.57	16.80	0.40	0.59	0.30
3-Jul	20	15.16	15.31	15.52	0.34	0.67	0.25
10-Jul	27	13.20	13.49	13.81	0.42	0.56	0.41
13-Jul	30	16.16	16.50	16.26	0.18	0.38	0.25
16-Jul	33	14.08	14.29	14.15	0.25	0.31	0.16
19-Jul	36	16.06	15.62	15.98	0.57	0.64	0.29
23-Jul	40	16.17	15.63	16.44	0.34	0.32	0.39
26-Jul	43	16.05	14.89	14.87	0.36	0.34	0.31
30-Jul	47	16.28	13.48	13.79	0.27	0.66	0.31
31-Jul	48	15.84	12.83	12.76	0.43	0.44	0.29
1-Ago	49	16.00	12.26	12.38	0.41	0.41	0.55
6-Ago	54	15.44	10.13	10.12	0.13	0.60	0.24
8-Ago	56	16.93	10.15	10.53	0.33	0.24	0.22
10-Ago	58	15.70	11.88	10.03	0.41	1.07	0.37
13-Ago	61	15.64	9.61	9.37	0.48	0.35	0.17
14-Ago	62	14.91	14.82	9.45	0.20	0.27	0.15
15-Ago	63	17.41	13.98	8.79	0.43	0.40	0.18
16-Ago	64	15.45	15.29	14.96	0.44	0.43	0.65
17-Ago	65	16.93	15.74	15.71	0.50	0.21	0.48
20-Ago	68	14.34	14.73	13.72	0.27	0.29	0.30
21-Ago	69	16.39	15.97	12.51	0.34	0.37	0.28
22-Ago	70	15.63	15.84	12.44	0.26	0.24	0.19
23-Ago	71	14.73	14.77	12.40	0.44	0.18	0.31
24-Ago	72	15.11	15.12	11.88	0.21	0.28	0.25
27-Ago	75	14.22	12.96	10.45	0.25	0.31	0.26
28-Ago	76	16.19	15.93	10.04	0.37	0.31	0.37
29-Ago	77	14.80	14.91	9.81	0.35	0.31	0.35
31-Ago	79	15.32	13.04	9.43	0.37	0.45	0.25
3-Set	82	13.99	12.70	8.37	0.27	0.60	0.21
5-Set	84	14.86	14.54	7.81	0.37	0.27	0.40
7-Set	86	14.63	13.43	7.52	0.26	0.39	0.25
10-Set	89	13.19	10.82	7.54	0.32	0.26	0.26
12-Set	91	14.84	10.14	7.12	0.20	0.43	0.30

*El recojo de muestras de suelo por cada parcela se desarrolló desde el 21 de junio, 8 días después de la siembra, hasta el 12 de setiembre a finales de la etapa de la senescencia del cultivo de la papa ÚNICA.

Anexo 8: Cálculos de CWSI, desde los 36 DAP.

DESCRIPCIÓN			
Tf (°C)	Temperatura del follaje	Rs(W/m²)	Radiación solar
Tsh (°C)	Temperatura de superficie húmeda	PP	Precipitación
Ta (°C)	Temperatura ambiente	VV (m/s)	Velocidad de Viento
HR (%)	Humedad Relativa	Dir	Dirección del viento
VPD (kPa)	Déficit de presión de vapor	Dt	Diferencia de temperatura
PAR (uE)	Radiación PAR	CWSI	Coefficiente del Índice de estrés hídrico

01_19/07/2018_13:20pm																dT	7
# Parc	Tratamiento	Número de foto	Hora	Tf (°C)	Tsh (°C)	Ta (°C)	HR (%)	es (kPa)	VPD (kPa)	PAR (uE)	Rs (W/m ²)	PP	VV (m/s)	Dir	Tc-Ta (°C)	CWSI	
1	T2	9992	13:24	23.8	19.9	20.8	71.1	2.5	0.71	1398.7	595.6	0	3.27	73	3.0	0.497	
2	T1	9994	13:27	23.5	20.6	20.8	71.7	2.5	0.69	1398.7	595.6	0	3.27	73	2.7	0.409	
3	T3	9996	13:31	25.3	19.9	21.0	71.7	2.5	0.70	1378.7	584.4	0	3.27	80	4.4	0.674	
4	T2	9998	13:36	23.7	19.3	21.2	72.2	2.5	0.70	1366.2	583.1	0	3.27	81.4	2.5	0.492	
5	T3	0	13:39	25.2	20.1	20.7	71.9	2.4	0.69	1366.2	573.1	0	3.53	85.6	4.5	0.666	
6	T1	2	13:43	24.4	19.6	20.7	72.4	2.4	0.68	1348.7	574.4	0	3.53	81.4	3.6	0.586	
7	T3	4	13:52	25.2	21.4	21.1	71.8	2.5	0.71	1328.7	555.6	0	3.02	75.8	4.0	0.559	
8	T2	8	13:57	21.5	19.3	20.7	72.3	2.4	0.68	1316.2	558.1	0	3.78	78.6	0.7	0.257	
9	T1	10	14:00	22.6	19.6	20.4	73.1	2.4	0.64	1318.7	551.9	0	3.53	74.4	2.2	0.383	
10	T2	12	14:04	22.6	19.8	20.4	73.1	2.4	0.64	1301.2	545.6	0	3.53	75.8	2.2	0.370	
11	T3	14	14:06	22.9	20.3	20.4	73.1	2.4	0.64	1301.2	545.6	0	3.53	75.8	2.5	0.371	
12	T1	16	14:08	22.9	19.7	20.2	74.0	2.4	0.62	1286.2	541.9	0	3.53	74.4	2.7	0.433	
13	T2	18	14:10	22.6	19.4	20.2	74.0	2.4	0.62	1286.2	541.9	0	3.53	74.4	2.4	0.414	
14	T1	20	14:13	24.0	19.9	19.9	74.7	2.3	0.59	1258.7	534.4	0	3.78	77.2	4.1	0.591	
15	T3	22	14:16	21.7	19.2	19.9	74.7	2.3	0.59	1258.7	534.4	0	3.78	77.2	1.9	0.331	

De la misma forma se realizó hasta el día 04/09/2018, teniendo un total de 25 de las imágenes termografías.

Drip Irrigation			
Variable	T1	T2	T3
Tf (°C)	23.5	22.8	24.1
Tf - Ta (°C)	3.1	2.2	3.5
SUM(Tf-Ta)	15.5	10.9	17.3
CWSI	0.480	0.406	0.520
eCWSI	0.045	0.044	0.072
	PROMEDIO	e	
DT	2.91	0.27	
Ta	20.6	0.10	
HR	72.8	0.29	
VPD	0.66	0.01	



*De la misma forma se desarrolló el cálculo del CWSI desde el 19 de Julio al 4 de setiembre del 2018.

Para los 25 días posteriores, se muestra a continuación el cuadro resumen de resultados del índice de estrés hídrico (CWSI). Los valores finales de CWSI, representan el promedio por cada tratamiento (T1, T2 y T3)

N	Fecha	DAP	DDT	T1	T2	T3
1	19/07/2018	36	0	0.480	0.406	0.520
2	20/07/2018	37	1	0.284	0.238	0.282
3	23/07/2018	40	4	0.183	0.159	0.170
4	24/07/2018	41	5	0.138	0.127	0.142
5	25/07/2018	42	6	0.157	0.133	0.162
6	26/07/2018	43	7	0.190	0.170	0.197
7	27/07/2018	44	8	0.140	0.119	0.123
8	30/07/2018	47	11	0.371	0.406	0.330
9	31/07/2018	48	12	0.176	0.163	0.209
10	1/08/2018	49	13	0.288	0.365	0.439
11	2/08/2018	50	14	0.247	0.338	0.385
12	7/08/2018	55	19	0.182	0.243	0.259
13	10/08/2018	58	22	0.174	0.247	0.267
14	13/08/2018	61	25	0.244	0.432	0.461
15	15/08/2018	63	27	0.462	0.600	0.711
16	16/08/2018	64	28	0.524	0.585	0.630
17	17/08/2018	65	29	0.429	0.607	0.601
18	20/08/2018	68	32	0.594	0.734	0.655
19	21/08/2018	69	33	0.428	0.591	0.602
20	24/08/2018	72	34	0.270	0.365	0.431
21	27/08/2018	75	37	0.516	0.688	0.899
22	29/08/2018	77	39	0.288	0.380	0.608
23	31/08/2018	79	41	0.337	0.422	0.654
24	3/09/2018	82	44	0.521	0.689	1.012
25	4/09/2018	83	45	0.324	0.494	0.837



- El 15 de agosto del 2018, se registró un Coeficiente del Índice de estrés hídrico para el T2 = 0.600 y T3 = 0.711, en condiciones de brillo solar a partir de las 8: 00 horas hasta las 17: 00 horas con humedad relativa de 72% y temperatura de 20 °C. Llegando a cumplir los umbrales planteados en los objetivos del trabajo de investigación.

Anexo 9: Cálculos para la definición de la programación de riego en los T1, T2 y T3.
Según la formula (2).

23 de julio				Variedad: ÚNICA		Experimento PNIA jun-oct-2018				Siembra: 13 de jun				
Muestreo de suelo				8	da (g/c M)		1.56		θ_{cc} (%)	31.19	P_w	20.29	Prof. Raíz	0.25
# Parc	Tratamiento	Psh+pirex (g)	Pss+pirex (g)	# pirex	P_pirex (g)	Psh (g)	Pss (g)	P_w (%)	θ_{cc} (%)	Hv va a subir	Vol surco (L)	Vol Parc (cm ³)	Tiempo de riego (min)	Lamina de riego (mm)
P1	T2	270.28	237.1	1	36.2	234.08	200.9	16.5	25.8	5.4	85.9	0.43	21	13.6
P2	T1	263.46	231.36	2	41.3	222.16	190.06	16.9	26.3	4.9	76.7	0.38	19	12.1
P3	T3	246.64	216.31	3	39.3	207.34	177.01	17.1	26.7	4.5	70.6	0.35	17	11.2
P4	T2	249.21	222.02	4	42.2	207.01	179.82	15.1	23.6	7.6	120.3	0.60	30	19.0
P5	T3	257.02	227.54	5	40.5	216.52	187.04	15.8	24.6	6.6	104.5	0.52	26	16.5
P6	T1	265.83	234.31	6	39.3	226.53	195.01	16.2	25.2	6.0	94.6	0.47	23	15.0
P7	T3	278.59	245.33	7	39.6	238.99	205.73	16.2	25.2	6.0	94.5	0.47	23	15.0
P8	T2	259.35	231.29	8	40.6	218.75	190.69	14.7	22.9	8.2	130.3	0.65	32	20.6
P9	T1	240.34	214	9	37.5	202.84	176.5	14.9	23.3	7.9	125.1	0.63	31	19.8
P10	T2	239.67	211.86	10	36.8	202.87	175.06	15.9	24.8	6.4	101.4	0.51	25	16.0
P11	T3	252.8	220.54	11	36.7	216.1	183.84	17.5	27.4	3.8	60.5	0.30	15	9.6
P12	T1	244.12	215.12	12	40	204.12	175.12	16.6	25.8	5.4	84.8	0.42	21	13.4
P13	T2	258.6	228.64	13	40.1	218.5	188.54	15.9	24.8	6.4	101.3	0.51	25	16.0
P14	T1	248.79	219.58	14	40.8	207.99	178.78	16.3	25.5	5.7	90.3	0.45	22	14.3
P15	T3	242.48	215.02	15	38.9	203.58	176.12	15.6	24.3	6.9	108.7	0.54	27	17.2
PROMEDIO													24	

variable	T1	T2	T3
P_w (%)	16.17	15.63	16.44
θ_{cc} (%)	25.22	24.36	25.63
LR	14.9	17.1	13.9
VR(cm ³)	0.47	0.54	0.44

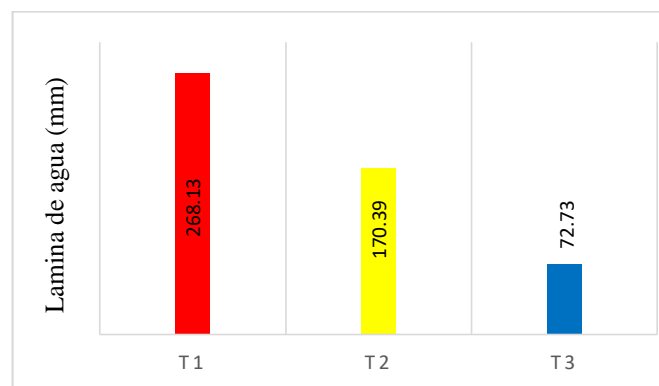
* Se obtiene una lámina de riego promedio de 5 parcelas por cada tratamiento; T1=14.9, T2=17.1 y T3=13.9

* Según los resultados del CWSI, se tiene que regar el T1 pero solo en 4 parcelas correspondiente a P6-T1, P9-T1, P12-T1 y P14-T1 teniendo un promedio de Lámina de riego =12.49 mm. Entonces se aplicó según tiempo y lamina de riego correspondiente a las parcelas P6, P9, P12 y P14.

A continuación se muestran los resultados de la lámina de agua promedio en (mm) por cada tratamiento durante 25 días.

N	Fecha	DAP	DDT	LT1	LT2	LT3
1	19/07/2018	36	0	0.0	0.0	0.0
2	20/07/2018	37	1	14.1	14.5	15.7
3	23/07/2018	40	4	12.5	0.0	0.0
4	24/07/2018	41	5	0.0	0.0	0.0
5	25/07/2018	42	6	0.0	0.0	0.0
6	26/07/2018	43	7	13.3	0.0	0.0
7	27/07/2018	44	8	0.0	0.0	0.0
8	30/07/2018	47	11	0.0	0.0	0.0
9	31/07/2018	48	12	14.1	0.0	0.0
10	1/08/2018	49	13	13.5	0.0	0.0
11	2/08/2018	50	14	0.0	0.0	0.0
12	7/08/2018	55	19	0.0	0.0	0.0
13	10/08/2018	58	22	14.5	0.0	0.0
14	13/08/2018	61	25	0.0	42.1	0.0
15	15/08/2018	63	27	0.0	15.6	37.2
16	16/08/2018	64	28	7.9	10.1	11.5
17	17/08/2018	65	29	6.2	8.2	8.4
18	20/08/2018	68	32	14.0	12.4	0.0
19	21/08/2018	69	33	6.7	7.3	0.0
20	24/08/2018	72	34	10.8	0.0	0.0
21	27/08/2018	75	37	14.5	19.8	0.0
22	29/08/2018	77	39	12.2	0.0	0.0
23	31/08/2018	79	41	10.0	19.5	0.0
24	3/09/2018	82	44	15.5	20.9	0.0
25	4/09/2018	83	45	0.0	0.0	0.0

A partir de los 36 DAP, la cantidad de agua que se aplicó para el riego de los tratamientos T1, T2 y T3 respectivamente, fue de 268.13 mm, 170.39 mm y 72.73 mm respecto al monitoreo del CWSI.



Anexo 10: Proceso de las actividades desarrolladas en el campo experimental CIER de la UNALM, durante el trabajo de investigación realizado el año 2018.

- Surcado y siembra del cultivo de la papa.



- Monitoreo de la emergencia del cultivo a los 12 DAP.



- Limpieza de malezas, aporque y riego.



- Control del inicio de tuberización a los 31 DAP



- Cultivo de papa ÚNICA, a los 36 DAP.



- Control del brote floral a los 34 DAP.



- Muestras en laboratorio para su pesado y secado.



- Toma de imágenes con la cámara térmica FLIR E60.



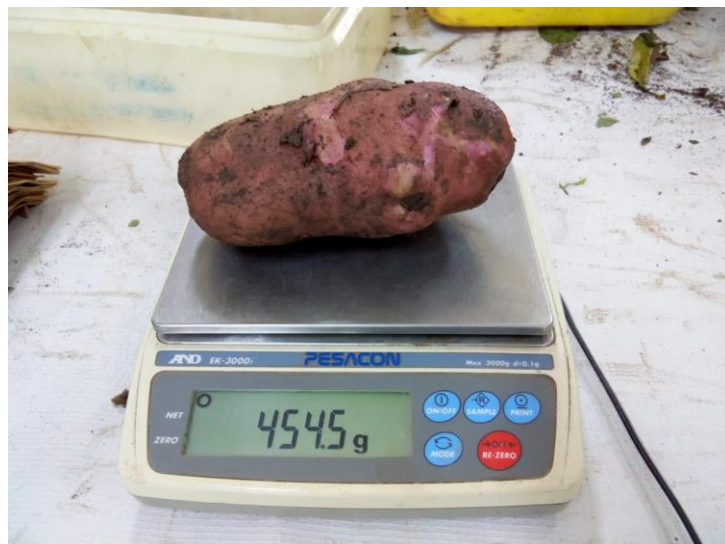
- Etapa de senescencia a los 61 DAP, del cultivo de papa ÚNICA



- Cosecha y selección de la papa ÚNICA, por cada parcela.



- Tubérculo con mayor peso de la cosecha, del tratamiento T1.



- Visita y coordinación del Rector, con el equipo de investigación UNALM - CIP.



- Equipo de investigación de la UNALM – CIP, en el campo experimental 2018.

