

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“CARACTERIZACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL  
CULTIVO DE ARROZ MEDIANTE EL USO DE SENSORES  
TÉRMICOS Y DE HUMEDAD DEL SUELO EN LA MOLINA, LIMA -  
PERU”**

**Presentado por:**

**BACH. MOISÉS RODRIGO DURÁN GÓMEZ**

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

**Lima – Perú  
2018**

## **Dedicatoria**

A cada miembro de mi familia, por su apoyo incondicional, los quiero.

## **Agradecimiento**

A la Universidad Nacional Agraria La Molina por los años que me albergó y a la

Facultad de Ingeniería Agrícola por la formación brindada.

Al proyecto "Uso de sensores remotos para determinar el índice de estrés hídrico en el mejoramiento del manejo de riego de Arroz (*Oryza sativa* L.) en zonas áridas, para enfrentar al cambio climático" del PNIA y al Área Experimental de Riego por el apoyo en la realización de las observaciones de mi experiencia.

A mis amistades.

Y al incondicional apoyo de mi asesora, la Dra. Lía Ramos, su fuerza y entusiasmo que me empujó a la conclusión de la tesis.

# ÍNDICE GENERAL

## RESUMEN

## ABSTRACT

<b>I.</b>	<b>INTRODUCCION.....</b>	<b>1</b>
<b>II.</b>	<b>REVISIÓN DE LA LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1.	CULTIVO DE ARROZ.....	3
2.2.	ESTRÉS ABIÓTICO.....	3
2.2.1.	Estrés hídrico foliar.....	4
2.2.2.	Estrés hídrico del suelo.....	4
2.2.3.	Estrés térmico.....	5
2.3.	ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO FOLIAR (CWSI).....	9
2.4.	SENSORES TÉRMICOS.....	10
2.5.	PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TÉRMICAS.....	12
2.5.1.	Método de temperaturas umbrales (temperaturas húmeda y seca del cultivo) ...	13
2.5.2.	Método de superposición de imágenes.....	15
<b>III.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>19</b>
3.1.	ZONA DE ESTUDIO.....	19
3.2.	MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES....	19
3.3.	PROCEDIMIENTO.....	22
3.3.1.	Caracterización de las temperaturas húmeda y seca por fase fenológica.....	27
3.3.2.	Obtención del CWSI a partir de la temperatura foliar.....	27
3.3.3.	Correlación del CWSI y la humedad volumétrica del suelo.....	31
<b>IV.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>39</b>
4.1.	CARACTERIZACIÓN DE LAS TEMPERATURAS UMBRALES POR FASE FENOLÓGICA.....	39
4.2.	OBTENCIÓN DEL CWSI A PARTIR DE TEMPERATURAS FOLIARES ...	46

4.3. CORRELACIÓN DEL CWSI Y LA HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO.....	51
<b>V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>60</b>
<b>VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>61</b>
<b>VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>62</b>
<b>VIII. ANEXOS .....</b>	<b>67</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1: Índices térmicos derivados de la termografía más usados en la monitorización del estrés hídrico foliar de los cultivos.....	10
Cuadro 2: Materiales, equipos y herramientas computacionales.....	20
Cuadro 3: Duración de las fases fenológicas del cultivo de arroz, variedad IR 43. ....	22
Cuadro 4: Temperaturas umbrales para cada fase fenológica del cultivo.....	45

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Variación del coeficiente de estrés hídrico del suelo ( $K_s$ ).....	5
Figura 2: Espectro electromagnético y las longitudes de onda en cada rango .....	11
Figura 3: Energía emitida y reflejada de una superficie objetivo medida con una cámara térmica.....	12
Figura 4: Relación del índice de estrés hídrico foliar estimado a partir de la razón de $(T_x - T_{nws}) / (T_{max} - T_{nws})$ y el correspondiente valor de déficit de presión de vapor.....	13
Figura 5: Diagrama secuencial del método de superposición de imágenes térmicas y ópticas .....	16
Figura 6: Variación de la reflectancia del espectro electromagnético, siendo el Índice de verdor triangular (TGI) el área del triángulo de reflectancia .....	17
Figura 7: Diagrama secuencial del requerimiento hídrico del cultivo y programación de riego .....	18
Figura 8: Ubicación de la parcela experimental (AER).....	19
Figura 9: Clasificación por periodo y fase fenológica del cultivo de arroz .....	21
Figura 10: Diagrama general de actividades acorde a los objetivos específicos.....	24
Figura 11: Distribución de cuatro parcelas de evaluación, sistema de STT y sensores de humedad (FDR) en el área experimental .....	25
Figura 12: Detalle de distribución de los STT: (a) llegada de manguera protectora con seis filamentos de STT, (b) conexión de filamentos de STT al envés de la hoja de arroz .....	26
Figura 13: Procedimiento secuencial para uso y procesamiento de imágenes térmicas con una cámara FLIR E60.....	29
Figura 14: Parámetros requeridos en la calibración de imágenes térmicas empleando el software FLIR Tools.....	30
Figura 15: Diagrama de flujo de estimación del CWSI empleando temperaturas umbrales y variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura del aire y temperaturas de bulbo seco y húmedo), estimadas mediante la ecuación psicrométrica propuesta por Pinazo (1995).....	32
Figura 16: Diagrama de flujo de estimación del CWSI empleando temperaturas umbrales húmeda y seca del cultivo .....	33
Figura 17: Diagrama de flujo de estimación del CWSI empleando la superposición de imágenes térmicas y ópticas .....	34

Figura 18: Imágenes térmicas antes del procesamiento (panel izquierdo) y después del procesamiento (panel derecho) por el método de temperaturas umbrales, en la parcela de evaluación IV, obtenidas el 18 de marzo y 25 de mayo .....	35
Figura 19: Imagen multispectral del cultivo: banda roja (R), banda verde (V) y banda azul (A) y máscara de cobertura vegetal (z) obtenida de la fórmula $z=V-0.39R-0.61A$ , propuesta por McKinnon and Hoff (2017), en la parcela de evaluación I, en la fase vegetativa, el 14 de marzo.....	36
Figura 20: Variación cincominutal de la temperatura foliar estimadas por los STT (líneas de color verde) y temperatura del aire (línea roja), del 20 de mayo al 02 de agosto del 2017. Antes del 20 de mayo no se dispuso de los STT.....	40
Figura 21: Variación cincominutal de la humedad relativa del aire estimado por sensor digital de humedad y temperatura del aire instalado en campo, del 20 de mayo al 02 de agosto del 2017.....	41
Figura 22: Comportamiento promedio horario de la temperatura del aire (a) en la fase reproductiva (panel superior) y (b) en la fase de maduración (panel inferior).....	42
Figura 23: Comportamiento promedio horario de la humedad relativa del aire (a) en la fase reproductiva (panel superior) y (b) en la fase de maduración de grano (panel inferior).....	43
Figura 24: Variación horaria de la temperatura promedio foliar (a) en la fase reproductiva (panel superior) y (b) fase de maduración (panel inferior).....	44
Figura 25: Variación del índice de estrés hídrico foliar (a) en la fase reproductiva (panel superior) y (b) en la fase de maduración (panel inferior).....	45
Figura 26: Correlación el CWSI estimados por los STT y el CWSI estimado por el método de temperaturas umbrales en las fases fenológicas reproductiva y de maduración.....	47
Figura 27: Correlación entre el CWSI estimado por los métodos de temperaturas umbrales y superposición de imágenes, en la fase fenológica vegetativa.....	48
Figura 28: Variación del índice de estrés de hídrico del (a) en la fase vegetativa (panel superior), (b) la fase reproductiva (panel medio) y (c) la fase de maduración (panel inferior).....	49
Figura 29: Valores de índice de estrés hídrico foliar estimados por el método de superposición de imágenes en la fase vegetativa.....	50
Figura 30: Registro de humedad volumétrica del suelo cada media hora de cinco sensores (FDR) ubicados en las parcelas de evaluación.....	52

Figura 31: Correlación entre valores de CWSI medidos por los STT e imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo para la fase fenológica reproductiva...	53
Figura 32: Variación diaria de la humedad volumétrica del suelo e índice de estrés hídrico foliar a 15 cm de profundidad.....	54
Figura 33: Variación diaria de la humedad volumétrica del suelo e índice de estrés hídrico foliar a 30 cm de profundidad.....	55
Figura 34: Comparación visual de condición del cultivo para diferentes valores de índice de estrés hídrico foliar (CWSI). .....	58
Figura 35: Correlación de valores de CWSI estimados por el método de umbrales de temperatura de referencia empleando variables meteorológicas, seis rangos evaluados en la totalidad de imágenes térmicas, y valores de humedad volumétrica de suelo.....	59

## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: EQUIPOS Y SENSORES.....	67
ANEXO 2: DIAGRAMA SECUENCIAL PARA EL ENSAMBLAJE, INSTALACIÓN Y DESCARGA DE INFORMACIÓN DE TEMPERATURAS DE LOS STT Y SENSOR DIGITAL (TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE) .....	69
ANEXO 3: DIAGRAMA SECUENCIAL DE LA INSTALACIÓN Y DESCARGA DE DATOS DE LOS SENSORES DE HUMEDAD (FDR) EN EL CAMPO.....	70
ANEXO 4: DIAGRAMA SECUENCIAL DEL USO Y PROCESAMIENTO INICIAL DE IMÁGENES TÉRMICAS .....	71
ANEXO 5: PANEL FOTOGRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DEL CULTIVO DESDE LA EMERGENCIA.....	72
ANEXO 6: IMÁGENES TÉRMICAS Y ÓPTICAS DE UNA PARCELA DE EVALUACIÓN EN TRES HORARIOS DISTINTOS EL 05 DE ABRIL DEL 2017, INDICANDO VALORES DE CWSI ESTIMADOS PARA CADA IMAGEN TÉRMICA POR EL MÉTODO POR USO DE UMBRALES DE TEMPERATURA DE REFERENCIA.....	75
ANEXO 7: PRUEBA T DE STUDENT PARA MEDIAS DE DOS MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE TEMPERATURAS ESTIMADAS POR EL MÉTODO DE TEMPERATURAS UMBRALES Y LOS STT EN LA FASE REPRODUCTIVA (CUADRO SUPERIOR) Y EN LA FASE DE MADURACIÓN DE GRANO (CUADRO INFERIOR) .....	76
ANEXO 8: PRUEBA T DE STUDENT PARA MEDIAS DE DOS MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE TEMPERATURAS ESTIMADOS POR EL MÉTODO DE TEMPERATURAS UMBRALES Y EL MÉTODO DE SUPERPOSICIÓN DE IMÁGENES EN LA FASE VEGETATIVA.....	77
ANEXO 9: PRUEBA T DE STUDENT PARA MEDIAS DE DOS MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO Y VALORES DEL CWSI TRANSFORMADOS POR REGLA DE CONVERSIÓN ESTIMADA POR REGRESIÓN LINEAL EN LA FASE REPRODUCTIVA, MEDICIONES REALIZADAS A 30 CM DE PROFUNDIDAD EN LAS PARCELAS DE EVALUACIÓN III (CUADRO SUPERIOR) Y IV (CUADRO INFERIOR).....	78

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

Acrónimo	
ADRD	Área demostrativa de riego y drenaje
ADT	Agua disponible total
AFA	Agua fácilmente aprovechable
a1	Factor psicrométrico
C(FL)	Valores de color de la imagen <i>FL</i> en el espacio de color HSV
CWSI	Crop water stress index (índice de estrés hídrico foliar)
Dr	Agotamiento de zona radicular
ETc	Evapotranspiración del cultivo
FDR	Frequency domain reflectometry (reflectometría de dominio de frecuencia)
FIR	Imagen infrarroja que contiene Fo
HSP	Heat-shock proteins (Proteínas de choque térmico)
HSV	Hue, saturation and value (tono, saturación y valor)
Kc	Coefficiente del cultivo
Ks	Coefficiente de estrés hídrico del suelo
NDVI	Normalized difference vegetation index (Índice de vegetación de diferencia normalizada)
NWSB	Non-water stress baseline (línea base sin estrés hídrico)
P	Presión atmosférica
Pv	Presión o tensión de vapor
Pvs,bh	Presión de vapor de saturación a la temperatura de bulbo húmedo
RFA	Radiación fotosintéticamente activa
ROS	Reactive oxygen species (Especies de oxígeno reactivas)
SDD	Grado de estrés del día
STT	Sensor(es) térmico(s) de termocupla(s)
T	Distribución de temperaturas de la escena de una imagen
Tbh	Temperatura de bulbo húmedo
Tc	Temperatura promedio de la hoja del cultivo (foliar)

$T_d$	Temperatura seca de referencia de la hoja (sin transpiración)
TGI	Triangular greenness index (índice de verdor triangular)
$T_{nws}$	Temperatura sin estrés hídrico
$T_s$	Temperatura superficial de objetivo
$T_w$	Temperatura húmeda de referencia de la hoja (con transpiración completa)
$(T - T_{bh})$	Diferencia o depresión psicrométrica
W	Energía total emitida
WUE	Water use efficiency (Eficiencia de uso de agua)
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann
$\varepsilon$	Emisividad
$\tau$	Transmisividad
$\varepsilon \sigma \cdot (T_s)^4$	Energía emitida
$(1 - \varepsilon) \cdot W_{\text{ambiente}}$	Energía emitida atmosférica
WUE	Water use efficiency (eficiencia de uso de agua)

## RESUMEN

El acelerado crecimiento poblacional y el consiguiente aumento de la demanda de alimentos, ha acarreado en las últimas décadas a una expansión progresiva de áreas de cultivo, originando un mayor consumo de recurso hídrico en el sector agrícola. Ante este paradigma la tendencia actual se orienta a la búsqueda de nuevas tecnologías y maneras apropiadas de producir alimentos utilizando y aprovechando los recursos disponibles, pero con alto grado de eficiencia y de manera sostenible. Por ello, el presente estudio estimó el índice de estrés hídrico foliar (CWSI) a partir de imágenes térmicas del dosel obtenidas por sensores térmicos (cámara FLIR y sensores de termocuplas), con el objetivo de correlacionar con la humedad volumétrica del suelo, bajo un sistema de riego por goteo en La Molina, en la campaña agrícola de febrero a agosto del 2017. Se elaboraron algoritmos para el reconocimiento de cobertura vegetal (dosel) en el rango espectral infrarrojo térmico (TIR) y rango visible (VIS), identificándose los píxeles de puro dosel por medio de la superposición de imágenes y empleando umbrales de temperatura foliar. Además, se monitoreó la humedad volumétrica del suelo con sensores de reflectometría de dominios de frecuencia (FDR) instalados a 15 cm y 30 cm de profundidad del suelo. El CWSI se correlacionó con la temperatura foliar ( $T_{\text{foliar}}$ ) ajustada a las condiciones atmosféricas  $[T_{\text{foliar}} - T_{\text{humeda}}] / [T_{\text{seca}} - T_{\text{humeda}}]$ , donde la  $T_{\text{humeda}}$  es la temperatura de mínimo estrés hídrico (máxima transpiración sin perturbación, estomas totalmente abiertos) y  $T_{\text{seca}}$  es la temperatura de máximo estrés hídrico (hoja que no transpira, estomas cerrados). Así, se obtuvo las temperaturas umbrales húmeda y seca, con valores de 15.2°C a 33.7°C y de 15.4°C a 36°C en la fase reproductiva y de maduración respectivamente. Finalmente, se obtuvo coeficientes de correlación de Pearson entre el CWSI (variando de 0 a 1) y la humedad volumétrica del suelo, para un nivel de significancia del 5%, alcanzando valores de -0.53 a 30 cm de profundidad del suelo. Concluyéndose que el empleo del índice de estrés hídrico foliar (CWSI) es factible de emplear para la estimación de la humedad volumétrica del suelo del cultivo mediante sensores remotos.

**Palabras clave:** índice de estrés hídrico foliar, sensores térmicos, humedad de suelo, arroz

## ABSTRACT

The accelerated population growth and the increase of the demand for food, has led in the last decades to a progressive expansion of the cultivation areas, causing a greater consumption of water resources in the agricultural sector. Given this paradigm, the current trend revolves around searching for new technologies and appropriate ways to produce food using and taking advantage of available resources, but with a high degree of efficiency making it sustainable. Therefore, the present study estimated the crop water stress index (CWSI) from thermal images of the canopy obtained by thermal sensors (FLIR thermal camera and thermocouples), with the objective of correlating with the volumetric moisture of the soil, under a system of drip irrigation in La Molina, in the agricultural campaign from February to August 2017. Algorithms were developed for the alignment and calibration of the thermal images with the vegetation cover (canopy) in the thermal infrared (TIR) and visible range (VIS), reaching the pure canopy pixels by using the superposition of images method and foliar temperature thresholds method. In addition, volumetric soil moisture was monitored in real time from frequency domain reflectometry (FDR) sensors installed at 15 cm and 30 cm deep in the soil. The CWSI was correlated with leaf temperature ( $T_{leaf}$ ) adjusted to local atmospheric conditions  $[T_{leaf} - T_{wet}] / [T_{dry} - T_{wet}]$ , where  $T_{wet}$  is the minimum water stress temperature (maximum transpiration without disturbance, stomata fully open) and  $T_{dry}$  is the maximum water stress temperature (leaf that does not perspire, closed stomata). Thus, the wet and dry threshold temperatures were obtained, with values of 15.2°C to 33.7°C and 15.4°C to 36°C in the reproductive and maturation phases, respectively. Finally, CWSI values were obtained, varying from 0 to 1, and were statistically correlated with soil volumetric moisture by Pearson coefficients, for a level of 5% of significance, which reached values of -0.53 to 30 cm of soil depth. Concluding that the use of the crop water stress index (CWSI) is feasible to use for the estimation of soil moisture volume of the crop, and in the future, it will be useful for irrigation scheduling in real time employing remote sensors.

**Key words:** crop water stress index, thermal sensors, soil moisture, rice

## I. INTRODUCCION

El arroz representa uno de los cereales de mayor consumo en el mundo, sin embargo, su producción demanda grandes cantidades de agua debido al tipo de riego por inundación el cual le es característico (IRRI, 2013). Así mismo, a nivel mundial, el cultivo del arroz libera anualmente en torno a 60-100 millones de toneladas de CH<sub>4</sub>, contribuyendo sustancialmente al calentamiento global de la atmósfera. Esto supone que alrededor del 5-19% de las emisiones antropogénicas de CH<sub>4</sub> son debidas al cultivo de arroz (Aulakh *et al.* 2000, IPCC 2006, Yusuf *et al.* 2012).

Ante este problema, han surgido líneas de investigación que evalúan la respuesta del cultivo ante menores dosis de agua con la finalidad de seleccionar las semillas de mayor resistencia, aumentando la calidad genética. Por ello, diversas investigaciones han orientado el impacto del estrés hídrico en la actividad fisiológica y el crecimiento, obteniéndose que un estrés hídrico moderado pueda mejorar el rendimiento del cultivo y el uso eficiente del agua, mientras que el estrés hídrico severo afecta el crecimiento y eventualmente conlleva a una pérdida en la producción de cultivos (Turner 1986). El diagnóstico del déficit de agua en el cultivo o monitoreo del estado hídrico es la base para una apropiada programación de riego.

En suma, la necesidad de cambiar el sistema de riego se da en un contexto de aumento de escasez del agua global; convirtiéndose el déficit hídrico en el principal estrés abiótico en la producción de cultivos. (Xu *et al.* 2016)

Por otro lado, el empleo de sensores térmicos permite relacionar las condiciones térmicas del cultivo con su requerimiento hídrico mediante la estimación del índice de estrés hídrico foliar (CWSI, por sus siglas en inglés "Crop Water Stress Index"), propuesto por Idso *et al.* (1981), proporcionando información precisa del requerimiento hídrico de la planta. Además, la amplitud del uso del sensor infrarrojo térmico, aumentaría al contar con sensores remotos instalados en vehículos aéreos no tripulados y satélites que proveerían información suficiente para pasar de una escala de planta a una mayor escala.

El índice del CWSI es una razón que permite determinar el grado de estrés hídrico del cultivo en base a la temperatura foliar ( $T_{\text{foliar}}$ ) ajustada a las condiciones climatológicas locales:  $[T_{\text{foliar}} - T_{\text{humeda}}] / [T_{\text{seca}} - T_{\text{humeda}}]$ , donde la  $T_{\text{humeda}}$  es la temperatura de mínimo estrés hídrico (máxima transpiración sin perturbación, estomas totalmente abiertos) y  $T_{\text{seca}}$  es la temperatura de máximo estrés hídrico (hoja que no transpira, estomas cerrados).

Para hacer posible la adopción de esta tecnología en nuestro país es necesario implementar y generar experiencias de este tipo de monitoreos como se ha desarrollado en otras partes del mundo como la India (Rajwade *et al.* 2014) y Honduras (Echevarría 2015), donde se han obtenido una mejora en el uso racional de recursos.

En base a lo anterior mencionado es que se propuso la presente investigación, la cual tuvo como objetivo principal estimar la humedad volumétrica del suelo mediante el cálculo del índice de estrés hídrico foliar en el cultivo de arroz (variedad IR 43) a partir de información de sensores térmicos durante su desarrollo fenológico bajo riego por goteo, del 08 de febrero al 02 de agosto del 2017, en el "Área Experimental de Riego" de la UNALM; y como objetivos específicos (1) Caracterizar la humedad relativa, temperatura del aire y temperaturas húmedas y secas del cultivo de arroz para cada fase fenológica, (2) Calcular el índice de estrés hídrico foliar a partir de la temperatura foliar del cultivo medido por sensores térmicos durante el desarrollo fenológico del cultivo, (3) Correlacionar el índice de estrés hídrico foliar (CWSI) y la humedad volumétrica del suelo.

## II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

### 2.1. CULTIVO DE ARROZ

El cultivo de arroz, de nombre científico *Oryza sativa* L., es considerado un cultivo extensivo y se siembra en altas densidades. Comúnmente, el arroz se produce bajo riego por inundación, como arroz de secano (sin aplicación de agua de riego) o cuando el productor tiene condiciones de riego, arroz de secano favorecido (aplicación de riegos de alivio) (Echevarría, 2015).

La variedad que se evaluó fue IR 43, es la más sembrada en el Perú y proviene del International Rice Research Institute (IRRI, Filipinas). Esta variedad, en buenos ambientes y buen manejo agronómico, alcanza rendimientos hasta de 13 Tn ha<sup>-1</sup>, pero la susceptibilidad a *Hydrellia wirthii*, *Chironomus xanthis*, *Tagosodes oryzicolus*, que trasmite el virus de la hoja blanca, *Sarocladium* y *Nakataea* disminuyen los rendimientos, pudiendo descender hasta 5 Tn ha<sup>-1</sup> (Gómez *et al.* 2017).

### 2.2. ESTRÉS ABIÓTICO

El término estrés en el marco de la fisiología vegetal refleja la magnitud de presión ambiental que fuerza al cambio en la fisiología de una planta (Nilsen y Orcutt 1996) y reduce la tasa de algún proceso fisiológico por debajo de la tasa máxima que podría alcanzar (Lambers *et al.* 1998) resultando potencialmente desfavorable (Levitt 1980).

Así mismo, se acepta la clasificación de los factores de estrés en factores ambientales bióticos y abióticos (Azcón-Bieto y Talón 2008).

Los estreses abióticos, dependiendo del agente causal, pueden dividirse en físicos y químicos. Entre los factores físicos se pueden mencionar el estrés por déficit o exceso de agua, temperaturas extremas (calor, frío, congelación), salinidad (en su componente osmótico) y radiación UV. Entre los factores químicos destacan la contaminación atmosférica por metales pesados, toxinas, salinidad (en su componente iónico o tóxico) y carencia de elementos minerales (Montoliu 2010).

### 2.2.1. Estrés hídrico foliar

Cuando las plantas se encuentran en condiciones de estrés hídrico y pierden agua, su potencial hídrico disminuye. Esto ocurre normalmente de forma simultánea a una disminución del potencial de turgencia y a una disminución del potencial osmótico, al implicar que la pérdida de agua producirá una mayor concentración de solutos (Montoliu 2010).

El agua evaporada por una superficie vegetal funciona al mismo tiempo como un estabilizador de la temperatura de las hojas ante la demanda evapotranspirativa de la atmósfera. A partir de esto, Idso *et al.* (1981) presentaron la teoría del balance energético que separa la radiación neta en calor sensible del aire y calor latente que incide en la transpiración. Jones (2014) sostiene que cuando el cultivo se somete al estrés hídrico, las estomas se cierran, la transpiración decrece y la temperatura de la hoja aumenta.

### 2.2.2. Estrés hídrico del suelo

Según Allen *et al.* (2006), los efectos del estrés hídrico sobre el valor de la evapotranspiración del cultivo (ETc) se reflejan mediante la reducción del coeficiente del cultivo (Kc). Esto se logra al multiplicar el valor del coeficiente del cultivo por el coeficiente de estrés hídrico del suelo (Ks). Al respecto, el contenido de humedad en la zona radicular puede ser expresado en función del agotamiento de humedad en la zona radicular, Dr, es decir la cantidad de agua faltante con respecto a la capacidad de campo. En capacidad de campo, el agotamiento en la zona radicular es igual a cero (Dr= 0). Cuando se produce la extracción del agua a través de la evapotranspiración, aumentará el agotamiento de humedad y se iniciarán las situaciones de estrés cuando el valor de Dr sea igual al “agua fácilmente aprovechable” (AFA). Después de que el agotamiento en la zona radicular exceda a AFA (o sea, el contenido de agua es menor al valor umbral), el agotamiento del agua será lo suficientemente alto como para limitar la evapotranspiración a valores menores que su potencial, por lo que la evapotranspiración del cultivo comenzará a disminuir en proporción a la cantidad de agua remanente en la zona radicular. Ver Figura 1.

Para  $Dr > AFA$ , Ks es calculado como:

$$K_s = \frac{ADT - D_r}{ADT - AFA} = \frac{ADT - D_r}{(1-p) ADT} \quad (1)$$

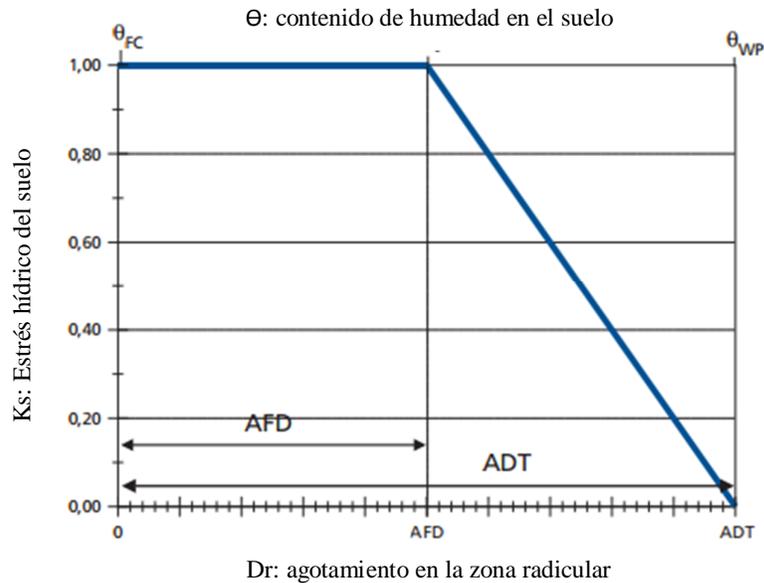


Figura 1: Variación del coeficiente de estrés hídrico del suelo ( $K_s$ ).  
Fuente: Allen, R. *et al.* (2006).

Donde, “ $K_s$ ” es un factor adimensional de reducción de la transpiración que depende de la cantidad de agua disponible en el suelo [0 - 1], “ $D_r$ ” es el agotamiento de humedad en la zona radicular [mm], “ $ADT$ ” es el agua disponible total en la zona radicular del suelo [mm], “ $p$ ” es la fracción de la  $ADT$  que un cultivo puede extraer de la zona radicular sin sufrir estrés hídrico.

Cuando el agotamiento en la zona radicular sea menor que  $AFA$ , el valor de  $K_s$  será 1. Finalmente, con el valor de  $K_s$ , se estima el nuevo valor de la evapotranspiración ajustada ( $ET_c$  ajustado).

### 2.2.3. Estrés térmico

El estrés térmico puede ser definido como la elevación de la temperatura por un período lo suficientemente prolongado como para causar daños irreversibles en el metabolismo y el desarrollo de las plantas; es un fenómeno complejo que involucra la duración del estrés, la tasa de su incremento y las temperaturas máximas alcanzadas (Porch and Hall, 2013). Las respuestas varían si se trata de un estrés transitorio o permanente, por altas temperaturas nocturnas, diurnas, el promedio diario, o si existe una interacción entre las temperaturas diurnas y nocturnas. En general, se reconocen cuatro tipos de estrés térmico en las plantas: el provocado por temperaturas altas sostenidas; los episodios frecuentes de temperaturas altas (“heat shock”); el daño por enfriamiento (de 0 a 10 °C)

o "chilling injury" en numerosos frutos, follajes y flores tropicales; y los daños por congelamiento a temperaturas inferiores a los 0 °C, que causan la formación de hielo en los tejidos de las plantas (Larcher 1980).

La exposición de las plantas a temperaturas muy altas (>50 °C) resulta en un severo daño a nivel celular en cuestión de minutos y en el colapso rápido de la organización celular. Sin embargo, cuando se presentan temperaturas moderadamente altas, los daños se dan después de exposiciones más prolongadas (Wahid *et al.* 2007). Las altas temperaturas desencadenan una cascada de señales que activan la expresión de genes y la síntesis de "proteínas del estrés", algunas específicas del estrés por calor (HSPs, por sus siglas en inglés "Heat-Shock Proteins"), que estabilizan la estructura de proteínas y enzimas (Iba 2002), y están involucradas en la protección del aparato fotosintético y la estabilidad de las membranas (Georgieva 1999, Wang *et al.* 2004, Wahid *et al.* 2007). Además, se producen en las plantas una serie de enzimas antioxidantes y desintoxicantes para atenuar el daño causado por las especies de oxígeno reactivas (ROS, por sus siglas en inglés "Reactive Oxygen Species"), cuya producción es inducida por el estrés por calor (Almeselmani *et al.* 2006). Otras toxinas producidas durante el estrés térmico son los productos de la fotorespiración (glicolato) y los subproductos de las alteraciones metabólicas necesarias para el reciclaje de las proteínas y la acumulación de osmolitos, iones y sustancias de defensa.

La tolerancia al calor es la capacidad de las plantas para crecer y rendir económicamente, bajo condiciones de alta temperatura (Wahid *et al.* 2007). El régimen de temperatura influye en el desarrollo vegetal, más a menudo acelerándolo; sin embargo, la sensibilidad de los procesos fisiológicos al estrés térmico cambia durante el desarrollo y con los ciclos fenológicos, y difiere entre las especies y los cultivares. Esta dependencia del crecimiento vegetal de la temperatura es el fundamento de las predicciones realizadas con modelos como el de grados día o de prácticas agronómicas como el forzamiento de la floración en algunos ornamentales. Entre más corto es el ciclo de vida de una planta, más pronunciada parece ser la aceleración fenológica impulsada por las altas temperaturas.

A escala agronómica, los experimentos de genotipo por ambiente y el análisis cuantitativo del crecimiento de los cultivos constituyen herramientas para el estudio de los efectos y de la tolerancia de las plantas a altas temperaturas. La gran variedad de

especies, escenarios y la diversidad de las respuestas observadas a este tipo de estrés, indican la necesidad de uniformar y tecnificar los protocolos de investigación.

Las diferentes modalidades de la imagenología son recursos modernos para estudiar, prevenir y remediar el estrés térmico en el campo. Incluyen la espectrometría infrarroja, los índices espectrales de la vegetación como el diferencial normalizado (NDVI, por sus siglas en inglés “Normalized Difference Vegetation Index”), los sensores multi-angulares en 3D y Lidar, y la fluorescencia para el diagnóstico del estrés de varios tipos. Estas aplicaciones son posibles porque las propiedades de absorción, transmisión y reflexión de la luz (propiedades radiativas) de las superficies vegetales determinan su capacidad para absorber, reflejar y transmitir la energía (Jones y Vaughan 2010). Las hojas verdes con concentraciones apropiadas de nitrógeno (~1-2%) y clorofila, absorben la luz fotosintéticamente activa (RFA, espectro rojo y azul) y reflejan la luz verde e infrarroja en un patrón característico, que es alterado por las deficiencias nutricionales, la sequía, y las temperaturas extremas, y puede ser monitoreado y registrado a través de varios instrumentos, y aplicado a través de diferentes modelos de estrés y productividad.

La temperatura de las plantas y los cultivos (doseles) puede ser medida con derivaciones de la ley de Stefan-Boltzmann, porque la radiación infrarroja reflejada por las plantas calientes es mayor que la emitida por las más frescas. La temperatura de las plantas está determinada en gran medida por la transpiración y la disipación del calor por evaporación (calor latente). Por lo tanto, las plantas bien irrigadas tienen menores temperaturas que las plantas que sufren estrés hídrico. Una posible aplicación de estos procesos es el manejo de los terrenos con sistemas de posicionamiento geográfico (GPS), para la distribución de los insumos agrícolas, según los requerimientos de los cultivos, en diferentes zonas y etapas fenológicas. La termometría infrarroja y los índices de estrés (Rosenberg *et al.* 1983), permiten administrar eficientemente el agua de riego y la sombra. Esta instrumentación se puede integrar a la maquinaria agrícola moderna y puede dirigir la dosificación eficiente del agua, los fertilizantes y otros agroquímicos, con efectos positivos en el ambiente y en las finanzas de los sistemas productivos.

- Temperaturas umbrales de estrés por calor en los cultivos

Cada especie cultivada tiene una temperatura mínima y máxima para su desarrollo normal y sobrevivencia. Cuando la temperatura excede o baja de esos límites, el

crecimiento y el rendimiento de los cultivos se ven afectados (Ulukan 2008). Existe un umbral inferior y uno superior, pero varían entre y dentro de las especies de plantas y con el hábitat donde se desarrollan. El umbral de estrés por alta temperatura es aquella a la cual se inicia la afección severa de algún proceso vital o una reducción detectable en el crecimiento y desarrollo de las plantas. A pesar de que los cultivos tropicales tienen una temperatura base más elevada que los cultivos de zonas templadas, el estrés por calor ya es considerado una de las mayores limitantes para la producción agrícola (Corley 1983, Wahid *et al.* 2007).

Los umbrales y las temperaturas óptimas pueden variar con los cultivares y el lugar donde estos fueron desarrollados. Por ejemplo, existen cultivares de maíz adaptados a zonas bajas, con un rango de temperatura de 20 a 38 °C, mientras que los de zonas altas poseen un rango de 7 a 27 °C (Laffite 2001, Ruiz *et al.* 2002). Los efectos de la temperatura varían también con el desarrollo del cultivo y la fenología (Wahid *et al.* 2007). Por ejemplo, en tomate y yuca se pueden observar grandes diferencias en los rangos de temperatura adecuados para sus diferentes fases del desarrollo.

Las mediciones de temperatura del cultivo en sí son de relativa poca utilidad como indicadores de estrés hídrico, esto debido a su extrema variabilidad temporal, ocasionado por las variaciones de las condiciones climatológicas. Sin embargo, el primer paso en el desarrollo de métodos para el uso de información de temperatura en la programación de riego se dio con la normalización de la temperatura foliar con referencia a la temperatura del aire (Aston y van Bavel 1972) y el cálculo del diferencial de temperatura cultivo-aire (SDD, por sus siglas en inglés "Stress-degree day") medido poco después de pasado el mediodía (Jackson *et al.* 1982); la significativa elevación de la temperatura foliar sobre la temperatura del aire es indicador del cierre de estomas y estrés hídrico del cultivo. Esta temperatura es determinada como la temperatura máxima de estrés hídrico foliar o temperatura seca.

A pesar que en cualquier momento se puede producir un valor óptimo de apertura de estomas brindando así valores máximos instantáneos de uso eficiente del agua (WUE, por sus siglas en inglés "Water Use Efficiency"), el uso óptimo del agua en un periodo involucra la distribución óptima de apertura estomática, así como de los cambios climáticos. Claramente es más eficiente restringirse a periodos de apertura estomática y rápida fotosíntesis y en periodos en los cuales la evaporación potencial

es baja, presentándose estas condiciones particularmente en horas de la mañana; a esta temperatura se le denomina temperatura mínima de estrés hídrico foliar o temperatura húmeda (Jones 2014).

### 2.3. ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO FOLIAR (CWSI)

La temperatura de la hoja ha sido reconocida como indicador del estado hídrico de los cultivos (Jackson *et al.* 1977, Gates 1964), obteniendo un índice normalizado capaz de enmascarar el efecto de parámetros ambientales que afectan la relación entre estrés y la temperatura de la planta. Este índice denominado índice de estrés hídrico foliar (CWSI, por sus siglas en inglés "Crop Water Stress Index") (Idso *et al.* 1982, Jackson *et al.* 1982) consiste en relacionar la diferencia de temperaturas entre el dosel vegetativo y el aire ( $T_c$  y  $T_a$ , respectivamente) con la diferencia  $T_c - T_a$  para una línea base sin estrés (por sus siglas en inglés "Non-Water Stress Baseline", NWSB) o límite inferior (en inglés *lower limit*, LL) y  $T_c - T_a$  para un límite superior (en inglés *upper limit*, UL), los dos siendo función del déficit de presión de vapor atmosférico (DPV) (Idso *et al.* 1982). Estos límites son específicos del cultivo y están influenciados por el clima (Bucks *et al.* 1985).

Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es entre 1 – 4 °C menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice de estrés hídrico foliar (CWSI) es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y puede alcanzar de 6 a 10 °C más que la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se ve drásticamente reducida con el incremento de la temperatura foliar; cuando la planta está muerta o no transpira durante mucho tiempo el CWSI es 1.

El índice de estrés hídrico foliar según Idso *et al.* (1981) está definido como:

$$CWSI = \frac{[(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{li}]}{[(T_c - T_a)_{ls} - (T_c - T_a)_{li}]} \quad (2)$$

Dónde,  $T_c$  es la temperatura del cultivo;  $T_a$  es la temperatura del aire. El subíndice  $m$  denota la diferencia medida entre las dos temperaturas, el subíndice  $li$  (límite inferior) denota la diferencia entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración no está restringida por disponibilidad del agua, de modo que la temperatura es el valor más bajo para las condiciones del clima, y el subíndice  $ls$  (límite superior) denota la diferencia

hipotética entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración es cero, como resultado de falta de disponibilidad de agua en el sistema suelo planta atmósfera.

Así mismo se cuenta con la formula simplificada desarrollada por Jones (2004).

$$CWSI = \frac{(T_{foliar} - T_{hum})}{(T_{seca} - T_{hum})} \quad (3)$$

Donde, Tfoliar es la temperatura de cultivo (dosel vegetativo), Tseca es la temperatura de máximo estrés hídrico o temperatura seca del cultivo y Thum es la temperatura de mínimo estrés hídrico o húmeda del cultivo.

Según Jones (2014), hallar el valor de índice de estrés hídrico foliar involucra hallar una relación que permita brindar una guía al momento de programar riego. Este índice es ampliamente asumido de reflejar cambios en la apertura de estomas y las variaciones en la evaporación producida a medida que el déficit de agua se torna un limitante en el desarrollo del cultivo.

De esta manera, para valorar convenientemente el estado hídrico de un cultivo, se precisa del uso de índices térmicos (Ver Cuadro 1), calculados a partir de la temperatura del objeto de estudio en cuestión y unos valores de temperatura de referencia.

Cuadro 1: Índices térmicos derivados de la termografía más usados en la monitorización del estrés hídrico foliar de los cultivos.

Índice	Índice de estrés hídrico foliar (CWSI)	Índice de conductancia estomática (I <sub>G</sub> )	Gradiente de temperatura (ΔT)
Fórmula	$CWSI = \frac{(T_{foliar} - T_{hum})}{(T_{seca} - T_{hum})}$	$I_G = \frac{(T_{seca} - T_{foliar})}{(T_{foliar} - T_{hum})}$	$\Delta T = T_{aire} - T_{foliar}$
Referencia	Jones (2004), Costa <i>et al.</i> (2014), Maes y Steepe (2012)	Jones (2004), Grant <i>et al.</i> (2007), Maes y Steepe (2012)	Maes y Steepe (2012), Garcia-Tejero <i>et al.</i> (2011)

## 2.4. SENSORES TÉRMICOS

La termografía es una técnica con amplitud de uso en la industria automovilística, aeronáutica, armamentística, construcción civil, electrónica, medicina, agricultura, fisiología vegetal, etc. (Kaplan 2007). Esta técnica se basa en la detección de la radiación en el rango infrarrojo térmico del espectro electromagnético (Ver Figura 2) emitida por los cuerpos, convirtiendo la información obtenida en imágenes visibles con información sobre la temperatura de la superficie de los mismos. Así, los objetos con

una temperatura superior al 0 absoluto (0 °K) emiten energía electromagnética en el rango térmico. Según la ley de Stefan-Boltzmann, esta radiación infrarroja emitida aumenta con la temperatura de los cuerpos.

$$W = \sigma \cdot T_s^4 \quad (4)$$

Donde, W es la energía de radiación total emitida (energía radiante en  $Wm^{-2}$ );  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \times 10^{-8} Wm^{-2}K^{-4}$ );  $T_s$  es la temperatura absoluta del cuerpo (°K).

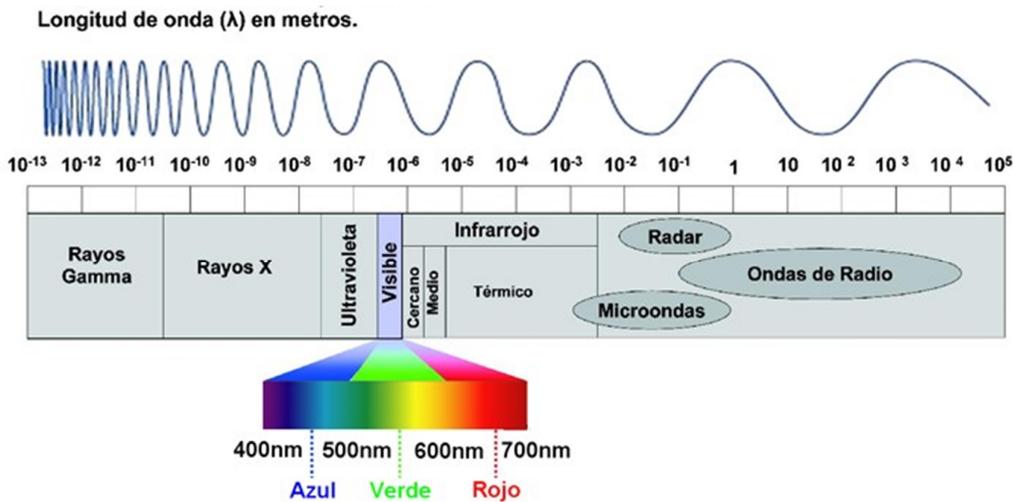


Figura 2: Espectro electromagnético y las longitudes de onda en cada rango.  
Fuente: Elaboración propia.

Esta ley es aplicable a cuerpos negros, que son cuerpos ideales, emisores perfectos de radiación infrarroja, es decir, emisividad ( $\epsilon$ ) igual a 1. La emisividad se define como la capacidad que tiene todo cuerpo para irradiar energía. Los cuerpos reales tienen una  $\epsilon < 1$ , por lo que además de emitir radiación infrarroja térmica, también reflejan una parte de la radiación infrarroja térmica incidente. Ver Figura 3.

Por ello, la radiación total infrarroja que es detectada por la cámara termográfica es la sumatoria de la energía emitida  $\epsilon \sigma \cdot (T_s)^4$  y de la energía reflejada  $((1 - \epsilon) \cdot W_{background})$  por el objeto observado, considerándose como no significativa la absorción de la radiación infrarroja por parte de la masa de aire existente entre el objeto estudiado y el sensor de la cámara cuando la distancia existente no es demasiado grande o cuando el sensor infrarrojo trabaja en el rango de los 3-5 o 7-14  $\mu m$ , donde la transmisividad de la atmósfera a los infrarrojos es máxima.

$$W = \varepsilon\sigma(T_s)^4 + (1 - \varepsilon)W_{\text{background}} \quad (5)$$

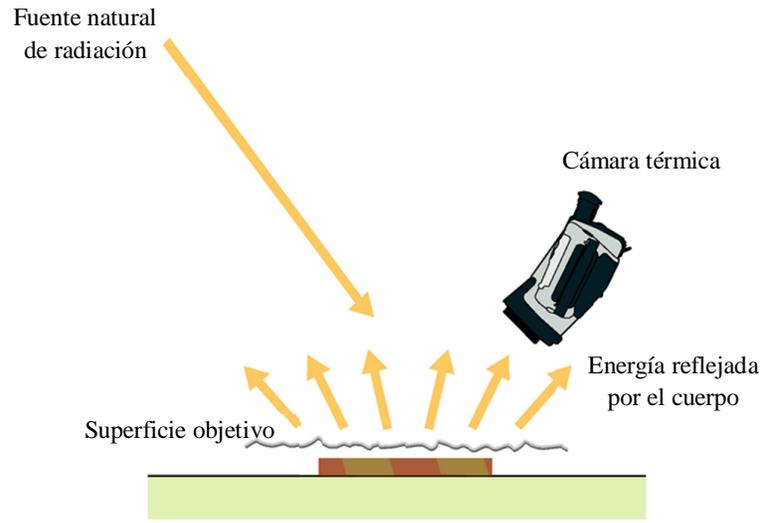


Figura 3: Energía emitida y reflejada de una superficie objetivo medida con una cámara térmica  
Fuente: Elaboración propia

En el caso de que la distancia entre la cámara y el objeto estudiado sea mayor (por ejemplo, en el caso de observaciones aéreas), resulta necesario introducir otro factor; la emisión atmosférica ( $W_{\text{atm}}$ ), así como la transmisividad de la energía de radiación en la atmósfera ( $\tau$ ).

$$W = \tau[\varepsilon\sigma(T_s)^4 + (1 - \varepsilon)W_{\text{background}}] + W_{\text{atm}} \quad (6)$$

Al respecto, los softwares para el procesamiento de imágenes térmicas permiten realizar correcciones a las variables que influyen sobre la información de estas, permitiendo así el desarrollo de mediciones más exactas de la temperatura de los objetos observados. Siendo necesario disponer de los valores de emisividad del cuerpo de interés, humedad relativa y la temperatura del aire, la distancia al objeto y la temperatura reflejada por el ambiente circundante.

## 2.5. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES TÉRMICAS

La extracción de la información de temperatura foliar de una imagen térmica requiere el empleo de métodos de procesamiento que permitan discriminar con precisión los píxeles correspondientes al cultivo, excluyendo aquellos píxeles que correspondan a otros elementos y coberturas.

Para tal fin, se dispone de dos métodos, un método matemático el cual emplea temperaturas umbrales particulares del cultivo (temperaturas húmeda y seca), que

permiten establecer un límite inferior y superior dentro del total de datos de temperaturas de una imagen térmica; y segundo, un método de superposición de imágenes térmicas y sus correlativas imágenes ópticas, cuyo procedimiento consiste en la elaboración de una máscara de cobertura vegetal en la imagen óptica para posteriormente traslaparla con la imagen térmica, obteniéndose una imagen recortada conteniendo únicamente información de pixeles de temperatura de la cobertura vegetal.

### 2.5.1. Método de temperaturas umbrales (temperaturas húmeda y seca del cultivo)

Este método surge a partir de una propuesta hecha por Idso *et al.* (1981) para la estimación del CWSI, que toma en cuenta las variaciones en humedad atmosférica. Se muestra que la variación ( $T_{\text{foliar}} - T_{\text{aire}}$ ) está correlacionado linealmente al déficit de presión de vapor de la atmósfera en cultivos regados a capacidad de campo permanente, obteniéndose correlaciones como el mostrado en la Figura 4.

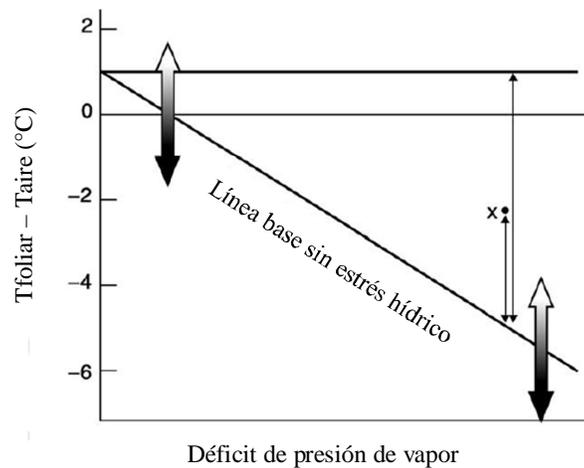


Figura 4: Relación del índice de estrés hídrico foliar estimado a partir de la razón de  $(T_x - T_{nws}) / (T_{max} - T_{nws})$  y el correspondiente valor de déficit de presión de vapor.

Fuente: Jones (2004).

Donde  $T_x$  es la temperatura foliar al momento de la medición y  $T_{nws}$  (nws, por sus siglas en inglés "non-water stress") es la temperatura sin estrés hídrico y  $T_{max}$  es la temperatura seca.

De esta forma se establece una correlación entre el gradiente de la temperatura aire-hoja y el déficit de presión de vapor. Este déficit de presión de vapor se puede estimar a partir de la ecuación psicrométrica propuesta por Pinazo (1995).

$$P_V = P_{VS,bh} - a_1 * P * (T - T_{bh}) \quad (7)$$

Donde  $P_V$  es la presión o tensión de vapor;  $P_{VS,bh}$  es la presión de vapor de saturación a la temperatura de bulbo húmedo;  $a_1$  es el factor psicrométrico (varía con la ventilación);  $P$  es la presión atmosférica;  $(T - T_{bh})$  es la diferencia o depresión psicrométrica (diferencia entre las temperaturas del termómetro de bulbo seco y el de bulbo húmedo).

Para el cálculo del CWSI por este método, se estiman valores de temperaturas umbrales, las cuales se asumen: el valor de  $T_{bh}$  es la temperatura húmeda del cultivo, así mismo, el valor de la temperatura seca es estimada como la temperatura del aire más una constante ( $T_{air} + C$ ), propia para el cultivo de estudio y para determinadas condiciones climáticas. El valor de  $C$  puede variar de 1 °C hasta 12 °C. (Idso *et al.* 1982)

Disponiendo de la información de variables climáticas adecuadas y mediante un cálculo iterativo es posible generar una correlación como la mostrada en la Figura 4, para cualquier cultivo, así como la caracterización de las temperaturas húmeda y seca.

En el caso particular de las imágenes térmicas, estas son procesadas por un algoritmo que seleccione los píxeles de temperatura que se encuentren dentro del rango de las temperaturas húmeda y seca:

$$T_{húmeda} < T_{foliar} < T_{seca} \quad (8)$$

Posteriormente se selecciona el 33% de temperaturas inferiores, garantizando la selección de únicamente píxeles de temperatura foliar, según la experiencia desarrollada por Meron *et al.* (2010). Finalmente, se calcula el valor promedio de píxeles obteniéndose la  $T_{foliar}$ , que ingresa en la fórmula de CWSI propuesta por Jones (2004) en la ecuación 2.

Las temperaturas húmeda y seca son temperaturas características de un cultivo en condiciones de mínimo y máximo estrés hídrico foliar, respectivamente, y que además varían para cada fase fenológica del cultivo y por estaciones del año. Por ello, se requiere inicialmente realizar una división por fases fenológicas para todo el proceso de crecimiento del cultivo, independizando la información para cada fase.

En el caso de no existir antecedentes o información de estas temperaturas anteriores al experimento, se realiza la estimación de estas temperaturas a partir de mediciones

directas (uso sensores térmicos instalados en campo, por ejemplo, el uso de sensores de térmicos de termocuplas) de temperatura foliar como se explica a continuación:

- a) La temperatura húmeda corresponde a un estado de mínimo estrés hídrico foliar en condiciones de transpiración de la planta, realizando un intercambio gaseoso con el ambiente (estomas abiertos). La manera más eficaz de realizar su estimación es mediante la medición de un cultivo en óptimas condiciones y sin estrés hídrico. Así también, es aceptado asociar a esta temperatura a la que se produce durante las primeras horas de la mañana, horario en el cual finaliza el periodo de adormecimiento nocturno del cultivo y la temperatura foliar se equipara a la temperatura del aire. (Aston y Van Bavel 1972, Jones 2004)
- b) La temperatura seca es la de mayor estrés hídrico del cultivo, condición en la cual las estomas de la hoja se encuentran completamente cerrados, sin intercambio gaseoso. Esta temperatura se mide en cultivos sometidos a largos periodos de secado y se encuentran próximos a morir. Debido a que estas condiciones resultan difíciles de controlar en campo es que se realizan mediciones de temperatura al cultivo en horarios de máxima temperatura del día, pasado el mediodía, considerándose los máximos valores como los correspondientes a la temperatura seca. (Jackson *et al.* 1982)

Una vez caracterizadas las temperaturas húmeda y seca para cada fase fenológica, se procede a realizar la selección de temperaturas en la imagen térmica, acorde a la experiencia de Meron *et al.* (2010).

### **2.5.2. Método de superposición de imágenes**

Según Wang *et al.* (2010), la extracción de temperatura de la hoja del cultivo en la imagen térmica global se basa en diferenciar la distribución de la temperatura foliar sobre la imagen considerando un patrón de mezclas de "n" densidades Gaussianas y bajo la luz solar la temperatura de la hoja posee una única distribución de Gauss, la distribución de temperaturas sobre el escenario de la imagen FIR es asumida como una de las "n" densidades Gaussianas. Estas distribuciones Gaussianas corresponden a cada cobertura (agua, suelo, vegetación, etc.) existente en la imagen. Partiendo este análisis, Wang *et al.* (2010) plantearon el siguiente procedimiento de tres pasos.

1) El primer paso consiste en la extracción del área foliar contenida en la imagen óptica mediante la identificación de color, asumiéndose que el color de la hoja de cultivo sigue una distribución Gaussiana; así mismo se considera la información de HSV (tono, saturación y valor; por sus siglas en inglés, hue, saturation and value) del color en el espacio. 2) Segundo, se extrae los pixeles de temperatura foliar superponiendo la imagen de cobertura vegetal con la imagen térmica. 3) Y tercero, se realiza el cálculo de la temperatura promedio de los pixeles extraídos. Este procedimiento se visualiza secuencialmente en la Figura 5.

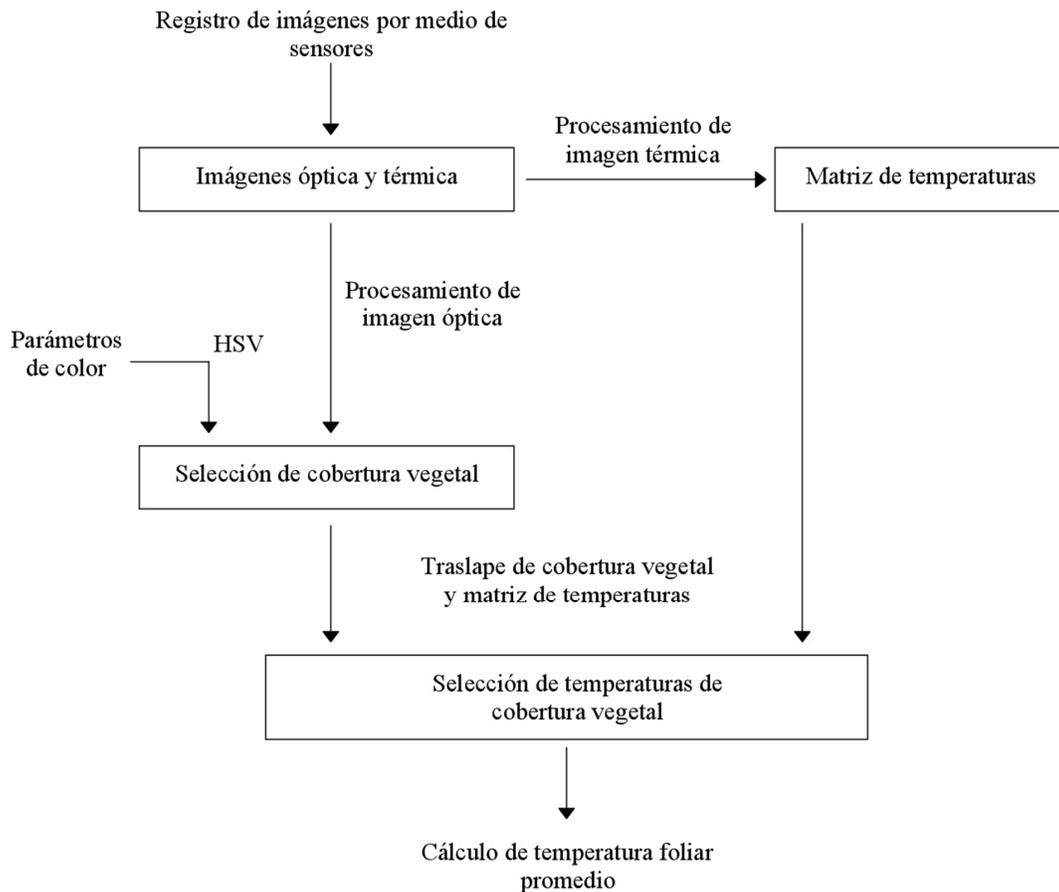


Figura 5: Diagrama secuencial del método de superposición de imágenes térmicas y ópticas.  
Fuente: Elaborado con información de Wang *et al.* (2010).

Sin embargo, pueden filtrarse objetos del color especificado que no corresponden al cultivo y la temperatura de las mismas pueden llegar a desviar significativamente la temperatura promedio del rango de temperatura de la hoja debido a la limitada precisión de la cámara térmica, o desperfectos en la superposición de las imágenes ópticas y térmicas, donde la imagen óptica no se superpone exactamente con la imagen térmica.

- Índice de verdor triangular (Triangular Greenness Index, TGI)

McKinnon and Hoff (2017), investigadores del Ministerio de Agricultura de los Estados Unidos (USDA), crearon el índice TGI con la finalidad de estimar la clorofila de las hojas e indirectamente el contenido de nitrógeno de la planta empleando imágenes de color real.

En la Figura 6, se presenta la variación de la reflectancia de las bandas rojo, verde y azul del espectro electromagnético, en el que el TGI se encuentra definido por el área del triángulo generado por las bandas. Las longitudes de onda usadas por los investigadores corresponden a las bandas 1, 2 y 3 del sistema de mapeo temático Landsat (Landsat Thematic Mapper Instrument, instrumentación de mapeo temático Landsat); empleándose los picos de sensibilidad de las longitudes de onda de los sensores típicos CMOS, siendo estos valores para cada banda espectral, rojo, verde y azul, 670 nm, 550 nm y 480 nm, respectivamente.

El uso de esta relación es válido para las cámaras CMOS y se normalizó para la cobertura vegetal, siendo el TGI igual a:

$$TGI = R_{GREEN} - 0.39 * R_{RED} - 0.61 * R_{AZUL} \quad (9)$$

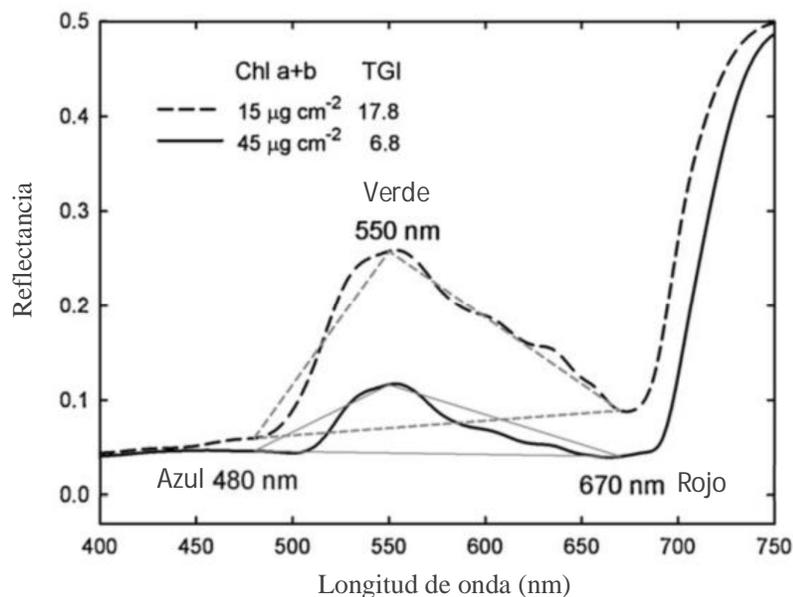


Figura 6: Variación de la reflectancia del espectro electromagnético, siendo el Índice de verdor triangular (TGI) el área del triángulo de reflectancia.  
Fuente: McKinnon and Hoff (2017).

Finalmente, el cálculo del índice de estrés hídrico foliar (CWSI) tiene como finalidad el poder anticipar el requerimiento hídrico del cultivo, por ello se comprende que su estimación pertenezca a un algoritmo más complejo y de orden superior en el cual el siguiente paso sea la programación de riego, como se observa en la Figura 7.

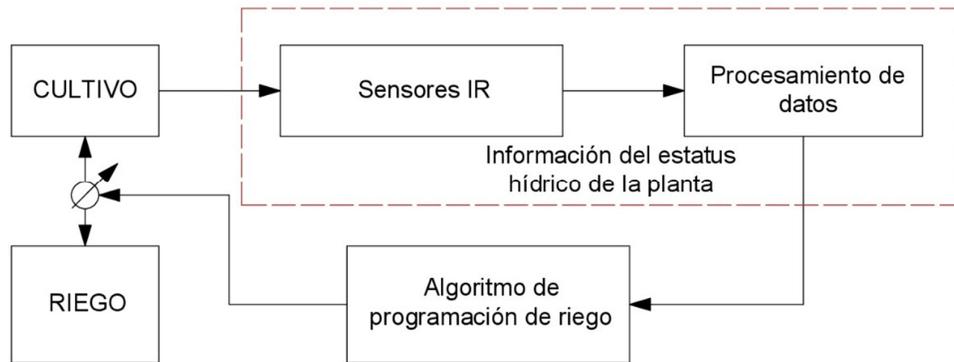


Figura 7: Diagrama secuencial del requerimiento hídrico del cultivo y programación de riego.  
Fuente: Elaborado con información de Wang *et al.* (2010).

### III. MATERIALES Y MÉTODOS

Se planteó un diseño de control, teniendo por finalidad el seguimiento y evaluación de los valores de temperatura requeridos para el cálculo del índice de estrés hídrico foliar (CWSI, Idso *et al.* 1981) según fase fenológica.

#### 3.1. ZONA DE ESTUDIO

El lugar de trabajo fue en las parcelas del “Área Experimental de Riego” (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, en la ciudad de Lima, teniendo por coordenadas UTM del centro de gravedad de las parcelas, 8673248.8 y 391135.8 y altitud de 238 m.s.n.m. (Ver Figura 8).



Figura 8: Ubicación de la parcela experimental (AER).  
Fuente: Google Maps.

#### 3.2. MATERIALES, EQUIPOS Y HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES

En la etapa de campo se emplearon sensores de temperatura, humedad volumétrica del suelo y equipos de medición de variables climatológicas (humedad relativa y temperatura del aire) necesarias (ver Anexo 1), así como, materiales necesarios para la conducción del cultivo, que se detallan en el Cuadro 2. Además, se indicó el software empleado en la etapa de gabinete para el procesamiento de imágenes térmicas y ópticas, y el lenguaje de programación para los cálculos necesarios.

Cuadro 2: Materiales, equipos y herramientas computacionales.

Equipo o insumo	Características técnicas	Uso-aplicación
Cámara termográfica	Marca FLIR, modelo E60. Resolución 320x240 pixeles, sensibilidad de 0.05°C, rango espectral: 7.5 – 13 µm.	Permitió la captura de imágenes térmicas y ópticas (RGB). Cuenta con un lente amplificador que incrementa la resolución de las imágenes ópticas.
Sensor térmico de termocuplas. (STT)	Termocuplas tipo "t", marca OMEGA, modelo TT-T-36-SLE-500; y un colector de datos PC200W, marca Campbell.	Medición directa de la temperatura de la hoja del cultivo.
Sensor digital de humedad de relativa y temperatura del aire.	Marca Campbell, modelo CS215.	Para medición de humedad relativa y temperatura del aire en campo.
Sensores de humedad del suelo.	Cinco sensores de reflectometría de dominio de frecuencia (FDR, por sus siglas en inglés "Frequency-Domain Reflectometer") con colector de datos.	Sensores para la medición de humedad volumétrica del suelo.
Insumos	Semilla: variedad IR 43, 2 kg. Fertilizante: N, P, K (120-60-60) Sistema presurizado de riego por goteo, manguera con goteros con presión de trabajo de 10 m y caudal de gotero 1.2 l/hr (marca Toro-Neptune).	Insumos para conducción del cultivo de arroz.
Software	Características técnicas	Uso-aplicación
FLIR Tools	Software desarrollado por compañía fabricante de cámaras térmicas.	Para el procesamiento y calibración de imágenes térmicas obtenidas por la cámara FLIR.
Matlab 2015	Herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio.	Lenguaje de programación para elaborar código para procesamiento de imágenes térmicas.

- Conducción del cultivo

Se desarrolló el experimento en el Área Experimental de Riego de la UNALM, habilitándose 12 parcelas de 15 m<sup>2</sup> cada una, con un diseño de bloques. Se contó además con un sistema de riego por goteo y se realizó la siembra mediante un

sistema de siembra directa en seco, debido a que es considerado un método más eficiente (Kumar y Ladha 2011, Naldang *et al.* 1996).

El crecimiento fenológico del cultivo de arroz está caracterizado por las etapas de emergencia, plántula, macollamiento, elongación del tallo, formación de panícula, desarrollo de panícula, floración, grano lechoso, grano pastoso y grano ceroso.

En la Figura 9 se indica el desarrollo fenológico teórico de la planta de arroz y el número de días desde la plantación.

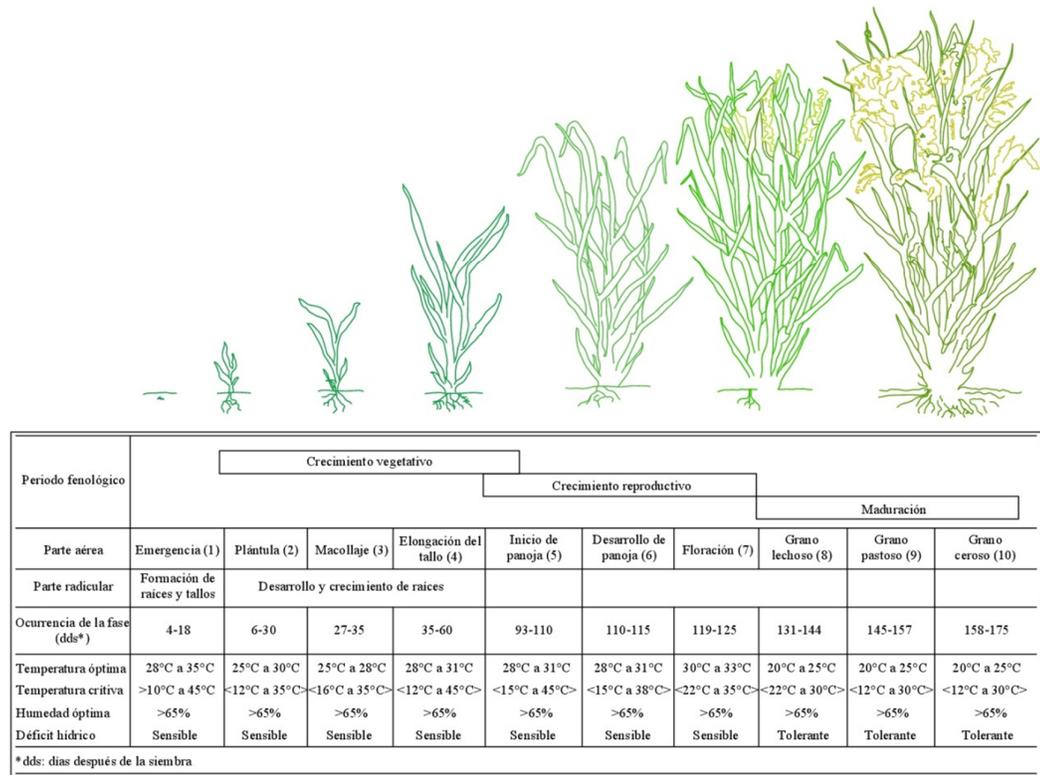


Figura 9: Clasificación por periodo y fase fenológica del cultivo de arroz.

Fuente: Elaborado con información de Steduto *et al.* (2012).

Se caracterizó el crecimiento fenológico del cultivo en cuatro fases fenológicas (i) vegetativa, que abarca desde el momento de la siembra hasta el inicio del primordio floral, (ii) fase reproductiva, que abarcó desde la formación de panícula hasta la floración, y (iii) fase de maduración de grano, que abarcó tres estadios hasta la cosecha. Ver Cuadro 3.

Cuadro 3: Duración de las fases fenológicas del cultivo de arroz, variedad IR 43.

Fase fenológica	Periodo de duración	Duración (días)
Vegetativa (macollamiento)	08 febrero – 11 mayo	93
Reproductiva	11 mayo – 18 junio	39
Maduración de grano	19 junio – 02 agosto	44

Fuente: Elaboración propia.

### 3.3. PROCEDIMIENTO

La presente investigación se desarrolló en tres etapas (acorde a los objetivos específicos planteados). Se puede visualizar el esquema de la secuencia de actividades en la Figura 10.

Se llevó a cabo la instalación de equipos y sensores en campos, y la recolección de información. Se brinda una vista general de las parcelas de evaluación y ubicación de sensores (sensores térmicos de termocuplas y de humedad del suelo) en la Figura 11.

Se acondicionaron 12 parcelas de arroz, empleándose un riego por goteo, y seleccionando cuatro parcelas de evaluación (PE I, PE II, PE III y PE IV) sobre las cuales se realizaron las mediciones de temperatura foliar con los sensores térmicos, y en tres de ellas las mediciones de humedad volumétrica del suelo (sensores FDR a 15 cm y 30 cm de profundidad).

Los equipos y sensores instalados en campo se pueden agrupar en dos sistemas, uno compuesto por los STT, el sensor digital de humedad relativa, temperatura del aire y un colector de datos; y el segundo, compuesto por los sensores de humedad volumétrica del suelo (FDR) y un colector de datos.

Sobre el procedimiento de instalación del sistema de STT y el sensor digital:

- a) Se agruparon y recubrieron las líneas de STT con cuatro mangueras de polietileno (seis líneas por manguera) como protección, partiendo desde el colector de datos enterrado hasta el área asignada en las parcelas de evaluación.
- b) En la Figura 12, se muestra la instalación del sistema de STT, la ubicación del colector de datos, las mangueras de protección de las líneas de STT y su disposición final en las hojas del cultivo. En el detalle (a), se observa la llegada de la manguera de polietileno de protección con seis STT, a la zona de medición de temperatura de hoja de cultivo. A continuación, en el detalle (b), se visualiza la adhesión final de la

línea de STT al envés de la hoja de cultivo, para lo cual previamente se soldó con estaño los cables de constatan y cobre que componen las STT.

- c) Se observa también, la ubicación de la estación meteorológica, del sensor digital de humedad relativa y temperatura del aire, y el sistema de colección de datos, el cual se programó para almacenar datos de temperaturas de los STT y del sensor digital cada cinco minutos desde su instalación, a las 9:00 hrs. del 19 de mayo del 2017, hasta las 12:00 hrs. del 02 de agosto del 2017, periodo a partir del cual era viable la instalación de este sistema.
- d) El sensor de digital, se ubicó en el mismo parante de la estación meteorológica y a una altura de 40 centímetros, de tal forma que se procuró que captara las mismas condiciones de viento y temperatura que las del cultivo.
- e) Además, se proveyó de energía al equipo por medio de un panel solar y su batería, el cual se instaló al lado de la estación meteorológica de tal forma que la energía reflejada por el panel no incidiera sobre los elementos de la estación meteorológica.
- f) Para observar mayores detalles de la instalación del sistema de STT y su colector de datos en campo, ver Anexo 2.
- g) Se realizó un control periódico del sistema, para detectar errores en la lectura analizando la información colectada.

Sobre el procedimiento de instalación del sistema de sensores FDR:

- a) Se enterró los cables de conexión a diez centímetros de profundidad, desde su colector de datos hasta el lugar asignado, y complementariamente, se señaló su posición con un banderín verde.
- b) Se instaló los cinco sensores de humedad volumétrica del suelo en tres de las cuatro parcelas de evaluación, enterrándose tres de ellas a una profundidad de 15 cm y dos a 30 cm. Se estableció estas dos profundidades en base a la profundidad de raíces del cultivo de arroz que alcanza en la fase de reproducción o panícula (Olmos 2007). Además, se procuró colocar tanto los sensores de humedad como los STT próximos entre sí de tal forma que se obtengan datos representativos a una misma área de vegetación y similares condiciones
- c) Para observar mayores detalles de la instalación del sistema de sensores de humedad de FDR y su colector de datos, ver Anexo 3.

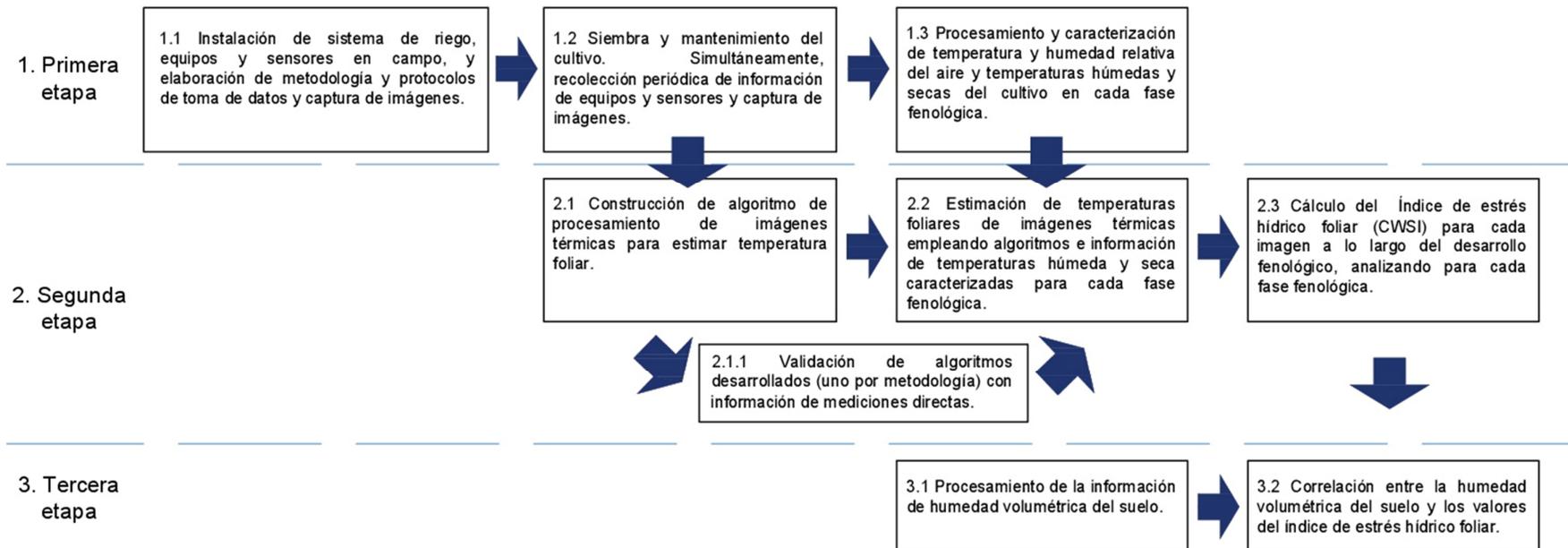


Figura 10: Diagrama general de actividades acorde a los objetivos específicos.  
Fuente: Elaboración propia.

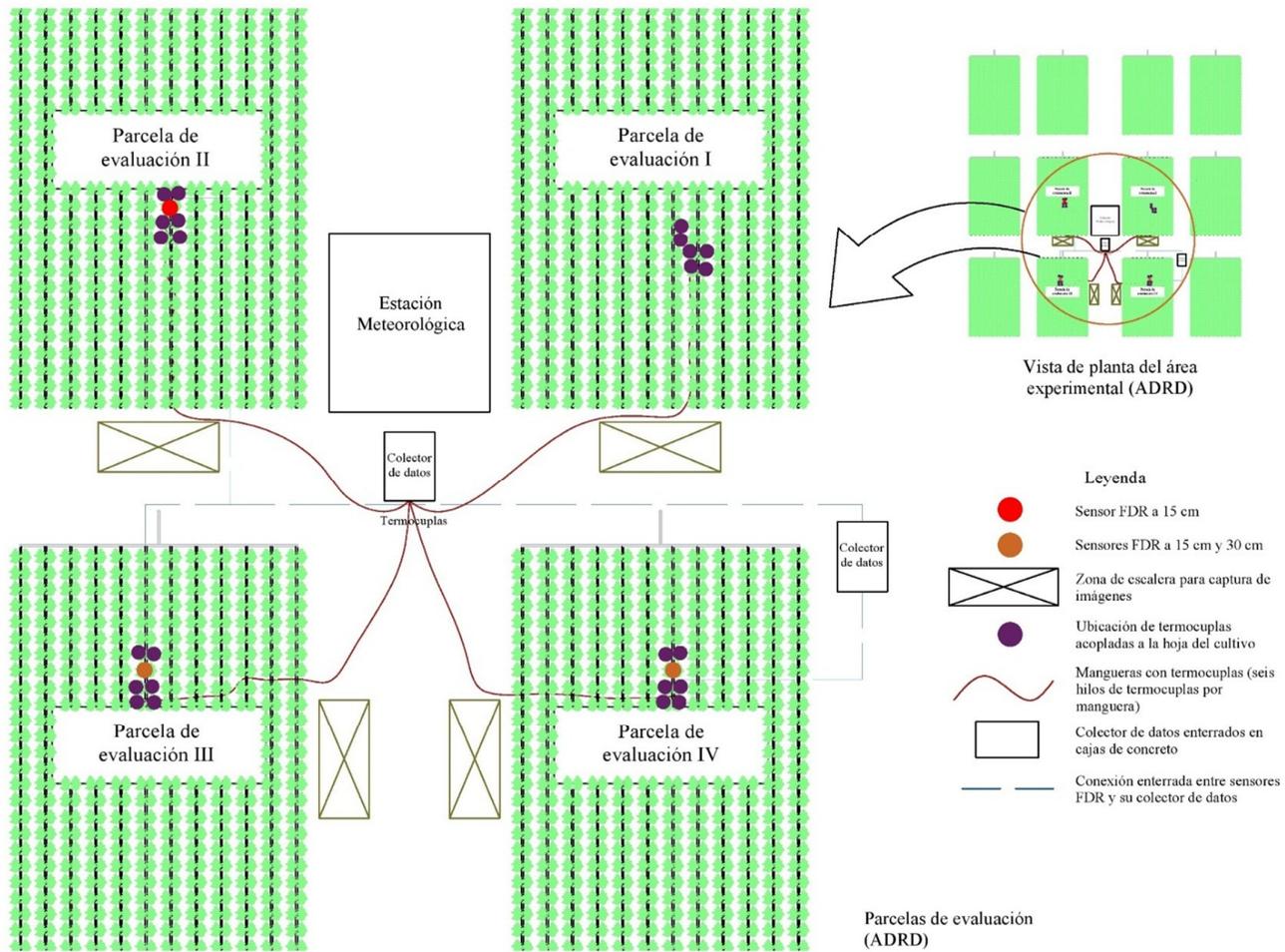


Figura 11: Distribución de cuatro parcelas de evaluación, sistema de STT y sensores de humedad (FDR) en el área experimental.  
Fuente: Elaboración propia.

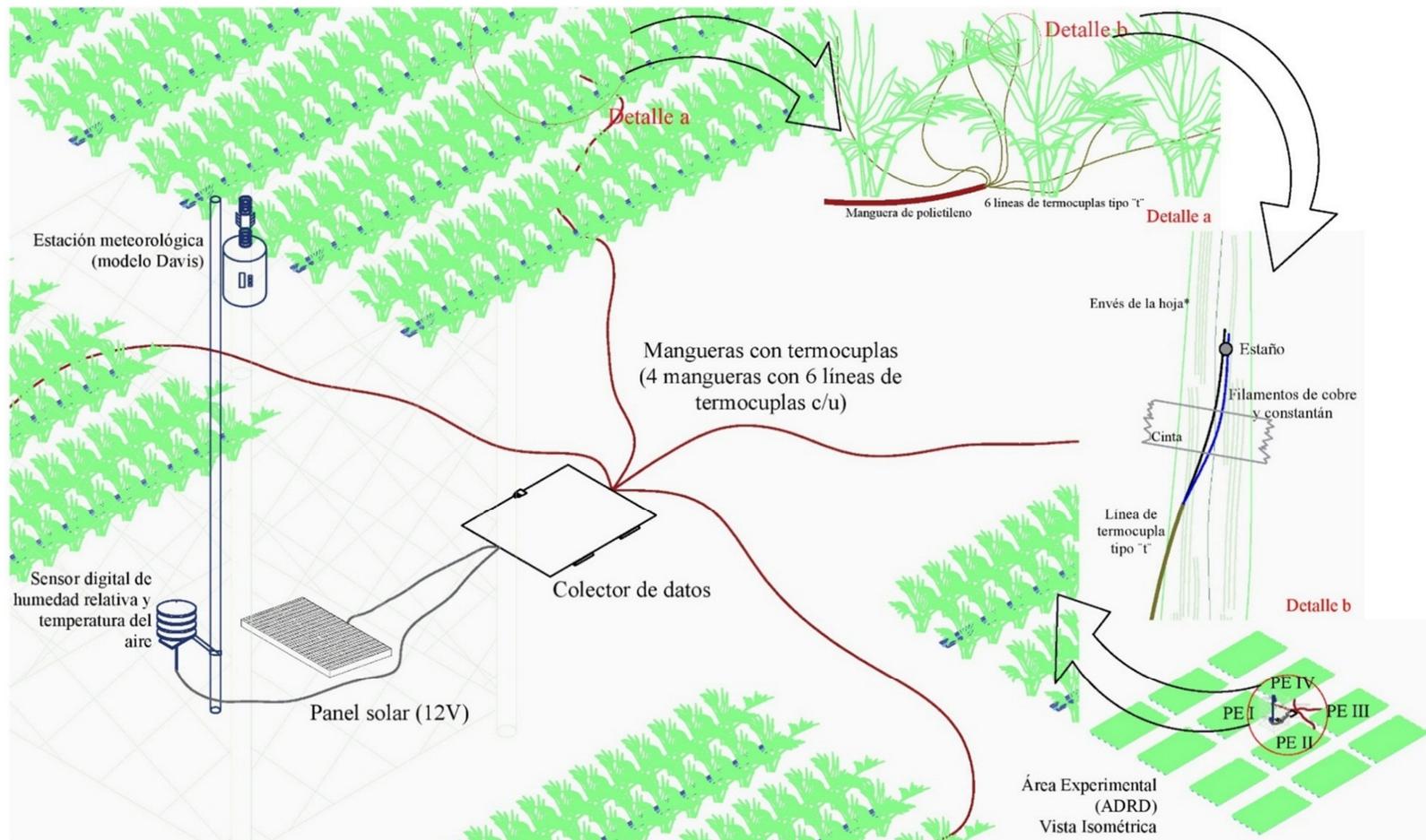


Figura 12: Detalle de distribución de los STT: (a) llegada de manguera protectora con seis filamentos de STT, (b) conexión de filamentos de STT al envés de la hoja de arroz.

Fuente: Elaboración propia.

### **3.3.1. Caracterización de las temperaturas húmeda y seca por fase fenológica**

El objetivo final de la primera etapa de actividades de la Figura 10 consistió en la caracterización de las temperaturas húmeda y seca del cultivo, empleándose para ello la información de humedad relativa, temperatura del aire y temperaturas foliares por medición directa (STT). Esta información se descargó del colector de datos y se elaboró un histograma con el fin de detectar errores en las mediciones. El periodo de colección de datos abarcó desde el 20 de mayo a las 09:00 hrs hasta el 18 de julio a las 12:00 hrs.

Al finalizar la conducción del cultivo, se procesó la información colectada como se indica a continuación:

- a) Se dividió los datos en dos grupos, uno correspondiente a la fase reproductiva o formación de panícula y otra a la fase de maduración de grano.
- b) Se empleó una tabla dinámica para filtrar la información horaria, de cada termocupla, de todos los días por cada periodo analizado.
- c) Se generó un gráfico de cajas de temperatura foliar versus horas del día para cada periodo analizado.
- d) Se usó el mismo procedimiento para la temperatura del aire.

Luego, en los dos periodos evaluados, se combinaron los gráficos correspondientes de temperatura del aire y temperatura foliar para, finalmente, obtener las temperaturas húmedas y secas en cada fase fenológica como se explica a continuación:

- a) Temperatura húmeda o de mínimo estrés hídrico foliar: corresponde a la temperatura en la cual finaliza el adormecimiento nocturno de la hoja y su temperatura se iguala a la temperatura del aire en las primeras horas de la mañana (Jones, 2014). Se empleó el grafico de cajas de la temperatura del aire horaria para mayor precisión.
- b) Temperatura seca o de máximo estrés hídrico foliar: corresponde a la máxima temperatura registrada durante el día en cada periodo.

### **3.3.2. Obtención del CWSI a partir de la temperatura foliar**

La segunda etapa de actividades planteadas en la Figura 10, se desarrolla en torno al cálculo del CWSI. Para ello se empleó la información recabada durante la primera etapa, siendo necesario establecer un protocolo de toma de datos, indicado en los pasos i, ii, iii, iv y v de la Figura 13. En ella se detalla el protocolo de captura de imágenes en

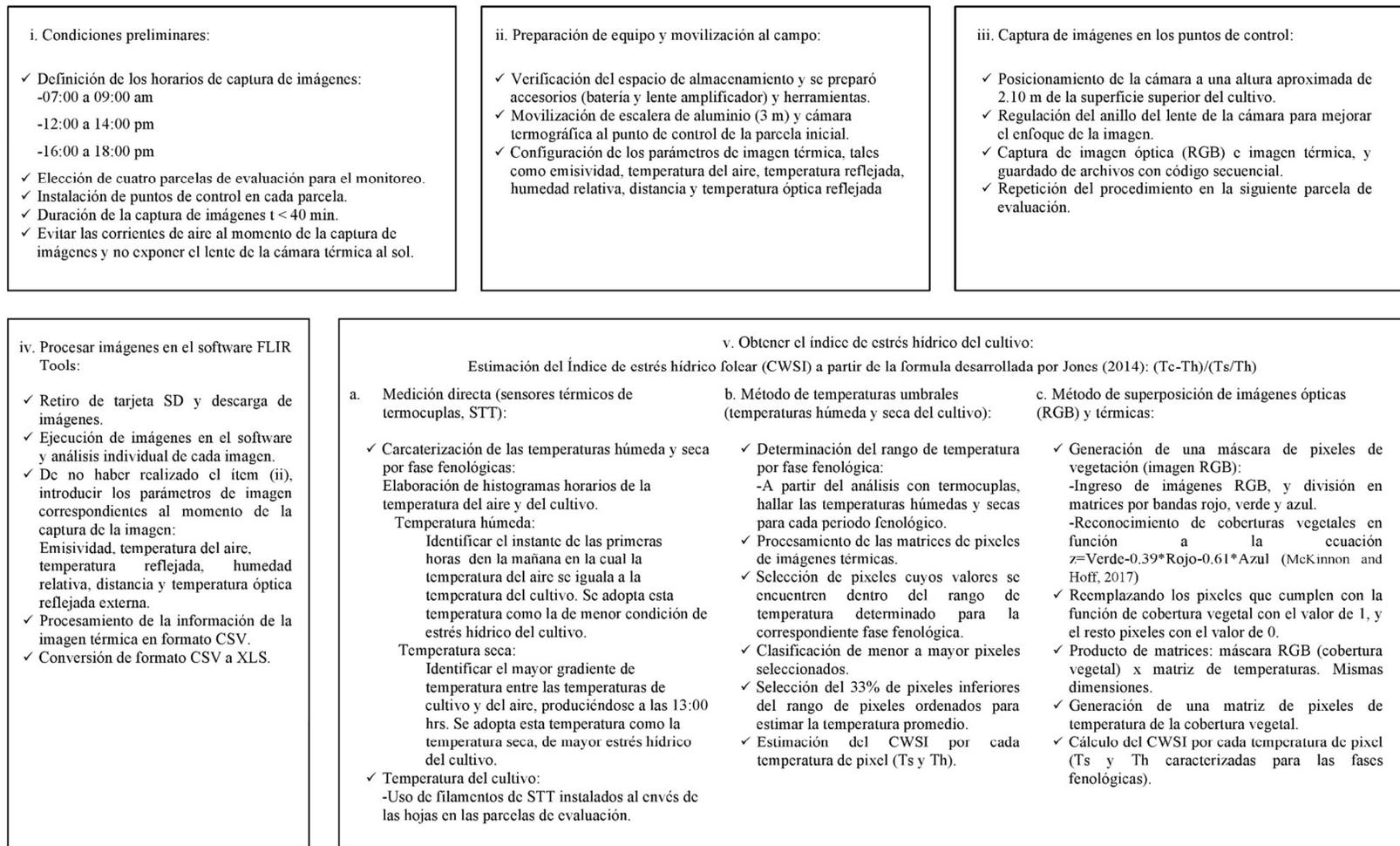
campo y brinda una breve reseña sobre los métodos de procesamiento de información de sensores térmicos. Así mismo, en el Anexo 4 se presenta un panel fotográfico del procedimiento en campo.

Durante el desarrollo fenológico del cultivo, se realizó un total de 73 secuencias de captura de imágenes, en tres horarios distintos (mañana, medio y tarde), en 47 días a lo largo de los 175 días del manejo del cultivo. Finalmente, producto de las secuencias de capturas de imágenes se recopilaron un total de 365 imágenes térmicas y sus correlativas imágenes ópticas (RGB), sumando un total de 730 imágenes. (Ver Anexo 5)

Posterior a la obtención de imágenes y previo al procesamiento de las mismas, es necesario la adecuada calibración y descarga de estas. En la Figura 14 se presenta el entorno de edición de parámetros de imagen térmica, la cual se emplea para calibrar las imágenes con información recabada por el sensor digital de humedad relativa y temperatura del aire entre otros. Estos son:

- a) Emisividad de la cobertura vegetal: según Mira *et al.* (2017), un valor característico para coberturas vegetales es 0.96.
  - b) Temperatura reflejada del ambiente: es la temperatura estimada en una superficie uniforme (ejemplo: cartón de 0.5x0.5 m) de acuerdo a la teoría de superficies de referencia propuesta por Jones (2014).
  - c) Altura del sensor térmico a la superficie de la hoja: 2.1 m.
  - d) Temperatura óptica externa: el entorno a la cámara no aporta variaciones significativas, por lo que se asumió igual a la temperatura del aire.
  - e) Transmisividad óptica externa: Se empleó la cámara en un entorno al aire libre y homogéneo, por lo que se asumió este valor igual a 1.
  - f) La temperatura y humedad relativa del aire: estimadas en campo por un sensor digital.
- Procesamiento de imágenes

El procesamiento de las imágenes tiene como finalidad la estimación de la temperatura foliar al momento de la captura de imagen, empleándose los siguientes métodos:



(\*1) y sensor digital de temperatura y humedad relativa: Emisividad (0.96, valor característico en coberturas de vegetación); temperatura del aire (sensor digital a una altura de 40 cm del suelo, en función a la altura del cultivo); temperatura reflejada (temperatura de perturbación alrededor de la cobertura vegetal); humedad relativa (sensor digital); distancia (altura desde la superficie del cultivo hasta el lente de la cámara térmica) y temperatura óptica externa (asumida similar a la temperatura del aire).

Figura 13: Procedimiento secuencial para uso y procesamiento de imágenes térmicas con una cámara FLIR E60.  
Fuente: Elaboración propia.

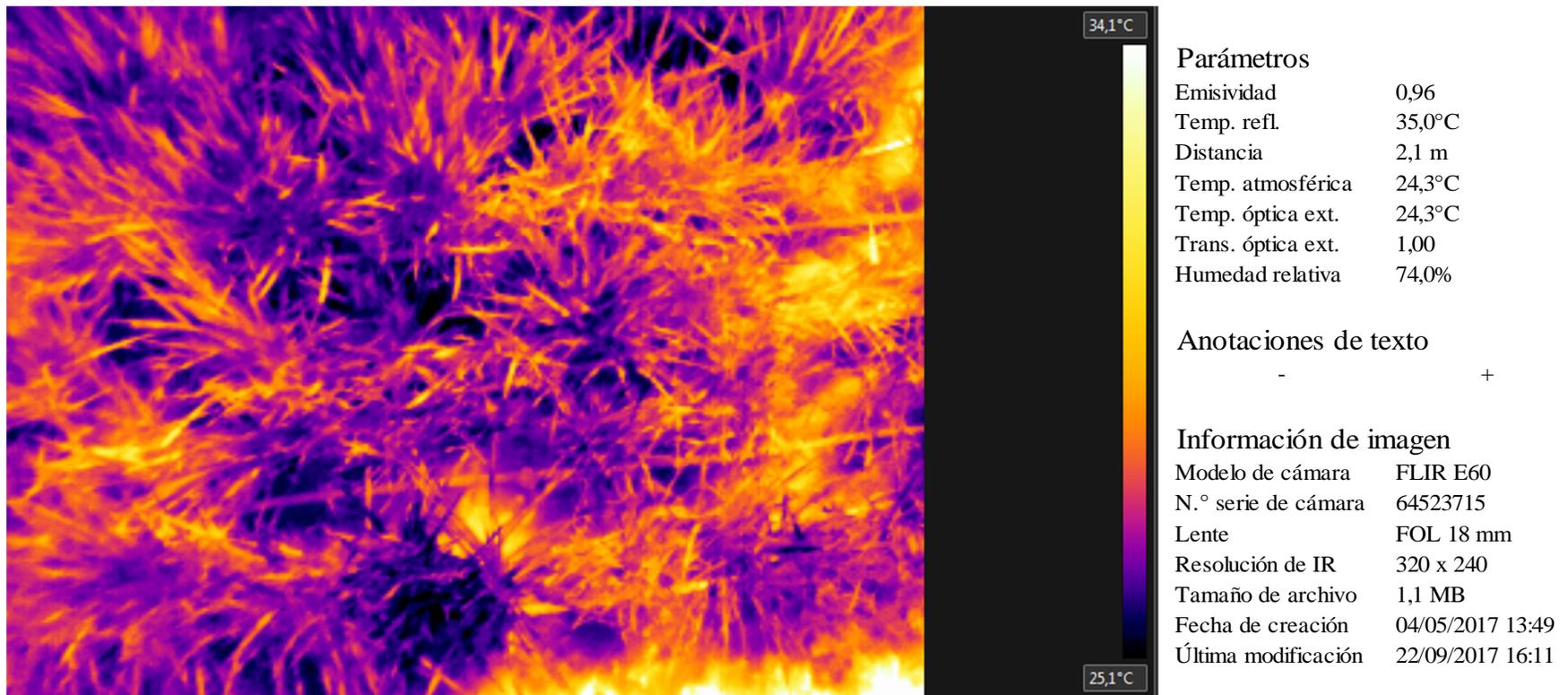


Figura 14: Parámetros requeridos en la calibración de imágenes térmicas empleando el software FLIR Tools.

Fuente: FLIR Tools.

a. Método temperaturas umbrales (temperaturas húmeda y seca del cultivo)

Como se desarrolló en la sección 2.4.1, este método involucró la estimación de temperaturas umbrales que permitan definir un rango de valores para la selección de pixeles de temperatura y el cálculo de la temperatura foliar.

- i. Este método fue propuesto en un inicio por Idso *et al.* (1981); realizándose el cálculo de las variables climáticas: temperatura de bulbo húmedo y presión de vapor de saturación, para hacer un cálculo actualizado de las temperaturas umbrales. Para ello, se recurrió a la ecuación psicrométrica propuesta por Pinazo (1995). En la Figura 15 se desarrolla el diagrama secuencial del código MatLab.
- ii. Así mismo, se desarrolló este método empleando las temperaturas húmedas y secas caracterizadas en la sección 3.3.2, como temperaturas umbrales para la selección de pixeles y cálculo de temperatura foliar. En la Figura 16 se presenta el diagrama secuencial del código MatLab elaborado para este método. Adicionalmente, en la Figura 18, se observa la extracción de pixeles de temperatura foliar realizado por dicho algoritmo a una imagen tomada el 25 de mayo (fase reproductiva) a la parcela de evaluación IV. (Ver ejemplos del cálculo en diferentes horarios en el Anexo 6)

b. Método de superposición de imágenes térmicas y ópticas

Este método se desarrolla teóricamente en la sección 2.4.2, y se basa en el empleo de imágenes térmicas y ópticas (RGB) para el reconocimiento de coberturas vegetales y selección de sus pixeles de temperatura. En la Figura 17 se desarrolla el diagrama secuencial del código MatLab elaborado para este método.

Adicionalmente, en la Figura 19 se observa la máscara de pixeles obtenida luego de procesar una imagen por el algoritmo del presente método; así como la división por canales (RGB) de la imagen a color real del día 14 de marzo (fase vegetativa) de la parcela de evaluación I.

### 3.3.3. Correlación del CWSI y la humedad volumétrica del suelo

Finalmente, se desarrolló la tercera etapa de la metodología planteada en la Figura 10; en la cual se buscó establecer una correlación entre cada método y los valores estimados por los STT para poder validar los métodos de procesamiento de imágenes térmicas; y su posterior correlación con la información de humedad de suelo correlativa.

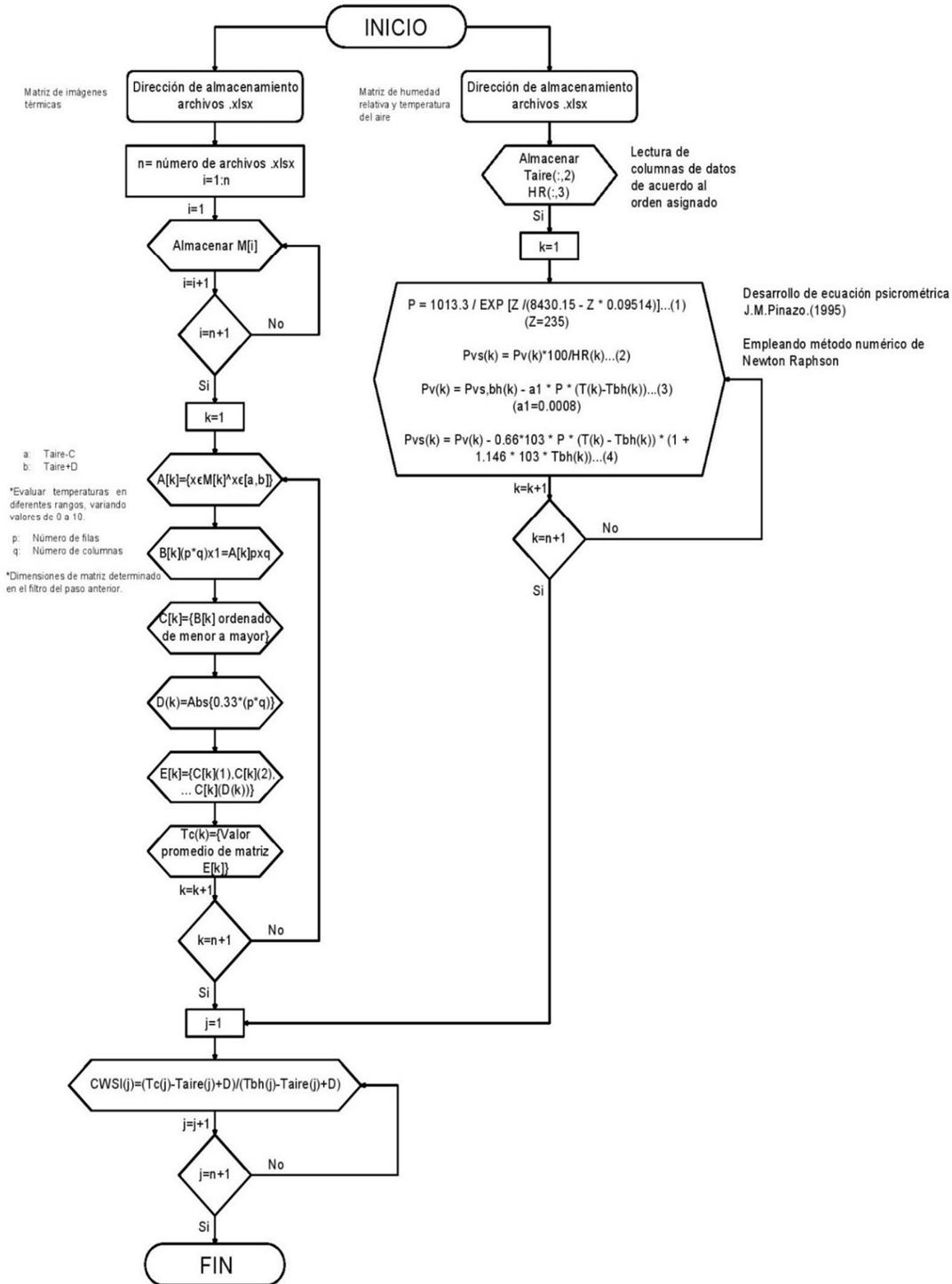


Figura 15: Diagrama de flujo de estimación del CWSI empleando temperaturas umbrales y variables meteorológicas (humedad relativa, temperatura del aire y temperaturas de bulbo seco y húmedo), estimadas mediante la ecuación psicrométrica propuesta por Pinazo (1995).

Fuente: Elaboración propia.

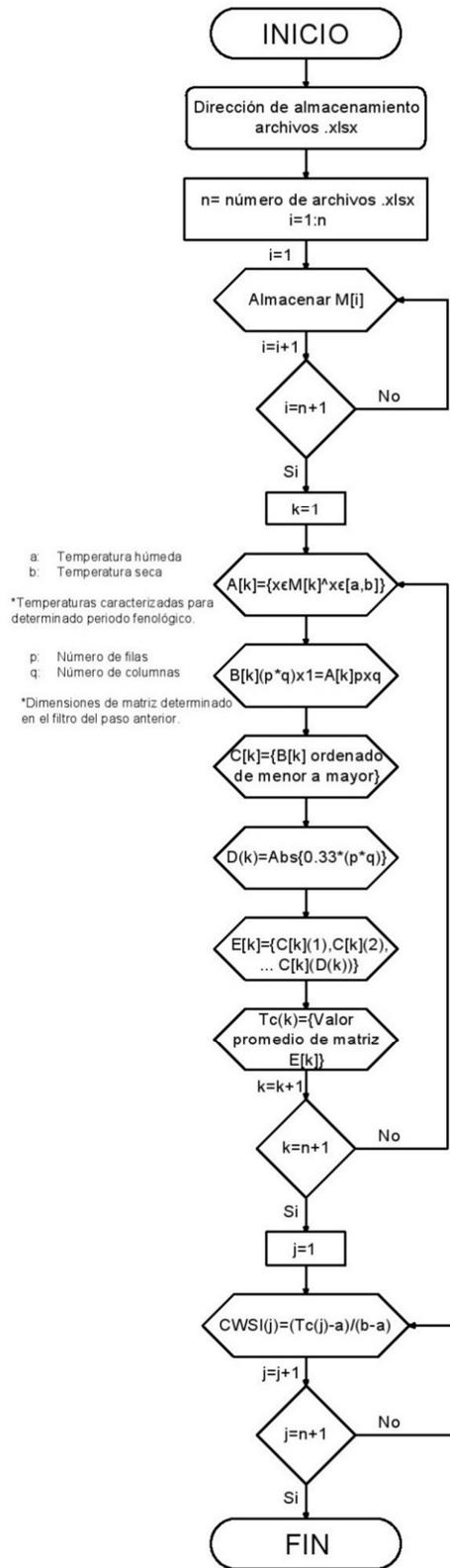


Figura 16: Diagrama de flujo de estimación del CWSI empleando temperaturas umbrales húmeda y seca del cultivo.  
 Fuente: Elaboración propia

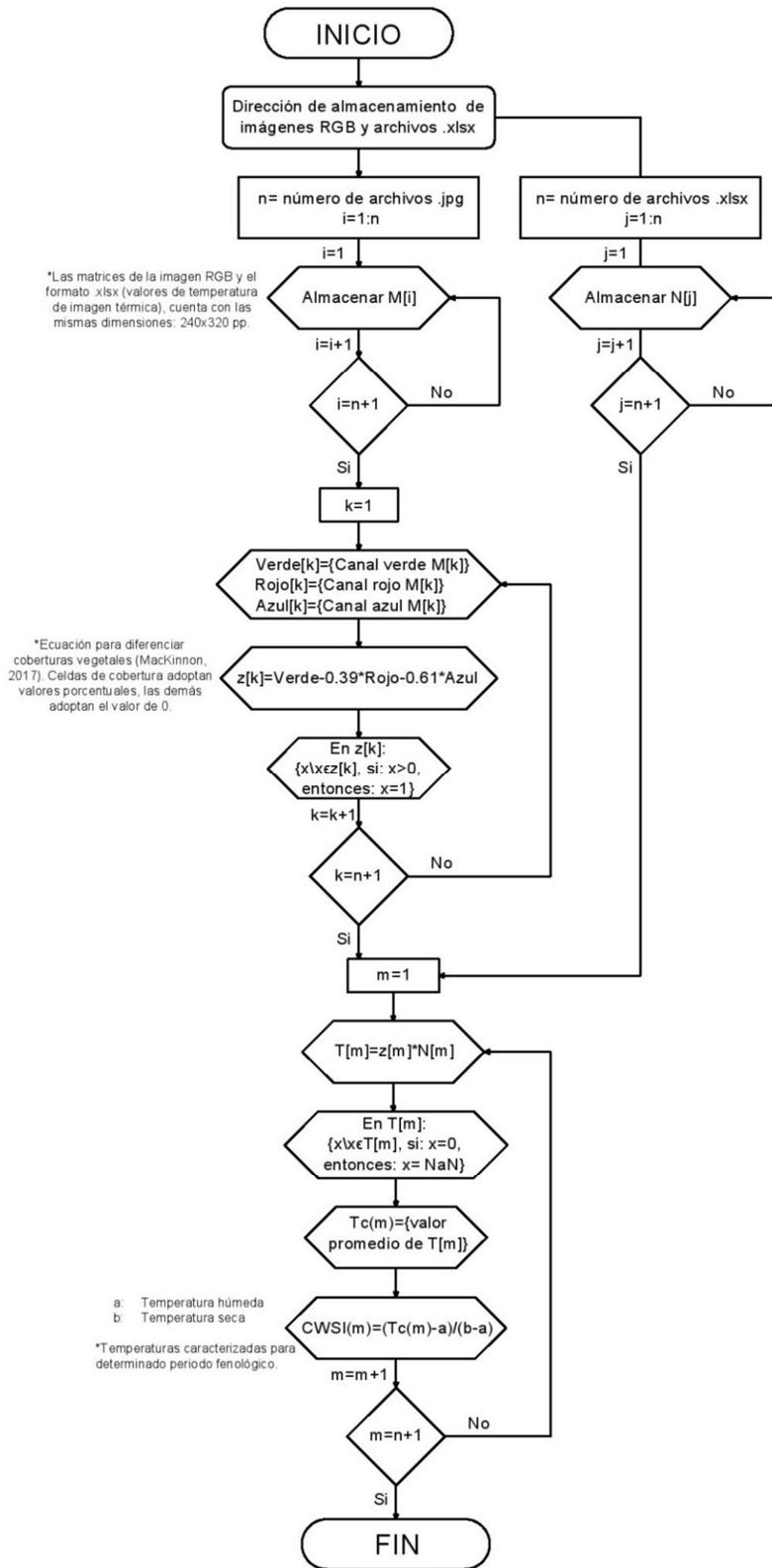


Figura 17: Diagrama de flujo de estimación del CWSI empleando la superposición de imágenes térmicas y ópticas.  
Fuente: Elaboración propia.

Panel izquierdo

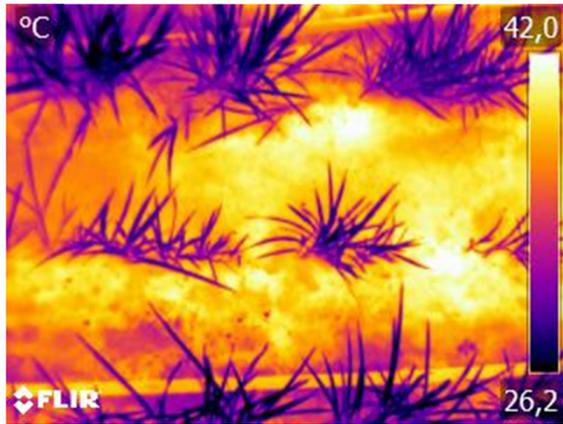


Imagen térmica

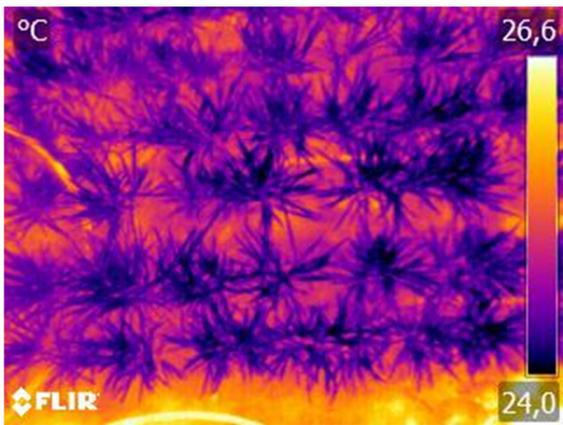


Imagen térmica

Panel derecho

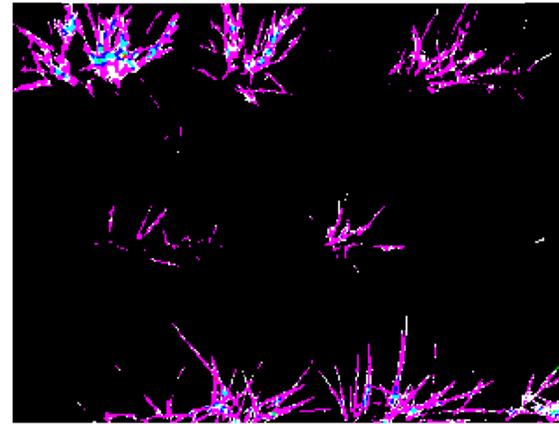


Imagen procesada

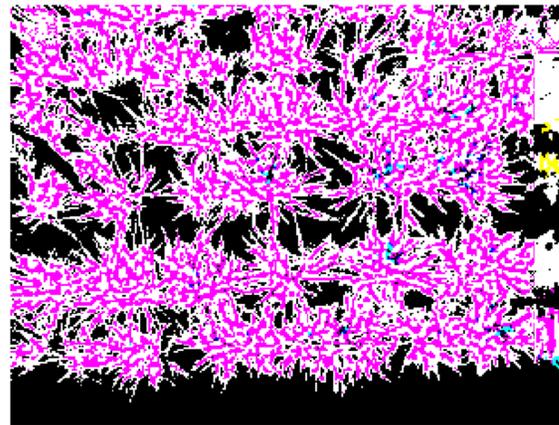


Imagen procesada

Figura 18: Imágenes térmicas antes del procesamiento (panel izquierdo) y después del procesamiento (panel derecho) por el método de temperaturas umbrales, en la parcela de evaluación IV, obtenidas el 18 de marzo y 25 de mayo.

Fuente: Elaboración propia.

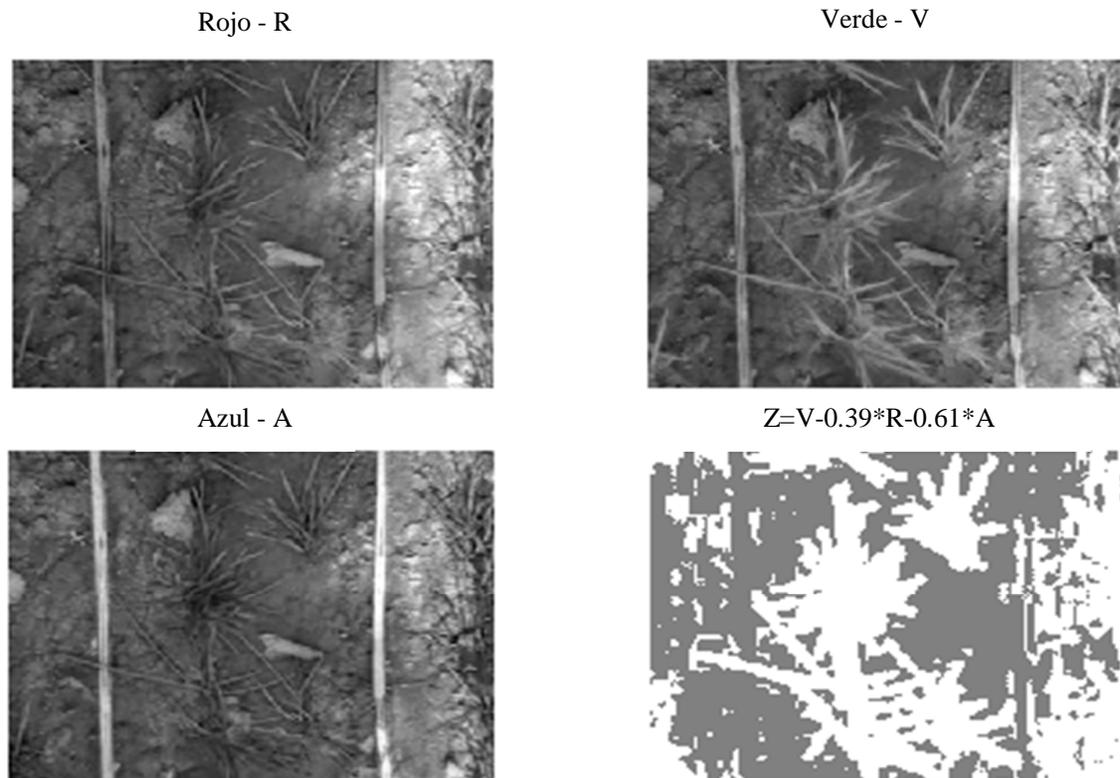


Figura 19: Imagen multiespectral del cultivo: banda roja (R), banda verde (V) y banda azul (A) y máscara de cobertura vegetal (z) obtenida de la fórmula  $z=V-0.39R-0.61A$ , propuesta por McKinnon and Hoff (2017), en la parcela de evaluación I, en la fase vegetativa, el 14 de marzo.  
Fuente: Elaborado con información de McKinnon and Hoff (2017).

Para tal fin, se realizó el siguiente procedimiento inicial:

- a) Se seleccionó y agrupó los valores de CWSI calculado por cada método a las cuatro parcelas de evaluación en las cuales se instalaron los STT.
- b) Se identificó la hora exacta de captura de imagen (hora y minutos del día) para cada valor calculado de CWSI.
- c) Se identificó el valor de CWSI promedio estimado con STT de cada parcela y al mismo momento de captura de imagen y su valor de CWSI estimado por el algoritmo.
- d) Se agruparon en tres grupos los valores de CWSI estimados por el método, de acuerdo al horario de captura de imagen (mañana, mediodía y tarde).
- e) Se realizó un análisis de "t" de Student, con grado de significancia del 5% para la información de temperaturas agrupada.
- f) Se estimó un coeficiente de correlación de Pearson entre los valores de CWSI medidos por los STT, medidos al mismo momento que la captura de imágenes térmicas, y valores de CWSI calculados por el método para cada horario.
- g) Se repitió el mismo procedimiento con cada método.

Este paso previo fue necesario para determinar el grupo de datos de mejor correlación, precisión y consistencia estadística, para luego, calcular las correlaciones entre los valores de CWSI y la humedad volumétrica del suelo; teniéndose también que emplear un análisis estadístico sobre los datos de humedad de suelo estimados por los sensores FDR.

Empleando estos dos grupos de datos se procedió de la siguiente manera:

- a) Se diferenció los datos de CWSI estimados por los STT y valores de humedad volumétrica del suelo por cada parcela evaluada.
- b) Se dividió los datos por parcela en dos grupos, correspondiente a las dos fases fenológicas de análisis.
- c) Se filtró, para cada grupo, los valores de CWSI de los STT y valores de humedad volumétrica del suelo, correspondientes a las 13:00 hrs de cada día, en cada periodo evaluado.
- d) Se generó un gráfico de dispersión que correlacionaba los valores de CWSI promedio de cada parcela con el valor correspondiente de humedad volumétrica del

suelo, para cada parcela y por fase fenológica, diferenciando los datos de sensores de humedad a 15 y 30 cm en dos gráficos distintos; y un gráfico de evolución diaria del CWSI y humedad volumétrica del suelo para cada fase fenológica, diferenciando los datos de sensores a 15 y 30 cm en gráficos distintos.

## **IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES**

En la siguiente sección se desarrolló la presentación y discusión de resultados en base a cada objetivo específico planteado, dividiéndose en tres partes. La primera presenta los resultados de la caracterización de temperaturas umbrales del cultivo y variables climáticas locales, necesarias para la estimación y análisis del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI). La segunda parte, consiste en el desarrollo de los resultados de temperaturas foliares estimadas por los métodos de procesamiento de imágenes y los sensores térmicos de termocuplas (STT), que, en conjunto con la información preliminar de variables y temperaturas caracterizadas, permite la estimación del índice de estrés hídrico foliar. Finalmente, la tercera parte desarrolla las correlaciones obtenidas entre los índices de CWSI y sus correlativas humedades de suelo, y la evaluación del comportamiento predictivo entre ambas variables.

### **4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS TEMPERATURAS UMBRALES POR FASE FENOLÓGICA**

Primero, se realizó la descarga, análisis y depuración de información cincominutal de temperaturas medidas por los sensores térmicos de termocuplas (STT), humedad relativa y temperatura del aire. En la Figura 20 se observa el comportamiento de la información total de temperaturas de STT (mediciones directas del cultivo) con la temperatura del aire desde el 20 de mayo al 02 de agosto. Antes del 20 de mayo no se contó con los equipos en campo debido a que no era viable su instalación en las pequeñas y frágiles hojas del cultivo. Así mismo, en la Figura 21 se observa el comportamiento de la variable de la humedad relativa del aire en el mismo periodo.

Una condición preliminar para la estimación de las temperaturas húmeda y seca del cultivo es la comparación entre la temperatura foliar y la temperatura del aire. Por tal motivo, se presenta en la Figura 22 el análisis realizado a la temperatura horaria del aire para los periodos evaluados. Para su elaboración se emplearon todos los datos horarios colectados dentro de los periodos de tiempo indicados. Similarmente, se elaboró la Figura 23, en la cual se caracterizó las humedades relativas del aire a las 08:00 hrs. y 13:00 hrs. del día, para su posterior análisis con las temperaturas húmedas y secas.

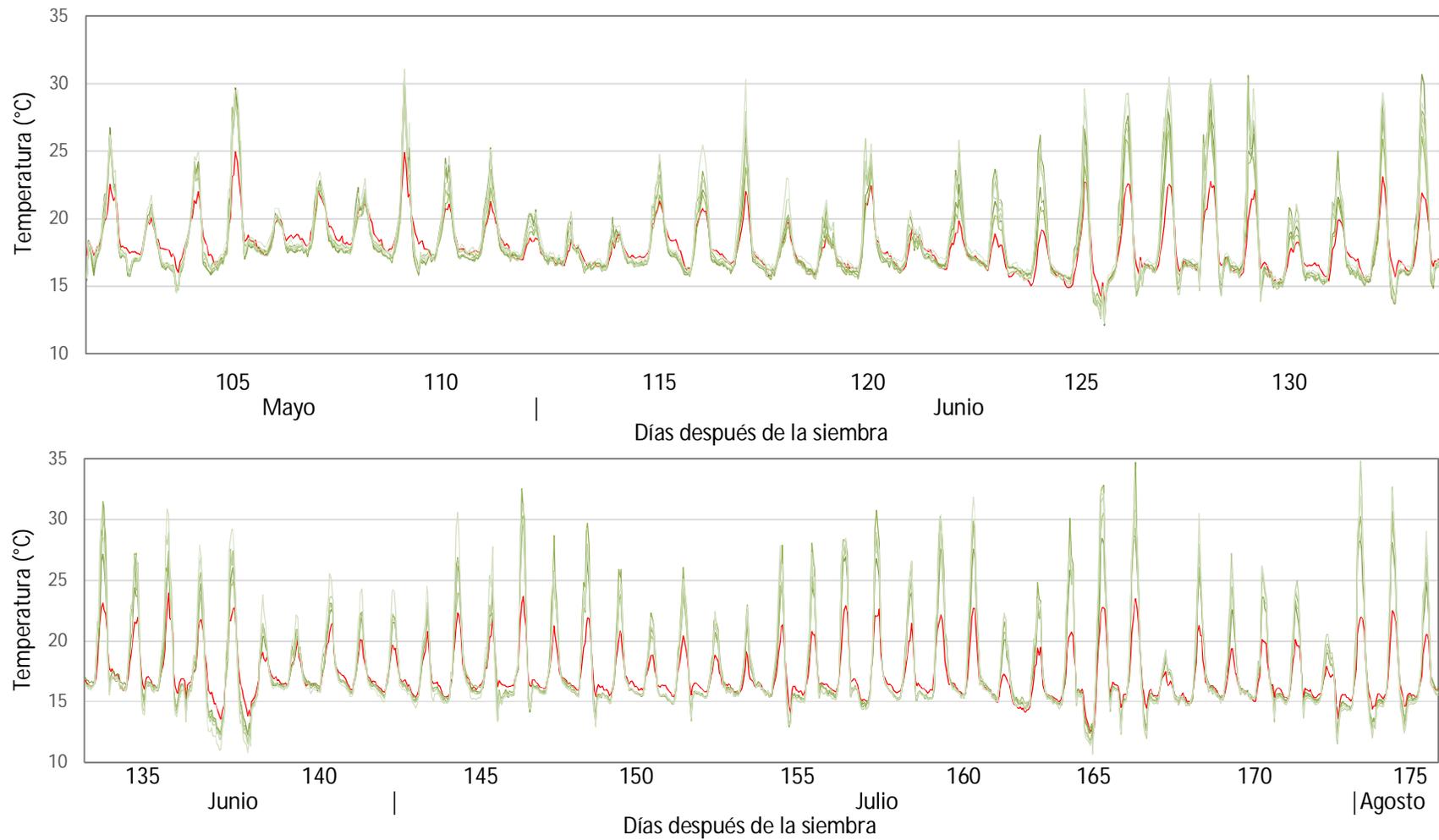


Figura 20: Variación cincominutal de la temperatura foliar estimadas por los STT (líneas de color verde) y temperatura del aire (línea roja), del 20 de mayo al 02 de agosto del 2017. Antes del 20 de mayo no se dispuso de los STT.

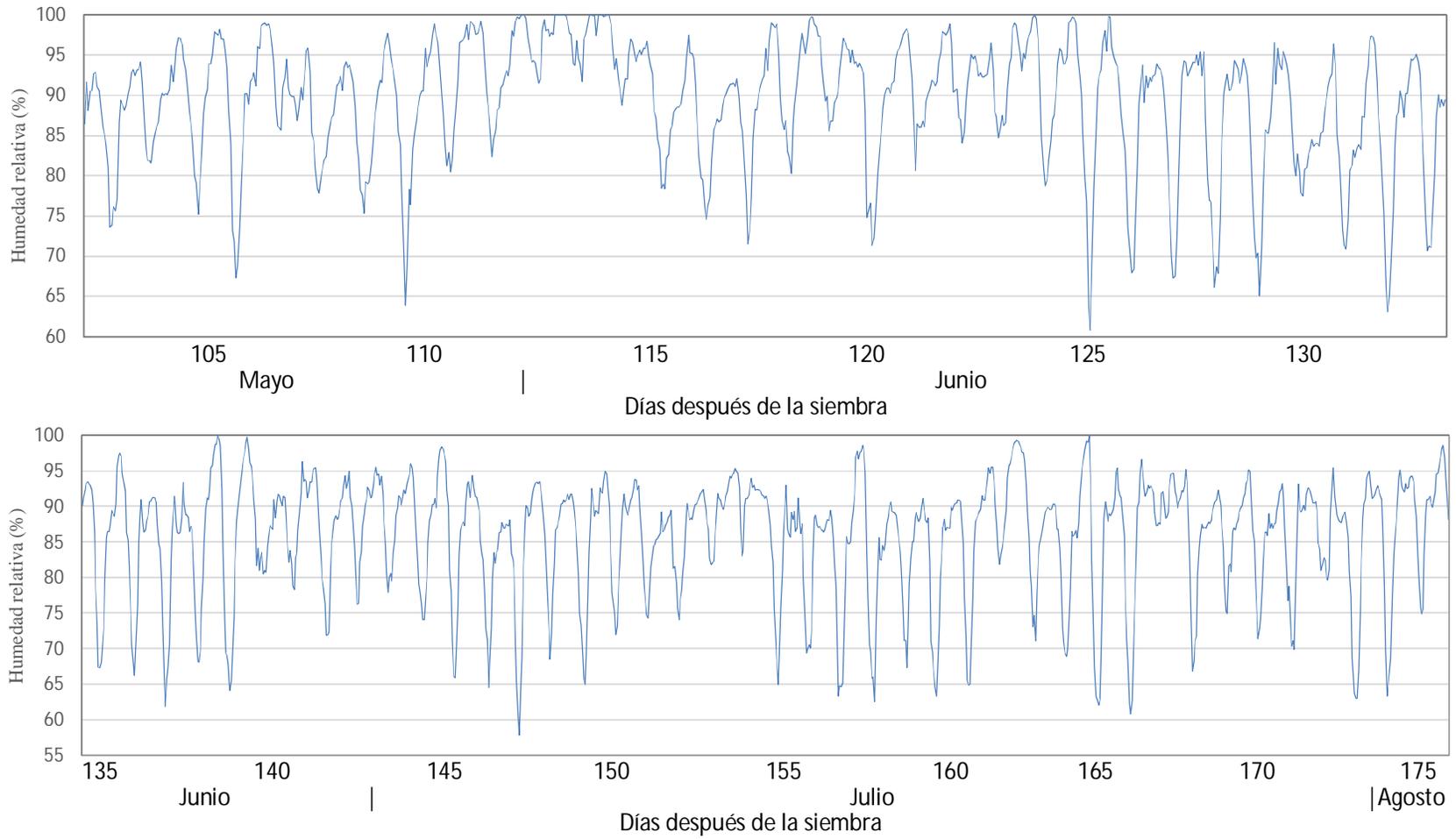


Figura 21: Variación cincominutal de la humedad relativa del aire estimado por sensor digital de humedad y temperatura del aire instalado en campo, del 20 de mayo al 02 de agosto del 2017.

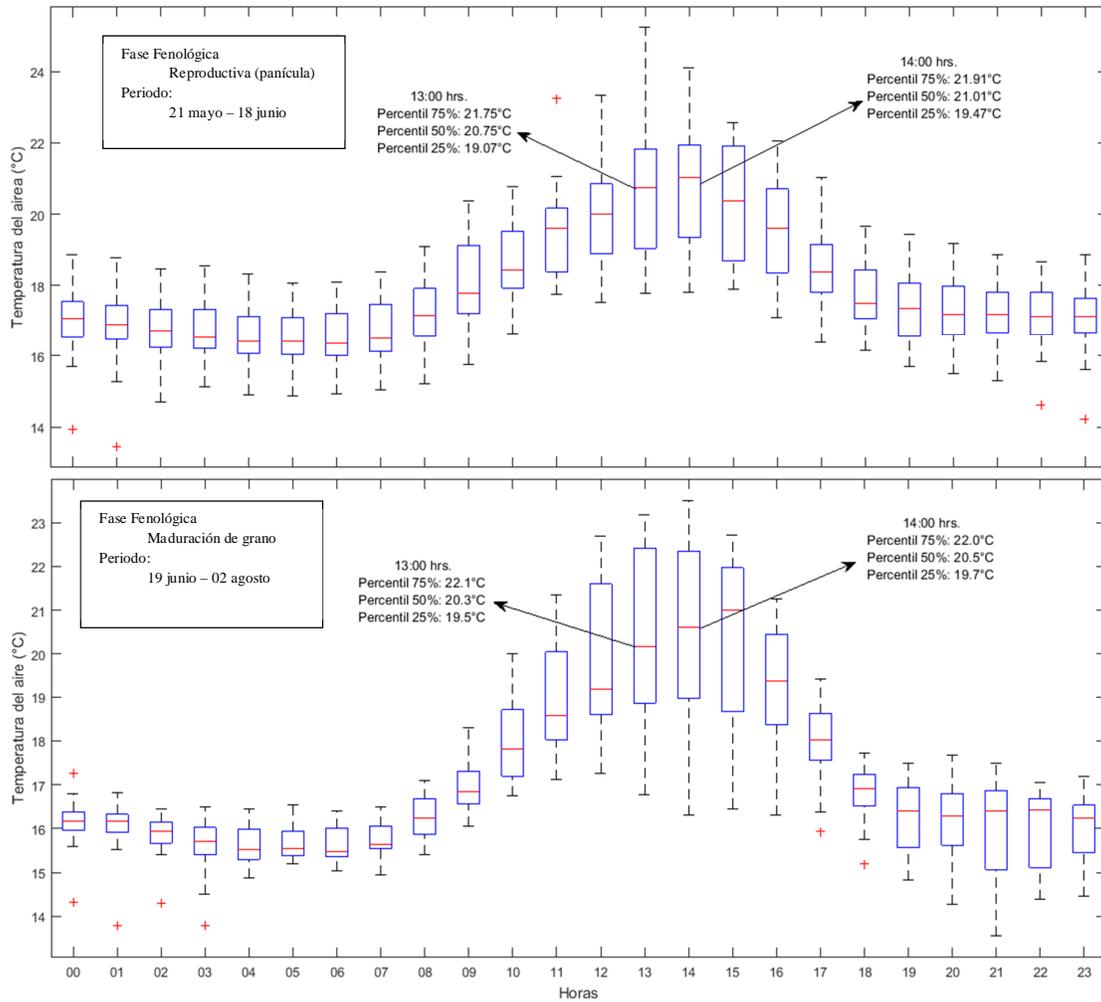


Figura 22: Comportamiento promedio horario de la temperatura del aire (a) en la fase reproductiva (panel superior) y (b) en la fase de maduración (panel inferior).

Se determinó que las máximas temperaturas del aire se produjeron alrededor de las 12:00 y 14:00 horas del día en ambas fases fenológicas, obteniéndose los valores máximos del día a las 13:00 horas, diferenciando además los percentiles 25 y 75 de cada hora del día. Posteriormente, esta segmentación de valores fue útil para calcular la intersección de la temperatura del aire con la temperatura del cultivo en horas de la mañana.

Las temperaturas medias del aire para los dos periodos evaluados fueron de 17.96°C y 17.15°C, variando en un rango de 13.50°C a 25.30°C y de 11.82°C a 24.05°C, respectivamente.

Análogamente al análisis de la temperatura del aire, se obtuvieron los percentiles 25, 50 y 75 de los datos horarios, obteniéndose un valor promedio de 93.1% y 90% en

horas de la mañana en la fase reproductiva y de maduración, respectivamente, y de 78.5% y 72.2% a las 13:00 hrs. Las humedades relativas medias del aire para los dos periodos evaluados fueron de 89.29% y 85.68%, variando en un rango de 58.4% a 100% y de 57.1% a 100%, respectivamente.

A continuación, se determinó los valores de temperatura húmeda y seca a partir de un análisis de las temperaturas foliares en los momentos de máximas temperaturas y en el momento de equiparación de temperaturas del aire y foliar, en horas de la mañana, como se muestra en la Figura 24; habiéndose empleado los datos de los STT para cada fase fenológica.

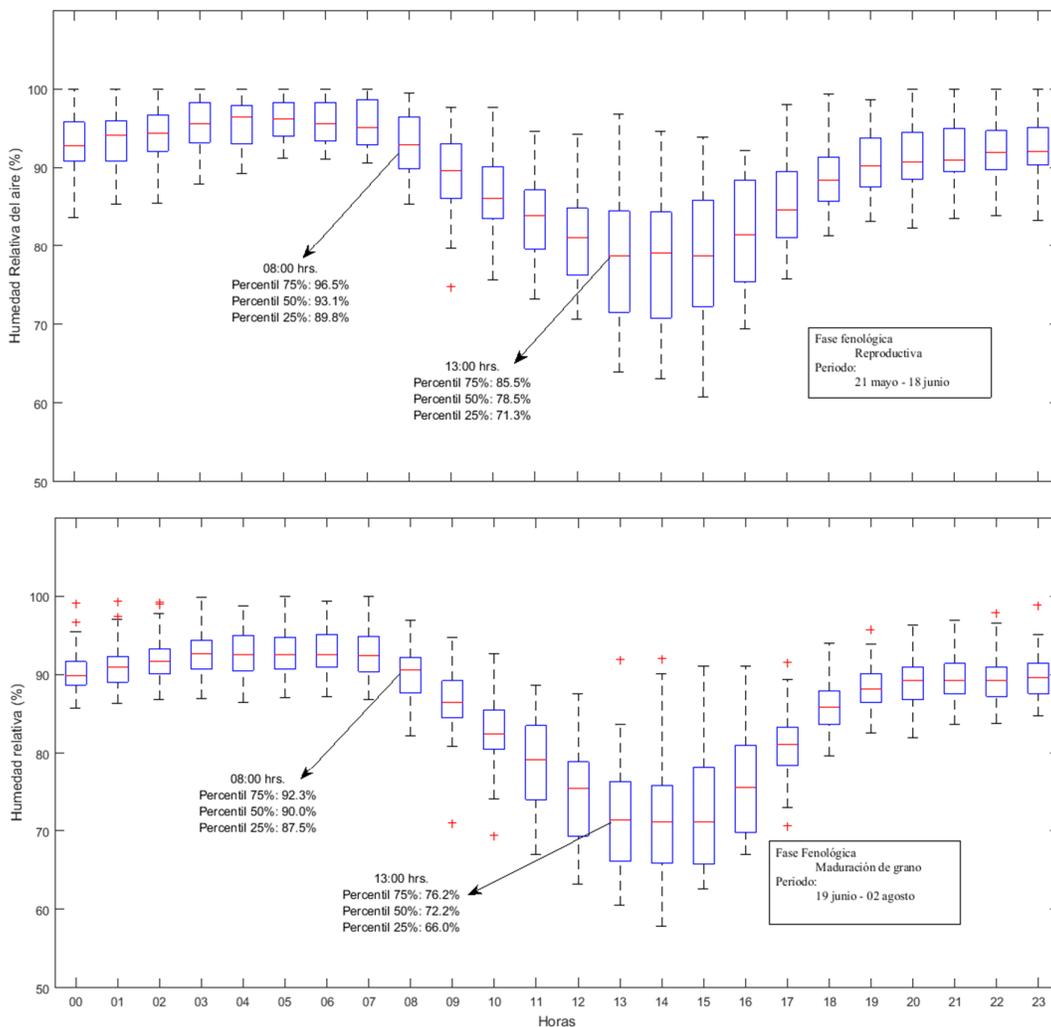


Figura 23: Comportamiento promedio horario de la humedad relativa del aire (a) en la fase reproductiva (panel superior) y (b) en la fase de maduración de grano (panel inferior).

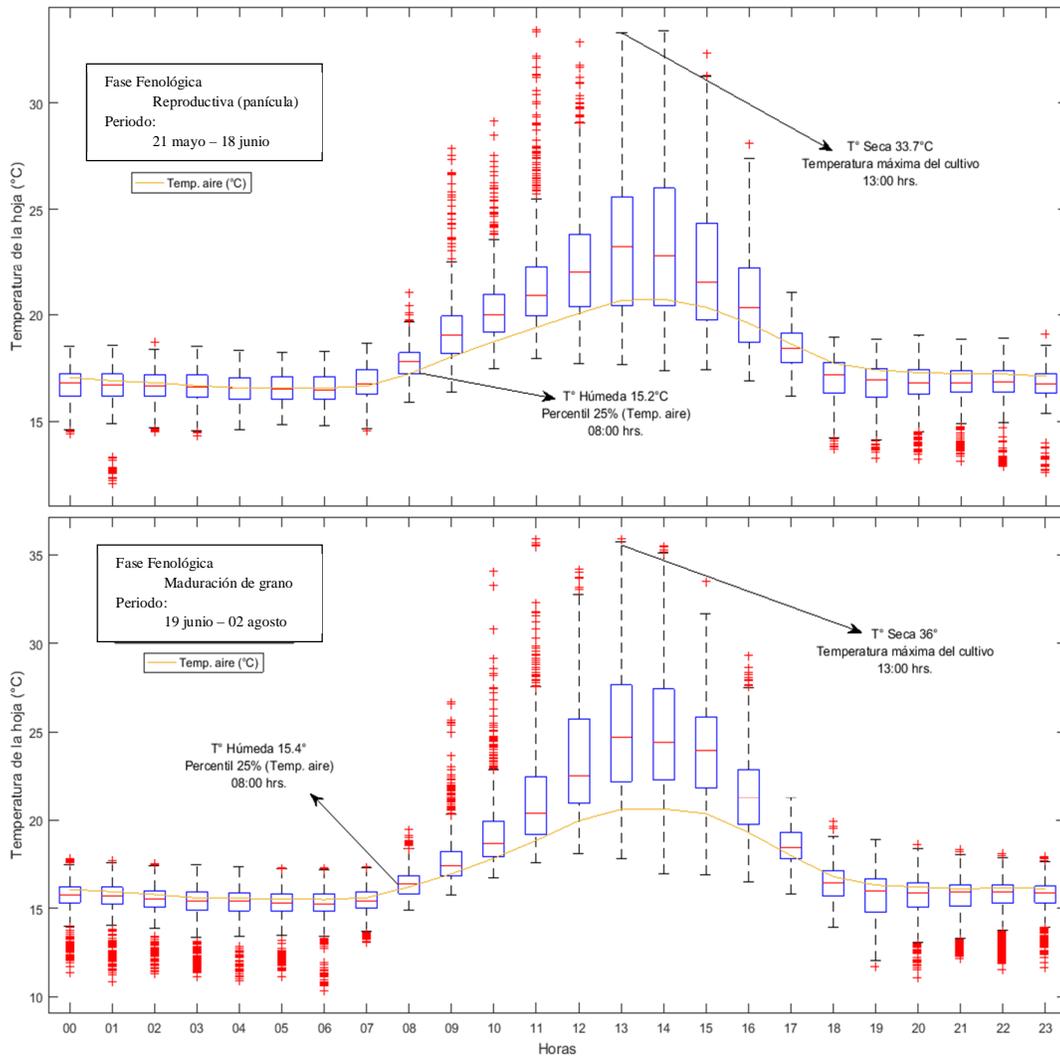


Figura 24: Variación horaria de la temperatura promedio foliar (a) en la fase reproductiva (panel superior) y (b) fase de maduración (panel inferior).

El intervalo de horas en que la temperatura foliar es menor a la temperatura del aire corresponde a un periodo de adormecimiento del cultivo, produciéndose un intercambio de gases con el medio y el cierre de estomas de la hoja. (Jones, 2014). Se asoció el valor mínimo de temperatura de estrés hídrico foliar a las 08:00 hrs, en cada fase fenológica; coincidiendo aproximadamente la temperatura promedio foliar con el percentil 25 de la temperatura promedio del aire. El valor de máximo estrés 15.2°C, en la fase reproductiva o panícula, y 15.4°C, en la fase de maduración de grano. Se estimó el valor máximo de temperatura de estrés hídrico foliar a las 13:00 hrs, en cada fase fenológica. El valor máximo de temperatura de estrés fue 33.7°C, en la fase reproductiva, y 36.0°C, en la fase de maduración.

Se resumió los valores de las temperaturas umbrales caracterizados para cada fase fenológica en el Cuadro 4. Para el caso de macollamiento se asumieron los mismos valores que en la fase reproductiva debido a que se contó con las mismas condiciones climatológicas.

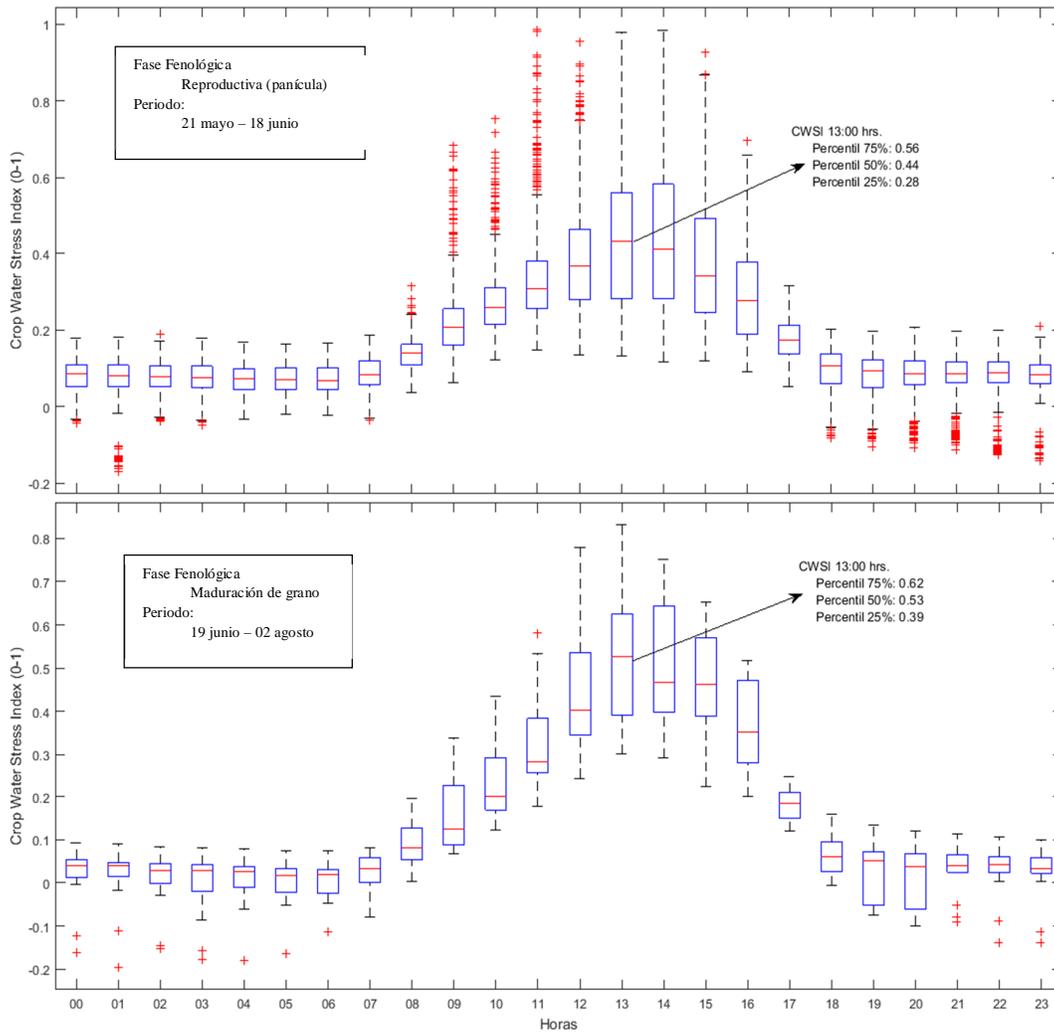


Figura 25: Variación del índice de estrés hídrico foliar (a) en la fase reproductiva (panel superior) y (b) en la fase de maduración (panel inferior).

Cuadro 4: Temperaturas umbrales para cada fase fenológica del cultivo.

Fase fenológica	Temperatura húmeda	Temperatura seca
Vegetativa	15.2	33.7
Reproductiva	15.2	33.7
Maduración de grano	15.4	36.0

- Estimación horaria del índice de estrés hídrico foliar empleando mediciones de los STT

Al disponer de las temperaturas umbrales húmeda y seca del cultivo para cada fase fenológica se pudo realizar el cálculo del índice de estrés hídrico foliar horario, la cual resulta en valores mostrados en la Figura 25; adquiriendo máximos valores alrededor de las 13:00 hrs. que corresponden al momento de máximo requerimiento hídrico del día, y valores negativos en el intervalo de horas correspondientes al adormecimiento nocturno, careciendo de significancia en estos horarios debido a que se trata de un comportamiento de no transpiración del cultivo.

Si bien se calculó los valores de CWSI horarios para cada fase, conceptualmente para estimar el máximo requerimiento hídrico del cultivo es necesario únicamente los valores máximos de temperatura, considerándose los valores dentro del intervalo horario de 12:30 a 13:30 hrs los más apropiados para el análisis y correlación con otros parámetros del cultivo.

#### **4.2. OBTENCIÓN DEL CWSI A PARTIR DE TEMPERATURAS FOLIARES**

Para la validación del método de temperaturas umbrales húmeda y seca se realizó una prueba de "t" de Student (Anexo 7), y posterior correlación con los valores estimados por los STT, como se muestra en la Figura 26, a partir del análisis de 40 datos de las parcelas de evaluación de 10 fechas distintas en el horario de 12:00 a 14:00 hrs.

Así mismo, en la Figura 27 se estimó una correlación entre los métodos de superposición de imágenes térmicas y el método de temperaturas umbrales a partir del análisis de 16 datos de las parcelas de evaluación, en 14 fechas distintas de la fase fenológica vegetativa o macollamiento, en el horario de 12:00 a 14:00 hrs. Previamente se realizó la prueba "t" de Student entre ambos grupos de datos (Anexo 8).

Se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de 0.91 entre los valores de CWSI estimados por los STT y por el método de temperaturas umbrales; y de 0.93 entre el método de temperaturas umbrales y de superposición de imágenes.

Se empleó imágenes correspondientes a la fase vegetativa o macollamiento para la estimación del CWSI por el método de superposición de imágenes, debido a ser el

único periodo en el cual se contó con imágenes adecuadas para emplear este método, el cual exige una alta correlación espacial entre ambas imágenes (térmica y óptica).

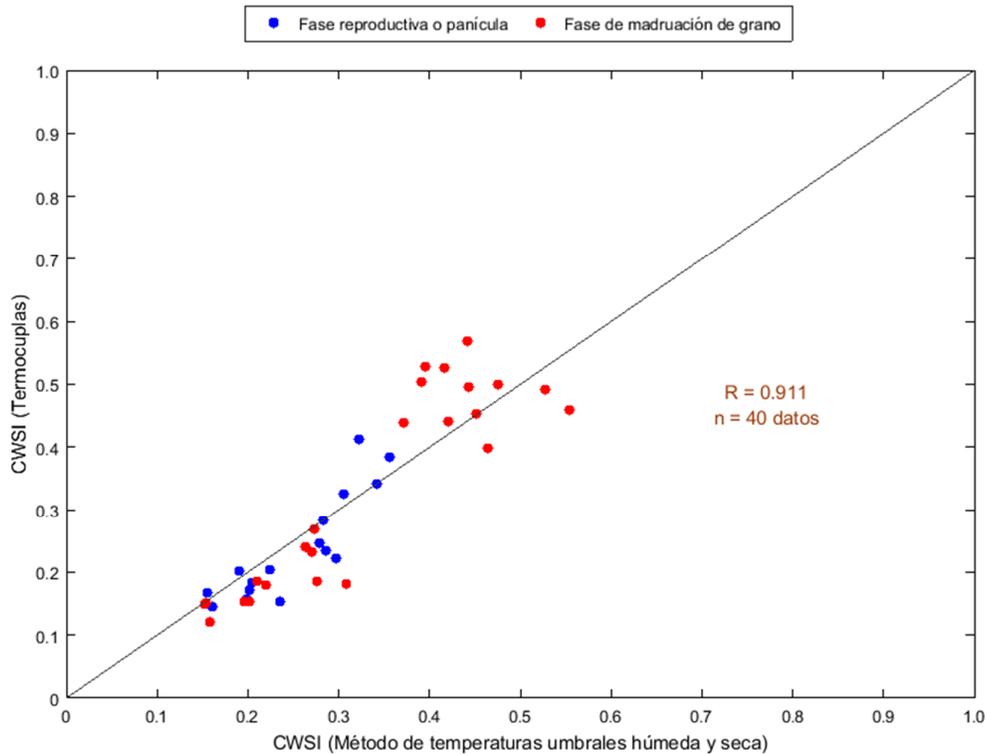


Figura 26: Correlación el CWSI estimados por los STT y el CWSI estimado por el método de temperaturas umbrales en las fases fenológicas reproductiva y de maduración.

Esto debido a que en este periodo no se empleó el lente amplificador, dado que se contaba con un cultivo con escasa cobertura vegetal; siendo el lente amplificador necesario posteriormente a medida que el cultivo cubría mayor área, pero que, en contraposición, generaba imágenes ópticas más amplias que las térmicas.

Así también, se empleó los STT a partir de la fase reproductiva del cultivo debido a que a partir de ese momento era viable instalar este sistema en el cultivo, limitado básicamente por el tamaño de la hoja del cultivo.

Se estimó un coeficiente de correlación de 0.85 como el mínimo valor de correlación de Pearson que se puede alcanzar entre el método de superposición de imágenes y la medición con los STT, a partir de los coeficientes de correlación entre los métodos calculados anteriormente.

Esta metodología sobreestima los valores de temperatura, pudiéndose deber al filtrado de pixeles de temperatura de la cobertura del suelo (errores de borde en la superposición) cuya temperatura es considerablemente mayor.

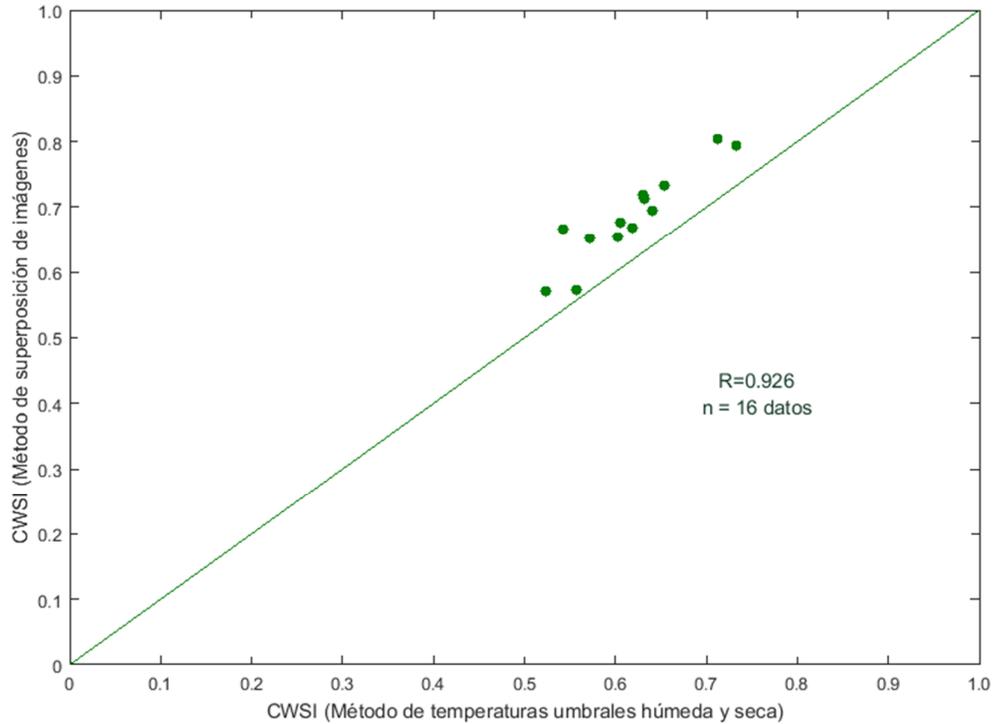


Figura 27: Correlación entre el CWSI estimado por los métodos de temperaturas umbrales y superposición de imágenes, en la fase fenológica vegetativa.

- Estimación diaria del índice de estrés hídrico foliar por el método de temperaturas umbrales

Para poder realizar un análisis diario del desarrollo del cultivo se decidió evaluar la variación del índice de estrés de hídrico del cultivo de las parcelas de evaluación con imágenes obtenidas en el horario de 12:00 hrs a 14:00 hrs, en las fases vegetativa, reproductiva y de maduración. Los valores de CWSI promedios de las parcelas de evaluación (considerando en el análisis la totalidad de pixeles de las imágenes) para los días muestreados se presentan en la Figura 28.

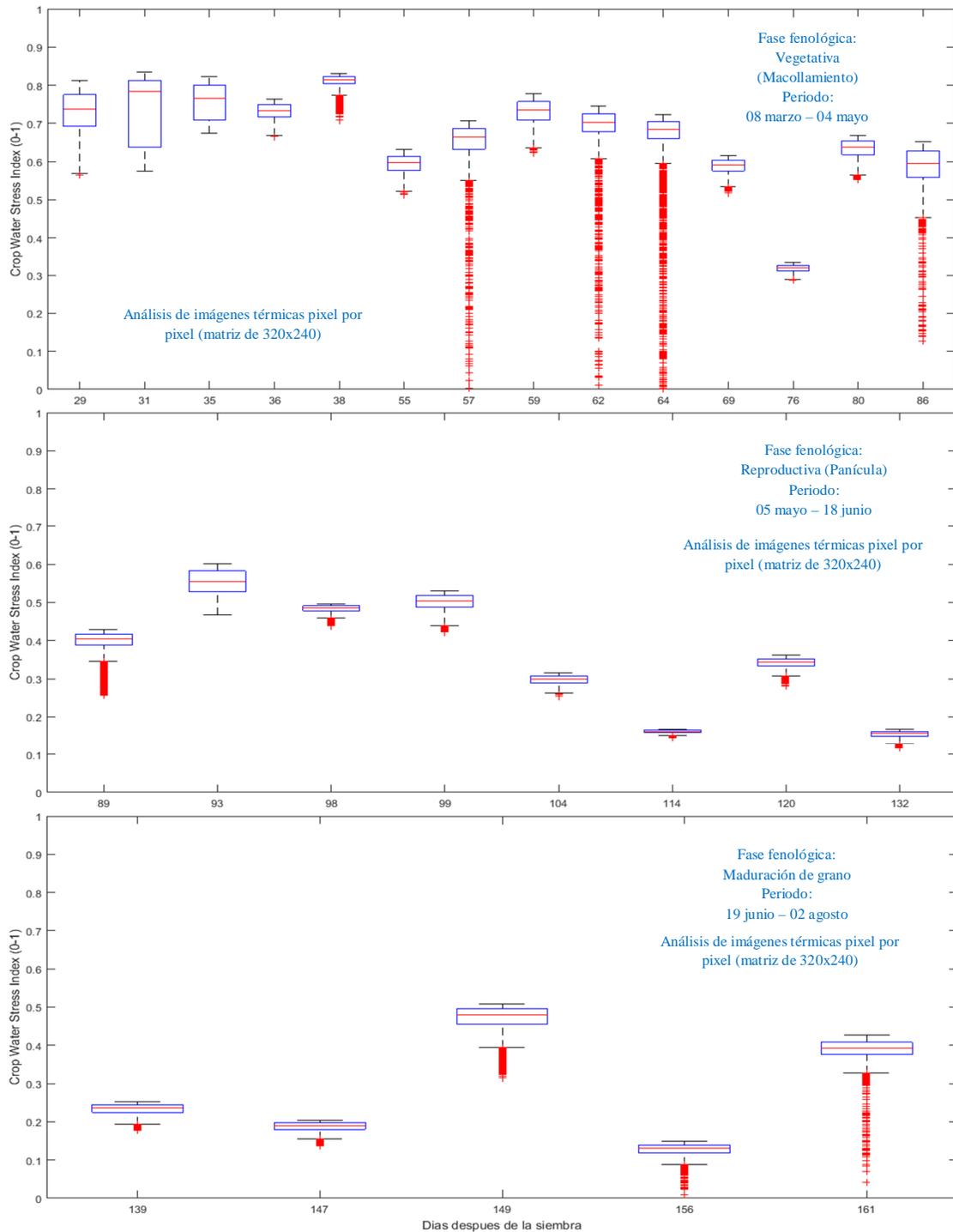


Figura 28: Variación del índice de estrés de hídrico del (a) en la fase vegetativa (panel superior), (b) la fase reproductiva (panel medio) y (c) la fase de maduración (panel inferior).

Los valores altos del periodo de macollamiento se pueden deber a dos motivos, el primero, debido a los cortes de agua en la universidad producidos en el mes de febrero y marzo del 2017, y segundo, debido a las condiciones de altas

temperaturas, que, además, se dilataron hasta el periodo de la fase reproductiva; sin embargo, se estimó menores valores de CWSI para este segundo periodo.

Se relacionó los valores bajos de CWSI en la fase de maduración a la caída de la temperatura del ambiente debido al cambio de estación que se dio entre los meses de junio y julio. Sin embargo, al contar con una relativa baja temperatura de aire no es posible determinar el máximo requerimiento hídrico. Concluyéndose que no es recomendable emplear el índice bajo condiciones de bajas temperaturas.

Se observó valores que escapan al rango calculado, atribuyéndolos a imágenes que fueron obtenidas en el momento de riego, tal que, al momento de procesar las imágenes por el método de umbrales de temperatura, es posible que dentro del cálculo de pixeles se hayan filtrado valores que corresponderían a la cobertura de suelo húmedo, escapando del rango de temperaturas que corresponden a la cobertura de cultivo.

- ✓ Estimación diaria del índice de estrés hídrico foliar por el método de superposición de imágenes térmicas y ópticas

Se realizó la estimación del índice de estrés hídrico foliar por el método de superposición de imágenes. (Ver Figura 29)

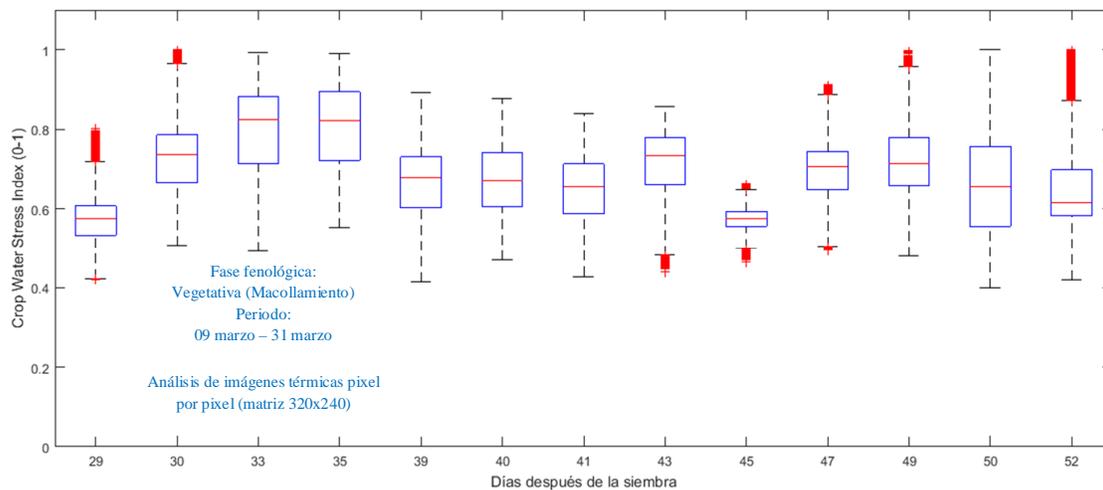


Figura 29: Valores de índice de estrés hídrico foliar estimados por el método de superposición de imágenes en la fase vegetativa.

El cálculo por este método se efectuó con imágenes correspondientes a la fase vegetativa, debido a ser el único periodo en el cual se contó con imágenes térmicas

y de color real (RGB) adecuadamente traslapadas, debido a que no se empleó el lente amplificador de la cámara FLIR E60, el cual permitía capturar mayor área, pero generaba imágenes ópticas de mayor tamaño que sus correlativas imágenes térmicas.

Se detectó valores de pixeles que escapan al rango de temperatura, asociándolos a la filtración de datos de cobertura de suelo, la cual se encuentra a mayor temperatura que la cobertura vegetal, persistiendo un error significativo.

### **4.3. CORRELACIÓN DEL CWSI Y LA HUMEDAD DEL SUELO**

En la Figura 30 se presenta la información de datos de humedad volumétrica del suelo recolectada del 01 de abril al 30 de julio del 2017. Las lecturas del colector de datos se programaron cada media hora, debido a la lenta variación de estos valores, en comparación a la de las temperaturas del aire y cultivo.

Se presenta en la Figura 31 las correlaciones inversas entre los valores de CWSI (variable independiente) estimados con los STT e imágenes térmicas con la humedad del suelo (variable dependiente) medida en la fase reproductiva. Esta correlación inversa, se justifica con la correspondencia de que, a menor humedad del suelo mayor es el requerimiento hídrico y, por ende, mayor es el índice de estrés hídrico foliar. Previamente, esta información se sometió a la prueba de "t" de Student (Anexo 9).

Se observó un grado de dependencia lineal negativa igual a -0.51 y -0.54, entre la información de los STT e imágenes térmicas con la humedad del suelo medida a 30 cm de profundidad, en la fase reproductiva. Los resultados a esta profundidad tienen una mejor correlación que los obtenidos a 15 cm, debido a que, a menor profundidad, la humedad del suelo es afectada por la evapotranspiración diaria. Sin embargo, en la fase de maduración de grano, no se obtuvo ninguna correlación debido a las bajas temperaturas y alta humedad relativa para poder realizar un muestreo adecuado con los sensores térmicos, como se explicó en la sección 2.2.

En la Figura 32 se presenta la variación diaria de la humedad volumétrica del suelo, medida por los sensores FDR a 15 cm de profundidad, y los valores promedio de CWSI estimados por los STT en las parcelas de evaluación II, III y IV. Se empleó información de 74 días, correspondiente a la fase reproductiva y de maduración, a las 13:00 hrs.

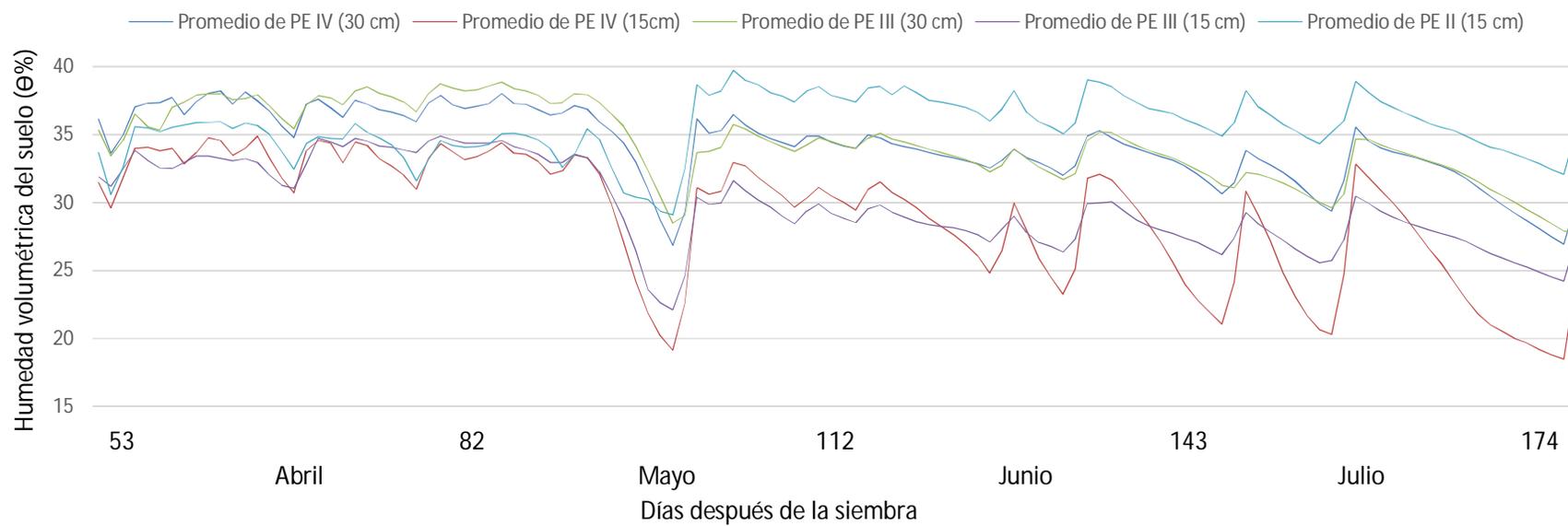


Figura 30: Registro de humedad volumétrica del suelo cada media hora de cinco sensores (FDR) ubicados en las parcelas de evaluación.

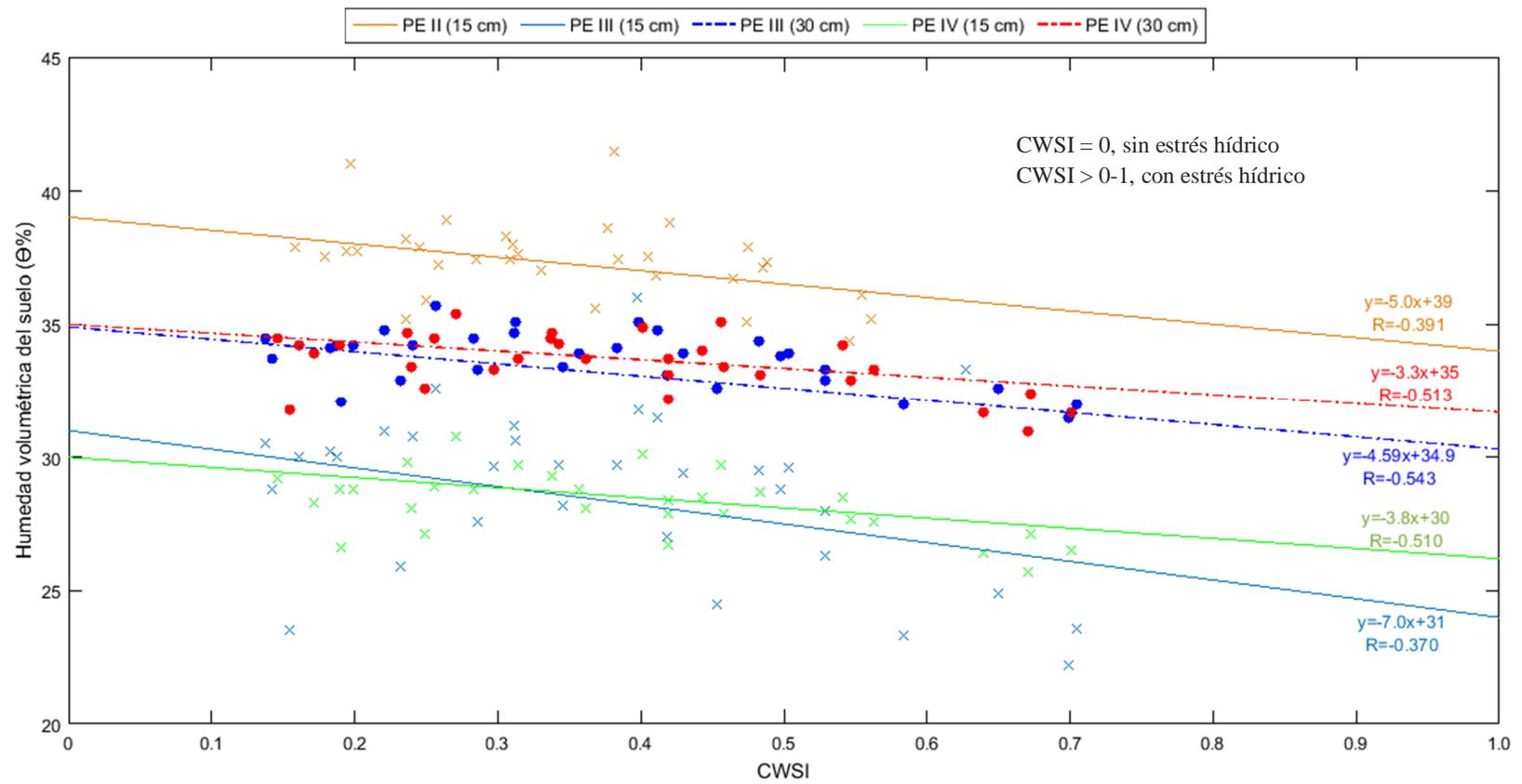


Figura 31: Correlación entre valores de CWSI medidos por los STT e imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo para la fase fenológica reproductiva.

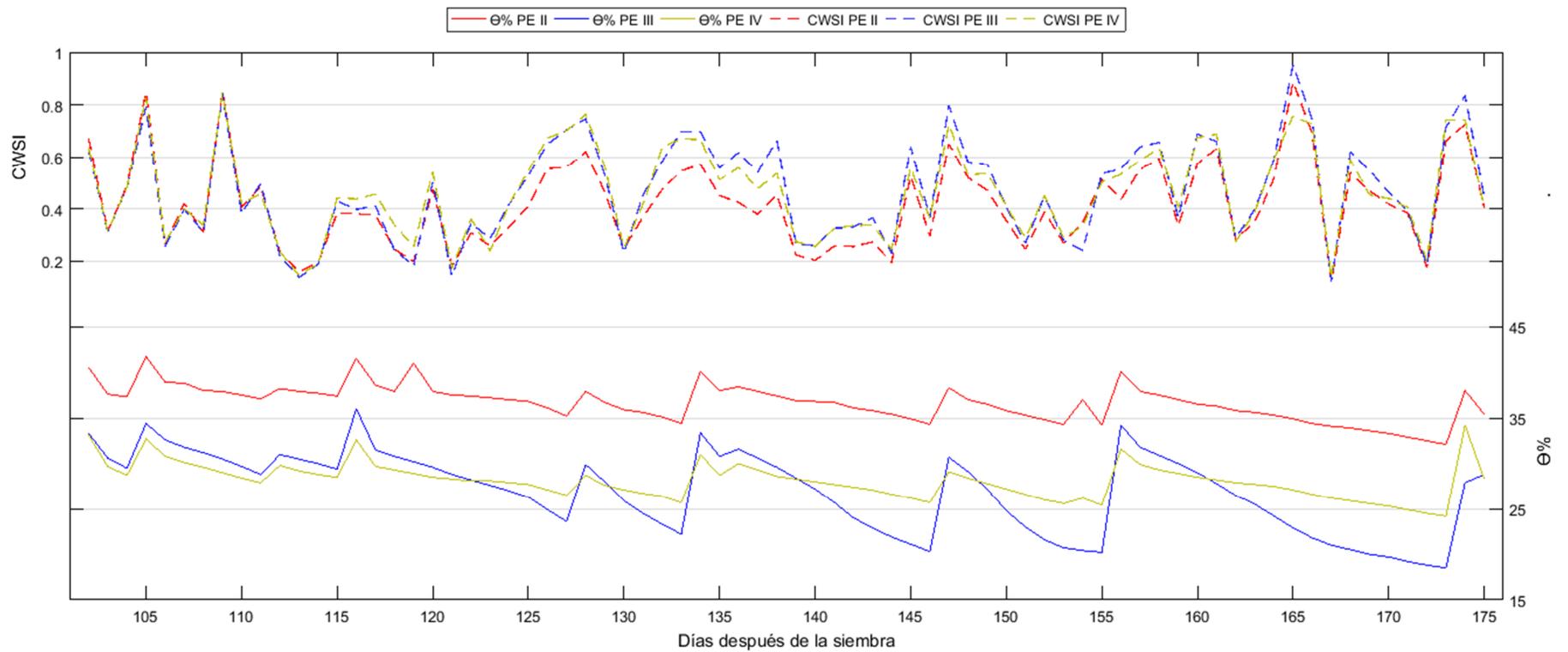


Figura 32: Variación diaria de la humedad volumétrica del suelo e índice de estrés hídrico foliar a 15 cm de profundidad.

En la Figura 33 se presenta la variación diaria de la humedad volumétrica del suelo, medida por los sensores FDR a 30 cm de profundidad, y los valores promedio de CWSI estimados por los STT en las parcelas de evaluación III y IV. Se empleó información de 74 días, correspondiente a la fase reproductiva y de maduración, a las 13:00 hrs.

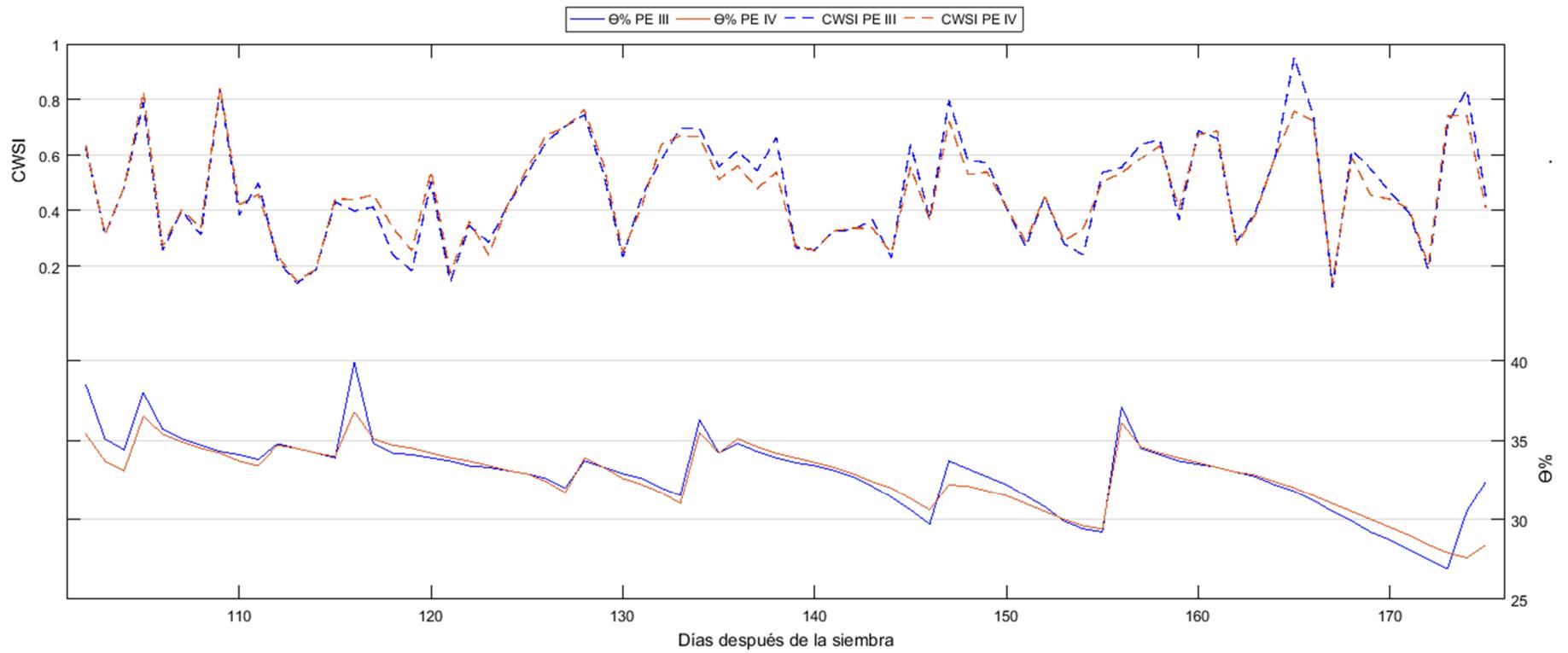


Figura 33: Variación diaria de la humedad volumétrica del suelo e índice de estrés hídrico foliar a 30 cm de profundidad.

Se observó que en ambas fases existen variaciones que coinciden en reiteradas ocasiones con los picos máximos, lo cual se interpretaría como una respuesta de la temperatura del cultivo a las variaciones de la humedad volumétrica del suelo. Se evaluó solo información correspondiente a la 13:00 hrs (debido a que es el horario apropiado para el análisis del índice de estrés hídrico foliar). La respuesta de temperatura del cultivo a un riego varió de acuerdo al momento en que se efectuó el riego.

Los rendimientos obtenidos en las parcelas de evaluación fueron: PE I, 0.8 Tn ha<sup>-1</sup> (25 panículas/planta); PE II, 0.3 Tn ha<sup>-1</sup> (14 panículas/ planta); PE III, 1.1 Tn ha<sup>-1</sup> (44 panículas/ planta) y PE IV, 0.3 Tn ha<sup>-1</sup> (37 panículas/planta). Estos resultan muy bajos en comparación a los valores promedio característicos del cultivo.

Así mismo, se registraron altos valores del índice de estrés hídrico foliar estimado que indicarían síntomas de encontrarse en situaciones desfavorables (no necesariamente solo estrés hídrico) para su desarrollo. Además, las diferencias entre los rendimientos entre parcelas se deberían a la variabilidad del suelo en la parcela, presentándose mayor compactación en determinadas zonas, así como valores altos de concentraciones de sales.

Los valores indicados por el CWSI fueron reflejo de síntomas muy distintos para cada fase fenológica, como se puede observar en la Figura 34. Se visualizó que para valores semejantes de CWSI, en la fase de maduración se presentaron síntomas de hojas con mayor marchitez y enrollamiento; mientras que en la fase reproductiva se observó un cultivo mucho más turgente, con una coloración verde intensa. Tanto en la fase reproductiva como maduración, las imágenes que correspondieron a valores de CWSI bajos presentan hojas más vigorosas y con tonos de color "más vivos", lo cual sugiere que, de manera relativa, se reflejan mejores condiciones fisiológicas para valores bajos de CWSI, menores a 0.2, mientras que para valores superiores a 0.4 se observa una flacidez del cultivo.

Estas características asintomáticas del cultivo se atribuyen principalmente al efecto del clima y la alta variabilidad (temperaturas, manejo del agua, conductividad del suelo, etc.) producida durante la conducción del cultivo.

Respecto a ello, cabe señalar que el periodo de crecimiento del cultivo se dio en un contexto de fenómeno del niño, siendo la variación climática el estrés de mayor impacto para la producción de arroz porque reduce significativamente sus rendimientos y con frecuencia induce a pérdidas de cosecha. (Jaleel *et al.* 2009)

Se presentó una mejor correlación en el estrato de 30 cm de profundidad en la variación diaria de la humedad volumétrica del suelo y del CWSI, debido a la estabilidad de lámina de agua a esta profundidad. Se consideró como una profundidad en la cual se puede evaluar una relación directa entre la temperatura del cultivo y la humedad del suelo, bajo las condiciones evaluadas en el cultivo de arroz.

Se contó con la humedad volumétrica del suelo por encima del valor de capacidad de campo ( $\Theta_{cc}=23\%$ ,  $\Theta_{pmp}=12\%$ ), en casi la totalidad de los periodos evaluados. Por lo que se interpreta que el cultivo de arroz es susceptible a variaciones en la humedad del suelo aún en el rango de capacidad de campo hasta la saturación del suelo.

Adicionalmente se generó la Figura 35, en la cual se presentan las seis mejores correlaciones de los rangos evaluados para el método de temperaturas umbrales de referencia empleando variables meteorológicas, analizando todas las imágenes térmicas del desarrollo fenológico correspondientes al horario del mediodía. Se obtuvo coeficientes de correlación de Pearson de -0.42 y -0,41. Sin embargo Los resultados de este método no reflejan ningún comportamiento correlativo entre ambas variables evaluadas, atribuyéndolo principalmente a ser de carácter matemático, así como la necesidad de realizar análisis de imágenes con frecuencia diaria y diferenciando las condiciones meteorológicas para cada día.



Parcela de evaluación IV  
CWSI=0.4249  
 $\Theta_s=31.2\%$   
11:30 hrs. 16-05-2017  
98 días después de la siembra  
Fase reproductiva



Parcela de evaluación IV  
CWSI=0.1613  
 $\Theta_s=34.2\%$   
12:00 hrs. 01-06-2017  
114 días después de la siembra  
Fase reproductiva



Parcela de evaluación IV  
CWSI=0.1293  
 $\Theta_s=32.1\%$   
11:00 hrs. 19-06-2017  
132 días después de la siembra  
Fase de maduración



Parcela de evaluación IV  
CWSI=0.4671  
 $\Theta_s=32.8\%$   
12:30 hrs. 06-07-2017  
149 días después de la siembra  
Fase de maduración

Figura 34: Comparación visual de condición del cultivo para diferentes valores de índice de estrés hídrico foliar (CWSI).

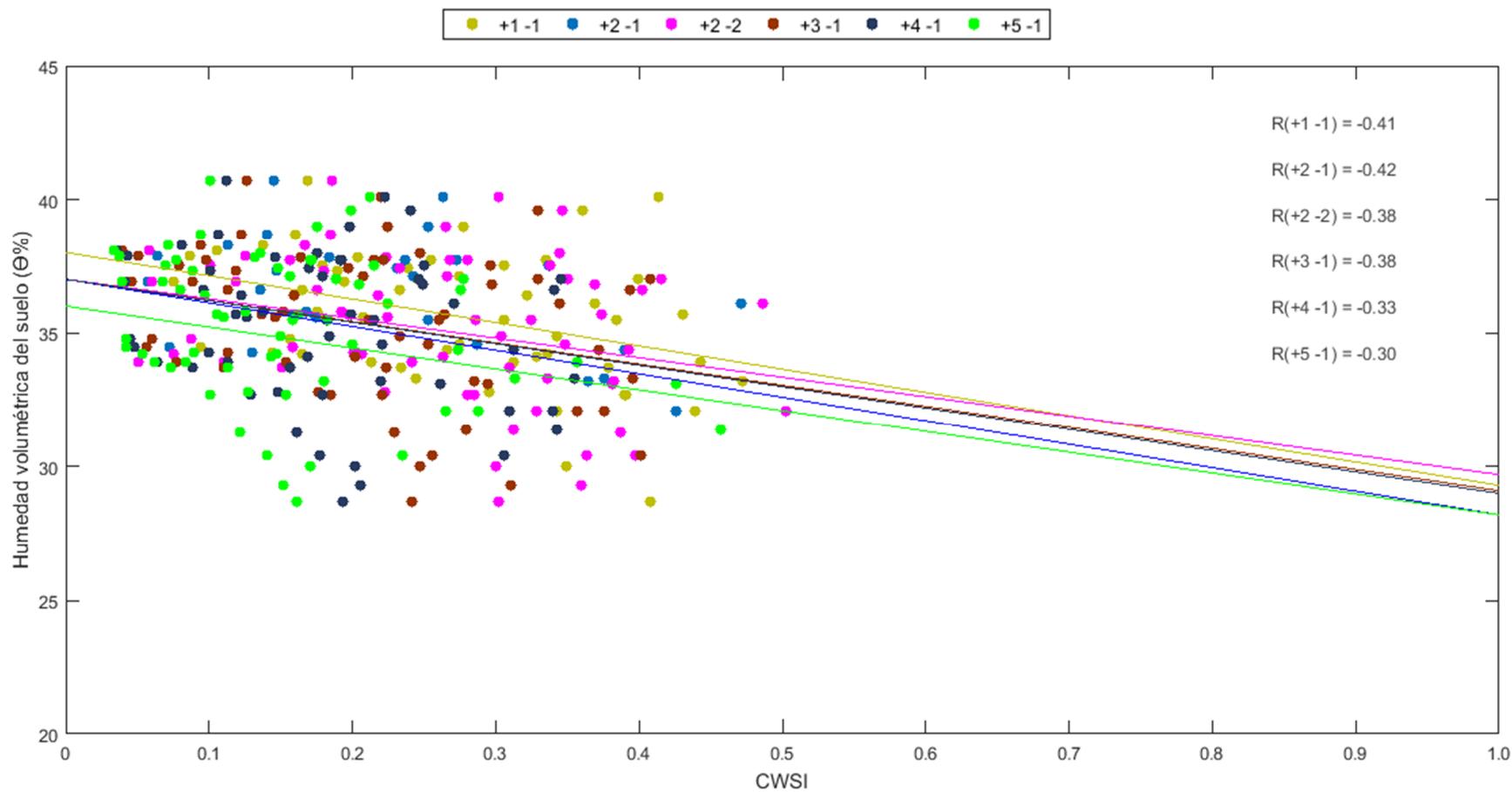


Figura 35: Correlación de valores de CWSI estimados por el método de umbrales de temperatura de referencia empleando variables meteorológicas, seis rangos evaluados en la totalidad de imágenes térmicas, y valores de humedad volumétrica de suelo.

## V. CONCLUSIONES

1. Se caracterizaron las variables climáticas de humedad relativa y temperatura del aire para las fases fenológicas reproductiva y de maduración, obteniéndose una temperatura media del aire de 17.96°C y 17.15°C, variando en un rango de 13.50°C a 25.30°C y de 11.82°C a 24.05°C; una humedad relativa media del aire de 89.29% y 85.68%, variando en un rango de 58.4% a 100% y de 57.1% a 100%; y temperaturas húmedas de 15.2°C y 15.4°C y temperaturas secas de 33.7°C y 36°C, respectivamente para cada fase.
2. Se calculó los coeficientes de correlación de Pearson, para un grado de significancia ( $\alpha$ ) del 5%, entre la información de temperaturas estimadas por las termocuplas y las estimadas por el método de temperaturas umbrales húmeda y seca, igual a 0.91, y con el método de superposición de imágenes igual a 0.85.
3. Se obtuvo un grado de dependencia lineal negativa de Pearson igual a -0.54, para un grado de significancia ( $\alpha$ ) del 5%, entre la humedad volumétrica del suelo a 30 cm de profundidad y el índice CWSI en la fase reproductiva.
4. Estadísticamente existe una correlación moderada (-0.54) entre las variables de la humedad suelo y el índice de estrés hídrico foliar, pero no se pudo realizar una estimación precisa entre ambas debido a la influencia que se pudo generar por el fenómeno del Niño y las variaciones por compactación del suelo en las mediciones.

## **VI. RECOMENDACIONES**

1. Usar plataformas niveladas para la captura de imágenes a alturas superiores a los dos metros, empleando bases estables por seguridad, y realizar la captura con un ángulo de inclinación aproximado de 60.
2. Se debe de estimar el valor de la emisividad del cultivo de arroz empleando un espectro-radiómetro.
3. Emplear macetas para el estudio del cultivo, facilitando las condiciones para un máximo control para la caracterización de temperaturas húmedas y secas. Además, llevar un control del grado de compactación del suelo y su influencia en la humedad volumétrica del suelo.
4. Realizar el monitoreo de otras variables fisiológicas, tales como la conductancia estomática, y relacionar su comportamiento con el índice del CWSI.
5. Evaluar el uso de sensores remotos ensamblados en vehículos aéreos no tripulados para pasar este experimento de escala de planta a una mayor escala.

## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeselmani, M; Deshmukh, PS; Sairam, RK; Kushwaha, SR; Singh, TP. 2006. Protective role of antioxidant enzymes under high temperature stress. *Plant Sci.* 171:382-388.
- Aston, AR; Van Bavel, CHM. 1972. Soil Surface water depletion and leaf temperature. *Agronomy Journal.* 64: 368-373.
- Aulakh, MS, Bodenbender, J, Wassmann, R, Rennenberg, H. 2000. Methane transport capacity of rice plants. 1. Influence of methane concentration and growth stage analyzed with an automated measuring system. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 58: 357-366.
- Azcon-Bieto, J; Talón, M. 2008. *Fundamentos de fisiología vegetal.* 2 Ed. España, Interamericana-McGraw-Hill. p. 577-597.
- Bucks, DA; Nakavamma, FS; French, OF; Regard, WW; Alexander, WL. 1985. Irrigated guayule evapotranspiration and plant water stress. *Agricultural Water Management* 10: 61-79.
- Corley, RHV. 1983. Potential productivity of tropical perennial crops. *Exp. Agr.* 19: 217-237.
- Echeverría, O. 2015. Efecto de tres sistemas de riego y dos variedades en el rendimiento de arroz (*Oryza sativa* L.) bajo dos métodos de siembra. Tesis Lic. Ing. Agro. Honduras. Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 23 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Italia). 2006. FAO 56: Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. FAO, Italia. 323 p.
- García-Tejero, I; Costa, J; Lima, R; Durán, Z; Muriel, F; Chaves, M. 2014. Aplicaciones de la termografía de infrarrojos en la agricultura moderna. *Vida Rural* 376: 60-66.

- García-Tejero, I; Durán, Z; Muriel, F; Jiménez, B. 2011. Linking canopy temperature and trunk diameter fluctuations with other physiological water status tools for water stress management in citrus crops. *Funct Plant Biol.* 38: 106-117.
- Gates, D. 1964. Transpiration and leaf temperature. *Agron J.* 56: 273-277
- Georgieva, K. 1999. Some mechanisms of damage and acclimation of the photosynthetic apparatus due to high temperature. *Bulg. J. Plant Physiol.* 25: 89-99.
- Gómez, L; Soplín, H; Sosa, G; Heros, E. 2017. Siembra directa: una alternativa para mejorar la sustentabilidad del cultivo de arroz (*Oriza sativa* L.) en el Perú. *Producción agropecuaria y desarrollo sostenible* v. 6, 13-26 p.
- Grant, O; Tronina, L; Jones, H; Chaves, M. 2006. Exploring thermal imaging variables for the detection of stress responses in grape-vine under different irrigation regimes. *J Exp. Bot.* 58: 815-825.
- Iba, K. 2002. Acclimative response to temperature stress in higher plants: approaches of gene engineering for temperature tolerance. *Annu. Rev. Plant Biol.* 53: 225-245.
- Idso, SB; Jackson, RD; Pinter, PJ; Reginato, RJ; Hatfield, JL. 1981. Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agric. Meteorol.* 24: 45-55.
- Idso, S. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27: 59-70.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2006. 2006 IPCC Guidelines for Greenhouse Gas Inventories. 2 Ed. IGES, Japan. 20 p.
- IRRI (Instituto Internacional de Investigación del Arroz). 2013. Rice Almanac: Source book for one of the most important economic activities on earth. 4 Ed. CABI Publishing, United Kingdom. 296 p.
- Jackson, RD; Reginato, R; Idso, S. 1977. Wheat canopy temperature: A practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research* 13: 651-656.
- Jackson, RD. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in irrigation* 1:43-85.

- Jaleel, CA; Maniranman, P; Wahid, A; Farooq, M; Somasundaran, R; Paneerselvan, R. 2009. Drought Stress in Plant. A review on Morphological Characteristics and Pigment Composition. *Int. J. Agric., Biol.* 11: 100-105.
- Jones, HG. 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research.* 41: 108-155.
- Jones, HG; Vaughan, RA. 2010. Remote sensing of vegetation. Principles, techniques and applications. Oxford University Press., UK. 400 p.
- Jones, H.G. 2014. Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology. 3 Ed. Cambridge University Press., UK. 428 p.
- Kaplan, H. 2007. Practical applications of infrared thermal sensing and imaging equipment. 3 Ed. BSPIE Press., US. 166 p.
- Kumar, V; Ladha, JK. 2011. Direct seeded rice: Recent development & future research needs. *Adv Agron.* 111: 297-413.
- Laffite, HR. 2001. Fisiología del maíz tropical. FAO, Italia. 21-28 p.
- Lambers, H; Stuart-Chapin III, F.; Pons, T. 1998. Plant physiological ecology. Springer-Verlag, Germany. 636 p.
- Larcher, W. 1980. Physiological plant ecology. 2 ed. Springer-Verlag. 636 p.
- Levitt, J. 1980. Responses of plant to environmental stress. 2 Ed. Academic Press. 698p.
- Maes, W.; Steepe, K. 2012. Estimating evapotranspiration and drought stress with ground-based thermal remote sensing in agriculture: a review. *J Exp Bot.* 63: 4671-4712.
- McKinnon, T.; Hoff, P. 2017. Comparing RGB-Based vegetation indices with NDVI for drone based agricultural sensing. *Agribotix* 21: 1-8.
- Meron, M; Tsipris, J; Orlov, V; Alchanatis, V; Cohen, Y. 2010. Crop water stress mapping for site-specific irrigation by thermal imagery and artificial reference surfaces. *Precision Agriculture.* 11: 148-162.

- Mira, M; Javier, G; Oscar, G; Xavier, P. 2017. Análisis comparativo de métodos para la estimación de la emisividad en la banda térmica del sensor TM de landsat-5. *Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, GeoFocus* 29: 55-80.
- Montoliu, O. 2015. Respuestas fisiológicas de los cítricos sometidos a condiciones de estrés biótico y abiótico. Aspectos comunes específicos. Tesis doctoral. Doctorat en Ciències. Universitat Jaume I, España. 213 p.
- Naldang, K; Shu, F; Nathabut, K. 1996. Growth of rice cultivars by direct seeding and transplanting under upland and lowland conditions. *Field Crop Research* 48: 115-123p.
- Nilsen, E. and Orcutt, D. 1996. *Physiology of plants under stress. Abiotic factors.* John Wiley & Sons, US. 683 p.
- Olmos, S. 2007. Apunte de morfología, fenología, ecofisiología, y mejoramiento genético del arroz. UNNE, Argentina. 13 p.
- Pinazo, J. 1995. *Manual de climatización 1, Transformaciones psicrométricas.* Universidad Politécnica de Valencia, España. 336 p.
- Porch, T; Hall, A. 2013. *Genomics and breeding for climate-resilient crops. Heat tolerance v. 2.* Springer-Verlag, Germany. 167-202 p.
- Rajwade, Y; Swain, D; Tiwari, K. 2014. Subsurface drip irrigation for wet season rice production under climate variability in India. *Agriculture: Towards a new paradigm of sustainability.* 293-300 p.
- Rosenberg, NJ; Blad, BL; Verma, SB. 1983. *Microclimate: the biological environment.* 2 Ed. John Wiley & Sons, US. 528 p.
- Ruíz, CJA, Flores-López, HE; Ramírez-Díaz, JL; González-Eguiarte, DR. 2002. Temperaturas cardinales y duración del ciclo de madurez del híbrido de maíz H-311 en condiciones de temporal. *Agrociencia* 36: 569-677.
- Steduto, P; Hsiao, TC; Fereres, E; Raes, D. 2012. *Crop yield response to water. Irrigation and Drainage Paper.* FAO, Italy. 505 p.

- Turner, NC, 1986. Crop water deficits: a decade of progress. *Adv. Agron.* 39: 1–51.
- Ulukan, H. 2008. Agronomic adaptation of some field crops: a general approach. *J. Agron. Crop Sci.* 194:169-179.
- Wahid, A; Gelani, S; Ahsraf, M; Fooland, M. 2007. Heat tolerance in plants: an overview. *Environ. Exp. Bot.* 61: 199-223.
- Wang, W; Vinocur, B; Shoseyov, O; Altman, A. 2004. Role of plant heat-shock proteins and molecular chaperones in the abiotic stress response. *Trends Plant Sci.* 9: 244-252.
- Wang, X; Yang, W; Wheaton, A; Cooley, N; Moran, B. 2010. Automated canopy temperature estimation via infrared thermography: A first step towards automated plant water stress monitoring. *Computers and Electronics* 2010. 73: 74-83.
- Xu, J; Lv, Y; Liu, X; Dalson, T; Yang, S; Wu, J. 2016. Diagnosing crop water stress of rice using infra-red thermal imager under water deficit condition. *International Journal of Agriculture and Biology.* 18: 565-572.
- Yusuf, RU; Noor, ZZ; Abba, AH; Hassan, MAA, Din, MFM. 2012. Methane emission by sectors: A comprehensive review of emission sources and mitigation methods. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16: 5059-5070.
- Yzarra, W; Lopez, F. 2011. *Manual de observaciones fenológicas.* Senamhi, Perú. 99 p.

## VIII. ANEXO

### ANEXO 1: EQUIPOS Y SENSORES



Cámara termográfica FLIR E60



Sensor de humedad volumétrica del suelo (FDR)



Colector de datos de los sensores de humedad del suelo



Colector de datos de los sensores térmicos de termocuplas



Sensores térmicos de termocuplas



Panel solar de 12 voltios

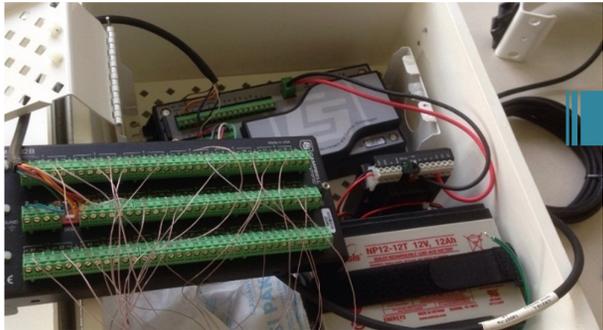


Sistema de sensores térmicos de termocuplas y colector de datos en campo



Sensor digital de humedad relativa y temperatura de aire

**ANEXO 2: DIAGRAMA SECUENCIAL PARA EL ENSAMBLAJE, INSTALACIÓN Y DESCARGA DE INFORMACIÓN DE TEMPERATURAS DE LOS STT Y SENSOR DIGITAL (TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE)**



i. Ensamblaje del sistema de los STT en el colector de datos PC 200W y programación de almacenamiento de datos.



iv. Instalación del colector de datos y STT en el área experimental.



ii. Lectura de información descargada en el software



iii. Descarga de información almacenada.

### ANEXO 3: DIAGRAMA SECUENCIAL DE LA INSTALACIÓN Y DESCARGA DE DATOS DE LOS SENSORES DE HUMEDAD (FDR) EN EL CAMPO



i. Se excavó la profundidad deseada.



ii. Se introdujo el sensor FDR y se enterró. Cables fueron conectados al colector de datos.



iv. Descarga de datos al computador.



iii. Identificación de puntos enterrados con banderines verdes.

## ANEXO 4: DIAGRAMA SECUENCIAL DEL USO Y PROCESAMIENTO INICIAL DE IMÁGENES TÉRMICAS

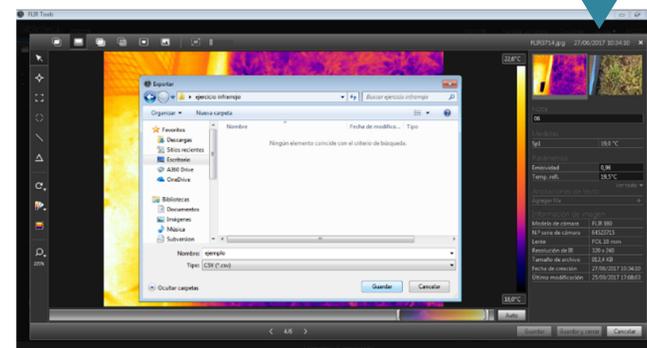


i. Ubicación en campo con equipos y materiales en zonas de control.

ii. Captura de imágenes térmicas y ópticas



iv. Procesamiento de información de matriz de temperaturas de imagen térmica en formato CSV.



iii. Procesamiento de imágenes térmicas en el software FLIR Tools.

## ANEXO 5: PANEL FOTOGRÁFICO DE LA EVOLUCIÓN DEL CULTIVO DESDE LA EMERGENCIA



Imagen óptica

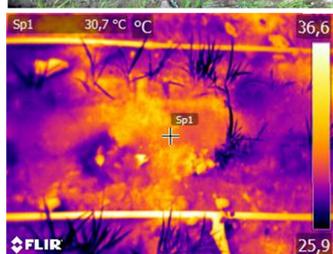


Imagen térmica

Cultivo 29 DDS - 09.15 am.



Imagen óptica

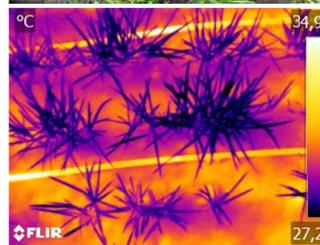


Imagen térmica

Cultivo 37 DDS - 08.30 am.



Imagen óptica

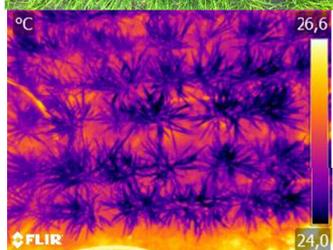


Imagen térmica

Cultivo 48 DDS - 07.45 am.



Imagen óptica

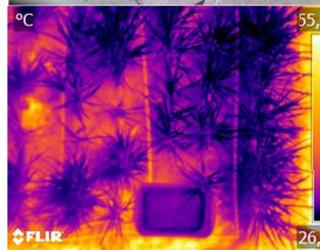


Imagen térmica

Cultivo 57 DDS - 13.15 pm.



Imagen óptica

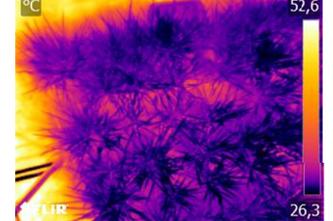


Imagen térmica

Cultivo 64 DDS - 13.30 pm.



Imagen óptica

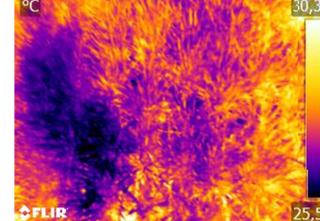


Imagen térmica

Cultivo 74 DDS - 10.15 am.



Imagen óptica

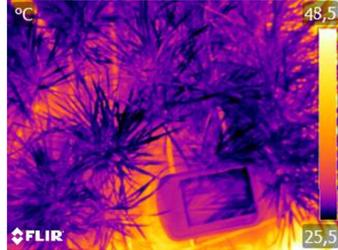


Imagen térmica

Cultivo 80 DDS – 13.00 pm.



Imagen óptica

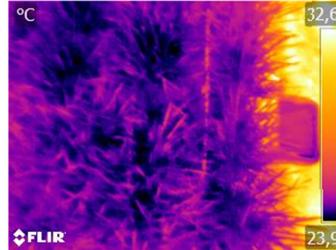


Imagen térmica

Cultivo 88 DDS – 10.30 am.



Imagen óptica

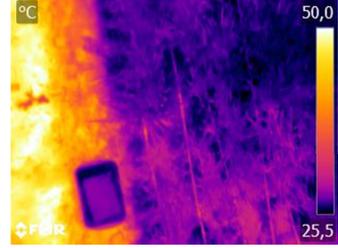


Imagen térmica

Cultivo 93 DDS – 11.15 am.



Imagen óptica

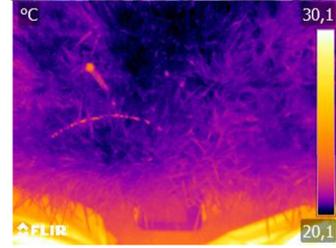


Imagen térmica

Cultivo 104 DDS – 10.30 am.



Imagen óptica

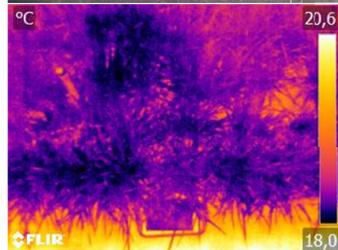


Imagen térmica

Cultivo 114 DDS – 11.30 am.



Imagen óptica

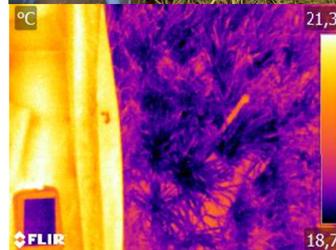


Imagen térmica

Cultivo 121 DDS – 14.45 pm.



Imagen óptica

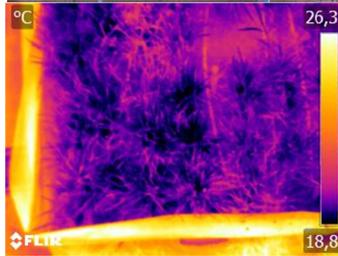


Imagen térmica

Cultivo 132 DDS – 10.50 am.



Imagen óptica

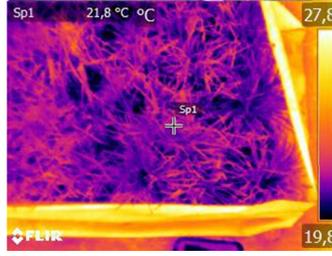


Imagen térmica

Cultivo 139 DDS – 11.15 am.



Imagen óptica

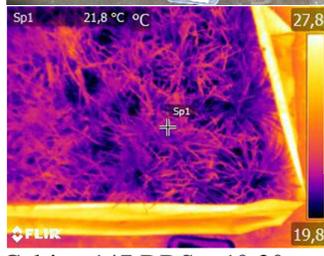


Imagen térmica

Cultivo 147 DDS – 10.30 am.



Imagen óptica



Imagen térmica

Cultivo 155 DDS – 16.00 pm.



Imagen óptica

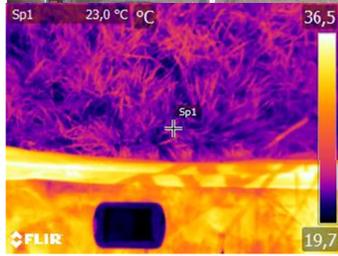


Imagen térmica

Cultivo 161 DDS – 10.30 am.



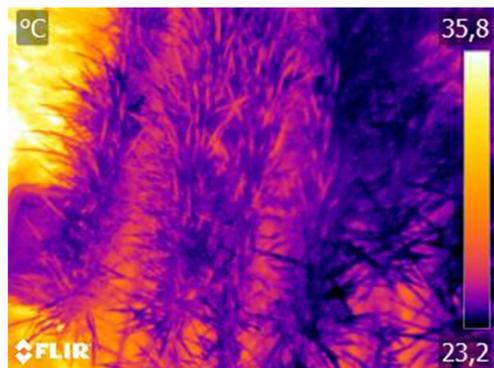
Imagen óptica



Imagen térmica

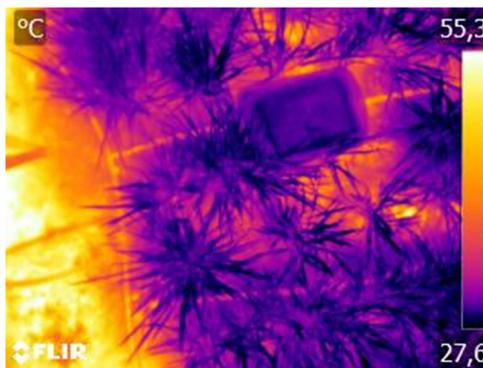
Cultivo 164 DDS – 15.00 pm.

**ANEXO 6: IMÁGENES TÉRMICAS Y ÓPTICAS DE UNA PARCELA DE EVALUACIÓN EN TRES HORARIOS DISTINTOS EL 05 DE ABRIL DEL 2017, INDICANDO VALORES DE CWSI ESTIMADOS PARA CADA IMAGEN TÉRMICA POR EL MÉTODO POR USO DE UMBRALES DE TEMPERATURA DE REFERENCIA**



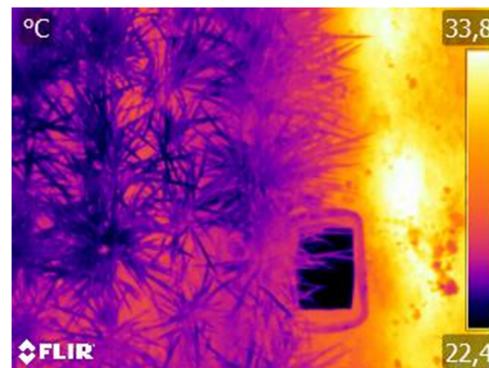
Mañana

08:15 hrs. CWSI = 0.4682



Mediodía

13:15 hrs. CWSI = 0.6613



Tarde

17:00 hrs. CWSI = 0.4745

**ANEXO 7: PRUEBA T DE STUDENT PARA MEDIAS DE DOS MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE TEMPERATURAS ESTIMADAS POR EL MÉTODO DE TEMPERATURAS UMBRALES Y LOS STT EN LA FASE REPRODUCTIVA (CUADRO SUPERIOR) Y EN LA FASE DE MADURACIÓN DE GRANO (CUADRO INFERIOR)**

	Variable 1	Variable 2
Media	0.25275044	0.24007151
Varianza	0.00412088	0.00732037
Observaciones	16	16
Coefficiente de correlación de Pearson	0.87800626	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	15	
Estadístico t	1.19653118	
P(T<=t) una cola	0.12502991	
Valor crítico de t (una cola)	1.75305036	
P(T<=t) dos colas	0.25005983	
Valor crítico de t (dos colas)	2.13144955	

	Variable 1	Variable 2
Media	0.33455754	0.33380326
Varianza	0.01569688	0.02551243
Observaciones	24	24
Coefficiente de correlación de Pearson	0.90424404	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	23	
Estadístico t	0.05216109	
P(T<=t) una cola	0.47942536	
Valor crítico de t (una cola)	1.71387153	
P(T<=t) dos colas	0.95885073	
Valor crítico de t (dos colas)	2.06865761	

**ANEXO 8: PRUEBA T DE STUDENT PARA MEDIAS DE DOS MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE TEMPERATURAS ESTIMADOS POR EL MÉTODO DE TEMPERATURAS UMBRALES Y EL MÉTODO DE SUPERPOSICIÓN DE IMÁGENES EN LA FASE VEGETATIVA**

	Variable 1	Variable 2
Media	0.61713642	0.68606923
Varianza	0.00375349	0.00488991
Observaciones	13	13
Coefficiente de correlación de Pearson	0.9255351	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	12	
	-	
Estadístico t	9.30742802	
P(T<=t) una cola	3.8665E-07	
Valor crítico de t (una cola)	1.78228756	
P(T<=t) dos colas	7.7331E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2.17881283	

**ANEXO 9: PRUEBA T DE STUDENT PARA MEDIAS DE DOS MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO Y VALORES DEL CWSI TRANSFORMADOS POR REGLA DE CONVERSIÓN ESTIMADA POR REGRESIÓN LINEAL EN LA FASE REPRODUCTIVA, MEDICIONES REALIZADAS A 30 CM DE PROFUNDIDAD EN LAS PARCELAS DE EVALUACIÓN III (CUADRO SUPERIOR) Y IV (CUADRO INFERIOR)**

	Variable 1	Variable 2
Media	33.7193548	33.7193287
Varianza	1.06494624	0.31428944
Observaciones	31	31
Coefficiente de correlación de Pearson	0.54324641	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	30	
Estadístico t	0.00016776	
P(T<=t) una cola	0.49993363	
Valor crítico de t (una cola)	1.69726089	
P(T<=t) dos colas	0.99986725	
Valor crítico de t (dos colas)	2.04227246	

	Variable 1	Variable 2
Media	33.5516129	33.5514655
Varianza	1.22258065	0.32119004
Observaciones	31	31
Coefficiente de correlación de Pearson	0.51255334	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	30	
Estadístico t	0.00086464	
P(T<=t) una cola	0.49965792	
Valor crítico de t (una cola)	1.69726089	
P(T<=t) dos colas	0.99931584	
Valor crítico de t (dos colas)	2.04227246	