

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**“ESTRÉS HÍDRICO MEDIANTE TERMOGRAFÍA EN
ARROZALES, VARIEDAD CAPOTEÑA, INIA, BAJO RIEGO
CON ALTERNANCIA DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO
EN VISTA FLORIDA”**

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

JOSÉ LUIS HUANUQUEÑO MURILLO

LIMA – PERÚ

2024

JOSÉ LUIS HUANUQUEÑO MURILLO
"ESTRÉS HÍDRICO MEDIANTE TERMOGRAFÍA EN ARROZALES, VARIEDAD
CAPOTEÑA, INIA, BAJO RIEGO CON ALTERNANCIA DE HUMEDICIMIENTO Y SECADO
EN VISTA FLORIDA"

2% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

Bibliografía

Texto citado

Fuentes principales



2%	Fuentes de Internet
4%	Publicaciones
0%	Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

**“ESTRÉS HÍDRICO MEDIANTE TERMOGRAFÍA EN
ARROZALES, VARIEDAD CAPOTEÑA, INIA, BAJO RIEGO
CON ALTERNANCIA DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO
EN VISTA FLORIDA”**

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

Presentado por:

BACH. JOSÉ LUIS HUANUQUEÑO MURILLO

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Ph. D. DAVID RICARDO ASCENCIOS TEMPLO

Presidente

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ

Asesora

Dr. RAÚL ARNALDO ESPINOZA VILLAR

Miembro

Dra. ROCÍO DEL PILAR PASTOR JÁUREGUI

Miembro

LIMA – PERÚ

2024

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi familia, con un reconocimiento especial para mis queridos padres, Giovanna y Hugo, mis abuelos, Teodora y Murillo, y mi hermano Luber. Además, quiero expresar mi profunda gratitud a todas las personas que me brindaron su apoyo incondicional, tanto emocional como intelectual.

AGRADECIMIENTO

Al Programa Nacional de Investigación Científica y de Estudios Avanzados (PROCIENCIA) de PROCIENCIA-Perú, en el marco del proyecto “Implementación de herramientas tecnológicas en el desarrollo de un sistema de precisión con sensores remotos para optimizar el uso del agua y reducir la emisión de gases de efecto invernadero en los campos de arroz en beneficio de los agricultores de la región Lambayeque” (Contrato No. PE501078113-2022). Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi asesora, la Dra. Lia Ramos Fernández, por su inigualable profesionalismo, dedicación y paciencia durante el desarrollo de esta tesis. Su constante ánimo y generoso aporte de tiempo han sido fundamentales para la culminación exitosa de este trabajo.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Objetivos	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	4
2.1. Cultivo de arroz.....	4
2.1.1. Características agronómicas	4
2.1.2. Requerimientos	5
2.1.3. Adaptaciones y riego	5
2.2. Estrés hídrico foliar	6
2.3. Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)	7
2.4. Déficit de presión de vapor (DPV).....	9
2.5. Antecedentes	10
III. METODOLOGÍA	12
3.1. Zona de estudio	12
3.2. Diseño experimental.....	13
3.2.1. Manejo del cultivo	17
3.3. Materiales y equipos.....	20
3.4. Procedimientos	21
3.4.1. Temperaturas umbrales con estrés y sin estrés vs VPD	21
3.4.2. Determinación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI).....	27
3.4.3. Conductancia estomática (Gs) y relación con el CWSI.....	27
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	29
4.1. Temperaturas umbrales con estrés y sin estrés vs el déficit de presión de vapor..	29
4.1.1. Calibración de las imágenes térmicas.....	29
4.2. Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)	35
4.3. Conductancia estomática (GS) y relación con el CWSI.....	39
V. CONCLUSIONES	44
VI. RECOMENDACIONES.....	45
VII. BIBLIOGRAFÍA	46
VIII. ANEXOS	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tratamientos de riego y número de repeticiones.....	15
Tabla 2: Volumen de agua en diferentes tratamientos de riego en cultivos de arroz.....	16
Tabla 3: Fenología del cultivo en días después de la siembra (DDS).....	17
Tabla 4: Materiales, equipos y sus aplicaciones	20
Tabla 5: Datos meteorológicos de la estación portátil Atmos 41	29
Tabla 6: Comparación de temperatura de la hoja (Th) por tratamientos.....	37
Tabla 7: Escala de referencia de conductancia estomática (Gs) a partir del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Relación entre $(T_c - T_a)$ y DPV	9
Figura 2: Ubicación geográfica y zona de estudio en la región Lambayeque, Perú.....	12
Figura 3: Diagrama de flujo de la metodología seguida en este estudio	13
Figura 4: Plano de la zona experimental, INIA-Vista Florida.....	14
Figura 5: Colocación de los piezómetros	15
Figura 6: Trasplante del cultivo de arroz a los 35 días después de la siembra (DDS)	17
Figura 7: a) Vuelos realizados en la zona experimental; b) fenología según los días después de la siembra (DDS).....	19
Figura 8: Cámara termográfica digital multifuncional Zenmuse H20T	21
Figura 9: Dron Matrice 300 RTK	22
Figura 10: (a) Ortomosaico RGB, y (b) ortomosaico térmico.....	23
Figura 11: Esquema del procedimiento desarrollado en gabinete para la obtención del recorte de la cobertura vegetal.....	24
Figura 12: Instalación de la estación meteorológica automática portátil ATMOS 41	25
Figura 13: Calibración indirecta de imágenes térmicas: comparación con datos de radiómetro en diferentes coberturas	26
Figura 14: Ecuación de ajuste para la relación entre datos del radiómetro y temperaturas obtenidas con la cámara térmica radiométrica Zenmuse H20T bajo condiciones meteorológicas específicas	31
Figura 15: Comparación de los coeficientes de determinación (R^2) entre datos del radiómetro e imágenes térmicas para diferentes combinaciones de coberturas en campos de arroz	32
Figura 16: Relación entre el déficit de presión de vapor y la diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire para la determinación de los límites de estrés hídrico	34

Figura 17: Variación de las temperaturas medias de los cultivos durante el ciclo fenológico y las fechas de vuelo.....	36
Figura 18: Variaciones en el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en diferentes regímenes de riego.....	38
Figura 19: Correlación entre temperatura del cultivo y conductancia estomática medidas con un porómetro.....	39
Figura 20: Correlación entre el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) obtenido a partir de la cámara térmica radiométrica Zenmuse H20T y la conductancia estomática (Gs) medida con el porómetro	40
Figura 21: Escala de referencia de conductancia estomática (Gs) para definir niveles de transpiración	41
Figura 22: Plano de CWSI.....	42
Figura 23: Plano de conductancia estomática (Gs)	43

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: CALIBRACIÓN DEL RADIÓMETRO APOGEE MI-210	52
---	----

NOMENCLATURA

Acrónimos

AER	Área Experimental de Riego
ANA	Autoridad Nacional del Agua
AWD	Alternating Wetting and Drying (Riego por alternancia de humedecimiento y secado)
CC	Capacidad de campo
CWSI	Crop water stress index (Índice de estrés hídrico del cultivo)
DDS	Días después de la siembra
DPV	Déficit de presión de vapor
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación
IC	Riego por inundación continua
IRRI	Instituto Internacional de Investigación en Arroz
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
PMP	Punto de marchitez permanente
R	Coefficiente de pearson
RGB	Rojo, verde y azul
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
TIR	Imágenes térmicas infrarroja
UAV	Unmanned aerial vehicle (Vehículo aéreo no tripulado)
UNALM	Universidad Nacional Agraria La Molina

RESUMEN

Ante la crisis del cambio climático, el aumento de la temperatura del aire afecta negativamente la productividad de los cultivos de arroz debido al estrés hídrico. El objetivo de este estudio fue determinar el índice de estrés hídrico del cultivo de arroz (CWSI) y la conductancia estomática (Gs) bajo diferentes regímenes de riego: riego por inundación continua (IC) y riego con alternancia de humedecimiento y secado (AWD) a niveles de agua de 5 cm, 10 cm y 20 cm por debajo de la superficie del suelo (AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀). El estudio se llevó a cabo en una zona experimental del INIA-Vista Florida, en la región Lambayeque, utilizando imágenes térmicas captadas con sensores térmicos. Los resultados indicaron que el riego AWD generó mayor estrés hídrico, con valores de CWSI entre 0,4 y 1,0. A pesar de ello, los rendimientos fueron similares entre IC y AWD₂₀. Además, se estableció una fuerte correlación de Pearson ($R = 0,91$) entre el CWSI y Gs, proporcionando una escala de referencia basada en los valores de Gs para evaluar los niveles de estrés hídrico.

Palabras clave: arroz; conductancia estomática; línea de base sin estrés hídrico; sensores térmicos; temperatura del dosel.

ABSTRACT

In the face of the climate change crisis, increasing air temperatures negatively affect rice crop productivity due to water stress. The objective of this study was to determine the Crop Water Stress Index (CWSI) and stomatal conductance (Gs) in rice under different irrigation regimes: continuous flood irrigation (CF) and alternating wetting and drying irrigation (AWD) at water levels of 5 cm, 10 cm, and 20 cm below the soil surface (AWD₅, AWD₁₀, and AWD₂₀). The study was conducted in an experimental area of INIA-Vista Florida in the Lambayeque region, using thermal images captured with thermal sensors. The results indicated that AWD irrigation generated higher water stress, with CWSI values between 0.4 and 1.0. Despite this, yields were similar between CF and AWD₂₀. Additionally, a strong Pearson correlation ($R = 0.91$) was established between CWSI and Gs, providing a reference scale based on Gs values to evaluate water stress levels.

Keywords: canopy temperature; non-water-stressed baseline; rice; stomatal conductance; thermal sensors.

I. INTRODUCCIÓN

El arroz, uno de los principales cultivos alimentarios del mundo, abarca 164 millones de hectáreas de tierra en más de 100 países, y es una fuente fundamental de calorías para aproximadamente 3500 millones de personas en Asia, América Latina y África (Shafi *et al.*, 2023). Durante la temporada 2022/23, la producción global de arroz alcanzó una cifra impresionante de 519,8 millones de toneladas (FAO, 2023). Sin embargo, su cultivo representa una carga significativa para los recursos hídricos, utilizando entre el 34% y el 43% del agua de riego mundial y siendo responsable de extraer del 24% al 30% del agua dulce total del planeta (Mallareddy *et al.*, 2023).

En Asia, el regadío consume más del 80% de los recursos de agua dulce disponibles, y más de la mitad de este consumo está dedicado al riego del arroz. La cantidad de agua aplicada para producir 1 kg de arroz oscila entre 800 y 5000 litros, con un promedio de 2500 litros (Surendran *et al.*, 2021). La agricultura del arroz se enfrenta a un desafío ambiental urgente debido a su alta demanda de agua y al uso ineficiente de los métodos de riego tradicionales.

Para abordar este problema acuciante, se necesita implementar tecnologías agrícolas innovadoras que optimicen las prácticas de riego y reduzcan el consumo de agua. Esto implica alejarse del método convencional de inundación continua (IC) y explorar alternativas más eficientes. Se han propuesto varias técnicas, entre ellas, el método de riego por alternancia de humedecimiento y secado (AWD), que destaca por su aplicación intermitente y controlada de inundaciones durante el ciclo de cultivo del arroz. Este enfoque, junto con otras prácticas como el riego por goteo y los sistemas automatizados de riego por gravedad superficial, puede reducir el uso general de agua mientras garantiza el suministro adecuado de agua durante las etapas críticas del crecimiento del arroz (Arouna *et al.*, 2023; Price *et al.*, 2013).

La aplicación de tecnología innovadora, como los vehículos aéreos no tripulados (UAV), ofrece nuevas posibilidades para monitorear y gestionar los cultivos. Los UAV pueden proporcionar información valiosa sobre el estado hídrico de los cultivos, utilizando índices como el índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI), que cuantifica el estrés hídrico mediante la medición de la temperatura del dosel de las plantas. Este enfoque no invasivo y eficiente puede ayudar a los agricultores a tomar decisiones informadas sobre el riego, lo que puede mejorar tanto la calidad como el rendimiento de los cultivos (Huang *et al.*, 2021; Wen *et al.*, 2023).

Además, la conductancia estomática, un indicador clave de la respuesta de las plantas al estrés hídrico, puede ser medida y relacionada con el CWSI para comprender mejor la relación entre el estado hídrico de la planta y su funcionamiento fisiológico (Qi *et al.*, 2023). Estas investigaciones son cruciales para abordar la creciente escasez de agua en las regiones productoras de arroz, como Lambayeque en Perú, donde la producción de arroz es esencial para la seguridad alimentaria, pero se enfrenta a desafíos cada vez mayores debido al déficit de agua y a la salinización del suelo (Heros *et al.*, 2020; MIDAGRI, 2023; Villar *et al.*, 2021).

En resumen, este estudio se enfoca en evaluar el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) y la conductancia estomática (Gs) en cultivos de arroz bajo diferentes regímenes de riego en Lambayeque, Perú. Al estimar estos parámetros y relacionarlos con prácticas de riego específicas, se espera proporcionar información valiosa para mejorar la eficiencia del uso del agua y garantizar la sostenibilidad a largo plazo del cultivo de arroz en la región.

1.1. Objetivos

El objetivo general de este estudio fue evaluar la relación entre la conductancia estomática (Gs) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), estimado a partir de termografía en cultivos de arroz, bajo diferentes regímenes de riego, específicamente riego con alternancia de humedecimiento y secado (AWD) e inundación continua (IC), en áreas experimentales de la región de Lambayeque.

Para lograr este objetivo general, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Estimar las temperaturas umbrales con y sin estrés hídrico en relación con la diferencia de vapor de aire.
- Calcular el CWSI en arrozales manejados con riego de inundación continua y con alternancia de humedecimiento y secado.
- Medir la conductancia estomática y relacionarla con el CWSI.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Cultivo de arroz

El arroz es uno de los cereales más relevantes en la alimentación global, y en Perú, constituye uno de los pilares fundamentales de la dieta nacional. Este cultivo desempeña un papel crucial en la seguridad alimentaria del país, con un consumo promedio de 60 kg por persona al año. Según el Ministerio de Agricultura y Riego (MINAGRI), el arroz cáscara es el producto de mayor contribución al valor bruto de producción (VBP) en la actividad agrícola, representando aproximadamente el 13,1% del VBP agrícola en 2018. Esta participación se ha mantenido constante durante el período comprendido entre 2007 y 2018 (Caldas *et al.*, 2020).

Para este estudio, se evaluará la variedad INIA 515 - CAPOTEÑA, la cual fue desarrollada por científicos del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) a partir del cruce “IR 1529 – ECIA” / “Fedearroz 2000”. Este cruce se llevó a cabo en la Estación Experimental Agraria Vista Florida, ubicada en Lambayeque, en 2004 (INIA, 2021).

2.1.1. Características agronómicas

INIA 515 - CAPOTEÑA es un cultivo de ciclo intermedio, con un periodo de aproximadamente 150 días desde la siembra hasta la maduración. Este cultivar tiene un potencial de rendimiento superior al de la variedad IR - 43, llegando a producir en parcelas experimentales en Chepén (La Libertad) hasta 14 t ha⁻¹ de arroz cáscara y 13 t ha⁻¹ en el sector Fala (Lambayeque). En parcelas comerciales, se han registrado rendimientos superiores a las 12 t ha⁻¹ de arroz cáscara.

Además, INIA 515 - CAPOTEÑA presenta una menor susceptibilidad al ataque de la mosca minadora y sogata comparado con las variedades IR - 43 e INIA 508 - Tinajones. También muestra una incidencia reducida del virus de la hoja blanca y de enfermedades fungosas en

comparación con las variedades mencionadas. Esta variedad posee un gran vigor inicial, permitiendo un trasplante más temprano y optimizando el manejo del cultivo.

INIA 515 - CAPOTEÑA se caracteriza por su alto rendimiento, resistencia a plagas y enfermedades, excelente calidad de grano y buen desempeño en el proceso de molienda. Esta variedad está disponible para los agricultores de la costa peruana, ofreciendo una opción prometedora para mejorar la productividad y la calidad en el cultivo de arroz (INIA, 2021).

2.1.2. Requerimientos

El manejo de INIA 515 - CAPOTEÑA debe realizarse de acuerdo con los estándares establecidos para las variedades cultivadas en la costa norte, con un comportamiento agronómico similar al de INIA 513 - La Puntilla. Una de las mejores prácticas es incorporar el 40% del nitrógeno antes del trasplante, lo cual incrementa la asimilación de nitrógeno y reduce las pérdidas por volatilización.

Es importante evitar el uso excesivo de nitrógeno para prevenir la mayor incidencia de enfermedades como el falso carbón y el posible acame del cultivo. Para minimizar la incidencia de enfermedades, se recomienda una buena nivelación del terreno, manejar láminas bajas de agua y aplicar dosis balanceadas de fertilizantes (INIA, 2021).

2.1.3. Adaptaciones y riego

El arroz cultivado (*Oryza sativa* L.) es una gramínea anual semiacuática de la familia Poaceae. Este género incluye dos especies cultivadas, *Oryza sativa* y *Oryza glaberrima*, además de unas 20 especies silvestres. El arroz es originario de condiciones semiacuáticas y está bien adaptado a crecer en suelos inundados, lo cual es facilitado por la presencia de aerénquima interorgánico, que permite el intercambio de gases respiratorios en partes sumergidas de la planta (Mohapatra y Sahu, 2022).

El arroz tradicionalmente se cultiva bajo condiciones de inundación continua, manteniendo una capa constante de agua en el campo. Este método reduce la competencia con malezas y la presión de plagas y enfermedades, además de facilitar la disponibilidad de nutrientes y la estabilidad de la temperatura del suelo. Sin embargo, el método de riego con alternancia de

humedecimiento y secado (AWD) ha demostrado ser una alternativa efectiva. Este enfoque permite drenar el agua del campo y volver a inundarlo cuando sea necesario. Implementar el AWD puede reducir significativamente el uso de agua en comparación con el riego por inundación continua, optimizar la absorción de agua y nutrientes, mantener o mejorar los rendimientos con una gestión adecuada, y reducir la emisión de gases de efecto invernadero como el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O) (Echegaray *et al.*, 2024).

2.2. Estrés hídrico foliar

El estrés hídrico foliar afecta todos los aspectos del crecimiento de las plantas. El impacto más evidente es la reducción del tamaño de la planta, el área foliar y el rendimiento del cultivo. Un déficit hídrico puede retrasar, detener o destruir el crecimiento y desarrollo normales de las plantas, acelerar el envejecimiento y provocar la caída o muerte de tejidos vivos, órganos e individuos. Esta tendencia se intensifica con el aumento o la prolongación del déficit hídrico (Simbeye *et al.*, 2023).

En condiciones de secano, el estrés hídrico es particularmente crítico para el arroz, afectando su crecimiento y desarrollo en diversas etapas del cultivo y disminuyendo el rendimiento. El impacto varía según el momento en que ocurre el estrés: al inicio, a mitad de temporada o en las etapas finales del desarrollo. En las fases iniciales, disminuye el número y tamaño de las hojas, la capacidad de ahijamiento, la altura del tallo y el desarrollo de la panícula, disminuyendo el rendimiento. Sin embargo, la disponibilidad de agua tras episodios de estrés temprano puede permitir la recuperación de las plantas y minimizar las pérdidas. En la fase reproductiva, el estrés hídrico afecta significativamente el rendimiento del arroz, y su severidad y momento de ocurrencia influyen en características específicas, resultando en una menor productividad del grano. Los cultivares de arroz responden de manera diversa al estrés hídrico según el momento y la intensidad de este, y la recuperación temprana del estrés puede atenuar las pérdidas al mejorar atributos como las hojas, el ahijamiento, el desarrollo del tallo y la formación de panículas (Hussain *et al.*, 2022). Sin embargo, los intervalos de estrés hídrico terminal (TWS) tienen un impacto mucho mayor en el rendimiento de la planta, disminuyendo significativamente las posibilidades de recuperación. El arroz es extremadamente sensible al TWS, lo que conduce a un aumento de las pérdidas de rendimiento debido a la imposibilidad de recuperarse adecuadamente en estas etapas críticas (Hussain *et al.*, 2021).

2.3. Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

Desde la década de 1970, los índices basados en la temperatura de la hoja o del dosel han sido ampliamente utilizados para diagnosticar el déficit de agua en los cultivos. Con la llegada de los termómetros de mano, los primeros investigadores escaneaban varias plantas con termómetros infrarrojos portátiles en el campo para detectar el estado hídrico del cultivo. Recientemente, las cámaras térmicas portátiles se han convertido en una herramienta de imagen no invasiva, no destructiva y versátil para el seguimiento de la temperatura del dosel del cultivo, siendo también utilizadas para el diagnóstico del déficit hídrico (Xu *et al.*, 2016). La temperatura de la hoja se ha reconocido como un indicador clave del estado hídrico de los cultivos (Gates, 1968; Jackson *et al.*, 1977). Se ha desarrollado un índice normalizado, el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI, por sus siglas en inglés), que puede compensar los efectos de los parámetros ambientales que influyen en la relación entre el estrés y la temperatura de la planta. Este índice relaciona la diferencia de temperaturas entre el dosel vegetativo y el aire (T_c y T_a , respectivamente) con la diferencia $T_c - T_a$ para una línea base sin estrés (*Non-Water Stress Baseline*, NWSB) o límite inferior (LI), y $T_c - T_a$ para un límite superior (LS), ambos en función del déficit de presión de vapor atmosférico (DPV) (Idso, 1982).

Cuando una planta transpira sin experimentar estrés hídrico, la temperatura de la hoja suele ser entre 1 y 4 °C más baja que la temperatura ambiente, lo que se refleja en un CWSI de 0. Sin embargo, cuando la transpiración disminuye, la temperatura de la hoja aumenta considerablemente, pudiendo ser de 6 a 10 °C más alta que la temperatura del aire. Este incremento en la temperatura foliar indica un déficit hídrico significativo, ya que la transpiración de las hojas se reduce notablemente. En situaciones extremas, como cuando la planta está muerta o ha dejado de transpirar durante un largo período, el CWSI alcanza su valor máximo de 1 (Durán, 2018).

El índice de estrés hídrico foliar, según Idso *et al.* (1981), se define como:

$$\text{CWSI} = \frac{(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{LI}}{(T_c - T_a)_{LS} - (T_c - T_a)_{LI}} \quad (1)$$

Donde, T_c es la temperatura del cultivo; T_a es la temperatura del aire. El subíndice m de-nota la diferencia medida entre las dos temperaturas, el subíndice LI (límite inferior)

denota la diferencia entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración no está restringida por disponibilidad del agua, de modo que la temperatura es el valor más bajo para las condiciones del clima, y el subíndice LS (límite superior) denota la diferencia hipotética entre las dos temperaturas cuando la evapotranspiración es cero, como resultado de falta de disponibilidad de agua en el sistema suelo planta atmósfera.

Idso *et al.* (1981) demostraron que el LI del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) es una función lineal del déficit de presión de vapor (DPV) para diversos cultivos y localidades. Este concepto fue aplicado al cultivo de arroz por Godson *et al.* (2022), como se describe en la Ecuación 2.

$$(T_c - T_a)_{LI} = a \times DPV + b \quad (2)$$

Donde a (pendiente) y b (intercepto) son parámetros de ajuste en la regresión lineal simple. Mientras tanto, LS representa la máxima variación entre la temperatura foliar del cultivo estresado y la temperatura del aire, siendo esta variación máxima (K) una función constante que no depende del DPV (Khorsandi *et al.*, 2018; Mangus *et al.*, 2016) (Ecuación 3).

$$(T_c - T_a)_{LS} = K \quad (3)$$

López *et al.* (2009) mencionan que el CWSI puede representarse gráficamente determinando la distancia relativa entre la línea base inferior, que representa las condiciones sin estrés, y la línea base superior, que indica la ausencia de transpiración, como se muestra en la Figura 1. Por lo tanto, la Ecuación 4, representada gráficamente, es equivalente a la siguiente relación:

$$CWSI = \frac{AC}{BC} \quad (4)$$

Donde el punto A representa la diferencia entre la temperatura de la hoja y la temperatura del aire ($T_c - T_a$), en el momento de la medición. El punto B corresponde a la diferencia de temperatura máxima entre la hoja y el aire (límite superior), mientras que el punto C indica la diferencia mínima (límite inferior) bajo las condiciones de DPV en las cuales se realizó la medición de las temperaturas de la hoja y del aire (ver Figura 1).

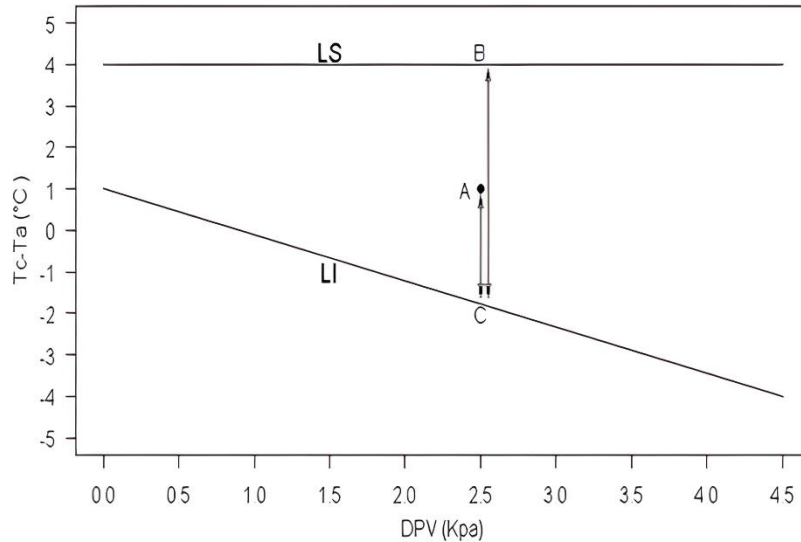


Figura 1: Relación entre (Tc - Ta) y DPV

FUENTE: López *et al.* (2009)

2.4. Déficit de presión de vapor (DPV)

El déficit de presión de vapor (DPV) mide la cantidad de humedad en el aire en relación con la cantidad máxima que el aire puede contener a una temperatura determinada, y tiene un impacto significativo en la transpiración de las hojas.

López *et al.* (2009) mencionan que un DPV igual a cero indica que el aire sostiene el máximo vapor de agua posible, lo que corresponde a una humedad relativa del 100%. La línea base inferior del CWSI cambia en función de la presión de vapor del agua debido al DPV. Estos valores se utilizan para calcular el CWSI, que varía entre 0 y 1, dependiendo de si las plantas están en condiciones óptimas de riego o bajo estrés hídrico extremo.

El DPV se calcula utilizando la temperatura del aire (Ta) en grados Celsius (°C) y la humedad relativa (HR) en porcentaje (%), resultando en un valor en kilopascales (kPa). Se puede calcular de la siguiente manera (Monteith y Unsworth, 2013) (Ecuación 5).

$$DPV = \left(1 - \frac{HR}{100}\right) \times \left(0,6108 \times 10^{\left(\frac{17,27 \times Ta}{237,3 + Ta}\right)}\right) \quad (5)$$

Donde, DPV representa la diferencia entre la presión de vapor saturado y la presión de vapor real en el aire. La variable Ta, que es la temperatura del aire, afecta la capacidad del aire para

retener humedad y, por lo tanto, la presión de vapor saturado. La HR indica el porcentaje de vapor de agua presente en el aire en comparación con el máximo que el aire puede contener a esa temperatura. El término $\left(1 - \frac{HR}{100}\right)$ convierte la HR a una fracción decimal y calcula el déficit de saturación. La expresión $\left(0,6108 \times 10^{\left(\frac{17,27 \times Ta}{237,3 + Ta}\right)}\right)$ estima la presión de vapor saturado a la temperatura específica del aire (T_a) utilizando la fórmula de Magnus, con la constante 0,6108 representando la presión de vapor saturado a 0 °C.

2.5. Antecedentes

En los últimos años, se ha observado un crecimiento significativo en la investigación sobre el cálculo del estrés hídrico en el cultivo de arroz, impulsado por el uso de tecnologías innovadoras como la termografía, los sistemas aéreos pilotados remotamente (RAPs) y la inteligencia artificial (IA). Este aumento en la investigación se debe, en gran medida, a la escasez de agua que afecta a muchas regiones en todo el mundo.

En China, por ejemplo, se llevaron a cabo investigaciones en 2013 que emplearon modelos teóricos del índice de estrés hídrico del arroz, basándose en tecnologías automatizadas de imágenes térmicas infrarrojas. Estos estudios evaluaron diferentes condiciones de riego por inundación y utilizaron el modelo teórico CWSI para diagnosticar el estrés hídrico del cultivo, obteniendo resultados que variaron entre 0,2 y 0,8 (Gao *et al.*, 2013). En años posteriores, se continuaron los estudios utilizando imágenes térmicas infrarrojas para diagnosticar el estrés hídrico en diversas condiciones de riego, como el riego por aspersión y el riego controlado no inundado, con valores de CWSI que oscilaron entre 0,3 y 0,91 (Hoffmann *et al.*, 2016; Luan *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2016).

En Indonesia, se llevó a cabo un análisis del mecanismo de mitigación de la sequía en arrozales utilizando los índices CWSI y TVDI, obteniendo valores entre 0,2 y 0,8 de CWSI (Fitriyah *et al.*, 2019). Además, en Perú, se realizaron estudios para evaluar el índice de estrés hídrico en arroz bajo condiciones de riego por goteo, con valores de CWSI que variaron entre 0,1 y 0,7 (Durán *et al.*, 2021; Villar *et al.*, 2021).

En Japón, Filipinas y Estados Unidos, se llevaron a cabo estudios utilizando cámaras infrarrojas y otros métodos para calcular el índice de estrés hídrico en arroz, obteniendo valores de CWSI que se situaron entre 0,11 y 1,6 (Godson *et al.*, 2022; Katimbo *et al.*, 2022; Visitacion *et al.*, 2022).

Actualmente, se están investigando métodos más precisos para calcular el índice de estrés hídrico del cultivo, incluyendo el uso de inteligencia artificial para mejorar la precisión de los datos obtenidos (Albrizio *et al.*, 2023; Katimbo *et al.*, 2022). Estos avances prometen proporcionar una comprensión más profunda y precisa del estrés hídrico en los cultivos de arroz, lo que podría conducir a una gestión más eficaz de los recursos hídricos en la agricultura.

III. METODOLOGÍA

3.1. Zona de estudio

La investigación se desarrolló en la región Lambayeque, ubicada en la costa norte del Perú. Se estableció un área experimental donde se implementaron dos métodos de riego: inundación continua (IC) y por alternancia de humedecimiento y secado (AWD). Estas pruebas se llevaron a cabo en las parcelas de arroz de la Estación Experimental Agropecuaria “Vista Florida”, perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), localizada en el distrito de Picsi, provincia de Chiclayo (ver Figura 2).

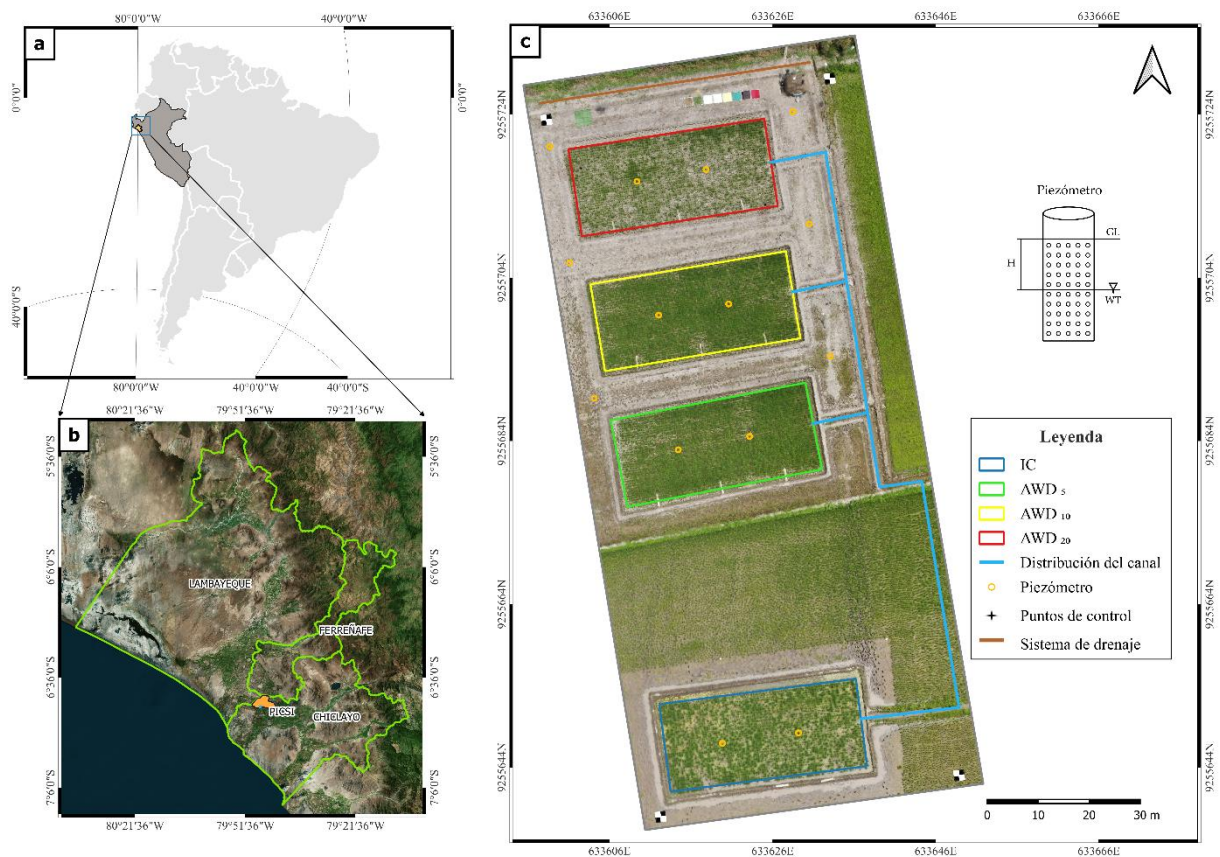


Figura 2: Ubicación geográfica y zona de estudio en la región Lambayeque, Perú

La zona específica de estudio se encuentra en la coordenada de longitud 06°43'56,55"S y latitud 79°47'27,55" W. Esta área presenta una altitud de 35 msnm.

La extensión total de las parcelas experimentales fue de 0,11 hectáreas (ha), distribuidas en un total de cuatro parcelas. El arroz utilizado en este estudio fue de la variedad INIA 515 - Capoteña, seleccionada específicamente por sus características y adaptabilidad a las condiciones locales.

La Figura 3 muestra la metodología de investigación empleada en este estudio, que se llevó a cabo durante la temporada de cultivo de arroz de diciembre a junio.

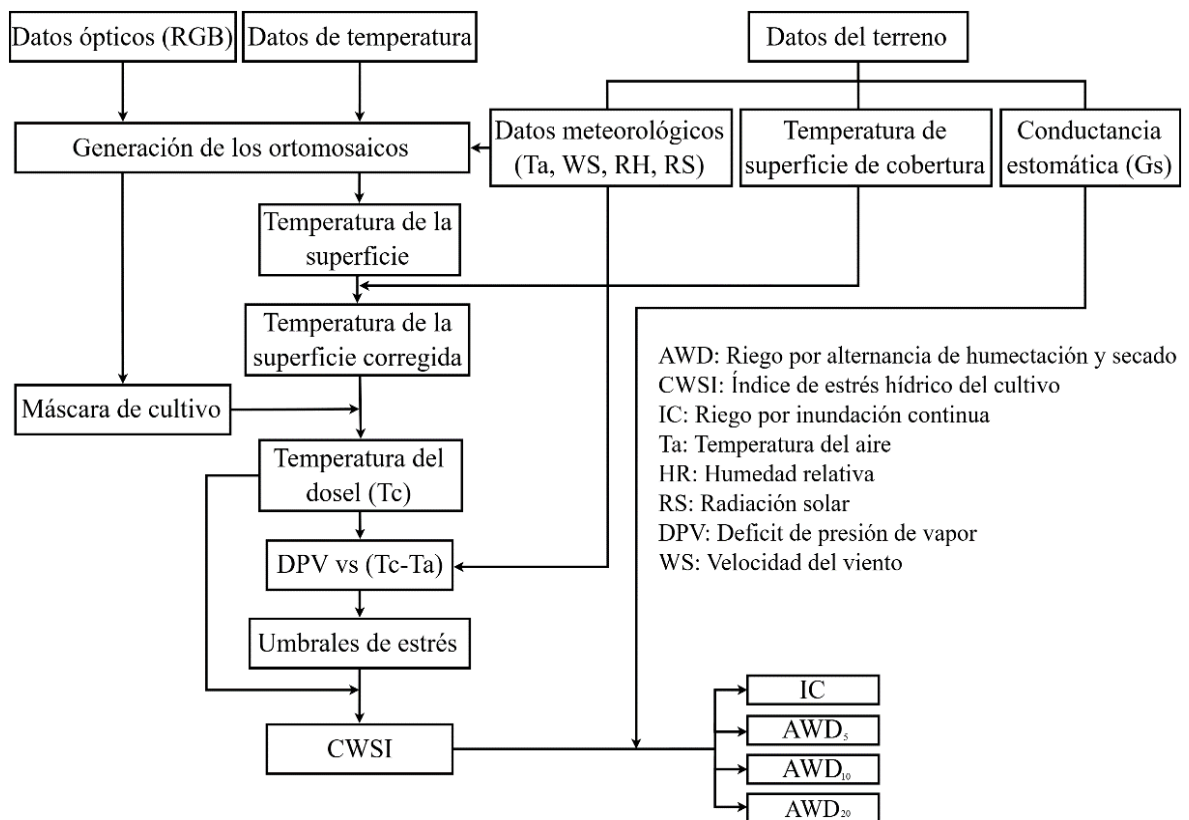


Figura 3: Diagrama de flujo de la metodología seguida en este estudio

3.2. Diseño experimental

Este estudio se diseñó como un experimento observacional, con cuatro parcelas que miden 24 m × 11 m cada uno, dividido a su vez en tres subparcelas de 8 m × 11 m como se observa en la Figura 4.

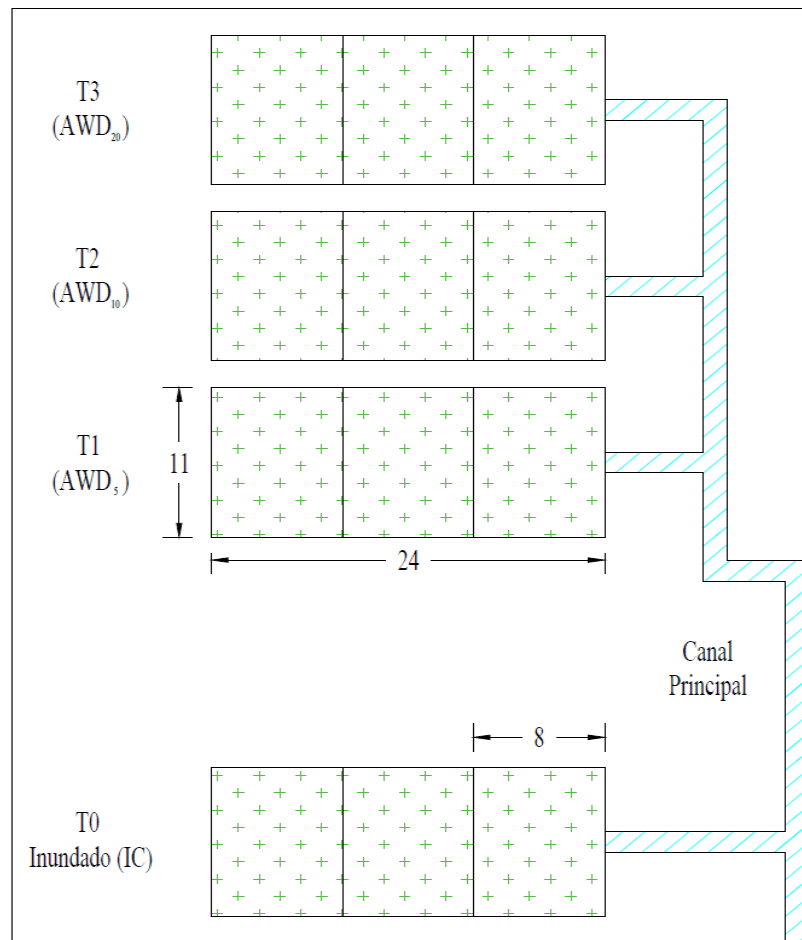


Figura 4: Plano de la zona experimental, INIA-Vista Florida

El tipo de investigación fue experimental, donde la variable independiente fue el manejo del agua.

El tratamiento inicial consistió en la inundación continua (IC), utilizando un método de riego por inundación permanente o tradicional. En contraste, los tratamientos orientados a la conservación del agua emplearon riegos con humedecimiento y secado alternos (AWD), a niveles de agua situados a 5 cm, 10 cm y 20 cm por debajo de la superficie del suelo (AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀). El riego se aplicó desde la etapa de macollamiento hasta la etapa de floración, y el nivel de agua se monitoreó a profundidades de 5 a 20 cm utilizando piezómetros (ver Figura 5) (Yang *et al.*, 2017).



Figura 5: Colocación de los piezómetros

La cantidad de agua utilizada se monitoreó mediante piezómetros colocados a profundidades de 5, 10 y 20 cm respecto al nivel del suelo (ver Tabla 1) (Yang *et al.*, 2017).

Tabla 1: Tratamientos de riego y número de repeticiones

Tratamientos	Tipo de Riego	Repeticiones
IC	Inundación continua	3
AWD ₅	-5 cm respecto al nivel del suelo	3
AWD ₁₀	-10 cm respecto al nivel del suelo	3
AWD ₂₀	-20 cm respecto al nivel del suelo	3

Durante las diferentes etapas de crecimiento de las plantas (vegetativa, reproductiva y maduración) (ver Figura 7), se realizaron un total de diecinueve, cinco y dos ciclos de riego, respectivamente (ver Tabla 2).

Tabla 2: Volumen de agua en diferentes tratamientos de riego en cultivos de arroz

Fase	Fecha	DDS	IC		AWD		AWD		AWD	
			Volumen (m ³ ha ⁻¹)	mm	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	mm	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	mm	Volumen (m ³ ha ⁻¹)	mm
Vegetativa	3/2/2023	30	1211.04	121	916.71	92	914.56	91	926.53	93
	6/2/2023	33	1140.36	114	827.22	83	880.91	88	864.20	86
	8/2/2023	35	1070.00	107	0.00	0	0.00	0	0.00	0
	11/2/2023	38	1070.00	107	874.17	87	865.79	87	939.90	94
	13/2/2023	40	700.00	70	0.00	0	0.00	0	0.00	0
	15/2/2023	42	720.23	72	548.48	55	612.91	61	619.83	62
	16/2/2023	43	636.36	64	628.81	63	586.97	59	566.29	57
	18/2/2023	45	1280.00	128	558.07	56	527.68	53	578.25	58
	20/2/2023	47	578.26	58	492.90	49	499.40	50	536.55	54
	24/2/2023	51	1157.12	116	820.75	82	824.03	82	880.18	88
	28/2/2023	55	570.00	57	406.18	41	0.00	0	0.00	0
	1/3/2023	56	577.03	58	355.13	36	0.00	0	0.00	0
	4/3/2023	59	683.87	68	632.61	63	646.75	65	670.19	67
	8/3/2023	63	1020.00	102	584.68	58	522.91	52	618.64	62
	12/3/2023	67	563.23	56	503.58	50	525.14	53	562.05	56
	13/3/2023	68	690.00	69	600.00	60	550.00	55	620.00	62
	15/3/2023	70	400.00	40	420.00	42	410.00	41	450.00	45
	31/3/2023	86	852.32	85	731.99	73	737.56	74	804.20	80
6/4/2023	92	750.00	75	679.14	68	637.03	64	667.50	67	
Reproductiva	12/4/2023	98	560.00	56	488.34	49	473.24	47	502.99	50
	18/4/2023	104	582.73	58	426.42	43	413.54	41	557.59	56
	24/4/2023	110	620.74	62	526.80	53	562.49	56	605.97	61
	30/4/2023	116	560.00	56	469.86	47	799.55	80	593.75	59
	4/5/2023	120	556.93	56	488.34	49	799.55	80	502.99	50
Maduración	8/5/2023	124	521.30	52	470.32	47	751.24	75	523.68	52
	12/5/2023	128	899.65	90	817.59	82	799.55	80	877.28	88
		Total	19971.17	1997	14268.09	1472	14340.8	1434	14468.56	1447

3.2.1. Manejo del cultivo

La siembra de la variedad Capoteña se llevó a cabo, preparando el almácigo el 02 de enero de 2023. A los 35 días después de la siembra (DDS), se procedió al trasplante (Figura 6), utilizando un marco de plantación de 20 × 20 cm y colocando 5 plántulas por golpe. Las diferentes etapas del ciclo de crecimiento, incluyendo las fases vegetativas, reproductiva y de maduración, tuvieron una duración de 95, 35 y 42 DDS, respectivamente. La fertilización N-P-K se realizó con una dosis de 250-106-60 en forma de urea, fosfato diamónico y sulfato de potasio, respectivamente. Durante el trasplante, se administró el 100% de fósforo (P) y potasio (K), junto con el 30% del nitrógeno (N). El restante de nitrógeno se distribuyó de manera equitativa durante el macollamiento, el punto de algodón y la floración (ver Tabla 3).



Figura 6: Trasplante del cultivo de arroz a los 35 días después de la siembra (DDS)

Tabla 3: Fenología del cultivo en días después de la siembra (DDS)

Vuelos	DDS	Fenología			
		CF	AWD ₅	AWD ₁₀	AWD ₂₀
1	38	Plántula	Plántula	Plántula	Plántula
2	42	Comienzo de Macollamiento	Comienzo de Macollamiento	Comienzo de Macollamiento	Comienzo de Macollamiento
3	61	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento
4	65	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento

«Continuación»

5	75	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento
6	79	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento
7	88	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento
8	92	Máximo Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento	Macollamiento
9	103	Iniciación de panícula	Máximo Macollamiento	Máximo Macollamiento	Máximo Macollamiento
10	107	Iniciación de panícula	Iniciación de panícula	Iniciación de panícula	Iniciación de panícula
11	123	Etapa de espigado	Etapa de espigado	Etapa de espigado	Etapa de espigado
12	127	Etapa de floración	Etapa de floración	Etapa de floración	Etapa de floración
13	147	Etapa de madurez	Etapa de madurez	Etapa de madurez	Etapa de madurez
14	149	Etapa de madurez	Etapa de madurez	Etapa de madurez	Etapa de madurez

Durante el crecimiento de los cultivos, se aplicaron insecticidas para controlar la presencia de *Chironomus* sp. E *Hydrellia wirthii* durante la etapa vegetativa. A medida que los cultivos alcanzaron la etapa de grano lechoso, se administraron fungicidas para prevenir enfermedades causadas por el hongo *Villosiclava virens*.

La fenología del cultivo se evaluó utilizando los grados días de calor (GDD), un índice altamente eficaz para rastrear y comprender el desarrollo del cultivo (Porrás et al., 2020). Este método proporciona una medida cuantitativa del calor acumulado a lo largo del tiempo, lo que permite identificar hitos clave en el crecimiento de los cultivos. En la Figura 7 se describe el ciclo fenológico del cultivo de arroz variedad Capoteña.

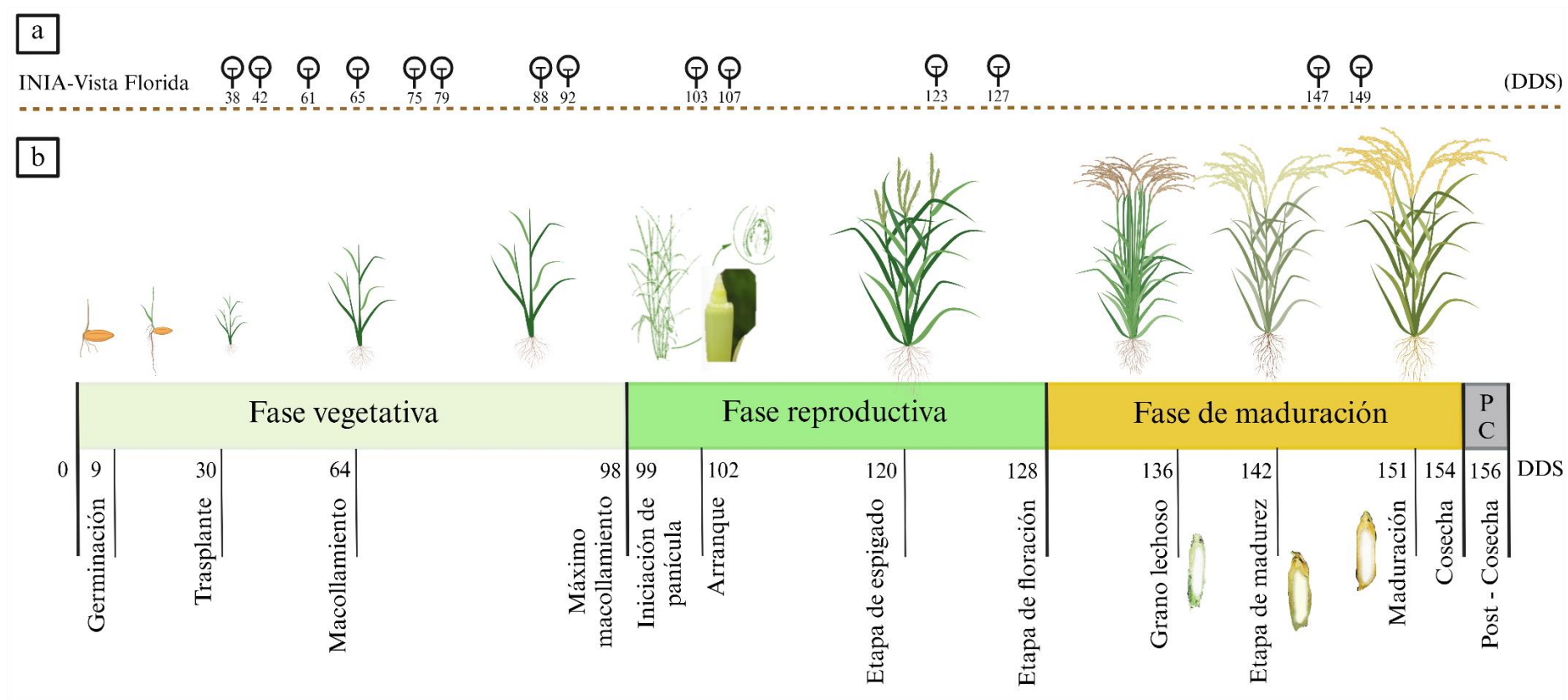


Figura 7: a) Vuelos realizados en la zona experimental; b) fenología según los días después de la siembra (DDS)

3.3. Materiales y equipos

En la etapa de campo, se utilizaron sensores de temperatura y equipos para medir variables climatológicas, junto con insumos y materiales necesarios para el manejo del cultivo. Además, en la etapa de gabinete, se emplearon softwares para procesar la información recolectada por los sensores. La Tabla 4 detalla los materiales, equipos y programas utilizados en la investigación.

Tabla 4: Materiales, equipos y sus aplicaciones

Materiales	Características técnicas	Uso-aplicación
Arroz	Variedad INIA 515 – CAPOTEÑA	Para la siembra de las cuatro pozas.
Pozas	Cuatro pozas experimentales de 24 m x 11 m.	Se aplicarán los cuatro tipos de riego por alternancia de humedecimiento.
Tecnopor	9 cuadrados de tecnopor 1m x 1m	Se utilizará como base para las coberturas.
Coberturas	Hoja verde, hoja seca, papel metálico, franelas (rojo, verde, amarillo, negro y blanco).	Se utilizará para realizar las mediciones con el radiómetro y luego calibrar la imagen térmica.
Equipos	Características técnicas	Uso-aplicación
Aeronave pilotada a control remoto (RPA)	Marca DJI, cuadricóptero, Matrice 300 RTK.	Acople de cámaras para el levantamiento de imágenes en el área de estudio.
Cámara termográfica y RGB	Cámara termográfica modelo Zenmuse H20T, marca DJI.	Captura de imágenes térmicas y ópticas (RGB, TIF y Radiométrica).
Porómetro	Marca Decagon Devices, INC.	Toma de datos de conductancia estomática del follaje.
TDR Radiómetro infrarrojo de mano	Marca FieldScout, modelo 150. Modelo MI-210, Marca Apogee.	Registro de humedad volumétrica. Permitirá obtener datos de temperatura para la calibración de imágenes térmicas.
Programas	Características técnicas	Uso-aplicación
Pix4D Mapper Pro	Software fotogramétrico versión 4.4.12.	Procesamiento de las imágenes térmicas.
QGIS	Software de SIG, versión 3.32.	Delimitación de cobertura vegetal y extracción de temperatura foliar.
Matlab R2023a	Lenguaje de programación.	Construcción de gráficas.
Estación automática meteorológica móvil	Marca atmos 41.	Registro y almacenamiento de datos climatológicos a la hora del vuelo.
Estación Geodésica (RTK)	Marca GNSS de alta precisión, modelo D-RTK 2 DJI.	Permite la colocación de puntos de control.

3.4. Procedimientos

3.4.1. Temperaturas umbrales con estrés y sin estrés vs VPD

Las temperaturas umbrales fueron obtenidas a partir de datos recopilados por imágenes térmicas capturadas con la cámara térmica H20T en las cuatro pozas experimentales. La información recopilada proporcionó un análisis detallado de cómo las temperaturas están relacionadas con el estrés y sin estrés en el cultivo de arroz, en función de la variabilidad del déficit de presión de vapor (DPV). Este enfoque metodológico permite una comprensión más completa de la respuesta del cultivo a las condiciones ambientales y su impacto en el estrés hídrico del cultivo.

a. Imágenes térmicas y procesamiento

Se recopilaron imágenes térmicas de alta resolución utilizando una cámara termográfica digital multifuncional Zennuse H20T (Figura 8), con un rango de precisión de ± 2 °C, desde el 11 de febrero hasta el 2 de junio de 2023. Esta cámara tiene la capacidad de capturar tanto imágenes térmicas como ópticas en formatos RGB, así como archivos TIF radiométricos. Su rango de medición de temperatura abarcaba de 8 a 14 μ m, con una resolución térmica de 640 \times 512 píxeles.



Figura 8: Cámara termográfica digital multifuncional Zennuse H20T

La cámara estaba equipada con un sensor microbolómetro Vox no refrigerado, lente DFOV de 40,6°, distancia focal de 13,5 mm (equivalente a 58 mm), una escala de

apertura de $f 1,0^{-1}$ y un rango de foco de 5 m a ∞ . Además, contaba con un telémetro láser con una precisión de $\pm (0,2 \text{ m} + D \times 0,15\%)$, donde D denotaba la distancia a una superficie vertical.

La cámara térmica H20T se montó en un cardán DJI en el UAV Matrice 300 RTK (Figura 9). Tanto la cámara como el UAV funcionaban en un rango de temperatura de $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ a $50 \text{ }^\circ\text{C}$. El UAV Matrice 300 RTK ofrecía una precisión de desplazamiento GPS de $\pm 0,1 \text{ m}$ verticalmente y $\pm 0,3 \text{ m}$ en horizontal, así como precisión de posicionamiento RTK y un ángulo de inclinación máximo de $30 \text{ }^\circ\text{C}$.



Figura 9: Dron Matrice 300 RTK

b. Planos de ortomosaico

Los ortomosaicos de temperatura fueron generados utilizando el software Pix4Dmapper Pro 4.4.12 (Pix4D S.A., Prilly, Suiza). El proceso incluyó tres etapas estándar: alineación de las fotografías, generación de una nube de puntos y creación de ortomosaicos con modelos digitales de superficie (DSMs). Posteriormente, la resolución se homogeneizó mediante remuestreo a $3,5 \text{ cm píxel}^{-1}$. Además, se llevó a cabo una clasificación supervisada por máxima verosimilitud de las imágenes utilizando el software QGIS 3.32 para obtener la máscara de vegetación para cada ortomosaico generado.

Se generaron los planos de ortomosaico RGB y térmico para un total de 14 fechas de vuelo. En la Figura 10 se muestra ejemplos de un ortomosaico RGB y otro térmico, ambos obtenidos por una cámara H20T implementada en vehículo aéreo no tripulado (UAV).

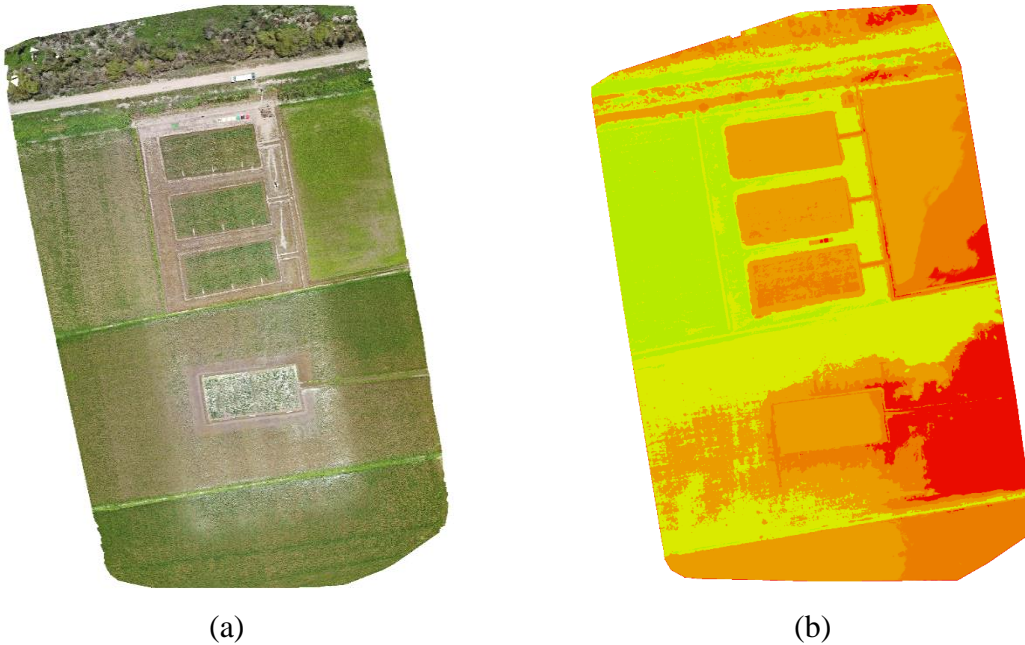


Figura 10: (a) Ortomosaico RGB, y (b) ortomosaico térmico

Para el recorte de la cobertura vegetal, se empleó un procedimiento detallado en la Figura 11, utilizando el plano de ortomosaico como referencia.

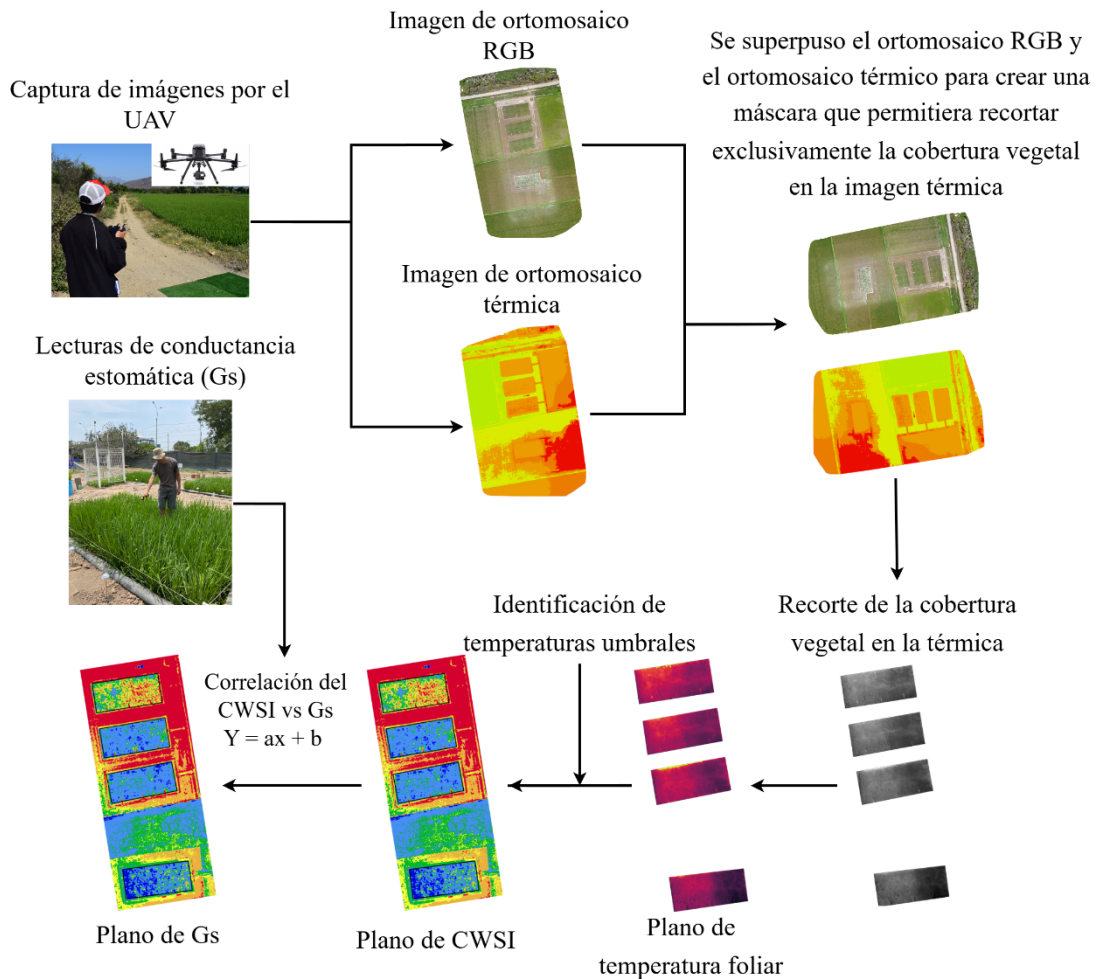


Figura 11: Esquema del procedimiento desarrollado en gabinete para la obtención del recorte de la cobertura vegetal

c. Condiciones meteorológicas

La recopilación de datos meteorológicos es esencial para calcular el índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI), subrayando la importancia de la temperatura del aire y la humedad relativa en este cálculo (Gonzalez y Zarco, 2022). Para las fechas de vuelo de los UAV, los datos meteorológicos se obtuvieron de la estación meteorológica automática portátil ATMOS 41 (ver Figura 12).



Figura 12: Instalación de la estación meteorológica automática portátil ATMOS 41

Esta estación, con capacidades de comunicación digital SDI-12, transmitía datos de sensores ambientales. Instalado a una altura de 2 m, el equipo estaba conectado a un registrador de datos modelo ZL6. Los datos recopilados incluían temperatura del aire (T_a , °C), humedad relativa (HR, %), radiación solar (SR , $W\ m^{-2}$), y velocidad del viento (WS , $m\ s^{-1}$). La estación se colocó en el centro de cada área de estudio en seis puntos diferentes a lo largo del día.

d. Calibración de imágenes térmicas H20T

La calibración indirecta de las imágenes térmicas obtenidas con la cámara térmica radiométrica Zenmuse H20T se llevó a cabo mediante la comparación con datos medidos por un radiómetro Apogee MI-210 (MI-210; Apogee Instruments, Inc., Logan, UT, EE. UU.) en nueve tipos de coberturas, como aluminio, hojas secas, hojas verdes, poliestireno expandido, tela amarilla, tela negra, tela roja, tela verde y suelo desnudo, estas cubiertas se colocaron sobre un cuadrado de PVC de 1×1 m. Las imágenes térmicas se capturaron a una altura de 45 m, y los vuelos se realizaron entre las 09:00 y las 15:00 h en días despejados para minimizar la presencia de sombras (ver Figura 13).

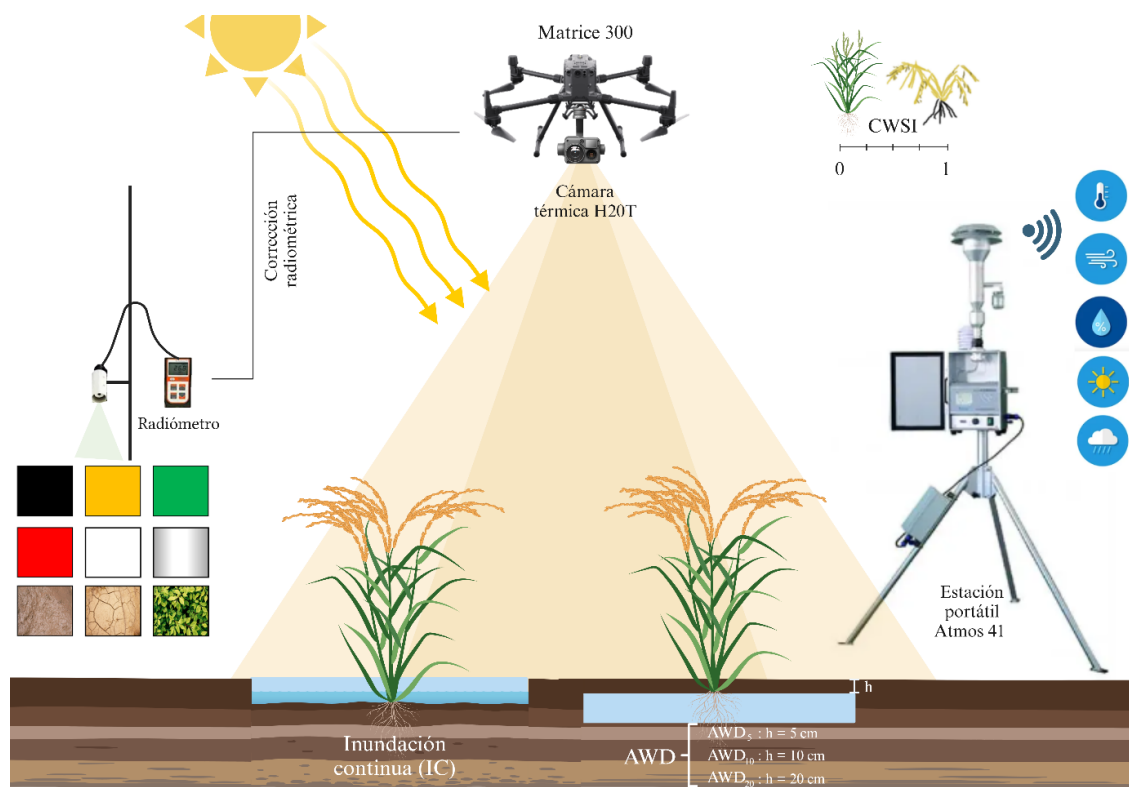


Figura 13: Calibración indirecta de imágenes térmicas: comparación con datos de radiómetro en diferentes coberturas

e. Umbrales con estrés y sin estrés

El cálculo de los umbrales de temperatura con y sin estrés es crucial para la determinación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI). Estos umbrales, que comprenden el límite inferior (LI) y el límite superior (LS) de la diferencia de temperatura entre el dosel del cultivo (T_c) y la temperatura del aire (T_a), se ajustan en función del déficit de presión de vapor (DPV).

Los valores del LI y LS se calcularon extrayendo los datos de temperatura del ortomosaico correspondiente a las fechas de los vuelos realizados. Estos límites se determinaron mediante mediciones realizadas entre las 9:00 y las 10:30 horas, y entre las 11:00 y las 13:00 horas, respectivamente. Además, se utilizó la temperatura registrada por termopares como referencia, los cuales proporcionan una medición directa de la temperatura de la hoja y registran las temperaturas más bajas entre las 5:00 y las 7:00 horas, así como las más altas entre las 11:00 y las 13:00 horas, según Villar *et al.* (2021).

Estos umbrales son fundamentales para calcular el CWSI, permitiendo una evaluación precisa del estado hídrico del cultivo. Esto facilita el monitoreo y la gestión eficiente del riego, contribuyendo a la optimización del uso del agua y mejorando la productividad agrícola.

3.4.2. Determinación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

Se calculó el CWSI mediante la aplicación de la Ecuación 1, utilizando datos recopilados de diversas fuentes. Se emplearon datos de temperatura obtenidos mediante una cámara térmica de alta resolución, que capturó imágenes térmicas durante todo el período de estudio. A partir de estas imágenes, se generó un ortomosaico de temperatura que representaba la variabilidad térmica en la superficie del cultivo. Además, se extrajeron las temperaturas de las hojas del cultivo utilizando las imágenes térmicas.

Para obtener los límites superior e inferior del CWSI, se integraron también datos de la temperatura del aire y la humedad relativa obtenidos de una estación meteorológica portátil ubicado en el área experimental. Estos datos proporcionaron información crucial para establecer las condiciones ambientales en las que se realizaron las mediciones de temperatura de las hojas del cultivo.

Para garantizar la precisión de los cálculos, el ortomosaico de temperatura se sometió a un proceso de recorte, enfocándose únicamente en la cobertura vegetal del arroz y excluyendo cualquier área no deseada, como el suelo u otras coberturas. Este enfoque permitió obtener mediciones más precisas y representativas de la temperatura de las hojas del cultivo, lo que a su vez contribuyó a una evaluación más precisa del estrés hídrico de las plantas mediante el CWSI.

3.4.3. Conductancia estomática (Gs) y relación con el CWSI

Para medir la conductancia estomática (Gs) y la temperatura del cultivo (Tc), se utilizó el porómetro Decagon Modelo SC-1 (METER Group, Pullman, WA, EE. UU.). Este dispositivo tiene un rango de medición de Gs de 0 mmol m² s⁻¹ a 1200 mmol m² s⁻¹, con una precisión del 10%, y opera en un intervalo de temperatura de 5 °C a 40 °C, así como con una humedad relativa máxima del 100%. Las mediciones se realizaron antes de los vuelos

del UAV, entre las 9:00 a.m. y las 12:00 p.m. Se tomaron tres repeticiones con el sensor ubicado en la superficie foliar de tres plantas por subparcela. A partir de estos datos, se desarrolló una escala específica que vincula la conductancia estomática del arroz con el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) (Barnaby *et al.*, 2019; Luan *et al.*, 2021), permitiendo comparaciones con escalas de referencia de otros cultivos, como el frijol (Vega y Mejía, 2017) para monitorear si el cultivo se mantiene dentro de las condiciones óptimas de agua.

Se estableció una relación entre el CWSI, obtenido a partir de datos del ortomosaico térmico, y la conductancia estomática (Gs), medida en campo con el porómetro. Esta relación permitió el desarrollo de una escala de referencia basada en investigaciones previas (Vega y Mejía, 2017). Se realizó un análisis de correlación entre Gs y dos variables clave en el estudio del estrés hídrico del cultivo: la temperatura del cultivo (Tc) y el CWSI. Las mediciones se llevaron a cabo durante los vuelos del UAV, con el sensor ubicado en la superficie foliar de tres plantas por subparcela, y se recopilieron estadísticas para evaluar la relación entre estas variables utilizando coeficientes de determinación (R^2) y correlaciones de Pearson. Basándose en la evaluación de estos datos, se propuso una escala de referencia para determinar los niveles de estrés hídrico en función de los valores de Gs, calculada a partir de la relación entre CWSI y Gs.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Temperaturas umbrales con estrés y sin estrés vs el déficit de presión de vapor

4.1.1. Calibración de las imágenes térmicas

a. Condiciones meteorológicas

La Tabla 5 describe las condiciones meteorológicas del área de estudio obtenidas de la estación portátil Atmos 41 calibrada con la estación meteorológica más cercana. La temperatura ambiente osciló entre 25,61 °C y 29,68 °C. La velocidad del viento varió entre 0,72 m s⁻¹ y 3,53 m s⁻¹, con fluctuaciones causadas principalmente por ráfagas de viento en el área de estudio. La humedad relativa mostró una alta variabilidad, oscilando entre el 61,84% y el 88,40%.

Tabla 5: Datos meteorológicos de la estación portátil Atmos 41

Vuelo	INIA-Vista Florida			
	Ta (°C)	RH (%)	WS (m s ⁻¹)	RS (W m ⁻²)
1	28,09	61,84	3,53	514,63
2	25,61	79,95	1,68	319,44
3	29,53	65,57	2,23	968,17
4	26,49	86,72	1,27	397,75
5	29,68	65,26	2,04	104,71
6	28,67	75,99	0,81	784,38
7	26,93	88,40	1,14	487,83
8	27,18	80,66	0,72	413,09
9	26,32	82,10	1,49	529,15
10	27,43	71,38	2,66	655,75
11	27,28	71,19	2,94	797,00
12	27,23	68,08	1,51	697,42
13	27,22	70,96	2,69	368,83

Los valores de temperatura del aire y humedad relativa, utilizados para calcular el déficit de presión de vapor (DPV), son las variables que más influyen en la determinación del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI). Esto se fundamenta con los hallazgos de Dong *et al.* (2024), quienes examinaron el impacto de varias

variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del viento y radiación solar) entre 1961 y 2020.

b. Ecuación de ajuste para temperatura con nueve coberturas

Los valores de temperatura obtenidos en las imágenes térmicas fueron ajustados utilizando mediciones proporcionadas por el radiómetro Apogee MI-210, un sensor remoto proximal calibrado de fábrica mediante termistores de precisión (ver Anexo 1). Posteriormente, se compararon estas mediciones de temperatura del radiómetro Apogee MI-210 con las obtenidas por la cámara térmica radiométrica Zenmuse H20T acoplada en el UAV. Dado que las mediciones realizadas a 45 metros de altura podrían verse afectadas por factores como la radiación solar, la humedad ambiental y la velocidad del viento, se realizaron correcciones para asegurar valores más precisos y sensibles a las condiciones ambientales. Esto incluyó ajustes para corregir la emisividad de las superficies, asegurando que estuvieran dentro del rango adecuado para la cámara térmica.

Para cada día de vuelo, se derivó una ecuación de ajuste (Figura 14). Para las imágenes recolectadas en el INIA bajo las condiciones meteorológicas descritas (Tabla 5), se estableció una ecuación general: $Y_{\text{radiométrico}} = 0,6638 \times X_{\text{H20T}} + 12$, con un coeficiente de Pearson de 0,959 y un error cuadrático medio (RMSE) de 6,309 °C.

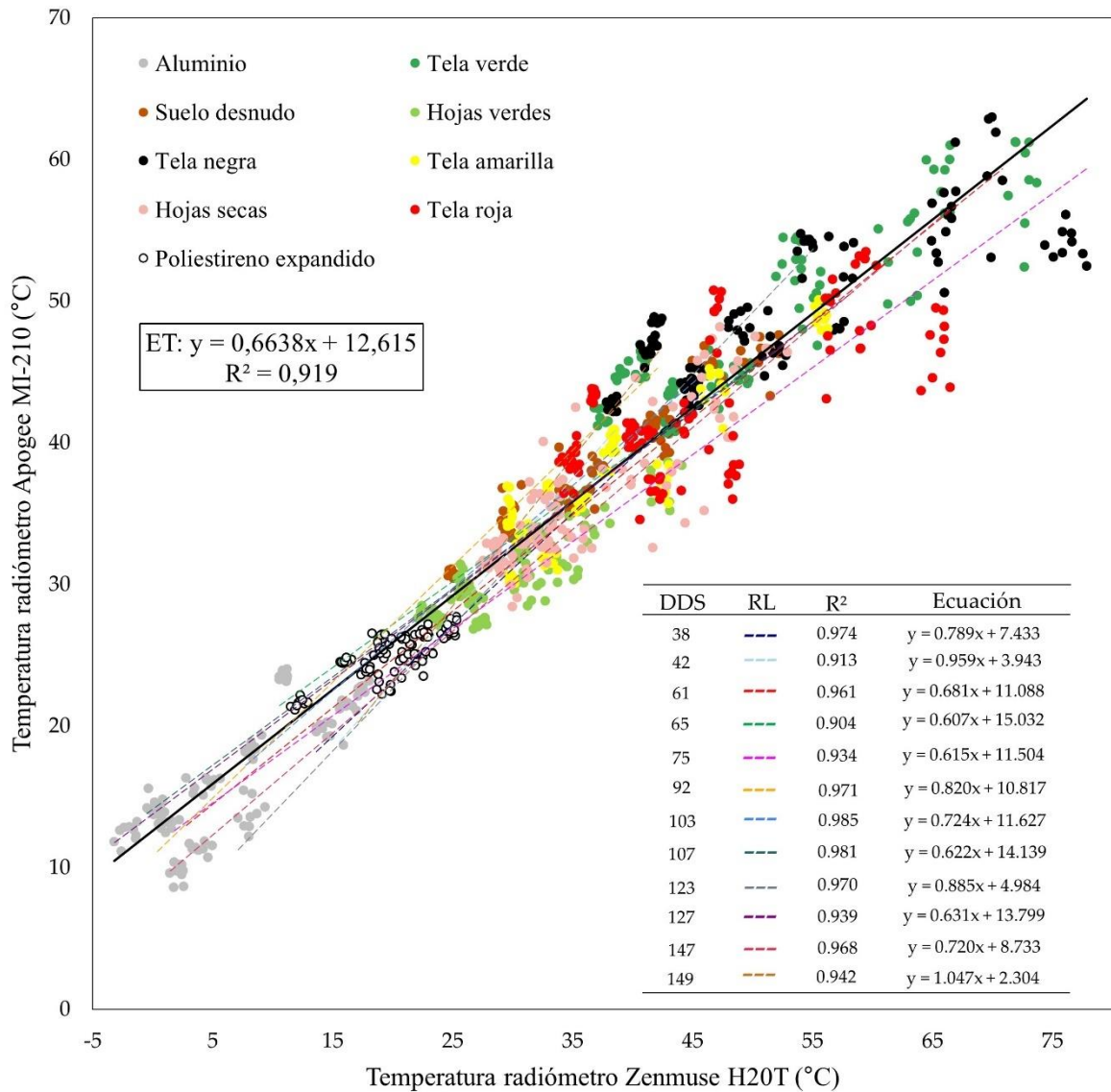


Figura 14: Ecuación de ajuste para la relación entre datos del radiómetro y temperaturas obtenidas con la cámara térmica radiométrica Zenmuse H20T bajo condiciones meteorológicas específicas

c. Análisis para reducir coberturas

Se calculó la media de los coeficientes de determinación (R^2) comparando los datos del radiómetro con las imágenes térmicas, con el objetivo de identificar las posibles combinaciones de coberturas de 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2 y 1. Se observó que el uso de múltiples coberturas, en este caso 9, contribuyó a establecer un gradiente de temperatura que mejoró la robustez y precisión de la estimación de la temperatura del cultivo en los campos de arroz (ver Figura 15).

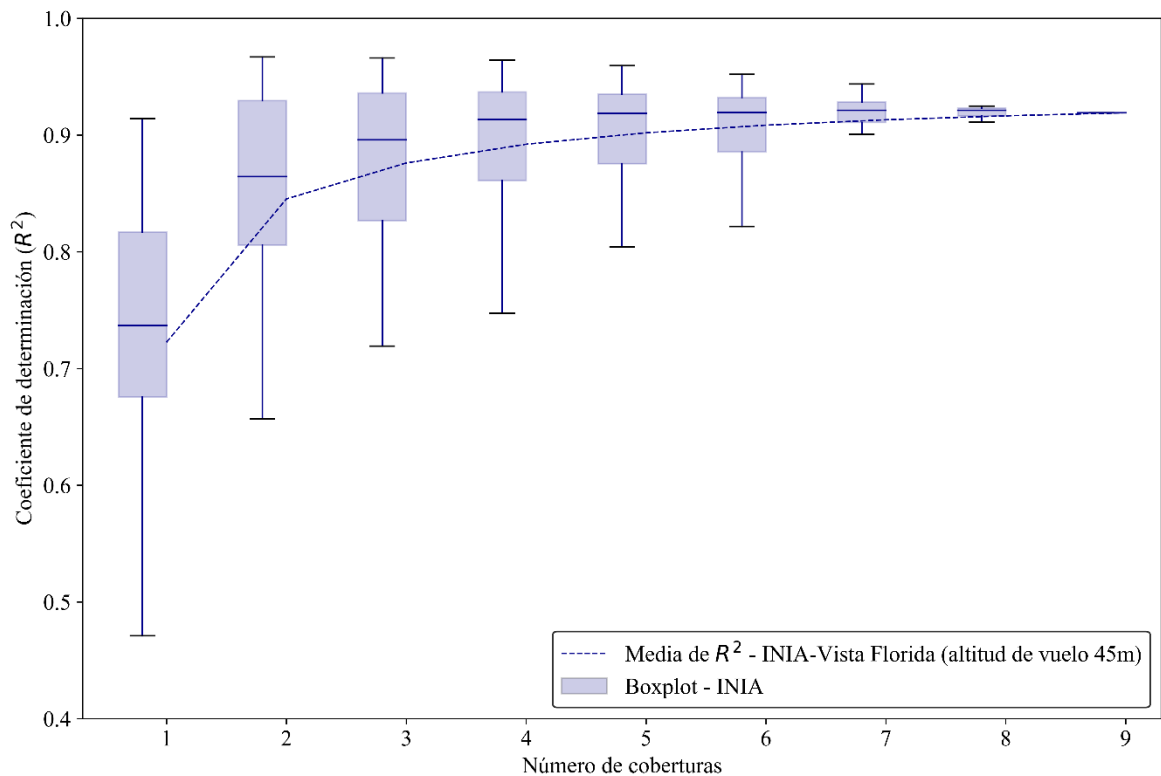


Figura 15: Comparación de los coeficientes de determinación (R^2) entre datos del radiómetro e imágenes térmicas para diferentes combinaciones de coberturas en campos de arroz

Sin embargo, al utilizar solo cuatro coberturas, la combinación con máximo R^2 de 0,96 (suelo desnudo, hojas verdes, hojarasca y poliestireno expandido), se observó una diferencia porcentual mínima del 3% al 4% en el promedio de R^2 en comparación con el uso de nueve coberturas. Este hallazgo sugiere que se podría reducir significativamente el tiempo de recopilación de datos sin sacrificar la precisión. Este resultado es consistente con los estudios de Machaca et al. (2022), quienes utilizaron cuatro coberturas (suelo desnudo, hojarasca, pasto y agua descongelada) logrando un R^2 de 0,97, y de Torres (2017), que emplearon tres coberturas (suelo desnudo, dosel verde corto y dosel alto) obteniendo un R^2 entre 0,58 y 0,95.

d. Gráfica de déficit de presión de vapor (DPV)

La temperatura del cultivo (T_c) alcanzó su punto más alto entre las 11:00 y las 14:00 horas, lo que se tradujo en el valor máximo del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI). Es importante destacar que el momento de las mediciones de campo ejerce

una influencia significativa en los resultados (Durán *et al.*, 2021; Godson *et al.*, 2022). Utilizando diagramas de dispersión, se estableció la relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire ($T_c - T_a$) para determinar el límite inferior $(T_c - T_a)_{LI}$ y superior $(T_c - T_a)_{LS}$. Estos límites se obtuvieron a través de mediciones realizadas entre las 9:00 y las 10:30 horas, y entre las 11:00 y las 13:00 horas, respectivamente. Además, se utilizó como referencia la temperatura de los termopares, ya que proporcionan una medición directa de la temperatura de la hoja, registrando las temperaturas más bajas entre las 5:00 y las 7:00 horas y las temperaturas más altas entre las 11:00 y las 13:00 horas (ver Figura 16).

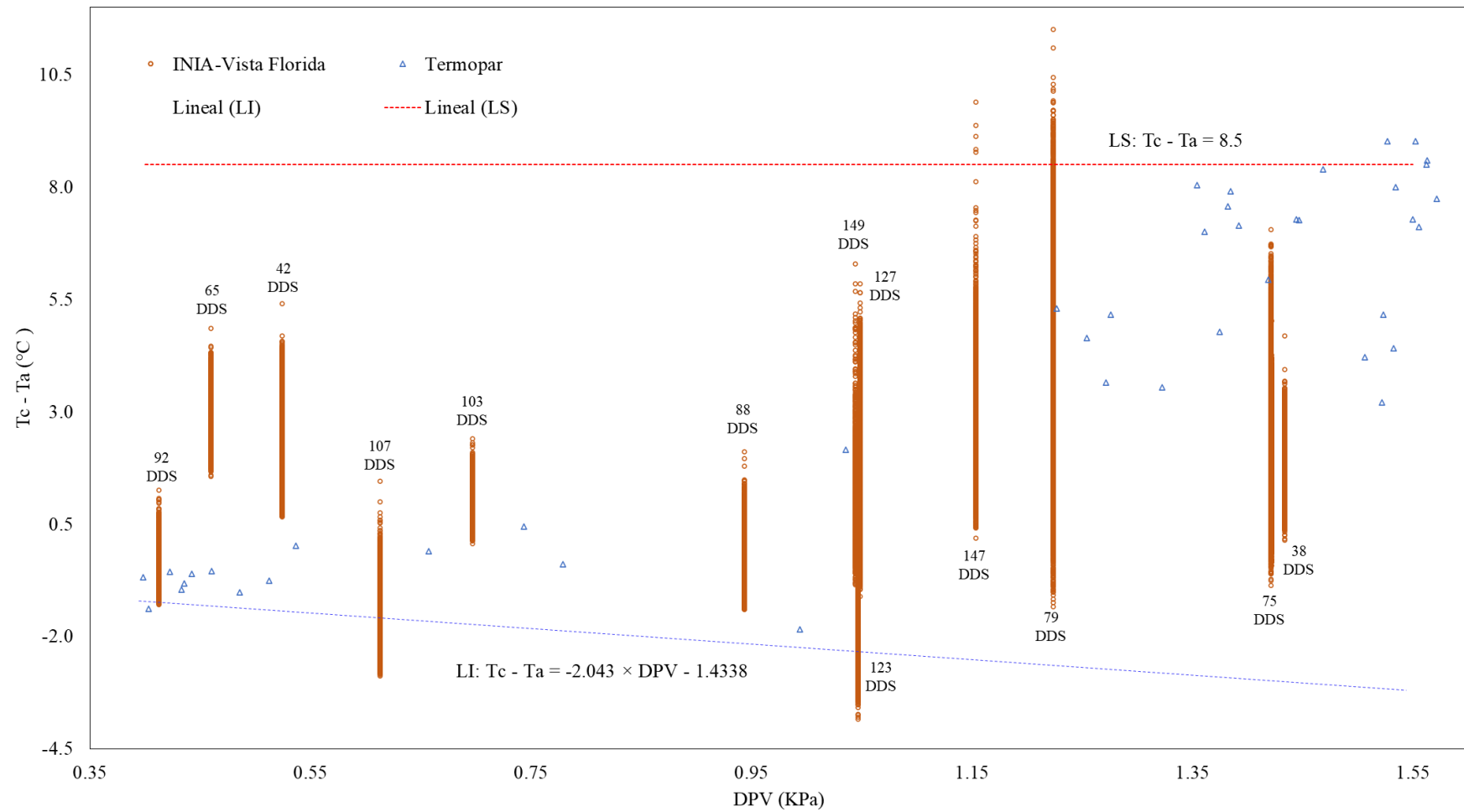


Figura 16: Relación entre el déficit de presión de vapor y la diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire para la determinación de los límites de estrés hídrico

Los datos empleados en este análisis fueron recopilados de la zona experimental ubicada en la región Lambayeque. Con el fin de asegurar la precisión de las mediciones, se llevaron a cabo experimentos adicionales en La Molina, donde se instalaron sensores de termopar en macetas. Se determinó que la temperatura de punto de rocío (UP) era de 8,5 °C, mientras que la línea de base inferior (LI) se representa mediante la ecuación $LI = -2,043 \times DPV - 1,434$. Mediante el análisis de las imágenes capturadas durante el vuelo 9, se identificó el LI que representa condiciones óptimas sin estrés. Por otro lado, el límite superior (LS), que representa las condiciones de máximo estrés, se obtuvo a partir de las imágenes recopiladas en el tratamiento AWD₂₀ durante el vuelo 06 - INIA.

Godson *et al.* (2022) observaron que la sensibilidad del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI) a diferentes escenarios de línea de base de referencia influye significativamente en la interpretación de los niveles de estrés hídrico en los cultivos de arroz. La elección de genotipos con diferentes sensibilidades al déficit de presión de vapor (DPV) y la frecuencia de condiciones de bajo DPV en el entorno de campo afectaron los valores de CWSI, especialmente en condiciones de bajo DPV (<2 kPa). Además, se encontró que la utilización de un valor constante para el límite inferior (LI) aumentó la incertidumbre, lo que se reflejó en una alta variabilidad en los valores de CWSI, especialmente en el entorno de campo. La sensibilidad de los genotipos al DPV y la temperatura del dosel de las plantas influyeron en los resultados del CWSI, sugiriendo la necesidad de investigar con germoplasma de arroz diverso para obtener una visión más completa de la dinámica del CWSI en condiciones húmedas.

Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar la sensibilidad genotípica al DPV y la variabilidad ambiental al interpretar y aplicar el CWSI en la gestión del riego y la productividad del arroz en climas húmedos.

4.2. Índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

La Figura 17 ilustra las variaciones en las temperaturas medias de los cultivos durante las diferentes etapas fenológicas en las diversas fechas de vuelo. Estos datos revelan fluctuaciones significativas en las condiciones ambientales a lo largo del ciclo del cultivo. Se observa un incremento en las temperaturas de los cultivos durante los vuelos 5 y 6,

atribuible a la influencia del ciclón Yaku (SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología), 2024) y a la escasez de agua proveniente de los canales de riego. Sin embargo, a partir del vuelo 7, que coincide con el final de la fase vegetativa y el inicio de la fase reproductiva, se evidencia una disminución en los valores de temperatura. Este descenso puede atribuirse a la llegada de precipitaciones, que alcanzaron hasta $26,8 \text{ mm día}^{-1}$ en los días previos al monitoreo y a la aplicación de riego en las parcelas experimentales. Es importante destacar que el aumento de las temperaturas está vinculado a la fase de maduración del cultivo, que requiere el proceso de secado de los granos antes de la cosecha.

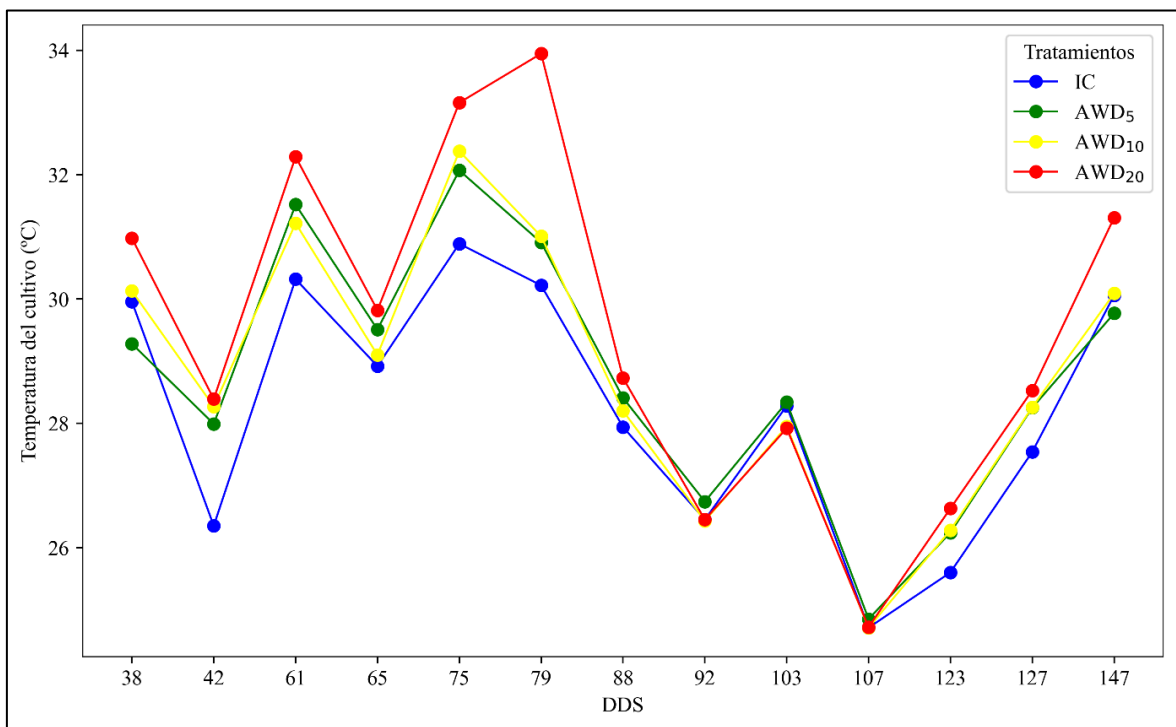


Figura 17: Variación de las temperaturas medias de los cultivos durante el ciclo fenológico y las fechas de vuelo

Evaluación de tratamientos en base a la temperatura de la hoja: análisis no paramétrico y comparaciones múltiples.

Se llevaron a cabo dos pruebas estadísticas para analizar las temperaturas promedio de la hoja (T_h) obtenidas mediante la cámara H20T en todas las fechas de vuelo. Primero, se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk para evaluar si los datos seguían una distribución normal. El resultado del p-valor fue de 0,08468, lo cual indica que no hay

evidencia suficiente para afirmar que no siguen una distribución normal. Además, realizamos la prueba de homogeneidad de varianzas (Prueba de Levene) para verificar si las varianzas eran iguales entre los tratamientos. El resultado fue significativo (p-valor = 0,0306), lo que indica diferencias en las varianzas.

Dado que los datos no cumplieron con los supuestos paramétricos, se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis. El chi-cuadrado resultante fue de 58,8976 con 3 grados de libertad y un p-valor de 0,01. Posteriormente, se realizó la prueba de Dunn para comparar las medias entre los tratamientos. En la Tabla 6, se muestran las diferencias en los rangos medios entre los tratamientos. Destacando que el tratamiento IC presenta diferencias significativas con los tratamientos (AWD₅, AWD₁₀ y AWD₂₀).

Tabla 6: Comparación de temperatura de la hoja (Th) por tratamientos

	IC	AWD ₅	AWD ₁₀
AWD ₅	-3,953979 0,0002*		
AWD ₁₀	-3,667286 0,0007*	0,286693 1	
AWD ₂₀	-7,669048 0,0000*	-3,715068 0,0006*	-4,001761 0,0002*

Los diagramas de caja presentados en la Figura 18 ofrece una visión detallada de los valores del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), los cuales varían en un rango de 0 a 1. En la Figura 18a, se observan los valores más bajos de CWSI, los cuales se relacionan con el régimen de riego continuo por inundación (CF). Este bajo nivel de CWSI refleja una situación de óptima disponibilidad de agua para el cultivo, donde la transpiración de las plantas se mantiene eficiente y sin estrés significativo. Por otro lado, en la Figura 18d, se representan los valores más altos de CWSI, los cuales corresponden al tratamiento AWD₂₀, caracterizado por una reducida lámina de agua. Estos valores elevados de CWSI indican un nivel de estrés hídrico más pronunciado en comparación con el régimen de riego por inundación continua, lo que sugiere una menor disponibilidad de agua para las plantas y, por lo tanto, una transpiración menos eficiente. Es importante destacar que estos hallazgos son consistentes con la respuesta esperada del cultivo frente a variaciones en el suministro de

agua, lo que subraya la importancia de gestionar adecuadamente el riego para mantener condiciones óptimas de crecimiento y desarrollo.

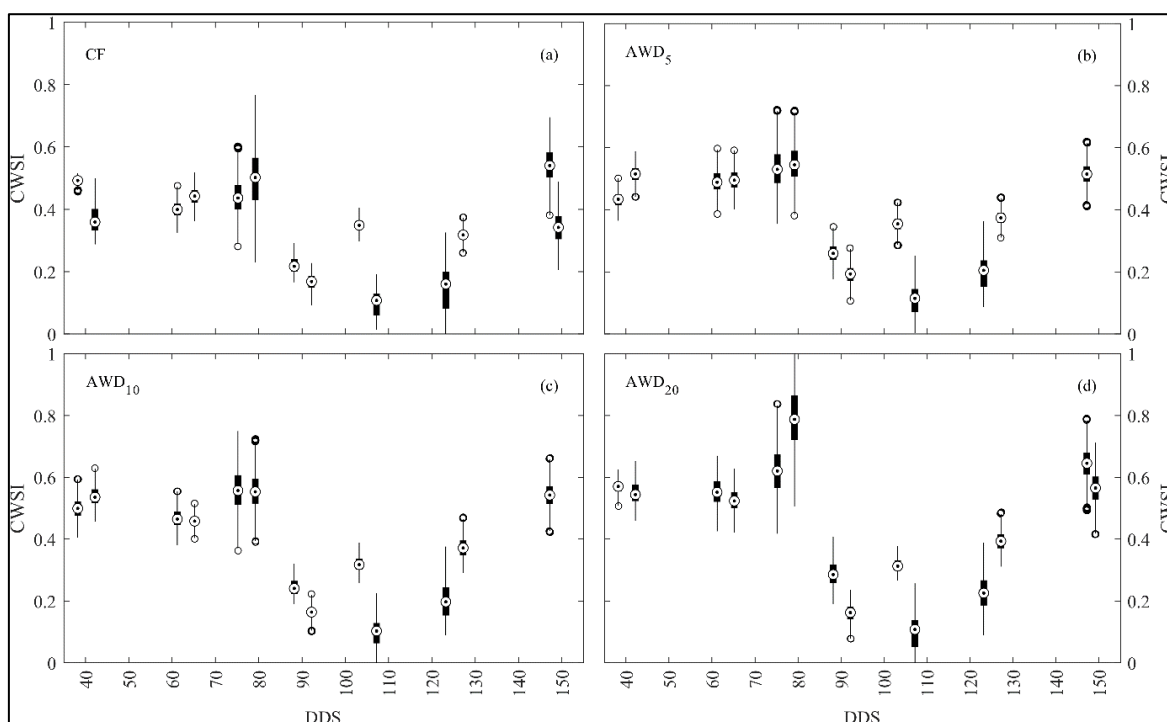


Figura 18: Variaciones en el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) en diferentes regímenes de riego

En la Figura 18d, correspondiente a la fase vegetativa a 79 días después de la siembra (DDS), se observa un promedio de 0.8 en el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI). Este elevado valor de CWSI se debe a los cortes de agua realizados en los cuatro tratamientos, lo que provocó que el cultivo dejara de transpirar. Estudios previos (Durán *et al.*, 2021; Parthasarathi *et al.*, 2018; Sandhu *et al.*, 2019) han demostrado que durante la fase vegetativa se registran mayores valores de CWSI, indicando periodos de mayor estrés hídrico debido a la escasez de agua de riego, especialmente bajo las condiciones del fenómeno de El Niño. Además, esta fase es crítica para el desarrollo del cultivo, lo que incrementa el impacto del déficit hídrico. Estos hallazgos subrayan la importancia de una gestión adecuada del riego, especialmente durante las fases críticas de crecimiento, para mitigar el estrés hídrico y asegurar una óptima producción del cultivo.

4.3. Conductancia estomática (Gs) y relación con el CWSI

La Figura 19 representa la relación entre la temperatura del cultivo (T_c) y la conductancia estomática (G_s), medidas ambas con un porómetro. Esta correlación exhibió un alto grado de ajuste, obteniendo un coeficiente de determinación (R^2) de 0,92, lo que sugiere una fuerte asociación entre ambas variables. Este resultado proporciona información significativa sobre la dinámica entre la temperatura del cultivo y su capacidad para la transpiración en respuesta a las condiciones ambientales.

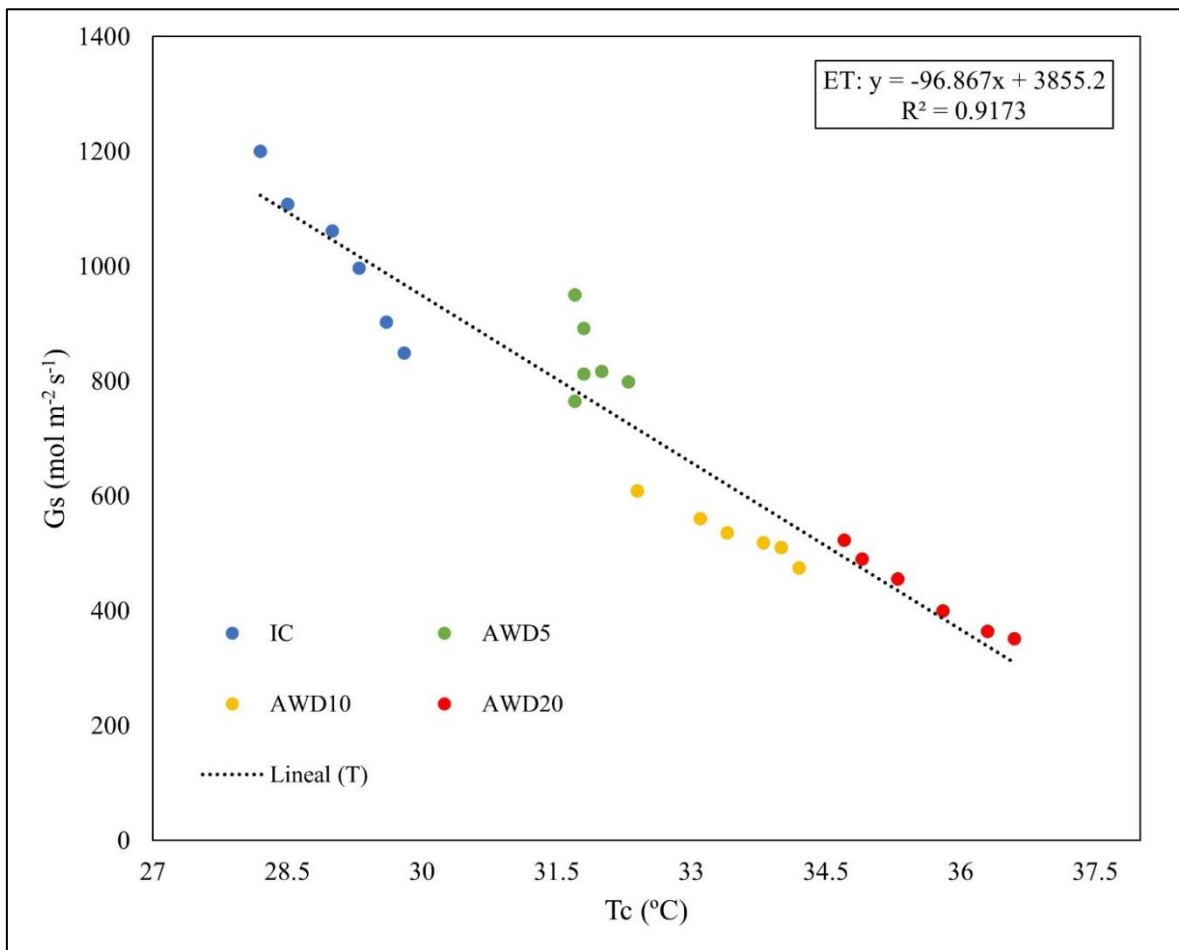


Figura 19: Correlación entre temperatura del cultivo y conductancia estomática medidas con un porómetro

En la Figura 20 se exhibe la correlación entre el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) y la conductancia estomática (G_s), y se observa un coeficiente de determinación (R^2) de 0,83. Esta relación revela una asociación significativa entre el CWSI y la capacidad de transpiración de las plantas, indicando la influencia del estrés hídrico en la respuesta fisiológica del cultivo.

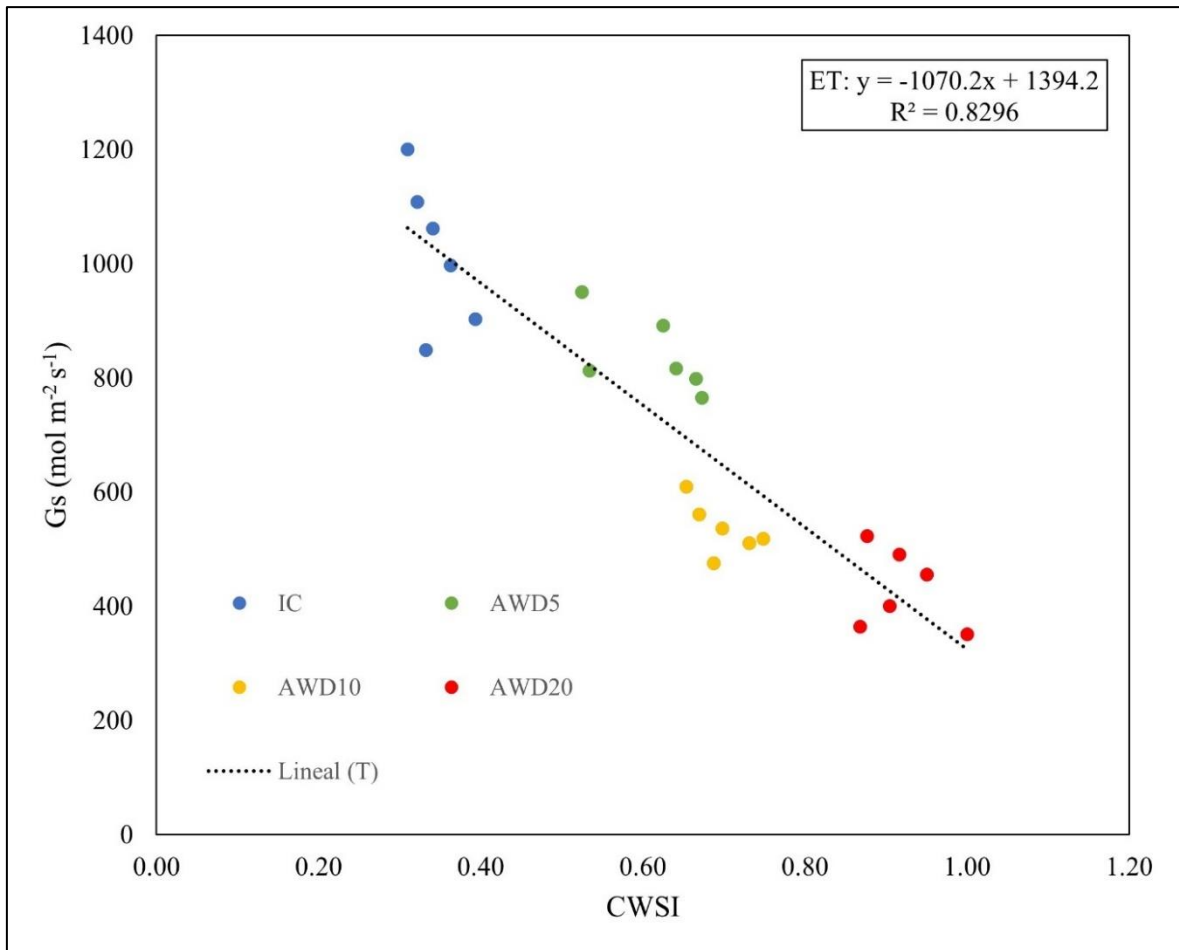


Figura 20: Correlación entre el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) obtenido a partir de la cámara térmica radiométrica Zennuse H20T y la conductancia estomática (Gs) medida con el porómetro

Tras evaluar los datos recolectados, se propone una escala de referencia para determinar los niveles de transpiración del cultivo a partir de los valores de conductancia estomática (Gs) (Tabla 7). Esta escala se elaboró teniendo en cuenta investigaciones previas (Barnaby et al., 2019; Luan *et al.*, 2021; Vega y Mejía, 2017). Para el cálculo de la escala de referencia se utilizó la ecuación presentada en la (Figura 20). Esta propuesta se basa en la relación entre el índice de estrés hídrico de los cultivos (CWSI) y los valores de Gs. En este contexto, los valores más altos de Gs, obtenidos en el estudio con riego por inundación continua (IC), indican una transpiración de lujo. Por el contrario, los valores más bajos, obtenidos en el tratamiento AWD₂₀, indican estrés moderado a extremo.

Tabla 7: Escala de referencia de conductancia estomática (Gs) a partir del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI)

Escala de referencia	Gs	CWSI
Transpiración de lujo	1200	0,18
	900	0,46
Rango óptimo	900	0,46
	650	0,70
Estrés leve	650	0,70
	500	0,84
Estrés moderado	500	0,84
	400	0,93
Estrés	400	0,93
	200	1,12
Estrés extremo	200	1,12
	0	1,30

A continuación, se presenta la escala de referencia de conductancia estomática (Gs) a partir del índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI), que facilita la definición de niveles de transpiración y estrés hídrico en el cultivo de arroz (Figura 21).

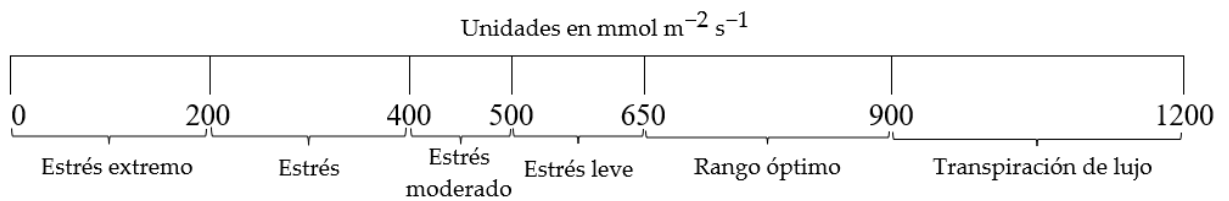


Figura 21: Escala de referencia de conductancia estomática (Gs) para definir niveles de transpiración

En la Figura 22 se presentan los planos del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (CWSI), generados a partir de las temperaturas obtenidas con la cámara térmica radiométrica Zenmuse H20T y calibradas con la ecuación de ajuste por día de vuelo, como se muestra en la Figura 14. La Figura 22f destaca por mostrar las temperaturas más altas, atribuibles a los cortes de agua realizados en la fase vegetativa a 79 días después de la siembra (DDS). Por otro lado, en la Figura 23 se presentan los planos de la conductancia estomática (Gs), con las escalas de referencia respectivas, generados utilizando la ecuación de ajuste mostrada en la Figura 20. Se observa una relación inversa entre los planos de CWSI y Gs: cuando los estomas se cierran (menor Gs), la temperatura del cultivo aumenta (mayor CWSI).

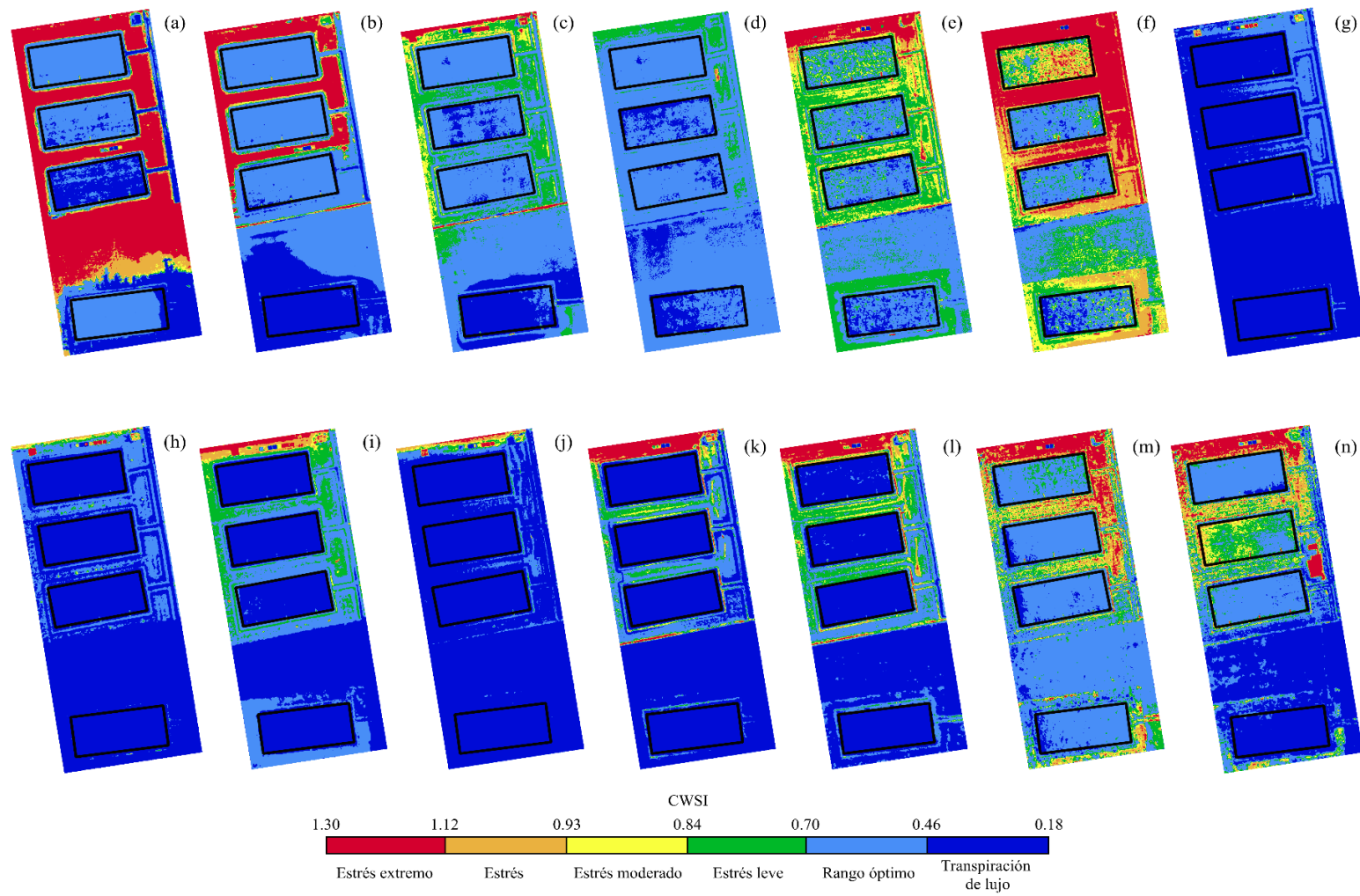


Figura 22: Plano de CWSI

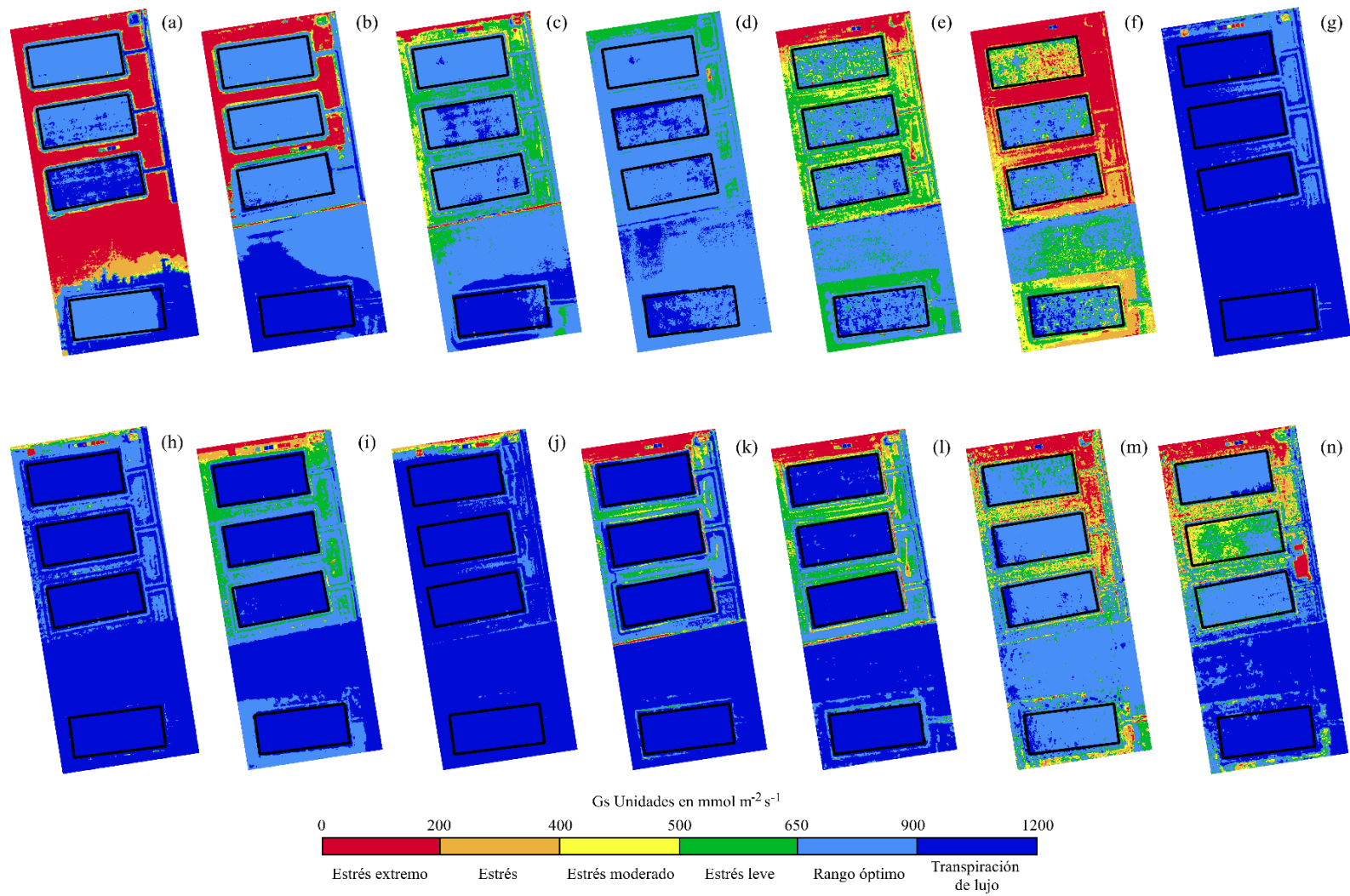


Figura 23: Plano de conductancia estomática (G_s)

V. CONCLUSIONES

1. Se estimaron las temperaturas umbrales con y sin estrés hídrico basándose en la relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la diferencia de temperatura entre el cultivo y el aire ($T_c - T_a$). Se observó que la relación creciente del límite superior (LS) con el DPV indica un mayor nivel de estrés hídrico a medida que aumenta el DPV. En contraste, el límite inferior (LI) mostró una relación negativa con el DPV.
2. Se observaron diferencias significativas en el CWSI entre los regímenes de riego de inundación continua (IC) y alternancia de humedecimiento y secado (AWD). Los cultivos bajo riego AWD mostraron valores más altos de CWSI, sugiriendo mayor estrés hídrico en comparación con IC. Factores como la humedad ambiental y la radiación solar también influyeron en los niveles de estrés.
3. Los datos recopilados sobre conductancia estomática (G_s) y el índice de estrés hídrico del cultivo (CWSI) revelaron una relación inversa significativa entre ambos parámetros. A medida que el CWSI aumentaba, indicando un mayor estrés hídrico en el cultivo, la conductancia estomática disminuía. Esto demuestra la sensibilidad de la G_s a las condiciones de estrés hídrico en los cultivos de arroz. El coeficiente de determinación (R^2) de 0,83 refleja una fuerte correlación entre estas variables.

VI. RECOMENDACIONES

1. Aumentar la frecuencia de los vuelos de UAV y ampliar su aplicación a más campos de arroz para obtener una mayor representación de la variabilidad dentro de estos terrenos. La integración de estos datos con información satelital podría proporcionar a los agricultores acceso en tiempo real a datos sobre sus cultivos. Además, es esencial realizar una evaluación económica para determinar la rentabilidad de estas tecnologías.
2. La integración de imágenes térmicas de los UAV y los planos de CWSI en la agricultura representa una excelente oportunidad para mejorar las prácticas de riego y gestión de cultivos en los campos de arroz. Estas tecnologías permiten la aplicación de métodos de riego específicos adaptados a las necesidades únicas de cada campo, optimizando el consumo de agua y mejorando la productividad del cultivo.
3. Utilizar cuatro coberturas para la calibración de imágenes térmicas con el fin de reducir el tiempo de recopilación de datos sin comprometer significativamente la precisión. El uso de múltiples coberturas, aunque mejoró la precisión, generó solo una diferencia mínima en comparación con el uso de nueve coberturas. Esto sugiere que es posible optimizar el proceso de calibración sin perder precisión significativa.
4. La adopción de cámaras térmicas avanzadas, junto con una estrategia optimizada de recopilación de datos, permitirá a los agricultores obtener información más precisa y detallada sobre las condiciones de sus cultivos. Esto mejorará la eficiencia en la gestión del riego y reducirá el estrés hídrico en los campos de arroz, contribuyendo así a un manejo más sostenible y rentable de los cultivos.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Albrizio, R., Puig, A., Sellami, M.H., Guida, G., Basile, A., Bonfante, A., Gambuti, A. & Giorio, P. (2023). Water stress, yield, and grape quality in a hilly rainfed “Aglanico” vineyard grown in two different soils along a slope. *Agricultural Water Management*, 279, 108183. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2023.108183>
- Arouna, A., Dzomeku, I.K., Shaibu, A.G. & Nurudeen, A.R. (2023). Water management for sustainable irrigation in rice (*Oryza sativa* L.) Production: A Review. *Agronomy*, 13(6), 1522. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY13061522>
- Barnaby, J.Y., Rohila, J.S., Henry, C.G., Sicher, R.C., Reddy, V.R. & McClung, A.M. (2019). Physiological and metabolic responses of rice to reduced soil moisture: relationship of water stress tolerance and grain production. *International Journal of Molecular Sciences*, 20(8), 1846. <https://doi.org/10.3390/IJMS20081846>
- Caldas, J.F., Lizárraga, A.D. y Vásquez, H. (2020, February 28). *Guía técnica: Manejo del cultivo de arroz bajo el sistema de riego con secas intermitentes en las regiones de Tumbes, Piura, Lambayeque y la Libertad*. Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA. Recuperado de <https://pgc-snia.inia.gob.pe:8443/jspui/handle/inia/1053>
- Dong, J., Wu, L., Zeng, W., Xiao, X. & He, J. (2024). Analysis of spatial-temporal trends and causes of vapor pressure deficit in China from 1961 to 2020. *Atmospheric Research*, 299, 107199. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2023.107199>
- Durán, M. (2018). Caracterización de índice de estrés hídrico del cultivo de arroz mediante el uso de sensores térmicos y de humedad del suelo en La Molina (Tesis de pregrado). Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3633>
- Durán, M., Ramos, L., Altamirano, L. & Arapa, J. (2021). Thermal imaging and thermocouple sensors for estimating water stress index of rice cultivation under drip irrigation. *Idesia (Arica)*, 39(1), 109–118. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000100109>

- Echegaray, I., Cruz, L., Ramos, L., Bonilla, M., Heros, E. & Flores del Pino, L. (2024). Effect of Alternate Wetting and Drying on the Emission of Greenhouse Gases from Rice Fields on the Northern Coast of Peru. *Agronomy* 2024, Vol. 14, Page 248, 14(2), 248. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY14020248>
- FAO (Food and Agriculture Organization). (2023). *Food Outlook – Biannual report on global food markets*. FAO. <https://n9.cl/xvrzbu>
- Fitriyah, A., Fatikhunnada, A., Okura, F., Nugroho, B.D.A. & Kato, T. (2019). Analysis of the drought mitigated mechanism in terraced paddy fields using CWSI and TVDI indices and hydrological monitoring. *Sustainability*, 11(24), 6897. <https://doi.org/10.3390/SU11246897>
- Gao, M.C., Zhang, W.Z., Han, Y.D., Yao, C., Wang, Y.T. & Ding, G.H. (2013). A Theoretical Model Research of Rice Water Stress Index Based on Automated Infrared Thermal Imaging. *Advanced Materials Research*, 712–715, 433–438. <https://doi.org/10.4028/WWW.SCIENTIFIC.NET/AMR.712-715.433>
- Gates, D.M. (1968). Transpiration and leaf temperature. *Annual Review of Plant Biology*, 19(Volume 19, 1968), 211–238. <https://doi.org/10.1146/ANNUREV.PP.19.060168.001235>
- Godson, S., Kato, T., y Katsura, K. (2022). Empirical setting of the water stressed baseline increases the uncertainty of the crop water stress index in a humid temperate climate in different water regimes. *Water*, 14(12), 1833. <https://doi.org/10.3390/W14121833/S1>
- Gonzalez, V. & Zarco, P. (2022). Assessing the impact of measurement errors in the calculation of CWSI for characterizing the water status of several crop species. *Irrigation Science*, 42(3), 431–443. <https://doi.org/10.1007/S00271-022-00819-6>
- Heros, E., Lozano, F. & Casas, A. (2020). Technologies for rice production: recommendations for Peru based on scientific research. *South Sustainability*, 4(1), 1–4. <https://doi.org/10.21142/SS-0401-2023-E069>
- Hoffmann, H., Jensen, R., Thomsen, A., Nieto, H., Rasmussen, J. & Friborg, T. (2016). Crop water stress maps for an entire growing season from visible and thermal UAV imagery. *Biogeosciences*, 13(24), 6545–6563. <https://doi.org/10.5194/BG-13-6545-2016>
- Huang, H., Yang, A., Tang, Y., Zhuang, J., Hou, C., Tan, Z., Dananjayan, S., He, Y., Guo, Q. & Luo, S. (2021). Deep color calibration for UAV imagery in crop monitoring using semantic style transfer with local to global attention. *International Journal of*

- Applied Earth Observation and Geoinformation*, 104, 102590.
<https://doi.org/10.1016/J.JAG.2021.102590>
- Hussain, T., Hussain, N., Ahmed, M., Nualsri, C. & Duangpan, S. (2021). Responses of lowland rice genotypes under terminal water stress and identification of drought tolerance to stabilize rice productivity in southern thailand. *Plants*, 10(12), 2565.
<https://doi.org/10.3390/PLANTS10122565/S1>
- Hussain, T., Hussain, N., Tahir, M., Raina, A., Ikram, S., Maqbool, S., Fraz Ali, M. & Duangpan, S. (2022). Impacts of drought stress on water use efficiency and grain productivity of rice and utilization of genotypic variability to combat climate change. *Agronomy*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/agronomy12102518>
- Idso, S.B. (1982). Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. *Agricultural Meteorology*, 27(1–2), 59–70.
[https://doi.org/10.1016/0002-1571\(82\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(82)90020-6)
- Idso, S.B., Jackson, R.D., Pinter, P.J., Reginato, R.J. & Hatfield, J.L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24(C), 45–55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- INIA (Instituto Nacional de Innovación Agraria). (15 de julio de 2021). *INIA 515 - CAPOTEÑA*. Instituto Nacional de Innovación Agraria. Recuperado de <https://pgc-snia.inia.gob.pe:8443/jspui/handle/20.500.12955/1529>
- Jackson, R.D., Reginato, R.J., & Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, 13(3), 651–656.
<https://doi.org/10.1029/WR013I003P00651>
- Katimbo, A., Rudnick, D.R., DeJonge, K.C., Lo, T.H., Qiao, X., Franz, T.E., Nakabuye, H.N. & Duan, J. (2022). Crop water stress index computation approaches and their sensitivity to soil water dynamics. *Agricultural Water Management*, 266, 107575.
<https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.107575>
- Khorsandi, A., Hemmat, A., Mireei, S.A., Amirfattahi, R. & Ehsanzadeh, P. (2018). Plant temperature-based indices using infrared thermography for detecting water status in sesame under greenhouse conditions. *Agricultural Water Management*, 204, 222–233.
<https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2018.04.012>
- López, R., Arteaga, R., Vázquez, M.A., López, I. & Sánchez, I. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica En México*, 35(1), 97–111.

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0568-25172009000100010y&lng=es&synrm=isoy&lng=es

- Luan, Y., Xu, J., Lv, Y., Liu, X., Wang, H., y Liu, S. (2021). Improving the performance in crop water deficit diagnosis with canopy temperature spatial distribution information measured by thermal imaging. *Agricultural Water Management*, 246, 106699. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2020.106699>
- Machaca, R., Pino, E., Ramos, L., Quille, J. & Torres, A. (2022). Estimation of evapotranspiration for irrigation purposes in real time of an olive grove from drone images in arid areas, case of La Yarada, Tacna, Peru. *Idesia (Arica)*, 40(2), 55–65. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000200055>
- Mallareddy, M., Thirumalaikumar, R., Balasubramanian, P., Naseeruddin, R., Nithya, N., Mariadoss, A., Eazhilkrishna, N., Choudhary, A.K., Deiveegan, M., Subramanian, E., Padmaja, B. & Vijayakumar, S. (2023). Maximizing water use efficiency in rice farming: a comprehensive review of innovative irrigation management technologies. *Water*, 15(10), 1802. <https://doi.org/10.3390/W15101802>
- Mangus, D.L., Sharda, A., y Zhang, N. (2016). Development and evaluation of thermal infrared imaging system for high spatial and temporal resolution crop water stress monitoring of corn within a greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture*, 121, 149–159. <https://doi.org/10.1016/J.COMPAG.2015.12.007>
- MIDAGRI (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego). (2023). *Productive and competitive profile of the main crops in the sector*. MIDAGRI. https://siea.midagri.gob.pe/portal/siea_bi/index.html
- Mohapatra, P.K., y Sahu, B.B. (2022). Botany of Rice Plant. *Panicle Architecture of Rice and Its Relationship with Grain Filling*, 27–48. https://doi.org/10.1007/978-3-030-67897-5_2
- Monteith, J., y Unsworth, M. (2013). Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere: Fourth Edition. *Principles of Environmental Physics: Plants, Animals, and the Atmosphere: Fourth Edition*, 1–401. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-66393-0>
- Parthasarathi, T., Vanitha, K., Mohandass, S. & Vered, E. (2018). Evaluation of drip irrigation system for water productivity and yield of rice. *Agronomy Journal*, 110(6), 2378–2389. <https://doi.org/10.2134/AGRONJ2018.01.0002>
- Porrás, R., Ramos, L., Ojeda, W. & Ontiveros, R. (2020). Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation

- in the coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 309–321. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>
- Price, A.H., Norton, G.J., Salt, D.E., Ebenhoeh, O., Meharg, A.A., Meharg, C., Islam, M. R., Sarma, R.N., Dasgupta, T., Ismail, A.M., McNally, K.L., Zhang, H., Dodd, I.C. & Davies, W.J. (2013). Alternate wetting and drying irrigation for rice in Bangladesh: Is it sustainable and has plant breeding something to offer? *Food and Energy Security*, 2(2), 120–129. <https://doi.org/10.1002/FES3.29>
- Qi, Y., Zhang, Q., Hu, S., Wang, R., Wang, H., Zhang, K., Zhao, H., Zhao, F., Chen, F., Yang, Y., Tang, G. & Hu, Y. (2023). Applicability of stomatal conductance models comparison for persistent water stress processes of spring maize in water resources limited environmental zone. *Agricultural Water Management*, 277, 108090. <https://doi.org/10.1016/J.AGWAT.2022.108090>
- Sandhu, N., Singh, V. & Sihag, M.K. (2019). Genomic Footprints Uncovering Abiotic Stress Tolerance in Rice. *Advances in Rice Research for Abiotic Stress Tolerance*, 737–753. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814332-2.00036-8>
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología). (2024). *Efecto del ciclón Yaku y su recorrido*. Recuperado de <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/efecto-ciclón-yaku-recorrido>
- Shafi, S., Shafi, I., Zaffar, A., Zargar, S.M., Shikari, A.B., Ranjan, A., Prasad, P.V.V. & Sofi, P.A. (2023). The resilience of rice under water stress will be driven by better roots: Evidence from root phenotyping, physiological, and yield experiments. *Plant Stress*, 10, 100211. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2023.100211>
- Simbeye, D.S., Mkiramweni, M.E., Karaman, B. & Taskin, S. (2023). Plant water stress monitoring and control system. *Smart Agricultural Technology*, 3, 100066. <https://doi.org/10.1016/J.ATECH.2022.100066>
- Surendran, U., Raja, P., Jayakumar, M. & Subramoniam, S.R. (2021). Use of efficient water saving techniques for production of rice in India under climate change scenario: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 309, 127272. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127272>
- Torres, A. (2017). Vicarious calibration of sUAS microbolometer temperature imagery for estimation of radiometric land surface temperature. *Sensors*, 17(7), 1499. <https://doi.org/10.3390/S17071499>

- Vega, E. y Mejía, J. (2017). Desempeño del *Phaseolus vulgaris* bajo riego parcial cultivado en un sistema de respuesta hidrogravitropica. *Scientia Agropecuaria*, 8(2), 137–147. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2017.02.06>
- Villar, H., Ramos, L. & Alminagorta, O. (2021). Water stress assessment of rice crop (IR 71706) using improved and calibrated thermography of the canopy in Lima, Peru. *Idesia (Arica)*, 39(4), 59–70. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292021000400059>
- Visitacion, G.J., Saludes, R.B., Luyun, R.A., Pinca, Y.M.M. & Eusebio, M.F.V. (2022). Statistical analysis of crop water stress in rainfed rice (*Oryza sativa* L.) using spectral and non-spectral indices. *Philippine Journal of Science*, 151(2), 587–603. <https://doi.org/10.56899/151.02.04>
- Wen, T., Li, J.H., Wang, Q., Gao, Y.Y., Hao, G.F. & Song, B.A. (2023). Thermal imaging: The digital eye facilitates high-throughput phenotyping traits of plant growth and stress responses. *Science of The Total Environment*, 899, 165626. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2023.165626>
- Xu, J., Lv, Y., Liu, X., Dalson, T., Yang, S. & Wu, J. (2016). Diagnosing crop water stress of rice using infrared thermal imager under water deficit condition. *International Journal of Agriculture and Biology*, 18, 565–572. <https://doi.org/10.17957/IJAB/15.0125>
- Yang, J., Zhou, Q. & Zhang, J. (2017). Moderate wetting and drying increases rice yield and reduces water use, grain arsenic level, and methane emission. *The Crop Journal*, 5(2), 151–158. <https://doi.org/10.1016/J.CJ.2016.06.002>

VIII. ANEXOS

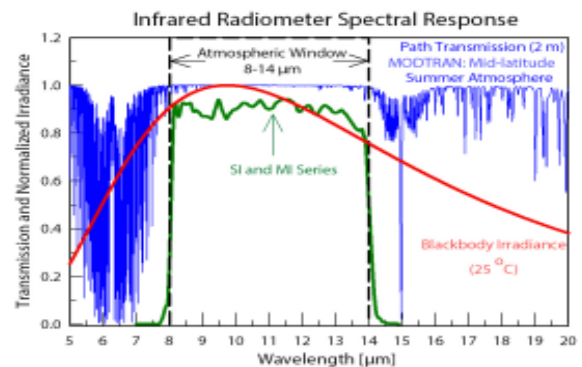
ANEXO 1: CALIBRACIÓN DEL RADIÓMETRO APOGEE MI-210



INFRARED RADIOMETER METERS MI-200 Series



Spectral Response



Above: Spectral response of SI series infrared radiometers. Spectral response (green line) is determined by the germanium filter and corresponds closely to the atmospheric window of 8 to 14 μm , minimizing interference from atmospheric absorption/emission bands (blue line) below 8 μm and above 14 μm . Typical terrestrial surfaces have temperatures that yield maximum radiation emission within the atmospheric window, as shown by the blackbody curve for a radiator at 25 C (red line).

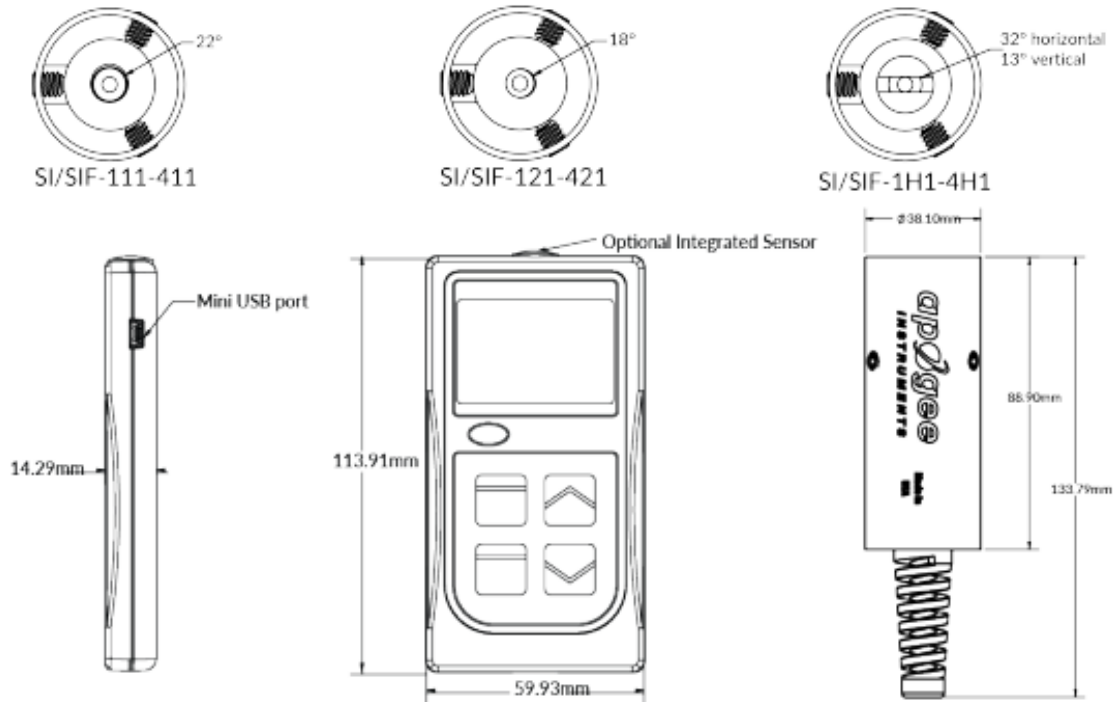
Product Specifications

	MI-210	MI-220	MI-2H0
Measurement Range	-60 to 110 C *Uncertainty has been determined for ranges below		
Calibration Uncertainty (-30 to 65 C), when target and detector ΔT are <20 C	0.2 C		0.2 C
Calibration Uncertainty (-40 to 80 C), when target and detector ΔT are >20 C	0.5 C		0.5 C
Measurement Repeatability	Less than 0.05 C		
Long-term Drift	Less than 2 % change in slope per year when germanium filter is maintained		
Response Time	0.6 s, time for detector signal to reach 95 % following a step change; meter firmware averaging results in a 3 s response for digital output on meter screen		
Field of View (half-angle)	22°	18°	32° horizontal; 13° vertical
Spectral Range	8 to 14 μm ; atmospheric window		
Operating Environment	0 to 50 C; less than 90 % non-condensing relative humidity up to 30 C; less than 70 % non-condensing relative humidity from 30 to 50 C		
Meter Dimensions	126 mm length, 70 mm width, 24 mm height		
Sensor Dimensions	23 mm diameter, 60 mm length		
Cable	2 m of four conductor, shielded, twisted-pair wire; additional cable available; TPR jacket (high water resistance, high UV stability, flexibility in cold conditions)		
Mass	270 g (with radiation shield)		
Warranty	4 years against defects in materials and workmanship		

Calibration Traceability

Apogee Instruments' MI series infrared temperature meters are calibrated to the temperature of a custom blackbody cone held at multiple fixed temperatures over a range of radiometer (detector/sensor body) temperatures. The temperature of the blackbody cone is measured with replicate precision thermistors thermally bonded to the cone surface. The precision thermistors are calibrated for absolute temperature measurement against a platinum resistance thermometer (PRT) in a constant temperature bath. The PRT calibration is directly traceable to the National Institute of Standards and Technology (NIST).

Dimensions



Features

TYPICAL APPLICATIONS

- Plant water status estimation
- Road surface temperature measurement for determination of icing conditions
- Terrestrial surface (soil, vegetation, water, snow) temperature measurement in energy balance studies

OUTPUT OPTIONS

- Analog response
- SDI-12
- Hand-held meter

HIGH ACCURACY

Calibrated to a custom black-body cone with a measurement uncertainty of ± 0.2 C from -30 to 65 C when the sensor temperature is within 20 C of the target. Radiometers are only sensitive to wavelengths from 8 to 14 μm to minimize the influence of water vapor and CO_2 on the measurement.

RUGGED HOUSING

Anodized aluminum body with fully-potted electronics. The outer radiation shield reduces thermal fluctuations.

Rev 9-Aug-2022