

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO DE ARROZ IR 71706 VÍA
TERMOGRAFÍA MEJORADA Y CALIBRADA DEL ÁREA DEL
DOSEL EN LA UNALM”**

Presentado por:

HUGO DIEGO VILLAR BARRAZA

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

Lima – Perú

2019

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO DE ARROZ IR 71706 VÍA
TERMOGRAFÍA MEJORADA Y CALIBRADA DEL ÁREA DEL
DOSEL EN LA UNALM”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

BACH. HUGO DIEGO VILLAR BARRAZA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Mg. Sc. GONZALO RAMCES FANO MIRANDA
Presidente

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ
Asesor

Mg. Sc. MIGUEL ANGEL SÁNCHEZ DELGADO
Miembro

Ing. JOSÉ BERNARDINO ARAPA QUISPE
Miembro

LIMA – PERU

2019

Dedicatoria

A mis padres Víctor y Paola, por sus enseñanzas y apoyo incondicional.

A mis hermanos Sebastián y Santiago, por estar siempre a mi lado compartiendo todo tipo de experiencias.

Y sin dejar atrás a toda mi familia por confiar en mí, a mis abuelitos, tíos y primos, gracias por ser parte de mi vida y por permitirme ser parte de su orgullo.

Agradecimiento

A Dios, por fortalecerme pese a las adversidades y mantener el rumbo de mi vida.

A la Universidad Nacional Agraria La Molina y a la Facultad de Ingeniería Agrícola, por haberme permitido ser parte de ella y abierto las puertas para poder estudiar mi carrera, así como también a los diferentes docentes que me brindaron sus conocimientos y su apoyo a seguir adelante día a día.

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

Al Vicerrectorado de Investigación, por haber sido beneficiario del 7° Concurso de Subvención de Tesis y brindarme las facilidades económicas para la elaboración de la presente tesis.

A mi asesora Dra. Lía Ramos, por el profesionalismo demostrado, por todo el tiempo, ánimo y paciencia brindada en el desarrollo de la tesis; a mi coasesor Dr. Omar Alminagorta, por haberme brindado la oportunidad de recurrir a su capacidad y conocimiento científico; y al grupo de investigación DANI “Teledetección y cambio aplicado a los recursos hídricos y la agricultura”, por el compañerismo y trabajo en conjunto en el desarrollo de la investigación.

Y para finalizar, también agradezco a todos los que fueron mis compañeros durante todos los años de estudio, ya que gracias al compañerismo, amistad y apoyo moral han aportado en un alto porcentaje mis ganas de seguir adelante en mi carrera profesional.

RESUMEN

Ante la creciente demanda del cultivo de arroz aunado a una mayor demanda hídrica y una existencia de métodos convencionales laboriosos y destructivos en la estimación de las respuestas fisiológicas de los cultivos al estrés hídrico, se planteó la presente investigación desarrollada entre noviembre del 2017 y abril del 2018 en La Molina. En el cual se utilizó un sensor térmico infrarrojo como una metodología novedosa en la estimación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) de arroz de forma rápida y no intrusiva. Tuvo como objetivo correlacionar el CWSI con la humedad del suelo, a partir de información de sensores remotos como son las imágenes térmicas, aplicadas en el dosel del cultivo. Asimismo, se aplicó riego por goteo con humedad superior a capacidad de campo (θ_{cc}) y se aplicaron reducciones de humedad entre macollamiento y floración bajo tres tratamientos ($85\%\theta_{cc}$, $80\%\theta_{cc}$ y $75\%\theta_{cc}$). En un primer paso, se elaboró algoritmos para extraer de las imágenes térmicas, píxeles de sólo cobertura vegetal verde por diversos métodos, obteniendo el mejores resultados en una nueva metodología que trabaja bajo dos procesos: superposición de imágenes y temperaturas umbrales; las metodologías fueron comparadas con las temperaturas foliares más certeras registradas por los sensores térmicos de termocuplas (STT), considerando pruebas de Student con un nivel de significancia de 0.05, obteniendo que la regresión potencial tuvo un mejor ajuste con un coeficiente de Pearson de 0.841. En segundo lugar, se calcularon los CWSI con la metodología y regresión optada, apoyado mediante el uso de macetas experimentales. Finalmente, se relacionó el CWSI con la humedad del suelo a profundidades de 12 y 20 cm respectivamente, obteniendo los coeficientes de Pearson, Kendall y Spearman (-0.489, -0.347 y -0.486) a 20 cm, los cuales fueron menores a los obtenidos a 12 cm, ya que a mayor profundidad del suelo debido al menor efecto de evaporación del suelo. Los rendimientos correspondientes a T0 y T1 fueron mayores al del promedio nacional, siendo 10.29 y 9.37 $t\ ha^{-1}$, respectivamente. En cuanto al volumen de agua aplicado, para T1 fue requerido $8781\ m^3\ ha^{-1}$, $4500\ m^3\ ha^{-1}$ menor al consumo bajo riego tradicional.

Palabras clave: arroz, sensores térmicos, temperatura foliar, índice de estrés hídrico del cultivo, CWSI, déficit hídrico.

ABSTRACT

In view of the growing demand for rice cultivation combined with increased water demand and the existence of laborious and destructive conventional methods for estimating the physiological responses of crops to water stress, the present investigation developed between November 2017 and April 2018 in La Molina. In which an infrared thermal sensor was used as a novel methodology in the estimation of the rice water stress index (CWSI) of rice quickly and non-intrusively. Its objective was to correlate CWSI with soil moisture, based on information from remote sensors such as thermal images, applied in the canopy of the crop. Likewise, drip irrigation with humidity greater than field capacity (θ_{cc}) was applied and moisture reductions were applied between tillering and flowering under three treatments (85% θ_{cc} , 80% θ_{cc} and 75% θ_{cc}). In a first step, algorithms were developed to extract from the thermal images, pixels of only green vegetal cover by different methods, obtaining the best results in a new methodology that works under two processes: superposition of images and threshold temperatures; the methodologies were compared with the most accurate leaf temperatures registered by thermocouple thermal sensors (STT), considering Student's tests with a level of significance of 0.05, obtaining that the potential regression had a better fit with a Pearson coefficient of 0.841. Second, the CWSIs were calculated with the methodology and regression chosen, supported by the use of experimental pots. Finally, the CWSI was related to soil moisture at depths of 12 and 20 cm respectively, obtaining the coefficients of Pearson, Kendall and Spearman (-0.489, -0.347 and -0.486) at 20 cm, which were lower than those obtained at 12 cm, since at greater depth of soil due to the lower effect of evaporation of the soil. The yields corresponding to T0 and T1 were higher than the national average, being 10.29 and 9.37 t ha⁻¹, respectively. Regarding the volume of water applied, for T1 was required 8781 m³ ha⁻¹, 4500 m³ ha⁻¹ lower than traditional irrigation consumption.

Keywords: rice, thermal sensors, leaf temperature, crop water stress index, CWSI, water deficit.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN

ABSTRACT

I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA	3
2.1. Estrés abiótico.....	3
2.1.1. Estrés hídrico foliar	5
2.1.2. Potencial hídrico del suelo.....	6
2.2. Índice de estrés hídrico foliar (CWSI)	9
2.2.1. Sensor térmico infrarrojo.....	10
2.2.2. Sensor térmico de termocupla	11
2.3. Procesamiento de imágenes térmicas.....	12
2.3.1. Método de temperaturas umbrales.....	13
2.3.2. Método de superposición de imágenes.....	14
III. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1. Zona de estudio.....	16
3.2. Materiales, equipos y herramientas computacionales.....	16
3.3. Procedimiento	21
3.3.1. Comparación de mediciones puntuales de temperatura obtenidos por los sensores térmicos de termocuplas (STT) con mediciones vía termografía infrarroja	25
3.3.2. Obtención del CWSI a partir de temperaturas foliares corregidas	32
3.3.3. Relación entre el CWSI y la humedad del suelo	32
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES	34
4.1. Comparación de mediciones puntuales de temperatura obtenidos por los sensores térmicos de termocuplas (STT) con mediciones vía termografía infrarroja	34
4.1.1. Sensor térmico de termocupla (STT).....	34
4.1.2. Cámara termográfica	45
4.2. Obtención del CWSI a partir de temperaturas foliares	59
4.2.1. Temperatura foliar mediante cámara termográfica	59
4.3. Relación entre el CWSI y la humedad del suelo.....	62
V. CONCLUSIONES	68
VI. RECOMENDACIONES	71

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
VIII.ANEXO	76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Materiales, equipos y herramientas computacionales	16
Tabla 2: Duración de las fases fenológicas del cultivo de arroz, variedad IR 71706.....	19
Tabla 3: Valor de tensión del suelo según tratamiento.....	21
Tabla 4: Valores utilizados para la obtención de la temperatura reflejada del día y calibración de cada imagen térmica.....	29
Tabla 5: Análisis estadístico y rango de valores registrados de temperatura foliar en el cultivo de arroz IR 71706, según fase fenológica.....	37
Tabla 6: Hora representativa para la estimación de la temperatura húmeda por tratamiento y fase fenológica del cultivo de arroz IR 71706.....	41
Tabla 7: Hora representativa para la estimación de la temperatura del aire, con el fin de obtener la temperatura seca, por tratamiento y fase fenológica del cultivo de arroz IR 71706	42
Tabla 8: Fórmula para el cálculo de la temperatura seca según fase fenológica del cultivo de arroz IR 71706	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Potenciales mátricos de un suelo arenoso (o) y otro arcilloso (●) en función del contenido hídrico del suelo.....	8
Figura 2. Linealización de temperatura respecto al voltaje para cada tipo de termocupla	12
Figura 3. Fases fenológicas del cultivo de arroz, variedad IR 71706.....	20
Figura 4. Distribución de tratamientos y orden de toma de imágenes térmicas.....	22
Figura 5. Esquema secuencial del procedimiento seguido en gabinete.....	24
Figura 6. Panel del programa FLIR Tools para cambio de variables, obtención de temperatura reflejada del cultivo de arroz IR 7176. Fecha de muestreo: 26 de febrero del 2018 (103 DDS)	27
Figura 7. Panel del programa FLIR Tools para cambio de variables, calibración de imágenes térmicas del cultivo de arroz IR 71706. Tratamiento: T0. Fecha de muestreo: 26 de febrero del 2018 (103 DDS).....	28
Figura 8. Histogramas de bandas de imagen RGB convertidas a HSV del cultivo de arroz IR 71706. Tratamiento: T0. Fecha de muestreo: 29 de enero del 2018 (75 DDS).....	30
Figura 9. Métodos para obtención de máscara de cobertura verde del cultivo de arroz IR 71706. Tratamiento: T0. Fecha de muestreo: 29 de enero del 2018 (75DDS).....	31
Figura 10. Líneas de tendencia para calibración de sensores de humedad del suelo en relación a la humedad volumétrica del suelo.....	33
Figura 11. Variación cada cinco minutos de la temperatura del aire por fase fenológica, ordenadas de 0 a 24 horas. Periodo de análisis: (i) 31 de diciembre del 2017 al 20 de febrero del 2018, (ii) 21 de febrero del 2018 al 22 de marzo del 2018 y (iii) 23 de marzo del 2018 al 28 de abril del 2018.....	36
Figura 12. Variación cada cinco minutos de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento en la fase vegetativa, ordenadas de 0 a 24 horas. Periodo de análisis: 31 de diciembre del 2017 al 20 de febrero del 2018	38
Figura 13. Variación cada cinco minutos de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento en la fase reproductiva, ordenadas de 0 a 24 horas. Periodo de análisis: 21 de febrero del 2018 al 22 de marzo del 2018	39

Figura 14. Variación cada cinco minutos de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento en la fase de maduración, ordenadas de 0 a 24 horas. Periodo de análisis: 23 de marzo del 2018 al 28 de abril del 2018	40
Figura 15. Variación cada cinco minutos de la diferencia de temperatura foliar y del aire según fase fenológica, en macetas sometidas a estrés hídrico llegando a Punto de Marchitez Permanente (PMP) en el cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: (i) 10 de febrero del 2018 al 20 de febrero del 2018, (ii) 17 de marzo del 2018 al 22 de marzo del 2018 y (iii) 23 de abril del 2018 al 26 de abril del 2018.....	44
Figura 16. Variación diaria de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento según fase fenológica, utilizando el método de superposición de imágenes. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	47
Figura 17. Relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición de imágenes con diferentes regresiones estadísticas en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	48
Figura 18. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición de imágenes para la regresión potencial en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	49
Figura 19. Variación diaria de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento según fase fenológica, utilizando el método de temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018.....	51
Figura 20. Relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de temperaturas umbrales con diferentes regresiones estadísticas en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	52
Figura 21. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de temperaturas umbrales para la regresión potencial en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	53

Figura 22. Variación diaria de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento según fase fenológica, utilizando el método de superposición – temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	55
Figura 23. Relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición – temperaturas umbrales con diferentes regresiones estadísticas en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	56
Figura 24. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición – temperaturas umbrales para la regresión potencial en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	57
Figura 25. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición – temperaturas umbrales para la regresión potencial por tratamiento en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018.....	58
Figura 26. Variación diaria de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 para toda la fase fenológica según tratamiento, utilizando el método de superposición – temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	60
Figura 27. Variación diaria del CWSI del cultivo de arroz IR 71706 para toda la fase fenológica según tratamiento, utilizando el método de superposición – temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	61
Figura 28. Variación diaria del CWSI del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento para el periodo de secas, utilizando el método de superposición – temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 1 de febrero del 2018 al 26 de febrero del 2018.....	63
Figura 29. Relación entre los valores de CWSI medidos por imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo a 12 cm de profundidad para todo el	

periodo fenológico del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	66
Figura 30. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre los valores de CWSI medidos por imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo a 12 cm de profundidad para todo el periodo fenológico del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	67
Figura 31. Relación entre los valores de CWSI medidos por imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo a 20 cm de profundidad para todo el periodo fenológico del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	68
Figura 32. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre los valores de CWSI medidos por imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo a 20 cm de profundidad para todo el periodo fenológico del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018	69

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Prueba T de Student para muestras emparejadas: Valores de temperatura estimadas por el método de superposición de imágenes corregidas según regresión potencial y los STT.....	76
Anexo 2: Prueba T de Student para muestras emparejadas: Valores de temperatura estimadas por el método de temperaturas umbrales corregidas según regresión potencial y los STT.....	77
Anexo 3: Prueba T de Student para muestras emparejadas: Valores de temperatura estimadas por el método de superposición de imágenes y temperaturas umbrales corregidas según regresión potencial y los STT	79
Anexo 4: Prueba T de Student para muestras emparejadas: Valores de temperatura estimadas por el método de superposición de imágenes y temperaturas umbrales corregidas por tratamiento según regresión potencial y los STT	80
Anexo 5: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para los valores de temperatura estimadas por el método de superposición de imágenes y temperaturas umbrales corregidas por tratamiento según regresión potencial y los STT	81
Anexo 6: Correlaciones de Pearson para los valores de temperatura estimadas por el método de superposición de imágenes y temperaturas umbrales corregidas por tratamiento según regresión potencial y los STT	82
Anexo 7: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para los valores de humedad volumétrica del suelo y valores de CWSI, mediciones realizadas a 12 cm de profundidad	82
Anexo 8: Prueba T de Student para muestras emparejadas: Valores de CWSI transformados según regresión lineal y humedad volumétrica del suelo a 12 cm de profundidad.....	82
Anexo 9: Correlaciones de Pearson, Kendall y Spearman para los valores de humedad volumétrica del suelo y valores de CWSI, mediciones realizadas a 12 cm de profundidad.....	83
Anexo 10: Correlaciones de Pearson, Kendall y Spearman para los valores de humedad volumétrica del suelo y valores de CWSI, mediciones realizadas por tratamiento a 12 cm de profundidad.....	83

Anexo 11: Prueba de Kolmogorov-Smirnov para los valores de humedad volumétrica del suelo y valores de CWSI, mediciones realizadas a 20 cm de profundidad	84
Anexo 12: Prueba T de Student para muestras emparejadas: Valores de CWSI transformados según regresión lineal y humedad volumétrica del suelo a 20 cm de profundidad.....	84
Anexo 13: Correlaciones de Pearson, Kendall y Spearman para los valores de humedad volumétrica del suelo y valores de CWSI, mediciones realizadas a 20 cm de profundidad.....	85
Anexo 14: Correlaciones de Pearson, Kendall y Spearman para los valores de humedad volumétrica del suelo y valores de CWSI, mediciones realizadas por tratamiento a 20 cm de profundidad.....	85
Anexo 15: Volumen de agua aplicada.....	85
Anexo 16: Rendimiento de arroz cáscara bajo riego deficitario por goteo.....	85
Anexo 17: Variación cada cinco minutos de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamientos y temperatura del aire, según fase fenológica. Periodo de análisis: 31 de diciembre del 2017 al 28 de abril del 2018	86
Anexo 18: Variación cada cinco minutos de la humedad relativa del aire, según fase fenológica. Periodo de análisis: 31 de diciembre del 2017 al 28 de abril del 2018.....	87
Anexo 19: Registro de humedad volumétrica del suelo cada media hora de cuatro sensores (FDR) ubicados en las parcelas evaluadas. Periodo de análisis: 30 de diciembre del 2017 al 2 de mayo del 2018.....	88
Anexo 20: Registro de humedad volumétrica del suelo cada día de toma de imágenes térmicas mediante el uso del sensor de humedad TDR. Periodo de análisis: 16 de febrero del 2018 al 26 de abril del 2018.....	89
Anexo 21: Panel fotográfico metodología de toma de imágenes térmicas	90
Anexo 22: Panel fotográfico metodología del uso de los sensores térmicos de termocuplas	92
Anexo 23: Panel fotográfico del desarrollo del cultivo de arroz IR 71706.....	94

Anexo 24: Panel fotográfico de macetas antes y después de las secas del cultivo de arroz IR 71706	99
Anexo 25: Panel fotográfico de imágenes térmicas antes y después del procesamiento ..	100

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
AER	Área Experimental de Riego
ANA	Autoridad Nacional del Agua
CC	Capacidad de campo
CFC	Clorofluorocarbonados
CTV	Variabilidad de la temperatura del dosel
CWSI	Índice de Estrés Hídrico Foliar
DCA	Diseño Completamente al Azar
DDS	Días Después de la Siembra
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
FDR	Frequency Domain Reflectometry
HSV	Tono, saturación y valor
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
IRRI	Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₃	Ozono
PMP	Punto de Marchitez Permanente
RGB	Rojo, verde y azul
SDD	Grado de estrés
SIF	Fluorescencia solar inducida
SO ₂	Dióxido de azufre
STT	Sensores Térmicos de Termocuplas
TDR	Time Domain Reflectometry
TIR	Imágenes térmica infrarroja
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina
ε	Emisividad

I. INTRODUCCIÓN

La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación (FAO) indica que en el mundo el arroz es el segundo cultivo alimenticio más importante después del trigo, el cual se cultiva en 166 millones de hectáreas con una producción anual de 767 millones de toneladas al 2018 (FAO, 2018).

En el Perú el arroz se produce en 18 departamentos, 74 provincias y 345 distritos. El Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI, 2018) reporta que la producción del arroz cáscara creció a un ritmo de 2.4 por ciento anual del 2001 al 2017, iniciando con una producción de 2 millones 28 mil toneladas y terminando con una de 3 millones 39 mil toneladas. Este crecimiento fue impulsado por un aumento en la superficie cosechada del 2 por ciento anual y al incremento del rendimiento del 0.4 por ciento anual. La superficie sembrada aumentó de 369 mil a 448 mil Has en el mismo periodo del 2001 al 2017. El rendimiento promedio al 2017 fue de 7.19 t ha⁻¹.

Por otro lado, el sistema de siembra dominante para el cultivo en el Perú es el trasplante, el cual se practica con riego bajo inundación en los valles arroceros de la costa y selva alta. Según el MINAGRI, el Perú es el único país en la región que cultiva el arroz bajo el sistema de trasplante, en más del 75 por ciento de su área, estimada en 300,000 Has. En los sistemas de trasplante, la gran demanda de mano de obra, los precios altos de jornales, la rentabilidad decreciente, el batido de los suelos, el alto consumo de agua y las emisiones de metano, contribuye al deterioro de la sustentabilidad del cultivo de arroz (Gómez *et al.*, 2017)

Actualmente, con la creciente escasez de agua, el déficit de agua se convierte en uno de los principales tipos de estrés abiótico en la producción agrícola, especialmente para este cultivo pues el riego practicado implica una baja eficiencia en el uso del recurso hídrico. Según la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el consumo de agua para el cultivo de arroz se estima entre 13,300 a 15,680 m³ ha⁻¹ (Gómez *et al.*, 2017). Muchos investigadores abordan el impacto del estrés hídrico en la actividad fisiológica del cultivo y el crecimiento. Según Turner, el estrés hídrico moderado mejora el rendimiento del cultivo y la eficiencia del uso del agua, mientras que el déficit de agua severo afecta el crecimiento de los cultivos y, finalmente, conduce a la pérdida en la producción de cultivos (Xu *et al.*, 2016).

Por esta razón, existen métodos convencionales basados en las respuestas fisiológicas de los cultivos al estrés hídrico, tales como el potencial hídrico, el contenido de agua de la hoja y la conductancia estomática; sin embargo, éstas son generalmente destructivas, laboriosas, requieren de tiempo y solo proporcionan información puntual.

Por todo lo mencionado anteriormente, se propuso la presente investigación, en la cual se estimó el índice de estrés hídrico foliar (CWSI) a partir de imágenes térmicas del dosel obtenidas mediante una cámara termográfica, calibrado mediante sensores térmicos de termocuplas (STT), con el objetivo de correlacionarlo con la humedad volumétrica del suelo, durante el periodo vegetativo del cultivo de arroz de la variedad IR 71706 bajo riego por goteo, del 15 de noviembre del 2017 al 29 de abril del 2018, en el “Área Experimental de Riego” (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina (UNALM).

1.1. Objetivos

El objetivo general planteado es evaluar la variación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) de arroz IR 71706 mediante la medición de la temperatura foliar vía termografía infrarroja, mejorada y calibrada con sensores térmicos de termocuplas (STT), en relación a la humedad volumétrica del suelo en el “Área Experimental de Riego” (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina. Para ello se plantean los objetivos específicos, tales como:

- Realizar y comparar mediciones puntuales de temperatura obtenidas por los STT con las temperaturas promedio obtenidas vía termografía infrarroja aplicando diferentes metodologías de selección del área foliar verde del cultivo.
- Obtener el CWSI a partir de temperatura foliar vía termografía infrarroja según la metodología, para la selección de la temperatura foliar verde del cultivo, y la ecuación de calibración optada.
- Realizar mediciones de humedad volumétrica del suelo ($\Theta\%$) por medio de sensores de humedad TDR y FDR, y compararlas con los CWSI, para determinar las correlaciones CWSI – $\Theta\%$ a 12 y 20 cm de profundidad del suelo.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1. Estrés abiótico

Nilsen y Orcutt definen que el estrés, en el marco de la fisiología vegetal, refleja la magnitud de presión ambiental que fuerza al cambio en la fisiología de una planta. Levitt lo define como cualquier factor ambiental potencialmente desfavorable para los organismos vivos. Lambers *et al.* lo definen como cualquier factor ambiental biótico o abiótico que reduce la tasa de algún proceso fisiológico por debajo de la tasa máxima (Montoliu, 2010).

Para esta investigación se tomará en cuenta principalmente la definición dada por Lambers y cols., debido a que el estrés puede tener respuestas que repercuten negativamente en la planta y otras que pueden poseer un efecto beneficioso. Por ejemplo, la marchitez producida por el déficit hídrico, si bien tiene un efecto negativo en la tasa de asimilación de CO₂, también puede ser positiva para la planta, ya que colabora en la menor absorción de energía lumínica al cambiar el ángulo de exposición, evitando el daño permanente en la hoja por altas temperaturas (Montoliu, 2010).

Como se mencionó anteriormente, la clasificación de los factores de estrés son dos: bióticos y abióticos. El estrés abiótico, dependiendo del agente causal, puede dividirse en físicos y químicos. Entre los factores físicos se encuentra la sequía (déficit de agua), la salinidad (en su componente osmótico), las temperaturas extremas (calor, frío, congelación), la excesiva o insuficiente irradiación, la anaerobiosis producida por encharcamiento o inundación (exceso de agua), el estrés mecánico producido por el viento o la excesiva compactación del suelo, y el inducido por heridas o lesiones. Por otro lado, el estrés químico es causado por la salinidad (en su componente iónico o tóxico), por la carencia de elementos minerales y por los contaminantes ambientales o atmosféricos como el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos de nitrógeno (NO_x), los compuestos clorofluorocarbonados (CFC), el ozono (O₃) y los metales (Tadeo y Gómez-Cardenas, 2008).

En el capítulo 36 Huellas genómicas el descubrimiento de tolerancia al estrés abiótico en el arroz (Sandhu *et al.*, 2019) se menciona cinco principales estreses abióticos:

El primero es la sequía, la cual genera efectos severos en los cultivos de arroz, principalmente en las fases vegetativa y reproductiva, causando una reducción significativa en el rendimiento del cultivo, tal como lo indica Hsia, Loka y Oosterhuis. La gravedad, el tiempo, y la longitud del estrés por sequía, así como la fase del desarrollo de las plantas son determinantes clave en la productividad de los cultivos en condiciones de sequía, esto fue indicado por Fischer, Nayyar *et al.*, Bernier *et al.*, Ghimire *et al.*, Tanveer ul Haq *et al.*

El segundo punto es la salinidad, Reddy indica que ésta es otra importante limitación abiótica en el rendimiento, del cual se espera que aumente debido al cambio climático y a las actuales prácticas de riego. Momayezi indica que la tolerancia a la salinidad es un factor clave para determinar la productividad. La salinidad interfiere con cada etapa de crecimiento y desarrollo y la adaptación de las plantas y las respuestas al estrés, afecta a la germinación de semillas, plántulas y al crecimiento de brotes, tamaño de la hoja, longitud de la raíz, peso fresco y seco, el número de granos productivos por planta, número de espiguillas, la absorción de nutrientes del agua y, finalmente, la productividad de los cultivos de arroz, todos estos puntos fueron analizados por Zeng y Shannon, Singh *et al.*, Verslues *et al.*, Moradi e Ismail, Lauchli y Grattan, Munns y Tester, Ashraf y Akram, Hakim, Gupta y Huang.

El tercer punto es el aumento de temperatura, la cual ha dejado al descubierto la mayor parte de los cultivos del mundo al estrés por calor durante algunas fases de su ciclo de vida. Según Watanabe y Kume, las complejidades involucradas en la predicción exacta de los impactos agrícolas proyectadas del cambio climático añaden más a la incertidumbre. Peng indica que la media anual de las temperaturas máximas y mínimas se han incrementado en un 0.35°C y 1.13°C, respectivamente, en el período de 1979-2003 y el rendimiento del grano ha disminuido en un 10 por ciento por cada 10°C de aumento en la temperatura mínima durante el período vegetativo. En los principales cultivos de cereales, como el arroz, una alta temperatura en las fases vegetativas y reproductivas tiene el efecto más significativo en la productividad, y es responsable de pérdidas de rendimiento de grano, tal como indica Driedonks.

El cuarto punto es la sensibilidad al frío. Ghosh indica que los cultivos de arroz son sensibles al frío, temperaturas por debajo de 15°C, y los conducen a la mortalidad de las plántulas, decoloración de las hojas, crecimiento retrasado, y reducción de vigor de las plántulas. La etapa reproductiva del arroz es más vulnerable a las bajas temperaturas (<18-20°C), ya que da lugar a pérdidas de rendimiento debido a espiguillas estériles, panícula incompleta, y

aborto de espiguilla, tal como indica Cruz. A nivel mundial, en el cultivo de arroz al encontrar bajas temperaturas durante las etapas iniciales del crecimiento resultan en germinación pobre, pobre vigor, clorosis de las plántulas, mortalidad, y reducción de macollamiento.

Según lo indicado anteriormente, la época de siembra dentro del territorio nacional está supeditada a las condiciones climáticas. La siembra se inicia desde noviembre a mayo (campana grande) y desde agosto a enero (campana chica). El mayor hectareaje de siembra se realiza en la campana grande. Debe procurarse que la floración suceda en la época de mayor radiación (abril-marzo). Las temperaturas bajas se registran en agosto (15.9°C), en consecuencia la floración debe presentarse en los meses de abril-marzo con temperaturas mínimas más altas (Heros, 2013).

El quinto y último punto son las características del suelo. Las interacciones suelo-clima en un mundo en cambio tienen efectos directos e indirectos sobre las propiedades físicas y químicas del suelo, y potencialmente representan una seria amenaza para la seguridad alimentaria mundial. El impacto negativo del cambio climático en la salud del suelo es complejo y extremadamente lento. Las propiedades del suelo y procesos físicos tales como la actividad microbiana del suelo, la acidez del suelo, lixiviación de metales pesados, toxicidad, y la tasa de degradación de contaminantes de hidrocarburos, mencionados por Sobolev y Begonia, van a llevarse a cabo cada vez más por los cambios climáticos. Según Karmakar, la pérdida de carbono del suelo se debe principalmente a un aumento de temperatura, lo que resulta en la estructura inferior del suelo, estabilidad, capacidad de retención de agua, la disponibilidad de nutrientes, y el exceso de erosión. Los cambios drásticos en carbono y ciclo del nitrógeno, la acidificación, el exceso de erosión, y la salinización son las principales preocupaciones para la salud general del suelo. Un suelo enfermo es la limitación más grave que conduce a pobres rendimientos de los cultivos siguiendo el estrés de agua.

2.1.1. Estrés hídrico foliar

El estrés hídrico del cultivo sucede cuando la demanda de agua es mayor a la cantidad disponible durante un periodo de tiempo y es determinado en base a su tasa de transpiración. En este se incluyen el estrés por salinidad (en su componente osmótico) y el estrés por sequía. La salinidad está dada por un incremento de solutos (sales) en el agua del suelo o del medio en el que se desarrolla la planta, cuando esto ocurre se reduce el potencial hídrico de ese medio, y las plantas experimentan dificultades para absorber agua, esta deficiencia por tanto

trae como resultado un estrés hídrico en la planta o estrés hídrico foliar. Por otro lado, el estrés por sequía se define, como cualquier situación en la cual la cantidad de agua disponible para el cultivo es menor que la cantidad de agua requerida para sostener el crecimiento y la productividad.

El efecto más importante del estrés hídrico, por más leve que sea, es la reducción del crecimiento. Se sabe que la presión de turgencia de las células en crecimiento proporciona la fuerza motriz necesaria para la expansión celular, pero la tasa real de extensión es controlada por la variación en el potencial hídrico y la extensibilidad. Durante el estrés leve, la síntesis de materiales de la pared celular puede continuar, de tal modo que el retraso en el crecimiento durante un periodo de estrés corto se puede superar tras la recuperación. La regulación de la transpiración también es importante desde el punto de vista del balance energético de la hoja, en el que desempeñan un papel crucial los movimientos foliares (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008).

En particular, el estrés hídrico reduce la actividad fotosintética e induce al cierre de los estomas. Por consiguiente, el enfriamiento por evaporación se reduce y aumenta la temperatura foliar. Además del aumento de la temperatura experimentado por las plantas bajo estrés hídrico, la emisión de fluorescencia de clorofila de estado estacionario (es decir, fluorescencia-solar inducida, SIF) está también afectado debido a la reducción de la fotosíntesis (Camino *et al.*, 2018).

2.1.2. Potencial hídrico del suelo

El suelo es un sistema complejo que consta no solo de proporciones variables de partículas de roca y materia orgánica que forman la matriz sólida, sino también de la disolución del suelo y del aire que ocupa el espacio poroso. El tamaño y la naturaleza química de las partículas, en especial su carga eléctrica superficial y la manera en que se disponen, determinan que cantidad de agua se puede retener en el suelo en contra de la acción de la gravedad y con qué fuerza se retiene. Esta capacidad de retener el agua es una manera de describir el potencial hídrico del suelo y, como ya se indicó anteriormente, depende especialmente de las fuerzas de interfaz, representadas por el potencial mátrico. Puesto que en las capas superficiales del suelo existe poca variación en la presión hidrostática (de tal modo que $\Psi_p = \text{presión atmosférica} = 0$), y se encuentran pocos solutos presentes (excepto en suelos salinos) (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008).

Cuando las raíces de las plantas absorben agua, provocan una desecación local del suelo, que hace que el agua se adhiera más firmemente a las partículas de este. La disminución resultante del potencial mátrico actúa como una presión negativa o succión y disminuye el potencial hídrico del suelo. Por tanto, el agua se mueve de las partes más húmedas del suelo a las más secas, siguiendo gradientes de potencial mátrico, en parte por difusión, pero fundamentalmente por flujo masivo (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008).

La velocidad con la que el agua se mueve desde el suelo a las raíces depende de la magnitud del gradiente de potencial hídrico y de la conductividad hidráulica del suelo. La conductividad hidráulica del suelo es una medida de la facilidad con que el agua se mueve a través de él, y depende tanto del tipo de suelo como de su contenido hídrico. Cuando un suelo está totalmente mojado después de haber drenado por gravedad, (estado conocido como capacidad de campo), su potencial hídrico es próximo a cero. No obstante, a medida que el suelo se seca, el potencial mátrico desciende y el potencial hídrico se hace más negativo. Al respecto, la Figura 1 representa la relación entre el potencial mátrico del suelo y el contenido hídrico. Se denomina porcentaje de marchitez permanente al contenido hídrico del suelo con el cual las plantas se marchitan. No obstante, con independencia del tipo de suelo, en el porcentaje de marchitez permanente el potencial hídrico es relativamente uniforme, aproximadamente -1.5 MPa. Aunque existen algunas excepciones, la mayoría de las plantas son incapaces de extraer cantidades importantes de agua cuando el potencial hídrico del suelo se hace inferior a -1.5 MPa. En cierto modo, la capacidad de campo se puede considerar una propiedad del suelo, mientras que el porcentaje de marchitez permanente lo es de la planta. Tradicionalmente se ha definido como agua disponible la que existe entre la capacidad de campo y el porcentaje de marchitez permanente. Hay que decir, no obstante, que en este margen el agua no está uniformemente disponible. En un suelo que se seca, las plantas empezaran a mostrar signos de déficit hídrico y reducción del crecimiento mucho antes de que el potencial hídrico del suelo alcance el porcentaje de marchitez permanente (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008).

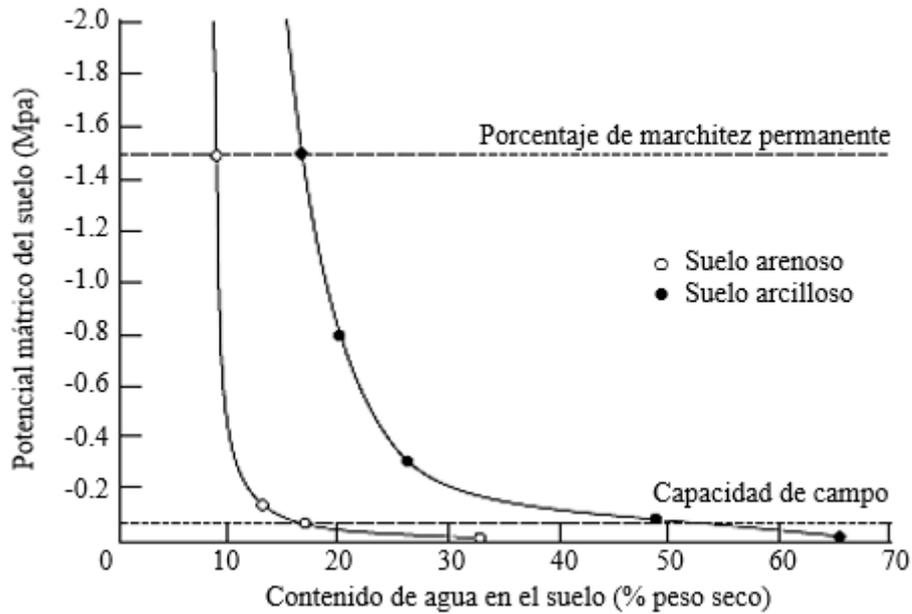


Figura 1. Potenciales mátricos de un suelo arenoso (o) y otro arcilloso (●) en función del contenido hídrico del suelo

FUENTE: Sánchez-Díaz y Aguirreolea (2008)

Cuando el potencial hídrico del suelo desciende por debajo de un nivel crítico, la absorción cesa y la planta muere. El efecto en las plantas de estos ciclos diarios de potenciales hídricos bajos no solo depende del grado de recuperación del xilema y de la cavitación, sino también de si se da o no osmorregulación en las hojas. Si esta no tiene lugar, la caída del potencial hídrico foliar provocara inevitablemente una disminución de la turgencia, que desencadenara el cierre estomático y la reducción de la expansión celular. En condiciones de campo, en la determinación del estado hídrico de la planta el déficit de presión de vapor de la atmosfera puede llegar a desempeñar un papel más importante que el del contenido hídrico del suelo. Otro factor relevante es la extensión del sistema radical, al condicionar la capacidad de absorción de agua por parte de la planta. Por la noche, cuando cesa la transpiración, el déficit hídricos diurnos se eliminan gradualmente y, con el tiempo, el potencial hídrico de la planta alcanza un cierto equilibrio con el potencial hídrico del suelo (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008).

Respecto a la textura del suelo, en la capacidad de campo, la arena solo contiene un tercio de la cantidad de agua que posee la arcilla, y para un mismo contenido hídrico, los suelos arcillosos poseen un potencial hídrico muy inferior al de los arenosos tal como se aprecia en la Figura 1 (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2008).

2.2. Índice de estrés hídrico foliar (CWSI)

Los índices basados en la temperatura de la hoja o del dosel se usan ampliamente en el diagnóstico del déficit de agua de cultivo desde la década de 1970, con la llegada de los termómetros de mano como los días de grado de estrés (SDD), la variabilidad de la temperatura del dosel (CTV) y el estrés hídrico del cultivo índice (CWSI) (Xu *et al.*, 2016).

El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI, por sus siglas en inglés “Crop Water Stress Index” es uno de los índices radiométricas basado en temperatura desarrolladas para climas áridos, tal como indica Jones (Rinza *et al.*, 2018). Además, Idso, Jackson, Pinter, Reginato, y Hatfield y Jackson, Idso, Reginato, y Pinter sugieren el uso del CWSI como un indicador de estrés hídrico de la planta (Quebrajo *et al.*, 2017).

Según Jones (2014), hallar el valor del índice de estrés hídrico foliar involucra hallar una relación que permita brindar una guía al momento de programar el 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.

El CWSI se ha aplicado en diversos cultivos, como el trigo (Yuan; Gontia y Tiwari; Li *et al.*), el algodón (Silva y Rao; O'shaughnessy *et al.*), el maíz (Anda; Li *et al.*; Romano *et al.*; Taghvaeian), frijol (Erdem *et al.*), y algunas verduras (Cremona *et al.*; Simsek *et al.*; Erdem *et al.*; Aladenola y Madramootoo; Rud *et al.*) o frutos (Erdem *et al.*; Paltineanu *et al.*), citado por Xu *et al.* (2016).

El fundamento teórico de dicho índice está en relación a la tasa de transpiración. El cierre de estomas inducido por el déficit hídrico reduce la tasa de transpiración de las hojas y, en consecuencia, reduce el enfriamiento por evaporación y aumenta de la temperatura foliar (Berni *et al.*, 2009). Cuando una planta transpira sin estrés hídrico, la temperatura de la hoja es menor que la temperatura ambiental, en este caso el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) es 0. Cuando la transpiración decrece, la temperatura de la hoja asciende y supera la temperatura del aire. En este caso, el déficit hídrico es alto, la transpiración de las hojas se 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 (López *et al.*, 2009).

El índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) desarrollado por Idso *et al.* (1981), fue definido como:

$$CWSI = \frac{T_{foliar} - T_{húmeda}}{T_{seca} - T_{húmeda}}$$

Donde T foliar es la temperatura de la hoja del dosel (°C), T húmeda es la temperatura promedio de la referencia en húmedo que actúan como el sustituto de la temperatura de la línea de base bien regado; y T seco es el límite superior para la temperatura de la cubierta, lo que equivale a la temperatura de una hoja no transpirante con estomas completamente cerrada (Xu *et al.*, 2016).

La temperatura seca es estimada como la temperatura del aire más una constante (Ta + X), propia para el cultivo de estudio y para determinadas condiciones climáticas. Según Idso *et al.* (1982), el valor de X puede variar de 1 °C hasta 12 °C. Por ejemplo, en la investigación en el cultivo de vid desarrollado por Rud *et al.* (2014) tomaron como temperatura seca a Ta+7°C y como temperatura húmeda Ta-10°C. Por otro lado, según Irmak, citado por Xu *et al.* (2016), tomaron como temperatura seca del cultivo de arroz Ta+5°C.

2.2.1. Sensor térmico infrarrojo

La termometría es una herramienta sencilla y práctica para la estimación del estrés hídrico, para obtener una mejor programación del riego optimizando el uso de agua en los campos agrícolas.

Detectar la temperatura foliar usando sensores infrarrojos o imágenes ha demostrado un buen potencial para el cálculo del CWSI y estimar el estado de agua de la planta para la programación de riego en soja, algodón, maíz, girasol, vid, y pistachos, realizado por diversos autores (Xu *et al.*, 2016 y Quebrajo *et al.*, 2017).

Según Snyder y Zhengming, citado por Quebrajo *et al.* (2017), la energía térmica de la tierra emitida es una función de la temperatura de la superficie y la emisividad de la superficie, donde la emisividad depende del propio material que varía de 0 a 1. Dado que los sensores remotos pueden detectar y cuantificar el calor emitido por la tierra, la temperatura de la superficie se podría determinar rápidamente (Quebrajo *et al.*, 2017). En la actualidad, los softwares de las cámaras termográficas facilitan las correcciones en campo de las imágenes, al introducir información de emisividad, humedad relativa, temperatura del aire, distancia al objeto y temperatura reflejada por el ambiente circundante.

El primer parámetro de emisividad según García *et al.* (2018) y Mira *et al.* (2017), tendrá un valor característico de 0.96 para coberturas vegetales. En relación al segundo, tercer y cuarto parámetro dependerá del día en que se realiza la toma de imágenes. Con respecto al último parámetro puede ser estimado midiendo la temperatura reflejada por una pieza de papel de aluminio irregular, colocada entre la cámara y el objeto a medir, y usando para ello el valor de emisividad máxima ($\epsilon = 1$). Esto es aplicado en el trabajo de Jones donde indica que la temperatura de referencia de fondo se determinó mediante la medición de la temperatura de la hoja de arrugado de papel de aluminio situado cerca de las hojas o dosel de interés y el uso de emisividad igual a 1. Además, que fueron las imágenes tomadas con una orientación NS (Costa *et al.*, 2018).

La temperatura reflejada, según el manual de la cámara termográfica FLIR, sigue lo especificado a continuación:

- i. Cortar un trozo grande de papel de aluminio y arrugarlo un poco.
- ii. Adjuntarlo a un trozo de cartón del mismo tamaño.
- iii. Colocar el cartón en la parte delantera del objeto que se desea medir. Asegurarse de que el lado con el papel de aluminio apunta a la cámara y está en el mismo ángulo y orientación que el objeto.
- iv. Ajustar la emisividad de la cámara termográfica a 1
- v. Medir la temperatura aparente del papel de aluminio y anotarla.

2.2.2. Sensor térmico de termocupla

Esta forma de medición de la temperatura de la hoja será mediante el uso de termocuplas unidas a las hojas del cultivo. La termocupla es el sensor de temperatura más común utilizado industrialmente, consta de dos alambres de distinto material unidos en un extremo (soldados generalmente). Al aplicar temperatura en la unión de los metales se genera un voltaje muy pequeño (efecto Seebeck) del orden de los milivoltios el cual aumenta con la temperatura.

La dependencia entre el voltaje entregado por la termocupla y la temperatura no es lineal, es deber del instrumento, efectuar la linealización, es decir tomar el voltaje y conociendo el tipo de termocupla. Dicha linealización se puede observar en la Figura 2.

Según las tablas de Omega, fabricante de termocuplas, se recomienda las de tipo “T” para ambientes con humedad presente. Éstas son las que poseen un error menor en la medición

de temperaturas siendo 1°C. Además, el rango de medición de temperatura varía entre -270 a 400°C.

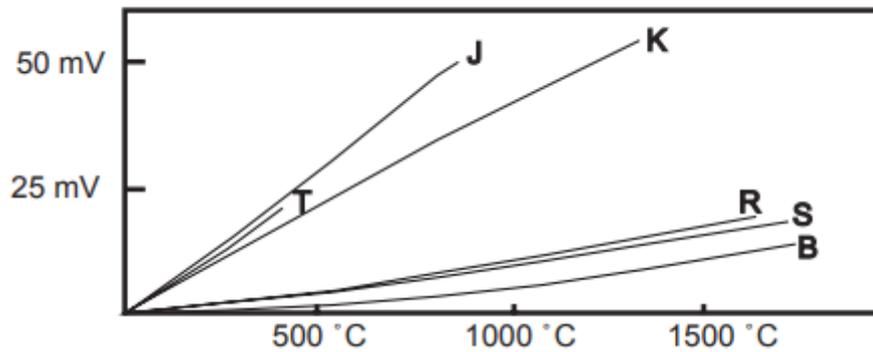


Figura 2. Linealización de temperatura respecto al voltaje para cada tipo de termocupla

FUENTE: ARIAN Control & instrumentation (Consultado 6 nov. 2017)

Según Li *et al.*, citado por Kim *et al.* (2018), las cámaras térmicas permiten la monitorización de las temperaturas de áreas más grandes mediante imágenes térmicas infrarrojas (IR) y pueden mantenerse durante períodos de tiempo más largos en comparación con mediciones de punto utilizando termocuplas o termopares.

Kim *et al.* (2018) evaluaron errores en las temperaturas IR comparándolas con mediciones directas de termocuplas, sensores que miden una parte muy pequeña de una hoja, resultando que éstos últimos obtuvieron una mayor correlación.

2.3. Procesamiento de imágenes térmicas

Para obtener la temperatura foliar en una imagen térmica, del área foliar del cultivo, se debe separar aquellos píxeles correspondientes a otros elementos y coberturas no deseables. Para ello se dispone de dos métodos: el método de temperaturas umbrales, el cual emplea temperaturas umbrales propios del cultivo como son las temperaturas húmeda y seca; y el método de superposición de imágenes, en el que la creación de una máscara de cobertura vegetal a partir de la imagen RGB se superpone con la imagen térmica.

Para el estudio, se analizará el método de superposición de imágenes seguido del método de temperaturas umbrales.

2.3.1. Método de temperaturas umbrales

Para obtener los valores de temperatura foliar es necesario la estimación previa de temperaturas umbrales como lo son la temperatura húmeda (T_h) y temperatura seca (T_s) obtenidas de los sensores térmicos y temperaturas del aire (Rud *et al.*, 2014).

Las temperaturas húmeda y seca son temperaturas características del cultivo en condiciones de mínimo y máximo estrés hídrico foliar, respectivamente. Varían según 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. La estimación de estas temperaturas se realiza a partir de mediciones directas a la hoja como lo son los sensores térmicos de termocuplas (STT), tal como se explica a continuación:

- 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, tal como indica Jones (2004), Aston y Van Bavel (1972).
- 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, tal como indica Jackson *et al.* (1982).

Las imágenes térmicas son procesadas por un algoritmo que seleccione los píxeles de temperatura que se encuentren dentro del rango de las temperaturas húmeda y seca:

$$T_{húmeda} < T_{foliar} < T_{seca}$$

Posteriormente se selecciona el 33 por ciento de temperaturas inferiores, garantizando la selección de únicamente píxeles de temperatura foliar, según la experiencia desarrollada por Meron *et al.*, citado por Rud *et al.* (2014). Finalmente, se calcula el valor promedio de píxeles obteniéndose la T_{foliar} .

2.3.2. Método de superposición de imágenes

Utiliza la extracción de la temperatura de la hoja a través de la identificación de colores, previa superposición y corrección de la imagen óptica y térmica, que al tener diferente tamaño de píxel ocasiona errores (Wang *et al.*, 2010).

Según Wang *et al.* (2010), la extracción de la temperatura de la hoja a través de la identificación del color implica los siguientes tres pasos:

- i. Extracción de la hoja de la planta: la imagen objetivo con solo hojas, se obtiene a través de la identificación del color. El color de la hoja de la planta, se supone que sigue una distribución de Gauss; es decir, sigue una distribución normal $N(\phi, \Sigma)$ en HSV (tonalidad, saturación y valor) espacio de color, donde $N(\phi, \Sigma)$ sigue una distribución Gaussiana con media ϕ y covarianza Σ . Se opta por convertir la imagen a HSV porque trabajar con valores de HSV es mucho más fácil de aislar colores. En la representación de HSV del color, el matiz determina el color que desea, la saturación determina la intensidad del color y el valor determina la claridad de la imagen. Estas distribuciones Gaussianas corresponden a cada cobertura (agua, suelo, vegetación, etc.) existente en la imagen. En la investigación de Wang *et al.* (2010) para seleccionar las hojas del cultivo de vid determinaron que la distribución tenía las siguientes características: $\phi = [100, 0.6, 0.6]'$ y $\Sigma = \text{diag}[30, 0.5, 0.25]'$.
- ii. Extracción de la temperatura foliar: se crea una máscara con la distribución de píxeles obtenidos del paso anterior. Luego se extraen los valores de la temperatura foliar mediante la superposición de la máscara creada con la imagen térmica.
- iii. Estadísticas de la temperatura de la cubierta: La temperatura foliar de la planta puede estimarse con el promedio de los píxeles de temperatura foliar resultantes.

Si bien la extracción de área de la hoja a través del color de identificación proporciona una solución sencilla y eficaz para la estimación de temperatura de la hoja, adolece de dos defectos (Wang *et al.*, 2010):

- Objetos que no son hojas dentro del color identificado pueden ser incluidos como “hojas” y la temperatura del objeto no hoja puede apartarse significativamente de la gama de temperatura de la hoja.
- Los valores de temperatura no deseados pueden ser introducidos a causa de registro de la imagen imperfecta surge el error de registro de imágenes debido a que la precisión algoritmo de registro es limitado y el detalle de imagen óptica no se corresponde exactamente con la de la imagen IR.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

El diseño experimental es de tipo comparativo donde cada índice de estrés hídrico, CWSI (variable independiente), se relaciona a un valor de humedad volumétrica del suelo (variable dependiente).

3.1. Zona de estudio

El experimento fue realizado en el campo experimental del “Área Experimental de Riego” (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, localizado en el distrito de La Molina, Provincia de Lima, Región Lima. Teniendo las siguientes coordenadas geográficas: $-12^{\circ} 04' 50''$, $-76^{\circ} 57' 06.5''$ y 233 m.s.n.m. de longitud, latitud y altura, respectivamente.

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, así como, insumos y materiales necesarios para el manejo del cultivo. Además, de los softwares empleados en la etapa de gabinete para el procesamiento de la información recolectada por los sensores.

Tabla 1: Materiales, equipos y herramientas computacionales

Equipos	Características generales	Uso o aplicación
Sensores térmicos	Cámara termográfica Marca FLIR, modelo E60. Dimensiones de imagen óptica 2048x1536 píxeles, dimensiones de imagen térmica 320x240 píxeles, resolución horizontal y vertical 72 ppp, tamaño de píxel 0.35 mm, sensibilidad de 0.05°C, rango espectral 7.5 - 13 μ m.	Permitió obtener imágenes térmicas y ópticas (RGB). Cuenta con un lente amplificador que incrementa las dimensiones de las imágenes ópticas.
Sensores térmicos	Sensores térmicos de termocuplas (STT) Marca OMEGA, modelo TT-T-36-SLE-500, 24 sensores termocuplas tipo "T" (cable positivo de cobre y cable negativo de constantán, aleación de cobre y níquel, unidos mediante soldadura de estaño); y colector de datos PC200W, marca Campbell Scientific.	Permitió obtener medición puntual y precisa de la temperatura de la hoja del cultivo.

Continuación...

Sensor climatológico	Sensor digital de humedad de relativa y temperatura del aire	Marca Campbell Scientific, modelo CS215-L. Precisión de humedad relativa de +/-2 por ciento y temperatura de +/-0.4°C. Posee un protector de radiación. Funcionamiento por medio del colector de datos PC200W.	Permitió obtener la medición de humedad relativa y temperatura del aire en el área experimental.
Sensores de humedad volumétrica del suelo	TDR sensor de humedad volumétrica del suelo	Marca FIELDSCOUT, modelo TDR 350. Medición de humedad volumétrica con precisión de +/-3 por ciento con $CE < 2 \text{ mS/cm}$. Registro de profundidad según varillas de 12 o 20 cm de largo con diámetro de 0.5 cm y espaciamiento de 3 cm.	Permitió obtener la medición de humedad volumétrica del suelo de forma de forma puntual con toma de datos en un momento en particular (TDR) o un registro de valores cada 30 minutos (FDR). Ambos sensores requieren calibración con humedad obtenida por el método de humedad gravimétrica.
	FDR sensor de humedad volumétrica del suelo	Marca DECAGON, modelo GS1, cuatro sensores FDR, medición de humedad volumétrica del suelo, tiempo de medición 10 ms, precisión de +/-0.03 por ciento, dimensiones de 5.1cm x 2.4cm x 2.1cm, varillas de 5.2 cm de largo.	

Materiales	Características generales	Uso o aplicación	
Semilla	Variedad IR 71706, alcanza rendimientos de 8 Tn Ha-1 con densidad de 80 Kg Ha-1 de semilla (Heros <i>et al.</i> , 2017).	Variedad de arroz resistente al déficit hídrico. Trasplante en tres bolillos con distanciamiento entre plantas de 0.2 m (horizontal y vertical).	
Conducción del cultivo	Fertilizante, funguicidas e insecticidas	N, P, K (60-30-60); en foliar: vibrel, azoo doo, absolute, agruben, sulfapulus, folicur, basfoliar, aminoácido, redomil, coadyuvante y corrector de PH; en funguicida: protexin; en fertirrigación: monofosfato monomónimo, nitrato de calcio, sulfato de magnesio, ácido fosfórico.	Para el óptimo desarrollo del cultivo, control de plagas y enfermedades.
	Sistema presurizado de riego por goteo	Cabezal de riego con electrobomba de 1.5 HP, caudalímetro, equipo venturi, filtros de anillos y válvulas check; tuberías de conducción y portales laterales de 1.5" de PVC; arco de riego con electroválvulas reguladoras, válvulas de aire y puntos de prueba de presión; laterales de riego de 16mm con goteros autocompensados de 3.75 L/h.	Permitió brindar el agua requerida al cultivo. Tener un mejor control en el momento de aplicación de tratamientos. Distancia entre laterales 0.5 m y entre goteros 0.25 cm (superposición del 36 por ciento).

Continuación...

Barras con aluminio para imágenes térmicas	Barras de acero	84 barras de acero de 1.2 m, diámetro de 3 cm, pintadas de blanco y enterradas 40 cm.	Permitió realizar la georreferenciación de las imágenes ópticas con respecto a las térmicas para la reducción de dimensiones.
	Alambre galvanizado	Alambre galvanizado N°18, sujeto en cada barra de acero.	
	Aluminio	Papel aluminio marca U-THIL, sujeto por cada alambre galvanizado.	
Accesorios de la cámara térmica	Rótula	Rótula de bola para cámara, 1/4" tornillo, soporte 360°, material de aleación de aluminio.	Permitió mantener un mismo ángulo de inclinación en la toma de imágenes.
	Nivel de agua burbuja de tres ejes	Tres niveles de burbujas en el interior del cubo transparente, en los ejes X, Y y Z.	Permitió mantener nivelada la cámara termográfica.
	Escalera de aluminio	Escalera de tijera de acceso por dos lados con peldaños, fabricado de aluminio y altura de 2.4 m.	Permitió cubrir una mayor área en la toma de imágenes.
Accesorios de termocuplas	Cinta de fibra de vidrio	Cinta autoadherible de fibra de vidrio, de 5cm x 45m, marca Superboard, gran adherencia, resistencia a la tensión.	Permitió la adherencia de los STT a las hojas del cultivo sin afectar la temperatura de medición por el aumento de temperatura de la cinta.

Softwares	Características generales	Uso o aplicación
Excel 2017	Software para el análisis, clasificación y manejo de datos, incluye funciones y cualidades para representar los resultados en forma de gráficas.	Utilizado para realizar el proceso de datos de temperaturas obtenidas por los sensores térmicos de termocuplas y cámara termográfica.
ArcMap 10.1	Software para la captura, edición, análisis, tratamiento y diseño de información geográfica.	Utilizado para reducir el tamaño de pixeles de imagen RGB al tamaño de pixeles de imagen térmica.
Matlab 2015	Software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio para el análisis de datos.	Utilizado para elaborar códigos de programación para el procesamiento de imágenes (RBG e IR).
SPSS 16	Software estadístico para el manejo de base de datos y análisis estadístico avanzado.	Utilizado para realizar el análisis estadístico de las correlaciones obtenidas.
FLIR Tools	Software desarrollado por la empresa fabricante de cámaras termográficas para la modificación o análisis de imágenes térmicas.	Utilizado para realizar la calibración de las imágenes térmicas obtenidas por la cámara termográfica.

FUENTE: Elaboración propia

- Conducción del cultivo

La variedad de arroz utilizada fue la IR 71706, tolerante a sequía para condiciones de riego y aridez. Su designación es IR71706-136-3-2-3 y tiene su origen del Instituto Internacional de Investigaciones en Arroz (IRRI, Filipinas).

Para el estudio, se realizó un almácigo con el fin de asegurar un mayor número de plantas germinada con posterior trasplante a 28 días después de la siembra (DDS) en parcelas de 15 m² con sistemas de riego por goteo instalados.

El desarrollo del cultivo se caracterizó en tres fases fenológicas: vegetativa, reproductiva y maduración de granos. En la Tabla 2 y la Figura 3 se pueden apreciar a mayor detalle las fases caracterizadas.

Tabla 2: Duración de las fases fenológicas del cultivo de arroz, variedad IR 71706

	Fase fenológica (Etapas comprendidas)	Periodo de duración	Duración
Vegetativa	Abarca desde la emergencia hasta el macollamiento.	15 noviembre - 20 febrero	97 días
Reproductiva	Abarca desde el inicio del primordio floral hasta la floración – antesis.	21 febrero - 23 marzo	31 días
Maduración de grano	Abarca desde la formación del grano lechoso hasta la madurez fisiológica.	24 marzo - 30 abril	38 días

FUENTE: Elaboración propia



Figura 3. Fases fenológicas del cultivo de arroz, variedad IR 71706

FUENTE: Elaboración del “Área Experimental de Riego” (AER) de la UNALM

3.3. Procedimiento

La presente investigación se desarrolló en dos etapas: campo y gabinete, ambas orientadas según los objetivos específicos planteados. En la etapa de campo se preparó un almácigo el 15 de noviembre del 2017 y trasplantándose a los 28 días a 12 parcelas bajo riego por goteo. Se realizó el análisis de suelo y agua de riego que provino del río, captada por los canales de riego de la UNALM y almacenada en un reservorio 12 m³ del AER.

La investigación tuvo un diseño completamente al azar (DCA). Las 12 parcelas se agruparon en tres bloques; es decir, cuatro parcelas por bloque. El riego fue con humedad por encima de capacidad de campo (θ_{cc}) para lo cual se instaló previamente un sistema de riego por goteo. Además, se aplicaron tratamientos entre macollamiento y floración, entre el 1 de febrero (78 DDS) al 26 de febrero (103 DDS) del 2018; en general se tuvo un testigo (T0) a θ_{cc} y tres tratamientos (T1, T2 Y T3), tres repeticiones por cada uno, bajo riego de θ_{cc} con secas de reducción de humedad a 85%, 80% y 75% de θ_{cc} , tal como se observa en la Tabla 3. En la tesis de Salazar (2018) se detalla las referencias bibliográficas en las cuales se respalda la metodología, ya que se el trabajo en campo se realizó en conjunto con la presente investigación. Para cada tensión se determinó la variación máxima durante la aplicación de los tratamientos y la humedad volumétrica del suelo correspondiente, estos valores se obtuvieron de una previa calibración del sensor.

Tabla 3: Valor de tensión del suelo según tratamiento

Tratamientos	Tensión del suelo (cb, KPa)	Variación	Humedad volumétrica equivalente del suelo (%)
T0	0	± 2	θ_{cc}
T1	- 10	± 2	85% θ_{cc}
T2	- 15	± 2	80% θ_{cc}
T3	- 20	± 2	75% θ_{cc}

FUENTE: Elaboración propia

Luego se preparó el terreno destinado para el trasplante, instalando los sensores de humedad del suelo FDR GS1 colectando información en tiempo real cada 30 minutos a 20 cm de profundidad distribuidas en 4 parcelas. Complementario se tiene lecturas de humedad puntual en el resto de las parcelas, realizadas con el sensor TDR 350, lecturas realizadas a las 12 horas a 12 cm y 20 cm de profundidad. Respecto al sistema de riego, dispone de una electrobomba de 1.5 HP, caudal de 6 m³h⁻¹ y una presión de salida de 1.7 bar después del cabezal de riego. En los arcos de riego, la presión de salida fue de 1.5 bar y era regulada por medio de electroválvulas que servían a su vez para la programación del tiempo de riego en

cada parcela. Además, para evitar problemas de cavitación o entrada del aire al sistema se añadieron válvulas de aire. Finalmente, se aseguró que la presión que llegara al gotero sea mayor de 0.8 bar, la cual es la presión mínima para el gotero Katif-compensado.

El trasplante se realizó el 13 de diciembre del 2017 (28 DDS con plantas que tenían cuatro hojas verdaderas. En el transcurso de la conducción del cultivo se realizó las labores de manejo correspondientes para su óptimo desarrollo.

Siguiendo con los objetivos planteados, para el caso de la cámara térmica, en cada parcela se definió un área al centro delimitada con círculos de aluminio en varillas de acero, para la toma de las imágenes térmicas con el fin de georreferenciar las imágenes ópticas o RGB respecto a las térmicas o IR. Para favorecer la estabilidad de la cámara e igual distancia horizontal entre la cámara y parcela, se acondicionó bloques de concreto cerca a cada parcela. Se acopló a la cámara termográfica una rótula, con ángulo de 45° y un nivel de tres burbujas para mantener un ángulo fijo respecto a la horizontal. En la toma de imágenes se siguió el orden de 1 al 12, tal como se muestra en la Figura 4, dicho orden se mantuvo en todo el periodo fenológico.

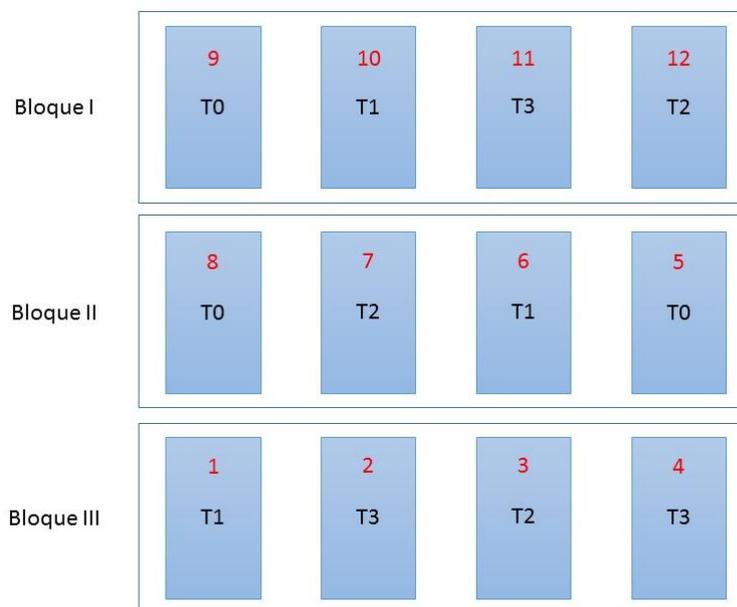


Figura 4. Distribución de tratamientos y orden de toma de imágenes térmicas

FUENTE: Elaboración propia

Para el caso de los STT, se instalaron 24 termocuplas distribuidas en cuatro parcelas y dos macetas de 0.04 m³ con una planta en cada maceta. Debido a la ubicación fija del data logger de los STT en el centro del experimento y a la longitud de los sensores, se instalaron en las

parcelas 6, 7, 10 y 11. Cada una de estas parcelas contaba con cinco termocuplas que se distribuyeron en plantas cercanas con hojas verdes y de la misma línea de riego. Respecto a la unión entre las soldaduras de estaño de los STT y las hojas del cultivo, se utilizó una malla autoadherible de fibra de vidrio. Se optó por utilizar esta cinta debido a que ésta permitió mantener la unión por un mayor tiempo sin alterar la medición real de temperatura brindada por las termocuplas, problemas anteriormente presentados en otras cintas probadas (3M Masking Tape, esparadrapo color piel, esparadrapo papel y 3M Transpore NEXC).

Para obtener la temperatura umbral seca, se sometió a estrés hídrico hasta la muerte de la planta de una maceta, iniciando el corte de riego en la fase fenológica vegetativo, monitoreándose la temperatura de la hoja con tres termocuplas, de igual manera para la fase reproductiva (segunda maceta) y fase de maduración (tercera maceta). La cuarta maceta se empleó para monitorear la temperatura del cultivo en condiciones óptimas (T0) monitoreándose la temperatura de la hoja con una termocupla.

La etapa de gabinete se describirá en los siguientes subtítulos relacionados, a su vez, con los objetivos específicos planteados para la presente investigación. La Figura 5 muestra un esquema general de la metodología desarrollada.

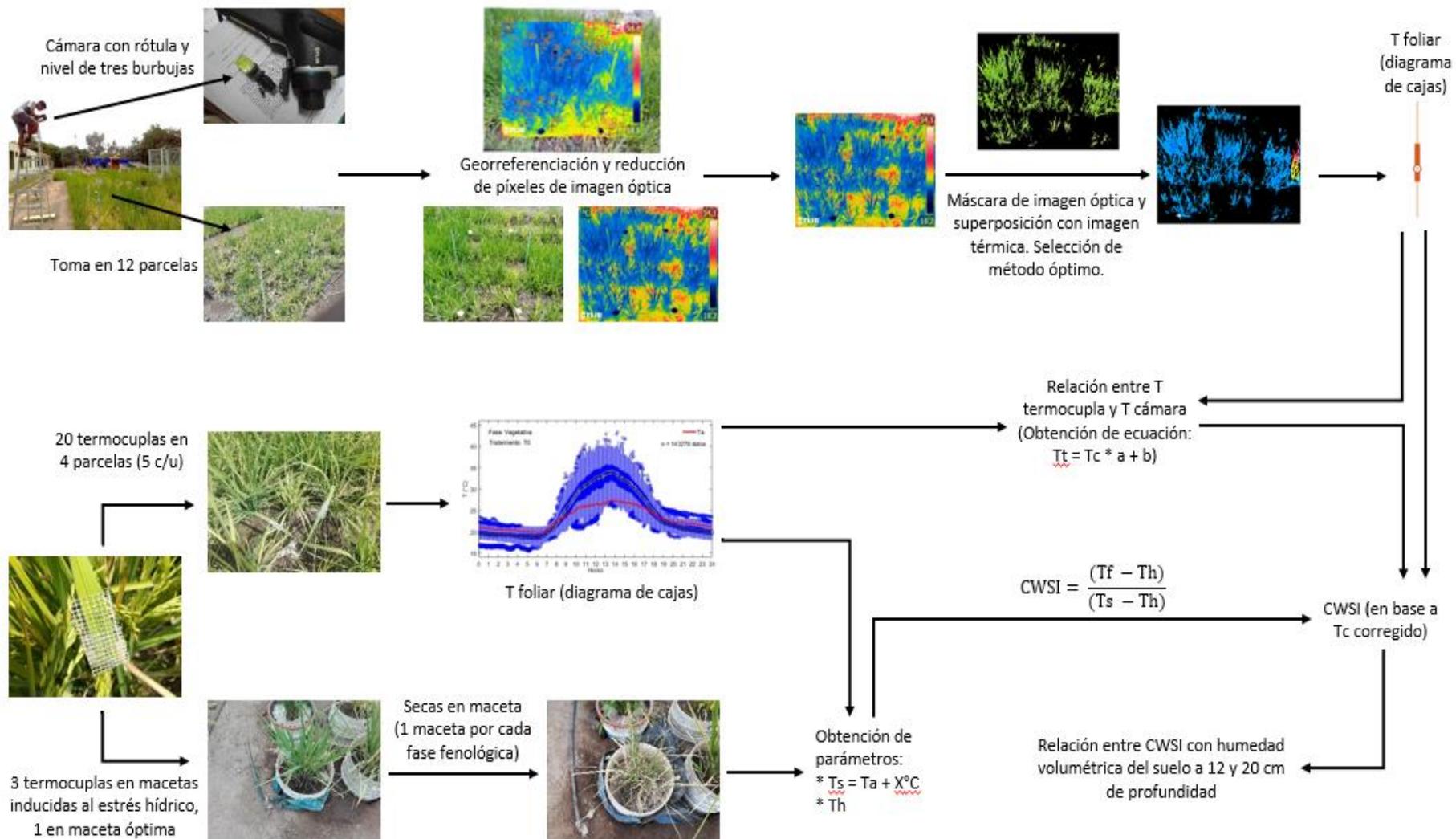


Figura 5. Esquema secuencial del procedimiento seguido en gabinete

FUENTE: Elaboración propia

3.3.1. Comparación de mediciones puntuales de temperatura obtenidos por los sensores térmicos de termocuplas (STT) con mediciones vía termografía infrarroja

Se realizó la descarga y análisis de información recogida cada cinco minutos de la humedad relativa, temperatura del aire y temperatura del cultivo. Con respecto a este último, se realizó la depuración de datos en que la temperatura registrada no correspondía al propio cultivo. Y se agrupó la información por fase fenológica, de igual forma para la temperatura del aire.

Estos valores sirvieron para la obtención de las horas representativas en la estimación de temperatura húmeda y seca diaria del cultivo. A continuación se detalla el procedimiento seguido para el caso de la temperatura húmeda o de mínimo estrés:

- 1) Gráficos de caja de temperatura del aire versus horas del día para cada fase analizada.
- 2) En el caso de la temperatura foliar, se utilizó aquellos datos registrados en las parcelas experimentales (total de 20 termocuplas) y maceta experimental con tratamiento T0 (una termocupla), y se generó el mismo tipo de gráficas por cada tratamiento y fase.
- 3) Se tomó una hora representativa en donde la mediana de los datos de temperatura foliar analizados se iguale a la del aire en cada tratamiento y fase.
- 4) Dicha hora fue utilizada en la temperatura del aire registrada para la obtención directa de la temperatura húmeda diaria.

Así mismo, se detalla el procedimiento seguido para la estimación de la temperatura seca o de máximo estrés:

- 1) Se utilizó las temperaturas foliares registradas de las macetas experimentales (tres termocuplas) en cada fase fenológica.
- 2) Para los días de interés, se realizó la diferencia cada cinco minutos de la temperatura del foliar con respecto a la del aire y se generó gráficas de caja para dicha diferencia de temperaturas versus horas del día para cada fase.
- 3) De las gráficas se tomó el valor máximo como la constante representativa, para cada fase fenológica, necesaria en el cálculo de la temperatura seca del cultivo ($T_s = T_a + X^{\circ}\text{C}$).
- 4) Respecto a la temperatura del aire requerida para el cálculo se tomó una hora representativa al igual que la temperatura húmeda, dicha hora fue aquella en donde se presentó las máximas temperatura promedio del cultivo en cada tratamiento y fase.

5) Dicha hora será utilizada en la temperatura del aire para la obtención directa de la temperatura seca diaria, en adición a la constante representativa para cada fase.

Por otro lado, se realizó la descarga y procesamiento de las imágenes IR y RGB obtenidos mediante la cámara termográfica. En esta sección se buscó definir la metodología más idónea para la clasificación de cobertura vegetal del cultivo respecto a los otros elementos presentes en ambas imágenes. Para ello, fue necesario realizar un proceso previo en ambas imágenes antes de la aplicación de las metodologías de discriminación de cobertura.

En las imágenes RGB, se realizó la georreferenciación de cada imagen RGB en relación a su respectiva imagen IR mediante el uso del software Arc Map. Este proceso se dio con ayuda de los puntos de aluminio instalados en campo, pues éstos fueron más fáciles de diferenciar en las imágenes térmicas. Una vez georreferenciada se procedió a cortar el área de la imagen RGB correspondiente a lo mostrado en la IR, con el fin de obtener ambas imágenes del mismo tamaño y con los mismos elementos en cada una. Un esquema de este proceso se puede observar en la Figura 5

En relación a las imágenes IR, la calibración se realizó mediante el uso del software FLIR Tools. La Tabla 4 muestra los parámetros requeridos para la calibración de las imágenes. Respecto a la obtención de la temperatura reflejada, se tomó como valor representativo para un día de toma, el promedio de los píxeles de temperatura en el cartón recubierto con aluminio, tal como se muestra en la Figura 6; esta imagen también requirió de una calibración. Este valor de temperatura reflejada es utilizado en la calibración de la imagen IR correspondiente a las parcelas experimentales, tal como se observa en la Figura 7. Por esta razón, la Tabla 4 muestra los valores utilizados en los parámetros de calibración para la obtención de la temperatura reflejada y la calibración de la imagen térmica de las parcelas.

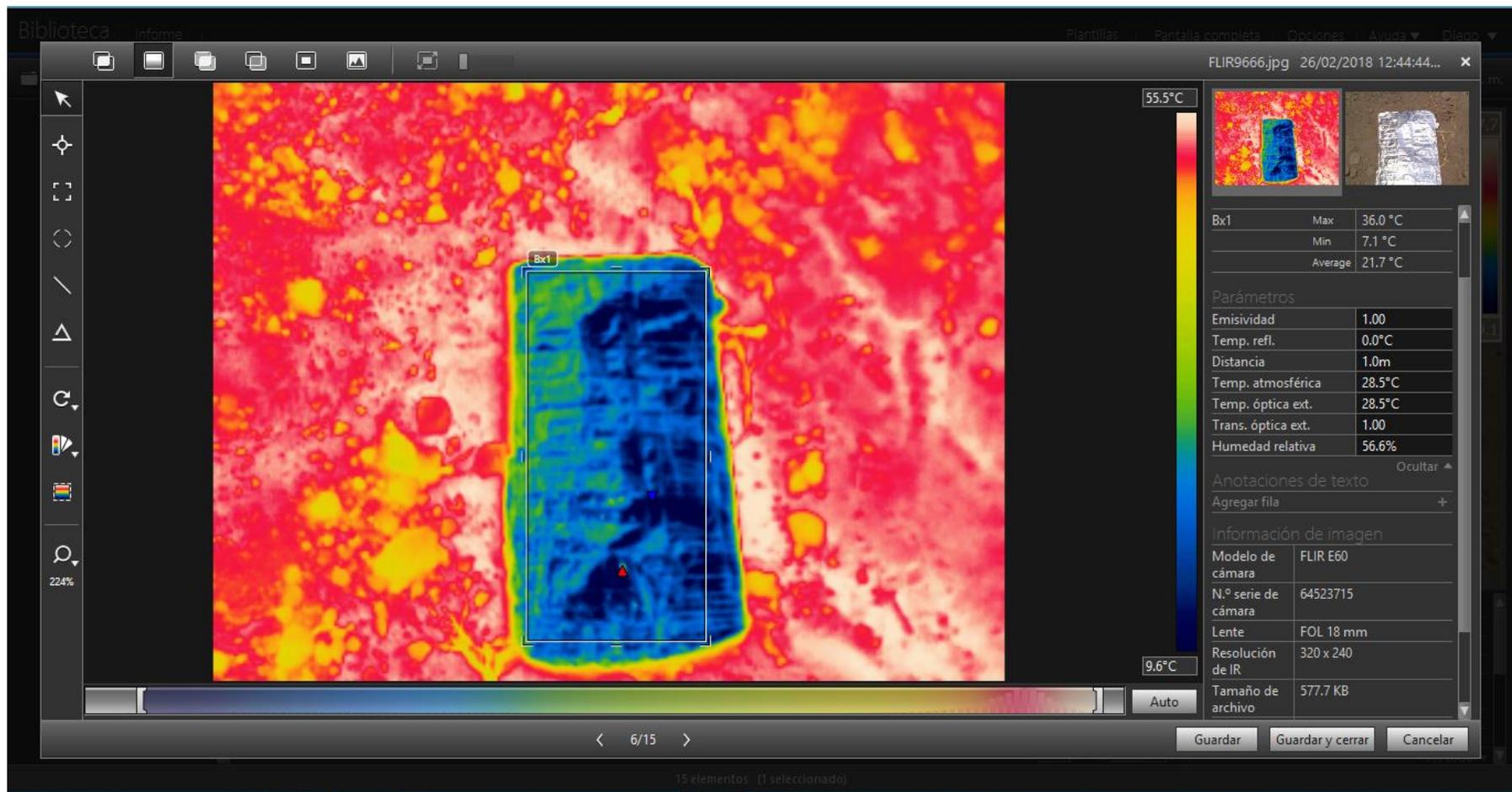


Figura 6. Panel del programa FLIR Tools para cambio de variables, obtención de temperatura reflejada del cultivo de arroz IR 71706

Fecha de muestreo: 26 de febrero del 2018 (103 DDS)

FUENTE: Elaboración propia

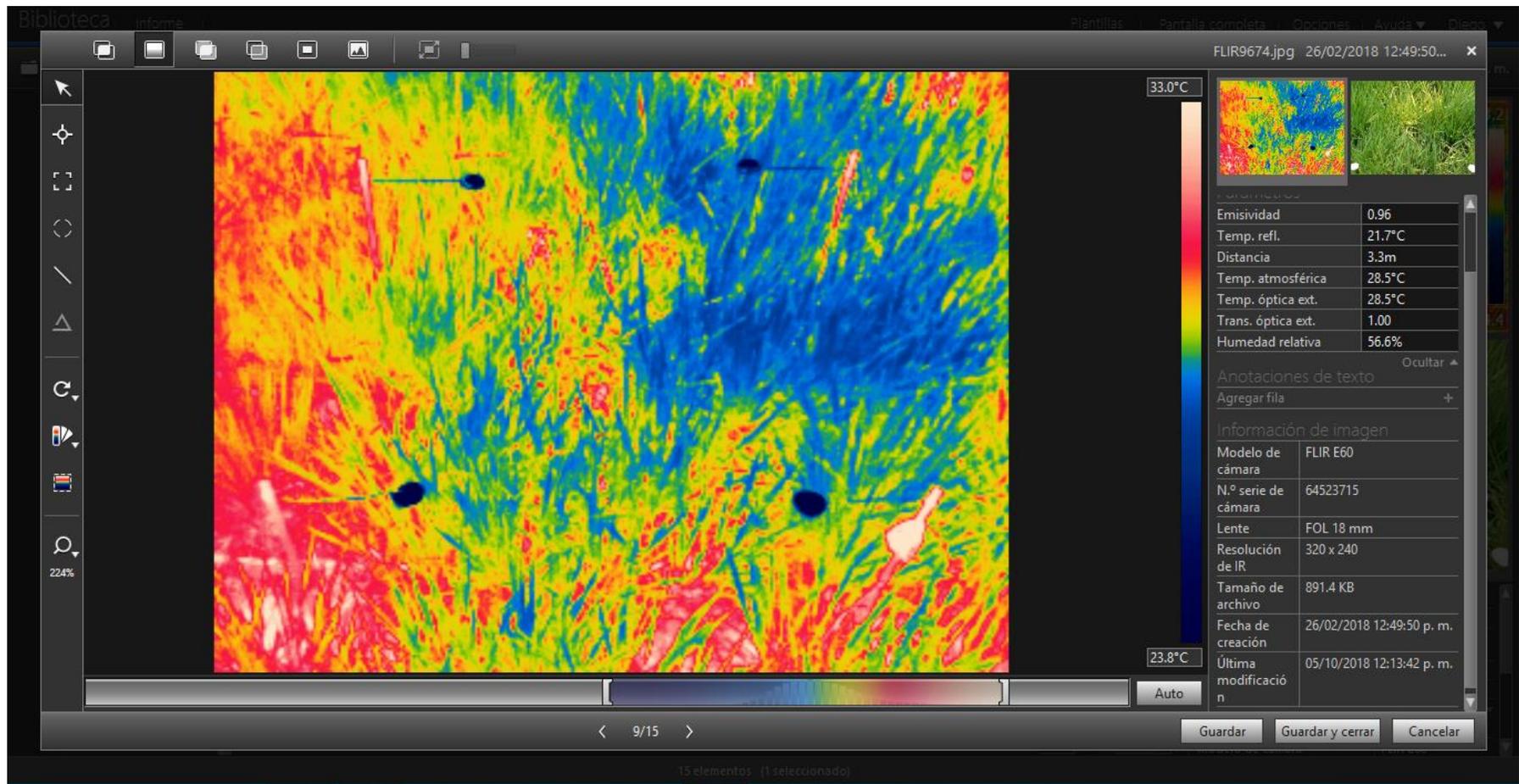


Figura 7. Panel del programa FLIR Tools para cambio de variables, calibración de imágenes térmicas del cultivo de arroz IR 71706 Tratamiento: T0. Fecha de muestreo: 26 de febrero del 2018 (103 DDS) FUENTE: Elaboración propia

Tabla 4: Valores utilizados en la obtención de la temperatura reflejada del día y calibración de cada imagen térmica

Parámetros de calibración	Obtención de temperatura reflejada	Calibración de imagen térmica
Emisividad de la cobertura vegetal	1	0.96
Temperatura reflejada del ambiente	0	Utilizando cartón recubierto de aluminio
Distancia del sensor térmico a la superficie de la hoja	1	3.3
Temperatura óptica externa	Igual a la temperatura del aire	Igual a la temperatura del aire
Transmisividad óptica externa	1	1
Temperatura atmosférica	Depende del día y hora	Depende del día y hora
Humedad relativa	Depende del día y hora	Depende del día y hora

FUENTE: Elaboración propia

Entre las metodologías planteadas para la extracción de cobertura vegetal están la (i) superposición de imágenes, (ii) temperaturas umbrales y (iii) superposición y temperaturas umbrales, que se desarrollaron mediante el uso del software Matlab. De ellas se escogió aquella que obtuvo una mayor correlación con los datos de temperatura foliar obtenidos mediante los STT, ya que éstos son datos más certeros (Kim *et al.*, 2018). Con el fin de tener una relación directa, esta comparación se realizó en las parcelas que tuvieron instaladas las termocuplas.

En el primer método se convirtió las imágenes RGB a HSV, tal como se observa en la Figura 8, y se usó como límites de cada banda: $4^\circ - 160^\circ$ (0.01 – 0.44), 0.4 – 1 y 0.3 – 0.9, en el tono, saturación y valor, respectivamente. Uniendo los valores restantes se obtuvo una máscara de cobertura vegetal de cada imagen RGB. Luego dicha máscara se superpuso con su respectiva imagen IR con el fin de obtener píxeles con temperatura foliar.

En el segundo método se excluyó aquellos valores de temperatura foliar por encima de la temperatura seca y por debajo de la temperatura húmeda en cada imagen IR. Los valores restantes se agruparon de mayor a menor y se seleccionó a aquellos valores dentro del 33 por ciento inferior con el fin de asegurar la selección de píxeles de cobertura vegetal.

En el tercer método se aplicó el procedimiento indicado en el método de superposición de imágenes seguido del procedimiento indicado en el método de temperaturas umbrales.

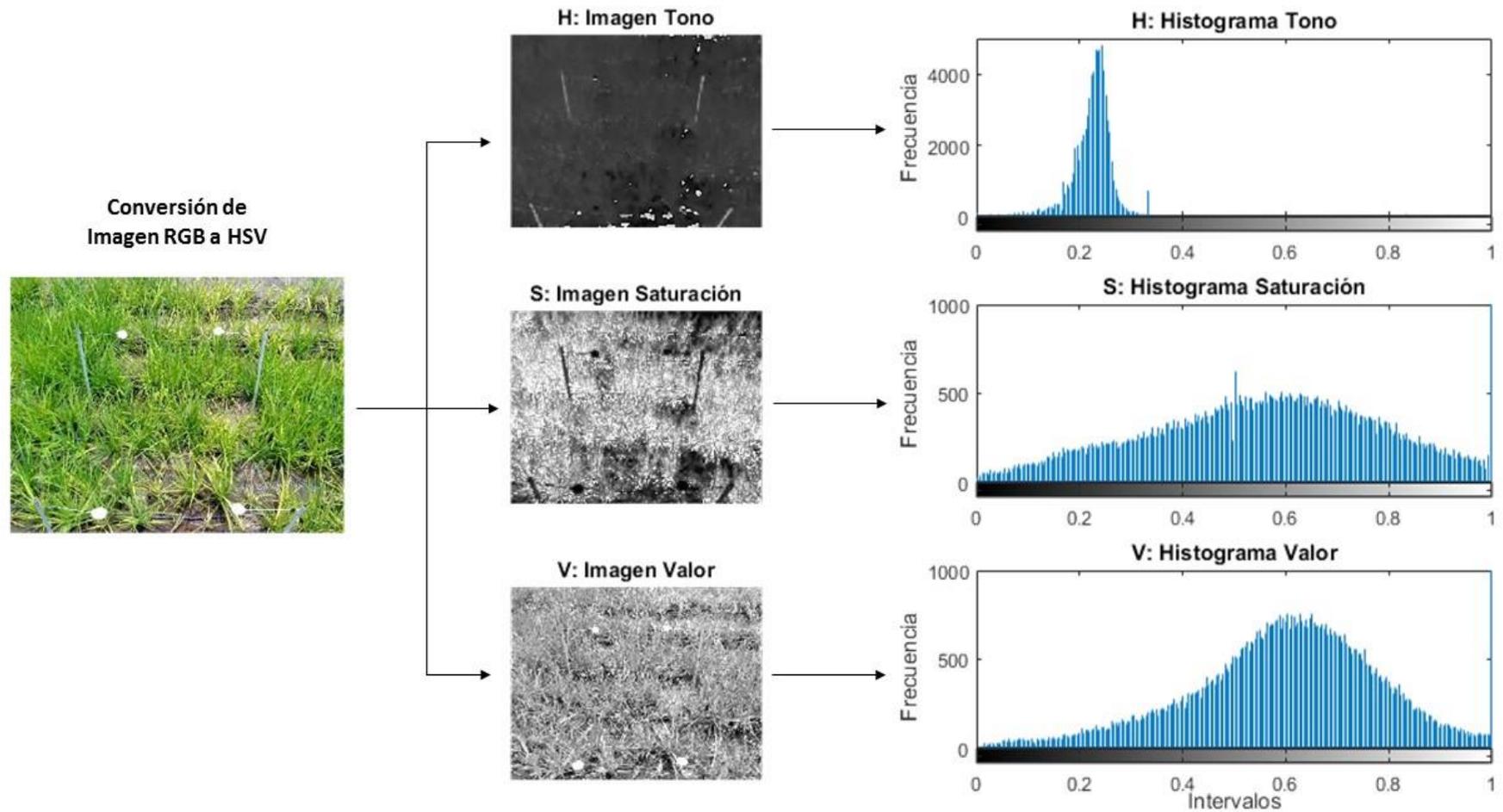


Figura 8. Histogramas de bandas de imagen RGB convertidas a HSV del cultivo de arroz IR 71706

Tratamiento: T0. Fecha de muestreo: 29 de enero del 2018 (75 DDS)

FUENTE: Elaboración propia

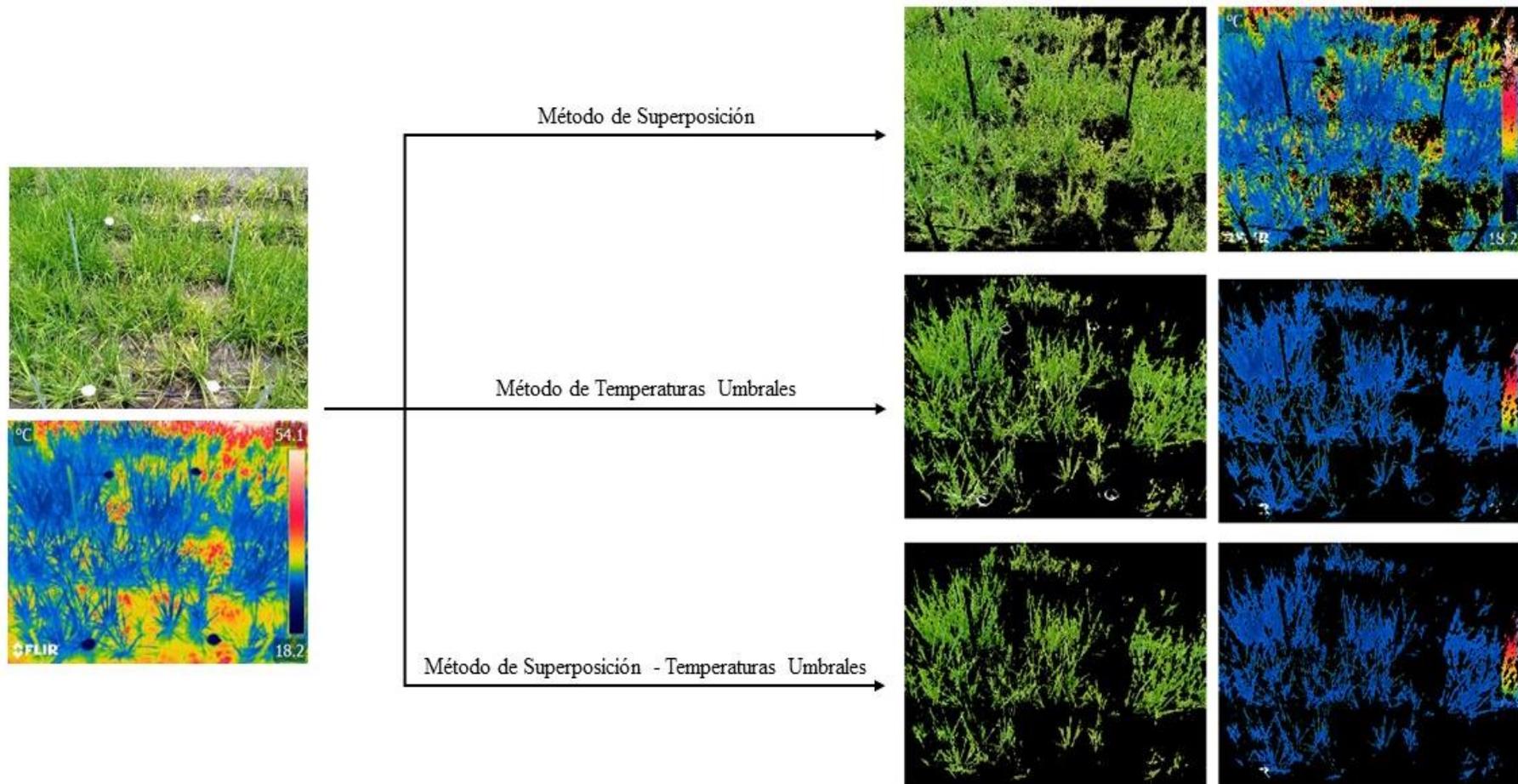


Figura 9. Métodos para obtención de máscara de cobertura verde del cultivo de arroz IR 71706

Tratamiento: T0. Fecha de muestreo: 29 de enero del 2018 (75 DDS)

FUENTE: Elaboración propia

Se aplicó los tres métodos en la información recolectada de cuatro parcelas para cada día de toma de imágenes: dos de tratamiento T1, uno de tratamiento T2 y uno de tratamiento T3. Luego se generó gráficos de caja para los datos de temperatura foliar versus DDS para cada fase. Posteriormente, se realizaron diferentes regresiones estadísticas tales como: exponencial, lineal, logarítmica, polinomial de segundo grado, polinomial de tercer grado y potencial. Para cada regresión se obtuvo el coeficiente de determinación y su ecuación correspondiente. Con el fin de validar las ecuaciones se realizaron pruebas t de Student. Finalmente, se escogió aquella regresión que más se ajustó a los valores trabajados entre los métodos descritos anteriormente.

3.3.2. Obtención del CWSI a partir de temperaturas foliares corregidas

Una vez definida la metodología y la regresión con mayor correlación entre las variables, se aplicó la ecuación seleccionada en los valores totales de temperatura foliar obtenidos mediante la cámara termográfica. Luego se generó gráficos de caja para los datos de temperatura foliar versus DDS para cada tratamiento.

Como anteriormente se definió las horas específicas para la obtención de las temperaturas húmeda y seca para cada día, se realizó el cálculo del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) para cada valor de temperatura foliar resultante. Estos valores se organizaron en diagramas de caja según tratamiento en todo el periodo fenológico.

Como el periodo de secas con reducción de humedad se dio entre los 78 y 103 DDS, se seleccionó los días comprendidos en dicho periodo para comparar la variación entre sus valores de CWSI por tratamiento.

3.3.3. Relación entre el CWSI y la humedad del suelo

En esta sección se buscó relacionar el CWSI con la humedad volumétrica del suelo. Para ello, en primer lugar se utilizó la calibración obtenida para cada sensor y profundidad, tal como se muestra en la Figura 10. El FDR registró la humedad del suelo en un periodo entre los 42 y 164 DDS de los sensores distribuidos en cuatro parcelas. Por otro lado, se utilizó el TDR para medir la humedad del suelo de cada parcela antes de cada toma de imágenes térmicas, esto se dio entre los 93 y 162 DDS.

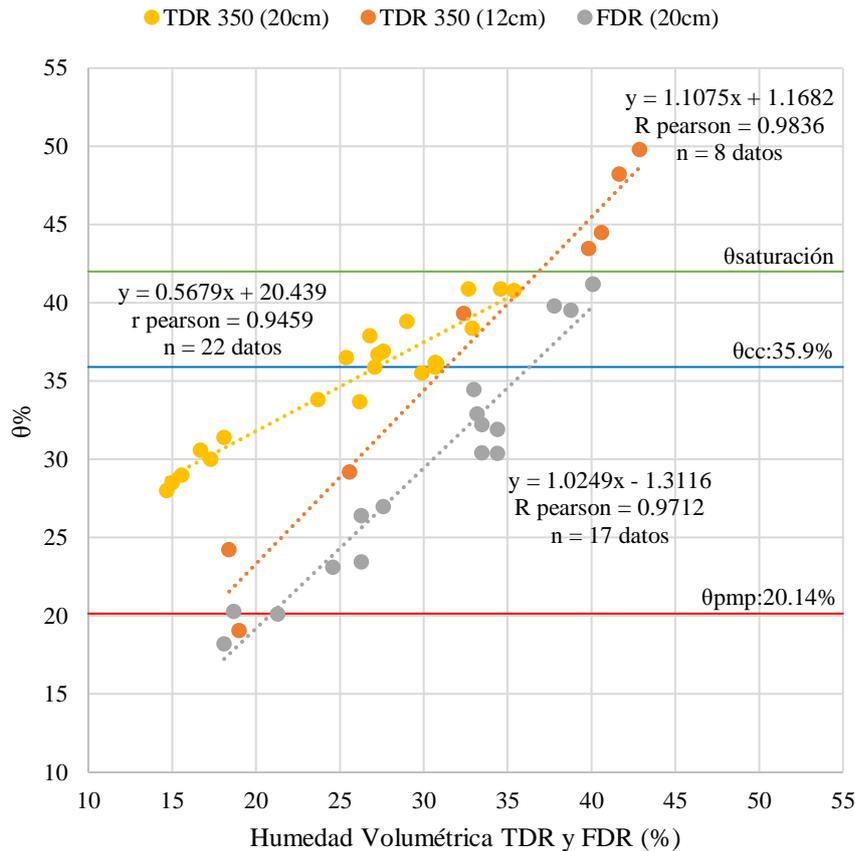


Figura 10. Líneas de tendencia para calibración de sensores de humedad del suelo en relación a la humedad volumétrica del suelo

FUENTE: Elaboración propia

Luego, se graficó el registro de todos los datos de humedad volumétrica del suelo a 20 cm de profundidad según tratamiento obtenidos cada media hora. A su vez, se graficó los datos puntuales de humedad volumétrica a 12 y 20 cm de profundidad según tratamiento.

Para la relación entre los valores resultantes de CWSI y humedad volumétrica del suelo se identificó los valores de humedad volumétrica del suelo correspondientes a cada día de toma de imágenes térmicas. Luego se generó un gráfico de dispersión que correlacionaba los valores de CWSI, por tratamiento, obtenidos en la sección anterior con el valor correspondiente de humedad volumétrica del suelo para cada profundidad analizada. Luego, se definió el tipo de correlación más adecuada en la relación de las variables se realizó la prueba de Kolmogorov – Smirnov indicando si poseen una distribución normal o no. Como las variables no se adecuaron a una prueba de correlación en específico se realizaron las correlaciones de Pearson, Kendall y Spearman. Finalmente, se eligió aquella profundidad que guardara una mayor correlación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

La presente sección se dividió en tres secciones, cada una de ellas referidas según los objetivos específicos planteados. La primer sección presenta los resultados de caracterización de temperaturas umbrales del cultivo y variables climáticas locales, análisis de las variables necesarias para calcular los CWSI de los datos de temperatura obtenidos por los STT y cámara termográfica, elección del método más adecuado para la clasificación de temperatura foliar en imágenes térmicas y correlación entre los resultados obtenidos de ambos sensores térmicos. La segunda sección, consiste en el cálculo del CWSI a partir de la metodología y regresión escogida en la primera parte para los datos de temperatura foliar obtenida de la cámara termográfica y el análisis de los resultados obtenidos en el periodo de secas de reducción de humedad. Finalmente, la tercera sección desarrolla las correlaciones entre los índices de CWSI, obtenidos en la sección anterior, con sus correlativas humedades volumétricas de suelo a las profundidades de 12 y 20 cm.

4.1. Comparación de mediciones puntuales de temperatura obtenidos por los sensores térmicos de termocuplas (STT) con mediciones vía termografía infrarroja

4.1.1. Sensor térmico de termocupla (STT)

El Anexo 14 muestra el comportamiento de la información total de temperaturas foliares del cultivo, clasificado según tratamientos, con la temperatura del aire para cada fase fenológica desde el 31 de diciembre de 2017 al 28 de abril de 2018; es decir, entre los 46 y 166 días después de la siembra (DDS). La instalación de los STT no se realizó antes de la fecha mencionada debido a que el trasplante fue el 14 de diciembre de 2017 y se esperó dos semanas para que la planta se adecúe al nuevo entorno. De igual forma, el Anexo 15 muestra el comportamiento de la información total de humedad relativa en el mismo periodo de tiempo y por cada fase fenológica.

En el Anexo 14, se observa que las temperaturas foliares se encuentran relacionadas a la variación de la temperatura del aire. Por ejemplo, a los 50 DDS se observa que la temperatura del aire no superó los 25°C, valor superado normalmente alrededor de dicha fecha, y como consecuencia la temperatura foliar no llegó a los valores obtenidos en esos días, siendo alrededor de 35°C, sino que llegó solo hasta los 28.4°C; lo mismo ocurre a los 95 DDS. Esto nos estaría indicando que la temperatura foliar guarda una relación con la temperatura del aire. Respecto a la humedad relativa, para los dos días mencionados se puede observar en el Anexo 15 que apenas disminuyeron por debajo del 70 por ciento, mientras que generalmente en los demás días el valor disminuye por debajo del 60 por ciento.

Debido a que se tuvo un registro de las condiciones de nubosidad en los días de toma de imágenes térmicas, se conoce que a los 61, 68 y 96 DDS la condición ambiental fue nublada. Se puede visualizar que esto tiene efecto en la variación de la temperatura foliar y del aire, pues la temperatura foliar no llega a los valores comúnmente alcanzados y poseen una variación distinta en comparación a la de los días cercanos. Analizando de la misma forma los valores de humedad relativa, no guardan la misma relación, pues las variaciones de humedad no se ven afectados en comparación a los días cercanos. Esto no estaría indicando que las bajas temperatura registradas a los 50 y 95 DDS no están relacionadas a la presencia de nubes sino a otros factores climatológicos.

Por otro lado, respecto a los tratamientos aplicados entre los 78 y 103 DDS se puede observar un aumento de la temperatura foliar de hasta 7°C. Luego del corte de riego, el aumento de temperatura se dio a partir del quinto día iniciando con 35°C; este aumento no es instantáneo debido a la disminución gradual de la humedad del suelo. A los 12 días después del corte registró una temperatura de 40°C. Luego de las secas, la temperatura foliar fue disminuyendo gradualmente hasta llegar nuevamente a 35°C. Así mismo, 15 días antes de la cosecha (151 DDS) se realizó las secas a todas las parcelas para la maduración de granos de arroz; en este periodo la temperatura foliar aumentó hasta 4°C.

a) Estimación de las temperaturas húmedas del cultivo

Debido a la presencia de datos atípicos en cada gráfica obtenida de la Figura 11, la cual agrupa la información cada cinco minutos de temperatura del aire por fase fenológica, se opta por utilizar las medianas de cada diagrama de caja como valor representativo.

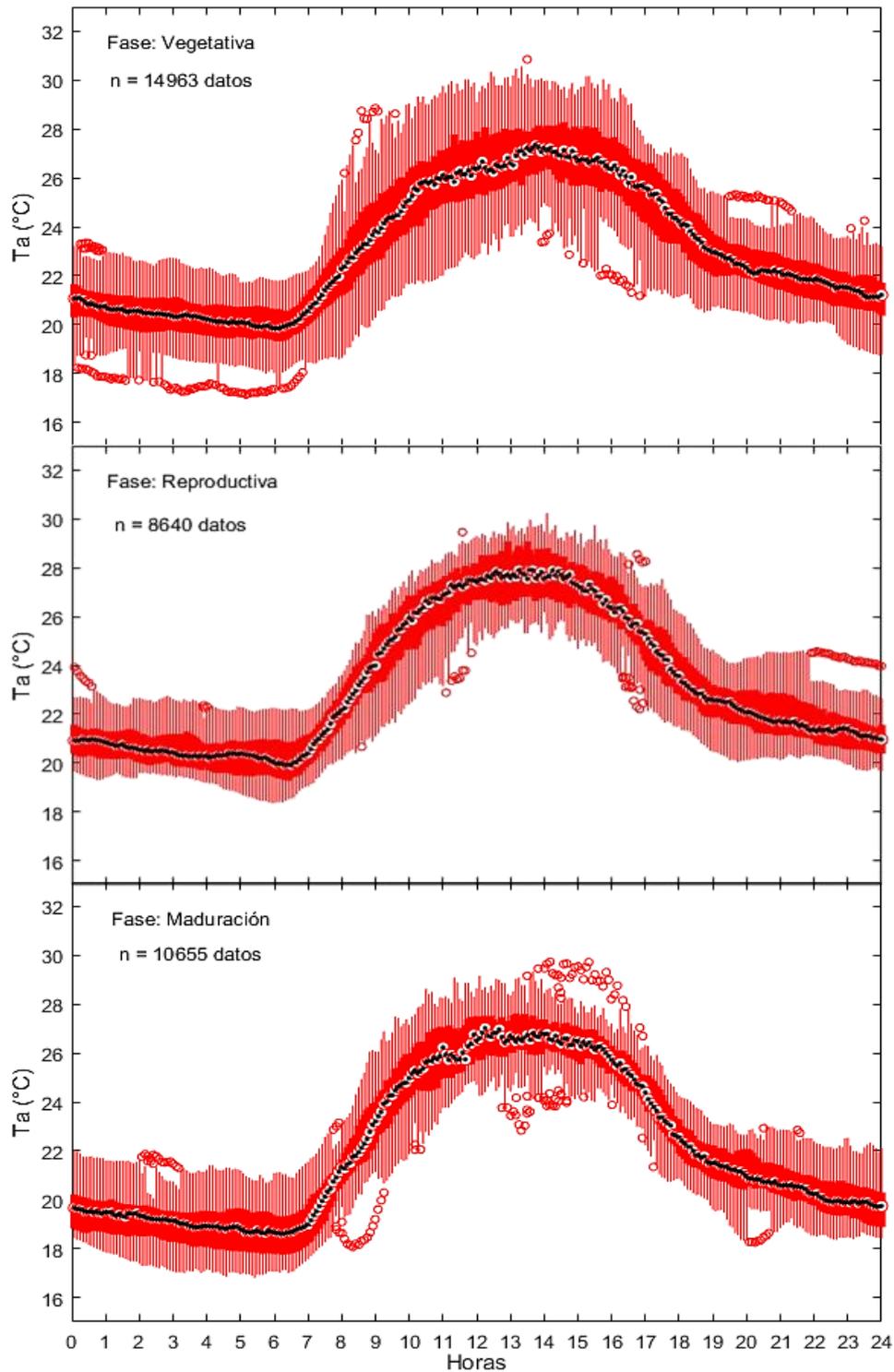


Figura 11. Variación cada cinco minutos de la temperatura del aire por fase fenológica, ordenadas de 0 a 24 horas. Periodo de análisis: (i) 31 de diciembre del 2017 al 20 de febrero del 2018, (ii) 21 de febrero del 2018 al 22 de marzo del 2018 y (iii) 23 de marzo del 2018 al 28 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

De la misma forma, las Figuras 12, 13 y 14 agrupan por tratamiento la información cada cinco minutos recolectadas por los STT (sensores térmicos de termocuplas) mediante gráficos de diagramas de cajas de 0 a 24 horas para cada fase fenológica. Dichas gráficas de temperatura foliar incluyen los valores cada cinco minutos promedio correspondientes a la temperatura del aire. Al igual que la gráfica de temperatura del aire, se optó por utilizar las medianas de cada de diagrama de caja cada cinco minutos como valor representativo, esto es debido a la presencia de datos atípicos.

La siguiente tabla muestra la variación del promedio de las gráficas de temperatura del aire y foliar obtenidas de las Figuras 11, 12, 13 y 14.

Tabla 5: Análisis estadístico y rango de valores registrados de temperatura foliar y del aire en el cultivo de arroz IR 71706, según fase fenológica

Temperatura		Vegetativa	Reproductiva	Maduración
T aire (°C)	Promedio	23.11 ± 2.88	23.24 ± 2.88	22.11 ± 3.13
	Rango	17.13 – 30.85	18.35 – 30.24	16.8 – 29.74
T foliar – T0 (°C)	Promedio	23.93 ± 11.70	24.39 ± 10.64	22.04 ± 7.05
	Rango	15.44 – 43.26	17.12 – 37.64	15.22 – 38.08
T foliar – T1 (°C)	Promedio	24.98 ± 10.26	24.67 ± 11.27	23.44 ± 11.28
	Rango	17.59 – 42.88	16.75 – 44.19	14.72 – 41.9
T foliar – T2 (°C)	Promedio	24.99 ± 6.99	24.36 ± 8.03	22.88 ± 8.78
	Rango	17.39 – 43.26	16.77 – 43.04	14.84 – 40.45
T foliar – T3 (°C)	Promedio	24.93 ± 7.13	24.14 ± 8.56	22.72 ± 9.98
	Rango	17.53 – 42.04	16.62 – 41.38	14.47 – 38.62

FUENTE: Elaboración propia

En general se observa que la temperatura foliar varía entre 14.47 (fase maduración) y 44.19°C (fase reproductiva) mientras que la temperatura del aire varía entre 16.8 y 30.85°C, observando las Figuras 12, 13 y 14, se puede indicar que la temperatura foliar es menor a la del aire en las mañanas y noches, y mayor alrededor del mediodía. En la fase vegetativa y reproductiva se observa que el tratamiento T2 alcanzó mayores temperaturas en comparación al resto de tratamientos siendo un indicativo de un mayor estrés. Además, se observa que el tratamiento T0 posee temperaturas más elevadas en la fase vegetativa en comparación con las otras fases fenológicas, esto es debido a que los STT se encuentran más cercanos al suelo, el cual posee temperaturas más elevadas al mediodía, y son afectados por este.

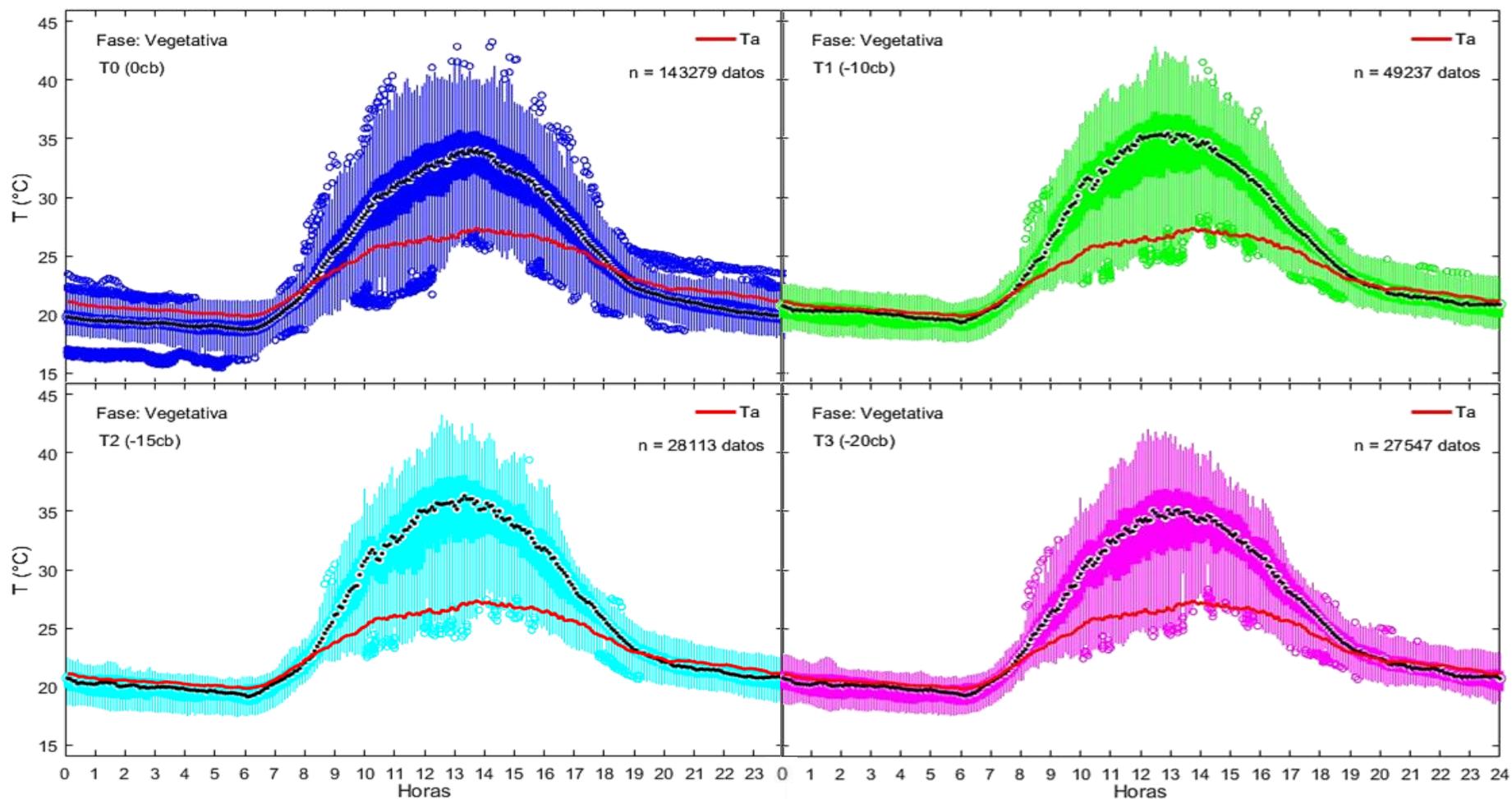


Figura 12. Variación cada cinco minutos de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento en la fase vegetativa, ordenadas de 0 a 24 horas. Periodo de análisis: 31 de diciembre del 2017 al 20 de febrero del 2018

FUENTE: Elaboración propia

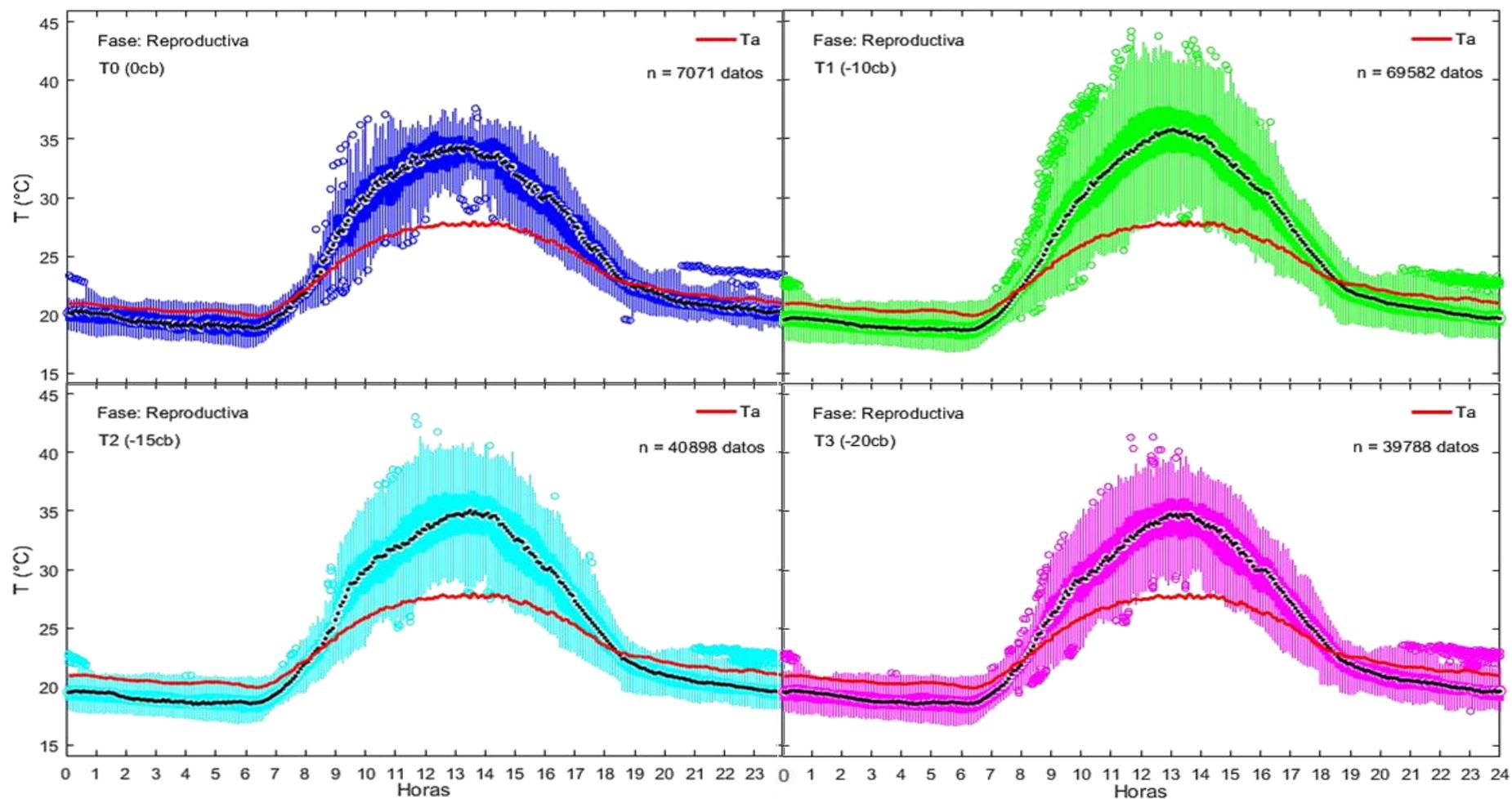


Figura 13. Variación cada cinco minutos de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento en la fase reproductiva, ordenadas de 0 a 24 horas. Periodo de análisis: 21 de febrero del 2018 al 22 de marzo del 2018

FUENTE: Elaboración propia

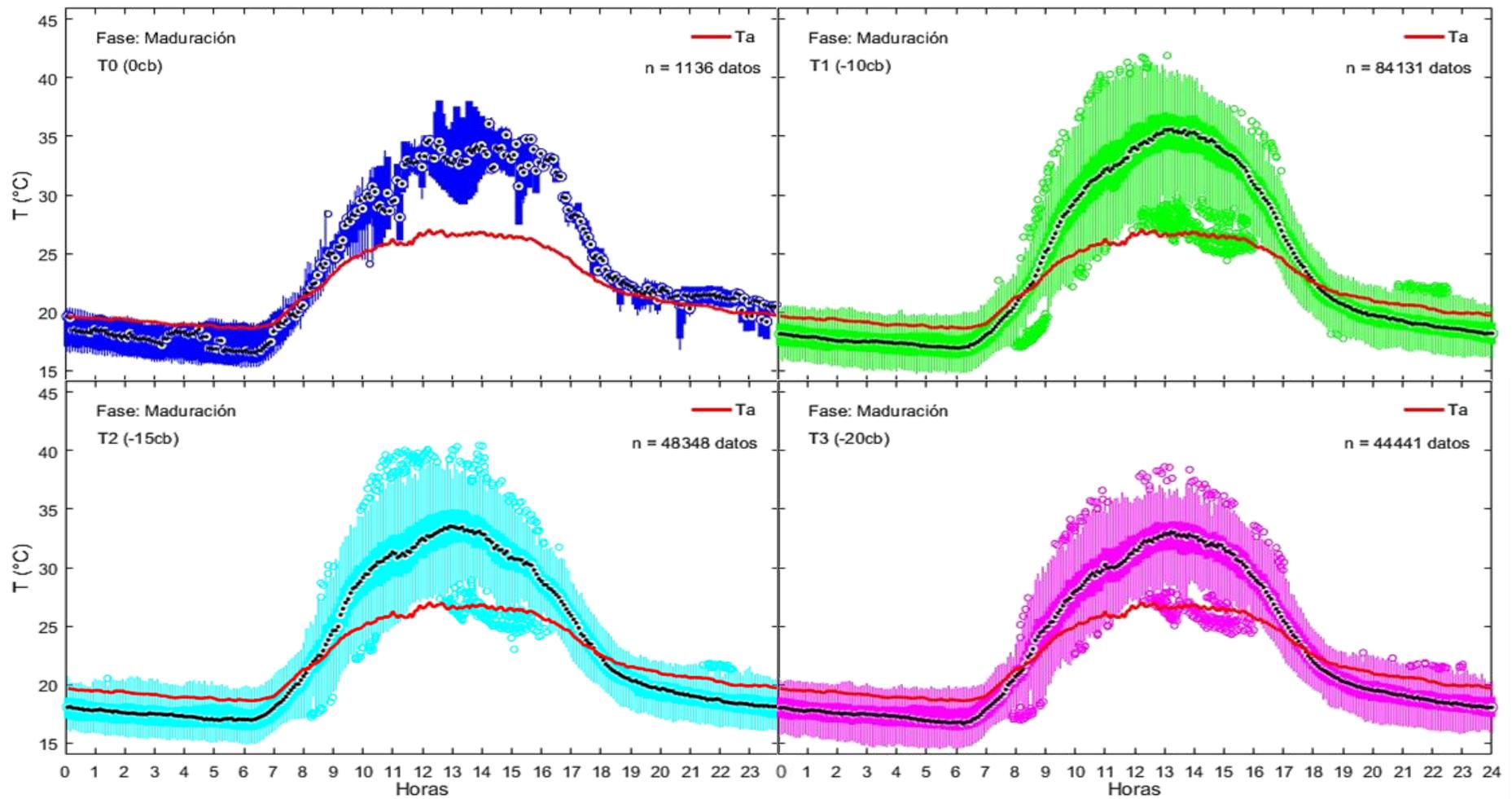


Figura 14. Variación cada cinco minutos de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento en la fase de maduración, ordenadas de 0 a 24 horas. Periodo de análisis: 23 de marzo del 2018 al 28 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

Finalmente en la Tabla 6, en el cual se estima la hora representativa donde el promedio de la temperatura del aire se intercepta con el promedio de la temperatura foliar para cada tratamiento y fase fenológica, estas horas varían entre las 07:40 y 08:15.

Tabla 6: Hora representativa para la estimación de la temperatura húmeda por tratamiento y fase fenológica del cultivo de arroz IR 71706

Fase	T0	T1	T2	T3	Rango
Vegetativa	08:10	07:40	08:15	07:40	07:40 – 08:15
Reproductiva	08:05	07:50	08:10	08:05	07:50 – 08:10
Maduración	08:00	08:10	08:10	08:15	08:00 – 08:15

FUENTE: Elaboración propia

Para el caso del tratamiento T0 la variación de la hora tomada para la obtención de la temperatura húmeda es entre las 08:00 y 08:10 horas. Para la obtención de dicho parámetro este sería el rango óptimo; sin embargo, se tomarán las horas representativas por cada tratamiento y fase fenológico debido a que los valores del T0 en la fase reproductiva y maduración corresponden a solo una planta, además que la variación del parámetro dentro del rango general entre las 07:40 y las 08:15 es de ± 0.4 °C. Según Durán (2018), la hora en la que obtuvo la temperatura húmeda fue a las 08:00 horas, encontrándose dentro del rango determinado, tomando constantes por cada periodo fenológico variando entre 15.2 y 15.4 °C; analizando los diagramas de cajas se puede observar que existe una diferencia notoria en los valores de temperatura húmeda, esto es debido a que la investigación mencionada fue desarrollada en otras fechas con diferentes características climatológicas.

- Estimación de las temperaturas secas del cultivo

Tal como se mencionó en el capítulo anterior, para la estimación de este parámetro se requiere de dos valores, la máxima temperatura del aire adicionado a una constante representativa para cada fase fenológica.

Para la primera parte, según las Figuras 12, 13 y 14, se determinó que las máximas temperaturas promedio del cultivo se produjeron alrededor de las 12:20 y 13:25 horas. Según Durán (2018), la hora determinada para la obtención de la temperatura seca fue a las 13:00 horas. Un resumen de las horas en el cual las temperaturas foliares promedio toman su máximo valor se aprecian en la Tabla 7.

Tabla 7: Hora representativa para la estimación de la temperatura del aire, con el fin de obtener la temperatura seca, por tratamiento y fase fenológica del cultivo de arroz IR 71706

Fase	T0	T1	T2	T3	Rango
Vegetativa	13:00	12:25	12:25	12:20	12:20 – 13:00
Reproductiva	13:05	12:55	13:25	13:05	12:55 – 13:25
Maduración	13:10	13:05	12:50	13:10	12:50 – 13:10

FUENTE: Elaboración propia

De la tabla anterior se puede indicar que los rangos horarios van aumentando y disminuyendo según la posición del sol sobre la vertical del lugar (cenit). Pues dentro del periodo en el cual se desarrolló el cultivo el cenit varió de la siguiente forma: 11:54 a 12:23, 12:23 a 12:15, 12:15 a 12:06 para las fases vegetativa, reproductiva y maduración, respectivamente. Pese a que los rangos horarios no coinciden del todo, existe una relación de en qué momento se presentará la mayor temperatura; es decir, la temperatura máxima en la fase reproductiva se dará en un horario superior al vegetativo, mientras que en la fase de madurez se dará en un rango posterior al reproductivo.

En relación a la segunda parte, para la estimación de la constante requerida en el cálculo de la temperatura seca se utilizó una maceta sometida a estrés hídrico llevándola a PMP para cada fase fenológica. La Figura 15 agrupa por fase fenológica la diferencia de la información recogida cada cinco minutos de temperatura foliar respecto a la del aire. En la Figura 5 se puede observar el efecto visual en la fisiología del cultivo luego del corte del riego.

Se consideró como valor máximo de estrés hídrico a la máxima variación de temperatura foliar respecto a la del aire. Para el caso de la maceta de fase vegetativa la duración para que llegue a PMP fue 8 días, mientras que para las otras dos fue de 4 días, partiendo en condiciones óptimas a CC. Esto se debe a que para la primera maceta se evitó la pérdida de agua por infiltración, mientras que en la segunda y tercera no. Respecto a las temperaturas foliares alcanzadas, la primera alcanzó temperaturas de 45°C mientras que las otras alcanzaron los 42°C.

En relación a los resultados observados en la Figura 15, se elaboró la Tabla 8 donde se muestra las constantes requeridas en el cálculo de la temperatura seca, éstos son los valores máximos de variación de temperatura alcanzadas para cada fase fenológica.

Tabla 8: Fórmula para el cálculo de la temperatura seca según fase fenológica del cultivo de arroz IR 71706

Fase	Tseca = Ta + X
Vegetativa	Ta + 18.8
Reproductiva	Ta + 15.2
Maduración	Ta + 14.0

FUENTE: Elaboración propia

La fase vegetativa posee una constante mayor debido a que alcanzó mayores temperaturas cuando fue sometido al máximo estrés hídrico. La razón de esta diferencia, tal como se mencionó anteriormente, es la cercanía de las hojas al suelo, pues este al tener mayor temperatura que el cultivo y encontrarse cerca afecta en la medición. Este mismo efecto es registrado en las Figuras 12, 13 y 14 para la fase vegetativa.

Por otro lado, según Idso *et al.* (1982) el valor de X puede variar entre 1 °C y 12 °C; sin embargo, se obtuvieron constantes por encima de lo indicado. Esto es debido a que estos valores dependen del cultivo en estudio y las condiciones climáticas. Por ejemplo, en la investigación de Rinza (2018) se trabajó con una constante de 13 °C para el cultivo de papa; las condiciones climáticas con las que se trabajó son las más cercanas a las de la presente investigación.

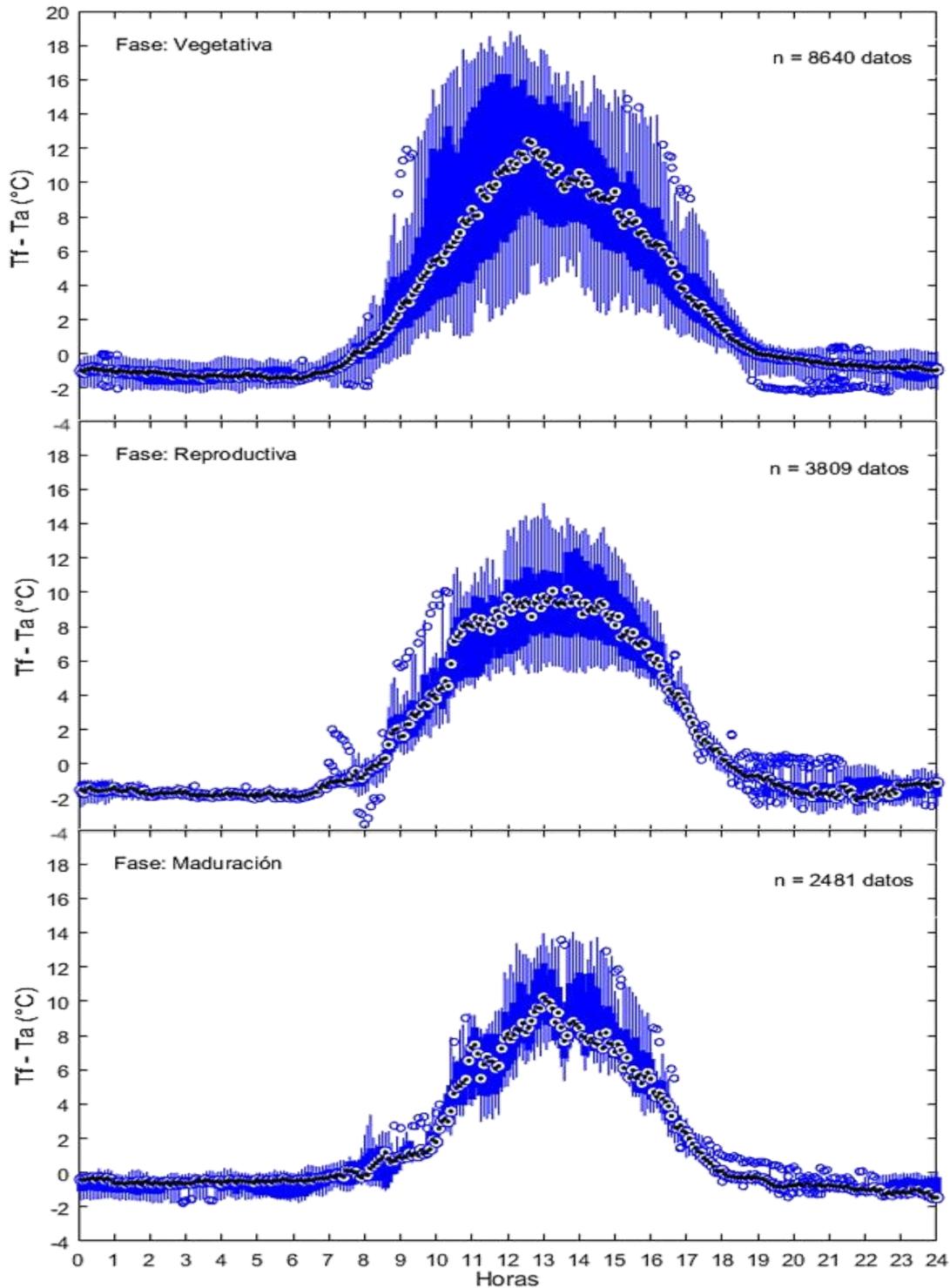


Figura 15. Variación cada cinco minutos de la diferencia de temperatura foliar y del aire según fase fenológica, en macetas sometidas a estrés hídrico llegando a Punto de Marchitez Permanente (PMP) en el cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: (i) 10 de febrero del 2018 al 20 de febrero del 2018, (ii) 17 de marzo del 2018 al 22 de marzo del 2018 y (iii) 23 de abril del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

4.1.2. Cámara termográfica

La toma de imágenes térmicas se da desde el 8 de enero al 26 de abril de 2018; es decir, en un rango comprendido entre la instalación de los STT y la fecha de cosecha del cultivo. En total fueron 36 días de toma de imágenes: 17 en fase vegetativa, 10 en fase reproductiva y 9 en fase de maduración. Las tomas se dieron entre las 12:00 y 14:00 horas, esto coincide con el rango obtenido en la Tabla 7 donde se presentan las máximas temperaturas foliares. Además, coincide con el rango indicado por Rinza (2018) entre las 13:00 y 15:00 horas.

Como la instalación de los STT se distribuyeron en cuatro parcelas, el análisis comparativo entre las temperaturas foliares obtenidos por ambos sensores térmicos se dará tomando en base dichas parcelas en particular.

- Método de superposición de imágenes

Al aplicar el método se obtiene una cobertura vegetal aproximada a la cobertura original de la imagen RGB, tal como se muestra en la Figura 9. En ella se discriminan los píxeles correspondientes al suelo, aluminio y tuberías de riego. Sin embargo, al interpolarla con la imagen IR se observa que existen píxeles con una temperatura mayor, esto se debe a que existe variabilidad de condiciones de estado de estrés hídrico del cultivo dentro de la misma imagen, generalmente éstas se muestran como hojas verde-amarillo, dando a entender que se encuentran más estresadas y, por lo tanto, elevan más su temperatura

Las hojas del cultivo seleccionadas determinaron que la distribución tenía las siguientes características: $\phi = [82, 0.7, 0.6]^T$ y $\Sigma = \text{diag}[12.6, 0.2, 0.14]^T$. Estas características tienen una gran semejanza a las obtenidas por Wang *et al.* (2010) para las hojas del cultivo de vid.

La Figura 16 muestra la variación resultante de la temperatura foliar para cada tratamiento según la fase fenológica con la aplicación del presente método. Se observa que existe mayor presencia de datos atípicos por encima del límite superior de cada diagrama de caja obtenido. Esto nos estaría indicando que exista variabilidad de temperaturas en los píxeles de temperaturas extraídos. También se observa que a los días 61, 68 y 96 DDS se registraron las temperaturas más bajas en comparación al resto de días, tal como se mencionó en el análisis de información recogida cada cinco minutos de temperatura foliar dado por los STT se tuvo un registro de las condiciones de nubosidad y estos días coinciden con dichos días. En conclusión, esta variación comparativa de temperatura con el resto de días es diferenciada por ambos sensores.

Luego se realizó la relación, bajo diferentes regresiones estadísticas, de los valores obtenidos respecto a las temperaturas promedio estimados por los STT para cada día y hora correspondiente, tal como se muestra en la Figura 17. Con el fin de determinar qué regresión estadística utilizar, se realizó la prueba T de Student (Anexo 1) dando como resultado que en todas, a excepción de la regresión polinómica de grado tres, no existen diferencias significativas entre las medias de las variables, ya que presentan valores de p mayores al nivel de significancia elegido de 0.05.

De las ecuaciones obtenidas en la Figura 17, la regresión logarítmica y la cuadrática presentan cada vez mayores diferencias entre las variables a medida que se trabajan fuera del rango con el cuál se obtuvieron las ecuaciones. Lo mencionado no podría darse, debido a que la calibración realizada a las imágenes térmicas es para que se ajusten a las temperaturas reales. Por ende quedarían como opciones las regresiones exponencial, lineal y potencial, de ellas se escogió última por tener un mayor coeficiente de determinación (R^2), siendo de 0.398.

En la Figura 18, independiente de la regresión estadística seleccionada, se observa que existe una gran variación en la temperatura foliar resultante del método de superposición de imágenes para cada valor de temperatura foliar dado por STT para los tres tratamientos. Los valores por encima de la mediana varían hasta 9.2°C y por debajo hasta 6.6°C , en general la máxima variación fue de 14.8°C y la mínima, de 3.8°C .

Por otro lado, se observan cuatro valores por debajo del resto, estos valores corresponden a las temperaturas registradas a los 68 DDS; por encima de estos valores se observan puntos que no superan los 30°C , estos hacen referencia a las temperaturas a los 61 y 96 DDS. Estos tres días coinciden con los días nublados identificados con anterioridad.

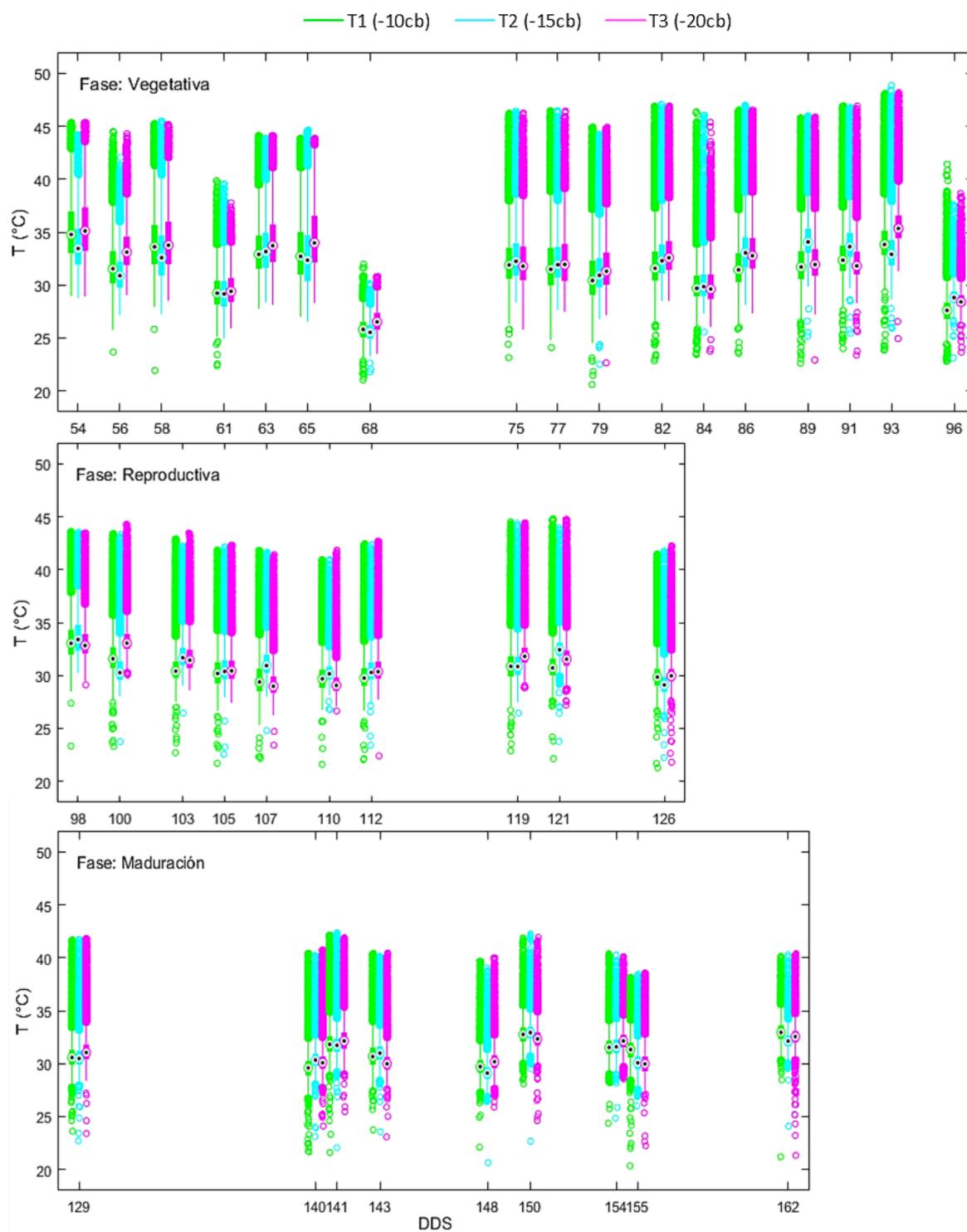


Figura 16. Variación diaria de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento según fase fenológica, utilizando el método de superposición de imágenes.

Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

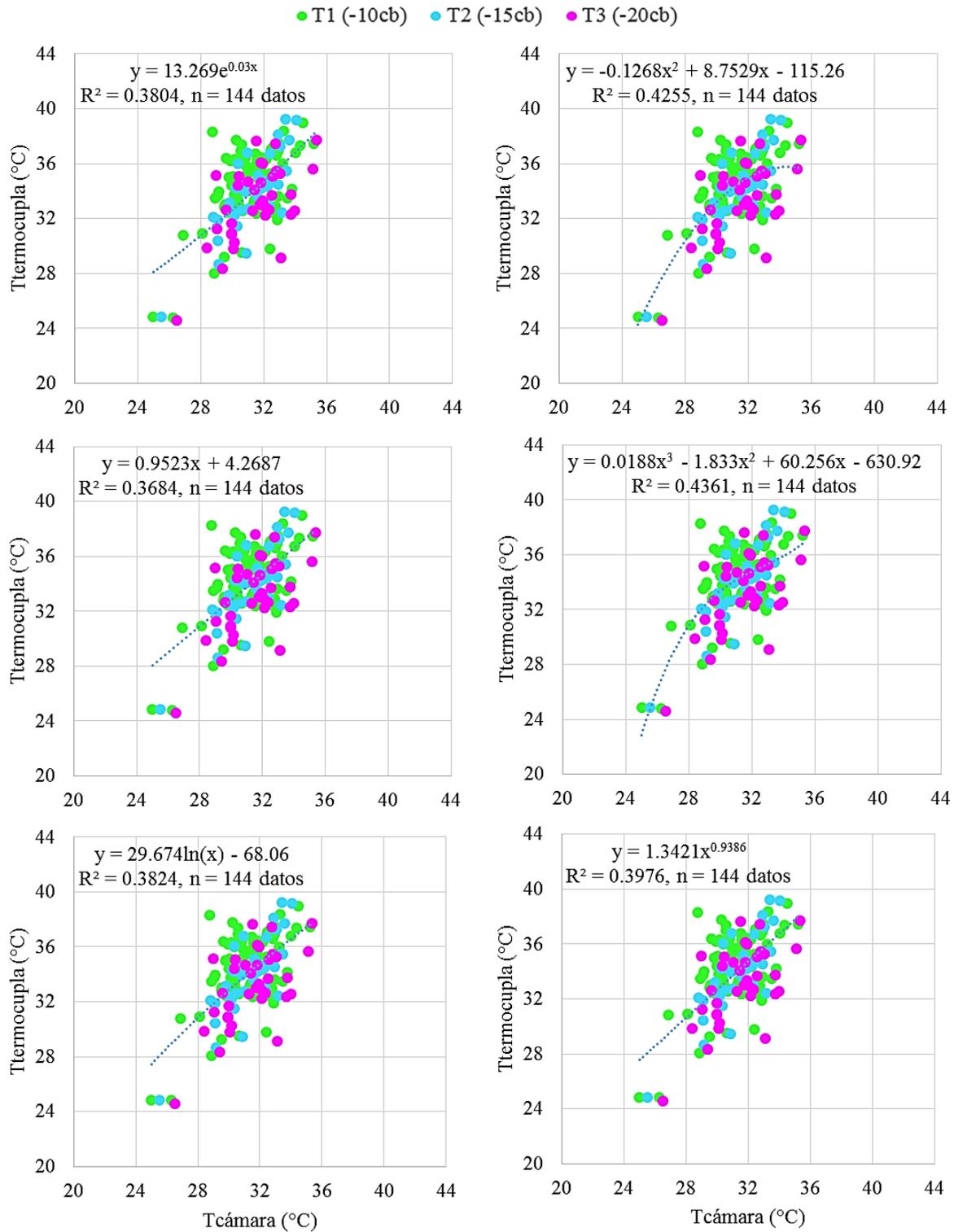


Figura 17. Relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición de imágenes con diferentes regresiones estadísticas en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

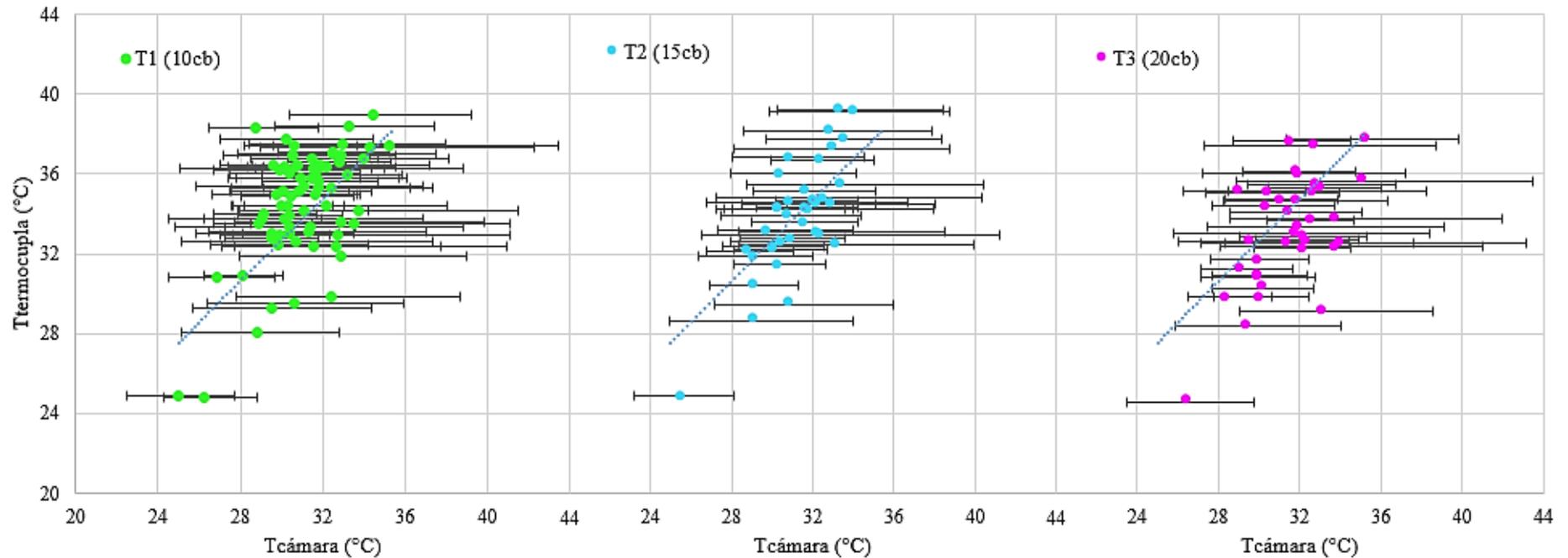


Figura 18. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición de imágenes para la regresión potencial en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

- Método de temperaturas umbrales

Aplicando este segundo método se obtiene una cobertura vegetal más reducida, priorizando aquellas hojas más verdes. En la Figura 9 se puede observar lo anterior mencionado y, además, que la imagen térmica solo incluye aquellos píxeles con menor temperatura; es decir, reduce la variabilidad de temperaturas foliares dentro de una misma imagen térmica. Sin embargo, también selecciona aquellos píxeles correspondientes al aluminio, esto es más visible en la imagen RGB.

Al contrario de lo observado en la metodología anterior, en la Figura 19 se observa que existe mayor presencia de datos atípicos por debajo del límite superior de cada diagrama de caja obtenido, indicando que aún persiste la variabilidad de temperaturas. Las medianas obtenidas con esta metodología disminuyen entre 0.49 y 1.34°C en comparación al primer método. Respecto a los días con presencia de nubosidad, presenta la misma tendencia de disminución de la temperatura foliar.

Con este método también se realizó la relación, bajo diferentes regresiones estadísticas, de las temperaturas obtenidas respecto a las temperaturas promedio estimados por los STT para cada día y hora correspondiente, los resultados se visualizan en la Figura 20. Con la prueba T de Student (Anexo 2) se obtuvo que en todas las regresiones no existen diferencias significativas entre las medias de las variables, ya que presentan valores de p mayores al nivel de significancia elegido de 0.05.

Al igual que la metodología anterior, las regresiones logarítmica y cuadrática, incluyendo a la polinómica de tercer grado en este caso, presentan el mismo problema de diferencia de temperatura entre variables cuando se trabaja fuera del rango con el cuál se obtuvieron las ecuaciones. En esta metodología, también quedarían como opciones las regresiones exponencial, lineal y potencial, de ellas se escogió última por tener un mayor coeficiente de determinación (R^2), siendo de 0.332. En todas las regresiones los coeficientes son menores a los obtenidos en la metodología de superposición.

En la Figura 21 se observa que la variación en la temperatura foliar resultante del método de temperaturas umbrales, relacionado a un valor de temperatura foliar dado por STT se ve reducida considerablemente en los tres tratamientos. Los valores por encima de la mediana varían hasta 2.1°C y por debajo hasta 5.1°C, en general la máxima variación fue de 7.1°C y, la mínima, de 1.1°C. Por otro lado, respecto al análisis de días nublados, se observan los mismos puntos que registran temperaturas bajas en dichos días.

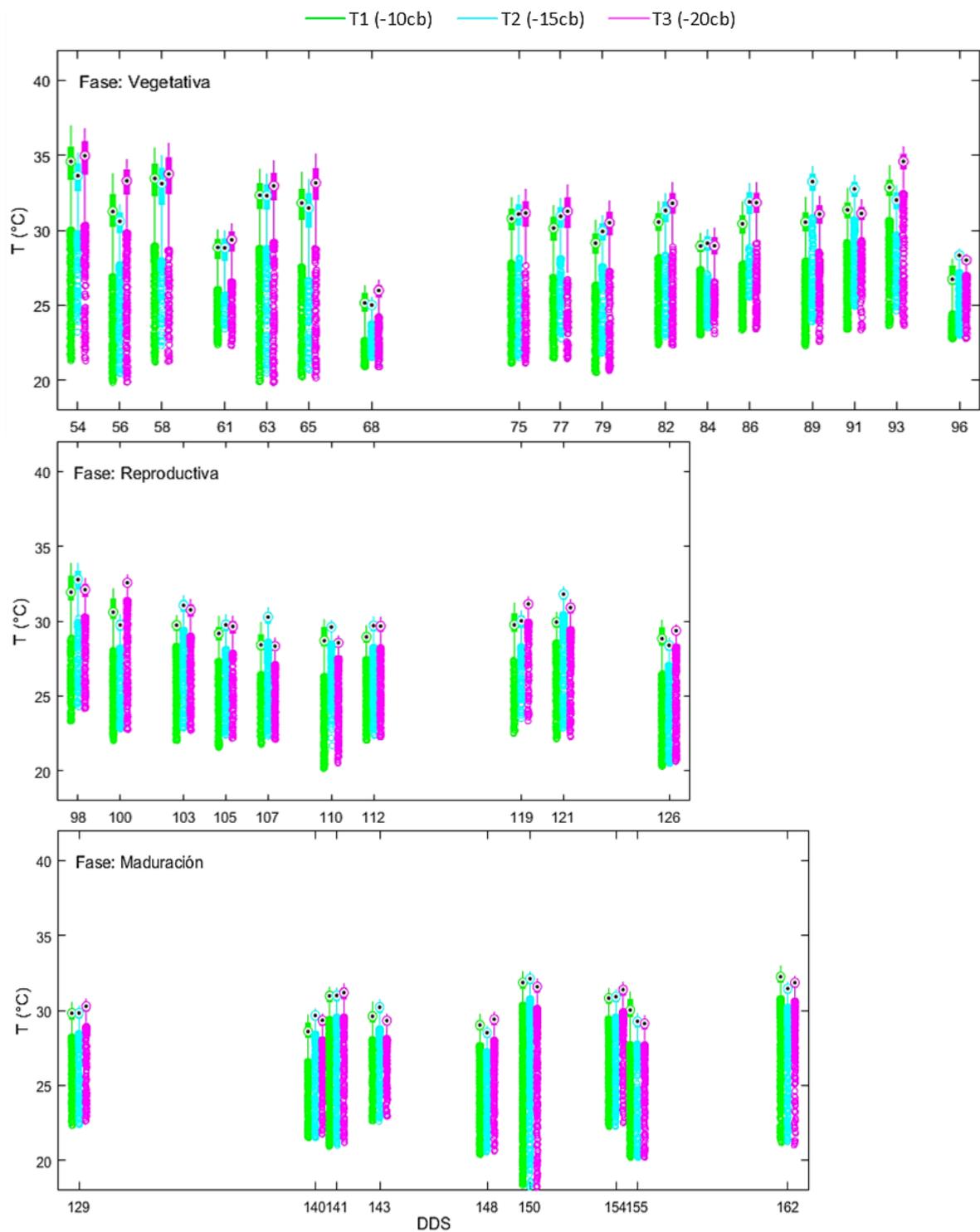


Figura 19. Variación diaria de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento según fase fenológica, utilizando el método de temperaturas umbrales.

Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

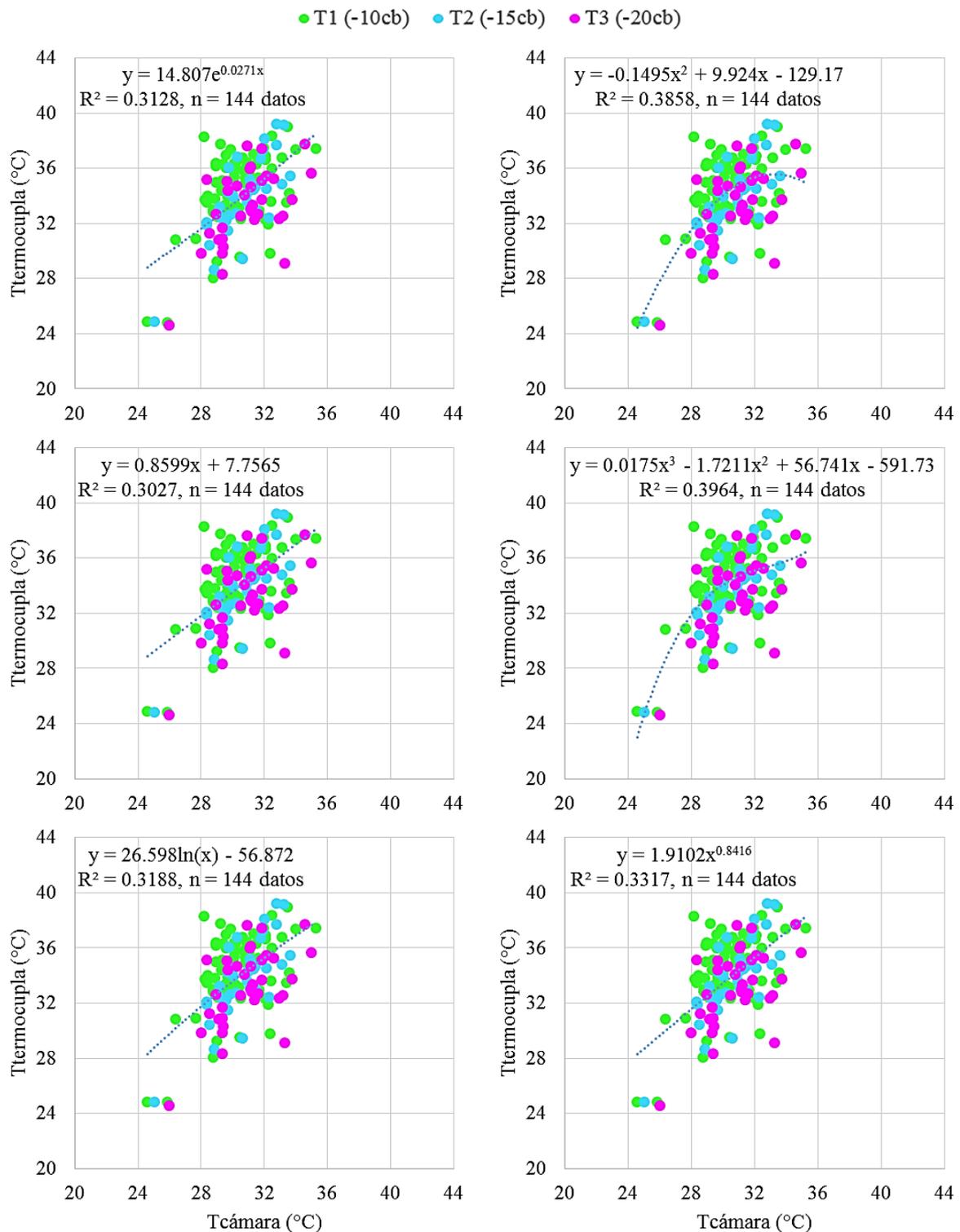


Figura 20. Relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de temperaturas umbrales con diferentes regresiones estadísticas en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

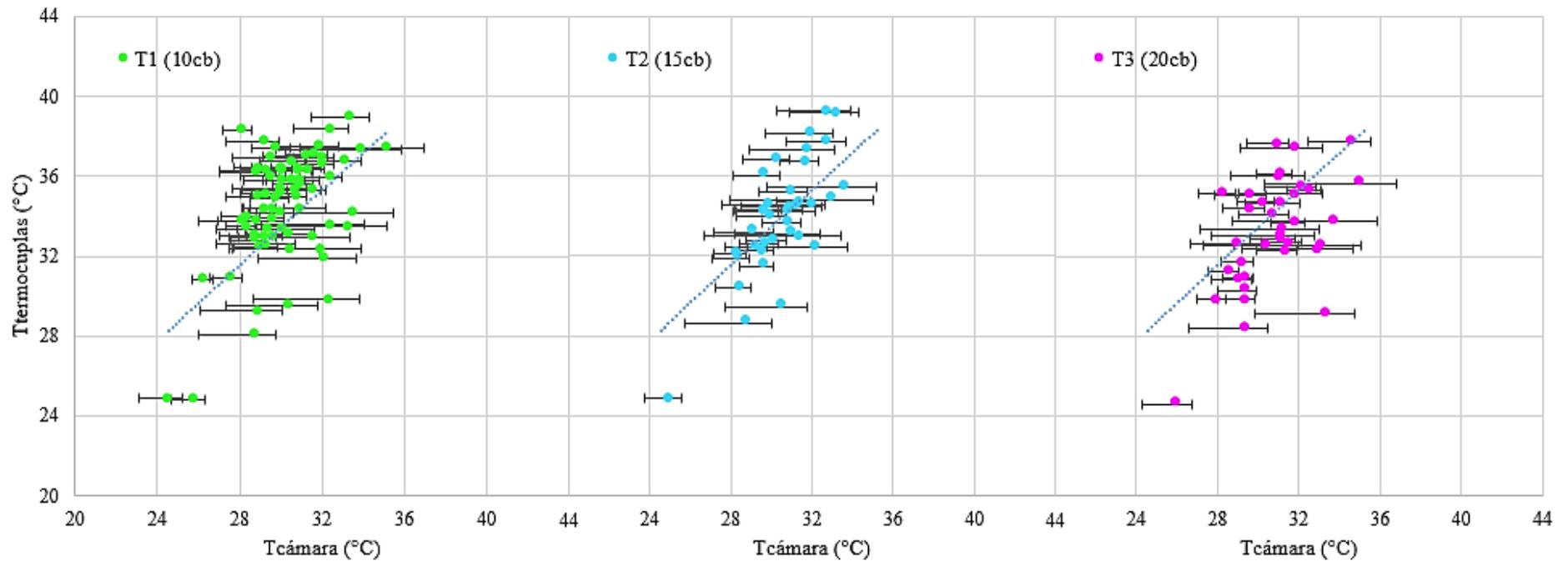


Figura 21. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de temperaturas umbrales para la regresión potencial en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

- Método de superposición – temperaturas umbrales

Tal como se planteó en el capítulo anterior, se aplicó un tercer método con el fin de obtener mejor comparabilidad en los resultados, con píxeles de cobertura vegetal verde y baja variabilidad de temperaturas. La Figura 9 muestra los resultados de este método, en ella se puede observar que se selecciona exclusivamente aquellos píxeles correspondientes a hojas verdes, siendo similar al método de temperaturas umbrales. La diferencia está en que dentro de los píxeles seleccionados no incluye otros elementos que no correspondieran a cobertura vegetal como era el caso del aluminio en el método anterior.

En la Figura 22 se observa que la presencia de datos atípicos, por debajo y encima de cada límite en cada diagrama de caja obtenido, mostrado en los métodos anteriores se reduce drásticamente. Esto nos indicaría que la variabilidad de temperaturas es reducida. Las medianas obtenidas con esta metodología disminuyen entre 0.58 y 2.67°C en comparación al primer método, y con respecto al segundo método, aumentan hasta 0.93 y disminuyen hasta 2.78. En relación a los días con presencia de nubosidad, presenta la misma tendencia de disminución de la temperatura foliar.

Luego se obtuvo la relación, bajo diferentes regresiones estadísticas, de las temperaturas obtenidas respecto a las temperaturas promedio estimados por los STT para cada día y hora correspondiente, tal como se visualizan en la Figura 23. Con la prueba T de Student (Anexo 3) se obtuvo que en todas las regresiones, a excepción de la regresión polinómica de tercer grado, no existen diferencias significativas entre las medias de las variables, ya que presentan valores de p mayores al nivel de significancia elegido de 0.05.

Las regresiones logarítmica y cuadrática presentan el mismo problema indicado anteriormente. Por ello, quedarían como opciones las regresiones exponencial, lineal y potencial, de ellas se escogió última por tener un mayor coeficiente de determinación (R^2), siendo de 0.481. Comparando las regresiones escogidas con las de los métodos anteriores se trabajará con esta última, ya que presenta mayores valores.

En la Figura 24 se observa que la variación en la temperatura foliar resultante del método de temperaturas umbrales, relaciona a un valor de temperatura foliar dado por STT se ve reducida en mayor medida que los dos métodos anteriores para los tres tratamientos. Los valores por encima de la mediana varían hasta 1.4°C y por debajo hasta 3.2°C, en general la máxima variación fue de 4.5°C y, la mínima, de 0.8°C. Respecto al análisis de días nublados, se observan los mismos puntos que registran temperaturas bajas en los mismos días.

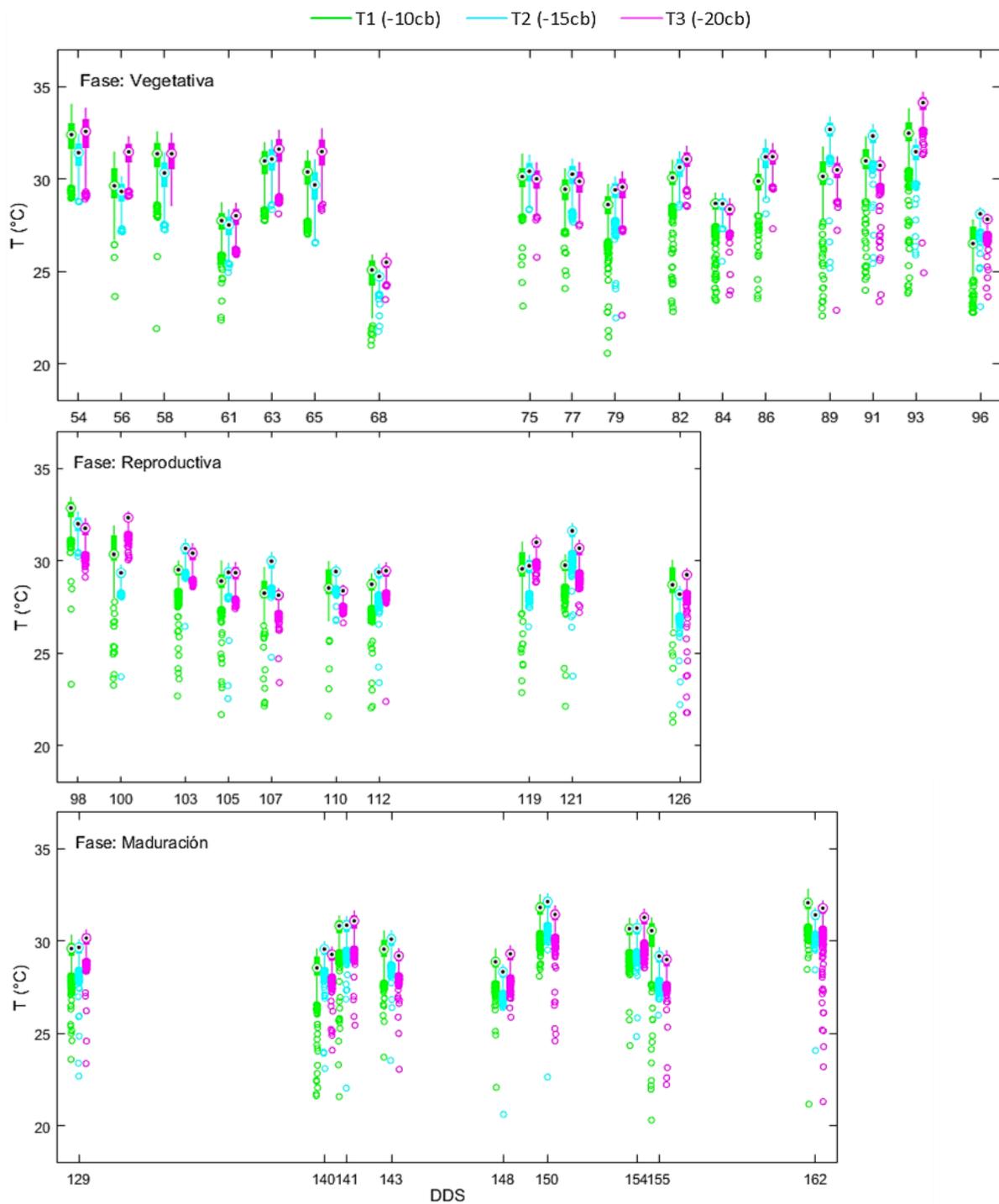


Figura 22. Variación diaria de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento según fase fenológica, utilizando el método de superposición – temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

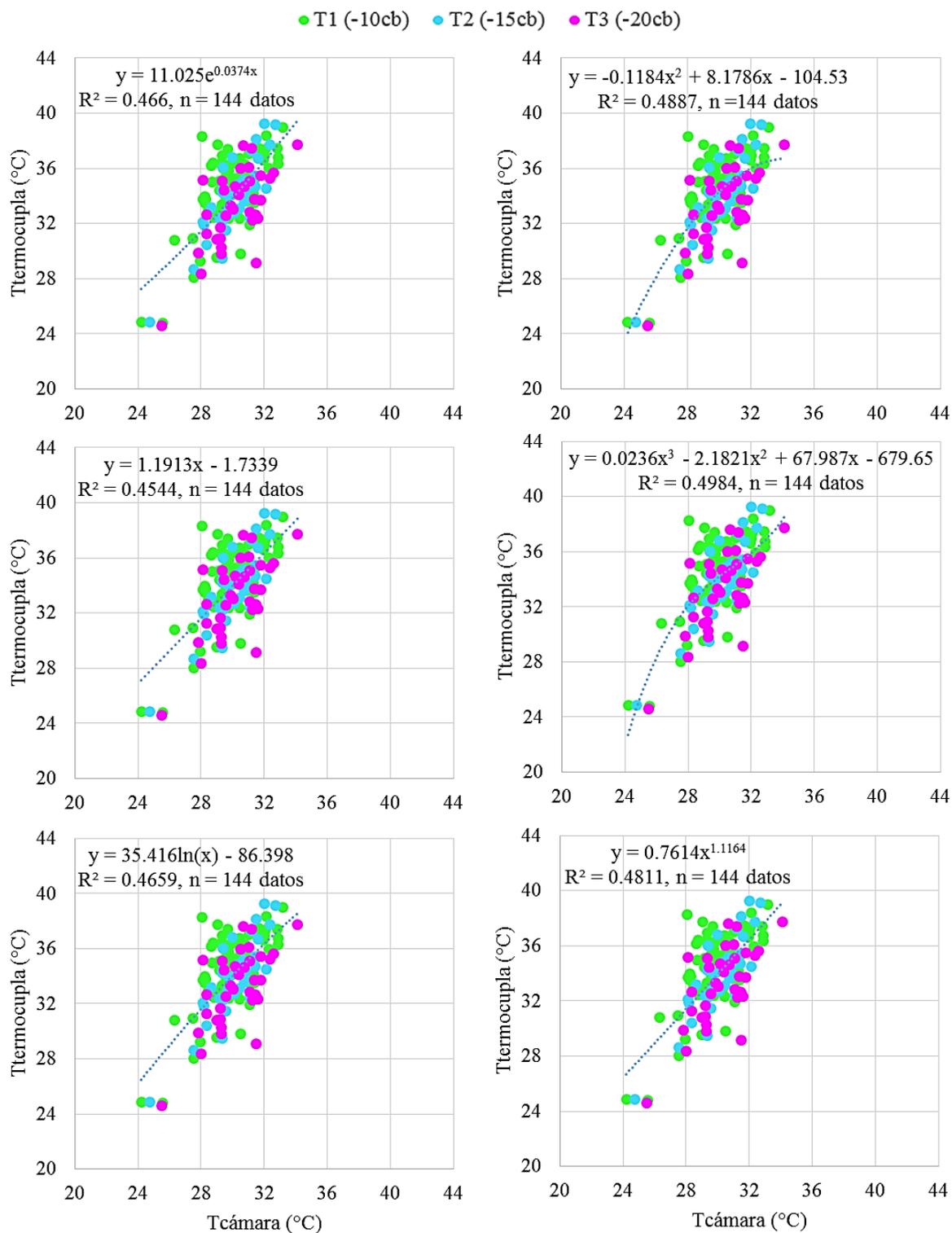


Figura 23. Relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición – temperaturas umbrales con diferentes regresiones estadísticas en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706.

Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

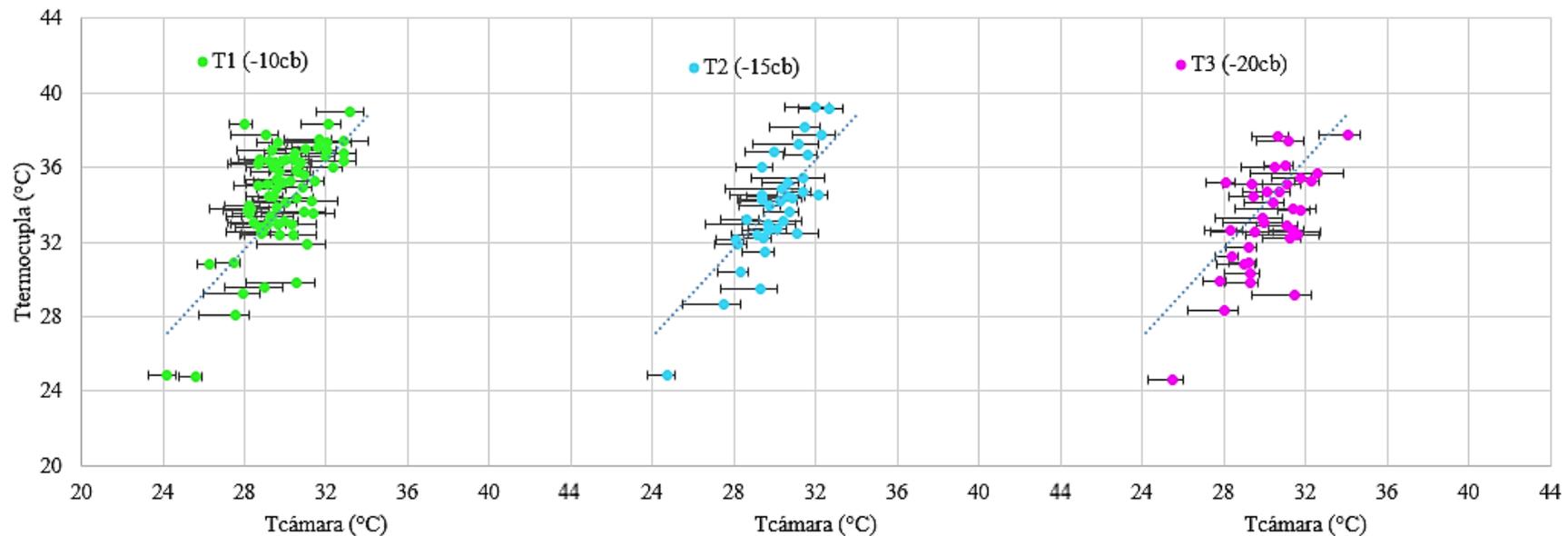


Figura 24. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición – temperaturas umbrales para la regresión potencial en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

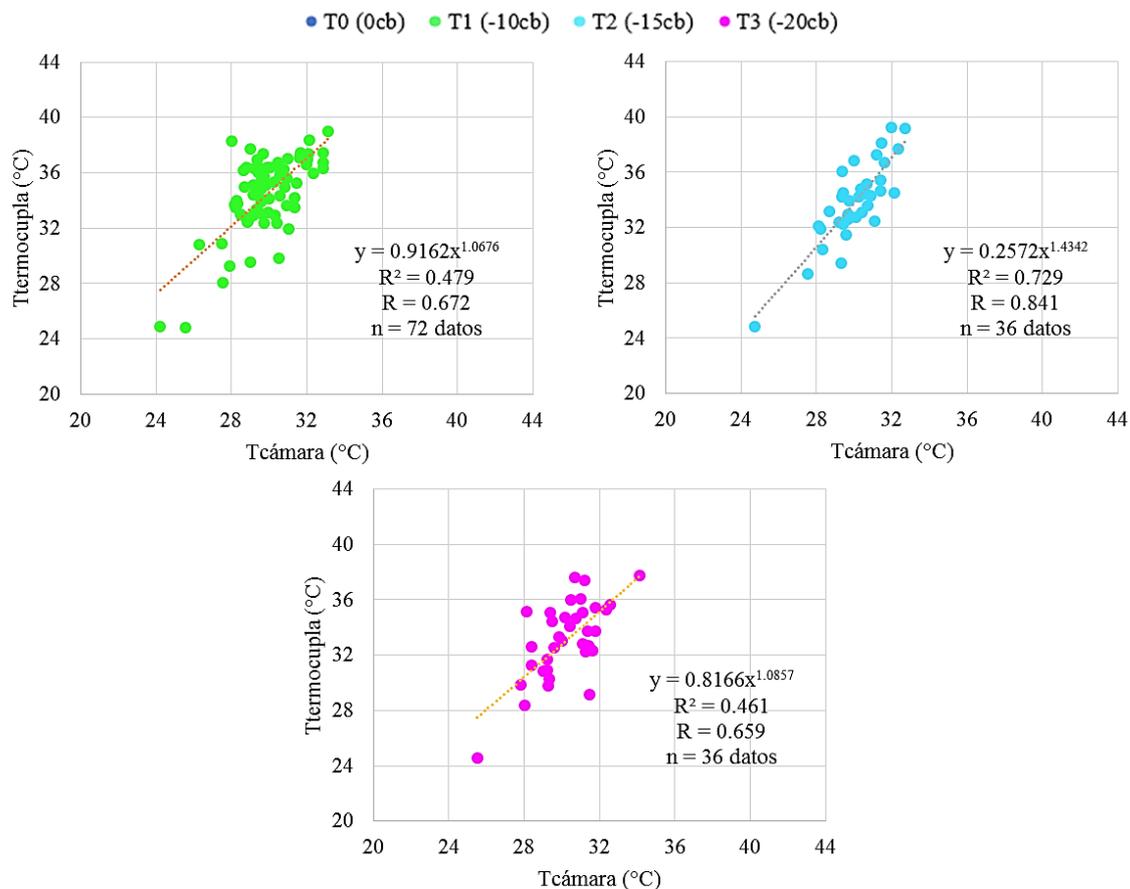


Figura 25. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre la temperatura estimada por los STT y la temperatura estimada por el método de superposición – temperaturas umbrales para la regresión potencial por tratamiento en todo el periodo vegetativo del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

A partir de la regresión potencial se analizó por tratamiento, tal como se observa en la Figura 25. Con la prueba T de Student (Anexo 4) se obtuvo que solo en la regresión del tratamiento T2 no existe diferencias significativas entre las medias de las variables, ya que presenta valores de p mayores al nivel de significancia elegido de 0.05. Además, como se trataron de variables normales (Anexo 5) se obtuvieron los coeficientes de Pearson (Anexo 6). El que obtuvo un mayor coeficiente fue el tratamiento mencionado, siendo de 0.841. Por esta razón, se escogió trabajar con la ecuación de correlación de temperatura foliar correspondiente al tratamiento T2 para la regresión potencial.

4.2. Obtención del CWSI a partir de temperaturas foliares

4.2.1. Temperatura foliar mediante cámara termográfica

Definida la metodología y la regresión estadística más adecuada, en este caso, el método de superposición – temperaturas umbrales bajo la regresión potencial, se obtuvo la variación del temperatura foliar considerando todas las parcelas experimentales según fase fenológica; es decir, en esta parte también se tomará en cuenta las imágenes RGB e IR donde no estaban instalados los STT.

En la Figura 26 se observa que las temperaturas foliares fueron más elevadas en el inicio de la fase vegetativa, situación similar fue registrada por los STT al comparar las Figuras 12, 13 y 14. Entre los 88 y 100 DDS se puede observar que las temperaturas de los T1, T2 y T3 se elevan nuevamente, esta variación es debido a que en dicho periodo se aplicaron los tratamientos. Más adelante se detallará a mayor profundidad este punto.

Por otro lado, al disponer de las temperaturas umbrales húmeda y seca del cultivo para cada fase fenológica determinadas en la sección anterior, se realizó el cálculo del índice de estrés hídrico foliar (CWSI) diario para el caso de los datos de temperatura obtenidos mediante la cámara termográfica. Estos valores se ven representados en la Figura 27.

En la cual se puede observar que las medianas de cada diagrama de caja de CWSI varían entre 0.2 y 0.8; en la investigación de Durán (2018) los valores estaban entre 0.05 y 0.5, la diferencia se debe a la calibración realizada en los valores de temperatura foliar. Los valores al inicio de la fase vegetativa se mantienen elevados indicando que se encuentran estresadas en cierto grado, en la siguiente sección se evaluará si tiene relación al déficit hídrico. En la fase de maduración se puede observar que al aplicar las secas para la maduración de granos el CWSI se eleva indicando que se encuentra con déficit hídrico. Respecto a los días nublados, mantienen un CWSI bajo a los 61, 68 y 96 DDS. Sin embargo, el CWSI obtenido a los 96 DDS no correspondía con la situación del cultivo, pues en este periodo fue aplicado los tratamientos en el cultivo (78 a 103 DDS). Esto nos indicaría que el CWSI no refleja el estado de estrés hídrico en el cultivo en condiciones nubladas.

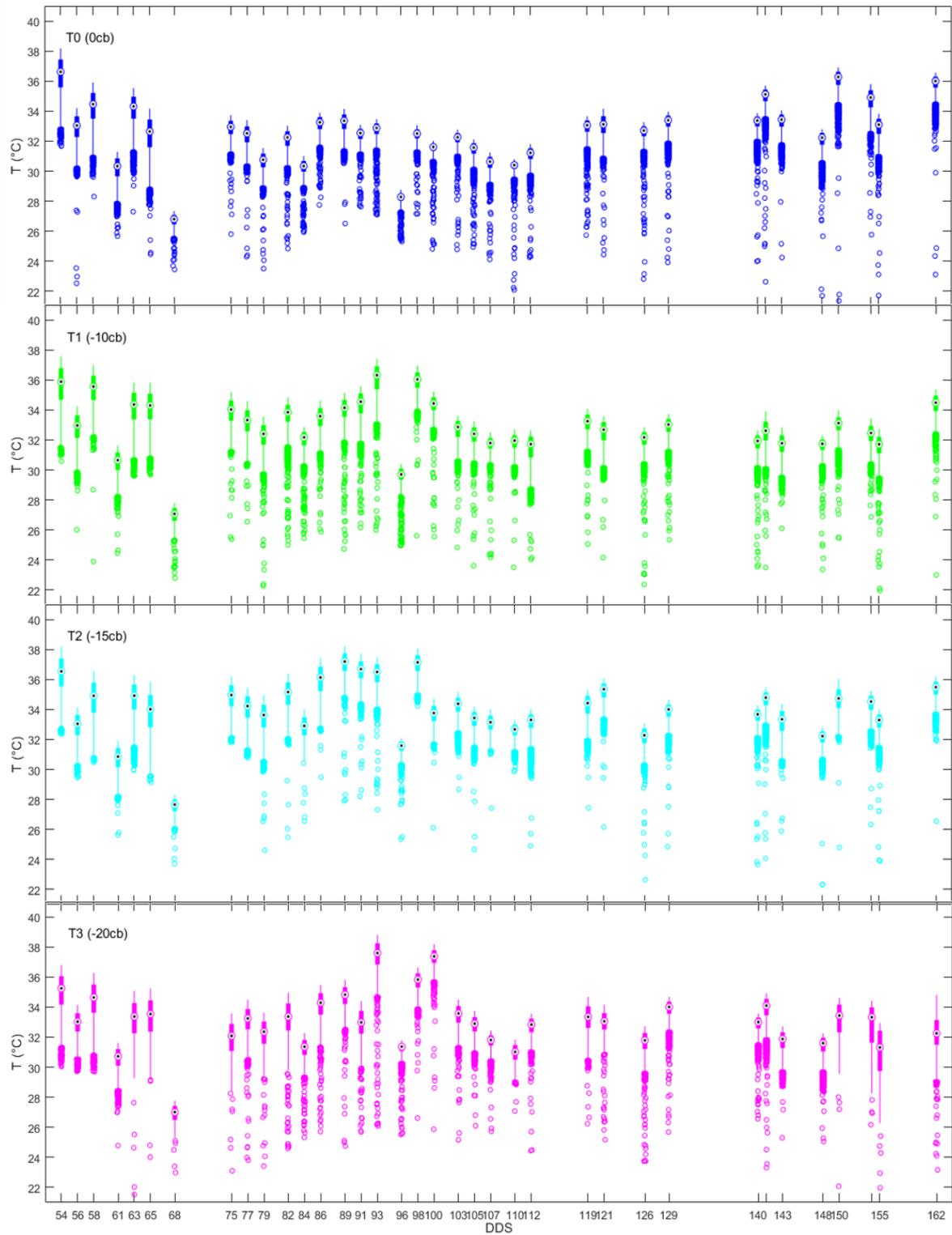


Figura 26. Variación diaria de la temperatura foliar del cultivo de arroz IR 71706 para toda la fase fenológica según tratamiento, utilizando el método de superposición – temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

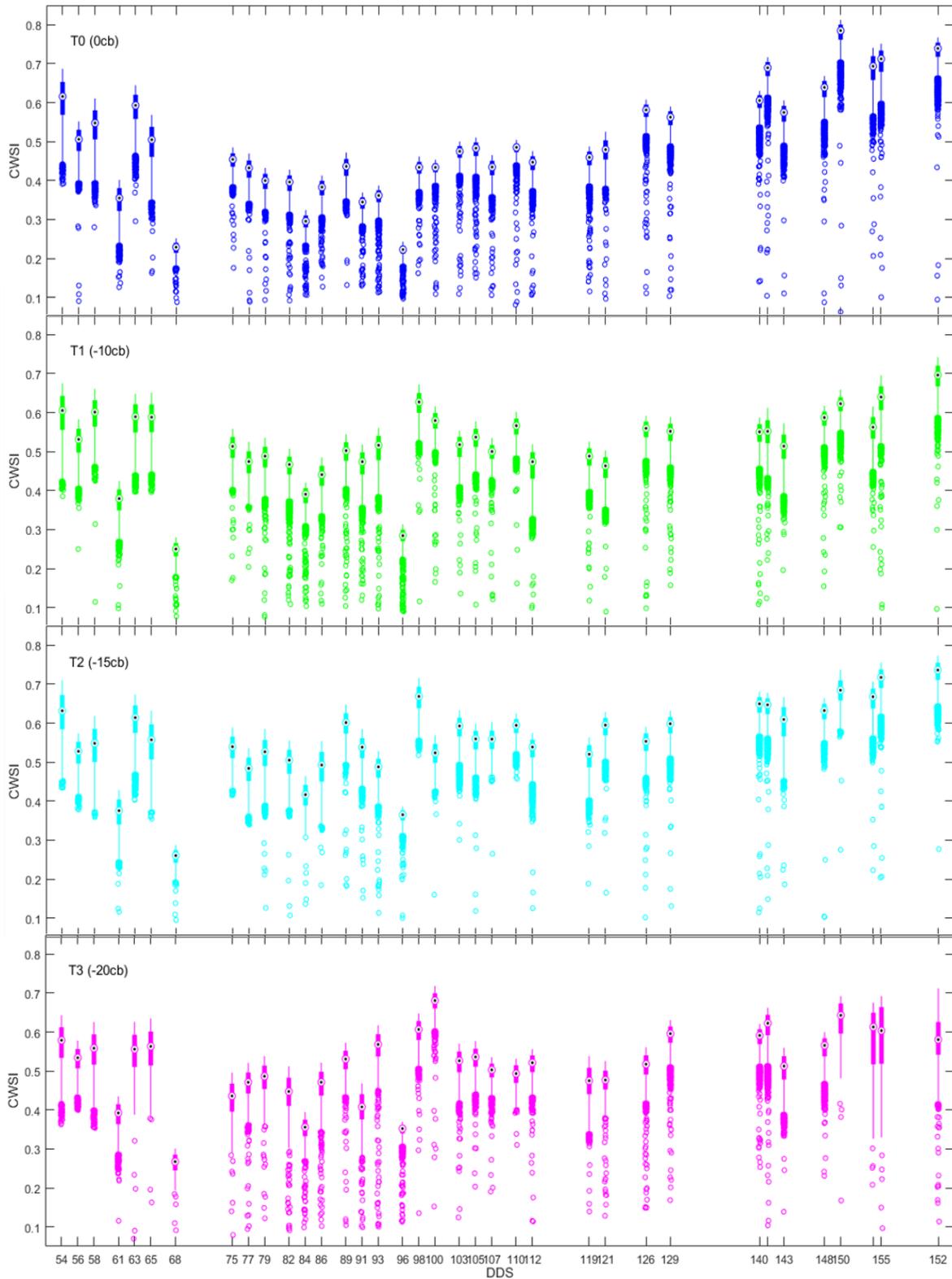


Figura 27. Variación diaria del CWSI del cultivo de arroz IR 71706 para toda la fase fenológica según tratamiento, utilizando el método de superposición – temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

4.3. Relación entre el CWSI y la humedad del suelo

El Anexo 17 presenta la información de datos de humedad volumétrica del suelo recolectado mediante el sensor FDR a 20 cm de profundidad del 30 de diciembre de 2017 al 2 de mayo de 2018. En ella se observa una disminución considerable de humedad entre los 78 y 103 DDS para los tratamientos T1, T2 y T3, lo cual sustenta que se aplicó los tratamientos de secas en las parcelas. También se presenta el Anexo 19, la cual muestra la información de humedad volumétrica del suelo recolectada por el sensor TDR a 12 y 20 cm de profundidad entre los 93 y 102 DDS.

La variación de humedad volumétrica del suelo a los 20 cm varió entre 25 y 42 por ciento. En el caso de la humedad a 10 cm de profundidad la variación se dio entre 16 y 52 por ciento. Ambos sensores registran humedades similares, pues en ambas se observan las humedades reducidas en el periodo de secas entre la fase vegetativa y reproductiva, así como al final del periodo vegetativo, en el cual se aplicó secas para la maduración de granos.

Analizando exclusivamente el periodo de secas o aplicación de tratamientos, se obtuvo la Figura 28. En estos valores ya se encuentra aplicada la ecuación potencial obtenida para la corrección de temperaturas foliares, bajo el método de superposición – temperaturas umbrales, obtenidas por la cámara termográfica. En ella se observa que los tratamientos T1, T2 y T3 se ven muy diferenciados del tratamiento T0. Por otro lado, debido a que se trata de una variedad de arroz resistente al estrés hídrico no hay una diferencia muy notoria entre los tratamientos. Inicia con un CWSI promedio de 0.5 para los tres tratamientos hasta un CWSI de 0.7, alcanzado por el T3 a los 100 DDS. Esto guarda relación con la humedad registrada a los 100 DDS, pues para dicho tratamiento fue la menor registrada. Respecto a los 96 DDS, este día fue registrado como nublado, según los resultados de CWSI nos indicaría que el cultivo se encuentra en condiciones de estrés hídrico bajo, en contraparte, según lo observado por el registro de humedad se observa que sí estuvo sometido a estrés hídrico. Con esto se concluiría que el uso de esta metodología para la estimación del estrés hídrico en el cultivo no es recomendable para días con condiciones nubladas, ya que no reflejaría las condiciones reales a las que estaría sometido. En relación al tratamiento T2 se observó que los valores máximos fueron a los 89 y 98 DDS, estos guardan relación con los días en los cuales se aplicaron el riego siendo en total dos riegos mientras que el tratamiento T3 fue solo un riego aplicado después de los 100 DDS.

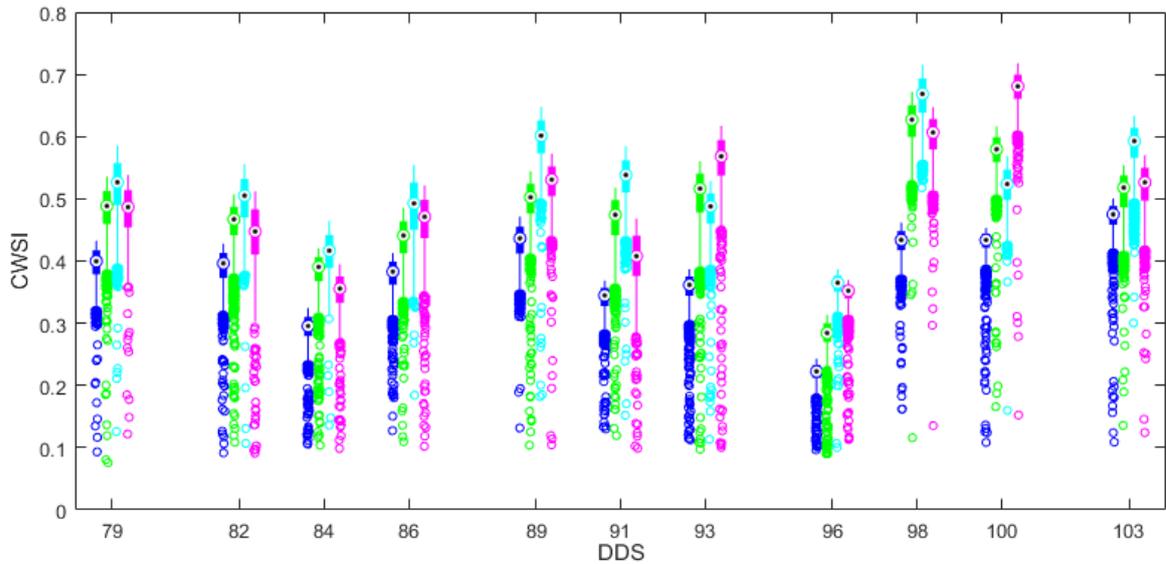


Figura 28. Variación diaria del CWSI del cultivo de arroz IR 71706 por tratamiento para el periodo de secas, utilizando el método de superposición – temperaturas umbrales. Periodo de análisis: 1 de febrero del 2018 al 26 de febrero del 2018

FUENTE: Elaboración propia

Las Figuras 29 y 31 muestran las relaciones entre los valores de CWSI obtenido por medio de la cámara termográfica respecto la humedad del suelo ($\theta\%$) medida con los sensores TDR y FDR.

Según el análisis estadístico para la relación de los 252 datos mostrados en la Figura 29, la prueba de Kolmogorov – Smirnov (Anexo 7) obtuvo que la variable CWSI posee una distribución normal (nivel de significancia mayor al elegido 0.05), mientras que la variable $\theta\%$ (12 cm) no la posee (nivel de significancia menor al elegido 0.05). Se decidió trabajar con una regresión lineal, ya que en anteriores investigaciones la relación entre ambas variables ha sido trabajada bajo esta regresión, tal es el caso de Xu. *et al* (2016). Se realizó la prueba T de Student (Anexo 8) para determinar si la ecuación es significativa y se obtuvo que en la regresión optada no existe una diferencia significativa entre las medias de las variables, ya que presenta un valor de p mayor al nivel de significancia elegido de 0.05.

Según la naturaleza de las variables, se realizaron las pruebas de Pearson, Kendall y Spearman. En el Anexo 9 se puede observar que las correlaciones obtenidas son -0.440, -0.306 y -0.421, respectivamente. Adicionalmente, se realizaron las correlaciones por tratamiento, tal como se observa en la Figura 30 y el Anexo 10. En ella se observa que los

tratamientos T0 y T1 presentan coeficientes más elevados (coeficiente de Pearson de -0.668 y -0.505, respectivamente) y se ajustan más a la ecuación de corrección de la Figura 29.

Según el análisis estadístico para la relación de los 312 datos mostrados en la Figura 31, la prueba de Kolmogorov – Smirnov (Anexo 11) obtuvo que la variable CWSI posee una distribución normal (nivel de significancia mayor al elegido 0.05), mientras que la variable $\theta\%$ (20 cm) no la posee (nivel de significancia menor al elegido 0.05). Con la prueba T de Student (Anexo 12) se obtuvo que en la regresión optada no existe una diferencia significativa entre las medias de las variables, ya que presenta un valor de p mayor al nivel de significancia elegido de 0.05.

Debido a las mismas razones mencionadas anteriormente se realizaron las pruebas de Pearson, Kendall y Spearman. En el Anexo 13 se puede observar que las correlaciones obtenidas son -0.489, -0.347 y -0.486, respectivamente. Adicionalmente, se realizaron las correlaciones por tratamiento, tal como se observa en la Figura 32 y el Anexo 14. En ella se observa que los tratamientos T0 y T1 presentan coeficientes más elevados (coeficientes de Pearson de -0.666 y -0.551, respectivamente) y se ajustan más a la ecuación de corrección de la Figura 31, además que los tratamientos T2 y T3 se ajustan en mayor medida (mayores coeficientes) en comparación a la profundidad anterior.

Estas correlaciones inversas, se justifican 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 del cultivo. Comparando los Anexos 9 y 13 se observa que las relaciones de las variables a profundidad de 20 cm son menores en las tres correlaciones; es decir, presentan mayores correlaciones: -0.489 para el coeficiente de Pearson, -0.347 para el coeficiente de Kendall y -0.486 para el coeficiente de Spearman.

Se observa que la variabilidad en el CWSI calculado con temperaturas foliares resultantes del método de superposición – temperaturas umbrales para un valor de humedad volumétrica del suelo es más reducida a mayor profundidad. Poseen un grado de dependencia lineal negativa de -0.44 y -0.49, según las profundidades de 12 y 20 cm, respectivamente. En el caso de la Figura 30, los valores por encima de la mediana de cada punto varían hasta 0.09 y por debajo hasta 0.18, en general la máxima variación fue de 0.27 y, la mínima, de 0.04. Y en el caso de la Figura 32, los valores por encima de la mediana varían hasta 0.10 y por debajo hasta 0.23, en general la máxima variación fue de 0.32 y, la mínima, de 0.04. Se obtienen mejores resultados a mayor profundidad debido a que, a menor profundidad, la

humedad del suelo es afectada en mayor medida por la evapotranspiración. Estos resultados son similares a lo indicado por Durán (2018) que a una profundidad de 30 cm se obtienen correlaciones mayores que a 15 cm. En dicha investigación se analizó cada termocupla por separado obteniendo correlaciones de Pearson, para 30 cm de profundidad, de hasta -0.42. Analizando por separado, en la Figura 32 se observa que el máximo coeficiente de Pearson fue de -0.66 correspondiente a T0.

En relación al rendimiento obtenido, se obtuvo que a mayor estrés hídrico sometido al cultivo el rendimiento fue menor, tal como se observa en el Anexo 16. En caso se requiera reducir la lámina de agua el tratamiento T1 sería el óptimo, pues obtuvo un rendimiento de 9.37 t ha⁻¹ (valor por encima al promedio nacional de 7.19 t ha⁻¹) y se redujo 408 m³ ha⁻¹ en volumen de agua en comparación a T0 (Anexo 15).

Respecto al análisis de días nublados, se observa que los puntos identificados en dichos días presentan valores de CWSI por debajo y alrededor de 0.4, y humedades de suelo por debajo de 30 por ciento; es decir, en estas fechas el cultivo al encontrarse en condiciones de déficit hídrico debió tener CWSI más elevados. Además, estos valores no guardan relación con las correlaciones obtenidas en ambas figuras. Por esta razón, esta correlación solo servirá cuando las tomas de imágenes térmicas se realicen en condiciones sin presencia de nubes.

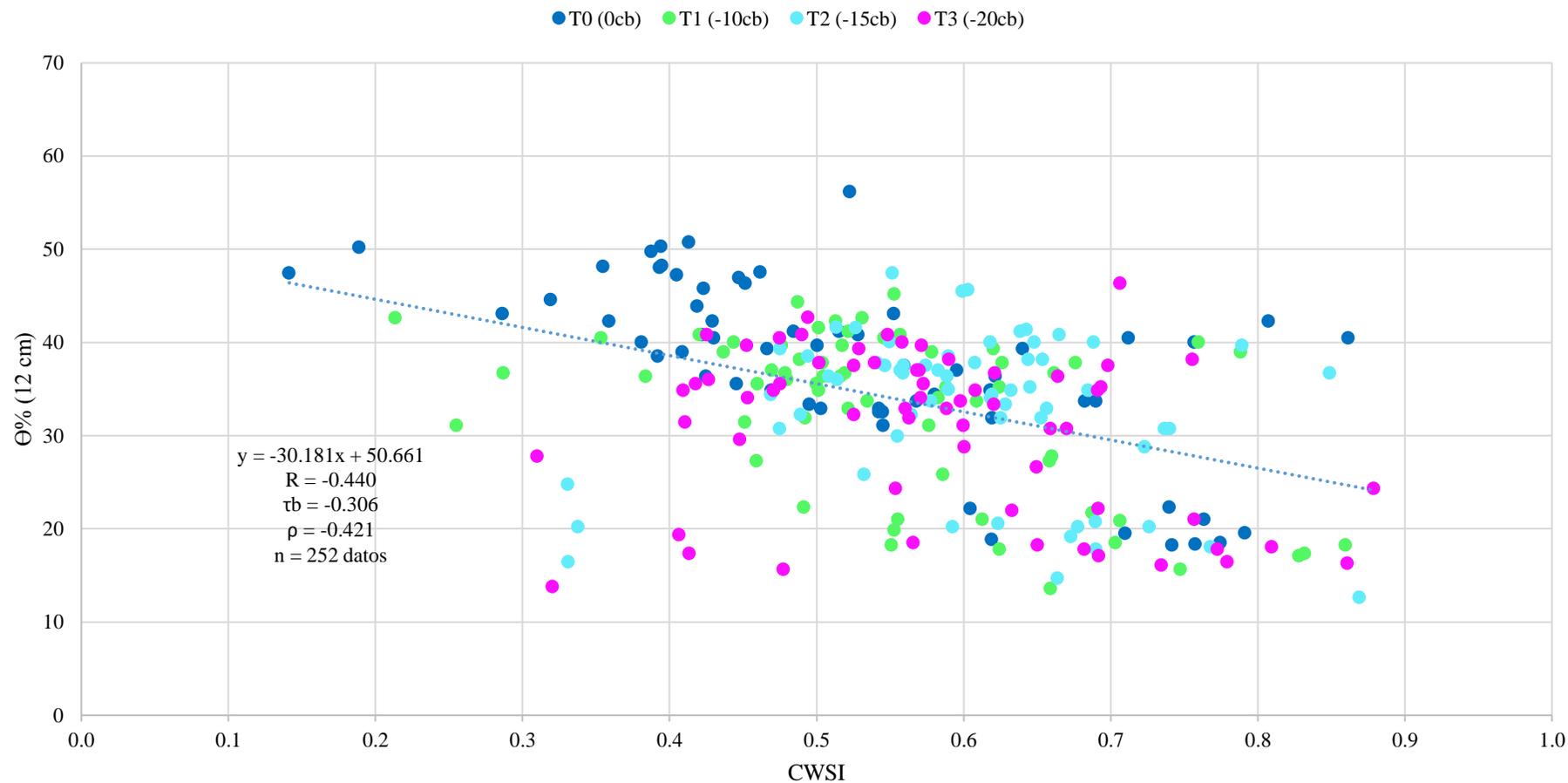


Figura 29. Relación entre los valores de CWSI medidos por imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo a 12 cm de profundidad para todo el periodo fenológico del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

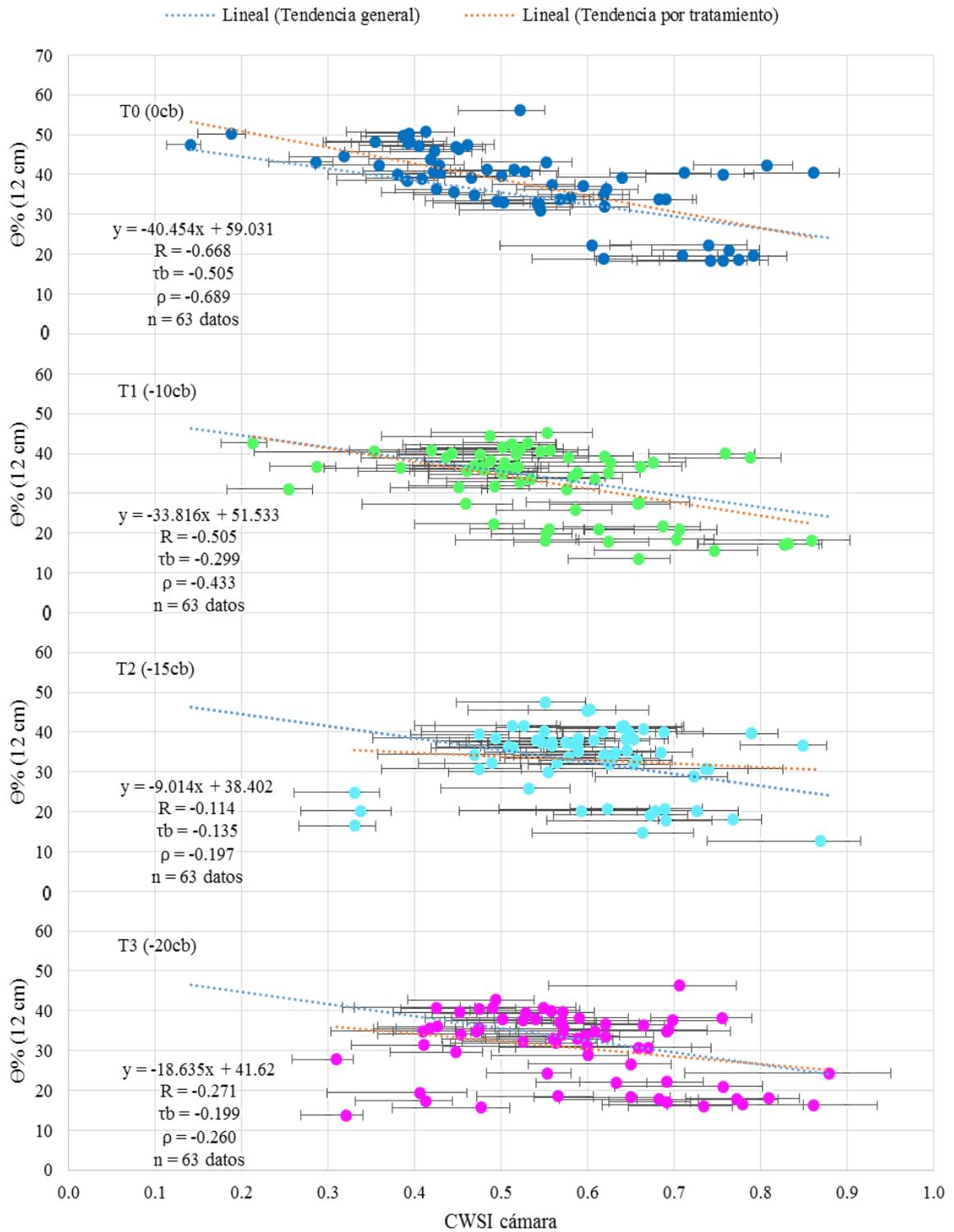


Figura 30. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre los valores de CWSI medidos por imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo a 12 cm de profundidad para todo el periodo fenológico del cultivo de arroz IR 71706.

Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

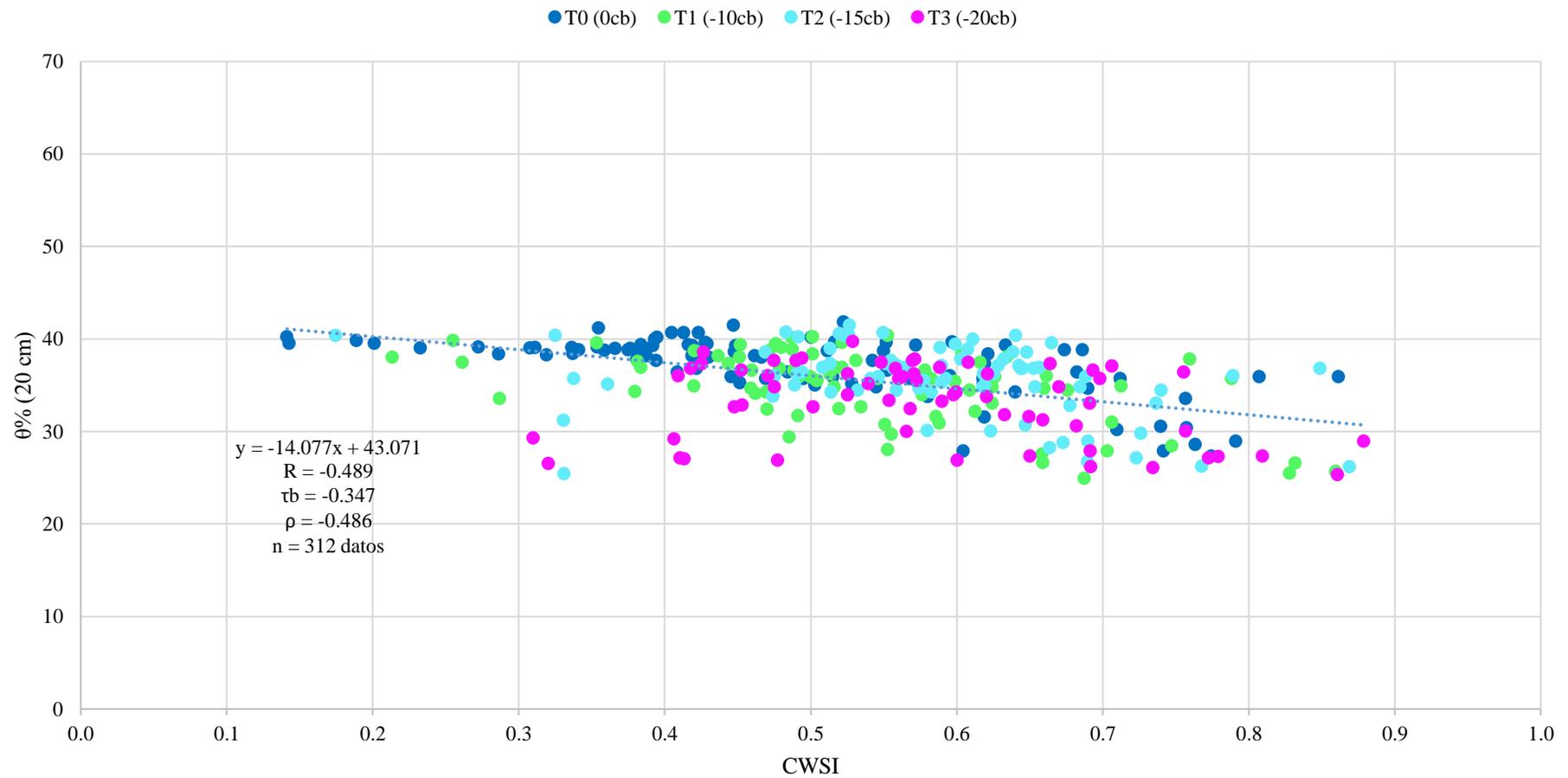


Figura 31. Relación entre los valores de CWSI medidos por imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo a 20 cm de profundidad para todo el periodo fenológico del cultivo de arroz IR 71706. Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

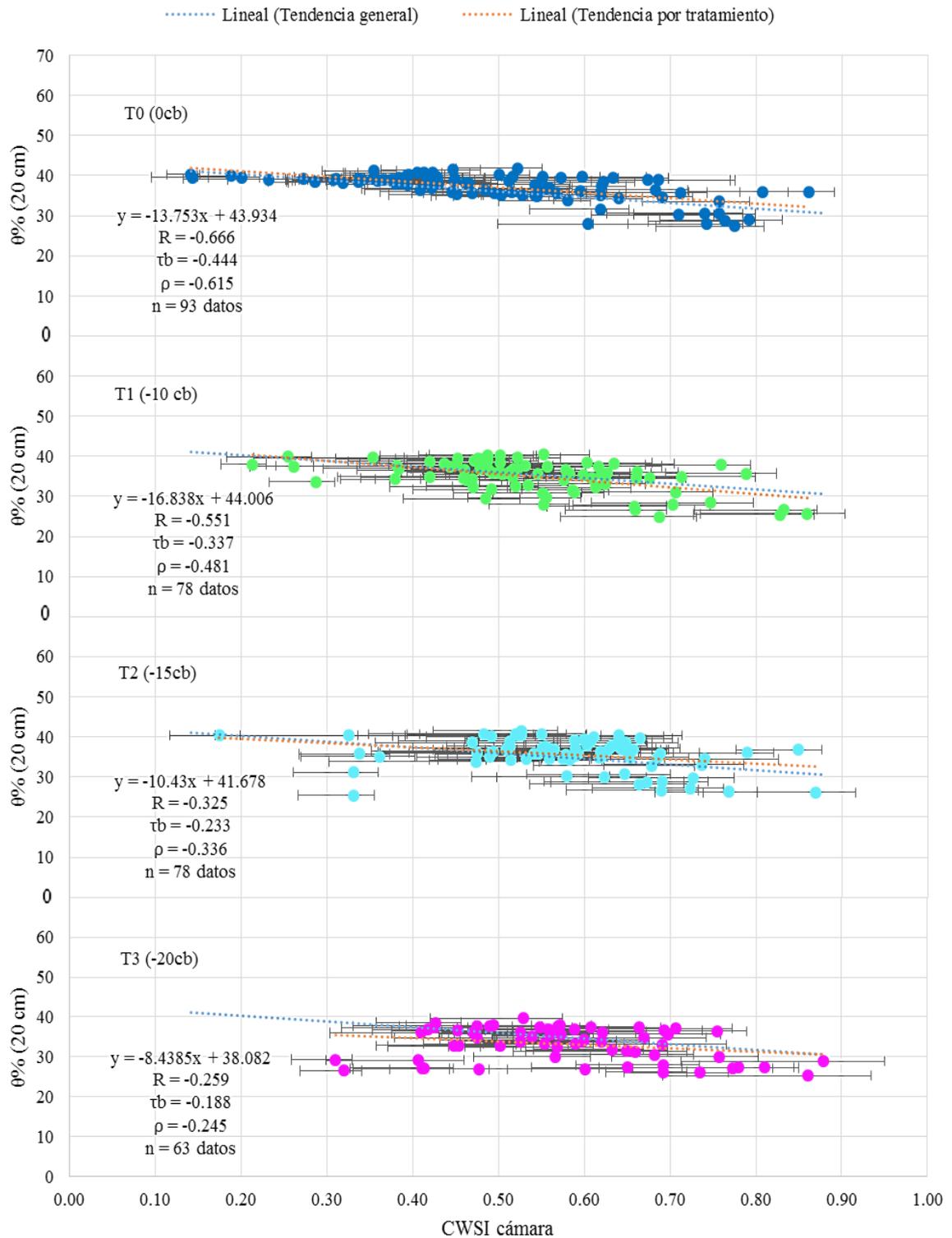


Figura 32. Variación de cada medida por tratamiento en la relación entre los valores de CWSI medidos por imágenes térmicas con la humedad volumétrica del suelo a 20 cm de profundidad para todo el periodo fenológico del cultivo de arroz IR 71706.

Periodo de análisis: 8 de enero del 2018 al 26 de abril del 2018

FUENTE: Elaboración propia

V. CONCLUSIONES

- La temperatura seca obtuvo valores entre 14.0 y 18.8°C más la temperatura del aire medida entre las 12:20 y 13:25 del día. En el caso de la temperatura húmeda, se obtuvo un valor igual a la temperatura de aire $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ medida entre las 07:40 y 08:15 del día.
- En la extracción de cobertura vegetal de las imágenes térmicas, el método de superposición de imágenes con temperaturas umbrales obtuvo la mejor relación bajo regresión potencial respecto a las temperaturas obtenidas mediante sensores térmicos de termocuplas (STT), con un coeficiente de Pearson de 0.841 para un nivel de significativa de 0.05.
- La relación entre el CWSI y la humedad volumétrica del suelo a profundidades de 12 y 20 cm, obtuvieron coeficientes de (-0.440, -0.306 y -0.421) a 12 cm y (-0.489, -0.347 y -0.486) a 20 cm, para las correlaciones de Pearson, Kendall y Spearman, respectivamente. La mejor correlación se obtuvo a una profundidad de 20 cm debido al menor efecto de la evaporación del suelo.

VI. RECOMENDACIONES

1. Realizar la captura de imágenes con la cámara termográfica teniendo en cuenta el ángulo de trabajo y la orientación respecto al sol.
2. Estimar el valor de la emisividad del cultivo de arroz mediante el uso de un espectroradiómetro para mejorar la calibración de las imágenes térmicas.
3. En la extracción de cobertura vegetal, determinar rangos óptimos en cada banda HSV para el método de superposición o probar nuevos métodos como el de umbral de imagen global por el método de Otsu.
4. Someter al cultivo a un mayor estrés hídrico con reducción de humedad menor a -20 cb.
5. Relacionar el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) con la conductancia estomática obtenida mediante el uso de un porómetro.
6. Aplicar la metodología en vehículos aéreos no tripulados con el fin de trabajar a una mayor escala.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARIAN Control & instrumentation. Norma técnica 2, rev. B. Consultado 6 nov. 2017.
<http://www.arian.cl/downloads/nt-002.pdf>
- Aston, AR; Van Bavel, CHM. 1972. Soil surface water depletion and leaf temperature. *Agronomy Journal*. 64: 368-373 p.
- Berni, J; Zarco, P; Sepulcre, P; Fereres, E; Villalobos, F. 2009. Mapping canopy conductance and CSWI in olive orchards using high resolution thermal remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment*. 113: 2380-2388 p.
- Camino, C; Zarco-Tejada, P; Gonzalez-Dugo, V. 2018. Effects of heterogeneity within tree crowns on airborne – quantified SIF and the CWSI as indicators of water stress in the context of precision agriculture. *Remote Sensing*. 10(4): 604. 18 p.
- Costa, J; Egipto, R; Sánchez-Virosta, A; Lopes, C; Chaves, M. 2018. Canopy and soil thermal patterns to support water and heat stress management in vineyards. *Agricultural Water Management*. 216: 484-496 p.
- Durán, M. 2018. Caracterización del índice de estrés hídrico foliar de arroz mediante el uso de sensores térmicos y de humedad del suelo en la Molina, Lima – Perú. Tesis Ing. Agrícola Lima – Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 92 p.
- 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. Consultado 22 ene. 2018.
<https://bdigital.zamorano.edu/handle/11036/4578>
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. 2018. Seguimiento del mercado del arroz de la FAO. 11(1). Consultado 26 mar. 2019.
<http://www.fao.org/3/I9243ES/i9243es.pdf>
- García-Tejero, L; Rubio, A; Viñuela, L; Hernández, A; Gutiérrez-Gordillo, S; Rodríguez-Pleguezuelo, C; Durán-Zuazo, V. 2018. Thermal imaging at plant level to assess the

- crop-water status in almond trees (cv. Guara) under deficit irrigation strategies. *Agricultural Water Management*. 208: 176-186 p.
- 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*. 6: 13-26 p.
- Heros, E. 2013. Asistencia técnica dirigida en manejo agronómico del cultivo de arroz. Universidad Nacional Agraria La Molina. Extensión y Proyección Social. Consultado 8 ene. 2018. <https://www.agrobanco.com.pe/data/uploads/ctecnica/006-a-arroz.pdf>
- Heros, E; Gómez, L; Sosa, G. 2017. Utilización de los índices de selección en la identificación de genotipos de arroz (*Oryza sativa L.*) tolerantes a sequía. *Producción Agropecuaria y Desarrollo Sostenible*. 2: 11-31 p.
- Idso, S. 1982. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agric. Meteorol.* 27: 59-70 p.
- Jackson, R. 1982. Canopy temperature and crop water stress. *Advances in Irrigation*. 1: 43-85 p.
- Jones, H. 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in plant physiology and ecophysiology. *Advances in Botanical Research*. 41: 108-155 p.
- Jones, H. 2014. *Plants and microclimate: a quantitative approach to environmental plant physiology*. 3rd ed. Cambridge, Cambridge University Press. UK. 428 p.
- Kim, Y; Still, C; Roberts, D; Goulden, M. 2018. Thermal infrared imaging of conifer leaf temperatures: comparison to thermocouple measurements and assessment of environmental influences. *Agricultural and Forest Meteorology*. 248: 361-371 p.
- López, R; Arteaga, R; Vásquez, M; López, I; Sánchez, I. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México*. 35: 97-111 p.
- Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI). Informe de coyuntura arroz. 2018. Dirección General de Seguimiento y Evaluación de Políticas. Consultado 5 oct. 2018. http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/Informe-coyuntura-arroz-280818_0.pdf

- 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 p.
- 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.
- OMEGA Engineering. Códigos de color del cable y límites de error. Consultado 6 nov. 2017. Disponible en <https://www.omega.com/techref/colorcodes.html>
- Quebrajo, L; Perez-Ruiz, M; Pérez-Urrestarazu, L; Martínez, G; Egea, G. 2018. Linking thermal imaging and soil remote sensing to enhance irrigation management of sugar beet. *Biosystems Engineering*. 165: 77-87 p.
- Rinza, J; Ramirez, D; García, J; Mendiburu, F; Yactayo, W; Barreda, C; Velasquez, T; Mejía, A; Roberto, Q. 2018. Infrared radiometry as a tool for early water deficit detection: insights into its use for establishing irrigation calendars for potatoes under humid conditions. *Potato Research*. 62 (2): 109-122 p.
- Rud, R; Cohen, Y; Alchanatis, V; Levi, A; Brikman, R; Shenderey, C; Heuer, B; Markovitch, T; Dar, Z; Rosen, C; Mulla, D; Nigon, T. 2014. Crop water stress index derived from multi-year ground and aerial thermal images as an indicator of potato water status. *Precision Agriculture*. 15 (3): 273-289 p.
- Salazar, W. 2018. Respuesta del cultivo de arroz, CV IR 71706 al estrés hídrico bajo riego por goteo en la UNALM. Tesis Ing. Agrícola Lima – Perú. Universidad Nacional Agraria La Molina. 105 p.
- Sánchez-Díaz, M; Aguirreolea, J. 2008. El agua en la planta. Movimiento del agua en el sistema suelo-planta-atmósfera. *Fundamentos de Fisiología Vegetal*. 2(29): 577-596 p.
- Sandhu, N; Singh, V; Kumar, M. 2019. Genomic footprints uncovering abiotic stress tolerance in rice. *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*. 36: 737-753 p.

- Tadeo, F; Gómez-Cárdenas, A. 2008. Fisiología de las plantas y el estrés. Fundamentos de Fisiología Vegetal. 2(29): 577-596 p.
- 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 in Agriculture. 73: 74-83 p.
- 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(3): 565-572 p.

VIII. ANEXO

ANEXO 1: PRUEBA T DE STUDENT PARA MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE TEMPERATURA ESTIMADAS POR EL MÉTODO DE SUPERPOSICIÓN DE IMÁGENES CORREGIDAS SEGÚN REGRESIÓN POTENCIAL Y LOS STT

Estadísticas de muestras emparejadas					
Regresión estadística	Variables	Media	N	Desviación estándar	Desv. Error promedio
Regresión exponencial	T termocupla	33.993	144	1.734	0.145
	T cámara	33.992	144	2.857	0.238
Regresión lineal	T termocupla	33.993	144	1.734	0.145
	T cámara	33.992	144	2.857	0.238
Regresión logarítmica	T termocupla	33.993	144	1.734	0.145
	T cámara	33.992	144	2.857	0.238
Regresión cuadrática	T termocupla	33.993	144	1.734	0.145
	T cámara	33.992	144	2.857	0.238
Regresión poli. de grado 3	T termocupla	33.993	144	1.734	0.145
	T cámara	33.992	144	2.857	0.238
Regresión potencial	T termocupla	33.993	144	1.734	0.145
	T cámara	33.992	144	2.857	0.238

Correlaciones de muestras emparejadas				
Regresión estadística	Variables	N	Correlación	Sig.
Regresión exponencial	T cámara -	144	0.596	0.000
	T termocupla			
Regresión lineal	T cámara -	144	0.607	0.000
	T termocupla			
Regresión logarítmica	T cámara -	144	0.618	0.000
	T termocupla			
Regresión cuadrática	T cámara -	144	0.652	0.000
	T termocupla			
Regresión poli. de grado 3	T cámara -	144	0.659	0.000
	T termocupla			
Regresión potencial	T cámara -	144	0.608	0.000
	T termocupla			

Prueba de muestras emparejadas									
Regresión estadística	Variables	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bil.)
		Media	Desv. est.	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza				
					Inferior	Superior			
Regresión exponencial	T cámara - T termocupla	0.096	2.298	0.191	-0.283	0.474	0.500	143	0.618
Regresión lineal	T cámara - T termocupla	-0.001	2.271	0.189	-0.375	0.373	-0.007	143	0.994
Regresión logarítmica	T cámara - T termocupla	0.000	2.245	0.187	-0.370	0.370	-0.002	143	0.999
Regresión cuadrática	T cámara - T termocupla	0.000	2.166	0.180	-0.357	0.357	-0.001	143	0.999
Regresión poli. de grado 3	T cámara - T termocupla	-1.456	2.159	0.180	-1.812	-1.101	-8.094	143	0.000
Regresión potencial	T cámara - T termocupla	0.082	2.272	0.189	-0.293	0.456	0.431	143	0.667

ANEXO 2: PRUEBA T DE STUDENT PARA MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE TEMPERATURA ESTIMADAS POR EL MÉTODO DE TEMPERATURAS UMBRALES CORREGIDAS SEGÚN REGRESIÓN POTENCIAL Y LOS STT

Estadísticas de muestras emparejadas					
Regresión estadística	Variables	Media	N	Desviación estándar	Desv. Error promedio
Regresión exponencial	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.890	144	1.672	0.139
Regresión lineal	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.991	144	1.572	0.131
Regresión logarítmica	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.993	144	1.613	0.134
Regresión cuadrática	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.951	144	1.771	0.148
Regresión poli. de grado 3	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.926	144	1.789	0.149
Regresión potencial	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.906	144	1.713	0.143

Correlaciones de muestras emparejadas				
Regresión estadística	Variables	N	Correlación	Sig.
Regresión exponencial	T cámara - T termocupla	144	0.538	0.000
Regresión lineal	T cámara - T termocupla	144	0.550	0.000
Regresión logarítmica	T cámara - T termocupla	144	0.565	0.000
Regresión cuadrática	T cámara - T termocupla	144	0.621	0.000
Regresión poli. de grado 3	T cámara - T termocupla	144	0.630	0.000
Regresión potencial	T cámara - T termocupla	144	0.553	0.000

Prueba de muestras emparejadas									
Regresión estadística	Variables	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bil.)
		Media	Desv. est.	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza				
					Inferior	Superior			
Regresión exponencial	T cámara - T termocupla	0.102	2.412	0.201	-0.295	0.499	0.508	143	0.613
Regresión lineal	T cámara - T termocupla	0.000	2.386	0.199	-0.393	0.393	0.002	143	0.998
Regresión logarítmica	T cámara - T termocupla	-0.001	2.358	0.197	-0.389	0.388	-0.004	143	0.997
Regresión cuadrática	T cámara - T termocupla	0.041	2.239	0.187	-0.328	0.410	0.219	143	0.827
Regresión poli. de grado 3	T cámara - T termocupla	0.066	2.220	0.185	-0.300	0.432	0.356	143	0.722
Regresión potencial	T cámara - T termocupla	0.086	2.385	0.199	-0.307	0.479	0.434	143	0.665

**ANEXO 3: PRUEBA T DE STUDENT PARA MUESTRAS EMPAREJADAS:
VALORES DE TEMPERATURA ESTIMADAS POR EL MÉTODO DE
SUPERPSICIÓN DE IMÁGENES Y TEMPERATURAS UMBRALES
CORREGIDAS SEGÚN REGRESIÓN POTENCIAL Y LOS STT**

Estadísticas de muestras emparejadas					
Regresión estadística	VARIABLES	Media	N	Desviación estándar	Desv. Error promedio
Regresión exponencial	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.904	144	2.018	0.168
Regresión lineal	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.991	144	1.926	0.160
Regresión logarítmica	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.993	144	1.950	0.163
Regresión cuadrática	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.948	144	1.993	0.166
Regresión poli. de grado 3	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.051	144	1.881	0.157
Regresión potencial	T termocupla	33.992	144	2.857	0.238
	T cámara	33.929	144	2.037	0.170

Correlaciones de muestras emparejadas				
Regresión estadística	VARIABLES	N	Correlación	Sig.
Regresión exponencial	T cámara -	144	0.664	0.000
	T termocupla			
Regresión lineal	T cámara -	144	0.674	0.000
	T termocupla			
Regresión logarítmica	T cámara -	144	0.683	0.000
	T termocupla			
Regresión cuadrática	T cámara -	144	0.699	0.000
	T termocupla			
Regresión poli. de grado 3	T cámara -	144	0.706	0.000
	T termocupla			
Regresión potencial	T cámara -	144	0.673	0.000
	T termocupla			

Prueba de muestras emparejadas									
Regresión estadística	Variables	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bil.)
		Media	Desv. est.	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza				
					Inferior	Superior			
Regresión exponencial	T cámara - T termocupla	0.088	2.140	0.178	-0.265	0.440	0.492	143	0.623
Regresión lineal	T cámara - T termocupla	0.000	2.110	0.176	-0.347	0.348	0.001	143	0.999
Regresión logarítmica	T cámara - T termocupla	-0.001	2.088	0.174	-0.345	0.343	-0.006	143	0.995
Regresión cuadrática	T cámara - T termocupla	0.043	2.043	0.170	-0.293	0.380	0.255	143	0.799
Regresión poli. de grado 3	T cámara - T termocupla	0.941	2.029	0.169	0.607	1.275	5.567	143	0.000
Regresión potencial	T cámara - T termocupla	0.063	2.116	0.176	-0.286	0.411	0.357	143	0.722

ANEXO 4: PRUEBA T DE STUDENT PARA MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES DE TEMPERATURA ESTIMADAS POR EL MÉTODO DE SUPERPOSICIÓN DE IMÁGENES Y TEMPERATURAS UMBRALES CORREGIDAS POR TRATAMIENTO SEGÚN REGRESIÓN POTENCIAL Y LOS STT

Estadísticas de muestras emparejadas					
Tratamiento	Variables	Media	N	Desviación estándar	Desv. Error promedio
T1	T termocupla	34.475	72	2.798	0.330
	T cámara	33.753	72	2.077	0.245
T2	T termocupla	33.883	36	2.901	0.484
	T cámara	33.971	36	1.946	0.324
T3	T termocupla	33.133	36	2.793	0.466
	T cámara	34.239	36	2.065	0.344

Correlaciones de muestras emparejadas				
Tratamiento	VARIABLES	N	Correlación	Sig.
T1	T cámara - T termocupla	72	0.672	0.000
T2	T cámara - T termocupla	36	0.841	0.000
T3	T cámara - T termocupla	36	0.659	0.000

Prueba de muestras emparejadas									
Tratamiento	VARIABLES	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bil.)
		Media	Desv. est.	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza				
					Inferior	Superior			
T1	T cámara - T termocupla	0.722	2.083	0.245	0.233	1.212	2.944	71	0.004
T2	T cámara - T termocupla	-0.088	1.646	0.274	-0.645	0.469	-0.321	35	0.750
T3	T cámara - T termocupla	-1.105	2.113	0.352	-1.820	-0.390	-3.139	35	0.003

ANEXO 5: PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LOS VALORES DE TEMPERATURA ESTIMADAS POR EL MÉTODO DE SUPERPOSICIÓN DE IMÁGENES Y TEMPERATURAS UMBRALES CORREGIDAS POR TRATAMIENTO SEGÚN REGRESIÓN POTENCIAL Y LOS STT

VARIABLES	N	Parámetros normales		Máximas diferencias extremas			Estadístico de prueba	Sig. (bil.)
		Media	Desv. Estánd.	Absoluto	Positivo	Negativo		
T term. (T1)	72	34.475	2.798	0.099	0.086	-0.099	0.099	0.079
T cám. (T1)	72	33.753	2.077	0.066	0.039	-0.066	0.066	0.200
T term. (T2)	36	33.883	2.901	0.107	0.095	-0.107	0.107	0.200
T cám. (T2)	36	33.971	1.946	0.129	0.051	-0.129	0.129	0.134
T term. (T3)	36	33.133	2.793	0.098	0.061	-0.098	0.098	0.200
T cám. (T3)	36	34.239	2.065	0.095	0.090	-0.095	0.095	0.200

ANEXO 6: CORRELACIONES DE PEARSON PARA LOS VALORES DE TEMPERATURA ESTIMADAS POR EL MÉTODO DE SUPERPOSICIÓN DE IMÁGENES Y TEMPERATURAS UMBRALES CORREGIDAS POR TRATAMIENTO SEGÚN REGRESIÓN POTENCIAL Y LOS STT

Tratamiento	Variables	R de Pearson		
		Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N
T1	T cámara - T termocupla	0.672	0	72
T2	T cámara - T termocupla	0.841	0	36
T3	T cámara - T termocupla	0.659	0	36

ANEXO 7: PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LOS VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO Y VALORES DE CWSI, MEDICIONES REALIZADAS A 12 CM DE PROFUNDIDAD

Variables	N	Parámetros normales		Máximas diferencias extremas			Estadístico de prueba	Sig. (bil.)
		Media	Desv. Estánd.	Absoluto	Positivo	Negativo		
CWSI	252	0.566	0.131	0.026	0.026	-0.022	0.026	0.200
Θ% a 12 cm	252	33.569	8.997	0.130	0.097	-0.130	0.130	0.000

ANEXO 8: PRUEBA T DE STUDENT PARA MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES CWSI TRANSFORMADOS SEGÚN REGRESIÓN LINEAL Y HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO A 12 CM DE PROFUNDIDAD

Estadísticas de muestras emparejadas					
Regresión estadística	Variables	Media	N	Desviación estándar	Desv. Error promedio
Regresión lineal	CWSI	33.942	252	4.462	0.281
	Θ% a 12 cm	33.569	252	8.997	0.567

Correlaciones de muestras emparejadas				
Regresión estadística	Variables	N	Correlación	Sig.
Regresión lineal	CWSI - Θ% a 12 cm	252	0.440	0.000

Prueba de muestras emparejadas									
Regresión estadística	Variables	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bil.)
		Media	Desv. est.	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza				
					Inferior	Superior			
Regresión lineal	CWSI - Θ % a 12 cm	0.374	8.095	0.510	-0.631	1.378	0.733	251	0.464

ANEXO 9: CORRELACIONES DE PEARSON, KENDALL Y SPEARMAN PARA LOS VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO Y VALORES DE CWSI, MEDICIONES REALIZADAS A 12 CM DE PROFUNDIDAD

Variables	R de Pearson			τ_b de Kendall			ρ de Spearman		
	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N
CWSI - Θ % a 12 cm	-0.440	0	252	-0.306	0	252	-0.421	0	252

ANEXO 10: CORRELACIONES DE PEARSON, KENDALL Y SPEARMAN PARA LOS VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO Y VALORES DE CWSI, MEDICIONES REALIZADAS POR TRATAMIENTO A 12 CM DE PROFUNDIDAD

Variables	R de Pearson			τ_b de Kendall			ρ de Spearman		
	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N
CWSI (T0) - Θ % a 12 cm	-0.668	0	63	-0.505	0	63	-0.689	0	63
CWSI (T1) - Θ % a 12 cm	-0.505	0	63	-0.299	0	63	-0.433	0	63
CWSI (T2) - Θ % a 12 cm	-0.114	0	63	-0.135	0	63	-0.197	0	63
CWSI (T3) - Θ % a 12 cm	-0.271	0	63	-0.199	0	63	-0.260	0	63

ANEXO 11: PRUEBA DE KOLMOGOROV-SMIRNOV PARA LOS VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO Y VALORES DE CWSI, MEDICIONES REALIZADAS A 20 CM DE PROFUNDIDAD

Variables	N	Parámetros normales		Máximas diferencias extremas			Estadístico de prueba	Sig. (bil.)
		Media	Desv. Estánd.	Absoluto	Positivo	Negativo		
CWSI	312	0.545	0.138	0.027	0.020	-0.027	0.027	0.200
Θ% a 20 cm	312	35.974	3.973	0.138	0.078	-0.138	0.138	0.000

ANEXO 12: PRUEBA T DE STUDENT PARA MUESTRAS EMPAREJADAS: VALORES CWSI TRANSFORMADOS SEGÚN REGRESIÓN LINEAL Y HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO A 20 CM DE PROFUNDIDAD

Estadísticas de muestras emparejadas					
Regresión estadística	Variables	Media	N	Desviación estándar	Desv. Error promedio
Regresión lineal	CWSI	35.586	312	2.252	0.127
	Θ% a 20 cm	35.397	312	3.973	0.225

Correlaciones de muestras emparejadas				
Regresión estadística	Variables	N	Correlación	Sig.
Regresión lineal	CWSI - Θ% a 20 cm	312	0.489	0.000

Prueba de muestras emparejadas									
Regresión estadística	Variables	Diferencias emparejadas					t	gl	Sig. (bil.)
		Media	Desv. est.	Desv. Error promedio	95% de intervalo de confianza				
					Inferior	Superior			
Regresión lineal	CWSI - Θ% a 20 cm	0.189	3.479	0.197	-0.199	0.576	0.958	311	0.339

ANEXO 13: CORRELACIONES DE PEARSON, KENDALL Y SPEARMAN PARA LOS VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO Y VALORES DE CWSI, MEDICIONES REALIZADAS A 20 CM DE PROFUNDIDAD

Variables	R de Pearson			τ_b de Kendall			ρ de Spearman		
	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N
CWSI - $\Theta\%$ a 20 cm	-0.489	0	312	-0.347	0	312	-0.486	0	312

ANEXO 14: CORRELACIONES DE PEARSON, KENDALL Y SPEARMAN PARA LOS VALORES DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO Y VALORES DE CWSI, MEDICIONES REALIZADAS POR TRATAMIENTO A 20 CM DE PROFUNDIDAD

Variables	R de Pearson			τ_b de Kendall			ρ de Spearman		
	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N	Coef. de corr.	Sig. (bilateral)	N
CWSI (T0) - $\Theta\%$ a 20 cm	-0.666	0	93	-0.444	0	93	-0.615	0	93
CWSI (T1) - $\Theta\%$ a 20 cm	-0.551	0	78	-0.337	0	78	-0.481	0	78
CWSI (T2) - $\Theta\%$ a 20 cm	-0.325	0	78	-0.233	0	78	-0.336	0	78
CWSI (T3) - $\Theta\%$ a 20 cm	-0.259	0	63	-0.188	0	63	-0.245	0	63

ANEXO 15: VOLUMEN DE AGUA APLICADA

Cantidad de agua aplicada	T0	T1	T2	T3
$m^3 ha^{-1}$	9189	8781	8481	8155

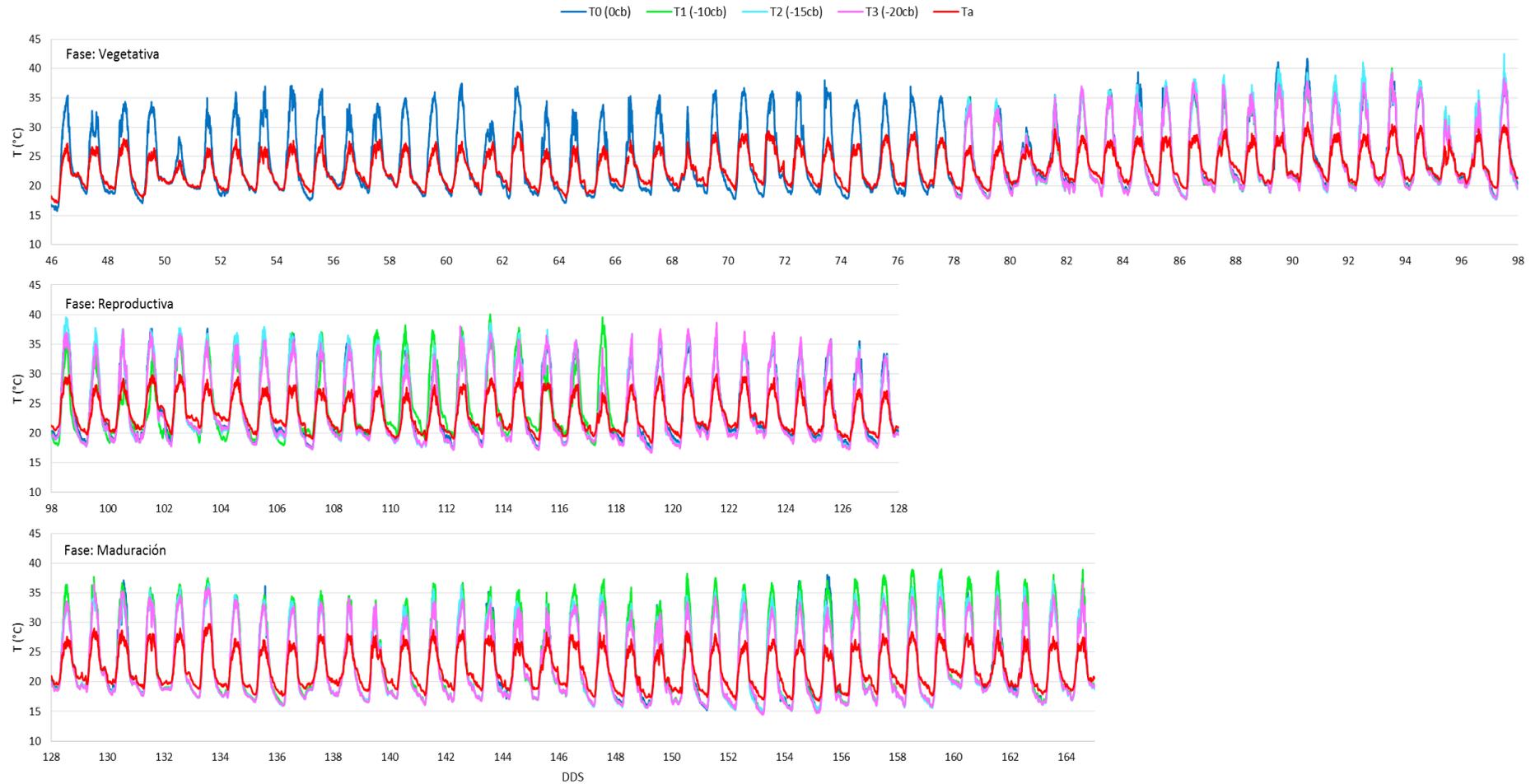
FUENTE: Salazar, W. (2018)

ANEXO 16: RENDIMIENTO DE ARROZ CÁSCARA BAJO RIEGO DEFICITARIO POR GOTEO

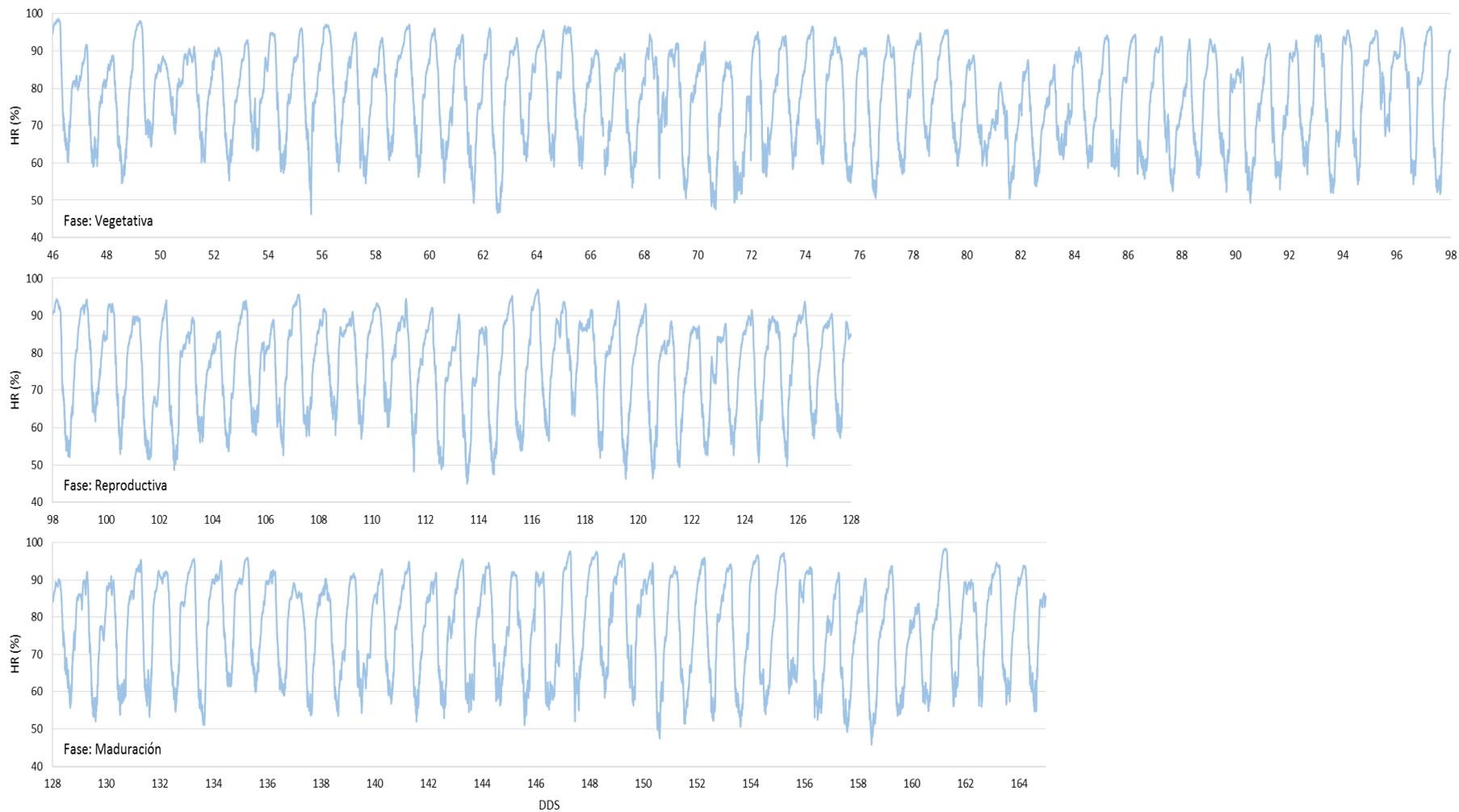
Tratamiento	Plantas por m^2	Rendimiento ($t ha^{-1}$)	Desviación Esándar ($t ha^{-1}$)	Coefficiente de Variación (%)	Mínimo	Máximo
T0	20	10.29	2.75	26.78	7.49	13
T1	20	9.37	2.62	27.94	7.25	12.30
T2	20	6.77	1.91	28.17	5.23	8.9
T3	21	6.65	1.89	28.45	4.63	8.38

FUENTE: Salazar, W. (2018)

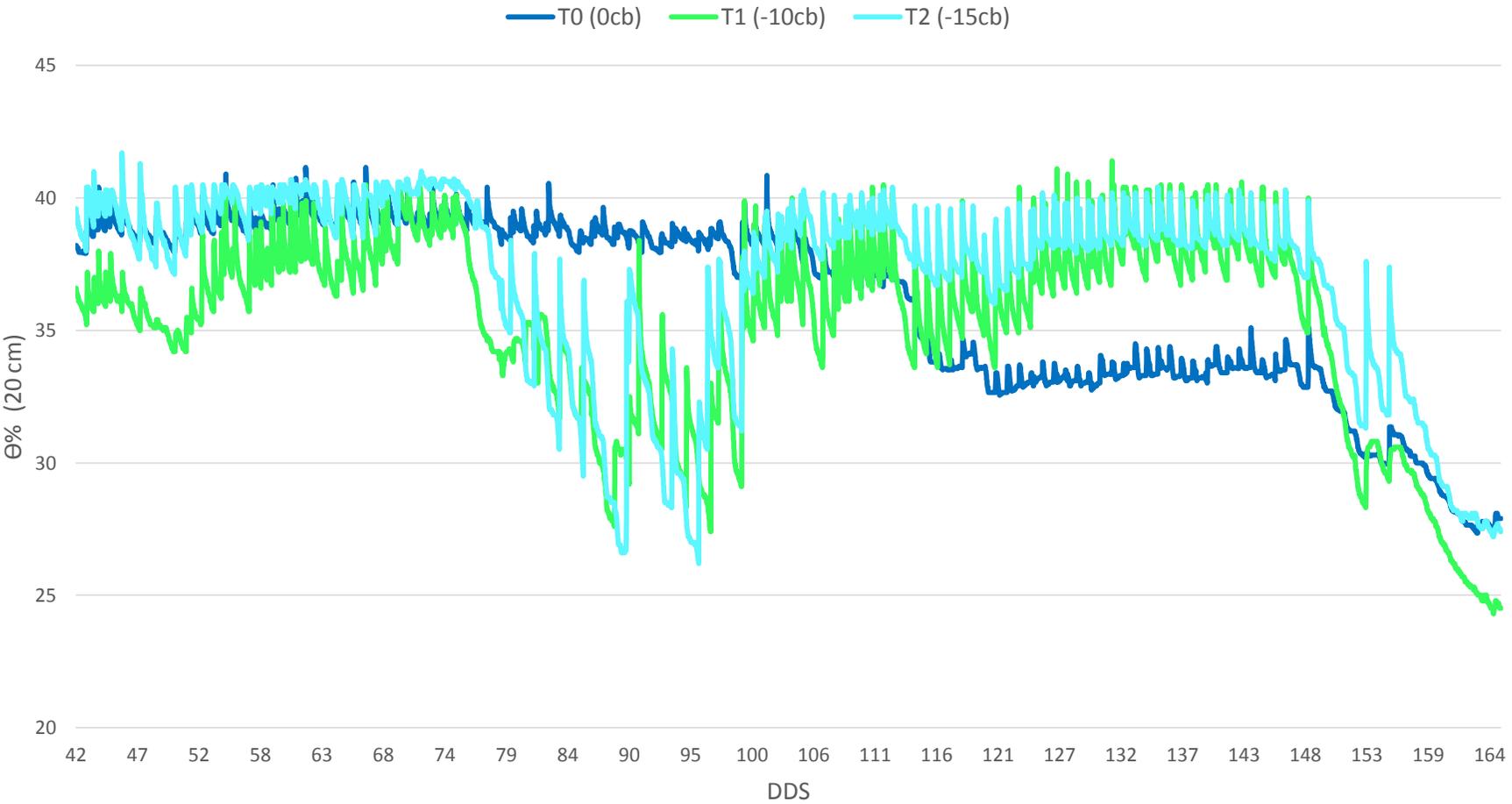
ANEXO 17: VARIACIÓN CADA CINCO MINUTOS DE LA TEMPERATURA FOLIAR DE CULTIVO DE ARROZ IR 71706 POR TRATAMIENTOS Y TEMPERATURA DEL AIRE, SEGÚN FASE FENOLÓGICA. PERIODO DE ANÁLISIS: 31 DE DICIEMBRE DEL 2017 AL 28 DE ABRIL DEL 2018.



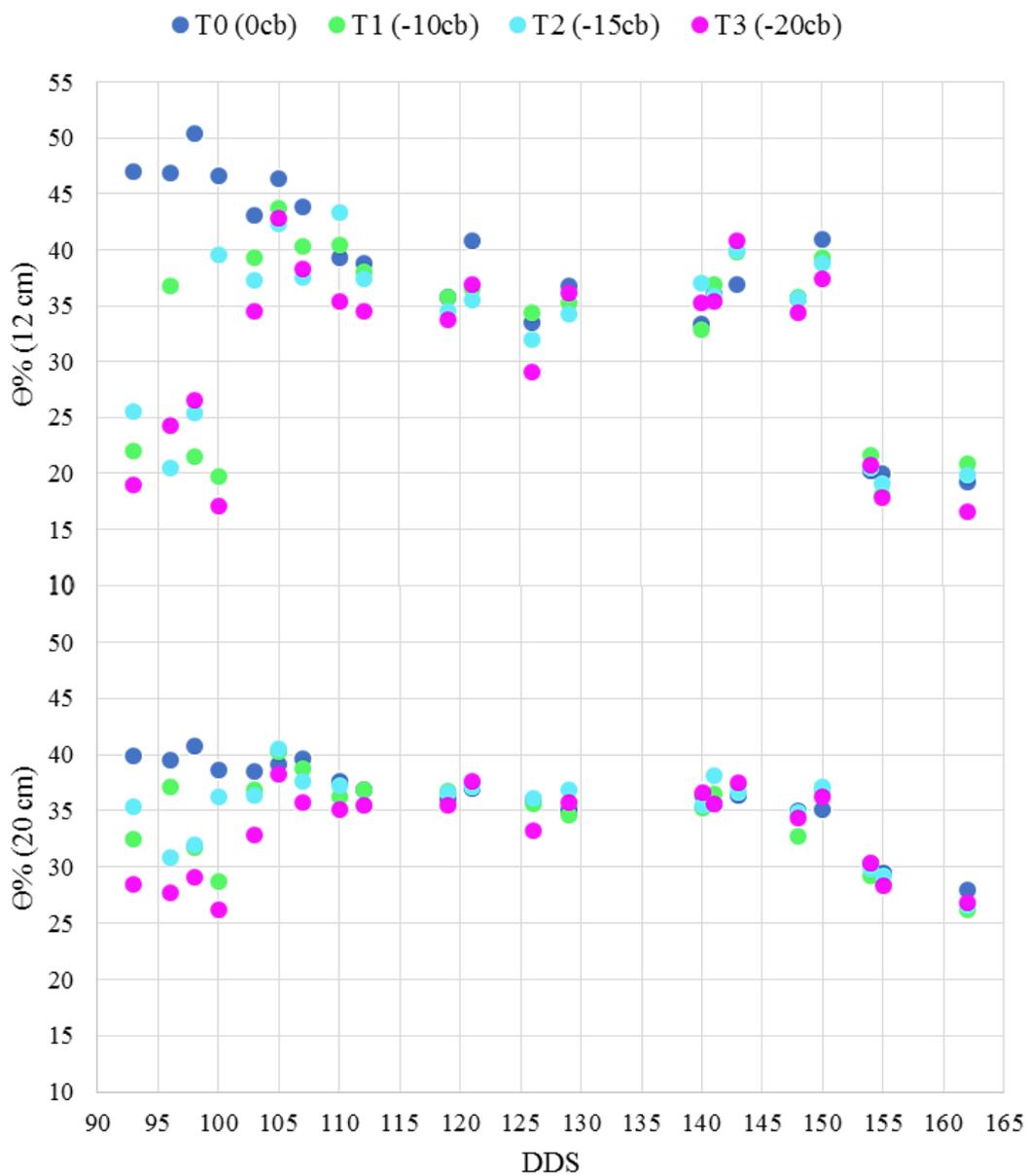
**ANEXO 18: VARIACIÓN CADA CINCO MINUTOS DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE, SEGÚN FASE FENOLÓGICA.
PERIODO DE ANÁLISIS: 31 DE DICIEMBRE DEL 2017 AL 28 DE ABRIL DEL 2018**



ANEXO 19. REGISTRO DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO CADA MEDIA HORA DE CUATRO SENSORES FDR UBICADOS EN LAS PARCELAS EVALUADAS. PERIODO DE ANÁLISIS: 30 DE DICIEMBRE DEL 2017 AL 2 DE MAYO DEL 2018.



ANEXO 20. REGISTRO DE HUMEDAD VOLUMÉTRICA DEL SUELO CADA DÍA DE TOMA DE IMÁGENES TÉRMICAS MEDIANTE EL USO DEL SENSOR DE HUMEDAD TDR. PERIODO DE ANÁLISIS: 16 DE FEBRERO DEL 2018 AL 26 DE ABRIL DEL 2018.



ANEXO 21: PANEL FOTOGRÁFICO METODOLOGÍA DE TOMA DE IMÁGENES TÉRMICAS

i. Acondicionamiento previo.



Ubicación de áreas requeridas de bloques de concreto y varillas de acero.



Construcción y nivelación de bloques de concreto en cada parcela.



Instalación de barras de acero con círculos de aluminio en cada parcela.



Acondicionamiento de rótula y nivel de tres burbujas para la cámara termográfica.

ii. Proceso de toma de imágenes térmicas.



Preparación en gabinete de la cámara termográfica (colocación de batería, lente, rótula y nivel de tres burbujas).

Colocación de escalera de aluminio en bloques de concreto.



Toma de imágenes apoyando la cámara en la escalera y asegurando la correcta nivelación con el nivel de tres burbujas.

ANEXO 22: PANEL FOTOGRÁFICO METODOLOGÍA DEL USO DE LOS SENSORES TÉRMICOS DE TERMOCUPLAS

i. Acondicionamiento previo.



Cámara de concreto y tapa metálica en el área de ubicación del data logger.



Identificación de sensores térmicos de termocuplas y protección con manguera.



Instalación de STT, panel solar y sensor de humedad y temperatura del aire al data logger.



Acondicionamiento final mediante la colocación de cintas de ajuste y mangueras enterradas.

ii. Proceso de toma de imágenes térmicas.



Colocación de sensores térmicos de termocuplas unidas a las hojas mediante el uso de la cinta de fibra de vidrio.



Continua verificación y renovación de cinta en la unión entre los sensores térmicos de termocuplas y las hojas.



Recolección de información almacenada en el data logger mediante el uso de una laptop y cable HDMI.

ANEXO 23: PANEL FOTOGRÁFICO DEL DESARROLLO DEL CULTIVO DE ARROZ IR 71706

Fase Vegetativa

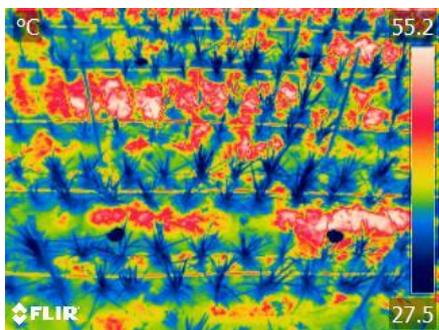
Fecha: 08/01/18 – 54 DDS



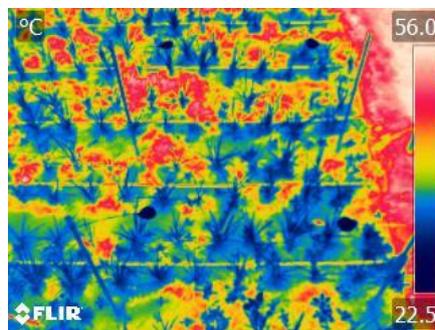
T0
Imagen
óptica



T1
Imagen
óptica



T0
Imagen
térmica



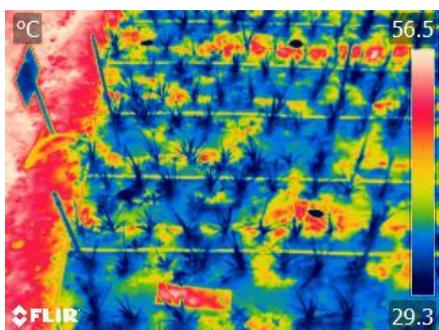
T1
Imagen
térmica



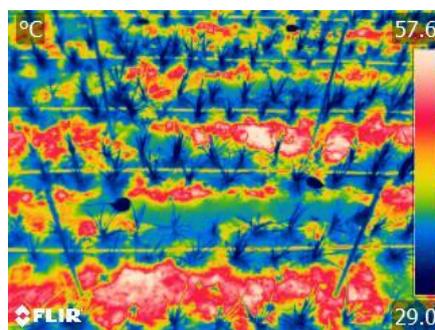
T2
Imagen
óptica



T3
Imagen
óptica



T2
Imagen
térmica



T3
Imagen
térmica

Fase Vegetativa

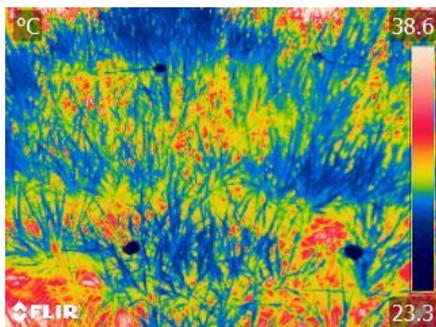
Fecha: 05/02/18 – 82 DDS



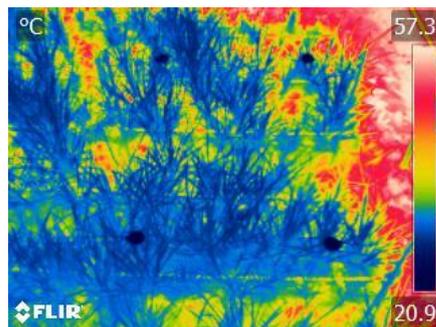
T0
Imagen
óptica



T1
Imagen
óptica



T0
Imagen
térmica



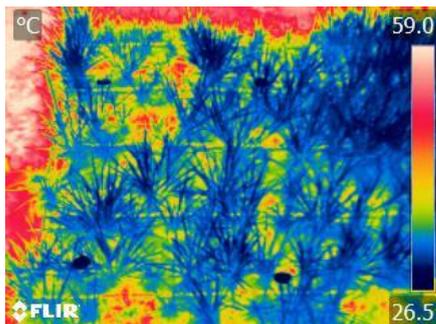
T1
Imagen
térmica



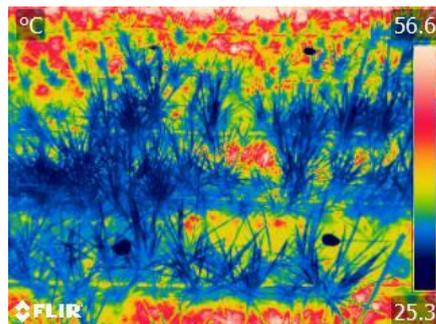
T2
Imagen
óptica



T3
Imagen
óptica



T2
Imagen
térmica



T3
Imagen
térmica

Fase Reproductiva

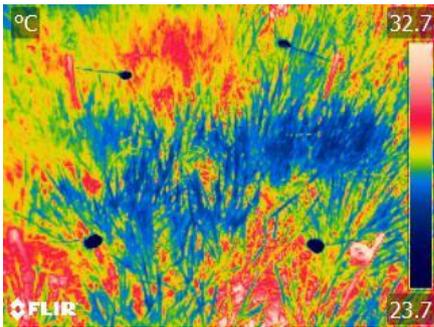
Fecha: 02/03/18 – 107 DDS



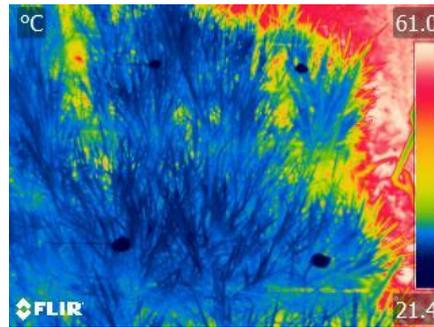
T0
Imagen
óptica



T1
Imagen
óptica



T0
Imagen
térmica



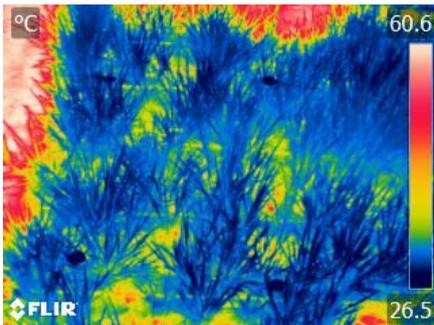
T1
Imagen
térmica



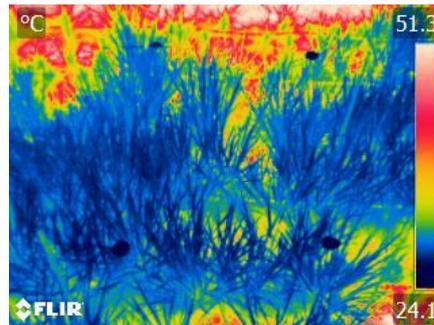
T2
Imagen
óptica



T3
Imagen
óptica



T2
Imagen
térmica



T3
Imagen
térmica

Fase Maduración

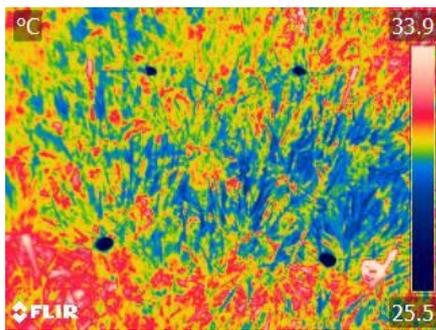
Fecha: 24/03/18 – 129 DDS



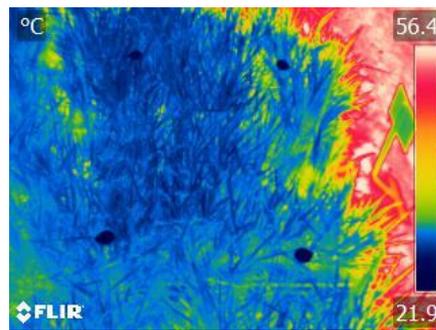
T0
Imagen
óptica



T1
Imagen
óptica



T0
Imagen
térmica



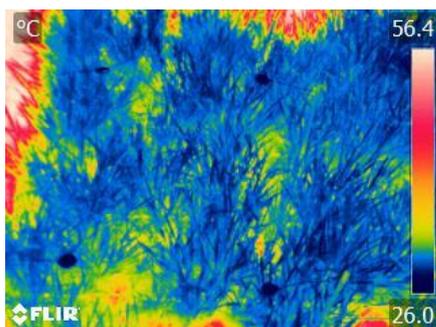
T1
Imagen
térmica



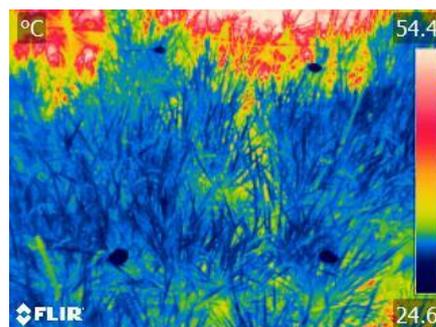
T2
Imagen
óptica



T3
Imagen
óptica



T2
Imagen
térmica



T3
Imagen
térmica

Fase Maduración

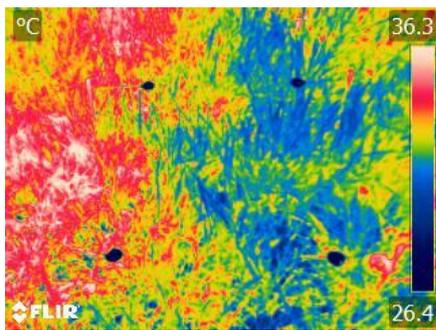
Fecha: 26/04/18 – 162 DDS



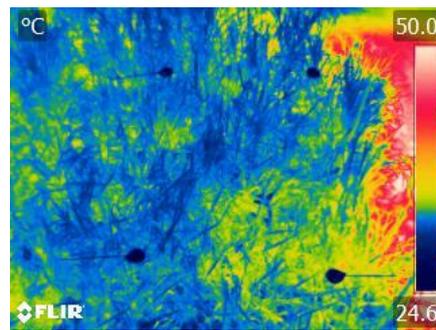
T0
Imagen
óptica



T1
Imagen
óptica



T0
Imagen
térmica



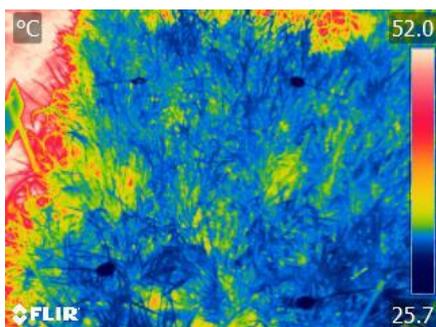
T1
Imagen
térmica



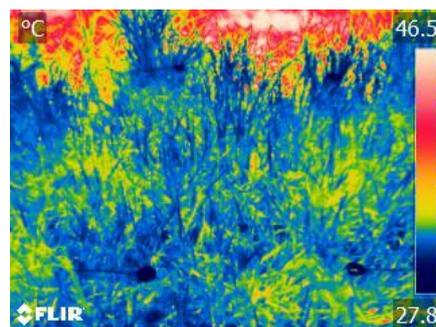
T2
Imagen
óptica



T3
Imagen
óptica



T2
Imagen
térmica



T3
Imagen
térmica

ANEXO 24: PANEL FOTOGRÁFICO DE MACETAS ANTES Y DESPUÉS DE LAS SECAS DEL CULTIVO DE ARROZ IR 71706

i. Fase Vegetativa



11/02/18
88 DDS



18/02/18
95 DDS

ii. Fase Reproductiva



17/03/18
122 DDS



22/03/18
127 DDS

iii. Fase Maduración



22/04/18
158 DDS



26/04/18
162 DDS

ANEXO 25: PANEL FOTOGRÁFICO DE IMÁGENES TÉRMICAS ANTES Y DESPUÉS DEL PROCESAMIENTO

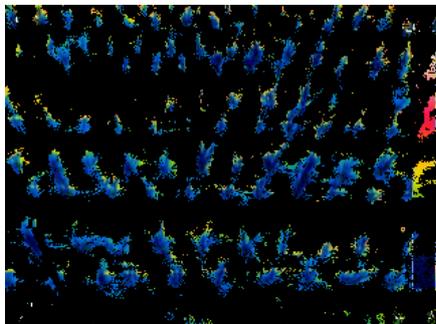
Fase Vegetativa

Fecha: 08/01/18 – 54 DDS

CWSI = 0.614

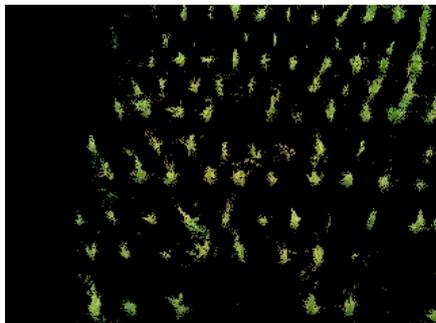


T0
Imagen
óptica

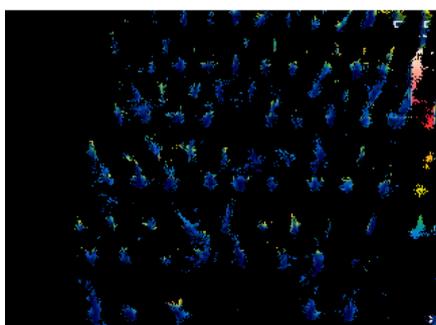


T0
Imagen
térmica

CWSI = 0.575

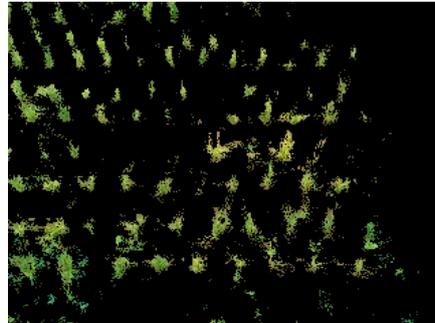


T2
Imagen
óptica

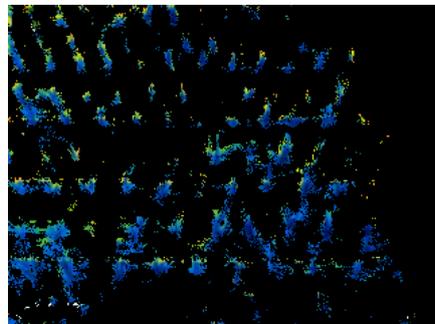


T2
Imagen
térmica

CWSI = 0.632

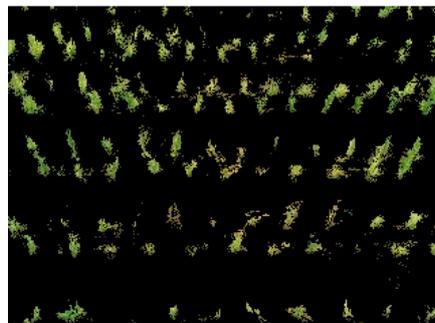


T1
Imagen
óptica

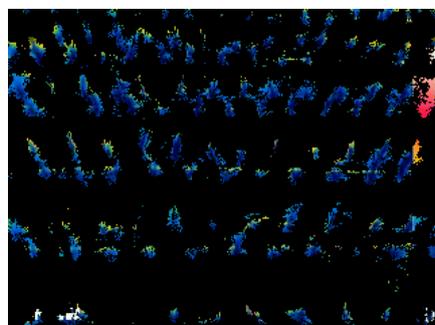


T1
Imagen
térmica

CWSI = 0.653



T3
Imagen
óptica



T3
Imagen
térmica

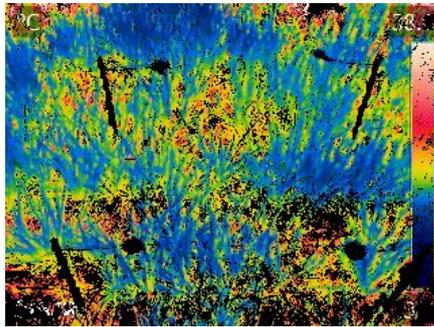
Fase Vegetativa

Fecha: 05/02/18 – 82 DDS

CWSI = 0.446



T0
Imagen
óptica

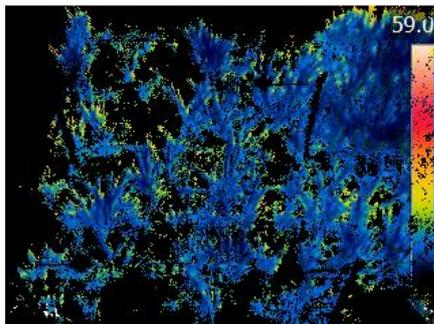


T0
Imagen
térmica

CWSI = 0.506



T2
Imagen
óptica

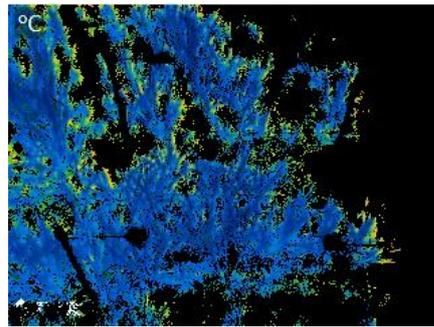


T2
Imagen
térmica

CWSI = 0.507



T1
Imagen
óptica

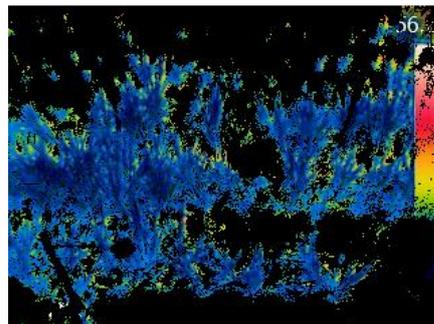


T1
Imagen
térmica

CWSI = 0.541



T3
Imagen
óptica



T3
Imagen
térmica

Fase Reproductiva

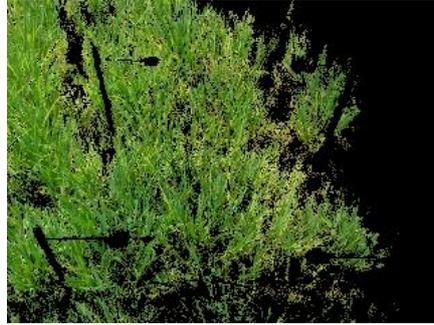
Fecha: 02/03/18 – 107 DDS

CWSI = 0.476

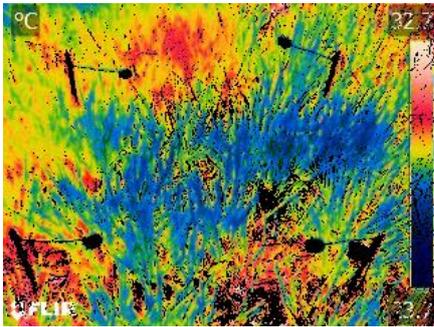


T0
Imagen
óptica

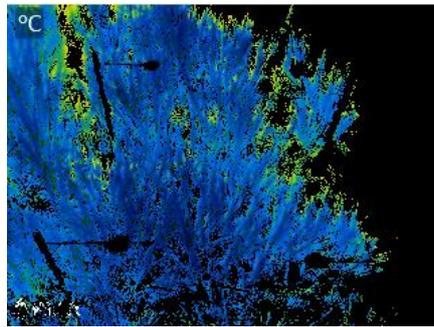
CWSI = 0.549



T1
Imagen
óptica



T0
Imagen
térmica



T1
Imagen
térmica

CWSI = 0.582

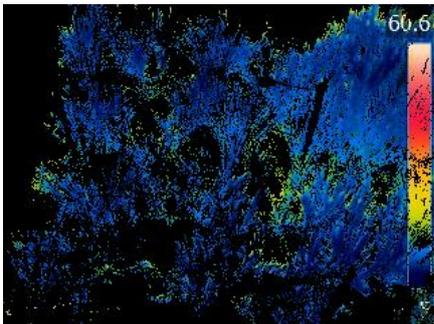


T2
Imagen
óptica

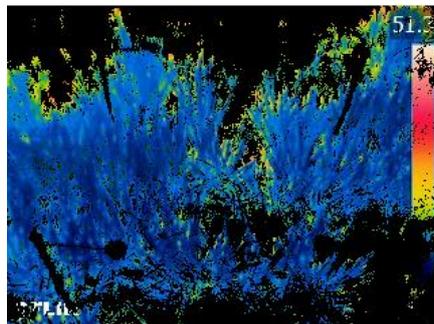
CWSI = 0.502



T3
Imagen
óptica



T2
Imagen
térmica



T3
Imagen
térmica

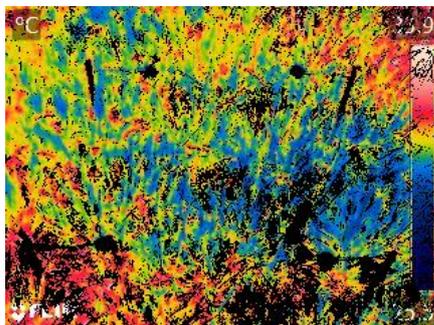
Fase Maduración

Fecha: 24/03/18 – 129 DDS

CWSI = 0.583



T0
Imagen
óptica

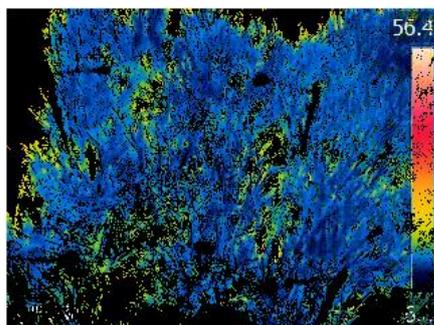


T0
Imagen
térmica

CWSI = 0.563



T2
Imagen
óptica

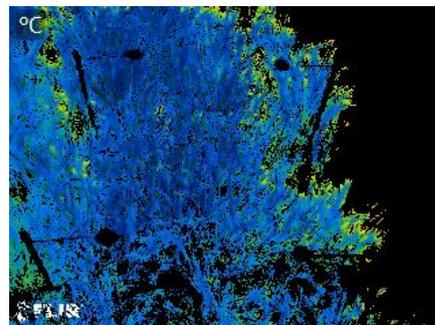


T2
Imagen
térmica

CWSI = 0.548



T1
Imagen
óptica

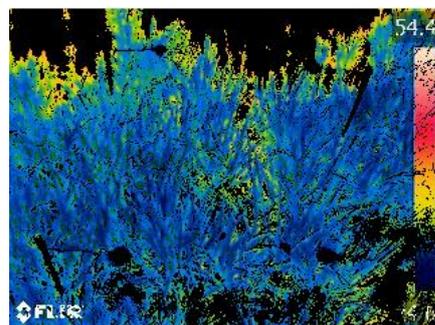


T1
Imagen
térmica

CWSI = 0.584



T3
Imagen
óptica



T3
Imagen
térmica

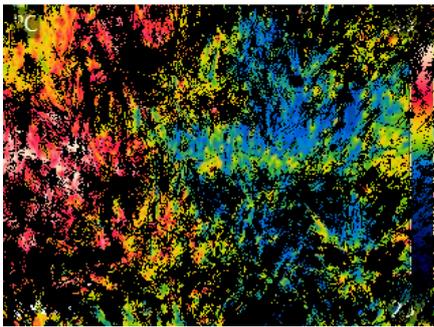
Fase Maduración

Fecha: 26/04/18 – 162 DDS

CWSI = 0.705

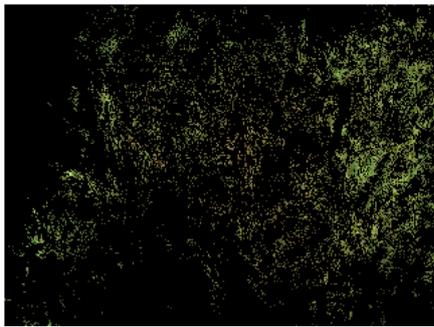


T0
Imagen
óptica

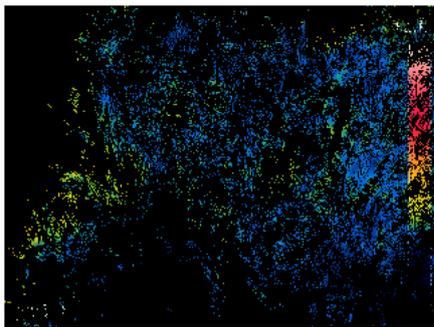


T0
Imagen
térmica

CWSI = 0.711



T2
Imagen
óptica

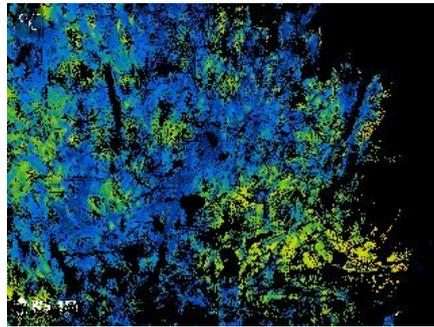


T2
Imagen
térmica

CWSI = 0.748



T1
Imagen
óptica

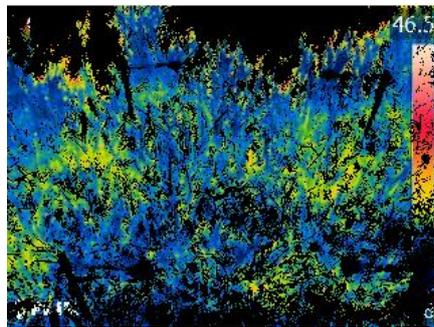


T1
Imagen
térmica

CWSI = 0.740



T3
Imagen
óptica



T3
Imagen
térmica