



Termografía infrarroja para medir índice de estrés hídrico en cultivares de palto (*Persea americana* M.)*

Infrared thermography as a tool for measuring water stress index in avocado cultivars (*Persea americana* M.)

Lia Ramos-Fernández¹, Malú Massiel Galindo-Sánchez², Herbert Núñez-Alfaro³, Erick Espinoza-Núñez⁴, Edwin Pino-Vargas⁵, Sandra del Águila-Ríos³

* Recepción: 16 de noviembre, 2023. Aceptación: 15 de julio, 2024. Este trabajo formó parte del proyecto “Uso de la teledetección en el seguimiento del cultivo de palto con menor consumo de agua, EEA CANAÁN – Ayacucho, 2022”. Contrato N° PE501080842-2022-Prociencia.

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina. Departamento de Recursos Hídricos. Lima, Perú. liarf@lamolina.edu.pe (autora para la correspondencia; <https://orcid.org/0000-0003-3946-7188>).

² Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. Facultad de Ciencias Agrarias. Ayacucho, Perú. malu.galindo.21@unsch.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0002-9040-1427>).

³ Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga. Departamento de Agronomía y Zootecnia. Ayacucho, Perú. herbert.nunez@unsch.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0001-8053-5950>); sandra.delaguila@unsch.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0001-8051-3575>).

⁴ Universidad Nacional Agraria La Molina. Departamento de Horticultura. Lima, Perú. eespinoza@lamolina.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0003-4579-8135>).

⁵ Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Departamento de Ingeniería Civil. Tacna, Perú. epinov@unjbg.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>).

Resumen

Introducción. El cultivo de palto es susceptible al estrés hídrico durante la etapa de floración y el crecimiento inicial de los frutos. Este estrés puede ocasionar la caída prematura de los frutos y acentuar la alternancia en la producción. **Objetivo.** Determinar el índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC) en tres cultivares de palto (Hass, Fuerte y Zutano) bajo diferentes condiciones de riego, mediante el empleo de termografía infrarroja. **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en la temporada de otoño del 2023, en la Estación Experimental Agraria Canaán, Ayacucho, Perú. Se seleccionaron 170 árboles de palto de cuatro años en fase reproductiva. Se llevaron a cabo cinco evaluaciones bajo diferentes condiciones de riego, donde se recopiló información después de 14 y 7 días sin riego (SR-14d y SR-7d) y 12, 2 y 1 hora posterior al riego (DR-12h, DR-2h y DR-1h, respectivamente). Se registró la temperatura de las hojas (Th), la conductancia estomática (gs), la humedad del suelo (θ) y el IEHC. **Resultados.** Los tres cultivares evaluados en este estudio presentaron diferencias significativas de la Th según manejo del riego. Estas variaciones, influenciadas por la temperatura y humedad ambiental, establecieron umbrales de estrés que definieron el IEHC en un rango de 0,34 a 0,96. Al relacionar el IEHC con la gs y θ se obtuvieron valores de $R^2 = 0,51$ y $R^2 = 0,61$, respectivamente. El cultivar Zutano mostró el valor más alto de IEHC en períodos prolongados de restricción de riego y tuvo una baja capacidad para reducir estos valores tras la rehidratación, a diferencia de los otros cultivares. **Conclusiones.** Se demostró que la termografía infrarroja puede medir eficazmente el IEHC en cultivares de palto, con variaciones significativas observadas en la Th, según la condición de riego. Además, el cultivar Zutano fue el que presentó la menor capacidad de recuperación ante el estrés hídrico.

Palabras claves: conductancia estomática, estrés abiótico, humedad del suelo, déficit de presión de vapor.



Abstract

Introduction. Avocado cultivation is susceptible to water stress during the flowering stage and initial fruit growth. This stress can cause premature fruit drop and accentuate the alternation in production. **Objective.** To determine the crop water stress index (CWSI) in three avocado cultivars (Hass, Fuerte, and Zutano) under different irrigation conditions using infrared thermography. **Materials and methods.** The study was conducted in the autumn of 2023, at the Estación Experimental Agraria Canaán, Ayacucho, Peru. A total of 170 four-year-old avocado trees in the reproductive phase were selected. Five evaluations were carried out under different irrigation conditions, where data was collected after 14 and 7 days without irrigation (WI-14d and WI-7d) and at 12, 2, and 1 hour post-irrigation (AI-12h, AI-2h, and AI-1h, respectively). Leaf temperature (T_h), stomatal conductance (gs), soil moisture (θ), and CWSI were recorded. **Results.** The three evaluated cultivars showed significant differences in T_h depending on the irrigation management. These variations, influenced by ambient temperature and humidity, established stress thresholds that defined the CWSI within a range of 0.34 to 0.96. By correlating the CWSI with gs and θ , values of $R^2 = 0,51$ y $R^2 = 0,61$ were obtained, respectively. The Zutano cultivar exhibited the highest CWSI values during prolonged water restriction periods and showed a limited ability to reduce these values after rehydration, differing from the other cultivars. **Conclusions.** Infrared thermography proved to be an effective tool for measuring the CWSI in avocado cultivars, revealing significant variations in T_h based on irrigation conditions. Additionally, the Zutano cultivar was the least resilient to water stress.

Keywords: stomatal conductance, abiotic stress, soil water content, vapor pressure deficit.

Introducción

El palto o aguacate (*Persea americana* M.) es un árbol frutal que ha tenido una expansión significativa a diversas zonas. Esto se debe en parte a la capacidad del árbol de adaptarse a diferentes condiciones climáticas y edáficas, lo que ha permitido su cultivo en regiones diversas (Chanderbali et al., 2008; Rohwer, 1993). Es originario de las zonas tropicales altas, pero el establecimiento del cultivo se ha adaptado a regiones subtropicales cálidas, húmedas y regiones desérticas (Schaffer et al., 2013). Su fruto es apreciado a nivel nutricional debido al alto contenido de ácidos grasos monoinsaturados, así como su riqueza en minerales, vitaminas y antioxidantes (Vivero et al., 2019).

La producción en el Perú se ha incrementado de 455 394 toneladas métricas (t) en 2016 a 778 790 t en 2021, con una proyección de la producción nacional de 973 000 t para el año 2024 (Flores-Izquierdo et al., 2023). El país destaca como el tercer productor mundial de paltos, después de México y Colombia, con aportes en el mercado del 9 % (Food and Agriculture Organization, n.d.). Esta producción genera ingresos significativos a los agricultores y al país, gracias a la creciente demanda internacional que ha generado precios favorables para los productores (Anyosa Gutiérrez, 2019).

Una de las razones que explican el éxito de su producción es el clima de las principales regiones productoras (Instituto de Desarrollo y Medio Ambiente, 2016), el cual se considera adecuado para el desarrollo del cultivo (Schaffer et al., 2013). Sin embargo, Perú es uno de los países con mayor vulnerabilidad ante cambios climáticos extremos (Lozano-Povis et al., 2021; Vargas, 2009), que ha llevado a fluctuaciones en la disponibilidad de agua en el suelo, lo que afecta de forma negativa la producción agrícola (Lal et al., 2012). En el valle de Ayacucho, se han registrado períodos prolongados de sequía y escasez de agua, que provoca disminución en la producción de palta de los pequeños y medianos productores (Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2021).

Los eventos climáticos extremos causan estrés en los cultivos y esto perjudica su desarrollo y capacidad de realizar fotosíntesis (Varela, 2010). En el caso del cultivo del palto, variables como la luz, la temperatura del aire, el agua, la salinidad y el dióxido de carbono, tienen un impacto significativo en su fisiología, crecimiento y desarrollo (Schaffer et al., 2013). La disponibilidad de luz en rangos de longitudes de onda de 400 a 700 nm es necesaria para la fotosíntesis, si se lleva a cabo de manera óptima a temperaturas ambientales entre 20 y 30 °C (Schaffer et al., 2013). Además, la humedad relativa (HR) también influye en la fotosíntesis, ya sea a través de la conductividad estomática o de otros factores no estomáticos (Schulze, 1986). Altas temperaturas y baja humedad relativa pueden provocar el cierre estomático e inducir el estrés oxidativo debido a la producción descontrolada de especies reactivas de oxígeno (ROS). Esto puede alterar la eficiencia fotosintética, así como el crecimiento y desarrollo de las plantas (Azcón-Bieto & Talón, 2013).

La interacción de la temperatura ambiental y la humedad relativa permite definir el déficit de presión de vapor (DPV) de agua (Allen et al., 2006; Anderson, 1936). El DPV es un índice clave que afecta la transpiración, fotosíntesis y absorción de agua en las plantas durante su crecimiento (Serrano-Pérez & Sandoval-Villa, 2023). Se ha postulado que podría ser una variable importante para analizar las dinámicas de las plantas ante cambios significativos generados por el cambio climático (Parada-Molina et al., 2022). Además, en conjunto con la temperatura de las hojas, se utiliza el índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC), como un indicador que proporciona información sobre el grado de estrés hídrico en los cultivos en campo (Ashan Salgadoe et al., 2019). Este índice se expresa en forma de un valor numérico o una escala, donde valores altos indican niveles de estrés hídrico más elevados (López López et al., 2009).

En la agricultura, se utilizan imágenes térmicas obtenidas a partir de sensores infrarrojos acoplados en drones, para medir la temperatura de las hojas (T_h) (Ríos-Hernández, 2021; Wen et al., 2023). Estas imágenes, basadas en la radiación de onda larga emitida por las plantas, se utilizan para evaluar el estrés hídrico que se refleja en las variaciones de la T_h de las plantas (Pineda et al., 2021). Además, ofrecen oportunidades para la selección de variedades tolerantes a condiciones adversas como la sequía, salinidad o frío (Pineda et al., 2021; Wen et al., 2023). La utilización de imágenes para determinar el estrés hídrico de cultivos se ha extendido en los últimos años y ha mostrado buenos resultados en cultivos frutales (Quezada et al., 2020; Ucak et al., 2024). Al utilizar una cámara térmica infrarroja sobre árboles de palto, se han obtenido valores normalizados del índice de estrés (Δ IEHC) en el rango de 0,04 a 0,18 en clima subtropical húmedo, bajo riego por aspersión (Ashan Salgadoe et al., 2019). Mientras que, en el caso de árboles de lima, Mira-García et al. (2022) utilizaron radiómetros infrarrojos y obtuvieron un rango de IEHC de 0,1 a 1,1. Además, se han empleado cámaras térmicas para determinar el IEHC en cultivos de olivo (Sánchez-Piñero et al., 2022) y cereza (Blaya-Ros et al., 2021).

Los valores de IEHC desempeñan un papel fundamental en la determinación del umbral de estrés hídrico que una planta o cultivo puede tolerar antes que su rendimiento se vea afectado. El uso de imágenes térmica para su determinación permite tener información en tiempo real para la programación del riego de manera precisa. En este contexto, la termografía infrarroja se presenta como un método valioso para identificar y evaluar el estado hídrico de los cultivos. Por consiguiente, el objetivo principal de este estudio fue determinar el IEHC en tres cultivares de palto (Hass, Fuerte y Zutano) bajo diferentes condiciones de riego, mediante el empleo de termografía infrarroja.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

El estudio se realizó en la Estación Experimental Agraria (EEA Canaán - Ayacucho), del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), en el centro poblado de Huanchacc, distrito Luricocha, provincia Huanta y región

Ayacucho, Perú ($12^{\circ} 55' 28''$ LS, $74^{\circ} 17' 42''$ LO y 2351 m s. n. m.). El clima es seco semicálido, según la clasificación de Köppen (García, 2004). La temperatura media anual es de 18°C , con valor máximo de 33°C y mínimo de 4°C . La precipitación varía de 205 a 375 mm/año, y la evapotranspiración potencial alcanza valores de 1028 mm/año.

Para llevar a cabo el estudio se seleccionó una plantación de palto con tres cultivares: Hass, Fuerte y Zutano, de cuatro años de edad en fase reproductiva, con un marco de plantación de 6,0 m entre líneas x 5,5 m entre plantas. De la plantación se seleccionaron a 170 plantas en la etapa fenológica de floración (Figura 1).

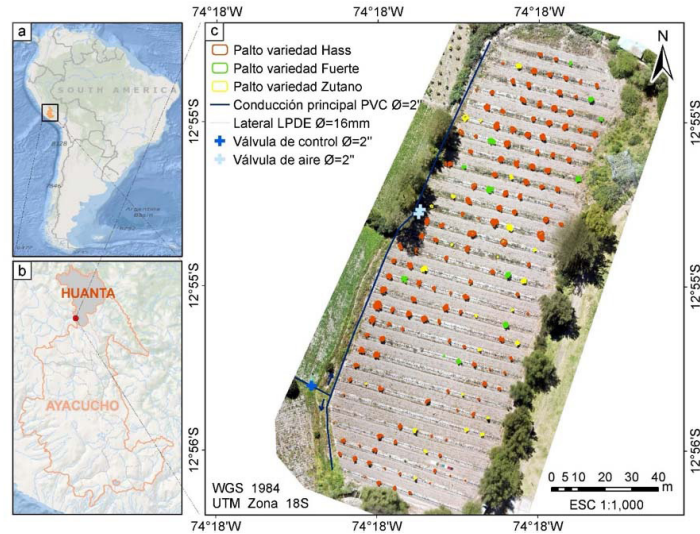


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio: (a) regional, (b) provincial y (c) detalle de plantación de los árboles de palto (*Persea americana* M.) en la Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

Figure 1. Location of the study site: (a) regional, (b) provincial, and (c) detail of the avocado (*Persea americana* M.) tree plantation at the Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

Manejo del riego

La Estación Experimental Agraria (EEA) obtiene su suministro de agua del Sector Hidráulico Mayor Cachi que proviene de la represa de Cuchoquesera. El agua se almacena en un reservorio de $135,5\text{ m}^3$, que se utiliza para distribuir el líquido al cultivo de palto mediante un sistema riego por goteo. La distribución se lleva a cabo a través de una tubería principal de PVC de dos pulgadas de diámetro. Esta tubería está regulada por dos válvulas que se encuentran en una caja de control situada en la salida del reservorio; alimenta a treinta tuberías laterales de polietileno de baja densidad (LPDE) de 16 mm de diámetro ($\phi = 16\text{ mm}$) distanciadas cada 5,5 m. Se colocaron una lateral por línea de plantación y dos emisores de gotero regulable por árbol, cada uno con capacidad de descarga de $4,2\text{ L h}^{-1}$.

En las zonas productoras de palta en el valle de Ayacucho, las plantaciones dependen del agua de las lluvias entre enero y marzo. A partir de abril se realiza riego con una frecuencia de 7 a 14 días en cultivo de palto (Tineo Canchari et al., 2018), con base en la disponibilidad de agua, que suele ser limitada. En la Estación Experimental Agraria Canaán, se administra riego entre 2 y 4 horas, con una lámina de agua que varía de 10 mm a 20 mm cada 7 días.

Con el objetivo de investigar las respuestas fisiológicas de los cultivares de palto, se aplicaron periodos de restricción del agua de riego por 14 y 7 días (SR-14d y SR-7d, respectivamente). Luego se realizó la rehidratación de los tres cultivares y se efectuaron mediciones a las 12, 2 y 1 horas después del riego (DR-12h, DR-2h y DR-1h, respectivamente) (Cuadro 1 y Figura 2). Durante estos cinco escenarios de riego, se capturaron imágenes aéreas (RGB y térmicas) con un dron (VANT) y se realizaron mediciones de conductancia estomática (gs) y humedad del suelo (θ).

Cuadro 1. Manejo de riego a intervalos de 14 (SR-14d) y 7 días de restricción de riego (SR-7d), con mediciones a las 12 (DR-12h), 2 (DR-2h) y 1 horas después del riego (DR-1h), en el cultivo de palto (*Persea americana* M.). Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria Ayacucho, Perú, 2023.

Table 1. Irrigation management at intervals of 14 days of water restriction (WI-14d), 7 days of water restriction (WI-7d), 12 hours after irrigation (AI-12h), 2 hours after irrigation (AI-2h), 1 hour after irrigation (AI-1h), in the avocado (*Persea americana* M.) crop. Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

Código	Condición de riego	Fecha
SR-14d	14 días de restricción de riego	26/04/2023
SR-7d	7 días de restricción de riego	18/05/2023
DR-12h	12 horas después del riego	27/04/2023
DR-2h	2 horas después del riego	19/05/2023
DR-1h	1 horas después del riego	19/05/2023

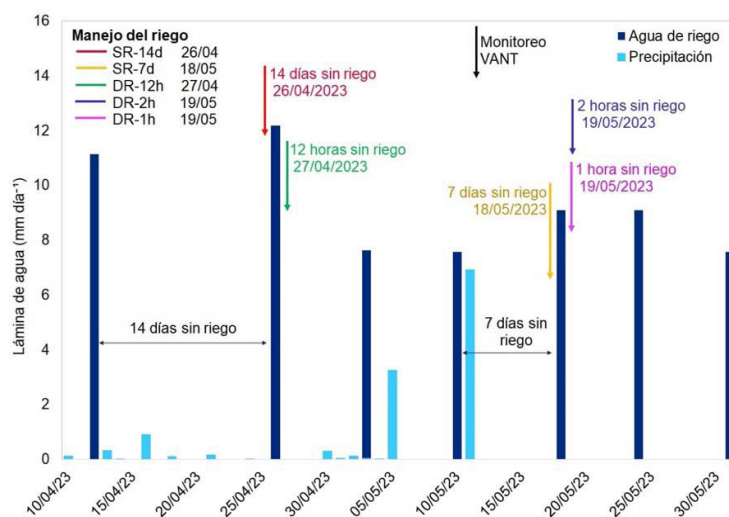


Figura 2. Lámina de agua de riego y precipitación durante el periodo de evaluación a los árboles de palto (*Persea americana* M.) en la Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 h después del riego, DR-2h: 2 h después del riego, DR-1h: 1 h después del riego.

Figure 2. Irrigation water depth and precipitation during the evaluation period of avocado (*Persea americana* M.) trees at the Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

Caracterización del suelo y agua

El tipo de suelo es Molisol (Knox, 1971) de textura franca cuyas características se presentan en el Cuadro 2. El agua de riego presentó un pH de 7,50, CE de 222,5 uS cm⁻¹, cationes: Ca²⁺ de 1,07; Mg²⁺ de 0,51; Na⁺ de 0,47; K⁺ de 0,20 meq/L, aniones: Cl⁻ de 0,54; HCO₃²⁻ de 1,68 meq/L. La clasificación del agua de riego es C1-S1, debido al bajo contenido de sodio y salinidad media, con una relación de absorción de sodio (RAS) de 0,529 (Olías et al., 2005).

Cuadro 2. Características físicas del suelo del cultivo de palto (*Persea americana* M.). Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria Ayacucho, Perú, 2023.

Table 2. Physical characteristics of the soil of the avocado crop (*Persea americana* M.). Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

Área	Textura del suelo	Textura del suelo			Densidad Aparente (g cm ⁻³)	Materia orgánica (%)	%			CIC (meq/100g)
		Arena (%)	Limo (%)	Arena (%)			P	K	N	
INIA-Canaán	Franco	35	50	15	1,19	3,10	7,18	727,3	0,16	7,1

Conductancia estomática, humedad del suelo y variables meteorológicas

La medición de la conductancia estomática (Figura 3) se realizó con un porómetro Decagon Modelo SC-1 (METER Group, Pullman, WA, USA). En este proceso, el cabezal del sensor se enganchó a la hoja bajo la presión del clip y la cámara secante se orientó en el envés de la hoja (Ashrafuzzaman et al., 2017). Se eligieron hojas desarrolladas de las ramas laterales situadas debajo de la rama líder en la copa del árbol de palto. Se realizaron tres repeticiones por cada medición, y cada lectura se realizó 30 s después de calibrar el equipo. Durante esta fase, se monitorearon en total veintinueve árboles, un árbol de palto por surco, el intervalo de medición fue de 3,5 horas, en el periodo del día en el que se presenta mayor actividad estomática (09:30 a.m. – 01:00 p.m.). Este periodo se seleccionó debido a que en investigaciones anteriores se ha medido la conductancia estomática en hojas de paltos entre las 10:00 a.m. y las 11:00 a.m. (Gil et al., 2009), y entre las 10:00 a.m. y las 12:00 p.m. (Lin et al., 2022), según su relación con la luz solar y las condiciones ambientales; asimismo en olivares, se ha registrado la medición entre las 11:00 a.m. y las 2:00 p.m. para estudiar la variación de la conductancia estomática durante las horas de mayor actividad solar (Pino et al., 2019).

La medición de la humedad del suelo se realizó con el sensor TDR-100 (reflectómetro en el dominio del tiempo), con lecturas a una profundidad de 20 cm debajo de la copa del árbol a 30 cm de su eje. Estas profundidades corresponden a las zonas donde se observa un mayor desarrollo y distribución de raíces del árbol palto (Salazar-García & Lazcano-Ferrat, 1999). Este sensor ofrece una precisión de $\pm 3,0\%$ en el contenido volumétrico de agua con conductividad eléctrica < 2 dS m⁻¹. Pevio a su uso, este sensor fue calibrado con muestras gravimétricas y densidad aparente del suelo para obtener valores de humedad volumétrica (θ), cuya ecuación de ajuste es $Y = 0,578x - 1,1199$ con un R² de 0,91 (Figura 4).

En paralelo, se utilizó la estación meteorológica portátil ATMOS 41, equipada con tecnología SDI-12, para transmitir los datos recopilados por los sensores ambientales al sistema de registro correspondiente. Esta estación meteorológica estaba conectada a un data logger del modelo ZL6. Los parámetros medidos incluyen velocidad del viento (m s⁻¹), temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), presión atmosférica (kPa), radiación solar (W m⁻²) y vapor de presión (kPa) con una resolución de 0,01 m s⁻¹, 0,1 °C, 0,1 %, 0,01 kPa, 1 W m⁻², 0,01 kPa, respectivamente.

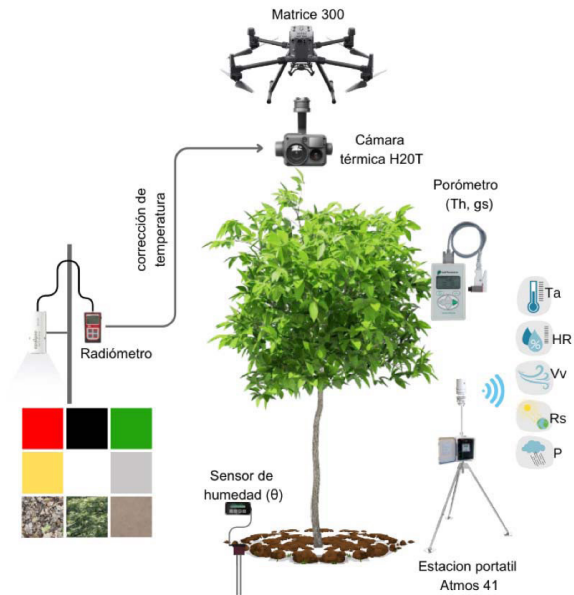


Figura 3. Sensores y equipos utilizados para la medición y recopilación de información en campo durante los monitoreos en el cultivo de palto (*Persea americana* M.) en la Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

Temperatura de la hoja, gs: Conductancia estomática, θ : Humedad del suelo, Ta: Temperatura del aire, HR: Humedad relativa, Vv: Velocidad del viento, Rs: Radiación solar y P: Precipitación.

Figure 3. Sensors and equipment used for field measurements and data collection in the field during monitoring of the avocado crop (*Persea americana* M.) at the Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

Th: Leaf temperature, gs: Stomatal conductance, θ : Soil water content, Ta: Air temperature, HR: Relative humidity, Vv: Wind speed, Rs: Radiation solar, and P: Precipitation.

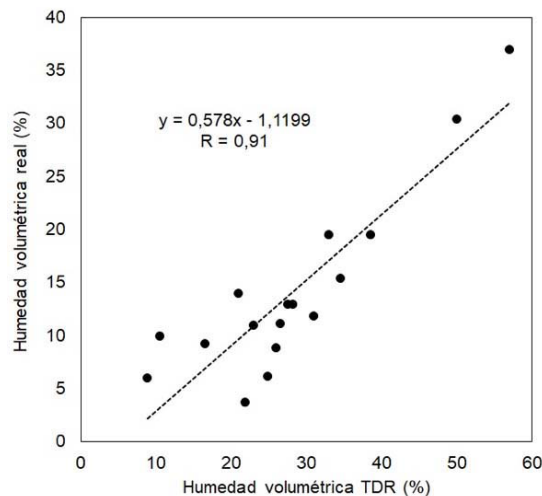


Figura 4. Calibración de las lecturas del sensor TDR 100 (varillas de 20 cm) con muestras gravimétricas y densidad aparente del suelo. Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

Figure 4. Calibration of TDR 100 sensor readings (20 cm rods) using gravimetric samples and soil bulk density. Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

Durante el monitoreo de la primera condición de riego SR-14d, se registró una variación en la temperatura del aire entre 27,9 y 26,5 °C, con una media de 27,1. En esta fecha, se observaron los valores más altos de temperatura y la humedad relativa más baja del ambiente, con una radiación solar superior a los 900 W m⁻². En las condiciones de riego subsiguientes, la temperatura del aire fluctuó entre 21 y 24 °C, con humedades relativas que oscilaron entre el 30 y el 45 %. No se registraron valores de humedad relativa superiores al 50 %, y la radiación fue menor a los 900 W m⁻² (Figura 5).

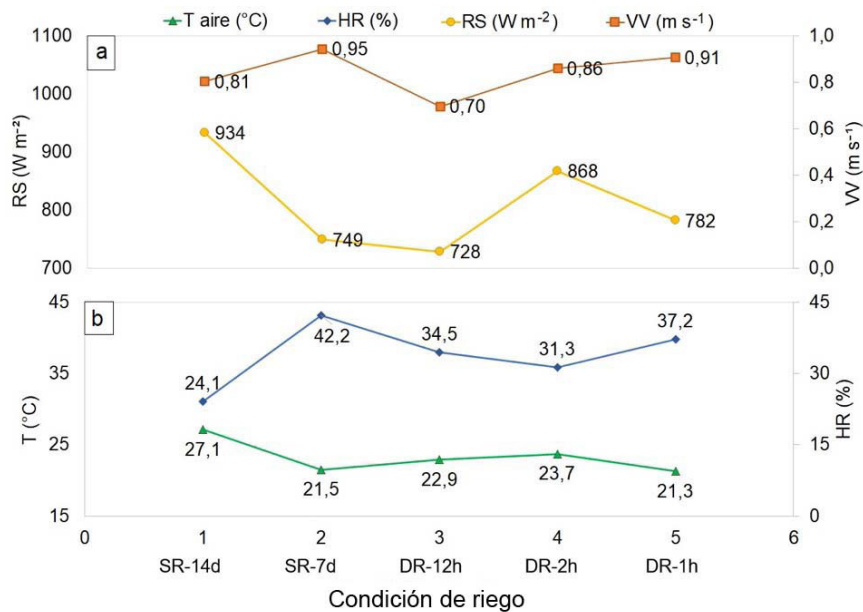


Figura 5. Variación de la radiación solar (RS), velocidad de viento (VV), temperatura del aire (T aire) y humedad relativa (HR) durante los días de monitoreo en árboles de palto (*Persea americana* M.) en la Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 h después del riego, DR-2h: 2 h después del riego, DR-1h: 1 h después del riego.

Figure 5. Variation in solar radiation (SR), wind speed (WS), air temperature (AT) and relative humidity (RH) during the monitoring days in avocado (trees *Persea americana* M.) at the Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

Toma y procesamiento de imágenes con termografía infrarroja mediante un vehículo aéreo no tripulado (VANT)

Se realizaron capturas de imágenes aéreas de la plantación de paltos con una cámara termográfica digital multifuncional modelo Zenmuse H20T (DJI, Shenzhen, China). Esta cámara tiene capacidad de capturar imágenes térmicas y ópticas en formatos RGB, TIF y radiométricos. Está equipada con un lente de 58 mm y puede adquirir imágenes a una frecuencia de 30 Hz. El rango de medición de temperatura abarca desde 8 hasta 14 μm, con resolución térmica de 640 x 512 píxeles. Ofrece una precisión de ± 2 °C o ± 2 %, medida a 25 °C en condiciones de laboratorio sin viento y a una distancia de 5 m del cuerpo negro.

La cámara termográfica H20T fue acoplada a un VANT cuadricóptero de la serie Matrice 300 RTK (DJI, Shenzhen, China). Para la georreferenciación de las imágenes se utilizaron cuatro puntos de control fotogramétricos, representados cada uno por un tablero dominó de 0,8 × 0,8 m de color blanco y negro, se cubrió con papel aluminio en la parte blanca para una mejor visibilidad en las imágenes térmicas. El plan de vuelo se configuró con la aplicación DJI Pilot y se realizaron vuelos a una altura de 70 m sobre el suelo con una velocidad constante de 1,5 m s⁻¹. Se capturaron imágenes térmicas con una resolución espacial de 2,5 cm/píxeles. Las capturas se llevaron a cabo entre las 09:30 a.m. y la 1:00 p.m., en días de cielo despejados con alta radiación solar para minimizar el efecto de sombreado, se realizó simultáneo con las mediciones de la conductancia estomática.

La temperatura de las imágenes térmicas se calibró con un radiómetro infrarrojo modelo Apogee MI-210 (Apogee Instruments, Utah, USA), con registro de datos en nueve coberturas (aluminio, hoja seca, hoja verde, poliestireno, tela amarilla, tela negra, tela roja, tela verde, suelo desnudo). Cada cobertura se dispuso en un marco de 1,0 x 1,0 m, se colectaron veintisiete lecturas por cobertura, para un total de 243 lecturas por cada monitoreo. Los datos se colectaron en simultáneo con los vuelos para lograr un mejor ajuste de la imagen térmica. Se realizaron cinco monitoreos en diferentes regímenes de riego (Figura 2).

El preprocesamiento de las imágenes térmicas se realizó con el software fotogramétrico Pix4Dmapper Pro (Pix4D S.A., Prilly, Switzerland), para la generación de los ortomosaicos y modelos de superficie digital (MSD). Se homogenizó el tamaño de píxeles a 2,5 cm mediante el remuestreo de los ortomosaicos. Se realizó una clasificación supervisada de las imágenes para obtener la máscara de vegetación por cada ortomosaico. Se obtuvieron un total de 170 máscaras de los árboles de cuatro años de edad en fase reproductiva. De cada máscara se obtuvo la temperatura media de la hoja (T_h).

Índice de estrés hídrico de cultivos (IEHC)

El índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC) se calculó con base en el modelo empírico (Idso et al., 1981) definido según la ecuación 1.

$$IEHC = \frac{(T_h - T_a) - (T_h - T_a)_{LI}}{(T_h - T_a)_{LS} - (T_h - T_a)_{LI}} \quad [1]$$

Donde, T_h es la temperatura de la hoja (°C) y T_a es la temperatura del aire (°C), $(T_h - T_a)_{LS}$ es el límite superior en condiciones de transpiración mínima o inexistente, $(T_h - T_a)_{LI}$ es el límite inferior que representa la condición sin estrés hídrico.

Los valores de $(T_h - T_a)_{LS}$ se determinan en función a las máximas diferencias de temperatura en °C y los valores de $(T_h - T_a)_{LI}$ se establecen a partir de la línea base del cultivo sin estrés, que se deriva de la relación lineal de la diferencia de temperaturas y el déficit de presión de vapor (VPD), según la ecuación 2.

$$(T_h - T_a)_{LI} = a DPV + b \quad [2]$$

Los coeficientes a y b están determinados por regresión lineal del diagrama de dispersión entre $(T_h - T_a)$ versus DPV. El DPV es la diferencia entre la presión de vapor de agua a saturación y presión actual de vapor, definido por la ecuación 3.

$$DPV = e_s - e_a \quad [3]$$

Donde, e_s es la presión de vapor de agua a saturación a una temperatura del aire dada, y e_a es la presión de vapor de agua actual (presión parcial de vapor de agua en la atmósfera) (Aguirre et al., 2021; López López et al., 2009). Los valores de e_s y e_a se estimaron según las ecuaciones 4 y 5.

$$e_s[T^\circ] = 0.611 \exp \left[\frac{17.27 T^\circ}{T^\circ + 237.3} \right] \quad [4]$$

$$e_a = HR \times \frac{e_s}{100} \quad [5]$$

Para obtener la ecuación 2, se colectaron mediciones de la plantación de palto durante una temporada de crecimiento específica (Gardner et al., 1992). El valor de IEHC cercano a 1 indica que el cultivo está bajo condiciones de estrés hídrico severo. Cuando el valor de IEHC se aproxima a 0, sugiere que el cultivo está bien regado y no está bajo un estrés hídrico significativo (Ekinzog et al., 2022).

Análisis de datos

Los datos recopilados fueron analizados mediante el software IBM SPSS Statistics (SPSS Inc., 24,0 Statistical package, Chicago, IL, USA). Primero se aplicó la prueba de Scheffé para investigar las diferencias significativas en la temperatura de la hoja (T_h) entre las distintas condiciones de riego. Luego se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo para determinar la media y la desviación estándar de T_h e IEHC. Se obtuvo el coeficiente de correlación de Pearson entre IEHC con g_s y con θ , con el fin de evaluar las relaciones existentes entre las variables del estudio.

Resultados

Calibración de imágenes térmicas

Los valores de la temperatura absoluta de la superficie, proporcionada por las imágenes aéreas de VANT, se calibraron mediante la regresión lineal entre los valores registrados con el radiómetro sobre las nueve coberturas para las condiciones ambientales de la zona de estudio. Se obtuvo una ecuación de corrección ($Y_{\text{radiómetro}} = 0,740 X_{H2OT} + 8,902$) cuyo coeficiente de Pearson® y error cuadrático medio (RMSE) fueron de 0,98 y 4,2 °C, respectivamente (Figura 6).

Umbral de temperatura con presencia de estrés hídrico (LS) y sin estrés hídrico (LI)

Los diagramas de dispersión revelaron una relación entre el déficit de presión de vapor (DPV) y la diferencia de temperaturas ($T_h - T_a$) para definir los límites superiores (LS) e inferiores (LI). Se observó una disminución gradual de $T_h - T_a$ a medida que aumentó el DPV. Se establecieron dos límites superiores en función de la condición de riego; para intervalos de riego menores a siete días, se identificó un umbral máximo de temperatura de 11,20 °C, mientras que, para intervalos de riego de 14 días sin riego, el límite superior se fijó en 9,80 °C. Se determinó el límite inferior

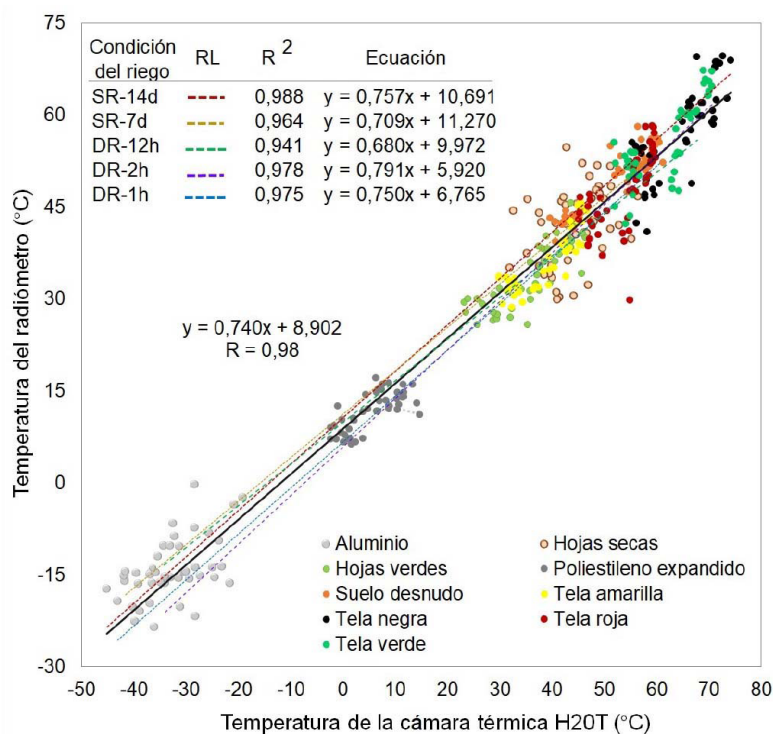


Figura 6. Relación de temperaturas medidas en simultáneo por la cámara H2OT y el radiómetro, en cada uno de los monitoreos del cultivo de palto (*Persea americana* M.) en la Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 h después del riego, DR-2h: 2 h después del riego, DR-1h: 1 h después del riego.

Figure 6. Relationship between temperatures simultaneously measured by the H2OT camera and the radiometer during each monitoring session of the avocado crop (*Persea americana* M.) at the Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

(LI) para la línea base del cultivo en condiciones sin estrés, el cual varió en función del DPV y las diferencias de temperaturas más bajas. Este límite se expresa mediante la ecuación $LI = 10,286 - 3,268 DPV$ (Figura 7).

Modificaciones del índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC) y temperatura de la hoja (Th) por déficit de riego

Se identificaron diferencias significativas en la temperatura de la hoja (Th) entre las diferentes condiciones de riego ($p < 0,05$). Las diferencias medias significativas de Th para las condiciones SR-7d, DR-12h, DR-2h y DR-1h en comparación con SR-14d fueron de 4,6, 3,6, 3,3 y 5,4 °C, respectivamente. La variación en Th bajo las diferentes

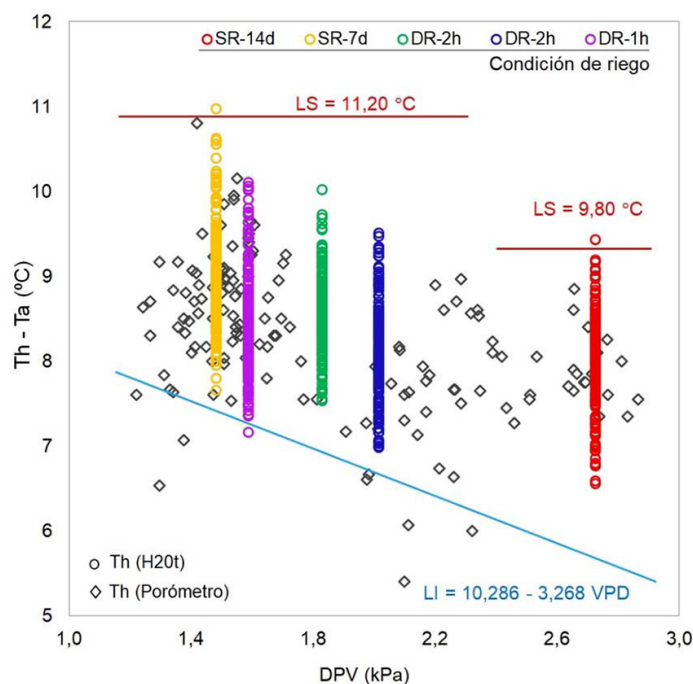


Figura 7. Determinación de los umbrales de estrés mediante análisis de la diferencia de temperatura ($T_h - T_a$) en relación al déficit de presión de vapor (DPV) a partir de las mediciones de la temperatura de la hoja (T_h) con cámara térmica (H20t) y sensor foliar (porómetro). Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

Las líneas rojas representan el límite superior (LS) del cultivo estresado. La línea azul es la línea base o límite inferior (LI) sin estrés hídrico en el cultivo de palto. SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 h después del riego, DR-2h: 2 horas después del riego, DR-1h: 1 hora después del riego.

Figure 7. Determination of stress thresholds through analysis of the temperature difference ($T_h - T_a$) in relation to vapor pressure deficit (VPD) based on leaf temperature (T_h) measurements with a thermal camera (H20t) and leaf sensor (porometer). Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

The red lines represent the upper limit (UL) of the stressed crop. The blue line is the baseline or lower limit (LL) without water stress in the avocado crop. SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

condiciones de riego (Cuadro 3) están relacionadas con la temperatura del aire (Figura 8a), lo que se respalda por el alto coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0,94. Además, los valores medios de T_h muestran una disminución gradual según las variedades de Zutano, Hass y Fuerte ($T_{h_{\text{Zutano}}} > T_{h_{\text{Hass}}} > T_{h_{\text{Fuerte}}}$), como se ilustra en la Figura 8a. Hubo una tendencia decreciente del IEHC con el incremento de la humedad del suelo representado por periodos de riego menores (Cuadro 3, Figura 8b). Los valores de IEHC para los tres cultivares oscilaron entre 0,34 y 0,96, el valor máximo se alcanzó cuando se sometió al cultivo a 14 días sin riego; en contraste, se obtuvo un valor mínimo de IEHC de 0,34, cuando se empleó solo una hora después del riego (Cuadro 3).

Los valores específicos del IEHC para cada cultivar (Cuadro 4) fluctuaron en función de las condiciones ambientales y la disponibilidad de agua en el suelo. No se detectaron diferencias significativas en el IEHC entre los cultivares, con una variación media de 0,08. El cultivar Hass, sin embargo, registró los valores más altos de IEHC, mientras que el cultivar Fuerte presentó los valores más bajos. Se observaron los valores más elevados de IEHC cuando las plantas estuvieron expuestas a periodos más largos sin riego (SR-14d), lo que indica un mayor estrés hídrico. Los valores más bajos de IEHC se registraron una hora después de regar (DR-1h).

Cuadro 3. Temperatura de la hoja (Th) en las diferentes condiciones de riego en el cultivo de palto (*Persea americana* M.). Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria Ayacucho, Perú, 2023.

Table 3. Leaf temperature (Th) under different irrigation conditions in the avocado crop (*Persea americana* M.). Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

Condición de riego	Th (°C)			IEHC		
	Media (\pm SE)	CV %	Rango (Min-Max)	Media (\pm SE)	CV %	Rango (Min-Max)
SR-14d	35,1 (\pm 0,593)	1,7	33,69 - 36,53	0,78 (\pm 0,070)	9,0	0,62 - 0,96
SR-7d	30,5 (\pm 0,496)	1,6	29,45 - 31,66	0,62 (\pm 0,086)	13,9	0,44 - 0,82
DR-12h	31,5 (\pm 0,435)	1,4	30,69 - 32,63	0,62 (\pm 0,063)	10,2	0,51 - 0,79
DR-2h	31,7 (\pm 0,574)	1,8	30,70 - 33,23	0,58 (\pm 0,077)	13,1	0,44 - 0,77
DR-1h	29,7 (\pm 0,559)	1,9	28,43 - 31,07	0,54 (\pm 0,091)	16,8	0,34 - 0,77

SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 h después del riego, DR-2h: 2 h después del riego, DR-1h: 1 hora después del riego. / SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

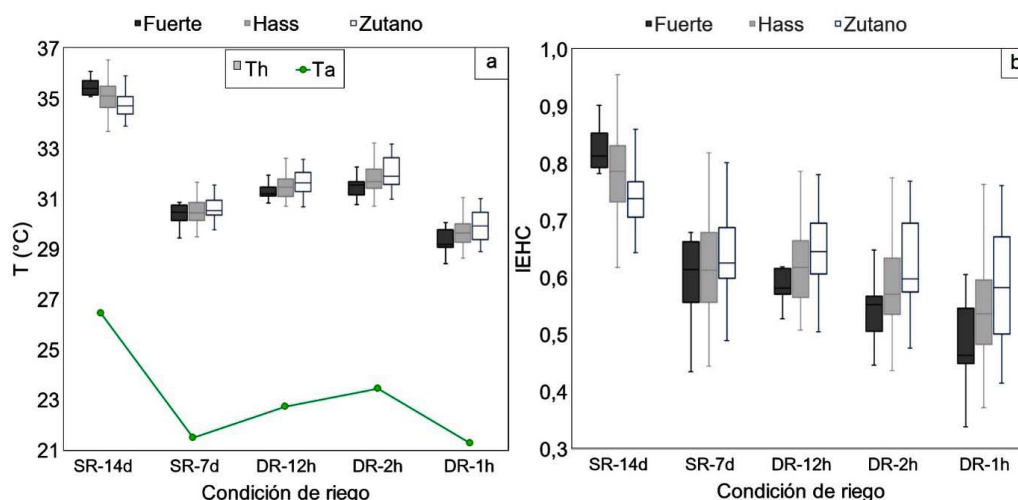


Figura 8. Variación de la temperatura de la hoja (Th) y el índice de estrés hídrico de cultivo (IEHC) (b), según las condiciones de riego en tres variedades de palto (*Persea americana* M.) en la Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 h después del riego, DR-2h: 2 h después del riego, DR-1h: 1 h después del riego.

Figure 8. Variation of leaf temperature (Th) and air temperature (Ta) (a), and the crop water stress index (CWSI) (b), under different irrigation conditions in three avocado varieties (*Persea americana* M.) at the Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

Cuadro 4. Índice de estrés hídrico en el cultivo (IEHC) en tres variedades de palto (*Persea americana* M.) bajo diferentes condiciones de riego en la Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria Ayacucho, Perú, 2023.

Table 4. Crop Water Stress Index (CWSI) in three avocado varieties (*Persea americana* M.) under different irrigation conditions at the Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Peru, 2023.

Condición de riego	Fuerte	Hass	Zutano
	\bar{x} (Min-Max)	\bar{x} (Min-Max)	\bar{x} (Min-Max)
SR-14d	0,78 (0,66-0,90)	0,79 (0,61 - 0,96)	0,78 (0,64 - 0,92)
SR-7d	0,56 (0,44- 0,67)	0,63 (0,44 - 0,82)	0,65 (0,49 - 0,80)
DR-12h	0,57 (0,52 - 0,62)	0,65 (0,50 - 0,79)	0,63 (0,50 - 0,76)
DR-2h	0,55 (0,45 - 0,65)	0,61 (0,44 - 0,77)	0,63 (0,48 - 0,77)
DR-1h	0,48(0,34 - 0,61)	0,57 (0,37 - 0,77)	0,59 (0,42 - 0,76)

\bar{x} (Min-Max): valor promedio (valor mínimo-valor máximo) / \bar{x} (Min-Max): Average value (minimum value-maximum value).
 SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 horas después del riego, DR-2h: 2 horas después del riego, DR-1h: 1 hora después del riego. / SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

IEHC y humedad del suelo

Se obtuvo la regresión lineal inversa entre la humedad volumétrica del suelo con la temperatura de la hoja (Th) y el IEHC, con un coeficiente de correlación de Pearson (R) de 0,66 y 0,61, respectivamente (Figura 9). El periodo de 14 días sin riego (SR-14d) provocó una drástica disminución de la humedad del suelo, que descendió hasta el 10 %

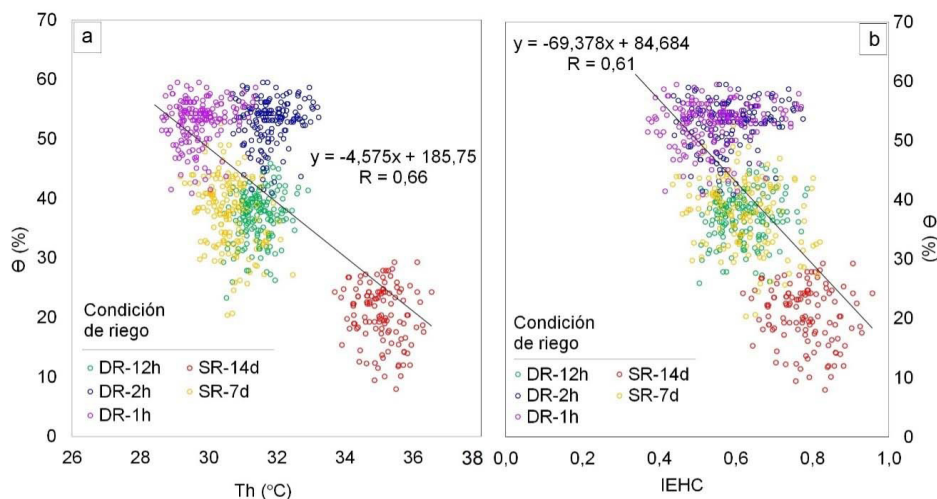


Figura 9. Regresión lineal entre la humedad volumétrica del suelo con la temperatura de la hoja (Th) (a), y el índice de estrés hídrico en el cultivo (IEHC) (b); bajo diferentes condiciones de riego en la Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 h después del riego, DR-2h: 2 h después del riego, DR-1h: 1 h después del riego.

Figure 9. Linear regression between soil volumetric moisture and leaf temperature (Th) (a), and the Crop Water Stress Index (CWSI) (b); under different irrigation conditions at the Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

(Figura 9b). Tal disminución se correlacionó con un incremento en la temperatura de la hoja (T_h), que alcanzó niveles máximos de $35,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ y de IEHC en un rango de 0,6 a 0,96. En la condición SR-7d, el IEHC medio fue de 0,62 con valores promedio de T_h de $30,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Bajo condiciones de riego óptimas para los árboles de palto, el IEHC varió entre 0,34 y 0,79, y mantuvo las temperaturas por debajo de los $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 9a).

IEHC, conductancia estomática

Se estableció la relación lineal inversa entre la conductancia estomática (gs) y el IEHC (Figura 10). Esta relación se evidencia en el cierre de las estomas como una respuesta fisiológica al estrés hídrico. La regresión presentó una inclinación de $590\text{ mmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ por unidad de IEHC en las condiciones de riego desde SR-7d hasta DR-1h. Sin embargo, en el manejo de riego SR-14d, se registraron valores superiores a $300\text{ mmol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ de gs para un IEHC mayor a 0,77 bajo condiciones de alta radiación solar (934 W m^{-2} , Figura 5a). Tales valores de radiación fueron entre 7 y 22 % más elevadas que en otras fechas de monitoreo, con una velocidad de viento media de $0,81\text{ m s}^{-1}$ (Figura 5a). Estos valores se observaron en árboles del cultivar Hass, es posible que fueran afectados por su ubicación en la parte central de la parcela con una vegetación densa circundante y una cobertura seca.

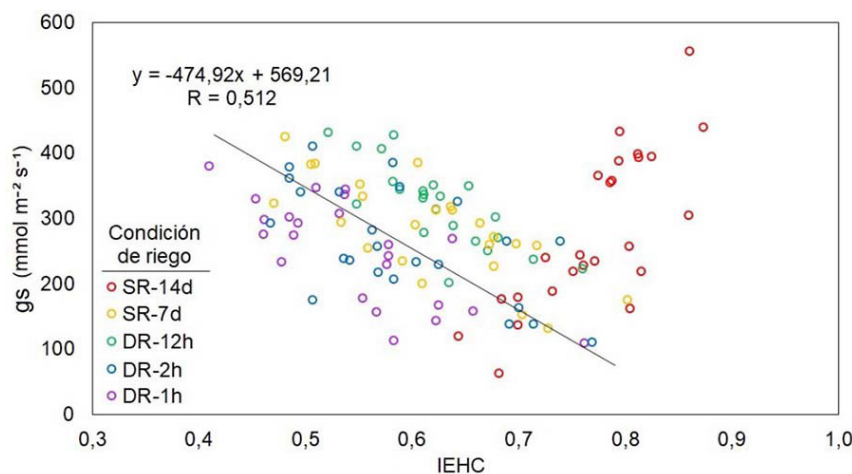


Figura 10. Relación entre la conductancia estomática (gs) de la hoja e índice de estrés hídrico en el cultivo de palto (*Persea americana* M.) (IEHC) bajo diferentes regímenes de riego. Estación Experimental Agraria Canaán del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 h después del riego, DR-2h: 2 h después del riego, DR-1h: 1 h después del riego.

Figure 10. Relationship between leaf stomatal conductance (gs) and Crop Water Stress Index (CWSI) in avocado (*Persea americana* M.) under different irrigation regimes. Estación Experimental Agraria Canaán of the Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA). Ayacucho, Perú, 2023.

SR-14d: 14 days without irrigation, SR-7d: 7 days without irrigation, DR-12h: 12 hours after irrigation, DR-2h: 2 hours after irrigation, DR-1h: 1 hour after irrigation.

Discusión

El ajuste de los datos térmicos del VANT a través de la evaluación del radiómetro en nueve coberturas presentó un R^2 de 0,98, un resultado equiparable al alcanzado al efectuar mediciones en solo cuatro coberturas (Machaca-

Pillaca et al., 2022). El uso de cuatro o nueve coberturas para realizar el ajuste de datos térmicos, no mostró diferencias significativas, acorde a lo señalado por Ramos-Fernández et al. (2024). Se aconseja preferir el uso de cuatro coberturas en futuros estudios.

El límite de estrés máximo disminuyó de 11,2 °C a 9,8 °C cuando el déficit de DPV superó los 2,3 kPa, vinculado con una temperatura ambiental de 27 °C y una humedad relativa media del 24 %. Investigaciones realizadas en plantaciones de frutas han mostrado que un incremento en el DPV lleva a una reducción en la diferencia de temperaturas ($T_h - T_a$) (Idso, 1982). Estos estudios se fundamentaron en mediciones de cultivos perennes con riego óptimo para establecer la línea de base de cultivo sin estrés (Jamshidi et al., 2021). En huertos de duraznos, se determinó que la diferencia de temperaturas puede disminuir hasta en 5 °C bajo condiciones de déficit de agua (0 % de Etc.), con una temperatura ambiental de 30,6 °C y una humedad relativa del 26,7 % (Park et al., 2021), condiciones similares a las del presente estudio.

Se detectó una relación lineal inversa entre el IEHC y la conductancia estomática (gs) con un R^2 de 0,51 (Figura 8). Esta correlación indica una mayor variabilidad en los datos de gs; sin embargo, Zia et al. (2012) informaron una correlación más alta con un R^2 de 0,6, con mayores variaciones de gs registrados durante la mañana y al atardecer, y un ajuste lineal más marcado con valores de gs obtenidos al mediodía. Cabe destacar que la variabilidad en la gs también podría deberse al número limitado de repeticiones efectuadas en el presente estudio.

Se registraron valores de gs superiores a 300 mmol m² s⁻¹ cuando el IEHC excedía de 0,7, con un promedio de humedad del suelo del 20,5 %. Este patrón es comparable al encontrado por Zia et al. (2012), quienes identificaron una tendencia lineal positiva para valores de gs superiores a 500 mmol m² s⁻¹ con una humedad media del suelo del 22 %. Es relevante mencionar que los árboles del presente estudio se ubican en la zona del lote con mayor vegetación circundante y una mayor cantidad de plantas secas en sus alrededores, lo que podría haber atenuado la disminución de la gs ante bajos niveles de humedad del suelo.

Las condiciones SR-14d y SR-7d, con periodos de riego de 14 y 7 días, respectivamente, la humedad del suelo fue < 40 % para valores de IEHC que fluctuaron entre 0,4 y 0,95. A diferencia, en las condiciones DR-12h, DR-2h y DR-1h, evaluadas 12, 2 y 1 h después del riego, la humedad del suelo superó el 30 %, con valores de IEHC entre 0,35 y 0,8. Estos niveles de IEHC señalan un cultivo con estrés hídrico, incluso poco después del riego (DR-1h). Por esta razón, para analizar las respuestas del estado hídrico del palto frente a periodos de restricción de riego, es esencial realizar seguimientos posteriores a los dos días después de aplicar riego (López López et al., 2009). El palto, al ser un cultivo perenne, tiende a recuperar sus condiciones fisiológicas normales tras dos a tres días después de aplicar riego tras restricción hídrica (Schaffer et al., 2013).

La T_h se manifestó como un indicador más sensible a las condiciones del suelo y del ambiente. Se registraron valores máximos de $T_h > 33,5$ °C para SR-14d, mientras que en SR-7d a DR-1h la T_h se mantuvo por debajo de 33,5 °C. En específico, en la condición SR-7d, con restricción de riego de siete días, resultó en una T_h de 29 a 32 °C, por un posible efecto de la lluvia (Figura 2). Estudios anteriores en cultivos de ciruelo han demostrado que la T_h es el indicador más sensible ante situaciones de estrés hídrico, seguido por la gs (Millán et al., 2020). En el cultivo de palto, se encontró que T_h fue el principal indicador de la absorción restringida de agua (Ashan Salgadoe et al., 2019).

La variedad Zutano exhibió valores promedio más altos de T_h en comparación con las variedades Hass y Fuerte y cuando se enfrentó a condiciones de estrés hídrico máximo, los valores de IEHC fueron más bajos que los de las otras variedades (Figura 6). Esto señala una mayor resistencia al estrés hídrico, lo que la convierte en una elección común como patrón de injerto y polinización (Schaffer et al., 2013). Cuando se aplicó riego después de un período de estrés hídrico, los árboles de la variedad Zutano mantuvieron valores elevados de T_h y IEHC en comparación con las variedades Hass y Fuerte. Esto sugiere que la variedad Zutano tiene una capacidad limitada para recuperarse después de un estrés máximo, a pesar de su mayor tolerancia a las variaciones de temperatura (Schaffer et al., 2013; Webber, 1917).

Conclusiones

Se demostró que la termografía infrarroja puede medir eficazmente el índice de estrés hídrico en cultivares de palto, con variaciones significativas observadas en la temperatura de la hoja (T_h), según la condición de riego. Estas variaciones, influenciadas por la temperatura y humedad ambiental, establecieron umbrales de estrés que definieron el índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC) en un rango de 0,34 a 0,96. Al correlacionar el IEHC con la conductancia estomática (g_s) y la humedad del suelo (θ), se obtuvo un coeficiente de correlación (R) de 0,51 y 0,61, respectivamente.

El cultivar Zutano exhibió el valor más alto de IEHC durante períodos prolongados de restricción de riego y tuvo una baja capacidad para reducir estos valores después de la rehidratación, a diferencia de los otros cultivares. La termografía infrarroja es una herramienta de gran potencial que proporciona una comprensión más matizada del estrés hídrico en los cultivares de palto, un aspecto crucial de la gestión y productividad del cultivo. Para futuras investigaciones, se sugiere incrementar la frecuencia de los vuelos de los UAV y ampliar su uso durante todo el ciclo de vida del palto. Esto permitirá una evaluación más precisa y continua del manejo del estrés hídrico en estos cultivos.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados (PROCIENCIA) del Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Concytec), quien financió esta investigación en el marco del proyecto “Uso de la teledetección en el seguimiento del cultivo de palto con menor consumo de agua, EEA CANAÁN – Ayacucho, 2022”. Especialmente se agradece a David Quispe Tito por el levantamiento fotogramétrico con un vehículo aéreo no tripulado RPAS (del inglés Remotely Piloted Aircraft System).

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

- Aguirre, B. A., Hsieh, B., Watson, S. J., & Wright, A. J. (2021). The experimental manipulation of atmospheric drought: Teasing out the role of microclimate in biodiversity experiments. *Journal of Ecology*, *109*(5), 1986–1999. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13595>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos* (Estudio FAO Riego y Drenaje 56) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación. <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>
- Anderson, D.B. (1936). Relative humidity of vapor pressure deficit. *Ecology*, *17*(2), 277–282. <https://doi.org/10.2307/1931468>
- Anyosa Gutiérrez, B. J. (2019). Exportación y perspectiva del comercio de la palta Hass Peruana. *Ciencia & Desarrollo*, *15*, 88–101. <https://doi.org/10.33326/26176033.2013.15.330>
- Ashan Salgadoe, A. S., Robson, A. J., Lamb, D. W., & Dann, E. K. (2019). Assessment of canopy porosity in avocado trees as a surrogate for restricted transpiration emanating from phytophthora root rot. *Remote Sensing*, *11*(24), Article 2972. <https://doi.org/10.3390/rs11242972>

- Ashrafuzzaman, M., Lubna, F. A., Holtkamp, F., Manning, W. J., Kraska, T., & Frei, M. (2017). Diagnosing ozone stress and differential tolerance in rice (*Oryza sativa* L.) with ethylenediurea (EDU). *Environmental Pollution*, 230, 339–350. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.06.055>
- Azcón-Bieto, J., & Talón, M. (2013). *Fundamentos de fisiología vegetal* (2ª ed.). Mc Graw Hill Education. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/FundamentosdeFisiologiaVegetal2008Azcon..pdf>
- Blaya-Ros, P. J., Blanco, V., Torres-Sánchez, R., González-Teruel, J. D., Espósito, M. E., & Domingo, R. (2021, noviembre 3-5). Estudio de indicadores de suelo y planta para la programación del riego en cerezos jóvenes [Presentación de poster]. XXXVIII Congreso Nacional de Riegos, Cartagena, Colombia. <https://doi.org/10.31428/10317/10096>
- Chanderbali, A. S., Albert, V. A., Ashworth, V. E. T. M., Clegg, M. T., Litz, R. E., Soltis, D. E., & Soltis, P. S. (2008). Persea americana (avocado): bringing ancient flowers to fruit in the genomics era. *BioEssays*, 30(4), 386–396. <https://doi.org/10.1002/bies.20721>
- Ekinzog, E. K., Schlerf, M., Kraft, M., Werner, F., Riedel, A., Rock, G., & Mallick, K. (2022). Revisiting crop water stress index based on potato field experiments in Northern Germany. *Agricultural Water Management*, 269, Article 107664. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107664>
- Flores-Izquierdo, M. A., & Espinoza-Villanueva, L. E. (2023). Situación actual y perspectivas de la producción de palta (Persea americana) peruana en el contexto del comercio internacional. *Ingeniería Industrial*, (45), 157–173. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2023.n45.6316>
- Food and Agriculture Organization. (n.d.). *FAOSTAT. Crop and livestock products*. Retrieved March 24, 2023, from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen* (5ª ed., Serie Libros No. 6). Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/83>
- Gardner, B. R., Nielsen, D. C., & Shock, C. C., (1992). Infrared thermometry and the crop water stress index. II. Sampling procedures and interpretation. *Journal of Production Agriculture*, 5(4), 466–475. <https://doi.org/10.2134/jpa1992.0466>
- Gil, P. M., Gurovich, L., Schaffer, B., García, N., & Iturriaga, R. (2009). Electrical signaling, stomatal conductance, ABA and ethylene content in avocado trees in response to root hypoxia. *Plant Signaling & Behavior*, 4(2), 100–108. <https://doi.org/10.4161/psb.4.2.7872>
- 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 Jr., P. J., Reginato, R. J., & Hatfield, J. L. (1981). Normalizing the stress-degree-day parameter for environmental variability. *Agricultural Meteorology*, 24, 45–55. [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(81\)90032-7](https://doi.org/10.1016/0002-1571(81)90032-7)
- Instituto de Desarrollo y Medio Ambiente. (2016). *Prácticas agroecológicas para el cultivo de palto*. <https://idmaperu.org/wp-content/uploads/2023/03/MANUAL-PALTO-HVCA.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística e Informática (2021). *Producción de palta creció 15,2% en marzo de 2021 por mejores condiciones climáticas*. <https://m.inei.gob.pe/prensa/noticias/produccion-de-palta-crecio-152-en-marzo-de-2021-por-mejores-condiciones-climaticas-12892/>
- Jamshidi, S., Zand-Parsa, S., & Niyogi, D. (2021). Assessing crop water stress index of citrus using in-situ measurements, landsat, and sentinel-2 data. *International Journal of Remote Sensing*, 42(5), 1893–1916. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1846224>

- Knox, E. G. (1971). *Criterios para clasificación de suelos según la séptima aproximación en las tres categorías superiores*. Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas. <https://repositorio.iica.int/handle/11324/9257>
- Lal, P. N., Mitchell, T., Aldunce, P., Auld, H., Mechler, R., Miyan, A., Romano, L. E., Zakaria, S., Dlugolecki, A., Masumoto, T., Ash, N., Hochrainer, S., Hodgson, R., Islam, T. U. I., McCormick, S., Neri, C., Pulwarty, R., Rahman, A., Ramalingam, B., ... Wilby, R. (2012). National systems for managing the risks from climate extremes and disasters. In Intergovernmental Panel on Climate Change (Ed.), *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: Special report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 339–392). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177245.009>
- Lin, S.-Y., Chen, P.-A., & Zhuang, B.-W. (2022). The stomatal conductance and Fv/Fm as the indicators of stress tolerance of avocado seedlings under short-term waterlogging. *Agronomy*, *12*(5), Article 1084. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051084>
- López López, R., Arteaga Ramírez, R., Vázquez Peña, M. A., López Cruz, I., & Sánchez Cohen, I. (2009). Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México*, *35*(1), 92–106.
- Lozano-Povis, A., Alvarez-Montalván, C., & Moggiano, N. (2021). El cambio climático en los andes y su impacto en la agricultura: una revisión sistemática. *Scientia Agropecuaria*, *12*(1), 101–108. <http://dx.doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Machaca-Pillaca, R., Pino-Vargas, E., Ramos-Fernández, L., Quille-Mamani, J., & Torres-Rua, A. (2022). Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar a partir de imágenes de un dron en zonas áridas, caso La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, *40*(2), 55–65. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292022000200055>
- Millán, S., Campillo, C., Vivas, A., Moñino, M. J., & Prieto, M. H. (2020). Evaluación de diferentes medidas de planta para identificación y caracterización de la respuesta al riego del ciruelo japonés para gestión del riego. In S. Mendes, & I. Valín (Eds.), *34 Actas Portugesas de Horticultura. Agricultura 4.0. II Simpósio Ibérico de Engenharia Hortícola 2020* (pp. 72-78). Associação Portuguesa de Horticultura. <https://aphorticultura.pt/wp-content/uploads/2021/09/Actas-II-Simp%C3%B3sio-Ib%C3%A9rico-de-Engenharia-Hort%C3%ADcola.pdf>
- Mira-García, A. B., Conejero, W., Vera, J., & Ruiz-Sánchez, M. C. (2022). Water status and thermal response of lime trees to irrigation and shade screen. *Agricultural Water Management*, *272*, Article 107843. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107843>
- Olfás, M., Cerón, J. C., & Fernández, I. (2005). Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del US Laboratory Salinity (USLS). *Geogaceta*, *37*(2005), 111–113. <https://sge.usal.es/archivos/geogacetas/Geo37/Geo37-28.pdf>
- Parada-Molina, P. C., Pérez-Silva, C. R., Cerdán-Cabrera, C. A., & Soto-Enrique, A. (2022). Condiciones climáticas y microclimáticas en sistemas de producción de vainilla (*Vanilla planifolia* Jacks. ex Andrews) en México. *Agronomía Mesoamericana*, *33*(2), 48682–48682. <https://doi.org/10.15517/am.v33i2.48682>
- Park, S., Ryu, D., Fuentes, S., Chung, H., O'Connell, M., & Kim, J. (2021). Dependence of CWSI-based plant water stress estimation with diurnal acquisition times in a nectarine orchard. *Remote Sensing*, *13*(14), Article 2775. <https://doi.org/10.3390/rs13142775>
- Pineda, M., Barón, M., & Pérez-Bueno, M.-L. (2021). Thermal imaging for plant stress detection and phenotyping. *Remote Sensing*, *13*(1), Article 68. <https://doi.org/10.3390/rs13010068>

- Pino, E., Montalván, I., Vera, A., & Ramos, L. (2019). La conductancia estomática y su relación con la temperatura foliar y humedad del suelo en el cultivo del olivo (*Olea europaea* L.), en periodo de maduración de frutos, en zonas áridas. La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 37(4), 55–64. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>
- Quezada, C., Bastias, R., Quintana, R., Arancibia, R., & Solís, A. (2020). Validación del índice de estrés hídrico de cultivo (CWSI) mediante termografía infraroja y su incidencia en rendimiento y calidad en manzanas 'royal gala'. *Chilean Journal of Agricultural & Animal Sciences*, 36(3), 198–207. <http://dx.doi.org/10.29393/chjaas36-18vicq50018>
- Ramos-Fernández, L., Gonzales-Quiquia, M., Huanuqueño-Murillo, J., Tito-Quispe, D., Heros-Aguilar, E., Flores del Pino, L., & Torres-Rua, A. (2024). Water Stress Index and Stomatal Conductance under Different Irrigation Regimes with Thermal Sensors in Rice Fields on the Northern Coast of Peru. *Remote Sensing*, 16(5), Article 796. <https://doi.org/10.3390/rs16050796>
- Ríos-Hernández, R. (2021). Uso de los drones o vehículos aéreos no tripulados en la agricultura de precisión. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(4), 75–84. <https://revistas.unah.edu.cu/index.php/IAgric/article/view/1469>
- Rohwer, J. G. (1993). Lauraceae. In K. Kubitzki, J. G. Rohwer, & V. Bittrich (Eds.), *Flowering plants-dicotyledons. The families and genera of vascular plants* (Vol 2., pp. 366–391). Springer, Berlin. https://doi.org/10.1007/978-3-662-02899-5_46
- Salazar-García, S., & Lazcano-Ferrat, I. (1999). Diagnóstico nutrimental del aguacate 'Hass' bajo condiciones de temporal. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 5, 173–184. https://www.avocadosource.com/WAC4/WAC4_p173.pdf
- Sánchez-Piñero, M., Martín-Palomo, M. J., Andreu, L., Moriana, A., & Corell, M. (2022). Evaluation of a simplified methodology to estimate the IEHC in olive orchards. *Agricultural Water Management*, 269, article 107729. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107729>
- Schaffer, B., Wolstenholme, B. N., & Whiley, A. W. (Eds.). (2013). *The avocado: botany, production and uses*. CABI. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/abs/10.1079/9781845937010.0000>
- Schulze, E. D. (1986). Carbon dioxide and water vapor exchange in response to drought in the atmosphere and in the soil. *Annual Review of Plant Physiology*, 37, 247–274. <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.37.060186.001335>
- Serrano-Pérez, E., & Sandoval-Villa, M. (2023). Low-cost electronic system for monitoring vapor pressure deficit and sunlight using a Raspberry Pi Pico board. *Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca*, 8(16), 7–11. <https://doi.org/10.29057/est.v8i16.9651>
- Tineo Canchari, J. I., Velásquez Ochoa, R., & Villantoy Palomino, A. (2018). *Curso virtual "Manejo integrado del cultivo de palto"*. Instituto Nacional de Innovación Agraria.
- Ucak, A. B., Kocięcka, J., Liberacki, D., Saltuk, B., Atilgan, A., Stachowski, P., & Rolbiecki, R. (2024). The effects of high temperature and low humidity on crop water stress index of seed pumpkin plants (*Cucurbita pepo* L.) in semi-arid climate conditions. *Acta Scientiarum Polonorum Hortorum Cultus*, 23(1), 63–73. <https://doi.org/10.24326/asphc.2024.5287>
- Varela, S. A. (2010). *Aspectos básicos de la fisiología en respuesta al estrés y el clima como condicionante del mismo en las plantas* (Comunicación Técnica No. 78, Área Forestal). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. <https://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/Aspectosb%C3%A1sicosfisiolog%C3%ADarespuestaestr%C3%A9s.pdf>
- Vargas, P. (2009). *El cambio climático y sus efectos en el Perú*. Banco Central de Reserva del Perú. <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Documentos-de-Trabajo/2009/Documento-de-Trabajo-14-2009.pdf>

- Vivero, A., Valenzuela, R., Valenzuela, A., & Morales, G. (2019). Palta: compuestos bioactivos y sus potenciales beneficios en salud. *Revista Chilena de Nutrición*, 46(4), 491–498. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182019000400491>
- Webber, H. J. (1917). Cold resistance of the avocado. *California Avocado Association Annual Report*, 3, 49–50. https://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_03_1917/CAS_1917_PG_49-51.pdf
- 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, Article 165626. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165626>
- Zia, S., Wenyong, D., Spreer, W., Spohrer, K., Xiongkui, H., & Müller, J. (2012). Assessing crop water stress of winter wheat by thermography under different irrigation regimes in North China Plain. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3), 24–34. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20120503.003>