

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Utilización de la teledetección en el seguimiento del desarrollo
de cultivo del palto (*Persea americana* Mill.), E.E. Huanchac,
Huanta 2022**

para optar el título profesional de:
INGENIERA AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:
Bach. Malu Massiel GALINDO SANCHEZ

ASESOR:
Ing. Herbert NÚÑEZ ALFARO

AYACUCHO - PERÚ

2025

Dedicatoria

A mi abuelita, padres y tíos por su apoyo en esta etapa académica y su constante motivación.

A mis hermanos por siempre estar a mi lado.

AGRADECIMIENTO

A Dios, por la fortaleza en medio de las dificultades.

A la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga, a la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola por la oportunidad de desarrollarme profesionalmente, y a los docentes por compartir sus valiosos conocimientos.

Al Programa Nacional de Investigación Científica y Estudios Avanzados PROCIENCIA – CONCYTEC por darme la oportunidad de iniciarnos en la investigación, y el financiamiento para la ejecución del proyecto de investigación de la presente tesis.

A mis asesores la Dra. Lia Ramos Fernández y el Ing. Herbert Núñez Alfaro por su constante apoyo y seguimiento a lo largo de este proceso. Su compromiso y experiencia fue importante para el buen desarrollo de este proyecto.

A mis amigos, compañeros y familiares durante los años de estudios con quienes se ha compartido los diferentes desafíos académicos.

Esta tesis ha sido posible gracias al esfuerzo conjunto, y agradezco cada contribución realizada.

RESUMEN

El palto es un cultivo altamente vulnerable al déficit hídrico, sobre todo durante fases clave como la productiva y frutera, ya que puede inducir la caída prematura de frutos y disminuir la productividad. El presente estudio tuvo como objetivo analizar el índice térmico de teledetección de estrés hídrico del cultivo de palto (IEHC) en tres variedades como el Zutano, Hass y Fuerte a distintas condiciones de riego: catorce y siete días sin riego (SR-14d y SR-7d) y a las doce, dos y una hora luego después de aplicar el riego (DR-12h, DR-2h y DR-1h), utilizando imágenes térmicas infrarrojas como herramienta principal. La investigación se llevó a cabo en los meses de abril y mayo del 2023 en la Estación Experimental de Huanchac en la provincia de Huanta, con una muestra de 170 árboles de cinco años seleccionadas de una población total de 300 árboles, principalmente los que mostraban mayor desarrollo entre los estados B y D de la fase reproductiva. El monitoreo consistió en medir la temperatura de la hoja (T_h), la capacidad de las estomas para el intercambio gaseoso a partir de la conductancia estomática (G_s), el contenido de humedad volumétrica del suelo (Θ) y el índice térmico de teledetección indicador de estrés, el IEHC, a partir de imágenes tomadas con VANT. Los datos mostraron variaciones significativas en la temperatura foliar según el cultivar y el tratamiento de riego, con valores de IEHC entre 0,34 y 0,96. Se identificó una correlación moderada del IEHC con G_s ($R = 0,51$) y con Θ ($R = 0,61$). La variedad Zutano fue la más afectada por el estrés hídrico, presentando una recuperación menos eficiente tras el riego en comparación con Hass y Fuerte. A partir del T_h , IEHC y humedad del suelo se definió el estado hídrico del cultivo de palto en tres aspectos: estado hídrico óptimo, estrés hídrico leve y estrés hídrico alto.

Palabras clave: índice de estrés hídrico, humedad volumétrica del suelo, estado hídrico, conductancia de las estomas.

ABSTRACT

Avocado is a crop highly vulnerable to water deficit, particularly during key stages such as the productive and fruiting phases, as this type of stress can lead to premature fruit drop and reduced productivity. The aim of this study was to analyze the thermal remote sensing-based Crop Water Stress Index (CWSI) in three avocado cultivars—Zutano, Hass, and Fuerte—under different irrigation conditions: fourteen and seven days without irrigation (SR-14d and SR-7d), and twelve, two, and one hour after irrigation (DR-12h, DR-2h, and DR-1h), using infrared thermal imaging as the primary tool. The research was conducted during April and May 2023 at the Huanchac Experimental Station in the province of Huanta, using a sample of 170 five-year-old trees selected from a total population of 300, primarily those showing greater development in phenological stages B and D of the reproductive phase. Monitoring involved measuring leaf temperature (T_h), stomatal conductance (G_s), soil volumetric water content (Θ), and the thermal remote sensing-based stress indicator, the CWSI, using UAV-acquired images. The data showed significant variations in leaf temperature depending on the cultivar and irrigation treatment, with CWSI values ranging from 0.34 to 0.96. A moderate correlation was found between CWSI and G_s ($R = 0.51$), as well as with Θ ($R = 0.61$). The Zutano variety was the most affected by water stress, showing less efficient recovery after irrigation compared to Hass and Fuerte. Based on T_h , CWSI, and soil moisture, the water status of the avocado crop was categorized into three levels: optimal water status, mild water stress, and severe water stress.

Keywords: water stress index, soil volumetric moisture, water status, stomatal conductance.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	4
INTRODUCCIÓN	14
MARCO TEÓRICO.....	17
1.1 Justificación	17
1.2 Antecedentes.....	17
1.2.1 En el ámbito internacional	17
1.2.2 En el ámbito nacional	19
1.2.3 En el ámbito local	19
1.3 Cultivares de palto	20
1.3.1 Cultivo de palto (<i>Persea americana</i> Mill.).....	20
1.3.2 Taxonomía del árbol de palto	20
1.3.3 Cultivares e injertos	20
1.3.4 Ecofisiología del palto	22
1.4 Teledetección aplicada al monitoreo hídrico.....	25
1.4.1 Teledetección.....	25
1.4.2 Teledetección térmica infrarroja.....	26
1.5 Índice térmico de teledetección de estrés hídrico	28
1.5.1 Índice de estrés hídrico de cultivo (IEHC)	28
1.5.2 Umbrales de temperatura.....	29
CAPÍTULO I	31
METODOLOGÍA.....	31
2.1 Localización del área de estudio.....	31
2.2 Planteamiento y descripción del estudio	33
2.2.1 Características del cultivo de palto	34
2.2.2 Características del suelo	36
2.2.3 Características del riego.....	37
2.2.4 Características meteorológicas durante el monitoreo	38
2.4.1 Flujograma del proceso de investigación	44
2.4.2 Mediciones y recolección de información.....	45
2.4.3 Modelación del estado hídrico del palto	49
2.5 . Metodología de investigación.....	51
2.5.1 Variables evaluadas	51
2.5.2 Metodología de la investigación.....	52

2.5.3	Población y muestra	52
2.5.4	Análisis estadístico de los datos	52
CAPÍTULO II.....		53
RESULTADOS Y DISCUSIONES		53
3.1.	Umbrales térmicos del cultivo de palto con teledetección térmica a diferentes condiciones de riego	53
3.1.1	Temperatura de termografía infrarroja con sensores remotos a diferentes condiciones de riego.....	53
3.1.2	Umbrales de temperatura del cultivo de palto a diferentes condiciones de riego	55
3.2.	Índice de estrés hídrico del cultivo a diferentes condiciones de riego a partir de los umbrales térmicos de teledetección.....	57
3.2.1.	Índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC)	57
3.3.	Estado hídrico del palto en base al IEHC como indicador térmico de teledetección	59
3.3.1.	Humedad del suelo	59
3.3.2.	IEHC y humedad del suelo	60
3.3.3.	IEHC y conductancia estomática.....	61
3.3.4.	Estado hídrico del cultivo de palto	63
CONCLUSIONES		65
RECOMENDACIONES		66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		69
ANEXOS		74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Índice de estrés hídrico determinado a partir de la medición de temperatura foliar en frutales con diferentes sensores térmicos, sistemas de riego, tipos de suelo y clima.	18
Tabla 1.2. Estados de la fase reproductiva del palto desde la aparición de yemas hasta la diferenciación floral.	22
Tabla 1.3. Formas de adquisición de información por el tipo de interacción objeto-sensor.	25
Tabla 2.1. Fechas de monitoreo del cultivo de palto a diferentes condiciones de riego.	34
Tabla 2.2. Evapotranspiración potencial para los meses de evaluación del cultivo de palto: abril – mayo del 2023.	37
Tabla 2.3. Lámina real y de riego aplicado para los meses de evaluación al cultivo de palto: abril – mayo del 2023.	37
Tabla 2.4. Instrumentos empleados en la realización del estudio.	41
Tabla 2.5. Materiales utilizados en la ejecución de la investigación.	42
Tabla 2.6. Programas utilizados para el análisis y procesamiento de datos.	43
Tabla 2.7. Diseño del plan de vuelo aplicado en los monitoreos del cultivo.	46
Tabla 2.8. Definición de variables.	51
Tabla 2.9. Definición de indicadores.	52
Tabla 3.1. prueba de Scheffé a los datos de temperatura de la hoja (Th) del cultivo de palto (Persea americana Mill.)	54
Tabla 3.2. Promedio, valores máximos y mínimos, y coeficiente de variación (CV) en las diferentes condiciones de riego de la temperatura de la hoja (Th) en el cultivo de palto (Persea americana Mill.).	57
Tabla 3.3. Definición del estado hídrico del cultivo de palto en función del nivel de estrés mediante los indicadores fisiológicos y ambientales.	63
Tabla R.1. Sensores térmicos recomendados para la medición de temperatura de las hojas de cultivos.	66
Tabla R.2. Ecuaciones para determinar el índice de estrés hídrico (IEHC) de los cultivos.	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Cultivares de palto.	21
Figura 1.2. Descripción gráfica de los estados de la fase reproductiva del palto.	22
Figura 1.3. Espectro de las radiaciones electromagnéticas ordenadas por longitud de onda.	26
Figura 1.4. Curvas de radiación espectral $M\lambda_s$ del cuerpo negro a diferentes temperaturas en °K.	27
Figura 1.5. Relación entre la diferencia de temperaturas ($T_c - T_a$) y el de déficit de presión de vapor.	30
Figura 2.1. Ubicación nacional, provincial, regional, y distrital de la Estación Experimental Huanchac, Huanta.	32
Figura 2.2. Ubicación y delimitación geográfica de la Estación Experimental de Huanchac, Huanta.	33
Figura 2.3. (a) Monitoreo con VANT en el cultivo de palto. (b) Estados de la fase reproductiva del palto (Persea americana Mill.).....	35
Figura 2.4. (a) Estado B y (b) D de la fase reproductiva del palto (persea americana Mil.) en la Estación Experimental de Huanchac.....	35
Figura 2.5. Arreglo espacial de los árboles de palto.	36
Figura 2.6. Lámina y frecuencia de riego aplicada durante el periodo de monitoreos del cultivo.	38
Figura 2.7. Comportamiento horario de las variables meteorológicas durante los monitoreos: temperatura, humedad relativa y viento.	39
Figura 2.8. Comportamiento horario de la velocidad, frecuencia y dirección del viento.	40
Figura 2.9. Equipos y sensores empleados en la recolección de datos en campo durante el monitoreo del cultivo de palto.....	40
Figura 2.10. Flujograma del proceso de investigación.....	44
Figura 2.11. Nueve diferentes tipos de coberturas para calibración de las imágenes térmicas. ..	47
Figura 2.12. a) Lectura de temperatura de las nueve coberturas con el radiómetro, b) temperatura superficial de las coberturas con el Dron.	47
Figura 2.13. Clasificación de vegetación por contraste suelo-vegetación.....	48
Figura 2.14. Delimitación de las máscaras del dosel de palto por índice de vegetación verde generado por combinación de bandas.	49

Figura 2.15. Umbrales de temperatura definidos por el límite inferior y superior.....	50
Figura 3.1. Comparación de temperaturas registradas simultáneamente por la cámara H20T y el radiómetro durante los monitoreos.....	54
Figura 3.2. Coeficientes de Pearson de la correlación entre la temperatura de la hoja calibrada (Th), con variables meteorológicas.	55
Figura 3.3. Umbrales de temperatura de estrés (límite superior) y sin estrés (límite inferior) a partir de datos térmicos obtenidos con cámara H20T y sensor foliar.	56
Figura 3.4. Variación de la temperatura de la hoja (Th) y el aire (Ta) (a), y el índice de estrés hídrico de cultivo (IEHC) (b), según las condiciones de riego en tres variedades de palto (Persea americana Mill.).	58
Figura 3.5. Variación espacial de la humedad volumétrica del suelo (%) a diferentes condiciones de riego.....	59
Figura 3.6. Análisis de regresión entre la humedad del suelo, las respuestas térmicas de las hojas y de estrés del cultivo en diferentes condiciones de riego.....	61
Figura 3.7. Correlación entre la Gs y el índice IEHC en árboles de palto en respuesta a diversas condiciones de riego.....	62
Figura A.1. Procesamiento de la nube de puntos de la imagen: proceso inicial, análisis de nube de puntos y malla, generación de DSM.	76
Figura A.2. Distribución espacial de cámaras y generación de nube de puntos densa a partir de imágenes aéreas en Pix4Dmapper.....	76
Figura A.3. Resultados del procesamiento con ortomosaico índices de reflectancia.....	77
Figura A.4. Ortomosaico procesado.....	77
Figura A.5. Estructura de riego en la Estación Experimental de Huanchac, Huanta.	92
Figura A.6. Sistema de riego a goteo del cultivo de palto.....	92
Figura A.7. Muestras de agua y suelo para su análisis – INIA Ayacucho.	93
Figura A.8. Pruebas de uniformidad al riego.	93
Figura A.9. Inicio del entrenamiento en el uso y manejo de drones UNALM.....	94
Figura A.10. Monitoreo de estrés hídrico del cultivo de palto con VANT en la UNALM.....	94
Figura A.11. Monitoreos al cultivo de palto en la Estación Experimental de Huanchac, Huanta, 2023.....	95
Figura A.12. Cultivo de palto en la Estación Experimental de Huanchac, Huanta.....	95

Figura A.13. Calibración de sensores y equipos.	96
Figura A.14. Foto grupal de los Ingenieros, especialistas y estudiantes que apoyaron el monitoreo.	96
Figura A.15. Foto grupal de los Ingenieros, especialistas y estudiantes que apoyaron el monitoreo.	97
Figura A.16. Imagen térmica del cultivo de palto.	97

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 Ley de Max Planck.....	26
Ecuación 1.2 Desplazamiento de Wien.....	27
Ecuación 1.3. Índice de estrés por baja disponibilidad de agua según Idso	29
Ecuación 2.1. índice de contraste suelo–vegetación.....	49
Ecuación 2.2 Índice de estrés por baja disponibilidad de agua según Idso	49
Ecuación 2.3 Diferencia de presión de vapor.....	50
Ecuación 2.4 Presión de saturación o presión de vapor de saturación	50
Ecuación 2.5 Presión parcial del vapor de agua presente en el aire	50
Ecuación 2.6 Ecuación del umbral de temperatura.....	51

ACRÓNIMOS

VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado
FLIR	Sigla de Forward Looking InfraRed, que es una cámara térmica
JPEG	Sigla de Joint Photographic Experts Group, es un formato de archivo de imagen fotográfica
TIFF	Acrónimo de Tagged Image File Format, es un tipo de archivo digital utilizado para guardar imágenes en forma de mapa de bits. Se caracteriza por su alta calidad y capacidad para almacenar múltiples capas y metadatos, siendo ampliamente usado en procesamiento de imágenes y análisis geoespacial.
RGB	Acrónimo del inglés Red, Green, Blue, es un modelo de color basado en la combinación de intensidades de luz roja, verde y azul. Este sistema se utiliza para representar colores en pantallas electrónicas, sensores ópticos e imágenes digitales.
IEHC	El índice de estrés hídrico del cultivo
VPD	Diferencia de presión de vapor
Gs	Conductancia estomática
MSD	Modelos de superficie digital
Ta	Temperatura del aire
Th	Temperatura de la hoja
Θ	Humedad volumétrica del suelo

INTRODUCCIÓN

La productividad del cultivo de palta se ha incrementado por su expansión a diversas regiones geográficas (Chanderbali et al., 2008). Esto se debe a su capacidad fisiológica del cultivo que le ha permitido adaptarse exitosamente a áreas subtropicales cálidas y húmedas, así como a regiones áridas (Schaffer et al., 2013). En el Perú, el área cosechada de palta se incrementó de 26,259.70 ha a 62,512.62 ha del 2015 al 2024 según datos del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI, 2025), ocupando el tercer lugar como mayor exportador a nivel mundial, representando el 9 % del mercado global, después de México y Colombia según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024).

Este aumento, debido a la importancia económica y nutricional del palto, junto con su creciente demanda en el país y en el extranjero, muestra que es necesario usar mejor el agua durante el cultivo para garantizar una producción sostenible y de alta calidad del fruto. Por ello, entender la influencia de los distintos niveles de humedad del suelo sobre el estado hídrico del cultivo de palto permitirá optimizar las estrategias de manejo del agua de riego, con el fin de incrementar la productividad y minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente. Algunos países han implementado el uso de tecnología para el monitoreo de cultivos y su uso eficiente del riego. En cultivos frutales, por ejemplo, se ha utilizado el monitoreo con técnicas de teledetección para determinar el momento óptimo de riego sin afectar el rendimiento. También se ha utilizado para evaluar el estado hídrico mediante indicadores de estrés, entre los que destaca el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC) (López et al., 2009). El IEHC, expresado numéricamente o en una escala, refleja mayores niveles de estrés hídrico en valores altos, indicando menor disponibilidad de agua para las plantas (López et al., 2009). Este índice resulta fundamental para identificar el umbral de tolerancia al estrés hídrico antes de que se comprometa el rendimiento del cultivo. Contar con esta información permite establecer una programación de riego precisa y adaptada en tiempo real a las necesidades hídricas del cultivo.

El uso de sensores térmicos complementa un método de investigación innovador para obtener información precisa y detallada sobre el estado hídrico de los árboles de paltos en diferentes momentos y bajo diferentes condiciones de riego. Este enfoque puede proporcionar una visión amplia de los patrones de estrés hídrico durante las fases vegetativa, reproductiva y frutera del palto, que ayude a tomar decisiones informadas para optimizar los recursos hídricos e incrementar la eficiencia productiva.

En el departamento de Ayacucho, se hace necesario implementar esta tecnología para utilizar eficientemente el agua de riego y asegurar la productividad agrícola del cultivo de palto. En el año 2024, las provincias que lideraron la producción de palta fueron La Mar y las Cabezas de Lucanas. Sin embargo, la provincia de Huanta, específicamente el distrito de Luricocha, alcanzó un estado de sequía moderada, según el índice de sequía del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2025). Como consecuencia, la producción de palta se redujo en un 50% en comparación con años anteriores, debido a las prolongadas sequías y la escasez de agua que han afectado a la región (Jornada, 2024).

En este contexto, la termografía infrarroja se posiciona como un método valioso para evaluar el estado hídrico de los cultivos. Por ello, el objetivo principal de este estudio fue utilizar técnicas de teledetección para determinar el IEHC en tres cultivares de palto (Hass, Fuerte y Zutano) durante la etapa de floración bajo diferentes condiciones de riego, empleando la termografía infrarroja como herramienta de análisis, evaluando las variaciones significativas de la temperatura foliar del cultivo.

Objetivo general

Aplicar la teledetección para el seguimiento del desarrollo del cultivo del palto (*Persea americana* Mill.) en la Estación Experimental Huanchac, Huanta, en el 2022.

Objetivos específicos

1. Determinar los umbrales térmicos del cultivo de palto en la fase reproductiva a diferentes condiciones de riego mediante teledetección térmica en la Estación Experimental Huanchac.

2. Estimar el índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC) de palto en la fase reproductiva a partir de los umbrales térmicos a diferentes condiciones de riego en la Estación Experimental Huanchac.
3. Evaluar el estado hídrico del cultivo de palto en la fase reproductiva utilizando el IEHC como indicador derivado de teledetección en la Estación Experimental Huanchac.

MARCO TEÓRICO

1.1 Justificación

La importancia económica y nutricional del palto, así como su creciente demanda a nivel nacional e internacional, indican la necesidad de optimizar los recursos hídricos durante el desarrollo del cultivo para asegurar una producción sostenible y de alta calidad. En este contexto, comprender cómo las diferentes condiciones de riego afectan el estado hídrico de los cultivares de palto ayuda a mejorar las estrategias de gestión de los recursos hídricos para aumentar el rendimiento y reducir el impacto ambiental. El uso de sensores térmicos complementa un método de investigación innovador para obtener información precisa y detallada sobre el estado hídrico de los árboles de paltos en diferentes momentos y bajo diferentes condiciones de riego. Este enfoque puede proporcionar una visión amplia de los patrones de estrés hídrico durante la fase reproductiva, que ayude a tomar decisiones informadas para optimizar los recursos hídricos y aumentar el rendimiento de los cultivos.

1.2 Antecedentes

1.2.1 En el ámbito internacional

La teledetección térmica infrarroja se ocupa de la adquisición de imágenes, procesamientos e interpretación de imágenes adquiridas de la región infrarroja térmica del espectro electromagnético (Chuvieco, 2008). El uso de estas imágenes ha crecido rápidamente en los últimos años por la capacidad de obtener información a mayor escala, sin contacto de manera no destructiva, y proporciona imágenes de alta resolución espacial y temporal. En la agricultura ha tenido lugar el monitoreo de viveros, programación de riego, la detección del estrés, la detección de enfermedades de las plantas, la estimación del rendimiento, evaluación de madurez (Ishimwe et al., 2014).

Estudios recientes han destacado la efectividad de los métodos de imágenes térmicas, infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta para definir niveles de estrés por falta de agua en la planificación del riego de cultivos de frutas (Islam et al., 2023; Karmakar et al., 2024). Estos estudios se centran en evaluar parámetros vegetales como la temperatura de la hoja, la tasa de transpiración, la conductancia estomática y el cierre de las estomas,

ya que sus reducciones son inducidas por cambios en el estado hídrico de la planta, y la combinación de estos parámetros con termografía infrarroja ha hecho posible automatizar y controlar a distancia los sistemas de riego (Ishimwe et al., 2014). En varios estudios que consideran diferentes sistemas de riego y tipos de suelo, los investigadores han utilizado la termografía infrarroja para obtener el índice de estrés hídrico en cultivos de diferentes frutales, como se muestra en la tabla 1.1. Estos resultados indican que el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC), determinado mediante termografía infrarroja, es un buen indicador para establecer el momento adecuado de riego y evaluar el estado hídrico del cultivo.

Tabla 1.1.

Índice de estrés hídrico determinado a partir de la medición de temperatura foliar en frutales con diferentes sensores térmicos, sistemas de riego, tipos de suelo y clima.

Clasificación climática Köppen-Geiger	Sistema de riego	Suelo	Sensor para medición de Temperatura	IEHC	Cultivo	Zona de estudio	Referencia
Subtropical húmedo	Aspersión	Suelo con óptimo drenaje	Cámara térmica infrarroja (Flir Systems, USA)	0,04 – 0,18	Palto	Bundaberg, Australia	(Salgadoe et al., 2019)
Subtropical árido	Aspersión	Fr-Ao	Cámara térmica (Flir One, Flir System, USA)	- 0,5 – 1,0	Olivo	Coria del Río, España	(Sánchez-Piñero et al., 2022)
Subtropical árido	Goteo	Suelo con buen drenaje	Cámara térmica (Flir One, Flir Systems, Wilsonville, OR, USA)	0,0 – 0,9	Cerezo	Cartagena, España	(Blaya-Ros et al., 2021)
Mediterráneo de verano suave	Goteo	Fr-L (10 cm)	Cámara térmica (Fluke, Ti55FT-20, Everett,	0,19 – 0,43 con riego	Manzano	Ñuble, Chile	(Quezada et al., 2020)

		Fr Ao (35 cm)	Washington, USA)	0,35 – 0,91 sin riego			
Mediterráneo	Goteo	Suelo con buen drenaje	Termómetro de infrarrojos tipo K (Fluke 5065882, China)	0,0 – 0,49	Pistacho	Merced County, EE. UU.	(Mortazavi et al., 2022)
	Aspersión			-0,12 – 0,43	Almendras		
Subtropical árido	Goteo	Fr-Ar	Radiómetro de infrarrojos (sensor Apogee serie SI-431)	0,1 – 1,1 (campo abierto)	Lima	Santomera, España	(Mira- García et al., 2022)
				0,2 – 1,0 (sombra)			

Nota: Fr-Ao: franco arenoso, Fr-Ar: franco arcilloso, Fr-L: franco limoso.

1.2.2 En el ámbito nacional

En el contexto peruano, se ha venido implementando esta metodología en diversos cultivos agrícolas como arroz (Durán-Gómez et al., 2021) y ají (Duran et al., 2021). Sin embargo, su aplicación en palto y otros frutales aún es limitada. Aunque se han obtenido resultados exitosos en investigaciones realizadas en otras regiones, la aplicación de estas estrategias en cultivos específicos del Perú constituye una oportunidad valiosa para perfeccionar el manejo hídrico y mejorar la eficiencia productiva en la agricultura.

1.2.3 En el ámbito local

En la región de Ayacucho, es ampliamente utilizado el uso de drones para fines de construcción, modelamiento hidrológicos e hidráulicos; y monitoreo de riesgos de desastres; sin embargo, su utilización en el monitoreo de cultivos o con fines de uso eficiente de riego es muy limitada y escasa. La presente investigación representa la oportunidad de implementar estas metodologías para la gestión del riego en nuestra región.

1.3 Cultivares de palto

1.3.1 Cultivo de palto (*Persea americana* Mill.)

El cultivo de palto se posiciona como uno de los frutales tropicales y subtropicales más relevantes a nivel global, tanto por su valor económico como por sus propiedades nutricionales. Durante los últimos 150 años, su producción y consumo ha tenido un crecimiento acelerado. Un factor contribuyente a este incremento es la expansión hacia nuevos mercados y lugares de cultivo, así como el aumento del consumo del fruto a través de generaciones en poblaciones familiarizadas con la palta (Schaffer et al., 2013).

1.3.2 Taxonomía del árbol de palto

El árbol de palto con nombre científico, *Persea americana* Mill., es miembro de la familia Laureceas con más de 2500 especies (Rohwer, 1993), distribuido en su mayoría en tipos de clima subtropical. Desde la antigüedad, el palto ha sido reconocido por su alto valor nutricional, destacando por su elevado contenido de ácidos grasos monoinsaturados, además de ser una fuente importante de minerales, vitaminas y compuestos antioxidantes (Ford et al., 2023; Schaffer et al., 2013).

Desde el punto de vista taxonómico, Ibar (1979) clasificó al palto dentro del Reino Plantae, ubicándolo en el subreino Talofitas. Se clasifica dentro de la división Fanerógamas y la subdivisión Angiospermas, con inclusión en la clase Dicotiledónea y la subclase Arquiclamíde. Morfológicamente, se ubica en el orden Ranales, suborden Magnolíneas, y forma parte de la familia Lauraceae. Su género es *Persea* y la especie correspondiente es *Persea americana* Mill. Dentro de esta especie se reconocen tres razas botánicas: guatemalteca, mexicana y antillana, y entre las variedades comerciales más destacadas se encuentran: Hass, Fuerte y Zutano.

1.3.3 Cultivares e injertos

Se describen 3 variedades de palto:

- **Hass**
Actualmente, el palto 'Hass' es el cultivar de mayor relevancia a nivel mundial, considerándose como estándar de excelencia en las zonas tropicales desde 1960 (Schaffer et al., 2013). El árbol del palto Hass se clasifica como de porte medio a grande, con un hábito de crecimiento semierguído y una copa de conformación amplia es de tamaño mediano a

grande, con crecimiento semierguido y de dosel ancho; pertenece al grupo de flores A. El fruto presenta una morfología periforme de color verde oscuro con un peso de 140–400 g con un promedio de 252–350 g; la cascara es de textura rugosa de grosor mediano a gruesa y una superficie áspera y granulada (Schaffer et al., 2013).

- ***Fuerte***

Es un híbrido mexicano-guatemalteco que logró sobrevivir al clima extremadamente frío de California en enero de 1913, ganándose así el nombre de 'Fuerte'. Es un cultivar muy robusto; los árboles son de gran tamaño y tienen copas extensas; las hojas desprenden un aroma a anís al ser trituradas, y los brotes jóvenes presentan manchas rojas en su madera; pertenece al grupo de flores B. Los frutos son de forma piriforme con un cuello característico pero variable, que va desde alargados con un cuello largo y estrecho hasta más compactos con un cuello corto y ancho, de tamaño que oscila entre mediano y grande, con un peso de 170 a 500 gramos; la piel es delgada, verde, con un brillo moderado, textura flexible y correosa con una superficie granulada (Schaffer et al., 2013).

- ***Zutano***

Es una variedad híbrida mexicano-guatemalteca, con un crecimiento vertical y presenta manchas rojas en la madera de los brotes jóvenes. Sus flores pertenecen al grupo B. Los frutos tienen una forma que varía de ovalada a piriforme y son de tamaño medio, pesando entre 200 y 400 gramos. Es un polinizador eficaz para la variedad Hass y se destaca por su capacidad para tolerar condiciones de salinidad y frío. Debido a estas cualidades, se utiliza extensamente como portainjerto para plántulas en áreas donde el agua está cerca del límite aceptable para el cultivo de palto (Schaffer et al., 2013).

Figura 1.1.

Cultivares de palto.

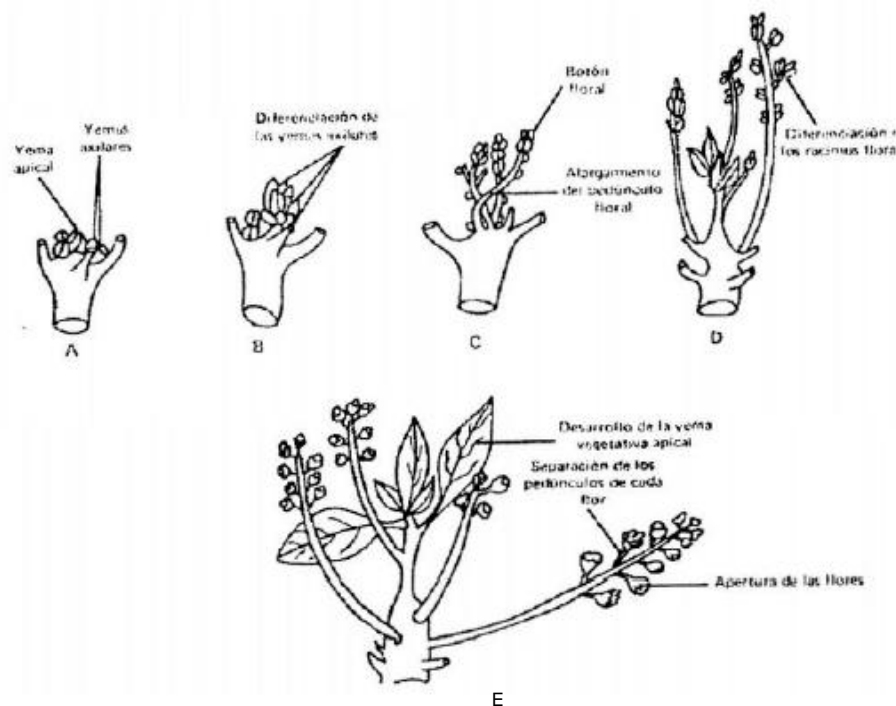


1.3.4 Ecofisiología del palto

El entorno ambiental desempeña un papel clave en los procesos fisiológicos y morfológicos de las plantas y determinan el grado en que se alcanza el potencial genotípico. Las condiciones ambientales y el estrés hídrico suelen tener mayor impacto en el crecimiento y desarrollo de los paltos (Rebolledo et al, 2011). Durante los cinco estados que comprende la fase reproductiva del palto (figura 1.2, tabla 1.2), se intensifica la sensibilidad de la planta a las condiciones ambientales y al estrés hídrico (Blanke & Lovatt, 1993). En esta fase, el palto reacciona a factores ambientales como la luz, la temperatura, el suministro de agua y la humedad relativa, y se manifiestan alteraciones en la tasa fotosintética y en la conductancia estomática de las hojas (Schaffer et al., 2013).

Figura 1.2.

Descripción gráfica de los estados de la fase reproductiva del palto.



Fuente: Espinoza-Mendoza (2015)

Tabla 1.2.

Estados de la fase reproductiva del palto desde la aparición de yemas hasta la diferenciación floral.

Estado A	Se caracteriza por la aparición de yemas hinchadas con un tono amarillento y la separación de las escamas superiores, análogo al estado B correspondiente a la fase vegetativa. Cerca de la yema apical emergen una o más yemas axilares
-----------------	--

	de tonalidad verde clara, a partir de las cuales se originan las inflorescencias.
Estado B	Se observa una relativa detención del desarrollo en el ápice terminal, mientras que las yemas laterales verdes muestran una mayor diferenciación, revelan los esbozos de las nuevas inflorescencias. Se distinguen claramente los botones florales.
Estado C	El pedúnculo floral experimenta un alargamiento, mientras que el ápice puede mantenerse detenido o continuar su desarrollo simultáneamente con otros órganos laterales.
Estado D	El pedúnculo floral alcanza su máxima longitud y los racimos de flores, que formarán una panícula (un racimo de racimos), están claramente diferenciados alrededor del eje central de la inflorescencia.
Estado E	Los pedúnculos se individualizan y se inicia la apertura de los pétalos, mostrando las características correspondientes a la dicogamia. Si la yema terminal ha continuado su desarrollo durante la antesis, en esta etapa el brote apical presentará características juveniles, evidenciadas por la presencia de cuatro a cinco hojas de tonalidad rojiza o rosada, con un grado incipiente de expansión de sus limbos.

Fuente: Espinoza-Mendoza (2015)

- **Luz solar:** La luz solar disponible es un componente predominante para la actividad fotosintética de las plantas, cuyas respuestas se cuantifican mediante el flujo de fotones fotosintéticos (PPF). Este flujo representa la cantidad de fotones presentes en la radiación solar que abarca longitudes de onda de 400 a 700 nm, empleada en las actividades fotosintéticas (Schaffer et al., 2013). En el cultivo de palto, Schaffer et al. (2013) señalan que el punto de saturación de luz es del 50% de PPF en horas de mayor insolación, donde el PPF es de $2000 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$. En variedades como la Hass y el Fuerte, alcanzan un nivel de saturación relativamente rápido al alcanzar un PPF de $500 \text{ mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ cuando están expuestas a luz solar directa.

- **Temperatura:** Schaffer et al. (2013) señalan que la temperatura óptima para la asimilación máxima de CO₂ en las hojas del palto se sitúa entre 20 y 30 grados Celsius, y los valores de temperaturas fuera de ese rango la asimilación de CO₂ disminuye. Las elevadas temperaturas ambientales durante la fase reproductiva y frutera del palto pueden influir en la calidad después de la cosecha, así como en el tamaño de los frutos. Es esencial mencionar que los árboles de palto tienen un nivel de tolerancia al frío, y esta capacidad difiere según la variedad. Por ejemplo, la variedad Zutano es capaz de resistir temperaturas mínimas más bajas en comparación con la variedad Hass. Las plantas de la variedad Hass, por ejemplo, han experimentado daños o incluso han llegado a morir cuando las temperaturas descienden hasta -2,8 °C (Schaffer et al., 2013).
- **Humedad relativa:** Es una de las variables ambientales influyentes en la actividad fotosintética. La cantidad de humedad que rodea a las plantas se origina por el déficit de presión de vapor a una temperatura determinada. Esta humedad influye, en síntesis, reflejándose en las variaciones en la fijación de CO₂ y en el intercambio gaseoso a través de las estomas de las hojas de palto (Schaffer et al., 2013).
- **Humedad del suelo:** El grado de estrés hídrico que puede llegar a tener el cultivo debido al déficit de agua en el suelo, impacta notablemente los procesos fisiológicos del palto. Esto causa una disminución en el intercambio gaseoso a través de las estomas de las hojas, el potencial hídrico de tejidos vegetal y la asimilación de CO₂, limitando el crecimiento y la generación de biomasa. Según Schaffer et al. (2013), cuando los árboles de aguacate son sometidos a largos periodos de estrés, su desarrollo se ve restringido, resultando en hojas más pequeñas, un peso específico menor y frutos de tamaño y forma reducidos. Además, el aguacate es vulnerable a la humedad excesiva en el suelo, como la que causa las inundaciones. Esto puede hacer que la planta reaccione al principio con reducciones del intercambio gaseoso por un mayor control de la apertura estomática y en la fotosíntesis neta (Schaffer et al., 2013).
- **Viento:** La evapotranspiración, determinada por la energía, temperatura, humedad, velocidad de viento y el déficit de presión de vapor, se ve influida significativamente por esta última. La baja velocidad del viento contribuye a la acumulación de humedad en la capa límite foliar, dificultando la pérdida de agua

por transpiración. En una investigación sobre árboles de palto, Haas (2000) indica que la exposición al viento disminuye la transpiración debido al cierre parcial de las estomas, mientras que velocidades por encima de 6 mph incrementan el flujo de savia en el tallo (Schaffer et al., 2013). Estos hallazgos evidencian la naturaleza compleja de la relación entre el viento y los procesos fisiológicos vegetales, remarcando la importancia de considerar la velocidad del viento al analizar la evapotranspiración y el comportamiento del agua en los cultivos.

1.4 Teledetección aplicada al monitoreo hídrico

1.4.1 Teledetección

Lillesand et al. (2015) describen la teledetección como una disciplina que combina ciencia y técnica para recolectar información sobre objetos, áreas o fenómenos sin contacto directo, a través del análisis de datos captados por sensores remotos.

Chuvieco (2008) también señala que la teledetección es una técnica que utiliza sensores para captar energía de objetos a distancia. Esta forma de energía se fundamenta en la capacidad de los cuerpos para emitir o reflejar radiación electromagnética. Por ello, todo sistema de teledetección se compone fundamentalmente de tres elementos clave: el sensor, el objeto de estudio y la energía que media en su interacción. La obtención de información mediante sensores remotos puede llevarse a cabo a través de tres mecanismos principales: reflexión, emisión y una combinación de reflexión-emisión (tabla 1.3) (Chuvieco, 2008).

Tabla 1.3.

Formas de adquisición de información por el tipo de interacción objeto-sensor.

Tipo	Interacción	Sensor
Reflexión	El sensor mide energía reflejada por los objetos en la superficie.	- Sensores ópticos pasivos (con radiación solar) - Sensores activos (emiten energía hacia el objeto)
Emisión	El sensor capta la energía térmica emitida naturalmente por los objetos debido a su temperatura.	Sensores térmicos infrarrojos
Reflexión-emisión	El sensor capta energía reflejada y emitida, generalmente en bandas del infrarrojo medio.	Sensores multiespectrales o hiperespectrales.

Fuente: Chuvieco (2008).

Cualquiera sea el caso, la energía transmitida desde la cubierta terrestre hacia el sensor se propaga como una onda electromagnética.

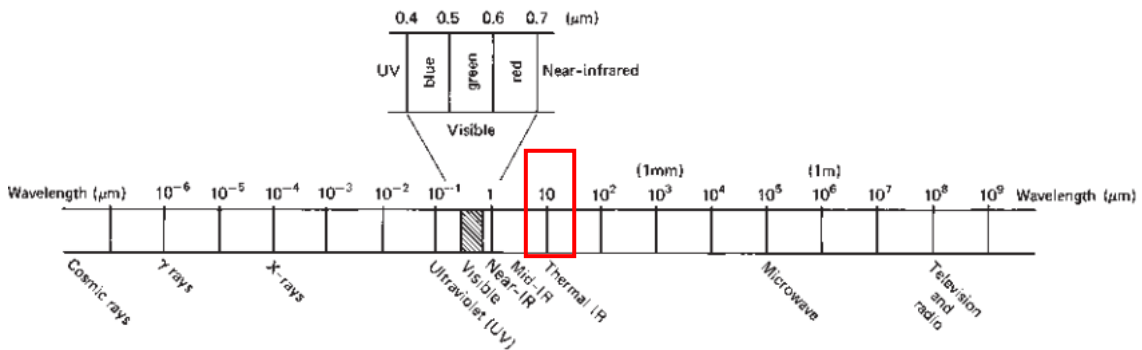
1.4.2 Teledetección térmica infrarroja

- **Principios físicos de la teledetección térmica infrarroja**

En 1800, William Herschel descubrió los rayos infrarrojos. Mientras buscaba nuevos materiales ópticos, iba midiendo la temperatura de los colores del espectro con un bulbo de termómetro de mercurio ennegrecido. Al ir moviendo lentamente el termómetro ennegrecido a través de los colores del espectro, notó que la temperatura aumentaba al ir del violeta al rojo. en una región situada un poco más allá de la luz roja del espectro, una zona que no era visible a simple vista, y descubrió que en esta zona sin luz visible seguía aumentando la temperatura. Por último, encontró que las temperaturas más altas de todas estaban en el rango ubicado más allá de la luz roja del espectro; actualmente es denominado como el espectro infrarrojo (figura 1.3).

Figura 1.3.

Espectro de las radiaciones electromagnéticas ordenadas por longitud de onda.



Fuente: Lillesand et al. (2015)

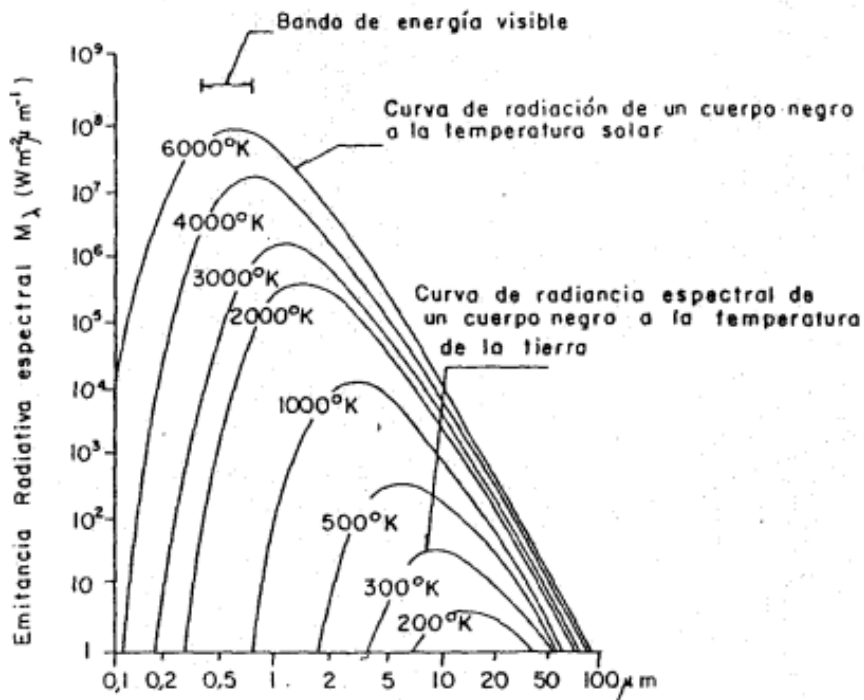
Aproximadamente un siglo después, alrededor de 1900, Max Planck, definió la ley de radiación que describe la radiación espectral específica M_{λ} s emitida por un cuerpo negro hacia el espacio, en función de su temperatura (T) y de la longitud de onda observada (λ).

$$M_{\lambda}s = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 \left(\exp\left(\frac{hc}{\lambda KT}\right) - 1 \right)} \quad \text{Ecuación 1.1}$$

Donde M_{λ} s representa la emitancia radiativa espectral de un cuerpo negro a una longitud de onda específica; h es la constante de Planck ($6,626 \times 10^{-34}$ J s); k , la constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ J/K); c , la velocidad de la luz; λ , la longitud de onda; y T , la temperatura absoluta del cuerpo negro en Kelvin (K) (Chuvieco, 2008). La fórmula de Planck indica que cualquier objeto por encima del cero absoluto (-273 °C) emite energía, y que esta emisión aumenta con la temperatura. Además, a temperaturas más elevadas, el cuerpo radia con mayor intensidad en longitudes de onda más cortas. A partir de esta fórmula se reconstruyó la curva de emitancia de un cuerpo negro a diferentes temperaturas (figura 1.4).

Figura 1.4.

Curvas de radiación espectral M_{λ} s del cuerpo negro a diferentes temperaturas en °K.



Fuente: Chuvieco (2008)

A partir de la fórmula de Planck, se puede calcular la longitud de onda en la que se produce la máxima emitancia de un cuerpo negro, conociendo su temperatura (T) en Kelvin. Esta relación es conocida como la ley del desplazamiento de Wien:

$$\lambda_{max} = \frac{2898 \mu m K}{T} \quad \text{Ecuación 1.2}$$

A medida que la temperatura se eleva, la longitud de onda en la que se alcanza la máxima emisión radiante se acorta, desplazándose hacia el extremo más

energético del espectro. Según estas leyes, Chuvieco (2008) indicó que la banda espectral entre 8 y 14 μm es donde la emitancia espectral de la superficie terrestre se muestra más claramente, según su temperatura. La señal espectral detectada por los sensores es resultado de la radiación térmica emitida por la superficie terrestre, y no de la energía solar reflejada, siendo esta emisión función directa de la temperatura superficial.

- **Emisión térmica de la vegetación en el espectro infrarrojo**

Las plantas absorben radiación solar como fuente de energía para sus funciones fotosintéticas. Su alta inercia térmica, derivada del contenido hídrico en los tejidos, les confiere una respuesta térmica más estable frente a cambios ambientales. Esta propiedad le permite regular su ciclo hídrico. A través de la evapotranspiración, la vegetación puede controlar su temperatura liberando calor, facilitando así el tránsito del agua almacenada en las hojas hacia el estado gaseoso. La pérdida de calor lleva a la vegetación a reducir su temperatura, lo que permite mantenerse más frescas durante el día en comparación con su entorno. Este comportamiento está influenciado por diversas condiciones y variables ambientales del entorno. La evapotranspiración está influenciada por múltiples variables ambientales, entre las que destacan la humedad relativa del aire, la velocidad del viento, la radiación solar disponible, la temperatura y el contenido de humedad en el suelo. En este contexto, una mayor humedad atmosférica tiende a disminuir la tasa de evapotranspiración, mientras que el aumento en los demás factores suele favorecer su incremento. (Chuvieco, 2008).

1.5 Índice térmico de teledetección de estrés hídrico

1.5.1 Índice de estrés hídrico de cultivo (IEHC)

En el siglo XX, se iniciaron con el diagnóstico de déficit de agua en cultivos a partir de la determinación de índices a partir de la temperatura foliar de las plantas. Esto incluye índices como los Días de Grado de Estrés (SDD), la Variabilidad de la Temperatura del Dosel (CTV) y el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC), gracias a la introducción de termómetros de mano (Xu et al., 2016). El IEHC, basado en la temperatura, ha sido desarrollado por Idso como indicador del estrés por falta de agua en las plantas

específicamente de climas áridos (López et al., 2009). Su determinación se apoya en las líneas base del cultivo en situaciones de estrés y sin estrés. Idso et al. (1981) definieron al IEHC con la siguiente ecuación empírica:

$$IEHC = \frac{[(T_c - T_a)_m - (T_c - T_a)_{Li}]}{[(T_c - T_a)_{Ls} - (T_c - T_a)_{Li}]} \quad \text{Ecuación 1.3}$$

En esta relación, la diferencia de temperaturas está representada por $T_c - T_a$, donde T_c corresponde a la temperatura foliar y T_a a la temperatura del aire. El subíndice m indica el momento específico en el que se realiza la medición de dicha diferencia. Cuando existen condiciones de baja humedad en el suelo, la evapotranspiración se reduce, lo que provoca un aumento del T_c y, en consecuencia, una mayor diferencia térmica entre la hoja y el aire. Esta situación define el límite superior de estrés hídrico, representado por el índice Ls . Por el contrario, cuando el suelo presenta niveles óptimos de humedad, la evapotranspiración no se ve limitada, lo que resulta en la menor diferencia térmica posible bajo las condiciones climáticas existentes. Este escenario corresponde al límite inferior de estrés, indicado por el subíndice Li .

Al sustituir estos valores en la ecuación 1.3, se calcula el IEHC, el cual refleja las alteraciones en la evaporación y en la apertura estomática que se producen conforme el déficit hídrico se convierte en un factor limitante para el crecimiento y desarrollo del cultivo. Este índice permite establecer una relación cuantitativa útil como referencia para la programación eficiente del riego.

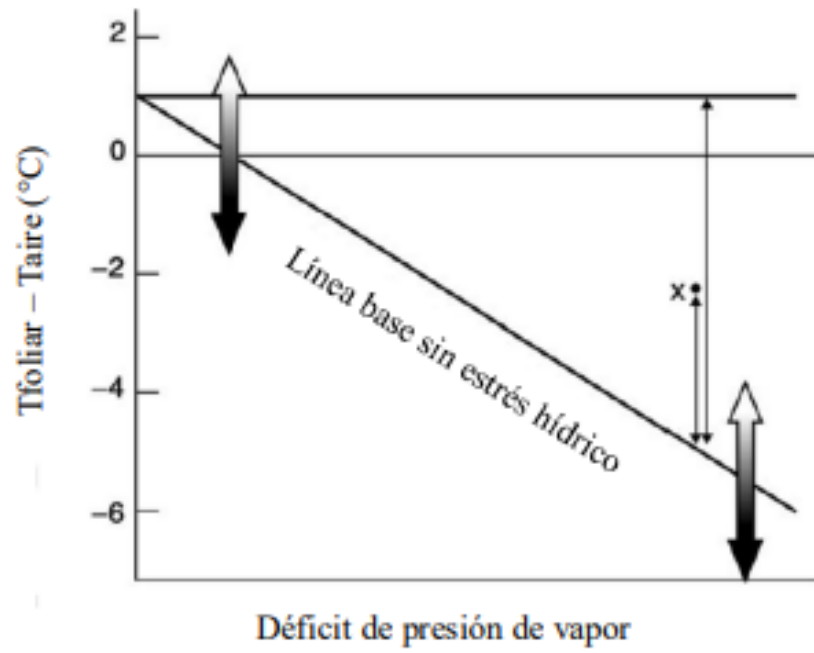
1.5.2 Umbrales de temperatura

Para calcular el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC), es necesario definir los umbrales de temperatura húmeda y seca, los cuales representan condiciones de mínimo y máximo estrés hídrico foliar. Estos umbrales permiten normalizar la temperatura del dosel bajo diferentes condiciones ambientales y son específicos para cada cultivo, dependiendo de factores climáticos y fenológicos (López et al., 2009; Villar Barraza, 2019).

La temperatura húmeda se obtiene en cultivos bien hidratados, usualmente en las primeras horas del día, cuando la temperatura foliar se asemeja a la del aire. En cambio, la temperatura seca se asocia a situaciones de máxima sequía, donde el cierre estomático impide la transpiración; se mide en las horas de mayor temperatura, tras el mediodía, y refleja el punto crítico de estrés hídrico.

Figura 1.5.

Relación entre la diferencia de temperaturas ($T_c - T_a$) y el de déficit de presión de vapor.



Fuente: Villar Barraza, (2019)

CAPÍTULO I

METODOLOGÍA

2.1 Localización del área de estudio

Se realizó en el valle de Huanta, en los campos de la Estación Experimental Huanchac, en la provincia de Huanta (figura 2.1), del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) de la región de Ayacucho (figura 2.2).

- **Localización política-administrativa**

Región : Ayacucho
Provincia : Huanta
Distrito : Luricocha
Centro poblado : Huanchac

- **Localización geográfica**

Latitud : 12° 55' 28" S
Longitud : 74° 17' 42" O
Altitud media : 2351 m s. n. m.

- **Coordenadas UTM**

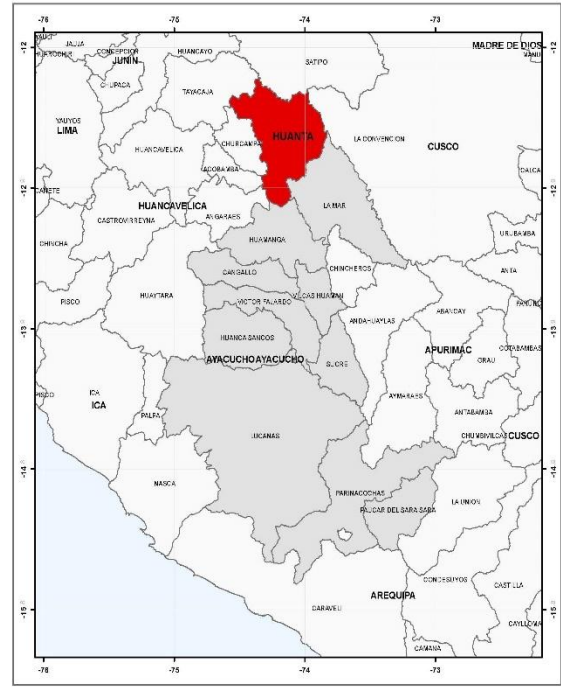
Este : 576515.00 m
Norte : 8570650.00 m
Altura : 2351 m s. n. m.
Datum : WGS 84
Zona : 18 – S

Figura 2.1.

Ubicación nacional, provincial, regional, y distrital de la Estación Experimental Huanchac, Huanta.



UBICACIÓN NACIONAL
Escala 1:50 000 000



UBICACIÓN PROVINCIAL
Escala 1:3 000 000



UBICACIÓN REGIONAL
Escala 1:20 500 000



UBICACIÓN DISTRITAL
Escala 1:700 000

Figura 2.2.

Ubicación y delimitación geográfica de la Estación Experimental de Huanchac, Huanta.



LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Escala 1:16 500

2.2 Planteamiento y descripción del estudio

La provincia de Huanta y, en específico, el distrito de Luricocha, es una zona productora de palta. Al 2023 cuenta con 217 ha sembradas según el Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias (MIDAGRI, 2025). La producción, según la asociatividad, se presenta de manera individual de muchos productores o mediante la integración a organizaciones como la Asociación de Fruticultores del Valle de Huanta (AFRUVAH), o en otro tipo de agrupaciones no especificadas (Palomino-Palomino, 2013). Sin embargo, su producción muchas veces es condicionada a la disponibilidad del recurso hídrico, en específico en los meses donde los niveles de precipitación son pocos o nulos. El manejo del riego generalmente se realiza con una frecuencia de 14 a 7 días, condicionado a la disponibilidad del agua y las condiciones meteorológicas que pueden intensificar un

estrés hídrico en los cultivos. Por ello, el estudio se realizó en el periodo en el que los niveles de precipitación se reducen en los meses de abril y mayo del 2023. Con el propósito de evaluar el estado hídrico de los árboles de palto bajo diversas condiciones hídricas, se establecieron cuatro fechas específicas de monitoreo (tabla 2.1). El primer monitoreo se realizó el 26 de abril, cuando el cultivo de palto se encontraba en el estado B de la fase reproductiva, con una condición de 14 días sin aplicación de agua. El riego se aplicó ese mismo día a las 6:00 p.m. durante aproximadamente cuatro horas. El monitoreo posterior se realizó al día siguiente, 27 de abril, a las 10:00 a.m., cuando el cultivo presentaba una condición de 12 horas después del riego. El segundo monitoreo se realizó en mayo, cuando el cultivo se encontraba en el estado D de la fase reproductiva, tras 7 días sin riego. Al día siguiente, se aplicó el riego a las 5:00 a.m., y el monitoreo se llevó a cabo a las 10:30 a.m. y 11:30 a.m., es decir, 1 y 2 horas después de finalizado el riego, respectivamente.

Tabla 2.1.

Fechas de monitoreo del cultivo de palto a diferentes condiciones de riego.

Fecha	Condición de riego	Código
26/04/2023	14 días sin riego	SR-14d
18/05/2023	07 días sin riego	SR-7d
27/04/2023	12 horas después del riego	DR-12h
19/05/2023	2 horas después del riego	DR-2h
19/05/2023	1 hora después del riego	DR-1h

2.2.1 Características del cultivo de palto

La plantación de palto estaba conformada por tres cultivares: Hass, Fuerte y Zutano, sembrados de manera aleatoria a una distancia de 6,0 m entre surcos y 5,5 m entre plantas. En la parcela de estudio se encontraron un total de 300 árboles de paltos de un promedio de 5 años de desarrollo; sin embargo, se seleccionaron 170 paltos con mayor desarrollo y densidad foliar en fase reproductiva (figura 2.5). El monitoreo coincidió entre los estados B (figura 2.4a) y D (figura 2.4b) de la fase reproductiva del cultivo de palto (figura 2.3). El palto muestra mayor sensibilidad al estrés durante esta fase, debido a su mayor requerimiento de agua, cierto grado de estrés para la producción de flores y el control de caída de estas (Acosta Rangel, 2018).

Figura 2.3.

(a) Monitoreo con VANT en el cultivo de palto. (b) Estados de la fase reproductiva del palto (*Persea americana* Mill.).

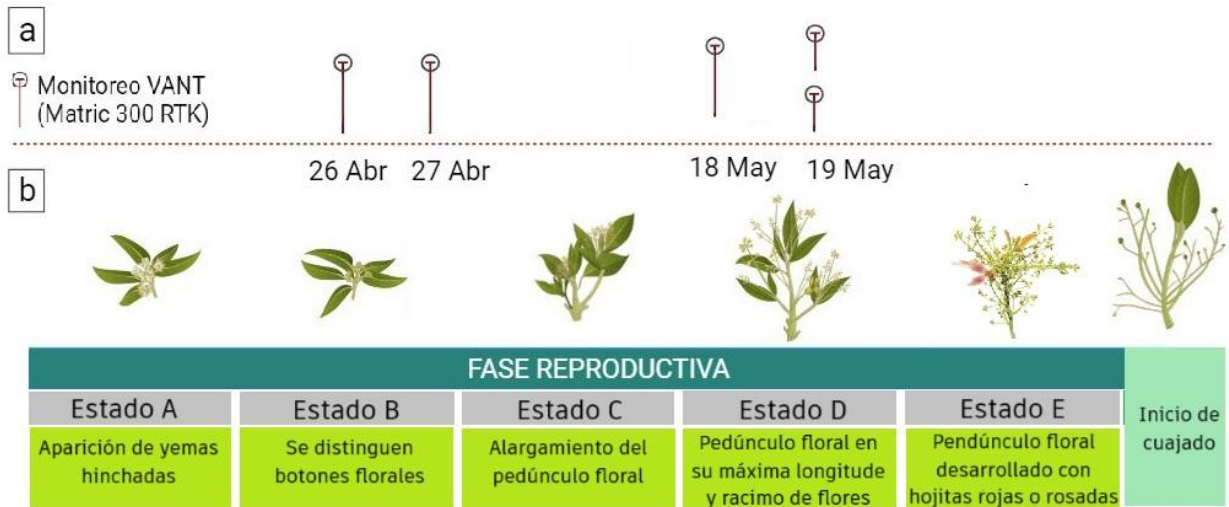


Figura 2.4.

(a) Estado B y (b) D de la fase reproductiva del palto (*persea americana* Mil.) en la Etsación Experimental de Huanchac.

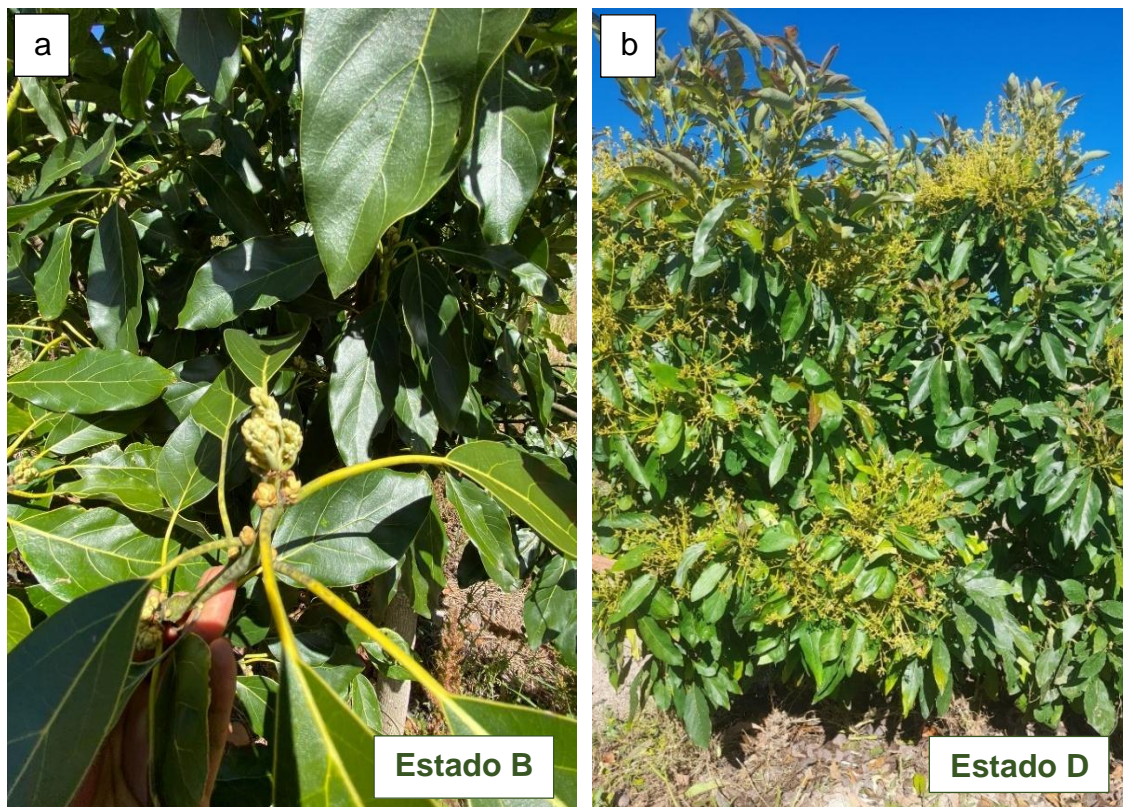
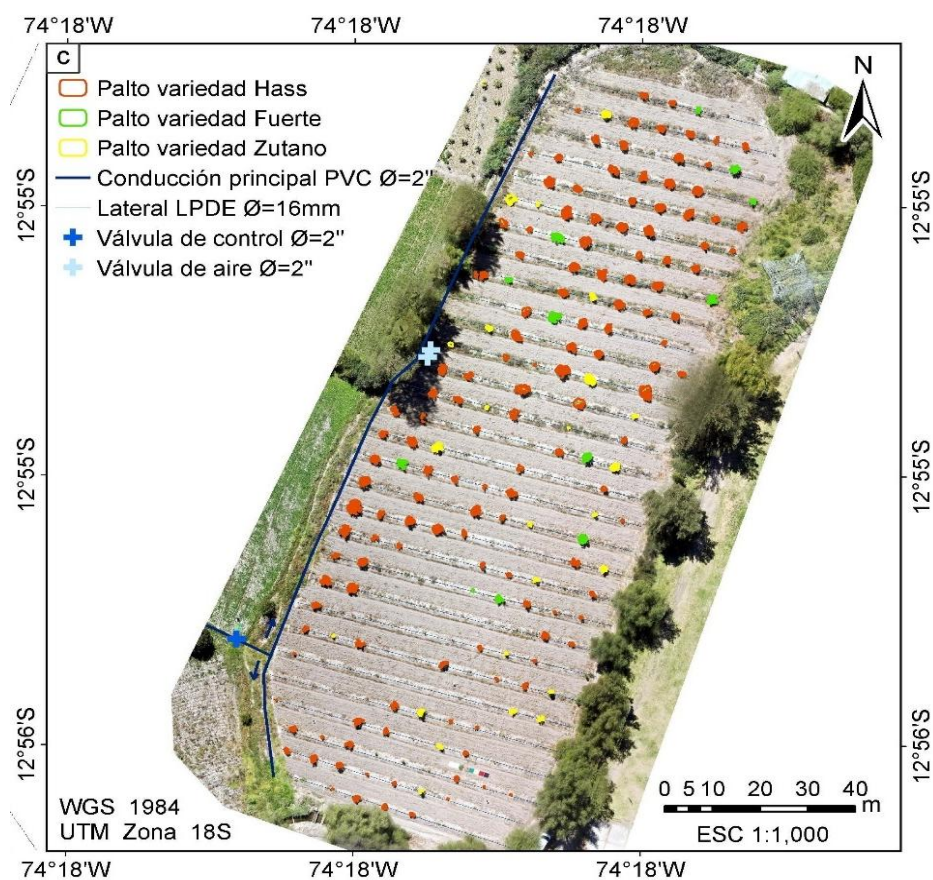


Figura 2.5.

Arreglo espacial de los árboles de palto.



2.2.2 Características del suelo

La región baja de Huanta se caracteriza por tener suelos aluviales con una fertilidad moderada, En tanto, la zona intermedia se caracteriza por presentar suelos de textura franco-arenosa, con un ligero grado de erosión y condiciones de drenaje favorables, lo que resulta óptimo para el crecimiento y desarrollo del palto (Espinoza-Mendoza, 2015). El suelo específico de la parcela de cultivo del presente estudio presenta similares condiciones del suelo de la zona intermedia. En el análisis realizado en el Laboratorio de Suelos, Agua y Foliare (LABSAF) Canaán, del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) en Ayacucho, se determinó que el suelo alcanza niveles de humedad volumétrica registrados de 28,23 % a capacidad de campo y de 15,89 % en el punto de marchitez. En cuanto a las propiedades texturales, el suelo fue clasificado como de textura franca, con una composición aproximada de 35 % de arena, 50 % de limo y 15 % de arcilla. Además, se observa una densidad aparente de $1,19 \text{ g cm}^{-3}$, un contenido de materia orgánica de 3,10%, un pH de 7,6, una CIC de 7,91 meq/100g, niveles de fósforo (P) del 7,18%, potasio (K) del 727,34% y nitrógeno (N) del 0,16% (Anexo 3).

2.2.3 Características del riego

La Estación Experimental de Huanchac se abastece de agua a través del canal del río Cachi. Dispone de un reservorio con una capacidad de almacenamiento de 180 m³, desde el cual se distribuye el agua hacia los cultivos mediante un sistema de riego por goteo compuesta por una tubería principal de PVC de 2 pulgadas de diámetro y regulada por un arco de riego. Treinta laterales de LPDE ($\phi = 16$ mm), colocados cada 5,5 m, reciben agua de esta tubería. Hay un lateral por línea de plantación y cada árbol tiene dos goteros regulables, con un flujo de 72 L h⁻¹ cada uno. El riego inicia en abril después de las lluvias, y varía la frecuencia según condiciones climáticas y el estado de los árboles. Se riega cada 7 días con una lámina de agua de 8-15 mm en un periodo de 3 a 4 horas. El requerimiento de agua mensual se calculó usando la evapotranspiración potencial (Eto) (tabla 2.2) con el método Hargreaves–Samani y un Kc de 0,7, coeficiente de cultivo como lo sugieren Gardiazabal et al. (2003). Los resultados indicaron una lámina real de 36,23 mm para el mes de abril y 46,52 mm para el mes de mayo (tabla 2.3).

Tabla 2.2.

Evapotranspiración potencial para los meses de evaluación del cultivo de palto: abril – mayo del 2023

Método de Hargreaves–Samani			
Parámetro de cálculo	Unidad	Abril	Mayo
días/mes		30	31
Temperatura media mensual	°F	56,1	56,0
Humedad relativa	%	66,0	55,8
Factor de corrección humedad		0,968	1,000
Factor de corrección altitud		1,047	1,047
Factor mensual de evapotransp.		1,980	1,765
ETo - evapotransp. potencial	mm/día	3,6	3,2

Tabla 2.3.

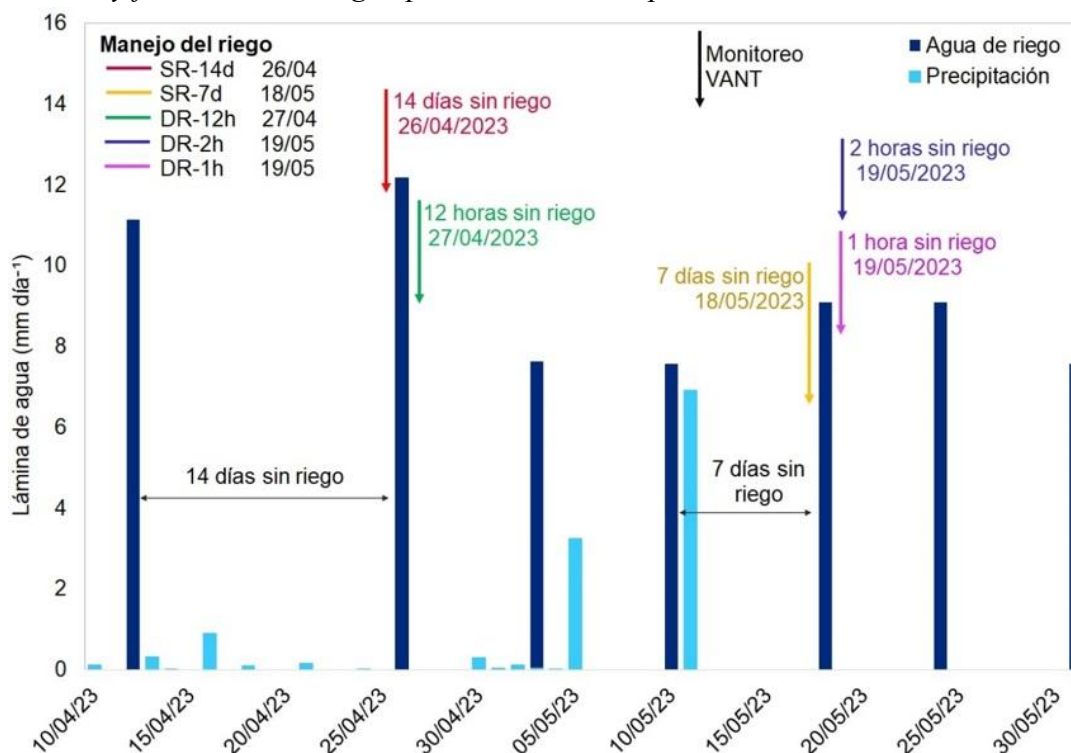
Lámina real y de riego aplicado para los meses de evaluación al cultivo de palto: abril – mayo del 2023.

	ETo mm/día	Kc	ETc (mm/día)	Precipitación (mm/mes)	Lámina real (mm/mes)
Abril	3,6	0,7	2,5	40,5	36,2
Mayo	3,2	0,7	2,2	22,4	46,5

Para evaluar las respuestas de los árboles de palto bajo diferentes condiciones de riego; 14 y 7 días sin riego, y 12, 2 y 1 hora después de cada ciclo de riego. Las láminas de riego aplicado al cultivo se muestran en la figura 2.6.

Figura 2.6.

Lámina y frecuencia de riego aplicada durante el periodo de monitoreos del cultivo.



De acuerdo con el análisis efectuado en el Laboratorio de Suelos, Agua y Foliare (LABSAF) en Canaán, el agua destinada al riego presenta un pH de 7,50 y una conductividad eléctrica (CE) de 222,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$. En cuanto a su composición iónica, se identificaron los siguientes cationes: calcio (Ca^{2+}) con 1,07 meq L^{-1} , magnesio (Mg^{2+}) con 0,51 meq L^{-1} , sodio (Na^{+}) con 0,47 meq L^{-1} y potasio (K^{+}) con 0,20 meq L^{-1} . Entre los aniones predominan el cloruro (Cl^{-}) con 0,54 meq L^{-1} y el bicarbonato (HCO_3^{-}) con 1,68 meq L^{-1} (ver Anexo 4). Según estos resultados, el agua se clasifica como C1-S1, lo que indica un bajo riesgo por sodio y una salinidad media, con un RAS (Relación de Adsorción de Sodio) de 0,529.

2.2.4 Características meteorológicas durante el monitoreo

De acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen, el clima predominante en el valle de Huanta corresponde a un tipo seco, semicálido y templado (García, 2004). La temperatura promedio anual es de 18 °C, con un máximo de 33 °C y un mínimo de 2.9

°C, la precipitación media anual es de 375 mm, distribuida principalmente durante la temporada de verano, mientras que el invierno y otoño se caracteriza por ausencia de lluvias, con humedad relativa promedio a 55 % y la radiación solar promedio anual de 825 W m^{-2} (Estación Meteorológica Convencional Huanta; SENAMHI, 2025). En la primera condición de riego SR-14d, se observó una fluctuación en la temperatura del aire de 27,9 a 26,5 °C, con un promedio de 27,1, y se registraron las temperaturas más elevadas y la humedad relativa más baja del ambiente, con una radiación solar que superaba los 900 W m^{-2} . Durante las siguientes condiciones de riego, la temperatura del aire osciló entre los 21 y los 24 °C, con humedades relativas que oscilaron entre el 30 y el 45 % (figura 2.7). No se observaron cifras de humedad relativa que superaran el 50%, y la radiación alcanzó un valor inferior a 900 W m^{-2} . El 26 y 27 de abril presentan vientos más intensos con una dirección predominante desde el Este. Durante el mes de mayo, se observa una mayor variabilidad en la dirección del viento, siendo el día 18 el viento más fuerte desde el Este y Noreste, y el día 19 desde el Sureste (figura 2.8).

Figura 2.7.

Comportamiento horario de las variables meteorológicas durante los monitoreos: temperatura, humedad relativa y viento.

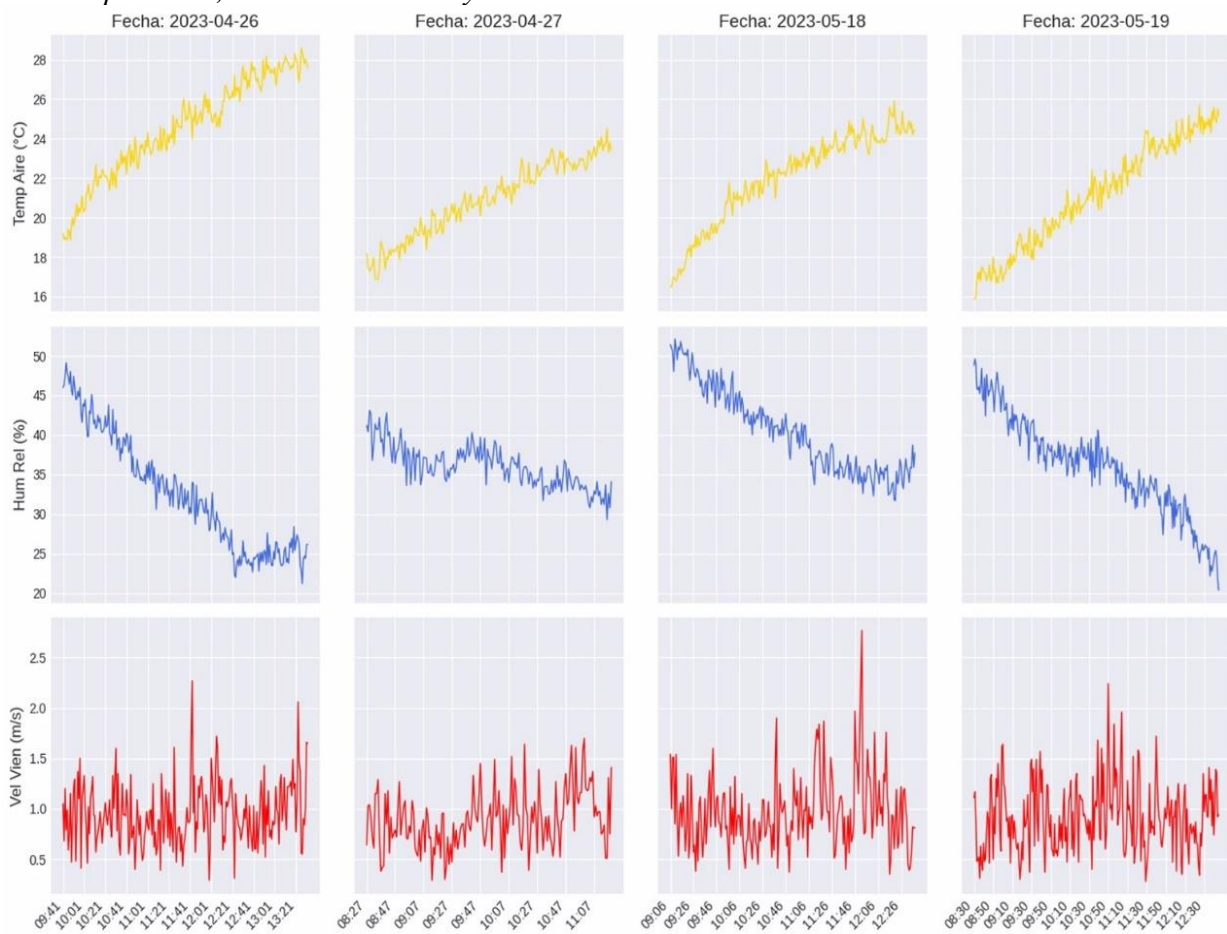
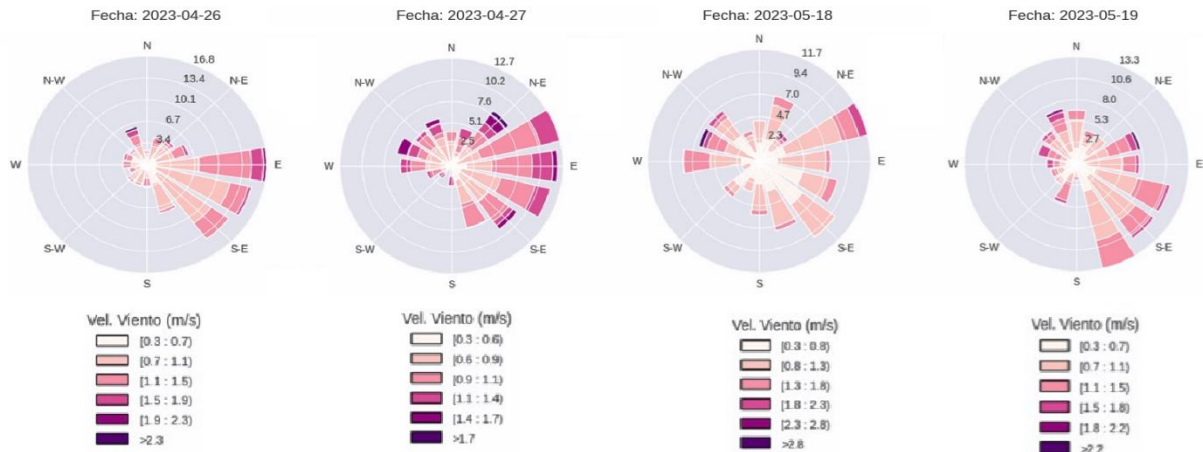


Figura 2.8.

Comportamiento horario de la velocidad, frecuencia y dirección del viento.



2.3 Materiales y equipos

En la fase de campo, se utilizaron sensores para medir la temperatura de las hojas del cultivo y la humedad volumétrica del suelo, así como equipos destinados al registro de variables climáticas (véase tabla 2.4, figura 2.9). Adicionalmente, se dispuso de materiales requeridos para el manejo agronómico del cultivo (tabla 2.5). Por otro lado, durante la etapa de gabinete, se emplearon programas especializados para el procesamiento y análisis de la información (tabla 2.6).

Figura 2.9.

Equipos y sensores empleados en la recolección de datos en campo durante el monitoreo del cultivo de palto.

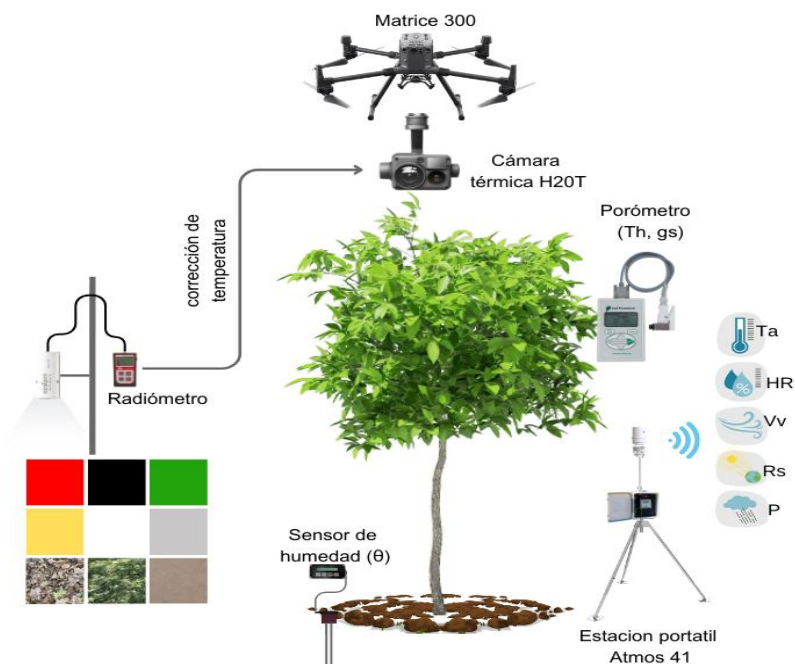


Tabla 2.4.*Instrumentos empleados en la realización del estudio.*

Equipos		Características generales	Uso o aplicación
Vehículo aéreo no tripulado	VANT – DRON	Cuadricóptero de la serie Matrice 300 RTK (DJI, Shenzhen, China)	Se utilizó para acoplar la cámara térmica para la captura de imágenes aéreas RGB y térmicas.
Sensores térmicos	Cámara termográfica	Cámara termográfica digital multifuncional modelo Zenmuse H20T (DJI, Shenzhen, China).	Captura de imágenes térmicas y ópticas en formatos RGB, TIF y radiométricos.
	Radiómetro	Radiómetro infrarrojo modelo Apogee MI-210 (Apogee Instruments, Utah, USA)	Registro de datos de temperatura de las 9 coberturas, se colectaron 27 lecturas por cobertura.
Sensor meteorológico	Estación meteorológica portátil	Marca ATMOS 41, con capacidades de comunicación digital SDI-12 para transmitir datos desde sensores ambientales.	Registro de datos de temperatura del aire (°C), humedad relativa (%), presión atmosférica (kPa) y radiación solar (Wm ⁻²).
Sensor de Humedad del suelo	TDR sensor de humedad volumétrica del suelo	Sensor TDR-100 (Reflectómetro en el Dominio del Tiempo)	Lecturas a una profundidad de 20 cm debajo de la copa del árbol a 30 cm de su eje.
Sensor foliar	Porómetro	Marca Decagon Modelo SC-1 (METER Group, Pullman, WA, USA)	Medir la conductancia estomática con el sensor enganchado a la hoja bajo presión.

Tabla 2.5.*Materiales utilizados en la ejecución de la investigación.*

Materiales	Características generales	Uso o aplicación
Cultivo de palto	Cultivo de 1.0 ha de paltos con árboles de 10 años de edad de variedades Hass, Zutano y Fuerte.	Monitoreo del cultivo en etapa de floración.
Conducción del cultivo	Sistema presurizado de riego por goteo	Se generó 5 condiciones de riego: 14 días sin riego 7 días sin riego 12 horas después del riego 2 horas después del riego 1 hora después del riego
Coberturas para calibración	9 coberturas de diferentes texturas.	Planchas de tecnopor de 1m x 1m cubiertas con tela amarilla, roja, negra, verde, hojas secas, hojas verdes, poliestireno expandido, suelo desnudo y papel aluminio corrugado.
Puntos de control	4 puntos de control georreferenciados	Tablero de dominó de 0,8 x 0,8 m de color blanco y negro, con papel aluminio en la parte blanca.

Tabla 2.6.*Programas utilizados para el análisis y procesamiento de datos.*

Programas	Características generales	Uso o aplicación
Pix4D	Programa de fotogrametría, transforma un gran número de imágenes en nubes de puntos, MDS y ortomosaicos precisos.	Preprocesamiento de las imágenes térmicas para la generación de los ortomosaicos y modelos de superficie digital (MSD).
PC 400	Programa para la visualización y descarga de datos de variables meteorológicas del datalogger de la estación meteorológica portátil.	Para descargar del registro de datos meteorológicos registrados.
Leaf Porometer Utility	Programa permite la visualización y descarga de datos de conductancia estomática, temperatura foliar y humedad relativa de medición.	Para descargar del registro de datos de conductancia estomática.
ArcGIS 10.8	Programa para la edición, procesamiento, análisis y tratamientos de imágenes en formato Tiff de información geográfica.	Para la extracción de la temperatura foliar por medio de la clasificación supervisada.
Excel 2019	Programa adecuado para el análisis, clasificación y manejo de datos; posee funciones avanzadas y cualidades específicas para representar los resultados de manera efectiva mediante gráficas.	Para realizar el proceso de datos de temperaturas obtenidas de las imágenes térmicas calibradas.

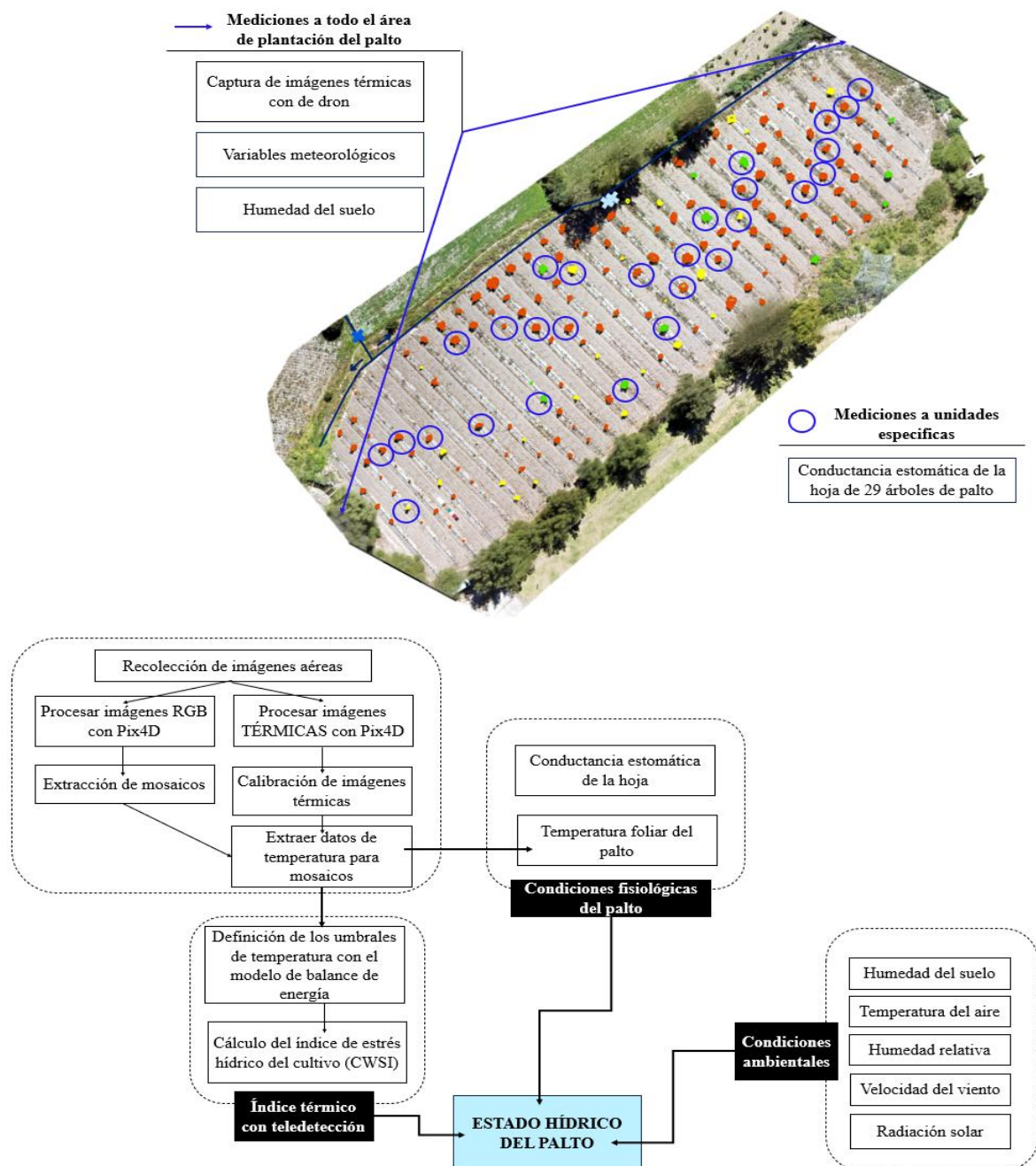
2.4 Procedimiento

2.4.1 Flujograma del proceso de investigación

El estudio se desarrolló en dos procesos; el primero comprende las actividades desarrolladas en campo, y el segundo en gabinete. En el esquema secuencial siguiente, mostrado en la figura 2.10, se presentan las actividades realizadas en cada proceso.

Figura 2.10.

Flujograma del proceso de investigación



2.4.2 Mediciones y recolección de información

Las mediciones realizadas se detallan a continuación:

2.4.2.1 Mediciones de conductancia estomática

La evaluación de la conductancia estomática se realizó utilizando un porómetro Decagon SC-1 (METER Group, Pullman, WA, EE. UU.). Para efectuar las mediciones, el cabezal del sensor fue fijado a la hoja mediante un clip, orientando la cámara secante hacia el reverso foliar, conforme a la metodología descrita por Ashrafuzzaman et al. (2017). Se seleccionaron hojas completamente desarrolladas situadas en las ramas laterales por debajo de la rama principal del dosel del árbol de palto. Cada muestra fue medida en tres ocasiones, registrando las lecturas 30 segundos después de la calibración del dispositivo. El monitoreo se aplicó a un total de 29 árboles representativos, en distintos intervalos horarios: entre las 12:00 y 01:00 p.m., 10:00 y 11:00 a.m., 09:40 y 10:40 p.m., 11:00 y 12:00 p.m., y 09:30 y 10:30 p.m., según las condiciones hídricas correspondientes a tratamientos de 14 y 7 días sin riego, así como 12, 2 y 1 hora posterior al riego, respectivamente.

2.4.2.2 Mediciones de humedad del suelo

La determinación del contenido de humedad en el suelo se efectuó mediante un sensor TDR-100 (Reflectómetro en el Dominio del Tiempo), realizando las mediciones a una profundidad de 20 cm y a una distancia de 30 cm del eje del árbol, bajo la proyección de su copa. Este equipo posee una exactitud de $\pm 3,0$ % en la estimación del contenido volumétrico de agua, siempre que la conductividad eléctrica del suelo sea inferior a 2 dS m^{-1} . Antes de su implementación en campo, el sensor fue calibrado utilizando datos obtenidos a partir de muestras gravimétricas y de la densidad aparente del suelo, con el objetivo de garantizar lecturas precisas de la humedad volumétrica. Este protocolo se aplicó a un total de 170 árboles durante cada jornada de monitoreo.

2.4.2.3 Recolección de información meteorológica

De manera paralela, se empleó una estación meteorológica portátil modelo ATMOS 41, equipada con tecnología de comunicación digital mediante protocolo SDI-12, lo que permitió la transmisión eficiente de datos provenientes de sensores ambientales. Esta estación fue vinculada a un registrador de datos ZL6. Entre las variables climáticas registradas se incluyen: velocidad del viento (m s^{-1}), temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$), humedad

relativa (%), presión atmosférica (kPa), radiación solar (W m^{-2}) y presión de vapor (kPa), cada una con una resolución de medición de $0,01 \text{ m s}^{-1}$, $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$, $0,1 \%$, $0,01 \text{ kPa}$, 1 W m^{-2} y $0,01 \text{ kPa}$, respectivamente.

2.4.2.4 Captura y recolección de imágenes térmicas

Se efectuó la adquisición de imágenes aéreas del cultivo de palto mediante una cámara termográfica digital multifuncional Zenmuse H20T (DJI, Shenzhen, China). Este dispositivo permite capturar imágenes tanto térmicas como ópticas en formatos RGB, TIF y radiométricos. Cuenta con una lente de 58 mm y opera a una frecuencia de captura de 30 Hz. Su rango de detección de temperatura se extiende entre 8 y 14 metros, con una resolución térmica de 640×512 píxeles. La precisión de medición es de $\pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ o $\pm 2 \%$, validada a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ bajo condiciones controladas de laboratorio (sin viento) y a una distancia de 5 metros respecto a un cuerpo negro.

La cámara fue instalada en un vehículo aéreo no tripulado (VANT) de tipo cuadricóptero, modelo Matrice 300 RTK (DJI, Shenzhen, China). Para georreferenciar las imágenes capturadas, se dispusieron cuatro puntos de control terrestre (GCP), representados por tableros dominó de $0,8 \times 0,8 \text{ m}$ en blanco y negro, con la superficie blanca recubierta con papel aluminio para mejorar su visibilidad en las imágenes térmicas.

El plan de vuelo (ver tabla 2.7) fue programado mediante la aplicación DJI Pilot, y los vuelos se ejecutaron a una altitud constante de 70 metros sobre el nivel del suelo y a una velocidad uniforme de $1,5 \text{ m s}^{-1}$. Las imágenes térmicas obtenidas presentaron una resolución espacial de 2,5 cm por píxel. Las capturas se realizaron entre las 9:00 a.m. y la 1:00 p.m., exclusivamente en días despejados, a fin de minimizar las interferencias por sombras.

Tabla 2.7.

Diseño del plan de vuelo aplicado en los monitoreos del cultivo

Sector	Resolución cm/píxel	Traslape frontal (%)	Traslape lateral (%)	Velocidad (m/s)	Altura (m)	Tiempo de vuelo	Área (has)
Estación Experimental Huanchac	2,7	85	80	1,5	45	10'56''	1.15

2.4.2.5 Procesamiento y calibración de imágenes de termografía infrarroja

La calibración de las imágenes térmicas se llevó a cabo utilizando un radiómetro infrarrojo modelo Apogee MI-210 (Apogee Instruments), mediante el cual se registraron mediciones sobre nueve tipos distintos de superficies: aluminio, hoja seca, hoja verde, poliestireno, tela amarilla, tela negra, tela roja, tela verde y suelo descubierto (véase figura 2.11 y figura 2.12). Cada una de estas superficies fue dispuesta en un marco de $1,0 \times 1,0$ m. Las mediciones se realizaron a una altura de 40 cm sobre cada cobertura, obteniéndose 27 lecturas por tipo de superficie, lo que dio como resultado un total de 243 datos por sesión de monitoreo. La recolección de estos datos se efectuó de forma simultánea con los vuelos, con el objetivo de lograr una mayor precisión en la corrección radiométrica de las imágenes térmicas.

Figura 2.11.

Nueve diferentes tipos de coberturas para calibración de las imágenes térmicas.

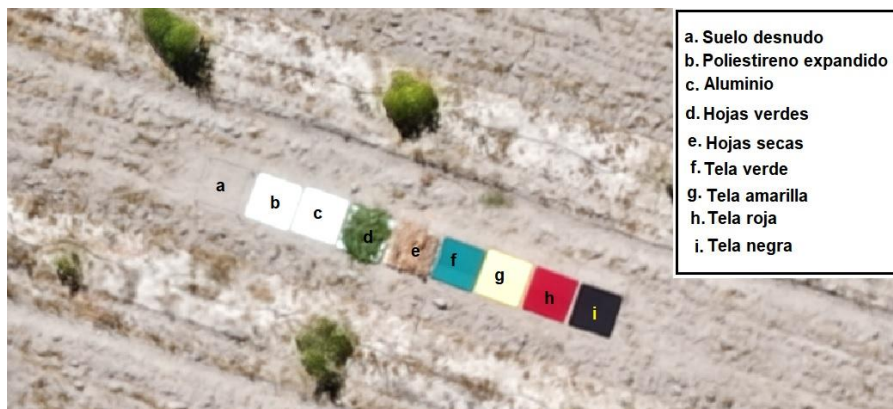
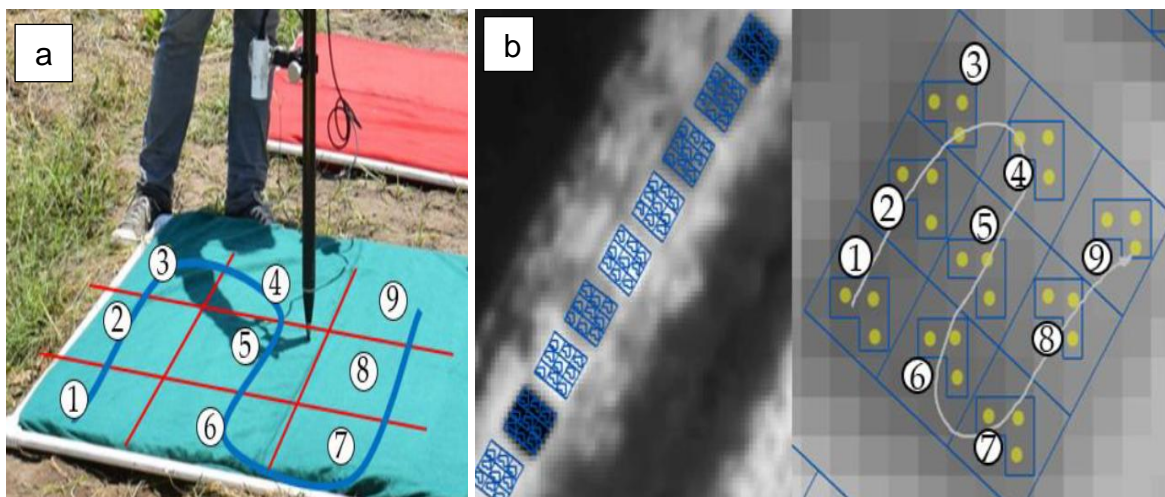


Figura 2.12.

a) Lectura de temperatura de las nueve coberturas con el radiómetro, b) temperatura superficial de las coberturas con el Dron.



Una vez calibradas las imágenes térmicas de cada monitoreo, se generaron máscaras del dosel de los árboles de palto para la extracción de la temperatura foliar mediante una clasificación de vegetación. Este proceso de clasificación tiene de tres etapas:

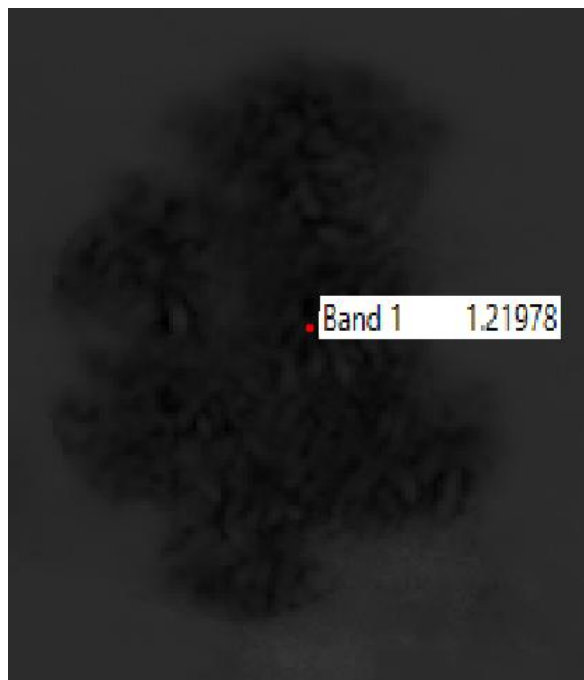
1. Generación de un índice de vegetación basado en el contraste suelo-vegetación, a partir de una combinación de bandas RGB.

$$Index = \frac{Blue + Green}{Red} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

2. Clasificación de la vegetación a partir del índice generado. Los valores de los píxeles correspondientes a vegetación se encuentran en un rango de 0 a 1,5. Por ello, se asignó un valor estándar que facilitó su identificación y extracción durante el proceso de clasificación.

Figura 2.13.

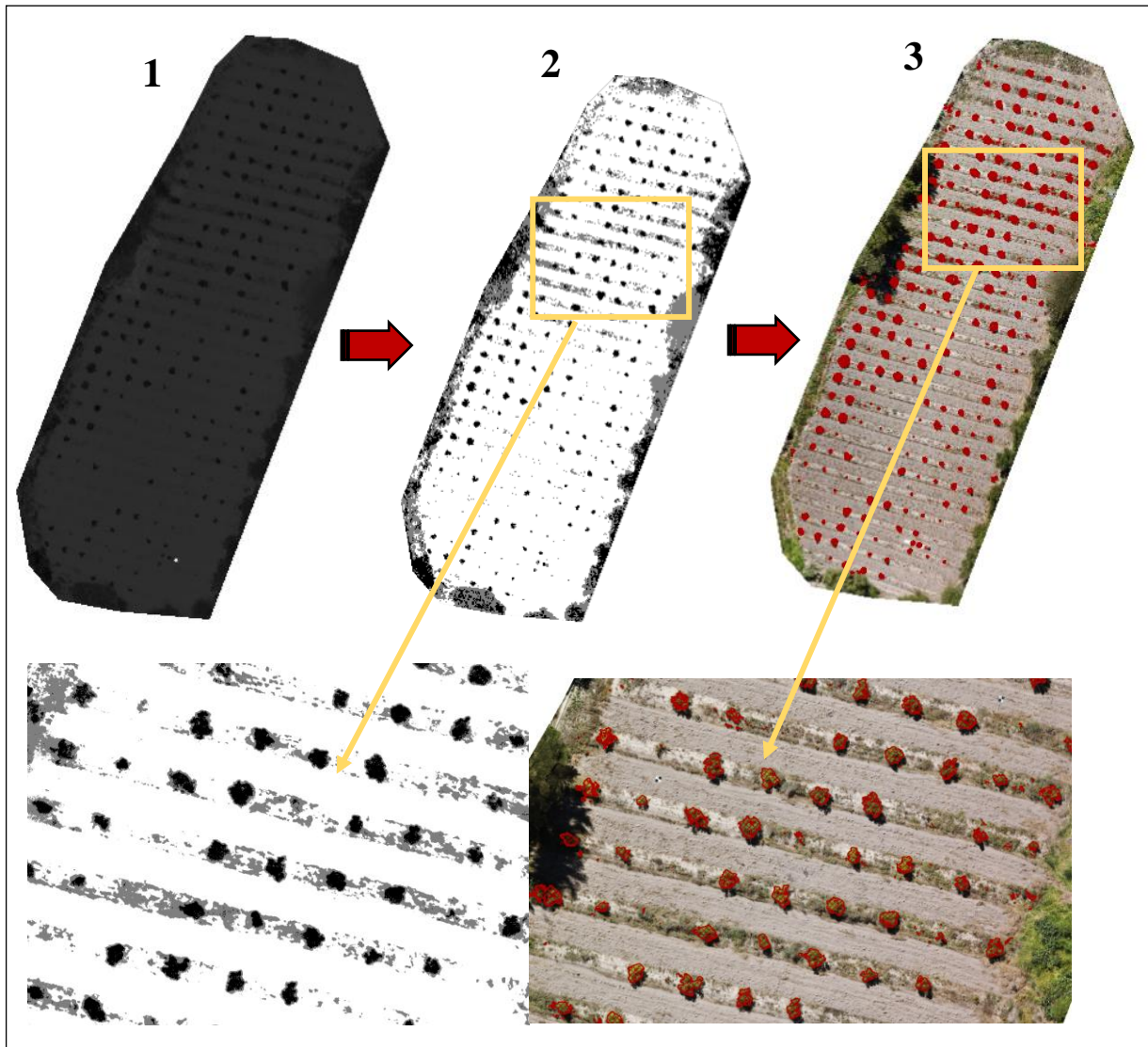
Clasificación de vegetación por contraste suelo-vegetación.



3. Poligonización del ráster clasificado. Una vez convertido a vector, se extrajo únicamente la porción correspondiente al dosel de los árboles de palto.

Figura 2.14.

Delimitación de las máscaras del dosel de palto por índice de vegetación verde generado por combinación de bandas.



2.4.3 Modelación del estado hídrico del palto

2.4.3.1 Índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC)

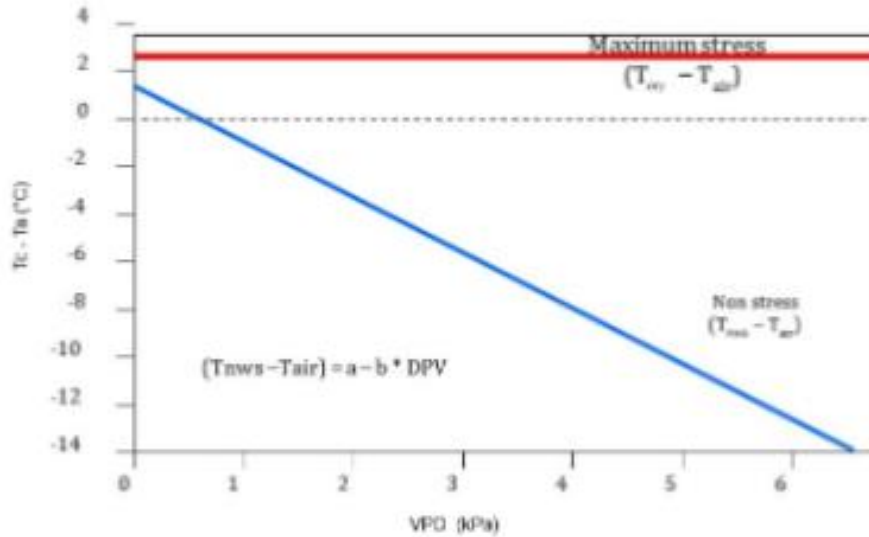
El Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC) fue estimado a partir del modelo empírico propuesto por Idso et al. (1981), el cual establece una relación entre la diferencia térmica hoja-aire y los límites de referencia asociados a condiciones de mínimo y máximo estrés hídrico, según la ecuación 2.2.

$$IEHC = \frac{(Th-Ta) - (Th-Ta)_{LI}}{(Th-Ta)_{LS} - (Th-Ta)_{LI}} \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Donde, T_h es la temperatura de la hoja ($^{\circ}\text{C}$) y T_a es la temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$); $(T_h - T_a)_{LS}$ 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 (figura 2.15).

Figura 2.15.

Umbrales de temperatura definidos por el límite inferior y superior



Se inicia estableciendo una relación lineal entre la diferencia de temperaturas hoja-aire, representada en el eje y, y el déficit de presión de vapor (VPD), ubicado en el eje x. El VPD se calcula como la diferencia entre la presión de vapor de agua a saturación y la presión de vapor actual, según lo definido en la ecuación 2.3.

$$DPV = e_s - e_a \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde e_s representa la presión de vapor de agua a saturación correspondiente a una temperatura del aire determinada, y e_a corresponde a la presión de vapor actual, es decir, la presión parcial de vapor de agua presente en la atmósfera (López et al., 2009). Ambos valores fueron calculados utilizando las ecuaciones 2.4 y 2.5, respectivamente.

$$e_s[T^{\circ}] = 0.611 \exp \left[\frac{17.27T^{\circ}}{T^{\circ} + 237.3} \right] \quad \text{Ecuación 2.4}$$

$$e_a = HRx \frac{e_s}{100} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Una vez establecida la relación lineal, se determinan los límites del índice: el límite superior $(T_h - T_a)_{LS}$ que corresponde al umbral de estrés cuando el cultivo se encuentra

bajo condiciones de déficit hídrico y es la mayor diferencia de temperaturas; y el límite inferior $(Th - Ta)_{LI}$, definido por la pendiente de la línea base obtenida a partir de plantas en condiciones óptimas de riego o sin estrés hídrico. Esta relación se describe en la ecuación 2.6, en la cual los coeficientes a y b se estiman mediante regresión lineal sobre el diagrama de dispersión de $(Th - Ta)$ frente al déficit de presión de vapor (DPV).

$$(Th - Ta)_{LI} = aDPV + b \quad \text{Ecuación 2.6}$$

Para determinar los límites superior e inferior del cultivo de palto, 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 experimenta condiciones de estrés hídrico severo. Un valor de IEHC próximo a 0 indica que el cultivo se encuentra bajo condiciones de estrés hídrico severo. En contraste, cuando el IEHC se aproxima a 0, refleja un adecuado estado hídrico del cultivo, sin evidencia de limitaciones por déficit de agua (López et al., 2009).

2.5. Metodología de investigación

2.5.1 Variables evaluadas

El desarrollo del cultivo se operacionaliza mediante tres aspectos cualitativas basadas en la severidad del estado hídrico (óptimo, leve y alto), evaluadas a través del índice térmico de teledetección (IEHC) (tabla 2.8) y validadas con indicadores fisiológicos (tabla 2.9).

Tabla 2.8.

Definición de variables

Variable dependiente	Definición	Medición
Desarrollo del cultivo de palto	Variable cualitativa que refleja el desempeño fisiológico del cultivo en la fase reproductiva, en función de su estado hídrico.	3 aspectos: estado hídrico óptimo, estrés leve y estrés alto
Variable independiente	Definición	Medición
Índice térmico de teledetección (IEHC)	Variable cuantitativa que estima el nivel de estrés hídrico del cultivo mediante teledetección térmica.	Indicador de estrés 0 (sin estrés) – 1 (con estrés)

Tabla 2.9.*Definición de indicadores*

Indicadores	Definición	Medición
Temperatura de la hoja	Indicador cuantitativo que representa la temperatura foliar, relacionada al balance hídrico del cultivo.	°C
Humedad del suelo	Porcentaje de contenido de humedad volumétrica en el suelo, que influye en la disponibilidad hídrica para el cultivo.	%
Conductancia estomática	Grado de apertura estomática, indicador fisiológico del estado hídrico y del desempeño del cultivo.	$\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$

2.5.2 Metodología de la investigación

La presente investigación se enmarca dentro del enfoque descriptivo-aplicado, al centrarse en la caracterización del estado hídrico del cultivo en función del grado de estrés hídrico generado por distintas condiciones ambientales y niveles de humedad en el suelo. En cuanto al diseño metodológico, se trata de un estudio no experimental y de tipo transversal, ya que el monitoreo se llevó a cabo en un periodo limitado de tiempo, con el objetivo de evaluar la respuesta del cultivo frente a diversas frecuencias de riego durante los estadios reproductivos más sensibles al déficit hídrico.

2.5.3 Población y muestra

La plantación está compuesta por 300 árboles de palto distribuidos en 1 hectárea en la Estación Experimental Huanchac. De estos, se eligió una muestra de 170 árboles que pertenecen a tres variedades de palto: Hass, Zutano y Fuerte. Se consideraron representativos para la toma de muestras aquellos árboles que presentaban un mayor desarrollo y una densidad foliar más elevada, específicamente los que se encontraban en los estados fenológicos B y D de la fase reproductiva.

2.5.4 Análisis estadístico de los datos

Los datos fueron analizados con el software IBM SPSS Statistics (v.24). Se aplicó la prueba de Scheffé para identificar diferencias significativas en la temperatura de la hoja (T_h) según las condiciones de riego. Además, se realizó un análisis descriptivo para obtener la media y desviación estándar de T_h e IEHC. Finalmente, se calculó el coeficiente de correlación de Pearson para evaluar la relación del IEHC con la conductancia estomática (G_s) y la humedad del suelo (θ).

CAPÍTULO II

RESULTADOS Y DISCUSIONES

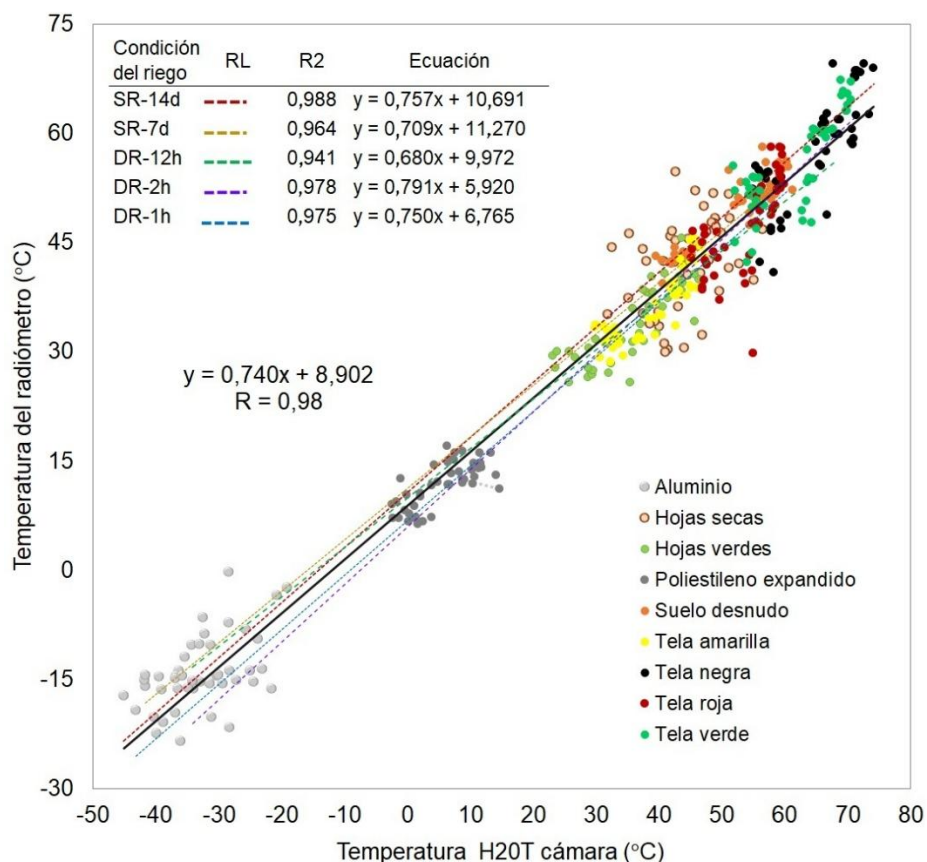
3.1. Umbrales térmicos del cultivo de palto con teledetección térmica a diferentes condiciones de riego

3.1.1 Temperatura de termografía infrarroja con sensores remotos a diferentes condiciones de riego

Las imágenes térmicas captadas por el VANT fueron corregidas linealmente para estimar con precisión los valores de temperatura absoluta de la superficie, basada en datos registrados con un radiómetro sobre nueve tipos de cobertura, bajo condiciones ambientales específicas del área de estudio. Esta calibración generó una ecuación de ajuste ($Y_{\text{radiómetro}} = 0,7 \cdot X_{\text{H20T}} + 8,9$) con un error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) de 4,2 °C (figura 3.1). Al aplicar este ajuste a los datos térmicos del VANT, se alcanzó un coeficiente R^2 de 0,98, lo que indica una excelente correspondencia entre los valores corregidos y los datos de referencia. El alto valor de R^2 evidencia que el modelo de calibración aplicado es robusto y eficaz. Además, el análisis mostró que no existen diferencias significativas al utilizar nueve coberturas frente a solo cuatro, en cuanto a la precisión del ajuste térmico. Esto implica que es posible reducir el número de coberturas sin afectar la calidad del modelo, lo que resulta favorable para optimizar la logística del trabajo de campo y minimizar los tiempos de procesamiento de datos. Estos resultados coinciden con lo reportado por Machaca-Pillaca et al. (2022), quienes lograron una precisión similar utilizando únicamente cuatro coberturas. Asimismo, Ramos-Fernández et al. (2024) concluyeron que la diferencia entre modelos calibrados con cuatro y nueve coberturas no es estadísticamente significativa en términos de precisión. Sin embargo, estos autores también advierten que la elección del número de coberturas debe estar en función de las características del entorno analizado. En contextos con alta heterogeneidad en los usos del suelo o con condiciones microclimáticas variables, una mayor cantidad de coberturas podría mejorar la representatividad y confiabilidad del modelo.

Figura 3.1.

Comparación de temperaturas registradas simultáneamente por la cámara H20T y el radiómetro durante los monitoreos.



Una vez calibrada las imágenes se extrajo la temperatura de la hoja (Th) de los árboles de palto, mediante máscaras del dosel generadas en el ortomosaico RGB. Los datos de Th se analizaron con la prueba de Scheffé, de la cual se observaron diferencias significativas con $p < 0,05$ en la Th entre las diversas condiciones de riego (tabla 3.1).

Tabla 3.1.

Prueba de Scheffé a los datos de temperatura de la hoja (Th) del cultivo de palto (Persea americana Mill.)

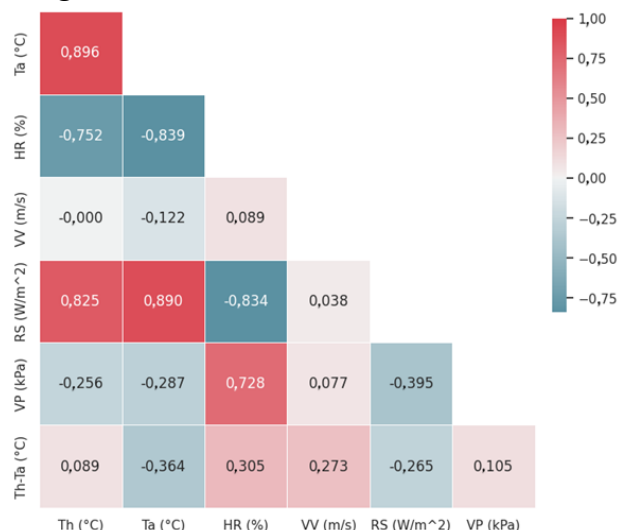
Comparación entre condiciones de riego	Diferencia significativa ($p < 0,05$) de Th
SR-14d – SR-7d	4,6
SR-14d – DR-12h	3,6
SR-14d – DR-2h	3,3
SR-14d – D-R-1h	5,4

A la vez la correlación de Pearson con las variables meteorológicas mostró un R de 0,896 entre la Th y la temperatura del aire (Ta), seguido por la Radiación solar con un

coeficiente de 0,826. Se observa también una correlación negativa de la humedad relativa para R de -0,752 y -0,839 con la Th y Ta respectivamente, lo que indica que, al aumento de estas temperaturas, disminuye la humedad relativa (figura 3.2).

Figura 3.2.

Coefficientes de Pearson de la correlación entre la temperatura de la hoja calibrada (Th), con variables meteorológicas.



3.1.2 Umbrales de temperatura del cultivo de palto a diferentes condiciones de riego

Los umbrales de temperatura fueron definidos en función de los límites superior e inferior establecidos para el cultivo de palto. El límite inferior (LI) se determinó en condiciones de bajo estrés hídrico, caracterizadas por valores reducidos en la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire ($Th-Ta$), donde se obtuvo una pendiente negativa de $-3,27$ por cada unidad de DPV, con una ordenada al origen de $10,27$, que representa la diferencia de temperatura ($Th-Ta$) en condiciones sin estrés hídrico. El límite superior (LS) se definió en función de las temperaturas más elevadas registradas por el cultivo bajo una temperatura ambiental determinada y considerando un déficit de presión de vapor (VPD) constante. Se estableció un valor de LS igual a $11,20$ °C para condiciones de riego con una frecuencia menor a siete días, y un LS de $9,20$ °C para la condición de 14 días sin riego (figura 3.3).

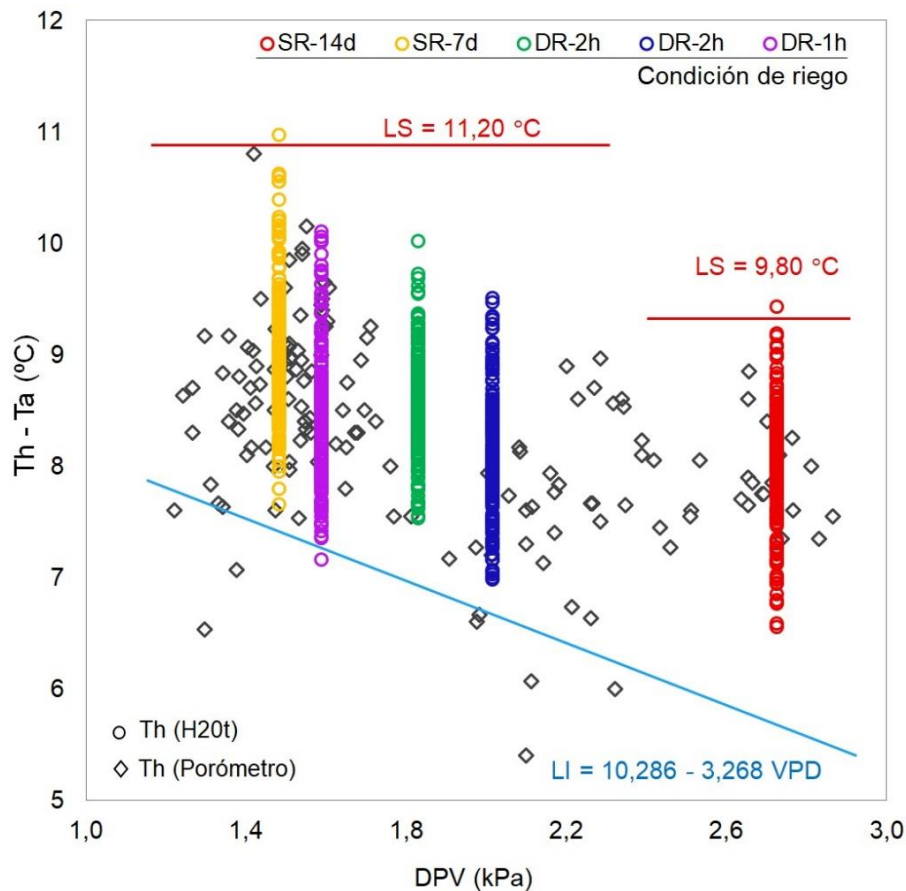
El comportamiento de los datos indica que el aumento del DPV genera una reducción en $Th-Ta$, lo que refleja una respuesta fisiológica del cultivo al ambiente más seco, disminuyendo la transpiración conforme se intensifica el déficit hídrico. En particular, cuando el DPV supera los $2,3$ kPa, el límite superior de estrés disminuye notablemente de $11,2$ °C a $9,8$ °C, bajo condiciones de 27 °C de temperatura ambiental y 24 % de

humedad relativa. Este patrón permite identificar con mayor precisión el umbral de estrés térmico para las plantas en distintos escenarios de disponibilidad hídrica.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Idso (1982), quien también documentó una reducción de $Th-Ta$ conforme aumenta el DPV en cultivos frutales. De igual manera, Jamshidi et al. (2020) establecieron líneas base para cultivos perennes bajo riego óptimo, confirmando la utilidad de $Th-Ta$ como indicador del estado hídrico de los cultivos. Además, en huertos de durazno, Park et al. (2021) observaron que, bajo condiciones extremas de déficit hídrico (0% de ETC), la diferencia $Th-Ta$ puede reducirse hasta 5 °C, en un ambiente con 30,6 °C y 26,7% de humedad relativa, condiciones similares a las registradas en el presente estudio. Estos antecedentes respaldan la validez de los umbrales establecidos y su aplicación en el monitoreo del estrés hídrico en frutales.

Figura 3.3.

Umbrales de temperatura de estrés (límite superior) y sin estrés (límite inferior) a partir de datos térmicos obtenidos con cámara H20T y sensor foliar.



Nota: 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.

3.2. Índice de estrés hídrico del cultivo a diferentes condiciones de riego a partir de los umbrales térmicos de teledetección

3.2.1. Índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC)

Se evidenció una tendencia decreciente del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC) a medida que aumentaba la humedad del suelo, particularmente en los periodos de riego más cortos (tabla 3.2, figura 3.4b). Los valores del IEHC para el cultivar Zutano es de un máximo de 0.64 y un mínimo de 0.41, para la variedad Hass es de 0.96 y 0.37, y la variedad fuerte es de 0.90 y 0.33. Los valores más altos de IEHC se obtuvo a una condición de 14 días sin riego (SR-14d) y su valor mínimo una hora después del riego (DR-1h). Asimismo, la temperatura de la hoja (Th) mostró una tendencia decreciente, con un comportamiento estrechamente relacionado con la temperatura del aire, respaldado por un alto R de Pearson de 0,896 (figura 3.2).

También se observó que los valores medios de temperatura foliar (Th) disminuyeron de forma consistente según la variedad de palto, siguiendo el orden: Zutano > Hass > Fuerte (figura 3.4a). En la condición de mayor estrés hídrico (SR-14d), se registraron valores máximos de Th superiores a 33,5 °C. En cambio, bajo la condición de siete días sin riego (SR-7d), la Th osciló entre 29,45 °C y 31,66 °C, posiblemente influenciada por un evento de lluvia previo. En las condiciones evaluadas a pocas horas después del riego (12, 2 y 1 horas), la Th se mantuvo entre 28,43 °C y 32,63 °C, en concordancia con los niveles elevados de humedad del suelo registrados tras la aplicación del riego.

Tabla 3.2.

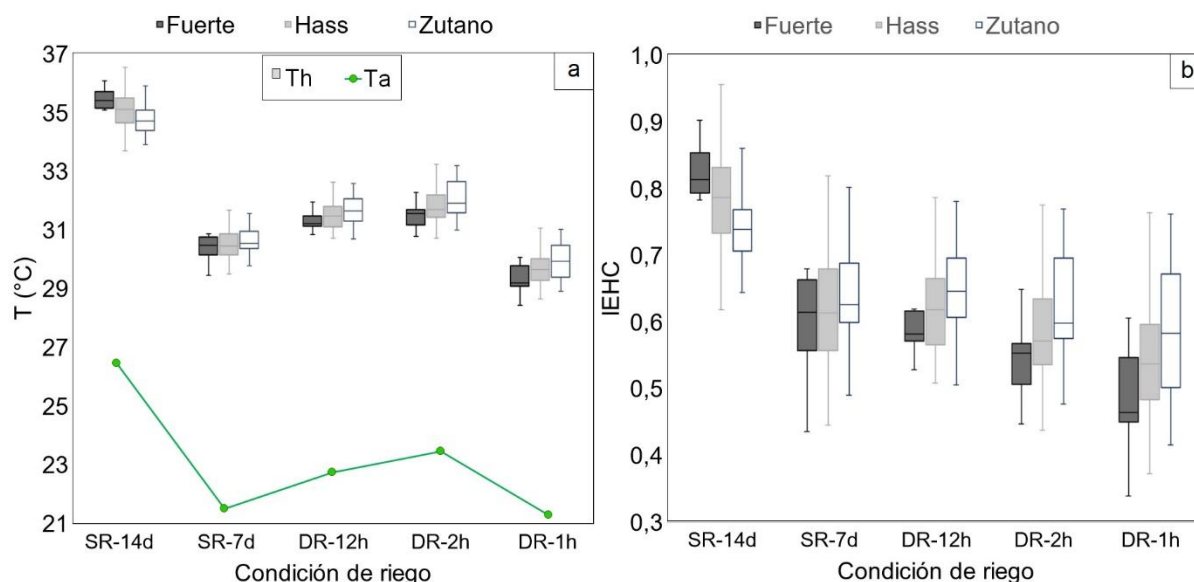
Promedio, valores máximos y mínimos, y coeficiente de variación (CV) en las diferentes condiciones de riego de la temperatura de la hoja (Th) en el cultivo de palto (Persea americana Mill.).

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

Nota. 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, K.

Figura 3.4.

Variación de la temperatura de la hoja (Th) y el aire (Ta) (a), y el índice de estrés hídrico de cultivo (IEHC) (b), según las condiciones de riego en tres variedades de palto (Persea americana Mill.).



La variación del IEHC responde directamente a la disponibilidad de agua en el suelo y a las condiciones microclimáticas. Aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre cultivares (variación promedio de solo 0,08), se identificó que el cultivar Fuerte presentó los valores más bajos de IEHC, mientras que el cultivar Hass registró los más altos. Esta dinámica indica que, en general, todas las variedades respondieron al estrés hídrico de manera similar, aunque con leves diferencias en su sensibilidad y recuperación. Por otro lado, Zutano mostró los valores promedio más altos de temperatura foliar, incluso después del riego, lo que sugiere una menor capacidad de recuperación tras el estrés hídrico, a pesar de su mayor tolerancia general al estrés. Durante el periodo de estrés máximo, Zutano también presentó valores más bajos de IEHC que las otras variedades, indicando una mayor resistencia fisiológica al estrés hídrico.

Estudios previos en ciruelos, Millán et al. (2020) han señalado que la temperatura foliar representa la variable de mayor sensibilidad al déficit hídrico, seguido por la conductancia estomática (Gs), lo que coincide con los hallazgos del presente estudio en palto. Además, Salgado et al. (2019) destacan que, en el cultivo de palto, Th es un indicador clave

de la absorción restringida de agua, confirmando su utilidad como variable de monitoreo. Respecto a la respuesta de los diferentes cultivares, Schaffer et al. (2013) y Webber (1917) mencionan que Zutano es comúnmente utilizado como patrón de injerto y polinizador debido a su tolerancia al estrés hídrico. No obstante, estos autores también reportan que presenta una menor capacidad de recuperación una vez superado el episodio de estrés, lo cual se corrobora en los resultados de este estudio, donde Th y IEHC permanecen elevados en Zutano incluso después del riego.

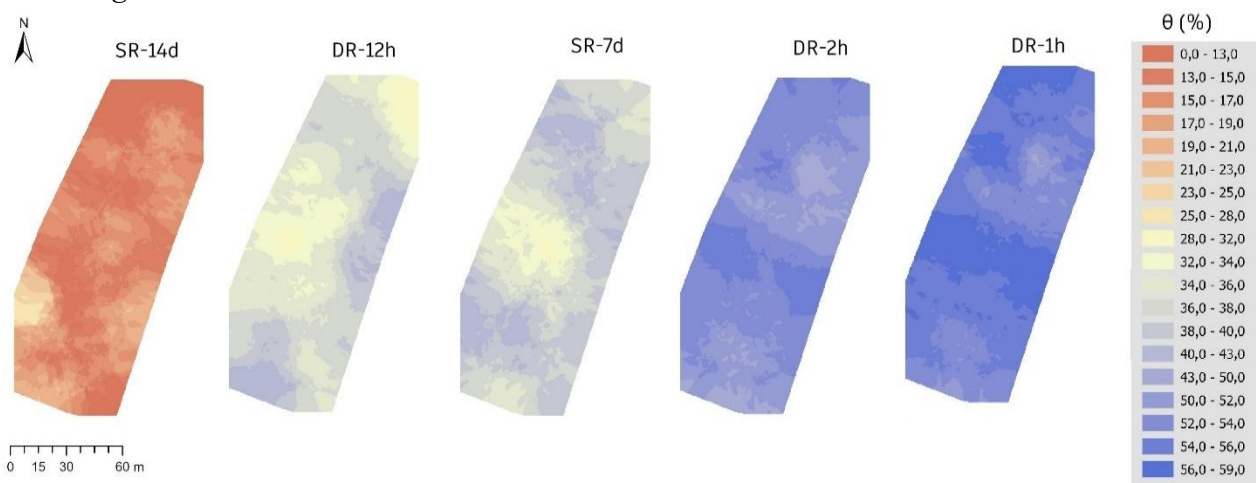
3.3. Estado hídrico del palto en base al IEHC como indicador térmico de teledetección

3.3.1. Humedad del suelo

El análisis físico del suelo determinó una textura franca, compuesta por 35 % de arena, 50 % de limo y 15 % de arcilla. La figura 3.5 muestra la distribución espacial de la humedad volumétrica del suelo, donde se evidencia un gradiente que va desde valores por debajo del punto de marchitez permanente (PMP) hasta niveles superiores a la capacidad de campo (CC). Estos umbrales corresponden a un PMP de 15,89 %, una CC de 28,23 % y una densidad aparente de 1,19 g/cm³ (véase Anexo 4).

Figura 3.5.

Variación espacial de la humedad volumétrica del suelo (%) a diferentes condiciones de riego.



Esta variabilidad refleja una capacidad de retención de agua influenciada por la textura, la estructura del suelo y el manejo del riego. Las zonas rojas (0–15 %) indican condiciones de estrés hídrico severo, sin disponibilidad de agua en el suelo útil para las plantas; las zonas amarillas (16–28 %) representan condiciones óptimas de humedad, y las zonas

azules (>28 %) sugieren saturación, posiblemente registrada pocas horas después del riego. Aunque no se cuenta con datos texturales diferenciados por sector, la textura franca obtenido en laboratorio indica capacidad de retención de agua moderada, adecuada para el cultivo. La distribución espacial observada se atribuye a las a variaciones en la humedad del suelo por las diferentes condiciones de riego del suelo y al bajo coeficiente de uniformidad del sistema de riego (59 %).

3.3.2. IEHC y humedad del suelo

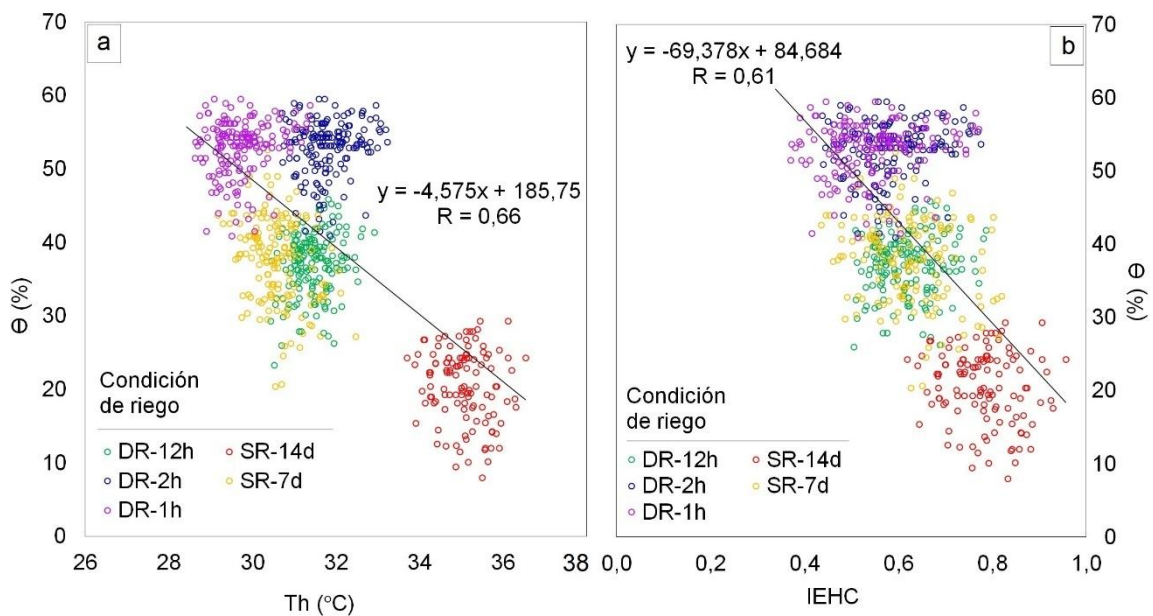
Se observa una tendencia negativa en la relación entre la temperatura de la hoja (T_h) y la humedad volumétrica del suelo (Θ), el coeficiente de Pearson indicó una relación negativa moderada ($R=-0,66$) (Figura 3.6a). En la condición de 14 días sin riego (SR-14d), se registraron los valores más altos de T_h , superando los 34 °C, con niveles de humedad del suelo inferiores al 25 %. Esta reducción en la humedad se asoció con un aumento en la temperatura foliar, alcanzando un máximo de 36,53 °C y un valor medio de IEHC de 0.78. En cambio, bajo condiciones de riego más frecuentes, como SR-7d, y las horas posteriores al riego (DR-12h, DR-2h y DR-1h), la temperatura foliar disminuyó a valores por debajo de 32,5 °C, con niveles de humedad del suelo superiores al 25 %. Cabe destacar que en las condiciones de DR-2h y DR-1h, la humedad del suelo alcanzó hasta un 60 %, reflejando el efecto de la saturación pocas horas después del riego.

Por otro lado, la Figura 3.6b muestra la relación entre el IEHC y la humedad del suelo, también con una tendencia negativa, aunque con una correlación ligeramente menor ($R = -0,61$). Las condiciones de riego deficitario (SR-14d) provocaron niveles de humedad inferiores al 25 %, acompañados de valores de IEHC elevados (entre 0,62y 0,96), lo que evidencia una alta sensibilidad del cultivo de palto frente al estrés hídrico prolongado. A siete días sin riego, se tuvo un IEHC en un rango de 0,44 a 0,82, con temperaturas foliares en un rango de los 29.45 y 31,66 °C. En contraste, bajo condiciones de riego recientes (DR-12h, DR-2h y DR-1h), los valores de IEHC oscilaron entre 0,34 y 0,79, con temperaturas foliares menores a 32 °C y humedad del suelo por encima del 25 % (Figura 3.6a). No obstante, estos resultados también revelan que el estrés no desaparece inmediatamente tras la aplicación del riego, ya que el IEHC permaneció por encima de 0,4 incluso una hora después. Esto indica que la recuperación fisiológica del cultivo no es instantánea, sino que depende del tiempo transcurrido y de la intensidad del estrés hídrico previo.

De acuerdo con López et al. (2009), el monitoreo del estado hídrico del palto debe realizarse al menos dos días después del riego para capturar adecuadamente su respuesta fisiológica. Esta recomendación es consistente con los resultados obtenidos, que muestran que el IEHC sigue siendo elevado poco después del riego. Asimismo, Schaffer et al. (2013) señalan que, al tratarse de un cultivo perenne, el palto tiende a recuperar sus condiciones fisiológicas normales entre dos y tres días después de la reanudación del riego tras un periodo de restricción hídrica.

Figura 3.6.

Análisis de regresión entre la humedad del suelo, las respuestas térmicas de las hojas y de estrés del cultivo en diferentes condiciones de riego.



3.3.3. IEHC y conductancia estomática

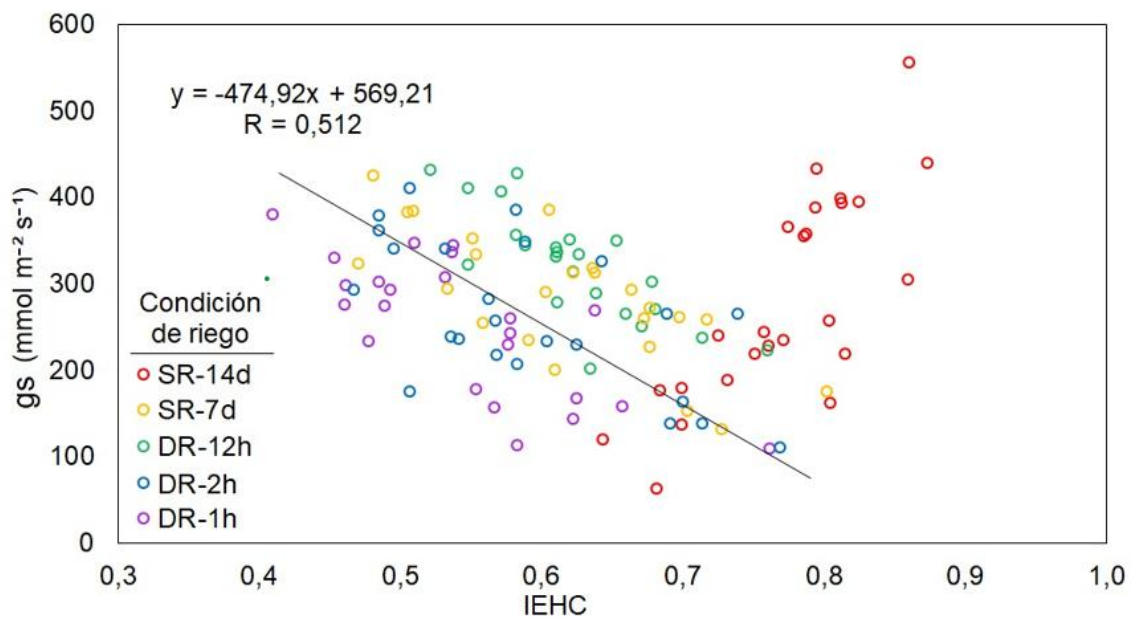
Se identificó una relación lineal inversa entre la conductancia estomática (G_s) y el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC) (Figura 3.7), lo que evidencia el cierre estomático como una respuesta fisiológica frente al incremento del estrés hídrico. El análisis de regresión arrojó una pendiente de $-590,21 \text{ mmol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ por cada unidad de IEHC en las mediciones que abarcó desde la condición de 7 días sin riego hasta 1 hora después de aplicar el riego. Esta tendencia indica que, a medida que el IEHC se incrementa, la G_s disminuye de manera progresiva, actuando como un mecanismo de regulación hídrica de la planta.

No obstante, en la condición de riego SR-14d se observaron valores de conductancia estomática (G_s) superiores a $300 \text{ mmol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, incluso con un IEHC por encima de 0,77, lo que contradice la tendencia general. Este comportamiento anómalo coincidió con condiciones ambientales particulares: una radiación solar elevada (934 W/m^2), que superó entre un 7 % y 22 % los niveles registrados en otras fechas de monitoreo, y una velocidad promedio del viento de 0,81 m/s (figura 2.8). Las mediciones correspondieron a árboles de la variedad Hass, ubicados en la zona central de la parcela, rodeados por vegetación densa y residuos secos en el suelo, lo cual podría haber influido en la dinámica microclimática local. Esta ubicación podría haber generado un microambiente con mayor humedad relativa o menor evaporación directa, atenuando la respuesta estomática al déficit hídrico.

El coeficiente de Pearson (R) entre IEHC y G_s fue de 0,51 (figura 3.7), lo que indica una relación inversa moderada y refleja cierta variabilidad en los datos. Esta variabilidad podría deberse, al menos en parte, al número limitado de repeticiones o a la influencia de factores ambientales no controlados, como el sombreado parcial por la presencia de árboles cercanos o la heterogeneidad del suelo. Bajo una humedad promedio del suelo del 20,5 %, se observaron valores de G_s que superaron los $250 \text{ mmol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, a pesar de que el IEHC se encontraba por encima de 0,68.

Figura 3.7.

Correlación entre la G_s y el índice IEHC en árboles de palto en respuesta a diversas condiciones de riego.



Los resultados obtenidos coinciden parcialmente con lo reportado por Zia et al. (2012), quienes encontraron una correlación más fuerte ($R = 0,6$) entre la conductancia estomática (Gs) y el IEHC, además de mayores fluctuaciones de Gs durante las horas de la mañana y el atardecer, con un ajuste lineal más marcado al mediodía. Por otro lado, Celedón et al. (2012) no observaron variaciones significativas en Gs en cultivares de palto sometidos a déficit hídrico de hasta 13 días sin riego, indicando que el parámetro más sensible para evaluar el estado hídrico en esta especie es el potencial hídrico de las hojas.

3.3.4. Estado hídrico del cultivo de palto

Con base en variables ambientales y fisiológicas como la temperatura de la hoja (T_h), la humedad del suelo y el índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC), se definió el estado hídrico del cultivo de palto, la cual consideró la respuesta del cultivo en los estados B y D de la fase reproductiva frente a diferentes condiciones de riego, registrándose variaciones en T_h y humedad del suelo asociadas a distintos niveles de estrés hídrico (IEHC). A partir de los datos obtenidos, se establecieron rangos que permiten clasificar el estado hídrico del palto en tres niveles de estrés: leve, moderado y alto (tabla 3.2).

Tabla 3.3.

Definición del estado hídrico del cultivo de palto en función del nivel de estrés mediante los indicadores fisiológicos y ambientales.

Estado hídrico	IEHC	Humedad del suelo (%)	T_h (°C)	Descripción
Estado hídrico óptimo	< 0,55	> 45	< 31	Baja temperatura de la hoja y alta disponibilidad de humedad en el suelo.
Estrés hídrico leve	0,55 – 0,75	25 – 45	31 – 34	Incremento de la temperatura de la hoja, humedad del suelo a capacidad de campo.
Estrés hídrico alto	> 0,75	< 25	> 34	La temperatura de la hoja se eleva y el suelo presenta baja humedad (restricciones de humedad del suelo),

La θ , la T_h y el IEHC permitieron establecer umbrales para el monitoreo del estado hídrico, evidenciando la sensibilidad del palto a la disponibilidad de agua y mostrando que estos indicadores reflejan eficazmente el nivel de estrés hídrico. Si bien la

conductancia estomática (Gs) muestra una disminución al aumentar el IEHC, no se utiliza como indicador para la definición del estado hídrico debido a que no muestra diferencias significativas en las diferentes condiciones de riego. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Celedón et al. (2012) en un cultivo de paltos en la costa de Chile. En dicho estudio, luego de 13 días sin riego en un suelo franco arcilloso pesado, con solo el 20 % de la disponibilidad hídrica a 30–40 cm de profundidad, no se observaron cambios significativos en la conductancia estomática. Este resultado se atribuyó a condiciones de baja demanda evaporativa (bajo VPD). Los autores concluyeron que el palto puede tolerar riegos deficitarios siempre que se apliquen en momentos del año con baja evaporación, como al inicio de la primavera o en otoño.

CONCLUSIONES

- 1 La aplicación de teledetección permitió evaluar el estado hídrico del palto y mostrar diferencias significativas entre las variedades Fuerte, Hass y Zutano bajo distintas condiciones de riego durante la fase reproductiva. El uso de técnicas de teledetección térmica facilitó la identificación de umbrales de temperatura de las hojas del cultivo, definiendo un umbral de estrés de 9,8 a 11,20 °C, y un umbral en óptimo de según ecuación $10,286-3,268VPD$.
- 2 Se obtuvieron rangos de IEHC de 0,61-0,92 y de 0,44- 0,82 para el palto durante periodos de 14 y 7 días sin riego, respectivamente. Posterior al riego, se registraron rangos de 0,50- 0,79, 0,44- 0,77 y 0,34- 0,77 para el palto a las 12, 2 y 1 horas después del riego, respectivamente. La variación del IEHC entre variedades refleja su capacidad fisiológica de respuesta frente condiciones de baja disponibilidad de agua. La variedad 'Zutano', comúnmente utilizada como portainjerto, se recomienda mantener el IEHC por debajo de 0,75 para asegurar un adecuado desempeño productivo. Por su parte, las variedades 'Hass' y 'Fuerte', debido a su capacidad de recuperación, no deben superar un IEHC 0,82, con una frecuencia de riego de cada 7 días para evitar que estas variedades superen los umbrales críticos de estrés hídrico y afecten el nivel de producción.
- 3 Los resultados obtenidos permiten clasificar el estado hídrico del palto en tres aspectos: estado hídrico óptimo, estrés hídrico leve y estrés hídrico alto, en función del IEHC, la humedad volumétrica del suelo (θ) y la temperatura de la hoja (T_h). Los valores bajos de IEHC ($< 0,55$), junto con alta humedad del suelo ($> 45\%$) y temperaturas foliares moderadas ($< 31\text{ °C}$) reflejan un buen estado hídrico del cultivo. A medida que estas condiciones cambian por el aumento de T_h y la disminución de los valores de θ , se identifican situaciones de estrés leve y alto.

RECOMENDACIONES

El índice de estrés hídrico de cultivos (IEHC) es un indicador que se obtiene a partir de valores de temperatura de la hoja del cultivo y la temperatura ambiental, por lo que su cálculo puede implementarse fácilmente para determinar el estado hídrico de los cultivos. Par su cálculo se recomienda lo siguiente:

1. Equipos alternativos para medir la temperatura foliar en cultivos.

Los sensores listados a continuación son opciones recomendadas actualmente disponibles para la medición en campo.

Tabla R.1. *Sensores térmicos recomendados para la medición de temperatura de las hojas de cultivos.*

Sensor	Descripción	Precio aproximado	Imagen
Apogee SI-431	Preciso, diseñado para hojas.	\$300 - \$450	 A white, cylindrical non-contact infrared thermometer mounted on a metal post. A text overlay reads: "RESEARCH-GRADE ± 0.2 C from -30 to 65 C Multiple Fields of View". The Apogee logo is visible on the side.
Exergen IRT/c Series	Sensor compacto adaptado para la agricultura.	\$150 - v250	 A compact, black infrared thermometer with a yellow cable. The body is labeled "EXERGEN CORP Watertown, MA USA SN: 1921601".
FLIR Lepton (Módulo térmico)	Genera imágenes térmicas.	\$200 - \$300	 A handheld black thermal imager with a color display screen showing a temperature of 54.3°F. The FLIR logo is visible on the top and side.

FieldScout Infrared Thermometer	Infrarrojo portatil	\$150 - \$300	
---------------------------------------	------------------------	---------------	--

2. Ecuación para determinar el índice de estrés hídrico de cultivos (IEHC)

La estimación del IEHC se realiza mediante la siguiente expresión matemática:

Tabla R.2. Ecuaciones para determinar el índice de estrés hídrico (IEHC) de los cultivos.

Índice de estrés hídrico del cultivo	$IEHC = \frac{(Th - Ta) - (Th - Ta)_{LI}}{(Th - Ta)_{LS} - (Th - Ta)_{LI}}$ <p>IEHC varía de 0 – 1, el cultivo experimenta estrés hídrico cuando se aproxima a 1, y condiciones óptimas de riego cuando el índice se acerca a 0.</p>
El umbral de temperatura superior	$(Th - Ta)_{LS} = [9,8 - 11,20] \text{ } ^\circ\text{C}$ <p>Se puede seleccionar valores dentro de este rango; sin embargo, también se puede utilizar el promedio 10,5 °C.</p>
El umbral de temperatura inferior	$(Th - Ta)_{LI} = 10,286 - 3,268VPD.$ <p>Reemplazar con el valor del VPD, la cual se determina en base a la Ta (temperatura ambiental) y HR en un momento específico.</p>
Diferencia de presión de vapor (VPD)	$VPD = \left(0.611 \exp \left[\frac{17.27T^\circ}{T^\circ + 237.3} \right] \right) * (100 - HR)$ <p>T°: Temperatura del ambiente en °C HR: Humedad relativa en %.</p>

Es importante destacar que los umbrales de temperatura determinados en el presente estudio son aplicables únicamente al cultivo de palto bajo las condiciones climáticas y ambientales de la provincia de Huanta, así como en zonas con características climáticas similares dentro de la región de Ayacucho.

3. Aplicación de la metodología durante el ciclo productivo del cultivo de palto.

Implementar la presente metodología de investigación propuesta en la fase vegetativa y frutera cultivo de palto, con el fin de identificar el requerimiento óptimo de agua durante ciclo de productivo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Rangel, A. M. (2018). *Environmental stress in avocado (Persea americana Mill.): Flowering and Physiology* [Doctoral dissertation, University of California, Riverside]. <https://escholarship.org/uc/item/7gt8g45g>
- 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>
- Blanke, M. M., & Lovatt, C. J. (1993). Anatomy and transpiration of the avocado inflorescence. *Annals of Botany*, 71(6), 543-547. <https://doi.org/10.1006/anbo.1993.1070>
- Blaya-Ros, P. J., Blanco Montoya, V., Torres Sánchez, R., González Teruel, J. D., Espósito, M. E., & Domingo Miguel, R. (2021). Estudio de indicadores de suelo y planta para la programación del riego en cerezos jóvenes. Póster. <https://doi.org/10.31428/10317/10096>
- Celedón, J. M., Gil, P. M., Ferreyra, R., Maldonado, P., & Barrera, C. (2012). Sensitivity and variability of two plant water stress indicators: exploring criteria for choosing a plant monitoring method for avocado irrigation management. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72(3). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000300012>
- Chanderbali, A. S., Albert, V. A., Ashworth, V. E., 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>
- Chuvieco, S. E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio*. Ariel. DOI:10.25100/eg.v0i3.3579
- Durán-Gómez, M. R., Ramos Fernández, L., Altamirano Gutiérrez, L., & Arapa Quispe, J. (2021). Imagen térmica y sensores de termopares para estimar el índice de estrés hídrico del cultivo de arroz bajo riego por goteo. *Idesia (Arica)*, 39(1), 109-118. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292021000100109>
- Duran, M., Ramos, F. L., Alvarado, R., & Altamirano, L. (2021). Evaluation of the crop water stress index (IEHC) in chili pepper (*Capsicum*) under drip irrigation in the arid conditions of the north coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*, 12(4), 481–489. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.052>
- Espinoza-Mendoza, C. (2015). Caracterización fenológica del palto (*Persea americana* Mill) Hass en Pichurara a 2594 msnm-Huanta. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/1b5d3742-c09a-4ce1-be0c-8b6e3c9100a6>
- Food and Agriculture Organization, (2023). *FAOSTAT. Crop and livestock products*,

- Retrieved March 24, 2023, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- Ford, N. A., Spagnuolo, P., Kraft, J., & Bauer, E. (2023). Nutritional composition of hass avocado pulp. *Foods*, 12(13), 2516. <https://doi.org/10.3390/foods12132516>
- 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/view/83/82/251-1>
- Gardiazabal, F., Magdahl, C., Mena, F., & Wihelmy, C. (2003). Determinación del coeficiente de cultivo (Kc) para paltos cv, Hass en Chile. *Proceedings V World Avocado Congress, Proceedings V World Avocado Congress*, 329–334. https://www.avocadosource.com/wac5/Papers/WAC5_p329.pdf
- 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>
- Haas, A. R. C. (1939). Growth and transpiration in avocado seedlings as affected by artificial winds of low intensity. *California Avocado Society Yearbook*, 24, 92-96. https://www.avocadosource.com/CAS_Yearbooks/CAS_24_1939/CAS_1939_PG_092-096.pdf
- Ibar, L. (1979). *Aguacate chirimoyo mango papaya*. Barcelona, España: Editorial AEDOS. <https://www.sidalc.net/search/Record/KOHA-OAI-FCF:7563/Description>
- 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)
- Ishimwe, R., Abutaleb, K., & Ahmed, F. (2014). Applications of thermal imaging in agriculture—A review. *Advances in remote Sensing*, 3(3), 128-140. DOI: [10.4236/ars.2014.33011](https://doi.org/10.4236/ars.2014.33011)
- Islam, S., Reza, M. N., Ahmed, S., Kabir, M. S. N., Chung, S. O., & Kim, H. (2023). Short-range sensing for fruit tree water stress detection and monitoring in orchards: A review. *Korean Journal of Agricultural Science*, 50(4), 883-902. <https://doi.org/10.7744/kjoas.500424>
- 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>

- Jornada. (2024, diciembre 29). Ayacucho: La Mar y las Cabezas lideran producción de palta. <https://jornada.com.pe/ayacucho-la-mar-y-las-cabezas-lideran-produccion-de-palta/>
- Karmakar, P., Teng, S. W., Murshed, M., Pang, S., Li, Y., & Lin, H. (2024). Crop monitoring by multimodal remote sensing: A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 33, 101093. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2023.101093>
- Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). *Remote sensing and image interpretation*. (7th ed.). Wiley. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/19800666998>
- López L. 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), 97-111. <https://www.redalyc.org/pdf/608/60835110.pdf>
- 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>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2025). MIDAGRI. *Sistema integrado de Estadísticas Agrarias*, Power BI. https://siea.midagri.gob.pe/siea_bi/
- 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, 107843. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107843>
- Mortazavi, M., Ehsani, R., Carpin, S., & Toudeshki, A. (2023). Predicting tree water status in pistachio and almond orchards using supervised machine learning. *Available at SSRN*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4511076>
- Palomino-Palomino, E. (2013). Análisis de los sistemas productivos y de comercialización del cultivo de palto (*persea americana*) en el valle de Luricocha Distrito de Luricocha-Huanta-Ayacucho. <https://repositorio.unh.edu.pe/items/eac24336-9489-45d0-b712-c9a33b06cba7>

- 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), 2775. <https://doi.org/10.3390/rs13142775>
- Quezada, C., Bastias, R., Quintana, R., Arancibia, R., & Solís, A. (2020). Validation of Crop Water Stress Index (CWSI) by infrared thermography and its impact on fruit yield and quality of “Royal Gala” apples. *Chilean Journal of Agricultural and 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), 796. <https://doi.org/10.3390/rs16050796>
- Rebolledo, A., & Romero, M. A. (2011). Avances en investigación sobre el comportamiento productivo del aguacate (*Persea americana* Mill.) bajo condiciones subtropicales. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, *12*(2), 113-120. https://doi.org/10.21930/rcta.vol12_num2_art:220
- Rohwer, J. G. (1993). Lauraceae. In K. Kubitzki, J. G. Rohwer, & V. Bittrich (Eds.), *Flowering plants. Dicotyledons: Magnoliid, hamamelid and caryophyllid families* (pp. 366–391). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-02899-5_46
- Salgadoe, A. S. A., 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), 2972. <https://doi.org/10.3390/rs11242972>
- Sánchez-Piñero, M., Martín-Palomo, M. J., Andreu, L., Moriana, A., & Corell, M. (2022). Evaluation of a simplified methodology to estimate the CWSI in olive orchards. *Agricultural water management*, *269*, 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>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2025). *SENAMHI*. Sequías en Ayacucho. <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=ayacucho&p=sequias>
- Villar Barraza, H. D. (2019). Estrés hídrico del cultivo de arroz IR 71706 vía termografía mejorada y calibrada del área del dosel en la UNALM. <https://repositorio.lamolina.edu.pe/items/8ae4b04c-f0a7-4d4e-a31d-a99e7a71c6c3>
- 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](#)

Xu, J., Lv, Y., Liu, X., Dalson, T., Yang, S., & Wu, J. (2016). Diagnosing crop water stress of rice using infra-red thermal imager under water deficit condition. *Int. J. Agric. Biol*, 18(3), 565-572.

http://www.fspublishers.org/published_papers/29044_.pdf

Zia, S., Du, W., Spreer, W., Spohrer, K., He, X., & Muller, 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>

ANEXOS

Anexo 1. Procesamiento de imágenes aéreas de VANT

Anexo 2. Ortomosaico térmico procesado en pix4d y calibrado con radiómetro

Anexo 3. Análisis de físico químico del suelo

Anexo 4. Análisis de físico químico del agua

Anexo 5. Panel fotográfico

ANEXO 1

PROCESAMIENTO DE IMÁGENES AÉREAS DE VANT

Figura A.1. *Procesamiento de la nube de puntos de la imagen: proceso inicial, análisis de nube de puntos y malla, generación de DSM.*



Figura A.2. *Distribución espacial de cámaras y generación de nube de puntos densa a partir de imágenes aéreas en Pix4Dmapper.*

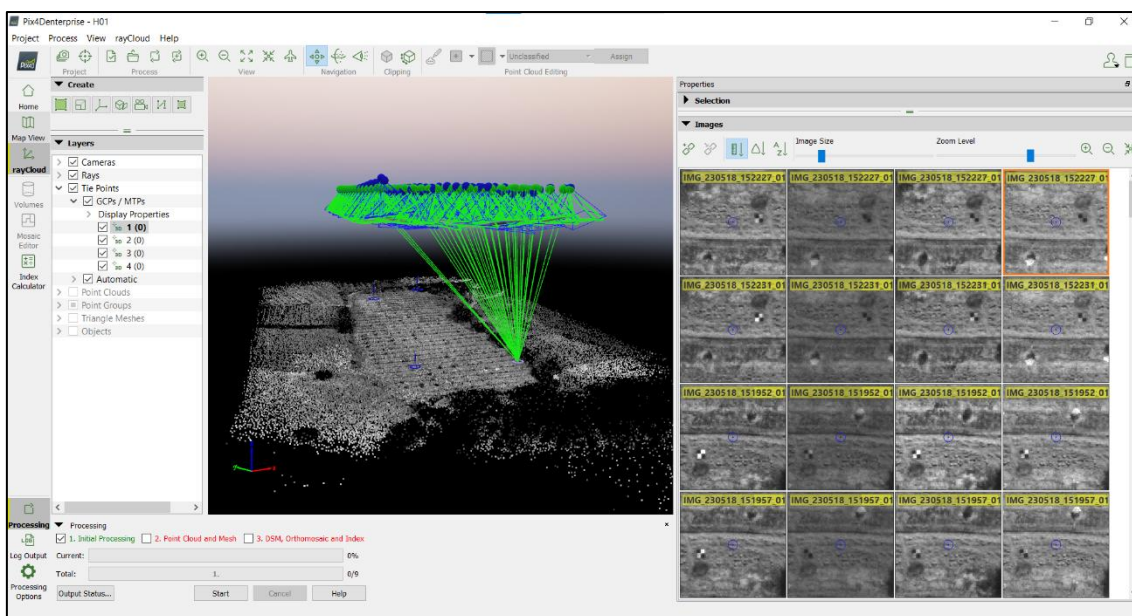


Figura A.3. Resultados del procesamiento con ortomosaico índices de reflectancia.

Quality Report - H01

Generated with Pix4Dentprise version 4.4.12

Important: Click on the different icons for:

- Help to analyze the results in the Quality Report
- Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	H01
Processed	2024-11-06 20:03:31
Camera Model Name(s)	Sequoia_4_0_1280x960 (Green), Sequoia_4_0_1280x960 (Red), Sequoia_4_0_1280x960 (Red edge), Sequoia_4_0_1280x960 (NIR)
Rig name(s)	«Sequoia»
Average Ground Sampling Distance (GSD)	7.19 cm / 2.83 in
Area Covered	0.045 km ² / 4.5221 ha / 0.02 sq. mi. / 11.1801 acres

Quality Check

Images	median of 10000 keypoints per image	✓
Dataset	720 out of 720 images calibrated (100%), all images enabled	✓
Camera Optimization	0.06% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
Matching	median of 5333.98 matches per calibrated image	✓
Georeferencing	yes, 4 GCPs (4 3D), mean RMS error = 0.026 m	✓

Display Automatically after Processing Close

Figura A.4. Ortomosaico procesado.

Pix4Dmapper - Educational - palto_04_rgb

Project Process View Mosaic Editor Help

Mosaic [group1] Edit Mosaic

Home
Map View
rayCloud
Volumes
Mosaic Editor
Index Calculator
Processing
Log Output
Processing Options

Mosaic Editing

Regions

Images

Ortho Projection Planar Projection

Export

Save Reset Export Help

Google Chrome

WGS 84 / UTM zone 18S - (576414.02, 8571098.56, 2381.68) [m]



Reservorio

Plantación de palto



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

PROYECTO:

Utilización de la
teledetección en
el seguimiento
del desarrollo de
cultivo del palto
(*Persea americana*
MIL.) E.E. Huanchac,
Huanta 2022

**Ortomosaico
RGB del área
de estudio y
detalle de
plantación
de los árboles
de palto en la
E.E. Huanchac
del Instituto
Nacional de
Innovación
Agraria (INIA).**

OR - 01

0 20 40 60 80 100
metros

ANEXO 2

ORTOMOSAICO TÉRMICO PROCESADO EN PIX4D Y CALIBRADO CON RADIÓMETRO

Temperatura (°C)

- 47.161 - 0
- 0.001 - 15.263
- 15.264 - 30.525
- 30.526 - 45.788
- 45.789 - 61.051
- 61.052 - 76.313

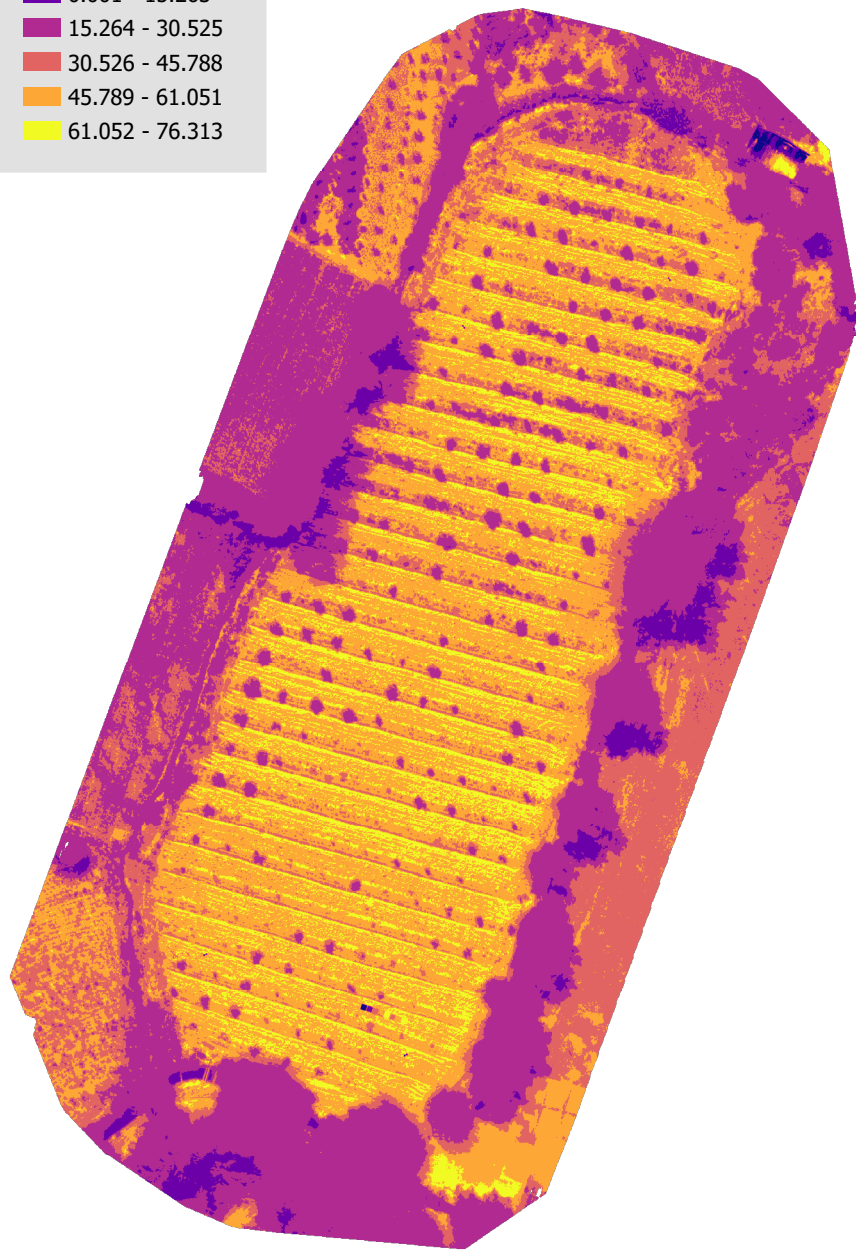


Imagen térmica procesada

Temperatura (°C)

- 25 - 0
- 0.001 - 13.689
- 13.69 - 27.378
- 27.379 - 41.067
- 41.068 - 54.756
- 54.757 - 68.445

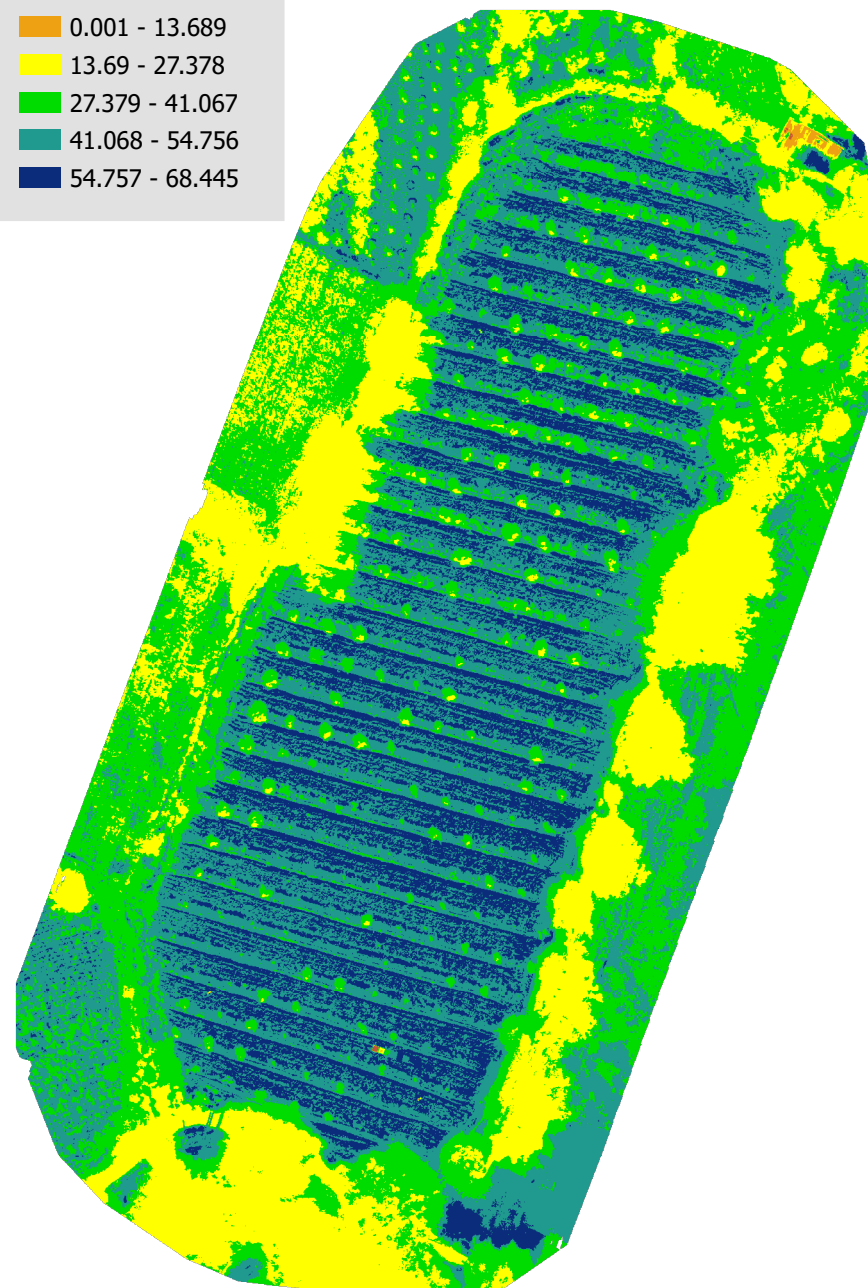


Imagen térmica calibrada



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

PROYECTO:

Utilización de la
teledetección en
el seguimiento
del desarrollo de
cultivo del palto
(*Persea americana*
MIL.) E.E. Huanchac,
Huanta 2022

**Imagen
térmica
procesada
en Pix4D y
calibrada**

**VUELO
NRO. 01
Fecha:
26/04/2023**

L - 01

Value

- 36.652 - 0
- 0.001 - 13.863
- 13.864 - 27.726
- 27.727 - 41.589
- 41.59 - 55.452
- 55.453 - 69.316

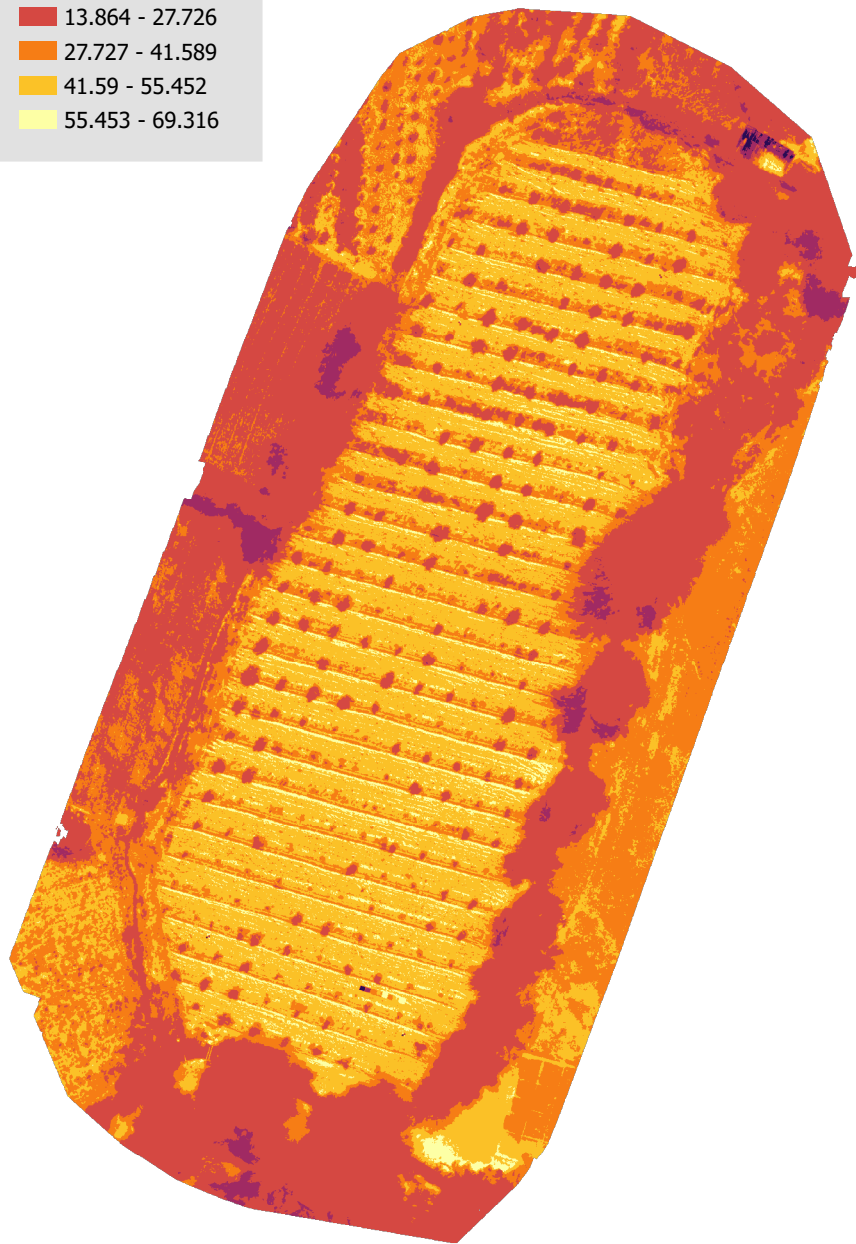


Imagen térmica procesada

Value

- 14.947 - 0
- 0.001 - 9.068
- 9.069 - 21.076
- 21.077 - 33.084
- 33.085 - 45.092
- 45.093 - 57.1

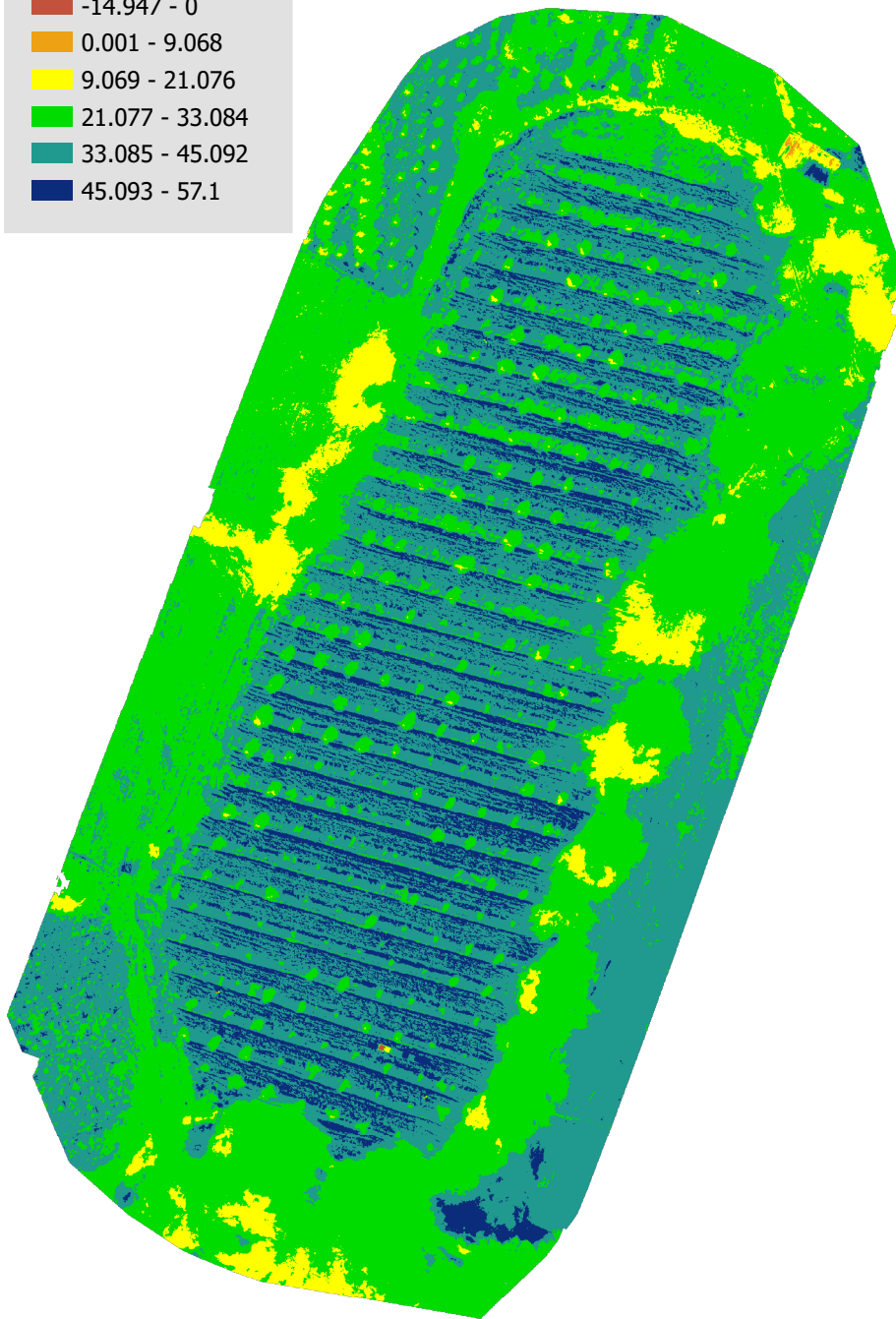


Imagen térmica calibrada



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

PROYECTO:

Utilización de la
teledetección en
el seguimiento
del desarrollo de
cultivo del palto
(*Persea americana*
MIL.) E.E. Huanchac,
Huanta 2022

**Imágen
térmica
procesada
en Pix4D y
calibrada**

**VUELO
NRO. 02
Fecha:
27/04/2023**

L - 02

Value

- -43.498 - 0
- 0.001 - 12.352
- 12.353 - 19.854
- 19.855 - 28.19
- 28.191 - 36.526
- 36.527 - 62.784

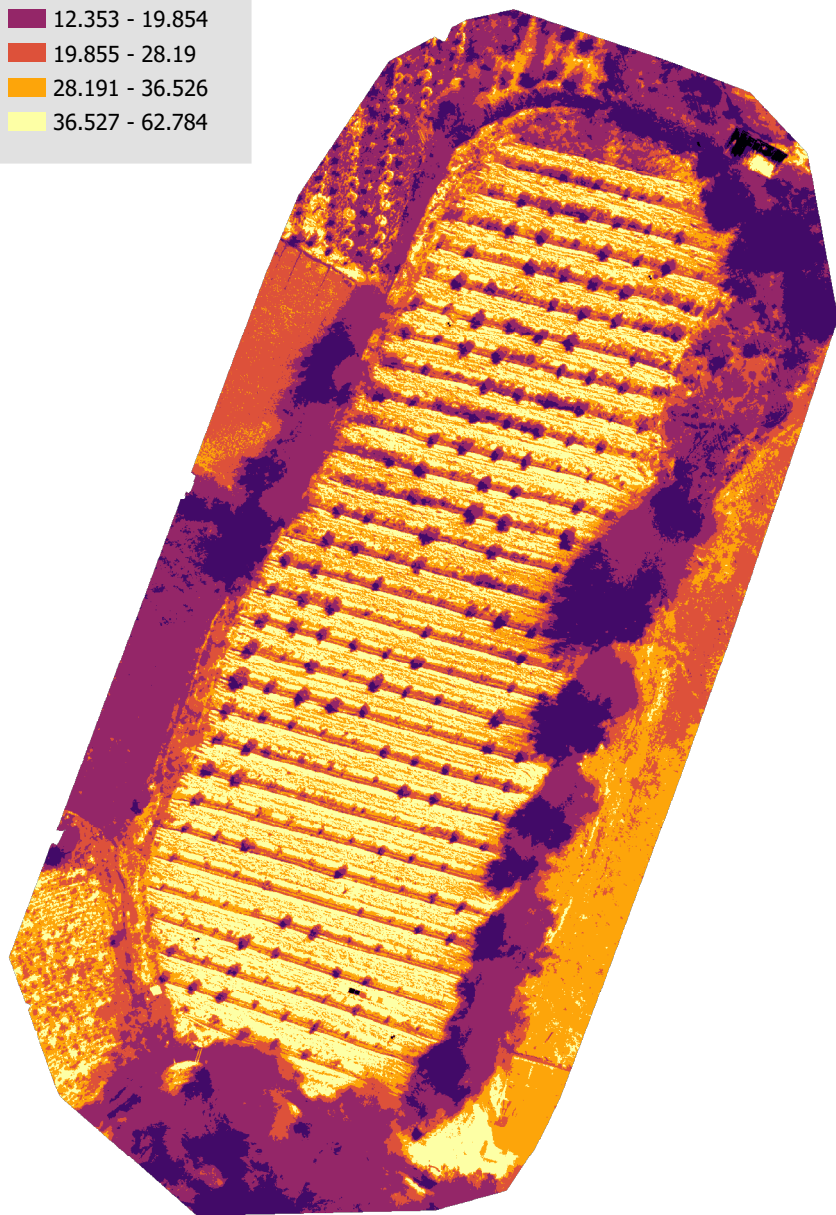


Imagen térmica procesada

Value

- -19.561 - 0
- 0.001 - 11.154
- 11.155 - 22.308
- 22.309 - 33.463
- 33.464 - 44.617
- 44.618 - 55.771

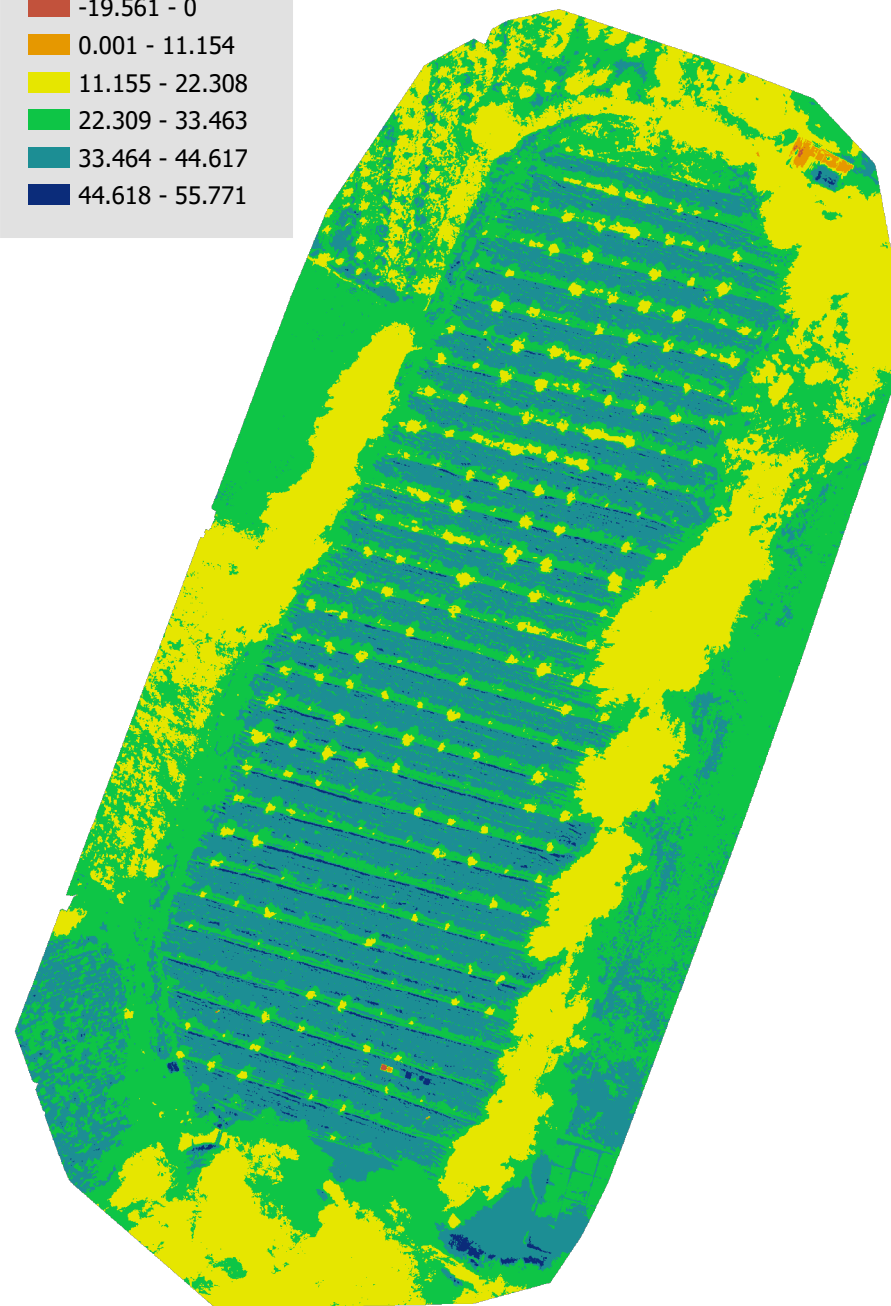


Imagen térmica calibrada



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

PROYECTO:

Utilización de la
teledetección en
el seguimiento
del desarrollo de
cultivo del paltó
(*Persea americana*
MIL.) E.E. Huanchac,
Huanta 2022

**Imagen
térmica
procesada
en Pix4D y
calibrada**

**VUELO
NRO. 03
Fecha:
18/05/2023**

L - 03

Value

- 44.749 - 0
- 0.001 - 18.04
- 18.041 - 24.921
- 24.922 - 32.232
- 32.233 - 39.973
- 39.974 - 64.918

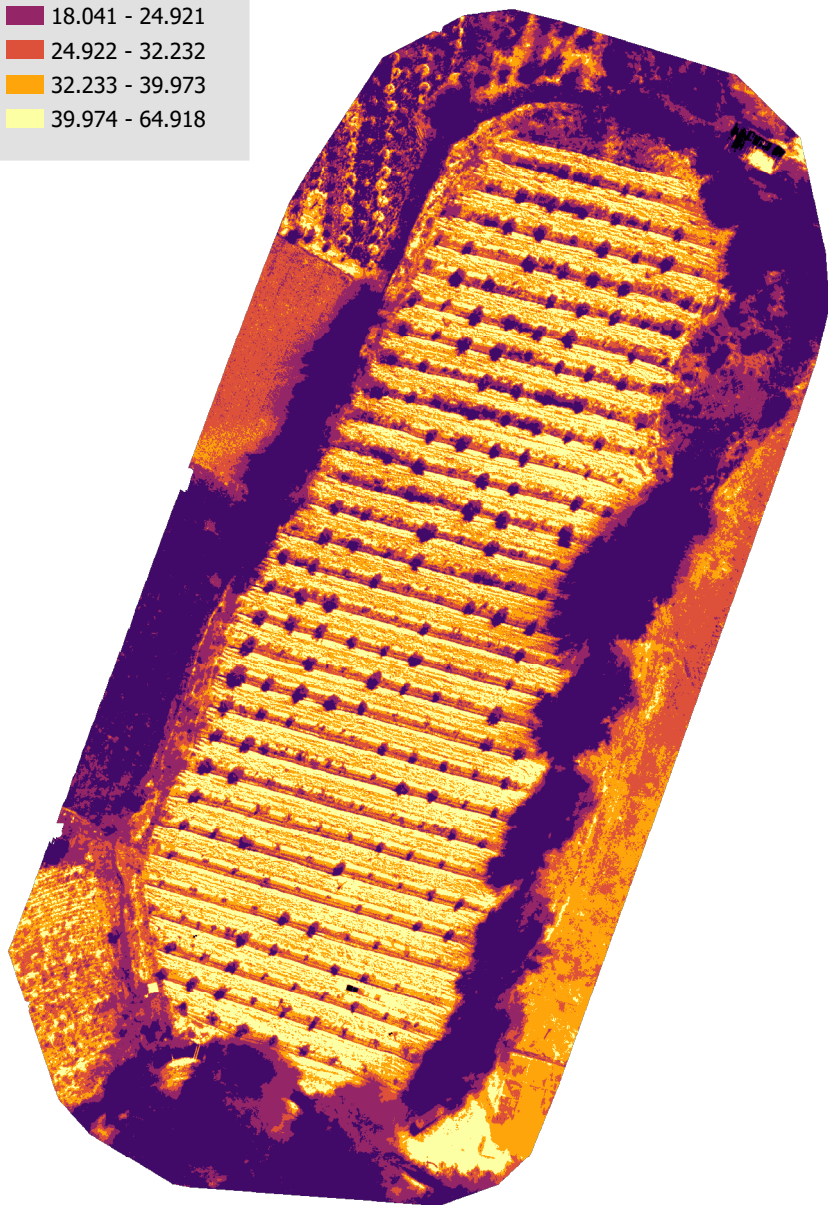


Imagen térmica procesada

Value

- 26.783 - 0
- 0.001 - 15
- 15.001 - 25.448
- 25.449 - 30.929
- 30.93 - 36.733
- 36.734 - 55.434

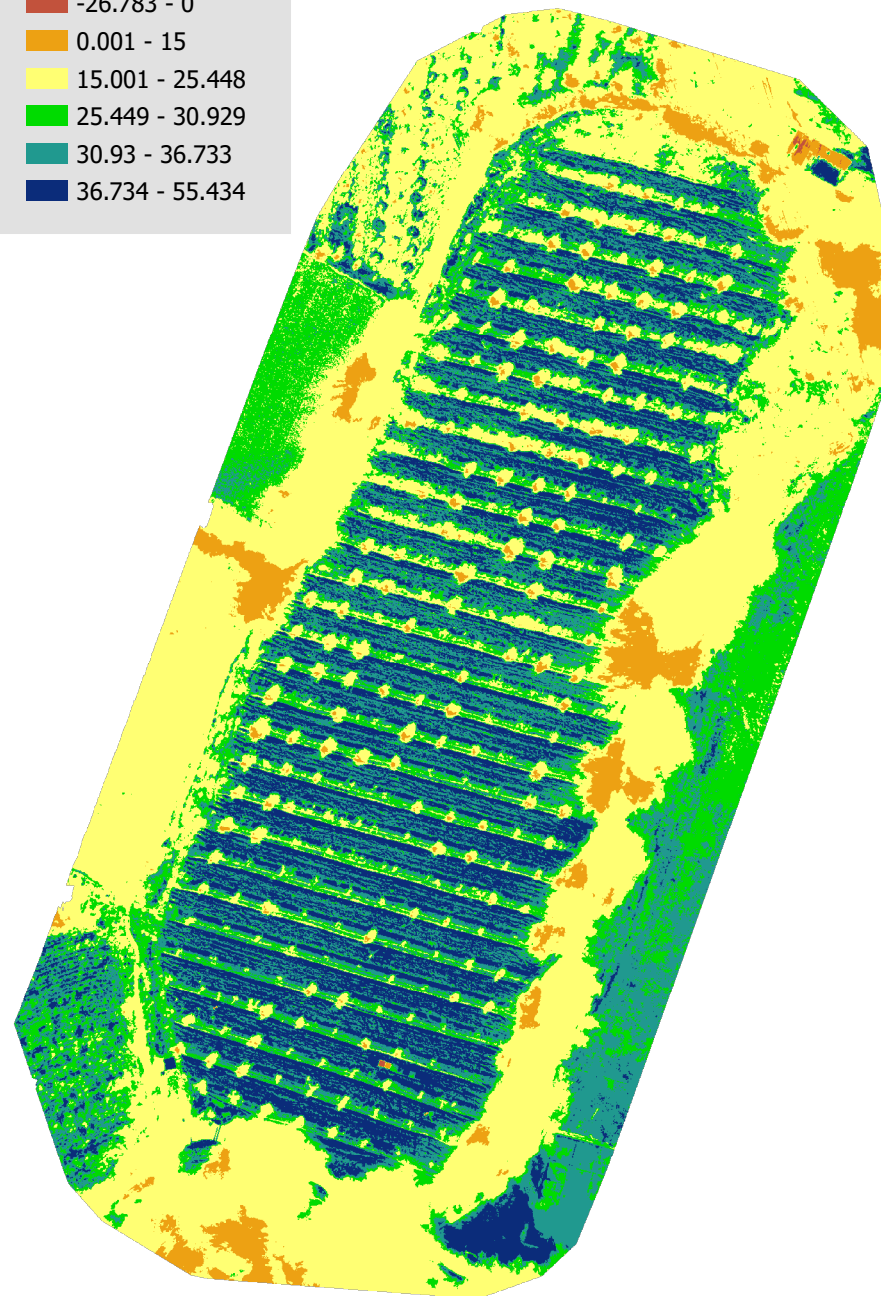


Imagen térmica calibrada



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

PROYECTO:

Utilización de la
teledetección en
el seguimiento
del desarrollo de
cultivo del palto
(*Persea americana*
MIL.) E.E. Huanchac,
Huanta 2022

**Imagen
térmica
procesada
en Pix4D y
calibrada**

**VUELO
NRO. 04
Fecha:
19/05/2023**

L - 04

Termica_19_02ver.tif

Value

- 35.631 - 0
- 0.001 - 18.04
- 18.041 - 24.921
- 24.922 - 43.602
- 43.603 - 52.107
- 52.108 - 78.519

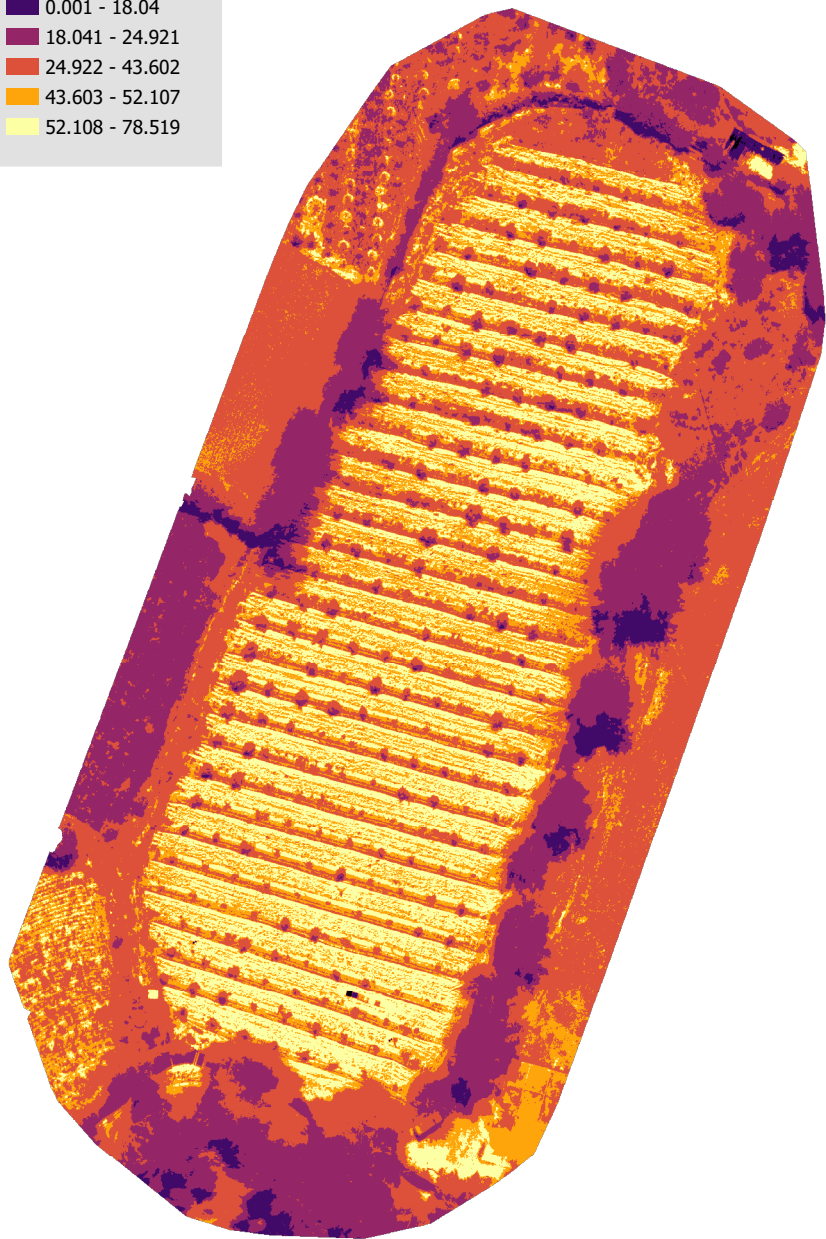


Imagen térmica procesada

Value

- 22.271 - 0
- 0.001 - 15
- 15.001 - 25.448
- 25.449 - 30.929
- 30.93 - 47.147
- 47.148 - 68.044

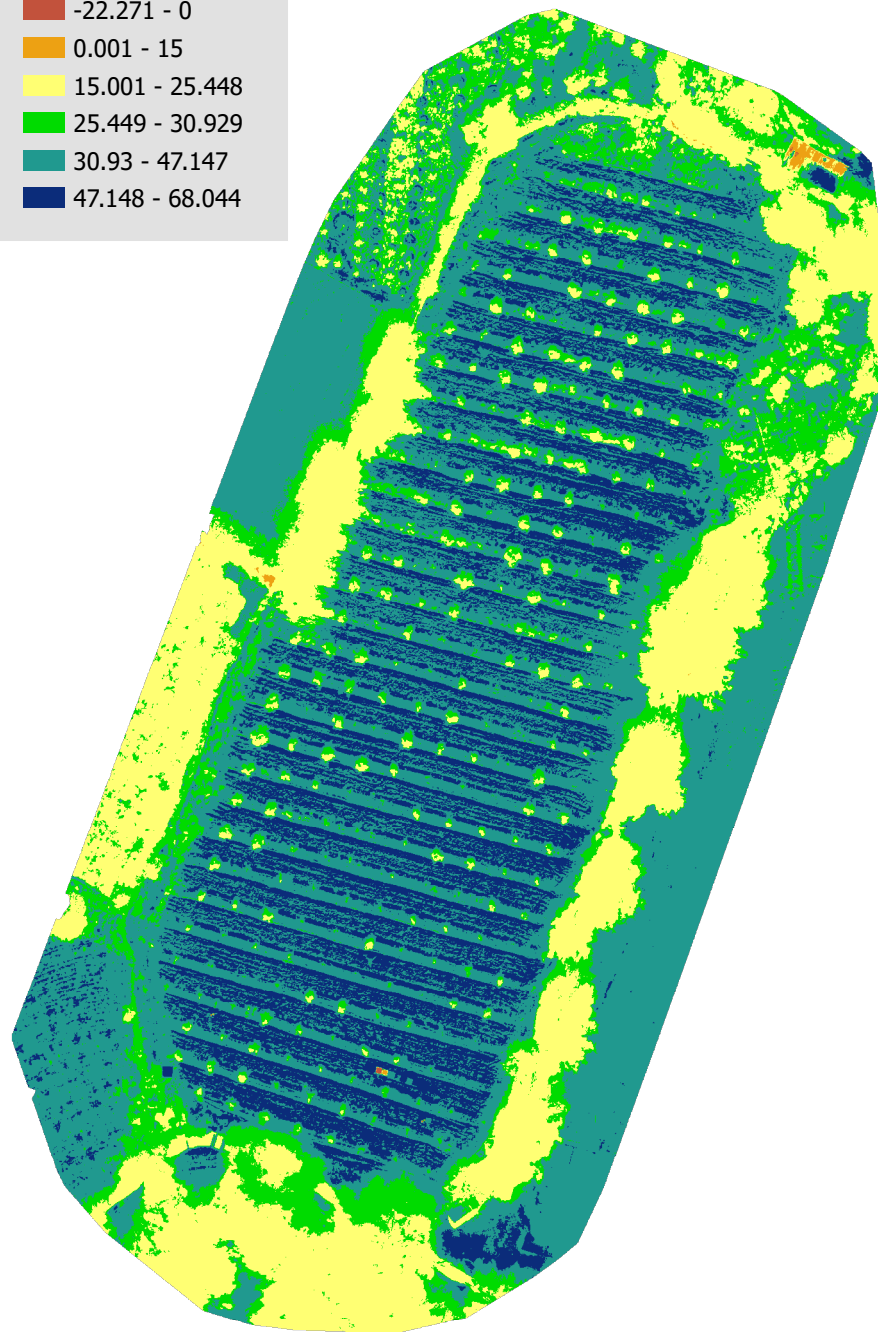


Imagen térmica calibrada



**UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

PROYECTO:

Utilización de la
teledetección en
el seguimiento
del desarrollo de
cultivo del palto
(*Persea americana*
MIL.) E.E. Huanchac,
Huanta 2022

**Imagen
térmica
procesada
en Pix4D y
calibrada**

**VUELO
NRO. 05
Fecha:
19/05/2023**

L - 05

ANEXO 3

ANÁLISIS DE FÍSICO QUÍMICO DEL SUELO



Instituto Nacional de Innovación Agraria

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA CON REGISTRO N° LE - 200



INFORME DE ENSAYO N° 02031-23/SU/ LABSAF - CANAAN

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : Malu Massiel Galindo Sánchez
Propietario / Productor : Malu Massiel Galindo Sánchez
Dirección del cliente : Asoc. Piscotambo Mz K Lote 3 - Huanta
Solicitado por : Malu Massiel Galindo Sánchez
Muestreado por : Cliente
Número de muestra(s) : 01 muestra
Producto declarado : Suelo Agrícola
Presentación de las muestras(s) : Bolsas de plástico transparente
Referencia del muestreo : Reservado por el Cliente
Procedencia de muestra(s) : Huanchacc - Huanta
Fecha(s) de muestreo : 2023-02-08
Fecha de recepción de muestra(s) : 2023-02-10
Lugar de ensayo : Laboratorio de Suelos, Aguas y Follares - LABSAF Canaan
Fecha(s) de análisis : 2023-02-14
Cotización del servicio : 013-23-CA
Fecha de emisión : 2023-02-17

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

Table with 7 columns (ITEM, 1, 2, 3, 4, 5, 6) and multiple rows detailing laboratory code, matrix, date, and various chemical and physical analysis results such as pH, conductivity, and nutrient levels.

INFORME DE ENSAYO N° 02031-23/SU/ LABSAF - CANAAN

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	EPA 9045D, Rev. 4, 2004. Soil and waste pH.
Conductividad Eléctrica	ISO 11265:1994/Cor.1:1996. Soil quality - Determination of the specific electrical conductivity - Technical Corrigendum 1.
Textura	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Ítem 7.1.9 AS-09.2000. Determinación de la textura del suelo por procedimiento de Bouyoucos.
Materia Orgánica	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección (31 de Diciembre 2002). Ítem 7.1.7 AS-07. 2000. Contenido de Materia Orgánica por el método de Walkley y Black.
Nitrogeno	ISO 11261: 1995. First edition. Soil quality - Determination of total nitrogen - Modified Kjeldahl method.
Fósforo	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección(31 de Diciembre 2002). Ítem 7.1.10 AS-10.2000. Determinación de fósforo por el método de Olsen y colaboradores.
Potasio	Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego-INIA Ed. 1era. 2017. Ítem 4.9.1. Pag. 62. Potasio extractable.
Cationes Intercambiables	Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Segunda Sección(31 de Diciembre 2002). Ítem 7.1.12 AS-12.2000. Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico y Bases Intercambiables de suelo con acetato de amonio.

IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento
- Este Informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C

(*) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.

(**) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de ensayo que no han sido acreditados por el INACAL-DA.

(***) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de ensayo que no han sido acreditados por el INACAL-DA, debido a que la muestra no es idónea para el ensayo.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Katia Mendoza Dávalos - Responsable del laboratorio del LABSAF Canaan

Firma
Director de la EEA Canaan

FIN DE INFORME DE ENSAYO



Firmado digitalmente por:
VELASQUEZ MANTARI Jose
FAU 20131365004 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 20/02/2023 12:52:53-0600

ANEXO 4

ANÁLISIS DE FÍSICO QUÍMICO DEL AGUA



Instituto Nacional de Innovación Agraria

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
EL ORGANISMO DE ACREDITACIÓN INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE - 200



Registro N° LE - 200

INFORME DE ENSAYO N° 02030-23/AG/ LABSAF - CANAAN

I. INFORMACIÓN GENERAL

Cliente : Malu Massiel Gallindo Sanchez
 Propietario / Productor : Malu Massiel Gallindo Sanchez
 Dirección del cliente : Jr. Arica N° 476 - Ayacucho
 Solicitado por : Malu Massiel Gallindo Sanchez
 Muestreado por : Cliente
 Número de muestra(s) : 1
 Producto declarado : Agua Superficial
 Presentación de las muestras(s) : Frasco de plástico
 Referencia del muestreo : Reservado por el Cliente
 Procedencia de muestra(s) : Huanchacc - Huanta
 Fecha(s) de muestreo : 8/02/2023
 Fecha de recepción de muestra(s) : 9/02/2023
 Lugar de ensayo : LABSAF - Canaan
 Fecha(s) de análisis : 9/02/2023
 Cotización del servicio : 013-23-CA
 Fecha de emisión : 14/02/2023

II. RESULTADO DE ANÁLISIS

ITEM	1	2	3	4	5	6
Código de Laboratorio	AG128-CA-23					
Matriz Analizada	Agua					
Fecha de Muestreo	2023-02-08					
Hora de Inicio de Muestreo (h)	18:49					
Condición de la muestra	Conservada					
Código/Identificación de la Muestra por el Cliente	Huanchacc					
Ensayo	Unidad	LC	Resultados			
pH (****)	unid. pH	-	7.5			
Conductividad Eléctrica	uS/cm	-	222.5			
Cationes (**)						
Calcio (**)	meq/Litro	-	1.07			
Magnesio (**)	meq/Litro	-	0.51			
Potasio (**)	meq/Litro	-	0.20			
Sodio (**)	meq/Litro	-	0.47			
Aniones (**)						
Carbonatos (**)	meq/Litro	-	0.00			
Bicarbonatos (**)	meq/Litro	-	1.68			
Cloruros (**)	meq/Litro	-	0.54			
TSD (**)	mg/L	-	142.4			
SAR (**)		-	0.529			

INFORME DE ENSAYO N° 02030-23/AG/ LABSAF - CANAAN

III. METODOLOGÍA DE ENSAYO

ENSAYO	NORMA DE REFERENCIA
pH	NTP 214.029 2015. 3er. Edición. CALIDAD DE AGUA. Determinación de pH en agua. Método electrométrico
Conductividad Eléctrica	NTP 214.049 - 2015. 1ra. Edición. CALIDAD DE AGUA. Determinación de conductividad eléctrica en agua
Carbonatos	Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego-INIA Ed. 1era. 2017. ítem 5.4.1. Pág. 75. Carbonatos y bicarbonatos solubles (alcalinidad)
Bicarbonatos	Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego-INIA Ed. 1era. 2017. ítem 5.4.1. Pág. 75. Carbonatos y bicarbonatos solubles (alcalinidad)
Cloruros	Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego-INIA Ed. 1era. 2017. ítem 5.4.2. Pág. 76. Cloruros.
Cationes (Ca,Mg,Na,K)	Manual de procedimientos de los análisis de suelos y agua con fines de riego-INIA Ed. 1era. 2017. ítem 6.4.1. Pág. 83-84. Determinación de Cationes.

IV. CONSIDERACIONES

- Estado en las que ingreso la Muestras: Buenas Condiciones de almacenamiento
- Este informe no puede ser reproducido total, ni parcialmente sin la autorización de LABSAF y del cliente.
- Los resultados se relacionan solamente con los ítems sometidos a ensayo
- Los resultados se aplican a las muestras, tales como se recibieron
- Este documento es válido sólo para el producto mencionado anteriormente.
- El Laboratorio no es responsable cuando la información proporcionada por el cliente pueda afectar la validez de los resultados.
- Medición de pH realizada a 25 °C

(*) Este dato ha sido proporcionado por el cliente, por lo que el laboratorio no es responsable de dicha información.

(**) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de ensayo que no han sido acreditados por el INACAL-DA.

(***) El (Los) resultado(s) obtenido(s) corresponde(n) a métodos de ensayo que no han sido acreditados por el INACAL-DA, debido a que la muestra no es idónea para el ensayo.

(****) Los datos obtenidos son referenciales, debido a que la muestra no cumple con los criterios de ingreso de muestra.

V. AUTORIZACIÓN DEL INFORME DE ENSAYO

- El presente Informe de ensayo ha sido autorizado por: Katia Mendoza Dávalos - Responsable del laboratorio del LABSAF Canaán

Firma
Director de la EEA Canaán



Firmado digitalmente por:
VELASQUEZ MANTARI Jose
FAU 20131305004 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 20/02/2023 12:04:11-0500

ANEXO 5

PANEL FOTOGRÁFICO

Figura A.5. Estructura de riego en la Estación Experimental de Huanchac, Huanta.



Figura A.6. Sistema de riego a goteo del cultivo de palto.



Figura A.7. Muestras de agua y suelo para su análisis – INIA Ayacucho.



Figura A.8. Pruebas de uniformidad al riego.



Figura A.9. *Inicio del entrenamiento en el uso y manejo de drones UNALM.*



Figura A.10. *Monitoreo de estrés hídrico del cultivo de palto con VANT en la UNALM.*



Figura A.11. *Monitoreos al cultivo de palto en la Estación Experimental de Huanchac, Huanta, 2023.*



Figura A.12. *Cultivo de palto en la Estación Experimental de Huanchac, Huanta.*



Figura A.13. *Calibración de sensores y equipos.*



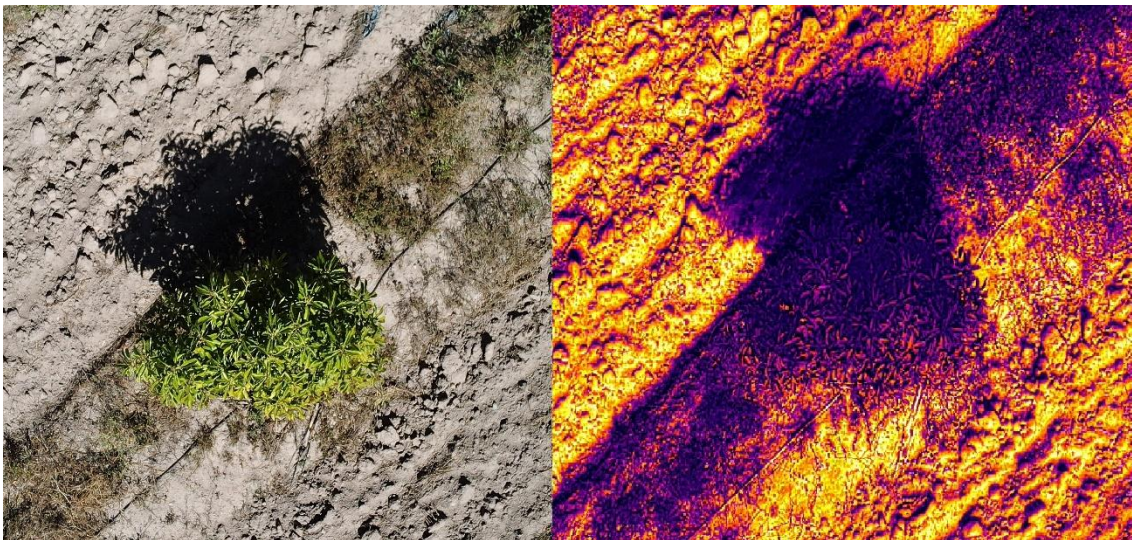
Figura A.14. *Foto grupal de los Ingenieros, especialistas y estudiantes que apoyaron el monitoreo.*



Figura A.15. Foto grupal de los Ingenieros, especialistas y estudiantes que apoyaron el monitoreo.



Figura A.16. Imagen térmica del cultivo de palto.





ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. MALU MASSIEL GALINDO SANCHEZ

R.D. N° 078-2025-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho a los dieciséis días del mes de mayo del año dos mil veinticinco, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por el M.Sc. Francisco Condeña Almora, Ing. Herbert Núñez Alfaro como asesor, Ph.D. Sandra Del Águila Ríos y el Mtro. Ronald Rojas Naccha; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Utilización de la teledetección en el seguimiento del desarrollo de cultivo del palto (*Persea americana*) Fuerte. E.E. Huanchac, Huanta 2022**, para obtener el Título Profesional de Ingeniera Agrícola presentado por la Bachiller **MALU MASSIEL GALINDO SANCHEZ**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
M.Sc. Francisco Condeña Almora	16	12	14	14
Ing. Herbert Núñez Alfaro	17	17	17	17
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos	16	16	18	17
Mtro. Ronald Rojas Naccha	18	17	16	17
PROMEDIO GENERAL				16

OBSERVACIÓN: Por acuerdo unánime de los miembros del jurado, el título del trabajo de investigación debe ser: **Utilización de la teledetección en el seguimiento del desarrollo de cultivo del palto (*Persea americana* Mill.), E.E. Huanchac, Huanta 2022**

Acto seguido se invita al sustentante y publico en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

.....
M.Sc. Francisco Condeña Almora
Presidente

.....
Ph.D. Sandra Del Águila Ríos
Jurado

.....
Ing. Herbert Núñez Alfaro
Asesor

.....
Mtro. Ronald Rojas Naccha
Jurado

.....
Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente



UNSCH

FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativisar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.C.F. N° N° 005-2024-UNSCH-FCA-CF; hace constar que el trabajo titulado;

Utilización de la teledetección en el seguimiento del desarrollo de cultivo del palto (*Persea americana* Mill.), E.E. Huanchac, Huanta 2022

Autor : Malu Massiel Galindo Sanchez

Asesor : Herbert Núñez Alfaro

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de Tesis, aprobado mediante la RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de trece por ciento (**13 %**) de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2701871617

Ayacucho, 18 de junio de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias

Ing. Edgar Tenorio Mancilla
Coordinador de Control de originalidad de
trabajo de investigación y tesis - FCA

Utilización de la teledetección en el seguimiento del desarrollo de cultivo del palto (Persea americana Mill.), E.E. Huanchac, Huanta 2022

por Malu Massiel Galindo Sanchez

Fecha de entrega: 18-jun-2025 02:21p.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2701871617

Nombre del archivo: Borrador_de_Tesis_Malu_Galindo_V02_0625_1_.pdf (12.78M)

Total de palabras: 17903

Total de caracteres: 99479

Utilización de la teledetección en el seguimiento del desarrollo de cultivo del palto (Persea americana Mill.), E.E. Huanchac, Huanta 2022

INFORME DE ORIGINALIDAD

13%

INDICE DE SIMILITUD

13%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

5%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	www.scielo.sa.cr Fuente de Internet	7%
2	Submitted to ucr Trabajo del estudiante	2%
3	Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina Trabajo del estudiante	1%
4	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	ciep.ing.uaslp.mx Fuente de Internet	<1%
6	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%
8	bdigital.unal.edu.co Fuente de Internet	<1%

9	repositorio.unap.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
10	Egea Cegarra, Gregorio. "Characterization and modelling of the agronomic and physiological responses of almond trees to deficit irrigation", Proquest, 20111108 Publicación	<1 %
11	kipdf.com Fuente de Internet	<1 %
12	idoc.pub Fuente de Internet	<1 %
13	www.revistas.unitru.edu.pe Fuente de Internet	<1 %
14	livrosdeamor.com.br Fuente de Internet	<1 %
15	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
16	dgip.unach.mx Fuente de Internet	<1 %
17	moam.info Fuente de Internet	<1 %
18	idus.us.es Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Utilización de la teledetección en el seguimiento del desarrollo de cultivo del palto (*Persea americana* Mill.),

E.E. Huanchac, Huanta 2022

Malu Massiel Galindo Sanchez ¹ malu.galindo.21@unsch.edu.pe

Herbert Núñez Alfaro ² herbert.nunez@unsch.edu.pe

Área de investigación : Medio ambiente
Línea de investigación : Hidrología hidráulica, saneamiento, energía y cambio climático. Riego y drenaje.

RESUMEN

El palto es un cultivo altamente vulnerable al déficit hídrico, sobre todo durante fases clave como la productiva y frutera, ya que este estrés puede inducir la caída prematura de frutos y disminuir la productividad. El presente estudio tuvo como objetivo analizar el índice térmico de teledetección de estrés hídrico del cultivo de palto (IEHC) en tres variedades como el Zutano, Hass y Fuerte a distintas condiciones de riego: catorce y siete días sin riego (SR-14d y SR-7d) y a las doce, dos y una hora luego después de aplicar el riego (DR-12h, DR-2h y DR-1h), utilizando imágenes térmicas infrarrojas como herramienta principal. La investigación se llevó a cabo en los meses de abril y mayo del 2023 en la Estación Experimental de Huanchac en la provincia de Huanta, con una muestra de 170 árboles de cinco años seleccionadas de una población total de 300 árboles, principalmente los que mostraban mayor desarrollo entre los estados B y D de la fase reproductiva. El monitoreo consistió en medir la temperatura de la hoja (Th), la capacidad de las estomas para el intercambio gaseoso (Gs), el contenido de humedad volumétrica del suelo (Θ) y el índice térmico de teledetección indicador de estrés, el IEHC, a partir de imágenes tomadas con VANT. Los datos mostraron variaciones significativas en la temperatura foliar según el cultivar y el tratamiento de riego, con valores de IEHC entre 0,34 y 0,96. Se identificó una correlación moderada del IEHC con Gs ($R = 0,51$) y con Θ ($R = 0,61$). La variedad Zutano fue la más afectada por el estrés hídrico, presentando una recuperación menos eficiente tras el riego en comparación con Hass y Fuerte. A partir del Th, IEHC y humedad del suelo se definió el estado hídrico del cultivo de palto en tres aspectos: estado hídrico óptimo, estrés hídrico leve y estrés hídrico alto.

Palabras clave: índice de estrés hídrico, humedad volumétrica del suelo, estado hídrico, conductancia de las estomas.

ABSTRACT

Avocado is a crop highly vulnerable to water deficit, particularly during key stages such as the productive and fruiting phases, as this type of stress can lead to premature fruit drop and reduced productivity. The aim of this study was to analyze the thermal remote sensing-based Crop Water Stress Index (CWSI) in three avocado cultivars—Zutano, Hass, and Fuerte—under different irrigation conditions: fourteen and seven days without irrigation (SR-14d and SR-7d), and twelve, two, and one hour after irrigation (DR-12h, DR-2h, and DR-1h), using infrared thermal imaging as the primary tool. The research was conducted during April and May 2023 at the Huanchac Experimental Station in the province of Huanta, using a sample of 170 five-year-old trees selected from a total population of 300, primarily those showing greater development in phenological stages B and D of the reproductive phase. Monitoring involved measuring leaf temperature (Th), stomatal conductance (Gs), soil volumetric water content (Θ), and the thermal remote sensing-based stress indicator, the CWSI, using UAV-acquired images. The data showed significant variations in leaf temperature depending on the cultivar and irrigation treatment, with CWSI values ranging from 0.34 to 0.96. A moderate correlation was found between CWSI and Gs ($R = 0.51$), as well as with Θ ($R = 0.61$). The Zutano variety was the most affected by water stress, showing less efficient recovery after irrigation compared to Hass and Fuerte. Based on Th, CWSI, and soil moisture, the water status of the avocado crop was categorized into three levels: optimal water status, mild water stress, and severe water stress.

Keywords: water stress index, soil volumetric moisture, water status, stomatal conductance.

1. INTRODUCCIÓN

La productividad del cultivo de palta se ha incrementado por su expansión a diversas regiones geográficas (Chanderbali et al., 2008). Esto se debe a su capacidad fisiológica del cultivo que le ha permitido adaptarse exitosamente a áreas subtropicales cálidas y húmedas, así como a regiones áridas (Schaffer et al., 2013). En el Perú, el área cosechada de palta se incrementó de 26,259.70 ha a 62,512.62 ha del 2015 al 2024 según datos del Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI, 2025), ocupando el tercer lugar como mayor exportador a nivel mundial, representando el 9 % del mercado global, después de México y Colombia según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2024).

Este aumento, debido a la importancia económica y nutricional del palto, junto con su creciente demanda en el país y en el extranjero, muestra que es necesario usar mejor el agua durante el cultivo para garantizar una producción sostenible y de alta calidad del fruto. Por ello, entender la influencia de los distintos niveles de humedad del suelo sobre el estado hídrico del cultivo de palto permitirá optimizar las estrategias de manejo del agua de riego, con el fin de incrementar la productividad y minimizar los efectos negativos sobre el medio ambiente. Algunos países han implementado el uso de tecnología para el monitoreo de cultivos y su uso eficiente del riego. En cultivos frutales, por ejemplo, se ha utilizado el monitoreo con técnicas de teledetección para determinar el momento óptimo de riego sin afectar el rendimiento. También se ha utilizado para evaluar el estado hídrico mediante indicadores de estrés, entre los que destaca el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC) (López et al., 2009). El IEHC, expresado numéricamente o en una escala, refleja mayores niveles de estrés hídrico en valores altos, indicando menor disponibilidad de agua para las plantas (López et al., 2009). Este índice resulta fundamental para identificar el umbral de tolerancia al estrés hídrico antes de que se comprometa el rendimiento del cultivo. Contar con esta información permite establecer una programación de riego precisa y adaptada en tiempo real a las necesidades hídricas del cultivo.

El uso de sensores térmicos complementa un método de investigación innovador para obtener información precisa y detallada sobre el estado hídrico de los

árboles de paltos en diferentes momentos y bajo diferentes condiciones de riego. Este enfoque puede proporcionar una visión amplia de los patrones de estrés hídrico durante las fases vegetativa, reproductiva y frutera del palto, que ayude a tomar decisiones informadas para optimizar los recursos hídricos e incrementar la eficiencia productiva.

En el departamento de Ayacucho, se hace necesario implementar esta tecnología para utilizar eficientemente el agua de riego y asegurar la productividad agrícola del cultivo de palto. En el año 2024, las provincias que lideraron la producción de palta fueron La Mar y las Cabezas de Lucanas. Sin embargo, la provincia de Huanta, específicamente el distrito de Luricocha, alcanzó un estado de sequía moderada, según el índice de sequía del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2025). Como consecuencia, la producción de palta se redujo en un 50% en comparación con años anteriores, debido a las prolongadas sequías y la escasez de agua que han afectado a la región (Jornada, 2024).

En este contexto, la termografía infrarroja se posiciona como un método valioso para evaluar el estado hídrico de los cultivos. Por ello, el objetivo principal de este estudio fue utilizar técnicas de teledetección para determinar el IEHC en tres cultivares de palto (Hass, Fuerte y Zutano) durante la etapa de floración bajo diferentes condiciones de riego, empleando la termografía infrarroja como herramienta de análisis, evaluando las variaciones significativas de la temperatura foliar del cultivo.

2. METODOLOGÍA

2.1. Ubicación de la zona de estudio

El estudio se llevó a cabo en los campos de la Estación Experimental Huanchac, perteneciente al Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA), ubicada en el valle de Huanta, provincia de Huanta, región Ayacucho, específicamente en el distrito de Luricocha y el centro poblado de Huanchac (figura 1). Geográficamente, se sitúa a una altitud media de 2351 m s. n. m., en las coordenadas 12° 55' 28" S y 74° 17' 42" O, correspondientes al sistema UTM con coordenadas Este 576515.00 m y Norte 8570650.00 m, dentro de la zona 18S y bajo el datum WGS 84 (ftaigura 2).

Figura 1.
Ubicación nacional, provincial, regional, y distrital de la Estación Experimental Huanchac, Huanta.

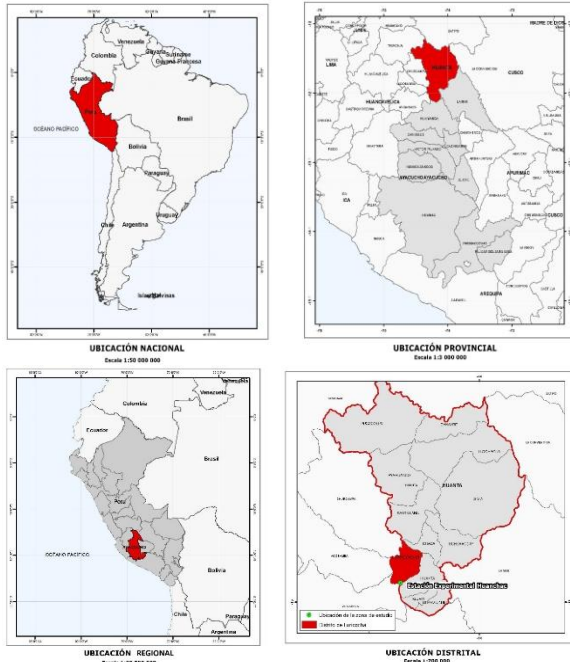


Figura 2.
Ubicación y delimitación geográfica de la Estación Experimental de Huanchac, Huanta.



2.2. Descripción del estudio

La provincia de Huanta, particularmente el distrito de Luricocha, es una zona dedicada a la producción de palta, con 217 hectáreas cultivadas hasta 2023. Los productores trabajan de forma individual o integrados en organizaciones como la Asociación de Fruticultores del Valle de Huanta. La producción depende en gran medida de la disponibilidad de agua, especialmente en los meses con escasa o nula precipitación. El riego se

realiza cada 7 a 14 días, según la disponibilidad hídrica y las condiciones climáticas, que pueden provocar estrés en los cultivos. Por ello, el estudio se desarrolló durante los meses de abril y mayo de 2023, cuando disminuyen las lluvias. Se realizaron cuatro monitoreos para evaluar el estado hídrico del cultivo. El primero fue el 26 de abril, con 14 días sin riego; el segundo, el 27 de abril, 12 horas después del riego. En mayo, se realizaron otros dos monitoreos tras siete días sin riego: uno a la hora y otro a las dos horas de haber finalizado el riego (tabla 1).

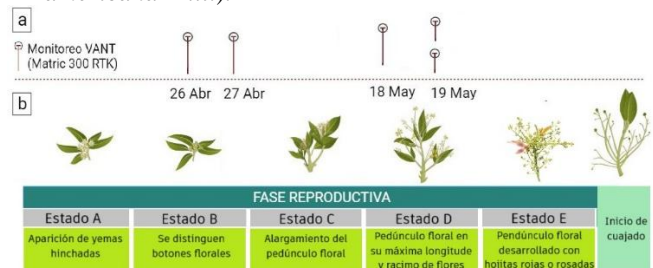
Tabla 1.
Fechas de monitoreo del cultivo de palto a diferentes condiciones de riego.

Fecha	Condición de riego	Código
26/04/2023	14 días sin riego	SR-14d
18/05/2023	07 días sin riego	SR-7d
27/04/2023	12 horas después del riego	DR-12h
19/05/2023	2 horas después del riego	DR-2h
19/05/2023	1 hora después del riego	DR-1h

2.1.1 Características del cultivo de palto

La plantación de palto estaba conformada por tres cultivares: Hass, Fuerte y Zutano, sembrados de manera aleatoria a una distancia de 6,0 m entre surcos y 5,5 m entre plantas. En la parcela de estudio se encontraron un total de 300 árboles de paltos de un promedio de 5 años de desarrollo; sin embargo, se seleccionaron 170 paltos con mayor desarrollo y densidad foliar en fase reproductiva (figura 3).

Figura 3.
(a) Monitoreo con VANT en el cultivo de palto. (b) Estados de la fase reproductiva del palto (*Persea americana* Mill.).



El monitoreo coincidió entre los estados B (figura 4a) y D (figura 4b) de la fase reproductiva del cultivo de palto (figura 5). El palto muestra mayor sensibilidad al estrés durante esta fase, debido a su mayor requerimiento de agua, cierto grado de estrés para la producción de flores y el control de caída de estas (Acosta Rangel, 2018).

Figura 4.

(a) Estado B y (b) D de la fase reproductiva del palto (*persea americana* Mil.) en la Estación Experimental de Huanchac.

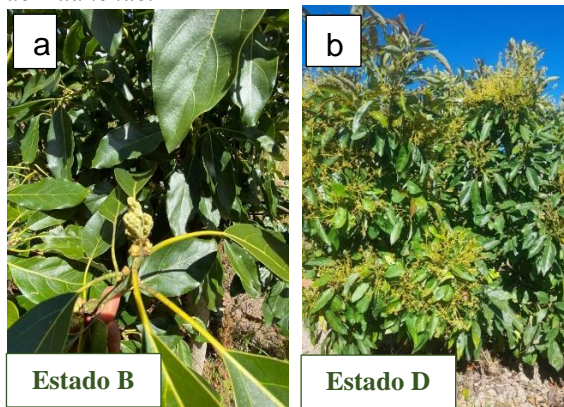
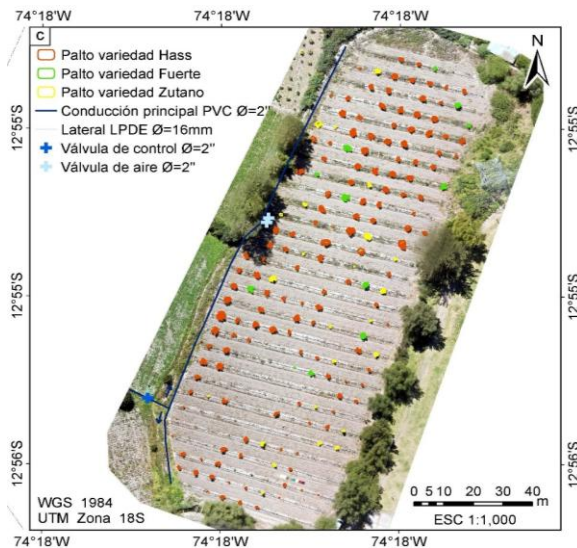


Figura 5.

Arreglo espacial de los árboles de palto.



2.1.2 Características del suelo

La región baja de Huanta se caracteriza por tener suelos aluviales con una fertilidad moderada, En tanto, la zona intermedia se caracteriza por presentar suelos de textura franco-arenosa, con un ligero grado de erosión y condiciones de drenaje favorables, lo que resulta óptimo para el crecimiento y desarrollo del palto (Espinoza-Mendoza, 2015). El suelo específico de la parcela de cultivo del presente estudio presenta similares condiciones del suelo de la zona intermedia. En el análisis realizado en el Laboratorio de Suelos, Agua y Foliar (LABSAF) Canaán, del Instituto Nacional de Innovación Agraria (INIA) en Ayacucho, se determinó que el suelo alcanza niveles de humedad volumétrica registrados de 28,23 % a capacidad de campo y de 15,89 % en el punto de marchitez. En

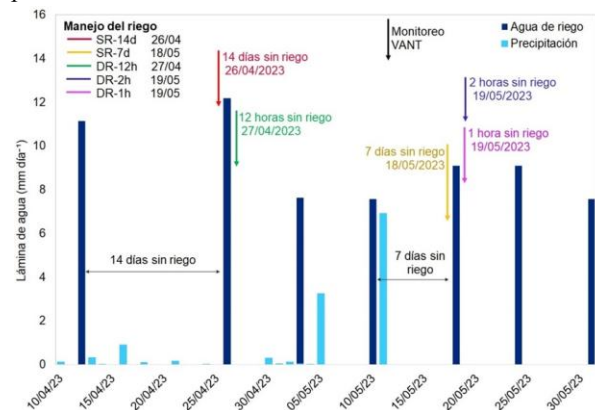
cuanto a las propiedades texturales, el suelo fue clasificado como de textura franca, con una composición aproximada de 35 % de arena, 50 % de limo y 15 % de arcilla. Además, se observa una densidad aparente de 1,19 g cm⁻³, un contenido de materia orgánica de 3,10%, un pH de 7,6, una CIC de 7,91 meq/100g, niveles de fósforo (P) del 7,18%, potasio (K) del 727,34% y nitrógeno (N) del 0,16%.

2.1.3 Características del riego

La Estación Experimental de Huanchac se abastece de agua a través del canal del río Cachi. Dispone de un reservorio con una capacidad de almacenamiento de 180 m³, desde el cual se distribuye el agua hacia los cultivos mediante un sistema de riego por goteo compuesto por una tubería principal de PVC de 2 pulgadas de diámetro y regulada por un arco de riego. Treinta laterales de LPDE (Ø = 16 mm), colocados cada 5,5 m, reciben agua de esta tubería. Hay un lateral por línea de plantación y cada árbol tiene dos goteros regulables, con un flujo de 72 L h⁻¹ cada uno. El riego inicia en abril después de las lluvias, y varía la frecuencia según condiciones climáticas y el estado de los árboles. Se riega cada 7 días con una lámina de agua de 8-15 mm en un periodo de 3 a 4 horas. El requerimiento de agua mensual se calculó usando la evapotranspiración potencial (Eto) con el método Hargreaves-Samani y un Kc de 0,7, coeficiente de cultivo como lo sugieren Gardiazabal et al. (2003). Los resultados indicaron una lámina real de 36,23 mm para el mes de abril y 46,52 mm para el mes de mayo (figura 6).

Figura 2.

Lámina y frecuencia de riego aplicada durante el periodo de monitoreos del cultivo.



Para evaluar las respuestas de los árboles de palto bajo diferentes condiciones de riego; 14 y 7 días sin riego, y 12, 2 y 1 hora después de cada ciclo de riego. Las láminas de riego aplicado al cultivo se muestran en la De acuerdo con el análisis efectuado en el Laboratorio

de Suelos, Agua y Foliar (LABSAF) en Canaán, el agua destinada al riego presenta un pH de 7,50 y una conductividad eléctrica (CE) de 222,5 $\mu\text{S cm}^{-1}$. En cuanto a su composición iónica, se identificaron los siguientes cationes: calcio (Ca^{2+}) con 1,07 meq L^{-1} , magnesio (Mg^{2+}) con 0,51 meq L^{-1} , sodio (Na^+) con 0,47 meq L^{-1} y potasio (K^+) con 0,20 meq L^{-1} . Entre los aniones predominan el cloruro (Cl^-) con 0,54 meq L^{-1} y el bicarbonato (HCO_3^-) con 1,68 meq L^{-1} . Según estos resultados, el agua se clasifica como C1-S1, lo que indica un bajo riesgo por sodio y una salinidad media, con un RAS (Relación de Adsorción de Sodio) de 0,529.

2.1.4 Características meteorológicas durante el monitoreo

De acuerdo con el sistema de clasificación de Köppen, el clima predominante en el valle de Huanta corresponde a un tipo seco, semicálido y templado (García, 2004). La temperatura promedio anual es de 18 °C, con un máximo de 33 °C y un mínimo de 2.9 °C, la precipitación media anual es de 375 mm, distribuida principalmente durante la temporada de verano, mientras que el invierno y otoño se caracteriza por ausencia de lluvias, con humedad relativa promedio a 55 % y la radiación solar promedio anual de 825 W m^{-2} (Estación Meteorológica Convencional Huanta; SENAMHI, 2025). En la primera condición de riego SR-14d, se observó una fluctuación en la temperatura del aire de 27,9 a 26,5 °C, con un promedio de 27,1, y se registraron las temperaturas más elevadas y la humedad relativa más baja del ambiente, con una radiación solar que superaba los 900 W m^{-2} . Durante las siguientes condiciones de riego, la temperatura del aire osciló entre los 21 y los 24 °C, con humedades relativas que oscilaron entre el 30 y el 45 % (figura 8). No se observaron cifras de humedad relativa que superaran el 50%, y la radiación alcanzó un valor inferior a 900 W m^{-2} . El 26 y 27 de abril presentan vientos más intensos con una dirección predominante desde el Este. Durante el mes de mayo, se observa una mayor variabilidad en la dirección del viento, siendo el día 18 el viento más fuerte desde el Este y Noreste, y el día 19 desde el Sureste (figura 7).

Figura 7. Variación temporal de la velocidad, frecuencia y dirección del viento durante el periodo de monitoreo.

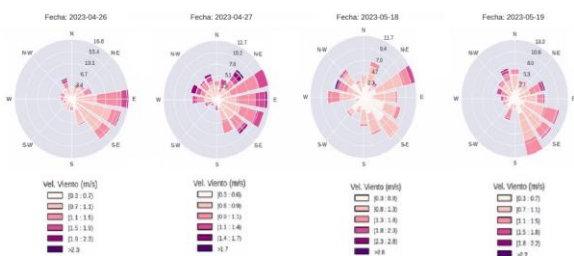
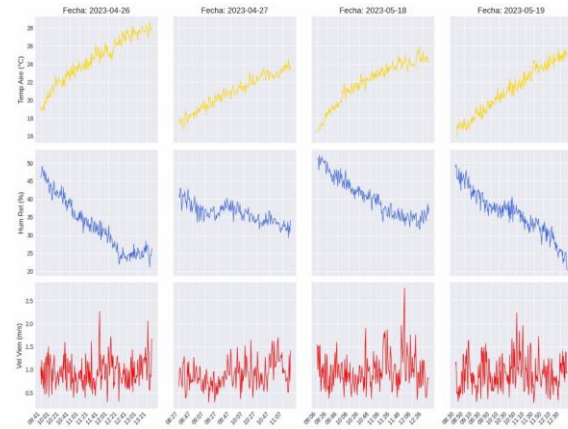


Figura 8. Variación temporal de la temperatura, humedad relativa y velocidad del viento durante el periodo de monitoreo.

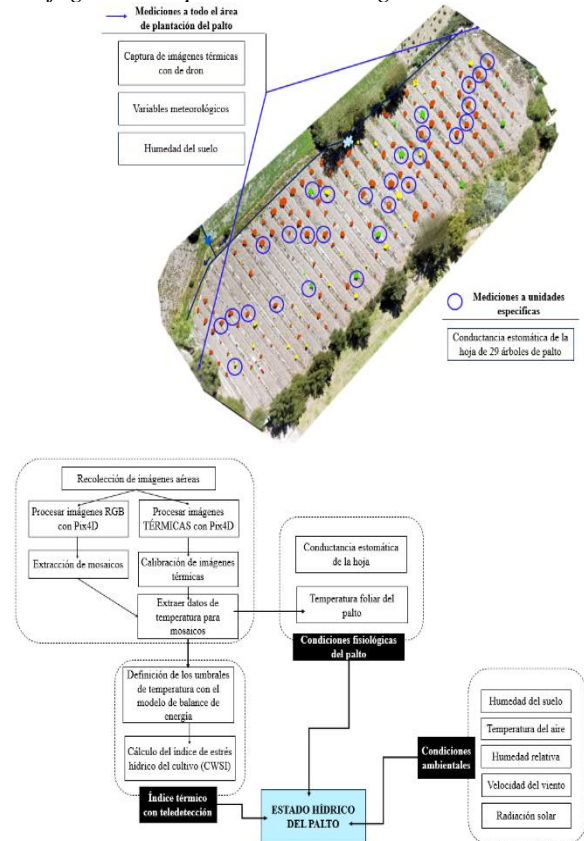


2.3. Procedimiento Metodológico

2.3.1. Procedimiento

El estudio se desarrolló en dos procesos; el primero comprende las actividades desarrolladas en campo, y el segundo en gabinete. En el esquema secuencial siguiente, mostrado en la figura 9, se presentan las actividades realizadas en cada proceso.

Figura 9. Flujograma del proceso de investigación

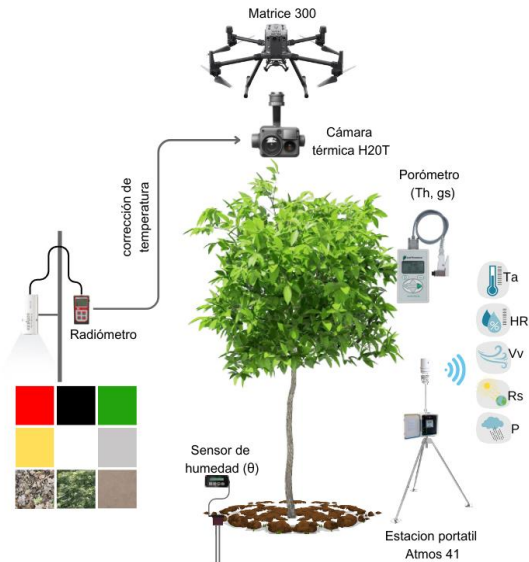


2.3.2. Materiales

Durante la investigación se emplearon diversos equipos tecnológicos (Figura 10), entre ellos un dron Matrice 300 RTK con cámara térmica Zenmuse H20T para capturar imágenes RGB y térmicas del cultivo de palto, complementado con un radiómetro MI-210 para mediciones de temperatura superficial y un sensor SC-1 para evaluar la conductancia estomática. Las condiciones ambientales fueron registradas mediante la estación meteorológica portátil ATMOS 41, mientras que la humedad del suelo se midió con un sensor TDR-100. Se trabajó con un cultivo de palto de una hectárea, aplicando cinco tratamientos de riego diferenciados y utilizando nueve coberturas calibradas y cuatro puntos de control georreferenciados para mejorar la precisión de las imágenes térmicas. El procesamiento de datos se realizó mediante los programas Pix4D, PC 400, Leaf Porometer Utility, ArcGIS 10.8 y Excel 2019, permitiendo generar ortomosaicos, extraer temperaturas foliares y analizar estadísticamente la información recopilada.

Figura 10.

Equipos y sensores empleados en la recolección de datos en campo durante el monitoreo del cultivo de palto.



2.3.3. Mediciones y recolección de información

Durante el estudio, se realizaron mediciones de conductancia estomática en hojas de palto con un porómetro SC-1, siguiendo protocolos estandarizados y aplicando tratamientos hídricos diferenciados en 29 árboles. La humedad del suelo se evaluó con un sensor TDR-100 a 20 cm de profundidad en 170 árboles, previa calibración para garantizar precisión. Simultáneamente, se recolectaron datos meteorológicos con una estación portátil ATMOS 41

conectada a un registrador ZL6, registrando variables como temperatura, humedad relativa, radiación solar y presión atmosférica. Además, se capturaron imágenes térmicas del cultivo mediante una cámara Zenmuse H20T instalada en un dron Matrice 300 RTK, con vuelos programados a 70 m de altitud y uso de puntos de control para georreferenciación, logrando una alta resolución espacial bajo condiciones controladas.

2.3.4. Modelación del estado hídrico del cultivo

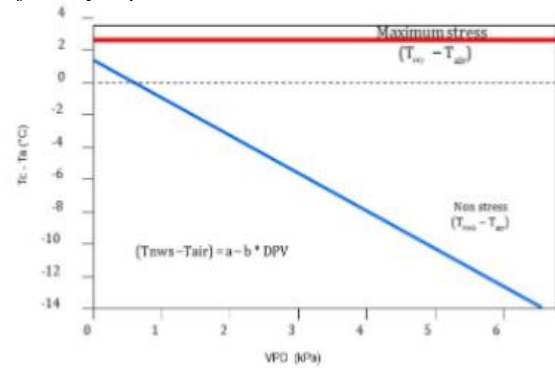
El índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC) se calculó con base en el modelo empírico (Idso et al., 1981) definido en la siguiente ecuación.

$$IEHC = \frac{(Th-Ta) - (Th-Ta)_{LI}}{(Th-Ta)_{LS} - (Th-Ta)_{LI}}$$

Donde, Th es la temperatura de la hoja ($^{\circ}C$) y Ta es la temperatura del aire ($^{\circ}C$); $(Th - Ta)_{LS}$ es el límite superior en condiciones de transpiración mínima o inexistente, $(Th - Ta)_{LI}$ es el límite inferior que representa la condición sin estrés hídrico (figura 11).

Figura 11.

Umbral de temperatura definidos por el límite inferior y superior



Los valores de $(Th - Ta)_{LS}$ se determinan en función de las máximas diferencias de temperatura en $^{\circ}C$, y los valores de $(Th - Ta)_{LI}$ 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 siguiente ecuación:

$$(Th - Ta)_{LI} = aDPV + b$$

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

$$DPV = e_s - e_a$$

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) (López et al., 2009). Los valores de e_s y e_a se estimaron según las siguientes ecuaciones:

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

$$e_a = HRx \frac{e_s}{100}$$

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 experimenta condiciones de estrés hídrico severo. Cuando el valor de IEHC se aproxima a 0, sugiere que el cultivo está bien regado y no experimenta un estrés hídrico significativo (López et al., 2009).

2.3.5. Análisis de datos

Los datos recopilados fueron analizados mediante el programa 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 (Th) entre las distintas condiciones de riego. Luego se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo para determinar la media y la desviación estándar de la Th y el 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.

3. RESULTADOS Y DICUSIONES

3.1. Umbrales térmicos del cultivo de palto con teledetección térmica a diferentes condiciones de riego

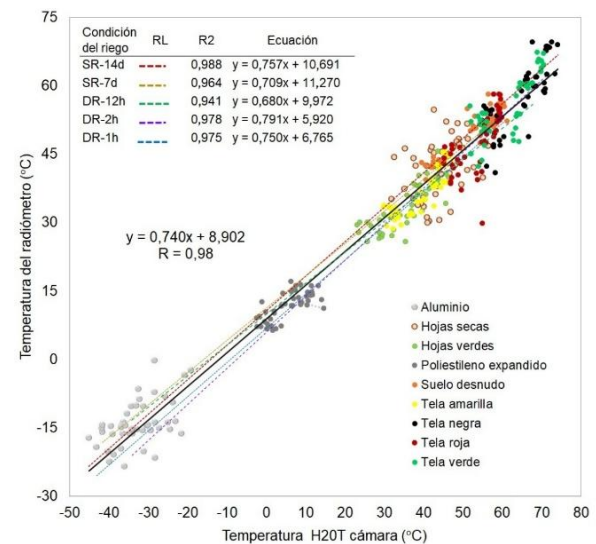
3.1.1. Temperatura de termografía infrarroja con sensores remotos a diferentes condiciones de riego

Las imágenes térmicas captadas por el VANT fueron corregidas linealmente para estimar con precisión los valores de temperatura absoluta de la superficie, basada en datos registrados con un radiómetro sobre nueve tipos de cobertura, bajo condiciones ambientales específicas del área de estudio. Esta calibración generó una ecuación de ajuste ($Y_{\text{radiómetro}} = 0,7 \cdot X_{\text{H20T}} + 8,9$) con un error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) de 4,2 °C (figura 12). Al aplicar este ajuste a los datos térmicos del VANT, se alcanzó un coeficiente R^2 de 0,98, lo que indica una excelente correspondencia entre los valores corregidos y los datos de referencia. El alto valor de R^2 evidencia

que el modelo de calibración aplicado es robusto y eficaz. Además, el análisis mostró que no existen diferencias significativas al utilizar nueve coberturas frente a solo cuatro, en cuanto a la precisión del ajuste térmico. Esto implica que es posible reducir el número de coberturas sin afectar la calidad del modelo, lo que resulta favorable para optimizar la logística del trabajo de campo y minimizar los tiempos de procesamiento de datos.

Figura 12.

Comparación de temperaturas registradas simultáneamente por la cámara H20T y el radiómetro durante los monitoreos.



Estos resultados coinciden con lo reportado por Machaca-Pillaca et al. (2022), quienes lograron una precisión similar utilizando únicamente cuatro coberturas. Asimismo, Ramos-Fernández et al. (2024) concluyeron que la diferencia entre modelos calibrados con cuatro y nueve coberturas no es estadísticamente significativa en términos de precisión. Sin embargo, estos autores también advierten que la elección del número de coberturas debe estar en función de las características del entorno analizado. En contextos con alta heterogeneidad en los usos del suelo o con condiciones microclimáticas variables, una mayor cantidad de coberturas podría mejorar la representatividad y confiabilidad del modelo. Una vez calibrada las imágenes se extrajo la temperatura de la hoja (Th) de los árboles de palto, mediante máscaras del dosel generadas en el ortomosaico RGB. Los datos de Th se analizaron con la prueba de Scheffé, de la cual se observaron diferencias significativas con $p < 0,05$ en la Th entre las diversas condiciones de riego (tabla 2).

Tabla 2

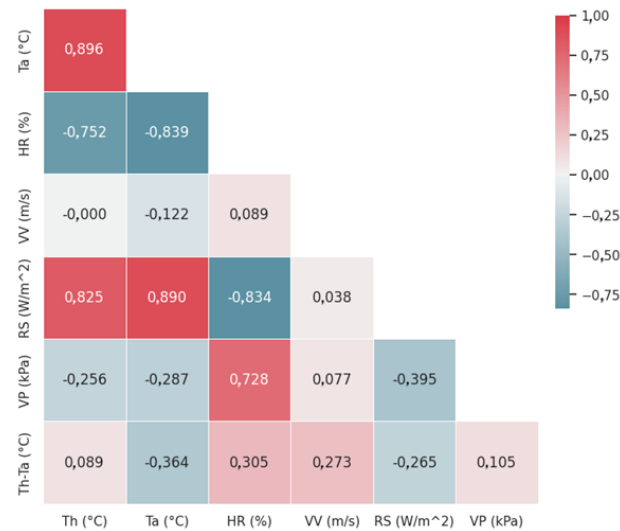
Prueba de Scheffé a los datos de temperatura de la hoja (T_h) del cultivo de palto (*Persea americana* Mill.)

Comparación entre condiciones de riego	Diferencia significativa ($p < 0,05$) de T_h
SR-14d – SR-7d	4,6
SR-14d – DR-12h	3,6
SR-14d – DR-2h	3,3
SR-14d – D-R-1h	5,4

A la vez la correlación de Pearson con las variables meteorológicas mostró un R de 0,896 entre la T_h y la temperatura del aire (T_a), seguido por la Radiación solar con un coeficiente de 0,826. Se observa también una correlación negativa de la humedad relativa para R de -0,752 y -0,839 con la T_h y T_a respectivamente, lo que indica que, al aumento de estas temperaturas, disminuye la humedad relativa (figura 13).

Figura 13.

Coefficientes de Pearson de la correlación entre la temperatura de la hoja calibrada (T_h), con variables meteorológicas.



3.1.2. Umbrales de temperatura del cultivo de palto a diferentes condiciones de riego

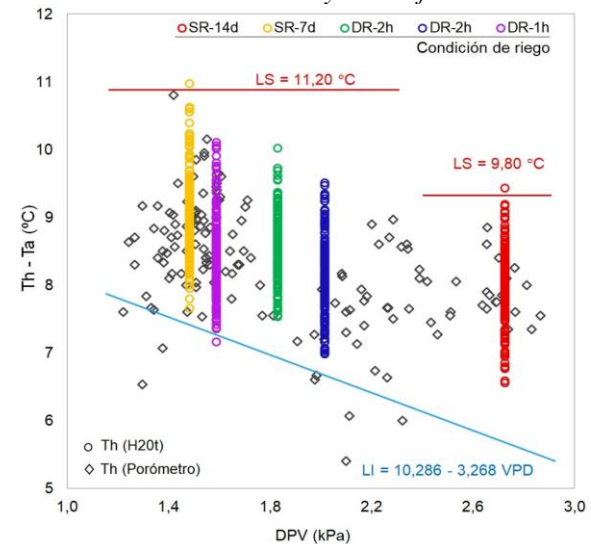
Los umbrales de temperatura fueron definidos en función de los límites superior e inferior establecidos para el cultivo de palto. El límite inferior (LI) se determinó en condiciones de bajo estrés hídrico, caracterizadas por valores reducidos en la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire ($T_h - T_a$), donde se obtuvo una pendiente negativa de -3,27 por cada

unidad de DPV, con una ordenada al origen de 10,27, que representa la diferencia de temperatura ($T_h - T_a$) en condiciones sin estrés hídrico. El límite superior (LS) se definió en función de las temperaturas más elevadas registradas por el cultivo bajo una temperatura ambiental determinada y considerando un déficit de presión de vapor (VPD) constante. Se estableció un valor de LS igual a 11,20 °C para condiciones de riego con una frecuencia menor a siete días, y un LS de 9,20 °C para la condición de 14 días sin riego (figura 14).

El comportamiento de los datos indica que el aumento del DPV genera una reducción en $T_h - T_a$, lo que refleja una respuesta fisiológica del cultivo al ambiente más seco, disminuyendo la transpiración conforme se intensifica el déficit hídrico. En particular, cuando el DPV supera los 2,3 kPa, el límite superior de estrés disminuye notablemente de 11,2 °C a 9,8 °C, bajo condiciones de 27 °C de temperatura ambiental y 24 % de humedad relativa. Este patrón permite identificar con mayor precisión el umbral de estrés térmico para las plantas en distintos escenarios de disponibilidad hídrica.

Figura 14.

Umbrales de temperatura de estrés (límite superior) y sin estrés (límite inferior) a partir de datos térmicos obtenidos con cámara H20T y sensor foliar.



Nota: 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.

Los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Idso (1982), quien también documentó una reducción de $T_h - T_a$ conforme aumenta el DPV en cultivos frutales. De igual manera, Jamshidi et al. (2020) establecieron líneas base para cultivos perennes bajo riego óptimo, confirmando la utilidad de $T_h - T_a$ como indicador del estado hídrico de los cultivos. Además, en huertos de durazno, Park et al.

(2021) observaron que, bajo condiciones extremas de déficit hídrico (0 % de ETC), la diferencia Th-Ta puede reducirse hasta 5 °C, en un ambiente con 30,6 °C y 26,7 % de humedad relativa, condiciones similares a las registradas en el presente estudio. Estos antecedentes respaldan la validez de los umbrales establecidos y su aplicación en el monitoreo del estrés hídrico en frutales.

3.2. Índice de estrés hídrico del cultivo a diferentes condiciones de riego a partir de los umbrales térmicos de teledetección

Se evidenció una tendencia decreciente del Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC) a medida que aumentaba la humedad del suelo, particularmente en los periodos de riego más cortos (tabla 3, figura 15b). Los valores del IEHC para el cultivar Zutano es de un máximo de 0.64 y un mínimo de 0.41, para la variedad Hass es de 0.96 y 0.37, y la variedad fuerte es de 0.90 y 0.33. Los valores más altos de IEHC se obtuvo a una condición de 14 días sin riego (SR-14d) y su valor mínimo una hora después del riego (DR-1h). Asimismo, la temperatura de la hoja (Th) mostró una tendencia decreciente, con un comportamiento estrechamente relacionado con la temperatura del aire, respaldado por un alto R de Pearson de 0,896 (figura 13).

También se observó que los valores medios de temperatura foliar (Th) disminuyeron de forma consistente según la variedad de palto, siguiendo el orden: Zutano > Hass > Fuerte (figura 15a). En la condición de mayor estrés hídrico (SR-14d), se registraron valores máximos de Th superiores a 33,5 °C. En cambio, bajo la condición de siete días sin riego (SR-7d), la Th osciló entre 29,45 °C y 31,66 °C, posiblemente influenciada por un evento de lluvia previo. En las condiciones evaluadas a pocas horas después del riego (12, 2 y 1 horas), la Th se mantuvo entre 28,43 °C y 32,63 °C, en concordancia con los niveles elevados de humedad del suelo registrados tras la aplicación del riego.

Tabla 3.

Promedio, valores máximos y mínimos, y coeficiente de variación (CV) en las diferentes condiciones de riego de la temperatura de la hoja (Th) y el IEHC en el cultivo de palto (Persea americana Mill.).

Condición de riego	Th (°C)		
	Media (±SE)	CV %	Rango (Min-Max)
SR-14d	35,1 (±0,593)	1,7	33,69 - 36,53
SR-7d	30,5 (±0,496)	1,6	29,45 - 31,66
DR-12h	31,5 (±0,435)	1,4	30,69 - 32,63
DR-2h	31,7 (±0,574)	1,8	30,70 - 33,23
DR-1h	29,7 (±0,559)	1,9	28,43 - 31,07

Condición de riego	CWSI		
	Media (±SE)	CV %	Rango (Min-Max)
SR-14d	0,78 (±0,070)	9,0	0,62 - 0,96
SR-7d	0,62 (±0,086)	13,9	0,44 - 0,82
DR-12h	0,62 (±0,063)	10,2	0,51 - 0,79
DR-2h	0,58 (±0,077)	13,1	0,44 - 0,77
DR-1h	0,54 (±0,091)	16,8	0,34 - 0,77

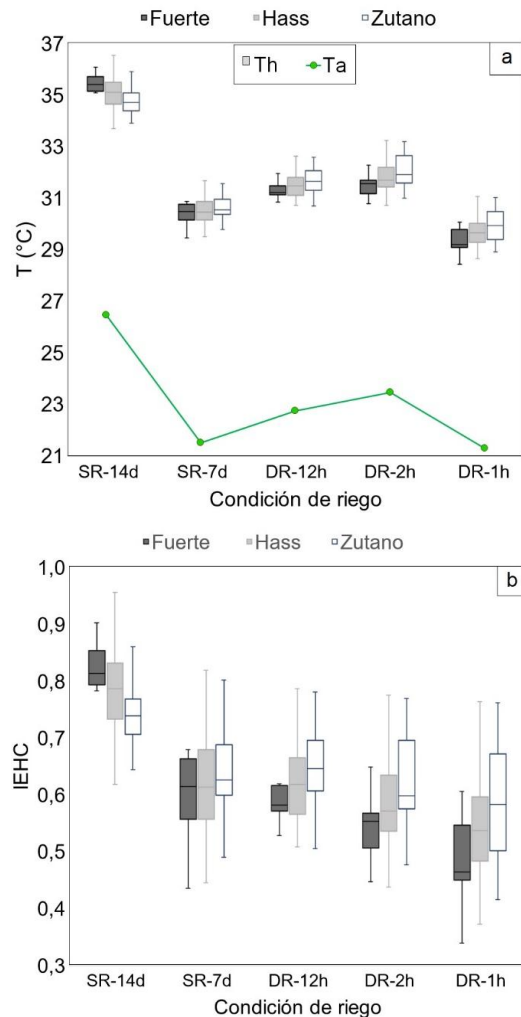
Nota. SR-14d: 14 días sin riego, SR-7d: 7 días sin riego, DR-12h: 12 horas después del riego, DR-2h: 2 horas después del riego, DR-1h: 1 hora después del riego, K.

La variación del IEHC responde directamente a la disponibilidad de agua en el suelo y a las condiciones microclimáticas. Aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre cultivares (variación promedio de solo 0,08), se identificó que el cultivar Fuerte presentó los valores más bajos de IEHC, mientras que el cultivar Has registró los más altos. Esta dinámica indica que, en general, todas las variedades respondieron al estrés hídrico de manera similar, aunque con leves diferencias en su sensibilidad y recuperación. Por otro lado, Zutano mostró los valores promedio más altos de temperatura foliar, incluso después del riego, lo que sugiere una menor capacidad de recuperación tras el estrés hídrico, a pesar de su mayor tolerancia general al estrés. Durante el periodo de estrés máximo, Zutano también presentó valores más bajos de IEHC que las otras variedades, indicando una mayor resistencia fisiológica al estrés hídrico.

Estudios previos en ciruelos, Millán et al. (2020) han señalado que la temperatura foliar representa la variable de mayor sensibilidad al déficit hídrico, seguido por la conductancia estomática (Gs), lo que coincide con los hallazgos del presente estudio en palto. Además, Salgadoe et al. (2019) destacan que, en el cultivo de palto, Th es un indicador clave de la absorción restringida de agua, confirmando su utilidad como variable de monitoreo. Respecto a la respuesta de los diferentes cultivares, Schaffer et al. (2013) y Webber (1917) mencionan que Zutano es comúnmente utilizado como patrón de injerto y polinizador debido a su tolerancia al estrés hídrico. No obstante, estos autores también reportan que presenta una menor capacidad de recuperación una vez superado el episodio de estrés, lo cual se corrobora en los resultados de este estudio, donde Th y IEHC permanecen elevados en Zutano incluso después del riego.

Figura 15.

Variación de la temperatura de la hoja (T_h) y el aire (T_a) (a), y el índice de estrés hídrico de cultivo (IEHC) (b), según las condiciones de riego en tres variedades de palto (*Persea americana* Mill.).



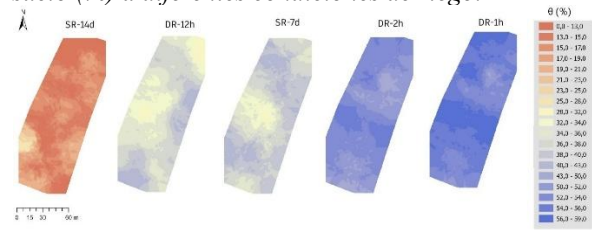
3.3. Estado hídrico del palto en base al IEHC como indicador térmico de teledetección

3.3.1. Humedad del suelo

El análisis físico del suelo determinó una textura franca, compuesta por 35 % de arena, 50 % de limo y 15 % de arcilla. La figura 16 muestra la distribución espacial de la humedad volumétrica del suelo, donde se evidencia un gradiente que va desde valores por debajo del punto de marchitez permanente (PMP) hasta niveles superiores a la capacidad de campo (CC). Estos umbrales corresponden a un PMP de 15,89 %, una CC de 28,23 % y una densidad aparente de 1,19 g/cm³.

Figura 16.

Variación espacial de la humedad volumétrica del suelo (%) a diferentes condiciones de riego.



Esta variabilidad refleja una capacidad de retención de agua influenciada por la textura, la estructura del suelo y el manejo del riego. Las zonas rojas (0–15 %) indican condiciones de estrés hídrico severo, sin disponibilidad de agua en el suelo útil para las plantas; las zonas amarillas (16–28 %) representan condiciones óptimas de humedad, y las zonas azules (>28 %) sugieren saturación, posiblemente registrada pocas horas después del riego. Aunque no se cuenta con datos texturales diferenciados por sector, la textura franca obtenido en laboratorio indica capacidad de retención de agua moderada, adecuada para el cultivo. La distribución espacial observada se atribuye a las variaciones en la humedad del suelo por las diferentes condiciones de riego del suelo y al bajo coeficiente de uniformidad del sistema de riego (59 %).

3.3.2. IEHC y humedad del suelo

Se observa una tendencia negativa en la relación entre la temperatura de la hoja (T_h) y la humedad volumétrica del suelo (θ), el coeficiente de Pearson indicó una relación negativa moderada ($R=-0,66$) (figura 17a). En la condición de 14 días sin riego (SR-14d), se registraron los valores más altos de T_h , superando los 34 °C, con niveles de humedad del suelo inferiores al 25 %. Esta reducción en la humedad se asoció con un aumento en la temperatura foliar, alcanzando un máximo de 36,53 °C y un valor medio de IEHC de 0.78. En cambio, bajo condiciones de riego más frecuentes, como SR-7d, y las horas posteriores al riego (DR-12h, DR-2h y DR-1h), la temperatura foliar disminuyó a valores por debajo de 32,5 °C, con niveles de humedad del suelo superiores al 25 %. Cabe destacar que en las condiciones de DR-2h y DR-1h, la humedad del suelo alcanzó hasta un 60 %, reflejando el efecto de la saturación pocas horas después del riego.

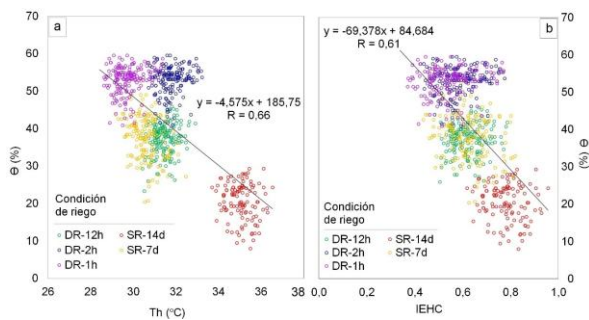
Por otro lado, la figura 17b muestra la relación entre el IEHC y la humedad del suelo, también con una tendencia negativa, aunque con una correlación ligeramente menor ($R = -0,61$). Las condiciones de riego deficitario (SR-14d) provocaron niveles de humedad inferiores al 25 %, acompañados de valores de IEHC elevados (entre 0,62y 0,96), lo que evidencia

una alta sensibilidad del cultivo de palto frente al estrés hídrico prolongado. A siete días sin riego, se tuvo un IEHC en un rango de 0,44 a 0,82, con temperaturas foliares en un rango de los 29,45 y 31,66 °C. En contraste, bajo condiciones de riego recientes (DR-12h, DR-2h y DR-1h), los valores de IEHC oscilaron entre 0,34 y 0,79, con temperaturas foliares menores a 32 °C y humedad del suelo por encima del 25 % (figura 17a). No obstante, estos resultados también revelan que el estrés no desaparece inmediatamente tras la aplicación del riego, ya que el IEHC permaneció por encima de 0,4 incluso una hora después. Esto indica que la recuperación fisiológica del cultivo no es instantánea, sino que depende del tiempo transcurrido y de la intensidad del estrés hídrico previo.

De acuerdo con López et al. (2009), el monitoreo del estado hídrico del palto debe realizarse al menos dos días después del riego para capturar adecuadamente su respuesta fisiológica. Esta recomendación es consistente con los resultados obtenidos, que muestran que el IEHC sigue siendo elevado poco después del riego. Asimismo, Schaffer et al. (2013) señalan que, al tratarse de un cultivo perenne, el palto tiende a recuperar sus condiciones fisiológicas normales entre dos y tres días después de la reanudación del riego tras un periodo de restricción hídrica.

Figura 17.

Análisis de regresión entre la humedad del suelo, las respuestas térmicas de las hojas y de estrés del cultivo en diferentes condiciones de riego.



3.3.3. IEHC y conductancia estomática

Se identificó una relación lineal inversa entre la conductancia estomática (G_s) y el Índice de Estrés Hídrico del Cultivo (IEHC) (figura 18), lo que evidencia el cierre estomático como una respuesta fisiológica frente al incremento del estrés hídrico. El análisis de regresión arrojó una pendiente de $-590,21 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ por cada unidad de IEHC en las mediciones que abarcó desde la condición de 7 días sin riego hasta 1 hora después de aplicar el riego. Esta tendencia indica que, a medida que el IEHC se incrementa, la G_s disminuye de manera progresiva,

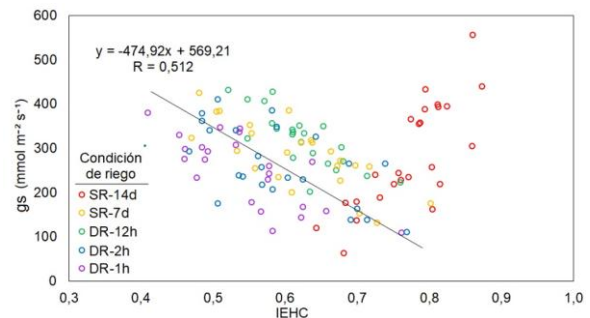
actuando como un mecanismo de regulación hídrica de la planta.

No obstante, en la condición de riego SR-14d se observaron valores de conductancia estomática (G_s) superiores a $300 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, incluso con un IEHC por encima de 0,77, lo que contradice la tendencia general. Este comportamiento anómalo coincidió con condiciones ambientales particulares: una radiación solar elevada (934 W/m^2), que superó entre un 7 % y 22 % los niveles registrados en otras fechas de monitoreo, y una velocidad promedio del viento de $0,81 \text{ m/s}$ (figura 7 y 8). Las mediciones correspondieron a árboles de la variedad Hass, ubicados en la zona central de la parcela, rodeados por vegetación densa y residuos secos en el suelo, lo cual podría haber influido en la dinámica microclimática local. Esta ubicación podría haber generado un microambiente con mayor humedad relativa o menor evaporación directa, atenuando la respuesta estomática al déficit hídrico.

El coeficiente de Pearson (R) entre IEHC y G_s fue de 0,51 (figura 18), lo que indica una relación inversa moderada y refleja cierta variabilidad en los datos. Esta variabilidad podría deberse, al menos en parte, al número limitado de repeticiones o a la influencia de factores ambientales no controlados, como el sombreado parcial por la presencia de árboles cercanos o la heterogeneidad del suelo. Bajo una humedad promedio del suelo del 20,5 %, se observaron valores de G_s que superaron los $250 \text{ mmol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, a pesar de que el IEHC se encontraba por encima de 0,68.

Figura 18.

Correlación entre la G_s y el índice IEHC en árboles de palto en respuesta a diversas condiciones de riego.



Los resultados obtenidos coinciden parcialmente con lo reportado por Zia et al. (2012), quienes encontraron una correlación más fuerte ($R = 0,6$) entre la conductancia estomática (G_s) y el IEHC, además de mayores fluctuaciones de G_s durante las horas de la mañana y el atardecer, con un ajuste lineal más marcado al mediodía. Por otro lado, Celedón et al. (2012) no observaron variaciones significativas en G_s

en cultivares de palto sometidos a déficit hídrico de hasta 13 días sin riego, indicando que el parámetro más sensible para evaluar el estado hídrico en esta especie es el potencial hídrico de las hojas.

3.3.4. Estado hídrico del cultivo de palto

Con base en variables ambientales y fisiológicas como la temperatura de la hoja (Th), la humedad del suelo y el índice de estrés hídrico del cultivo (IEHC), se definió el estado hídrico del cultivo de palto, la cual consideró la respuesta del cultivo en los estados B y D de la fase reproductiva frente a diferentes condiciones de riego, registrándose variaciones en Th y humedad del suelo asociadas a distintos niveles de estrés hídrico (IEHC). A partir de los datos obtenidos, se establecieron rangos que permiten clasificar el estado hídrico del palto en tres niveles de estrés: leve, moderado y alto (tabla 4).

Tabla 4

Definición del estado hídrico del cultivo de palto en función del nivel de estrés mediante los indicadores fisiológicos y ambientales.

Estado hídrico	IEHC	Humedad del suelo (%)	Th (°C)	Descripción
Estado hídrico óptimo	< 0,55	> 45	< 31	Baja temperatura de la hoja y alta disponibilidad de humedad en el suelo.
Estrés hídrico leve	0,55 – 0,75	25 – 45	31 – 34	Incremento de la temperatura de la hoja, humedad del suelo a capacidad de campo.
Estrés hídrico alto	> 0,75	< 25	> 34	La temperatura de la hoja se eleva y el suelo presenta baja humedad (restricciones de humedad del suelo),

La θ , la Th y el IEHC permitieron establecer umbrales para el monitoreo del estado hídrico, evidenciando la sensibilidad del palto a la disponibilidad de agua y mostrando que estos indicadores reflejan eficazmente el nivel de estrés hídrico. Si bien la conductancia estomática (Gs) muestra una disminución al aumentar el IEHC, no se utiliza como indicador para la definición del estado hídrico debido a que no muestra diferencias significativas en las diferentes condiciones de riego. Esto concuerda con los resultados obtenidos por Celedón et al. (2012) en un cultivo de paltos en la costa de Chile. En dicho estudio, luego de 13 días sin riego en un suelo franco arcilloso pesado, con solo el 20 % de la disponibilidad hídrica a 30–40 cm de profundidad, no se observaron cambios significativos en la conductancia estomática. Este resultado se atribuyó a condiciones de baja demanda evaporativa (bajo VPD). Los autores concluyeron que el palto

puede tolerar riegos deficitarios siempre que se apliquen en momentos del año con baja evaporación, como al inicio de la primavera o en otoño.

4. CONCLUSIONES

La aplicación de teledetección permitió evaluar el estado hídrico del palto y mostrar diferencias significativas entre las variedades Fuerte, Hass y Zutano bajo distintas condiciones de riego durante la fase reproductiva. El uso de técnicas de teledetección térmica facilitó la identificación de umbrales de temperatura de las hojas del cultivo, definiendo un umbral de estrés de 9,8 a 11,20 °C, y un umbral en óptimo de según ecuación 10,286-3,268VPD.

Se obtuvieron rangos de IEHC de 0,61-0,92 y de 0,44-0,82 para el palto durante periodos de 14 y 7 días sin riego, respectivamente. Posterior al riego, se registraron rangos de 0,50- 0,79, 0,44- 0,77 y 0,34-0,77 para el palto a las 12, 2 y 1 horas después del riego, respectivamente. La variación del IEHC entre variedades refleja su capacidad fisiológica de respuesta frente condiciones de baja disponibilidad de agua. La variedad ‘Zutano’, comúnmente utilizada como portainjerto, se recomienda mantener el IEHC por debajo de 0,75 para asegurar un adecuado desempeño productivo. Por su parte, las variedades ‘Hass’ y ‘Fuerte’, debido a su capacidad de recuperación, no deben superar un IEHC 0,82, con una frecuencia de riego de cada 7 días para evitar que estas variedades superen los umbrales críticos de estrés hídrico y afecten el nivel de producción.

Los resultados obtenidos permiten clasificar el estado hídrico del palto en tres aspectos: estado hídrico óptimo, estrés hídrico leve y estrés hídrico alto, en función del IEHC, la humedad volumétrica del suelo (θ) y la temperatura de la hoja (Th). Los valores bajos de IEHC (< 0,55), junto con alta humedad del suelo (> 45 %) y temperaturas foliares moderadas (< 31 °C) reflejan un buen estado hídrico del cultivo. A medida que estas condiciones cambian por el aumento de Th y la disminución de los valores de θ , se identifican situaciones de estrés leve y alto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Acosta Rangel, A. M. (2018). *Environmental stress in avocado (Persea americana Mill.): Flowering and Physiology* [Doctoral dissertation, University of California, Riverside]. <https://escholarship.org/uc/item/7gt8g45g>

- Celedón, J. M., Gil, P. M., Ferreyra, R., Maldonado, P., & Barrera, C. (2012). Sensitivity and variability of two plant water stress indicators: exploring criteria for choosing a plant monitoring method for avocado irrigation management. *Chilean Journal of Agricultural Research* 72(3). <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392012000300012>
- Espinoza-Mendoza, C. (2015). Caracterización fenológica del palto (*Persea americana*. Mill) Hass en Pichurara a 2594 msnm-Huanta. <https://repositorio.unsch.edu.pe/items/1b5d3742-c09a-4ce1-be0c-8b6e3c9100a6>
- Food and Agriculture Organization, (2023). *FAOSTAT. Crop and livestock products*, Retrieved March 24, 2023, from <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>
- 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>
- 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/view/83/82/251-1>
- Gardiazabal, F., Magdahl, C., Mena, F., & Wihelmy, C. (2003). Determinación del coeficiente de cultivo (Kc) para paltos cv, Hass en Chile. *Proceedings V World Avocado Congress, Proceedings V World Avocado Congress*, 329–334. https://www.avocadosource.com/wac5/Papers/WAC5_p329.pdf
- 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)
- 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>
- Jornada. (2024, diciembre 29). Ayacucho: La Mar y las Cabezadas lideran producción de palta. <https://jornada.com.pe/ayacucho-la-mar-y-las-cabezadas-lideran-produccion-de-palta/>
- 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>
- Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (2025). MIDAGRI. *Sistema integrado de Estadísticas Agrarias*, Power BI. https://siea.midagri.gob.pe/siea_bi/
- 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>
- López L. 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), 97–111. <https://www.redalyc.org/pdf/608/60835110.pdf>
- 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), 2775. <https://doi.org/10.3390/rs13142775>
- Ramos-Fernández, L., Gonzales-Quiquia, M., Huanqueño-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), 796. <https://doi.org/10.3390/rs16050796>
- Salgadoe, A. S. A., 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), 2972. <https://doi.org/10.3390/rs11242972>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del

Perú. (2025). SENAMHI. Sequías en Ayacucho. <https://www.senamhi.gob.pe/main.php?dp=ayacucho&p=sequias>

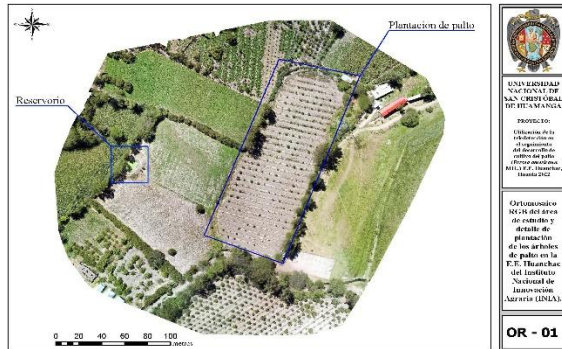
Schaffer, B., Wolstenholme, B. N., & Whiley, A. W. (Eds.). (2013). *The avocado: botany, production and uses*. CABI. <https://www.cabdigitalibrary.org/doi/abs/10.1079/9781845937010.0000>

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

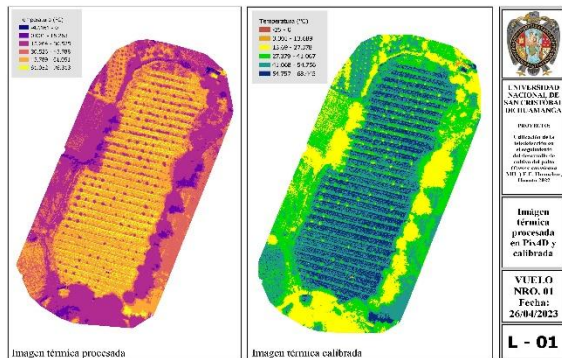
Zia, S., Du, W., Spreer, W., Spohrer, K., He, X., & Muller, J. (2012). Assessing crop water stress of winter wheat by thermography under different irrigation regimes in North China Plain. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 5(3), 24-34. <https://doi.org/10.3965/j.ijabe.20120503.003>

ANEXOS

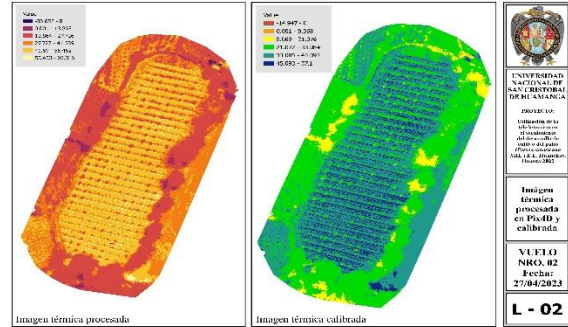
1. Imágenes aéreas RGB y térmicas



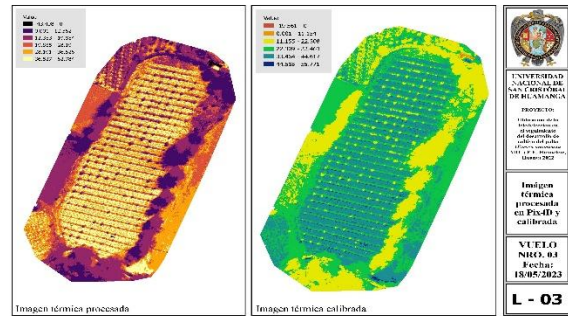
Anexo 1.1. Imagen RGB



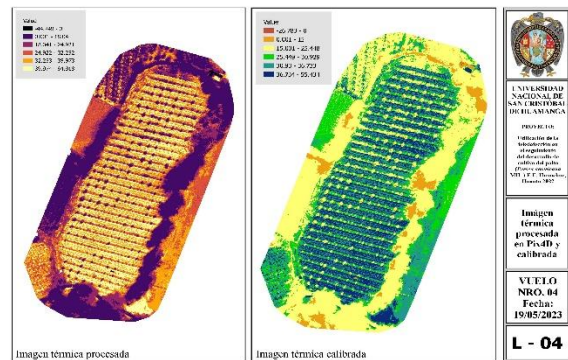
Anexo 1.2. Imagen térmica calibrada 26/04/23



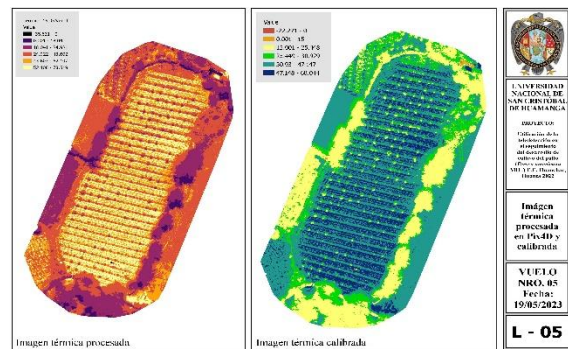
Anexo 1.3. Imagen térmica calibrada 27/04/23



Anexo 1.4. Imagen térmica calibrada 18/05/23



Anexo 1.2. Imagen térmica calibrada 19/05/23



Anexo 1.2. Imagen térmica calibrada 19/05/23

2. Guía para la determinación del índice de estrés hídrico del cultivo de palto en condiciones climáticas de la provincia de Huanta.

DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE ESTRÉS HÍDRICO DEL CULTIVO DE PALTO

El índice de estrés hídrico de cultivos (IEHC) es un indicador que se obtiene a partir de valores de temperatura de la hoja del cultivo y la temperatura ambiental, por lo que su cálculo puede implementarse fácilmente para determinar el estado hídrico de los cultivos.

Par su cálculo se recomienda lo siguiente:

1. Equipos alternativos para medir la temperatura foliar en cultivos.

Los sensores listados a continuación son opciones recomendadas actualmente disponibles para la medición en campo.

Tabla 1. Sensores térmicos recomendados para la medición de temperatura de las hojas de cultivos.

Sensor	Descripción	Precio aproximado	Imagen
Apogee SI-431	Preciso, diseñado para hojas.	\$300 - \$450	 A white cylindrical sensor mounted on a metal post. A text box above it reads: 'RESEARCH-GRADE ± 0.2 C from -30 to 65 C Multiple Fields of View'. The sensor has 'apogee' and 'ASTRO METS' printed on it.
Exergen IRT/c Series	Sensor compacto adaptado para la agricultura.	\$150 - v250	 A black cylindrical sensor with a yellow cable. The sensor has 'EXERGEN CORP Watertown, MA USA SN: 1921601' printed on it.
FLIR Lepton (Módulo térmico)	Genera imágenes térmicas.	\$200 - \$300	 A black handheld thermal imager with a color display screen showing a temperature reading of 54.3°F. The FLIR logo is visible on the device.

FieldScout Infrared Thermometer	Infrarrojo portatil	\$150 - \$300	
---------------------------------------	------------------------	---------------	--

2. Ecuación para determinar el índice de estrés hídrico de cultivos (IEHC)

La estimación del IEHC se realiza mediante la siguiente expresión matemática:

Tabla 2. Ecuaciones para determinar el índice de estrés hídrico (IEHC) de los cultivos.

Índice de estrés hídrico del cultivo	$IEHC = \frac{(Th - Ta) - (Th - Ta)_{LI}}{(Th - Ta)_{LS} - (Th - Ta)_{LI}}$ <p>IEHC varía de 0 – 1, el cultivo experimenta estrés hídrico cuando se aproxima a 1, y condiciones óptimas de riego cuando el índice se acerca a 0.</p>
El umbral de temperatura superior	$(Th - Ta)_{LS} = [9,8 - 11,20] \text{ } ^\circ\text{C}$ <p>Se puede seleccionar valores dentro de este rango; sin embargo, también se puede utilizar el promedio 10,5 °C.</p>
El umbral de temperatura inferior	$(Th - Ta)_{LI} = 10,286 - 3,268VPD.$ <p>Reemplazar con el valor del VPD, la cual se determina en base a la Ta (temperatura ambiental) y HR en un momento específico.</p>
Diferencia de presión de vapor (VPD)	$VPD = \left(0.611 \exp \left[\frac{17.27T^\circ}{T^\circ + 237.3} \right] \right) * (100 - HR)$ <p>T°: Temperatura del ambiente en °C HR: Humedad relativa en %.</p>

Es importante destacar que los umbrales de temperatura determinados en el presente estudio son aplicables únicamente al cultivo de palto bajo las condiciones climáticas y ambientales de la provincia de Huanta, así como en zonas con características climáticas similares dentro de la región de Ayacucho