

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**“EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE OLIVO (*Olea europaea*
L.) ESTIMADA DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES OBTENIDAS
DE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO”**

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

RRODY HOLIVER MACHACA PILLACA

LIMA - PERÚ

2021

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERIA AGRICOLA

**“EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO DE OLIVO (*Olea europaea L.*)
ESTIMADA DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES OBTENIDAS DE UN
VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

Presentado por:

RRODY HOLIVER MACHACA PILLACA

Sustentado y aprobado por el siguiente jurado:

Dr. NÉSTOR MONTALVO ARQUÍÑIGO
Presidente

Dra. LÍA RAMOS FERNÁNDEZ
Asesora

Dr. RAÚL ARNALDO ESPINOZA VILLAR
Miembro

Mg. Sc. CAYO LEONIDAS RAMOS TAIPE
Miembro

Dr. EDWIN MARTIN PINO VARGAS
Co-Asesor

LIMA – PERU

2021

DEDICATORIA

A mis padres Urbano Machaca Apaza y Zonia Pillaca Zarate, por su apoyo incondicional,
amor infinito y la confianza depositada.

A mis hermanos Maria Elena y Juan Mateo, que siempre me acompañaron en momentos
difíciles.

A todos mis amigos por su compañía y apoyo durante mi vida académica en la universidad
y la elaboración de la tesis.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme estar al lado de mi familia y mantenerme con vida.

A mi familia por todo el apoyo incondicional brindado.

Al proyecto de investigación “Uso de Vehículos Aéreos no Tripulados para obtener la humedad del suelo en el olivo con fines de programación de riego en tiempo real en La Yarada, Tacna, Perú”, financiado con fondos de canon, sobre canon y regalías mineras de la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohman, Tacna, Perú, proyecto a cargo del Dr. Edwin Pino Vargas, co asesor de la Tesis, gracias infinitamente por la confianza y recomendaciones dadas durante el desarrollo de la tesis.

A la Dra. Lía Ramos Fernández, asesora de la tesis, por su apoyo, confianza y consejos que permitieron la culminación de la presente investigación, y al grupo de investigación “investigación “Teledetección y cambio climático aplicado a los recursos hídricos y la agricultura” por el apoyo brindado.

Al Dr. Raúl Espinoza Villar por compartir sus conocimientos, recomendaciones y prestación de equipos.

Al PhD. Alfonso Torres por compartir sus conocimientos, recomendaciones y consejos que contribuyeron en la culminación del presente trabajo de investigación.

Al Mg. Sc. Javier Quille Mamani por compartir sus conocimientos, consejos y amistad.

A mis compañeros y amigos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, por su apoyo académico y emocional, en especial a David Quispe Tito, Camila Cruz Grimaldo, Lisette Altamirano Gutierrez, Gerardo Frisancho Larico, Nicolle Lopez Torres, Anthony Jamanca Sánchez, Jeefrey Samaniego Huayanay, Renzo Soto Ocupa, Edwar Riveros Chahuayo, Luis Pino Romero, Ruben Moreno Postigo, Angela Sánchez Palma, Rocio Nicodemos Quispe, Moises Durán Gómez y las promociones de ingreso de 2012-I, 2013-I, 2013-II y 2014-I de Ingeniería Agrícola.

ÍNDICE GENERAL

I. INTRODUCCIÓN	1
1.1. OBJETIVOS.....	2
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE BALANCE DE ENERGÍA CON IMÁGENES DE UN VANT	3
2.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN EN OLIVO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES.....	6
2.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN EN OLIVO A PARTIR DE IMÁGENES DE UN VANT.....	7
2.4. IMPACTO DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL EN LOS COMPONENTES DEL BALANCE ENERGÉTICO EN UN OLIVAR	8
III. METODOLOGÍA	10
3.1. ZONA DE ESTUDIO	10
3.2. MATERIALES Y EQUIPOS.....	12
3.3. PROCEDIMIENTO	13
3.3.1. Adquisición y procesamiento de imágenes con VANT	13
3.3.2. Calibración de imágenes multiespectrales y térmicas.....	16
3.3.3. Índices de vegetación (NDVI, SAVI, IAF) y albedo	18
3.3.4. Componentes del balance de energía	22
3.3.5. Evapotranspiración del cultivo de olivo (ETc)	24
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1. CALIBRACIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES Y TÉRMICAS.....	26
4.2. ÍNDICES DE VEGETACIÓN (NDVI, IAF, SAVI) Y ALBEDO.....	29
4.2.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	29
4.2.2. Índice de área foliar (IAF).....	30
4.3. TEMPERATURA SUPERFICIAL Y COMPONENTES DE BALANCE DE ENERGIA	35
4.3.1. Temperatura superficial (Ts).....	35
4.3.2. Componentes del balance de energía	36
4.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ETC)	44
4.4.1. Validación	48
V. CONCLUSIONES.....	52

VI. RECOMENDACIONES.....	53
VII. BIBLIOGRAFÍA.....	54
VIII. ANEXOS.....	62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Constantes empleadas en la estimación de la resistencia aerodinámica	8
Tabla 2: Materiales, equipos y herramientas computacionales	12
Tabla 3: Ecuaciones de regresión lineal y coeficiente de determinación r^2 para la calibración de bandas multiespectrales	26
Tabla 4: Ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación r^2 para la Temperatura de superficie	28
Tabla 5: Ecuaciones de regresión lineal y coeficiente de determinación r^2 para la calibración de bandas para los índices de vegetación (NDVI e IAF)	31
Tabla 6: Valores (\tilde{x} , S) de los índices de vegetación (NDVI, SAVI e IAF) y albedo, según variedades y condición de estrés	34
Tabla 7: Valores de (\tilde{x} , S) de los índices de vegetación (NDVI, SAVI e IAF) y albedo, según condición de sin estrés y con estrés	35
Tabla 8: Valores de (\tilde{x} , S) las RS_{\downarrow} , RL_{\downarrow} y RL_{\uparrow} , según condición de sin estrés y con estrés	37
Tabla 9: Selección del píxel frío y caliente en cada vuelo del VANT para los valores de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), albedo, T_s y las constantes de calibración a y b de la ecuación $dT=b+aT_s$ (Allen <i>et al.</i> , 2011).....	40
Tabla 10: Valores (\tilde{x} , S) de la T_s y los componentes del balance de energía (R_n , G, H y LE), según variedades y condición de estrés	43
Tabla 11: Valores (\tilde{x} , S) de la T_s y los componentes del balance de energía (R_n , G, H y LE), según condición de sin estrés y con estrés	44
Tabla 12: Valores (\tilde{x} , S) de la ET_c y ET_{rF} según condición de estrés y sin estrés	48
Tabla 13: Valores de ET_c y ET_{rF} según diversos investigadores	49
Tabla 14: Reducción de la productividad en un olivar adulto, en función de la salinidad del suelo expresada como CE	51
Tabla 15: Iteración para el cálculo de flujo de calor sensible (H) del 07-08-2019.....	64
Tabla 16: Iteración para el cálculo de flujo de calor de aire (H) del 06-03-2020	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de la zona de estudio.....	10
Figura 2: Vistas del campo de olivo de la zona de estudio	11
Figura 3: Distribución espacial del cultivo de olivo según variedades y condición con estrés	14
Figura 4: Distribución espacial de los puntos de control en el campo de olivo, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna	15
Figura 5: Reflectancia espectral para nueve tipos de cobertura (P1 (Pasto), P2 (suelo con humedad), P3 (Pasto), P4 (Vegetación con estrés) P5 (Vegetación muerta), P6 (Suelo seco), P7 (Roca), P8 (Superficie de color negro), P9 (Superficie de color azul)) obtenido con un espectralradiómetro modelo RAMSES en el AER-UNALM.....	16
Figura 6: Distribución espacial de la reflectancia por banda verde, roja, borde rojo y banda NIR obtenidas por la cámara multiespectral y puntos de muestreo	17
Figura 7: Equipo Green Seeker para medición del NDVI en campo	19
Figura 8: Equipo ceptómetro para medición del IAF en campo.....	20
Figura 9: Puntos de muestreo del IAF y NDVI distribuido en tres bloque del campo de olivo	21
Figura 10: Procedimiento secuencial para estimar la evapotranspiración del cultivo (ETc), mediante el modelo METRIC	25
Figura 11: Reflectancia obtenida con una cámara multiespectral SEQUOIA y un espectralradiómetro para las bandas multiespectrales: (a) rojo, (b) borde rojo, (c) verde, (d) infrarrojo cercano. Regresión lineal.....	27
Figura 12: Relación lineal del NDVI calculado con imágenes de una cámara multiespectral y un espectralradiómetro.....	28
Figura 13: Temperaturas registradas por un radiómetro y una cámara térmica FLIR (VANT). Regresión lineal	29
Figura 14: NDVI obtenido a partir de imágenes multiespectrales y el sensor Green Seeker para invierno (a) y verano (b)	29
Figura 15: IAF obtenido a partir de imágenes multiespectrales y un ceptómetro para invierno (a) y verano (b).....	30

Figura 16: Distribución espacial y diagramas de caja de los índices de vegetación NDVI(a) y SAVI(b) según variedad de olivo y condición de estrés, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	32
Figura 17: Distribución espacial y diagramas de caja del índice de vegetación IAF(a) y el albedo (d) según variedad de olivo y condición de estrés, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	33
Figura 18: Diagramas de cajas de los índices de vegetación NDVI, SAVI, e IAF y el albedo en condición de sin estrés y con estrés del cultivo de olivo del distrito La Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	35
Figura 19: Distribución espacial y diagrama de caja de la temperatura superficial (Ts) según variedad de olivo y condición de estrés del cultivo, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	36
Figura 20: Distribución espacial y diagrama de caja de los componentes de energía Rn(a) y G(b) según variedad de olivo y condición de estrés, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	38
Figura 21: Variación de la diferencia de la temperatura cerca de la superficie (dt) para la estimación de los coeficientes a y b a de la ecuación $dT=b+aT_s$ (Allen et al., 2011) en la selección del pixel frío y caliente en el cálculo de flujo de calor del aire (H).....	39
Figura 22: Imagen de la cobertura con el pixel frío y pixel caliente a partir de los índices de vegetación, albedo y temperatura superficial: (a) 07/08/2019 (invierno) y (b) 06/03/2020 (verano).....	40
Figura 23: Distribución espacial y diagrama de caja de los componentes de energía H(a) y LE (b) según variedad de olivo y condición de estrés, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna	42
Figura 24: Diagramas de caja de la temperatura de superficie (Ts) los componentes de balance de energía, en condición sin estrés y con estrés del cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	44
Figura 25: Distribución espacial de la ETc mediante el modelo METRIC (a), imagen RGB de los campos de olivo en invierno (izquierda) y verano (derecha) (b) y diagrama de caja de la ETc según variedades y condición de estrés del cultivo, por árbol (c), del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	46
Figura 26: Evapotranspiración de referencia (ETo) estimada a partir de métodos indirectos (Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Penman-Monteih, Prestley y	

Taylor, Turc y promedio de todas), de agosto 2019 a marzo 2020, en La Yarada-Los Palos (Tacna)	47
Figura 27: ETo estimada por métodos indirectos (a), ETc estimada con el modelo METRIC y rango de valores de ETc del olivo por diferentes autores (Pôças et al. (2014) (1), Paço et al. (2014) (2), Fuentes-Peñailillo et al. (2018) (3), Villalobos et al. (2000) (4) y Ramírez-Cuesta et al. (2019)(5)) (b) y valores de ETrF mediante el modelo METRIC y distintos autores(c) en La Yarada-Los palos (Tacna)	50
Figura 28: Lectura de la reflectancia en diferentes coberturas en el AER: 22 de enero del 2020 (12:00 y 1:00 pm)	62
Figura 29: Medición de la temperatura en diferentes coberturas con un radiómetro portátil en la Yarada Los Palos-Tacna: 06 de marzo del 2020 (12:00 y 2:00 pm).....	63
Figura 30: Análisis de rutina del agua de riego utilizada en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	66
Figura 31: Análisis físico-químico del agua de riego utilizada en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	67
Figura 32: Análisis de salinidad y sodicidad del suelo a una profundidad de 0 a 20 cm en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna.....	68
Figura 33: Análisis de salinidad y sodicidad del suelo a una profundidad de 20 a 40 cm en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna	69
Figura 34: Análisis de salinidad y sodicidad del suelo a una profundidad de 40 a 60 cm en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna	70
Figura 35: Análisis de salinidad y sodicidad del suelo a una profundidad de 60 a 80 cm en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna	71

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO	62
ANEXO 2: FLUJO DE CALOR SENSIBLE (H)	64
ANEXO 3: ANÁLISIS DEL AGUA DE RIEGO Y SUELO	66

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

ANN	Neuronales artificiales
CE	Conductividad eléctrica
dT	Diferencia de temperatura del aire
DTD	Diferencia de temperatura dual
EC	Edy Covarianza
EF	Fracción Evaporativa
EMC	Error medio Cuadrático
ET	Evapotranspiración
ETc	Evapotranspiración real o del cultivo
ETo	Evapotranspiración de referencia
ETrF	Fracción de evapotranspiración
G	Flujo de calor del suelo
H	Flujo de calor sensible
IAF	Índice de área foliar
Kc	Coefficiente de cultivo estándar
LE	Flujo de calor latente
METRIC	Mapeo de la evapotranspiración a alta resolución con calibración internalizada
ML	Machine learning
NDVI	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada
ND	Número Digital
RL↑	Radiación de onda larga saliente
RL↓	Radiación de onda larga entrante
RMSE	Raíz del error cuadrático medio
Rn	Radiación neta
Rs↓	Radiación de onda corta entrante
SAVI	Índice de vegetación ajustado al suelo
SEB	Componentes del balance de energía
SEBAL	Algoritmo de balance de energía superficial para tierra
Ta	Temperatura del aire
Tc	Temperatura del canopy
Ts	Temperatura de la superficie terrestre
Tscaliente	Temperatura superficial caliente
TSEB	Balance de energía de dos fuentes
Tsfri	Temperatura superficial fría

Tss	Temperatura del suelo
u	Velocidad del viento
u *	Velocidad de fricción
u200	Velocidad del viento a una altura de mezcla de 200 m
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado
z1 y z2	Alturas por encima del desplazamiento de la vegetación en el plano cero. k
zom	Longitud de la rugosidad del momento
α	Albedo de la superficie
ϵ_0	Emisividad térmica superficial
τ	Transmisividad atmosférica

RESUMEN

El uso de técnicas de la teledetección mediante el vehículo aéreo no tripulado (VANT) para la estimación de la evapotranspiración de cultivo de olivo (*Olea europaea L.*) en la costa del Perú, han sido discutidos en el presente estudio. El experimento tuvo como objetivo estimar la evapotranspiración del cultivo de olivo mediante el modelo METRIC, a partir del uso de imágenes multiespectrales e imágenes térmicas montadas en un VANT multirrotor, las cuales fueron calibradas en campo mediante el uso de un espectroradiómetro y radiómetro portátil respectivamente, como también, la calibración de los índices de vegetación NDVI e IAF, a partir de información de un Green Seeker y ceptómetro, para una densidad de plantación de 200 olivos has^{-1} . Se obtuvo valores de mediana en la ETc de 2,868 a 2,942 mm d^{-1} y 4,021 a 4,533 mm d^{-1} en invierno (floración) y verano (maduración) respectivamente, no existiendo diferencia significativa entre variedades de olivo; y valores de mediana de ETrF de 1 a 1,23 ligeramente más alto en invierno, debido a un manejo de riego diario durante todo el año, para evitar tensiones abióticas generadas por las sales del agua y suelo.

Palabras clave: Cultivo de olivo, evapotranspiración del cultivo, teledetección, METRIC, balance de energía.

ABSTRACT

The use of remote sensing techniques by means of the unmanned aerial vehicle (UAV) for the estimation of the evapotranspiration of olive cultivation (*Olea europaea L.*) in the coast of Peru, have been discussed in the present study. The objective of the experiment was to estimate the evapotranspiration of the olive cultivation by means of the METRIC model, from the use of multispectral images and thermal images mounted on a multicopter UAV, which were calibrated in the field by using a portable spectroradiometer and radiometer respectively. as well as the calibration of the NDVI and IAF vegetation indices, based on information from a Green Seeker and ceptometer, for a plantation density of 200 olive trees has-1. Median values in ETc of 2,868 to 2,942 mm d⁻¹ and 4,021 to 4.533 mm d⁻¹ were obtained in winter (flowering) and summer (maturation) respectively, there being no significant difference between olive varieties; and median ETrF values of 1 to 1.23 slightly higher in winter, due to daily irrigation management throughout the year, to avoid abiotic stresses generated by water and soil salts.

Keywords: Olive cultivation, crop evapotranspiration, remote sensing, METRIC, energy balance.

I. INTRODUCCIÓN

Ante la escasez del agua, se requiere una mejor gestión del agua y prácticas de riego optimizadas en términos de cuantificación de las necesidades hídricas del cultivo, importantes para el manejo del riego. Los requerimientos de riego deben compensar las pérdidas de agua debido a la evapotranspiración (ET), que alberga la transpiración de la planta y la evaporación del suelo. La evapotranspiración requiere de diferentes variables climáticas como la temperatura del aire, velocidad de viento, radiación solar y humedad relativa, además de parámetros del cultivo como la altura de la vegetación, estado del cultivo, densidad, entre otras.

Existen diversos métodos para la estimación del ET, como los métodos de campo basados en el balance hídrico del suelo, empleando lisímetros y los métodos basados en el balance energético superficial con el apoyo de técnicas de teledetección (Ramírez-Cuesta *et al.*, 2019), siendo estos últimos, útiles para explicar la variabilidad espacial de la ET. Los métodos de campo brindan información de la evapotranspiración de forma continua y casi completamente automatizadas, sin embargo, presentan inconvenientes debido a un alto costo de instalación, que representan valores puntuales de la evapotranspiración (Niu *et al.*, 2020); en cambio la teledetección, emplea técnicas que son más económicas, debido a que abarcan una mayor área de medición. Las técnicas que emplea la teledetección son más económicas, debido a que abarca una mayor área de monitoreo, obteniendo información de manera espacial de la ET. Los investigadores están interesados en el potencial de las plataformas de teledetección; sin embargo, la principal limitación de las plataformas satelitales actuales para su aplicación práctica en el manejo del riego, son la falta de resolución espacial fina y datos en tiempo real en las escalas de campo y subcampo, que es clave para la aplicación del manejo específico; generando incertidumbre en la cuantificación de ciertas variables en la ecuación del balance energético (Ortega-Farias *et al.*, 2016); en cambio, el uso de imágenes de muy alta resolución proporciona información espacial más detallada de la ET, permitiendo una óptima gestión del campo y asesoramiento a través de la identificación de

áreas dentro de la parcela con diferentes características. Existen dos tipos de plataformas VANT en el mercado, las de alas fijas, que generalmente pueden volar más tiempo (2 horas) con una carga mayor, utilizados en campos con mayores dimensiones, y los multirrotor, utilizados en campos pequeños de menor dimensión, que son adecuados para misiones de vuelo corto (hasta 30 minutos). Las estimaciones de la ET a partir de imágenes de un VANT, emplean algunos de los métodos de balance de energía, como: el balance de energía superficial para tierra (SEBAL), el mapeo de la evapotranspiración a alta resolución con calibración internalizada (METRIC), el balance de energía de dos fuentes (TSEB) o la diferencia de temperatura dual (DTD), a las que se incorporan nuevas técnicas de procesamiento como las redes neuronales artificiales (ANN), machine learning (ML) o deep learning (DL), (Niu *et al.*, 2020).

1.1. OBJETIVOS

Estimar la evapotranspiración del cultivo de olivo (*Olea europaea L.*) por balance de energía con el modelo METRIC mediante el uso de imágenes multiespectrales de un vehículo aéreo no tripulado. Esto se logrará a través de los siguientes objetivos específicos:

- Calibrar las imágenes multiespectrales y térmicas con información de un espectroradiómetro y un radiómetro.
- Obtener el índice de área foliar (IAF) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) a partir de imágenes multiespectrales ajustadas con información de un ceptómetro y Green Seeker.
- Estimar la radiación neta, el flujo de calor del suelo, el flujo de calor latente y el flujo de calor sensible.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. EVAPOTRANSPIRACIÓN A PARTIR DE BALANCE DE ENERGÍA CON IMÁGENES DE UN VANT

En el modelo Algoritmo de balance de energía superficial para tierra (SEBAL), el flujo de calor del suelo (G) es estimado en función del albedo de la superficie (α), el índice de vegetación y la temperatura de la superficie terrestre (T_s), que depende de la ecuación empírica desarrollada por Bastiaanssen *et al.*, citado por Niu *et al.* (2020). Esta ecuación se desarrolló para regiones mediterráneas; por tanto, se tendrá diferentes resultados según la condición climática de la zona. Para el modelo SEBAL, se miden dos temperaturas de referencia del aire; una temperatura se mide a la altura h_1 cerca de la superficie, y la otra se mide a una altura superior h_2 . En el cálculo de dT para cada píxel, SEBAL asume que existe una relación lineal entre dT y T_s como (Allen *et al.*, 2011):

$$dT = a + bT_s \quad (1)$$

Dónde a y b son parámetros derivados empíricamente basados en píxeles fríos y calientes extremos, que definen el límite del flujo de calor sensible (H). El píxel frío generalmente se selecciona de un área bien regada sin estrés hídrico. El H se supone que es mínimo y la ET debe ser máximo. El píxel caliente se toma de un campo seco y desnudo donde el H es máximo y la ET es casi cero. Los píxeles calientes y fríos generalmente se seleccionan mediante un método empírico. Las desventajas al usar este método, es que a la hora de seleccionar los píxeles fríos o calientes se hace de manera subjetiva que podría dar variaciones en la estimación de la ET. Pero hay varias ventajas a la hora de usar SEBAL, como, por ejemplo, no necesita muchos datos en tierra, tiene corrección interna automática y cada imagen tiene una calibración interna.

Ortega-Farias *et al.* (2016) implementaron un algoritmo de balance energético para estimar los componentes de balance de energía en un olivar a partir de imágenes de alta resolución espacial. Los resultados del experimento mostraron que el algoritmo estima el flujo de calor

latente (LE) y el flujo de calor sensible (H) con errores del 7% y 5%, respectivamente, demostrando que el VANT podría utilizarse como una excelente plataforma para evaluar la variabilidad espacial de la ET en un olivar.

El modelo Mapeo de la evapotranspiración a alta resolución con calibración internalizada (METRIC), es originalmente un modelo de procesamiento de imágenes satelitales para estimar la ET como un residuo del balance energético, que se basa en SEBAL. METRIC puede generar mapas de la ET con una resolución espacial de 30 x 30 m; tiene un proceso de autocalibración que contiene la ET de referencia horaria en tierra y la selección de píxeles fríos y calientes, eliminando la necesidad de calibrar la temperatura superficial absoluta (Allen *et al.*, 2007). Según Niu *et al.* (2020) existen tres diferencias entre SEBAL y METRIC: (i) para el píxel frío, MÉTRIC no considera el H (valor cero), y en su lugar aplica un balance de agua del suelo superficial para establecer la ET como 1,05 veces la evapotranspiración de referencia (ET_o) en píxeles fríos. (ii) en METRIC, los píxeles fríos se seleccionan en entornos agrícolas en lugar de características biofísicas. Y (iii) la extrapolación de la ET instantánea se basa en la ET_o en lugar de la fracción evaporativa real. Para el balance energético de una fuente, la ET se obtiene a partir de la radiación neta (R_n), que se calcula sumando la radiación entrante y restando la saliente formulándose la siguiente ecuación:

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \varepsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (2)$$

Dónde $R_{s\downarrow}$ es la radiación de onda corta entrante (Wm^{-2}); α es el albedo superficial; $R_{L\downarrow}$ y $R_{L\uparrow}$ son la radiación de onda larga entrante (Wm^{-2}) y radiación de onda larga saliente (Wm^{-2}), respectivamente. El H (Wm^{-2}) se calcula a partir de la rugosidad de la superficie, la velocidad del viento y los rangos de temperatura:

$$H = \rho_{air} C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (3)$$

Dónde ρ_{air} es la densidad del aire, C_p es la capacidad de calor específico del aire su valor equivale $1004 J Kg^{-1} K^{-1}$, dT es la diferencia de temperatura entre dos alturas y r_{ah} es la resistencia aerodinámica (sm^{-1}) entre dos alturas superficiales, que se calcula utilizando la velocidad del viento, el índice de área foliar (IAF) o el Índice de Vegetación de Diferencia

Normalizada (NDVI), y una corrección de estabilidad iterativa, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$r_{ah} = \frac{\ln\left(\frac{z_2}{z_1}\right)}{u * k} \quad (4)$$

Dónde z_1 y z_2 son alturas por encima del desplazamiento de la vegetación en el plano cero. k es la constante de Von Karman (0,41), u^* es la velocidad de fricción (ms^{-1}), que se calcula con:

$$u * = \frac{ku_{200}}{\ln\left(\frac{200}{z_{om}}\right)} \quad (5)$$

Dónde u_{200} es la velocidad del viento a una altura de mezcla de 200 m, y z_{om} es la longitud de la rugosidad del momento (m). La diferencia de temperatura entre el aire y la superficie está representada por dT como se indicó en la ecuación (1). Los flujos de calor sensible para los píxeles fríos y calientes se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$LE = R_n - G - H \quad (6)$$

Al seleccionar los puntos de anclaje (píxel frío y píxel caliente), se define las condiciones límites para el equilibrio energético. De acuerdo con Tasumi *et al.* (2005), para el píxel frío, la relación LE y ET_c se supone que es 1,05. Sin embargo, esta suposición no siempre es cierta al comienzo o fuera de la temporada de crecimiento cuando la vegetación es mucho menor que la alfalfa. Por lo tanto, las proporciones de LE y ET_c para el píxel frío y calientes son calculados a partir del NDVI. Entonces la dT y la T_s para el píxel frío y caliente en la ecuación (1) se calcula como:

$$a = \frac{dT_{caliente} - dT_{fria}}{T_{scaliente} - T_{sfria}} \quad (7)$$

$$b = \frac{dT_{caliente} - a}{T_{scaliente}} \quad (8)$$

Dónde $T_{scaliente}$ y T_{sfria} son la temperatura de la superficie terrestre en Kelvin (K) en los píxeles calientes y fríos, respectivamente.

METRIC está diseñado para usar imágenes de satélite como entrada, pero haciendo ajustes en función a las imágenes de un VANT. Existe un modelo modificado de METRIC de alta resolución, para utilizar las imágenes de alta resolución de los VANT. Según Allen *et al.* (2007) y Hardin y Jensen. (2011), METRIC recomiendan seleccionar píxeles fríos en un lugar homogéneo y bien regado donde el rango del NDVI sea de 0,76 a 0,84 y el rango de α sea de 0,18 a 0,24. Los píxeles calientes se deben seleccionar suelo seco homogéneo y desnudo con NDVI inferior a 0,2. Se recomienda que el α para píxeles calientes sea de 0,17 a 0,23. METRIC y METRIC-HR tienen un rendimiento similar, con un coeficiente de correlación de 0,9. Las imágenes de mayor resolución en el modelo METRIC-HR tienen mayor rendimiento en áreas mixtas, sin embargo, las cámaras necesitan una calibración adicional para relacionar la respuesta espectral con los modelos METRIC-HR.

2.2. EVAPOTRANSPIRACIÓN EN OLIVO A PARTIR DE IMÁGENES SATELITALES

Los olivos muestran un importante control estomático, que se demuestra con un ajuste del ETrF durante la parte del día en el que era mayor, el déficit de presión de vapor (Paço *et al.*, 2014); por lo tanto, cuando el déficit de presión de vapor era mayor, el paso de ET_{inst} a ET diaria (ET_{24}) se basó en una fracción de evaporación (EF), según la ecuación propuesta por Allen *et al.* (2007):

$$ET_{24} = EF(R_n - G)_{24}, \quad (9)$$

Con $(R_n - G)_{24}$ correspondiente a períodos de 24 h de R_n y G , y EF se calcula como la relación entre ET_{inst} y la diferencia $R_n - G$, entonces $EF = ET_{inst} / (R_n - G)$. El uso de EF para las imágenes de satélite del período de mitad de temporada proporcionó un ajuste apropiado para la ETrF real diaria y la ET diaria.

En teoría, los modelos de dos fuentes como TSEB, permiten diferenciar los componentes del suelo y la vegetación en el cálculo del balance energético, funcionan mejor que los modelos de una fuente, en cultivos leñosos discontinuos. Sin embargo, los datos necesarios para parametrizar y aplicar TSEB a menudo no están fácilmente disponibles.

El $ETrF_{inst}$ se usa comúnmente para convertir la ET_{inst} a mayor periodo de tiempo. Se ha

demostrado que esta suposición es válida para cultivos agrícolas desarrollados para maximizar la fotosíntesis y la conductancia estomática. Sin embargo, los olivos muestran un importante control estomático. La fracción de evaporación (FE) se calcula como la relación entre ET_{inst} y la diferencia $R_n - G$, por lo tanto, $FE = ET_{inst} / (R_n - G)$. El uso de la FE en las imágenes de satélite de la mitad de temporada, proporciona un ajuste para la ET diaria real y la ETrF diaria.

2.3. EVAPOTRANSPIRACIÓN EN OLIVO A PARTIR DE IMÁGENES DE UN VANT

Las principales limitaciones de las plataformas satelitales actuales para su aplicación práctica en el manejo del riego, son la falta de resolución espacial fina y datos en tiempo real en las escalas de campo y subcampo, que es clave para la aplicación del manejo específico del sitio. A la falta de ellos se introduce incertidumbre en la cuantificación de ciertas variables en la ecuación del balance energético; teniendo esto en cuenta, se observó que los sensores remotos ópticos modernos a bordo de un VANT proporcionan imágenes de alta resolución espacial que se pueden utilizar como entradas en los algoritmos del balance de energía, para estimar la variabilidad de los componentes del balance energético (Ortega-Farias *et al.*, 2016).

Ortega-Farias *et al.* (2016) obtuvieron la ETc de olivo (*CV. Arbequina*) empleando imágenes de un VANT multirrotor, equipado con cámaras multiespectrales e infrarrojos térmicos, colectando información de los componentes del balance energético y variables climáticas en el Valle Pehuenhue, Chile, con clima semiárido mediterráneo, alta densidad de plantación (5,0 x 1,5 m) con un sistema triangular de setos, suelo franco arcilloso, con densidad aparente de $1,54 \text{ g cm}^{-3}$, humedad a capacidad de campo y punto de marchitez de 0,33 y $0,19 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente y torre de flujo (Edy covarianza) de 5,5 m de altura. Estimaron la ET a partir de balance energético de dos fuentes en un olivar con estrés hídrico moderado durante el período de estudio. En la estimación de la resistencia aerodinámica por balance de energía, las constantes empleadas se detallan en la Tabla 1.

Tabla 1: Constantes empleadas en la estimación de la resistencia aerodinámica

Símbolo	Descripción	Valor
n	Coefficiente de decaimiento de difusión de remolinos	2,5
x	Altura de referencia	5,5 m
h	Altura de dosel	3,2 m
d	Altura de desplazamiento (0.63 x h)	2,02 m
Zom	Longitud de rugosidad del cultivo (0.05 x h)	0,16 m
Zo	Longitud de rugosidad del suelo desnudo (0.1 x Zom)	0,016 m
k	Constante de Von Karman	0,41

FUENTE: Ortega-Farias *et al.* (2016)

2.4. IMPACTO DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL EN LOS COMPONENTES DEL BALANCE ENERGÉTICO EN UN OLIVAR

Las recientes mejoras en los sensores utilizados para adquirir imágenes de superficies terrestres han hecho posible evaluar el rendimiento de los modelos de balance energético utilizando altas resoluciones de imágenes. Ramírez-Cuesta *et al.* (2019), utilizaron imágenes de alta resolución espacial en sistemas agrícolas heterogéneos como el olivo, para evaluar el efecto causado por la agregación en tamaños de píxeles más gruesos.

Ramírez-Cuesta *et al.* (2019) analizaron imágenes de satélite a resolución de 30, 60 y 100 m, con colección de imágenes con una cámara hiperespectral y térmica instalada en un avión Cessna C172S, sobre un campo de olivo con 30% de factor de cobertura, ubicada entre Córdoba, Málaga y Sevilla (España), con clima mediterráneo. La cámara hiperespectral usada fue un modelo Micro-Hyperspec VNIR con región espectral de 400 - 885 nm, 260 bandas, intervalo de muestreo de 1,85 nm, resolución radiométrica de 12 bits y tamaño de pixel de 40 cm; y para la cámara térmica, modelo FLIR SC655, con región espectral de 7,5 - 13 μ m, distancia óptica focal de 13,1 mm y 50 cm de resolución de píxeles. El 30% del campo recibió agua de riego, y el resto estuvo bajo condiciones de secano. Obtuvieron que la R_n , G, emisividad térmica superficial (ϵ_0) y α , mostraron un comportamiento casi insensible a la escala; pero el H y LE a resoluciones < 30 m, dió diferencias < 2%, mientras que las diferencias alcanzaron el 24% para H y 15% para LE en resoluciones espaciales más gruesas. Los resultados encontrados revelan que los parámetros de rugosidad de la superficie, heterogeneidad del terreno, variaciones en la T_s , características de uso del suelo, y el comportamiento no lineal de la estabilidad atmosférica, podrían ser las principales fuentes

de estas diferencias.

Ramírez-Cuesta *et al.* (2019) indican que la obtención de la ETc a partir de imágenes de satélite como MODIS (resolución espacial 1000 m) podrían generar diferencias hasta de un 23% en comparación con satélites Landsat (30 m); sin embargo, la mayor resolución temporal de estos satélites podría contrarrestar estas diferencias, lo que permite un seguimiento más continuo del estado hídrico de los cultivos.

Las imágenes de un VANT suelen tener una mayor homogeneidad radiométrica que las imágenes de aviones o satélites debido a la menor altura de vuelo. Se debe considerar lo siguiente: (i) la posición de la cámara en el VANT puede ser diferente para cada misión de vuelo, lo que causa una resolución espacial diferente o ángulos de visión diferentes; (ii) los efectos de la función de distribución de reflectancia bidireccional, este efecto es relativamente uniforme en satélites porque cubre una amplia región en un solo cuadro. Sin embargo, esta simplificación no es válida para plataformas VANT, equipadas con un sistema de imágenes con un amplio campo de visión. Por ello las cámaras deben diseñarse solo para las bandas necesarias, reduciendo costos. La disponibilidad de plataformas VANT de bajo costo y cámaras especializadas también hará que la aplicación de los VANT, en la estimación de ET sea más competitiva.

Cada modelo de estimación de la ET tiene sus ventajas y desventajas, pero ningún método existente puede satisfacer completamente los requisitos espaciales, temporales, espectrales y de precisión. Por lo tanto, se requieren métodos o modelos innovadores para la estimación de la ET.

III. METODOLOGÍA

3.1. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio de la investigación se desarrolló en un campo de olivo de 3,19 has, ubicada en el distrito de La Yarada Los Palos, provincia Tacna y región de Tacna, con coordenadas geográficas de latitud: 18°10'55,37" S, longitud: 70°31'52,17"O, la cual se observa en la Figura 1. La zona tiene un clima húmedo en invierno, donde abundan neblinas o camanchacas, y semicálido el resto del año, con temperatura promedio en los meses de febrero y julio de 24,6 °C máxima y 13,6 °C mínima.

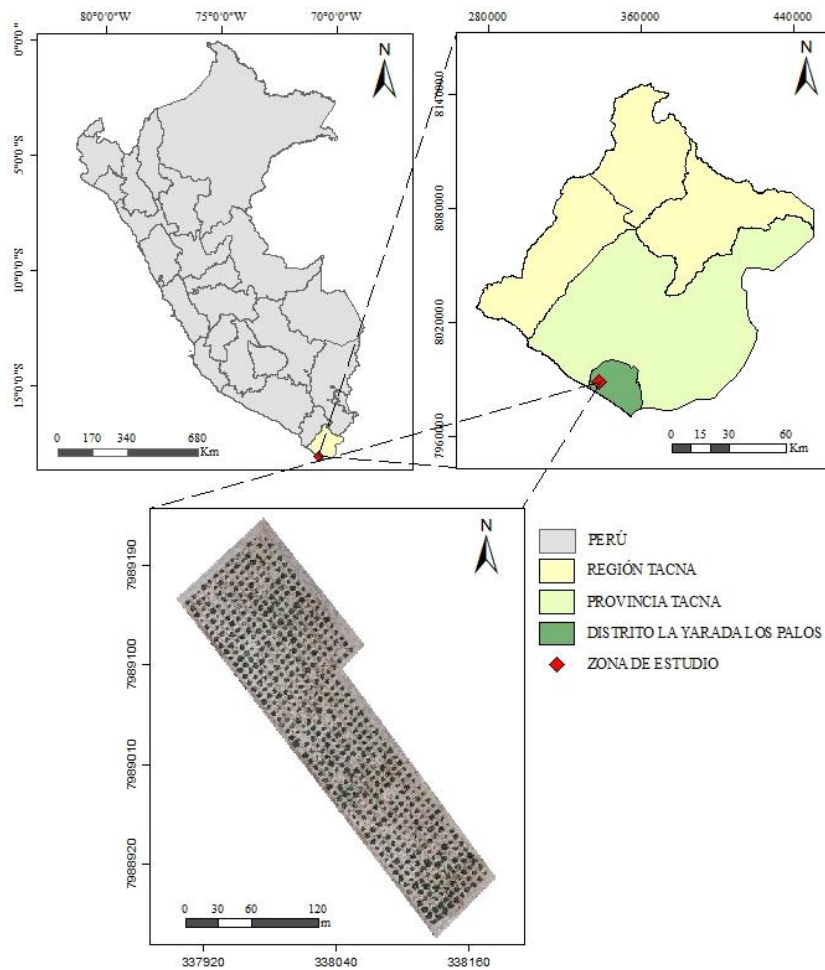


Figura 1: Ubicación de la zona de estudio

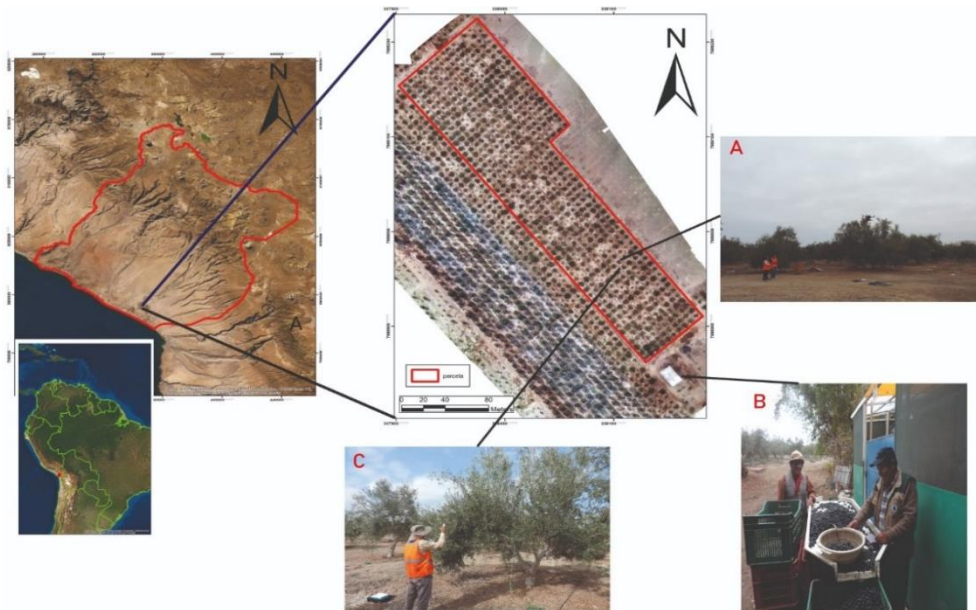


Figura 2: Vistas del campo de olivo de la zona de estudio

Las precipitaciones son prácticamente nulas, típico comportamiento de regiones desérticas, con precipitación media acumulada anual de 33,4 mm, por lo cual es considerada una región con escasas lluvias y de clima seco (esta zona forma parte del desierto de Atacama) (Pino *et al.*, 2019); se encuentra dividida en 3 parcelas, que contienen 580 árboles con una edad promedio de 22 años, con variedad sevillana en un 96% y un 4% de variedad ascolana (árboles polinizadores), con una densidad de 200 plantas/has, un marco de plantación de 7x7m, con dos líneas de goteo, una distancia entre goteros de 0,40 m con un caudal de 1,5 l h⁻¹ y presión de 0,5-1,0 bar. Se dispuso de información de una estación meteorológica tipo Davis Vantage en la Yarada, con ubicación en coordenadas geográficas latitud: 18°15'33,98" S, longitud: 70°24'00,02"O. El agua de riego obtuvo un pH de 7,13 y una conductividad eléctrica de 1,35 dS m⁻¹, con clasificación C3S3, lo que indica una alta salinidad. Se realizó una pequeña calicata de 1x1m y una profundidad de 0.8 m, tomando muestras cada 20 cm, y luego del análisis, se obtuvo texturas: franco arenoso, arena franca, arena y arena franca, con una conductividad eléctrica (dS m⁻¹) de 4,66, 3,43, 2,88 y 2,37, un pH de 7,74, 7,95, 7,28 y 7,02, respectivamente, con densidad aparente promedio de 1,65 g cm⁻³, la humedad gravimétrica a capacidad de campo y punto de marchitez fue de 11,03 y 5,31 g g⁻¹. Es de mencionar que se realizó poda sanitaria del cultivo para evitar plaga del barrenillo, que podría ocasionar problemas de estrés; debido a un agua de riego con problemas de salinidad y problemas de sales en el suelo, se mantiene un riego diario durante todo el año.

3.2. MATERIALES Y EQUIPOS

Los materiales, equipos y software empleados en el estudio, para el trabajo de campo y gabinete en el procesamiento de imágenes y análisis de resultados se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Materiales, equipos y herramientas computacionales

Equipos	Características técnicas	Uso-aplicación
Vehículo aéreo no tripulado	Modelo Matrice 210, marca DJI.	Transportar los distintos tipos de cámaras y sensores que permiten la obtención de distintos tipos de imágenes o fotografías.
Cámara termográfica	Modelo R640, marca FLIR VUE PRO.	Permitió la captura de imágenes térmicas y ópticas (RGB, TIF y radiométrica) con lentes de 13 mm y una frecuencia de 30 Hz para registrar mediciones de temperaturas en un rango de 7,5-13,5 μm , con una precisión de $\pm 5^\circ\text{C}$
Cámara multispectral	Modelo Parrot - Sequoia, Marca Parrot.	Permitió la captura de imágenes multispectrales en bandas verde (530-570 nm), rojo (640-680 nm), borde rojo (730-740 nm) e infrarrojo cercano (770-810 nm)
Espectro-radiómetro	Modelo TriOs- Ramses, Marca TriOS.	Permitió obtener la reflectancia espectral, para la calibración de imágenes multispectrales.
Radiómetro infrarrojo de mano	Modelo MI-210, Marca Apogee.	Permitió obtener datos de temperatura para la calibración de imágenes térmicas.
Ceptómetro	Modelo LP-80, Marca Accupar.	Permitió medir datos del índice de área foliar (IAF) del cultivo de olivo, para su posterior calibración.
Green Seeker	Modelo Green Seeker-Marca Trimble.	Permitió medir el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), para su posterior calibración.
Estación Geodésica (RTK)	Marca Topcon, modelo Hiper SR.	Permitió la colocación de puntos de control con mayor precisión.
Software	Características técnicas	Uso-aplicación
Pix4D	Software de fotogrametría profesional.	Permitió la generación de ortomosaicos, a partir de las fotos obtenidos por las cámaras instaladas en el VANT.
ArcGis 10.3	Software de sistema de información geográfica.	Se utilizó en el procesamiento de los ortomosaicos de las imágenes térmica y multispectrales, para el modelo de estimación del Etc.
Matlab 2015	Software matemático, que posee un lenguaje de programación propio.	Permitió la representación gráfica de los resultados.
Jupyter Notebook	Aplicativo perteneciente al proyecto Jupyter, que utiliza el lenguaje de programación Python.	Permitió el análisis de la selección de grupos para determinar el pixel frío y caliente.
Rstudio	IDE (entorno de desarrollo integrado que utiliza el lenguaje de programación R.	Permitió el análisis estadístico de los resultados obtenidos del proceso.
Materiales	Características	Uso-aplicación
Tubos y codos de PVC	Diámetro de 1/2 " , de un 1m de longitud.	Se utilizó para la creación de marcos, para tomar datos de temperaturas en diferentes superficies.
Escalera	Escalera tipo tijera de 1,83 m de 6 peldaños.	se utilizó en la toma de datos con el Green Seeker

3.3. PROCEDIMIENTO

3.3.1. Adquisición y procesamiento de imágenes con VANT

Los planes de vuelo para la VANT se elaboraron mediante la aplicación DJI Gsp Pro, a una velocidad de 6,3 m/s, una altura de 85 m, un traslape frontal de 85 % y lateral de 80%, para ambos vuelos, resultando una distancia entre líneas de vuelo de 26,26 m y dimensiones de 5472 x 3648, 1280 x 960, y 640 x 512, pixeles para imagen RGB, multiespectral y térmica, respectivamente. El vuelo se realizó en un horario cercano al medio día entre las 12:00 pm a 1:00 pm. Niu *et al.* (2020) indican que la calibración de imágenes multiespectrales, que para minimizar el efecto de sombreado se vuela al mediodía con condiciones de cielo despejado. Se estimó la altura de vuelo en función al área de estudio y tiempo de vida de la batería, una altura baja con la misma cámara, significa una menor distancia para la muestra del suelo y resultados detallados, pero conlleva más tiempo y mayor consumo de la batería para captar la misma área. Se realizaron pruebas de vuelo a distintas alturas 50, 80 y 100 m, a una misma velocidad de 6 m/s, observando que entre los 80 m y 100 m de altura se obtuvo una buena resolución que permite mapear un área mayor en menor tiempo.

Se realizó dos fechas de vuelo; la toma de imágenes en el primer vuelo (7 de agosto del 2019) se realizó en la temporada de invierno donde el clima es húmedo, el cultivo se encontraba etapa de floración, el segundo vuelo (6 de marzo del 2020) se llevó a cabo en la temporada de verano, el cultivo se hallaba en etapa de fructificación y llenado de fruto, la duración de temporada es durante todo el año. En la Figura 3 se puede visualizar la distribución de las variedades de olivo (sevillana y ascolana), como arboles sometidos a estrés.

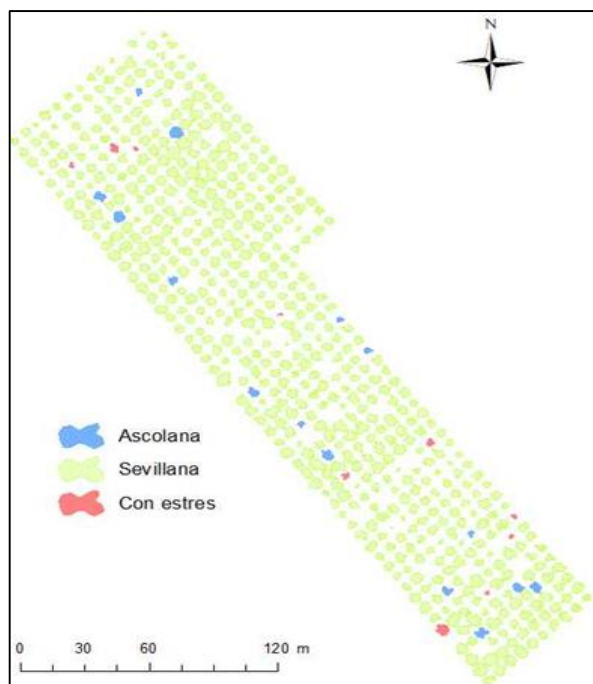


Figura 3: Distribución espacial del cultivo de olivo según variedades y condición con estrés

a. Puntos de control terrestre o Ground Control Points (GCP)

Los GCP se obtienen mediante tecnología de posicionamiento por satélites, con equipos GNSS, que ayudan en la precisión de los resultados (Costales, A., 2018), porque permiten georreferenciar las zonas de estudio. Ruzgienè *et al.* (2015) recomiendan que la cantidad de GCP no sea menor a 5 puntos distribuidos uniformemente.

En el estudio, la medición de puntos de control se realizó con una estación (RTK), marca Topcon, modelo Hiper SR, 8 puntos de control en campo, identificados con placas de aluminio, que ayudaran en la georreferenciación de imágenes RGB, multiespectrales y térmicas. Los puntos se colocaron en el camino a los límites de las parcelas, por lo que se identificaron rápidamente en las imágenes. El proceso de georreferenciación se realizó con el software Pix4D obteniendo un error medio cuadrático (EMC) de 0,025 en las imágenes analizadas. En la Figura 4 se observa la distribución de puntos de control en el campo de olivo.

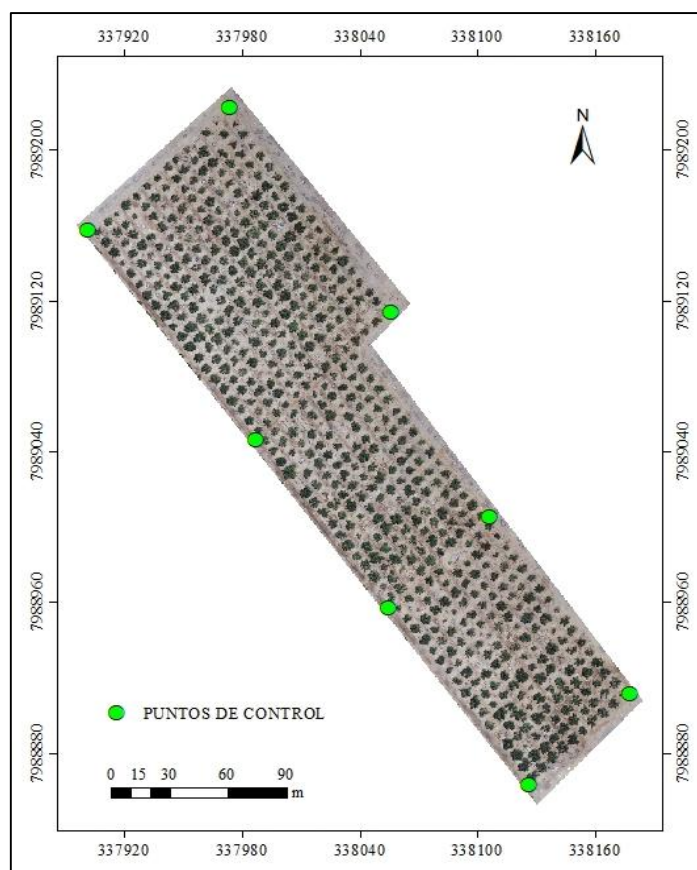


Figura 4: Distribución espacial de los puntos de control en el campo de olivo, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna

b. Calibración radiométrica

Las cámaras multiespectrales captan imágenes a escalas de grises, que son principalmente matrices de números digitales (ND), cada pixel contiene un ND correspondiente a la intensidad de la radiación dentro de una determinada longitud de onda, la cual es información relativa. Para lograr la precisión radiométrica, es necesario tener un punto de reflectancia conocido, la reflectancia de línea base y los cambios de iluminación durante el vuelo. La calibración radiométrica en el presente estudio, se realizó mediante el panel de calibración AIRINOV, capturándose imágenes del panel, antes de la ejecución del vuelo, esto permitió asignar valores de reflectancias conocidos a los pixeles (Quille *et al.*, 2021), mientras que el sensor de luz incidente, posicionado en la parte superior del VANT, se orientó hacia arriba, para registrar información sobre las condiciones de iluminación durante todo el vuelo, almacenándose en el metadato de cada imagen, información que posteriormente se empleó en la calibración radiométrica, mejorando de esta forma los datos obtenidos. Las imágenes RGB, multiespectrales y térmicas fueron procesadas en el software Pix4D para la formación de ortomosaicos. Se obtuvo pixeles de 2,4 x 2,4 cm para el sensor RGB, 9,2 x 9,2 cm para

el sensor multispectral y 11,8 x 11,8 cm para el sensor térmico, se uniformizaron las imágenes a píxeles de 12 x 12 cm para poder realizar el procedimiento.

3.3.2. Calibración de imágenes multispectrales y térmicas

a. Imágenes multispectrales

La información colectada con la cámara Parrot Sequoia tuvo una calibración radiométrica por el panel de calibración y sensor de luz (ítem 3.3.2b), sin embargo, por el manejo del equipo, cuidados de las cámaras y demás componentes (Cubero-Castan *et al.*, 2018), es necesario comparar el comportamiento de las reflectancias, frente a otros equipos como los espectroradiómetros. El experimento se llevó a cabo en el Área Experimental de Riego de la UNALM, se identificaron diferentes coberturas como: suelo desnudo, vegetación, hojarasca, roca y superficies de colores, cuyas reflectancias se midieron con un espectroradiómetro TriOs-Ramses, el cual posee un sensor de irradiancia y radiancia, obteniéndose valores de reflectancia de las coberturas analizadas, que posteriormente se compararon con los valores obtenidos con a cámara multispectral montada en un VANT. La prueba se realizó alrededor de las 12:00 m con cielo despejado y a una altura de 80 metros. En la Figura 5 se visualiza el comportamiento de las curvas de reflectancia espectral para los diferentes tipos de cobertura.

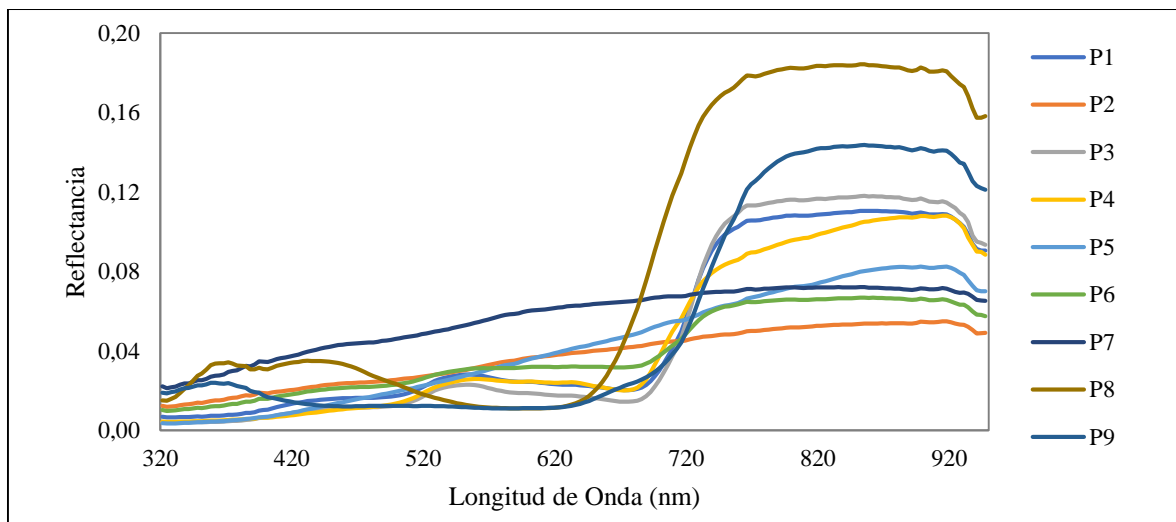


Figura 5: Reflectancia espectral para nueve tipos de cobertura (P1 (Pasto), P2 (suelo con humedad), P3 (Pasto), P4 (Vegetación con estrés) P5 (Vegetación muerta), P6 (Suelo seco), P7 (Roca), P8 (Superficie de color negro), P9 (Superficie de color azul)) obtenido con un espectroradiómetro modelo RAMSES en el AER-UNALM

En la Figura 6 se muestra la variación espacial de las reflectancias de los puntos obtenidas por la cámara multiespectrales según banda verde, roja, borde rojo y banda NIR.

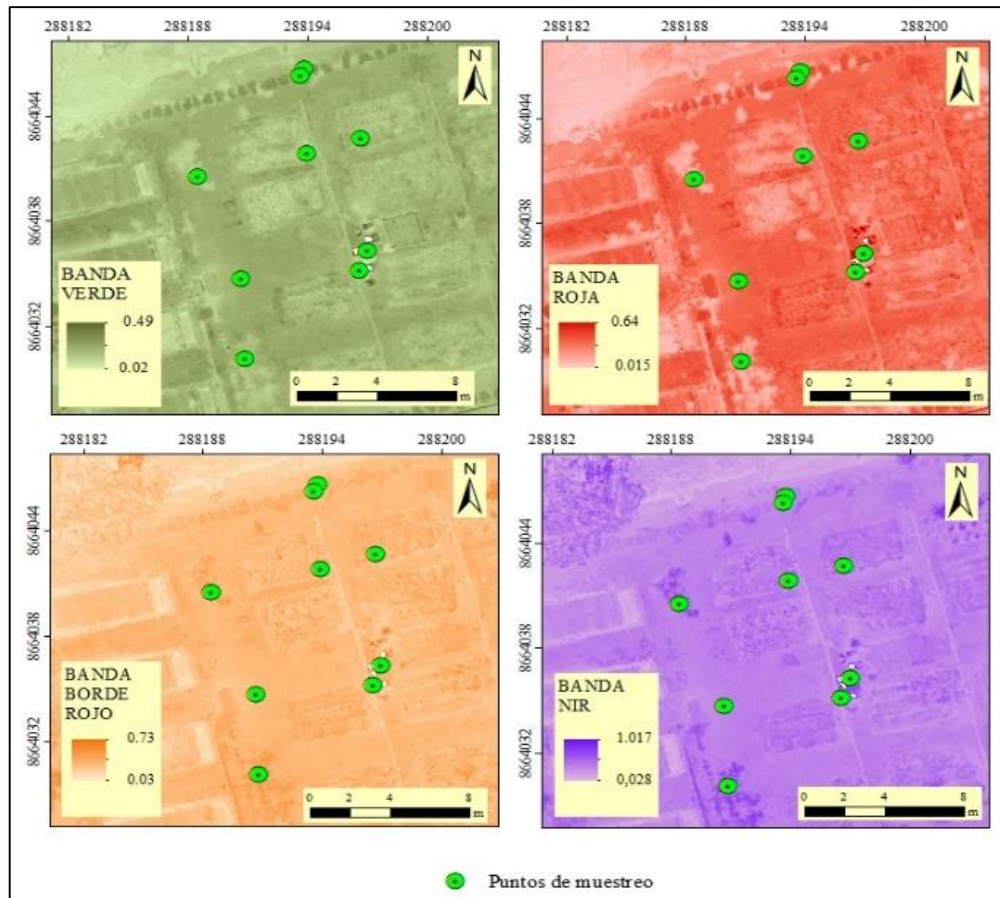


Figura 6: Distribución espacial de la reflectancia por banda verde, roja, borde rojo y banda NIR obtenidas por la cámara multiespectral y puntos de muestreo

En el ANEXO 1 se observan las imágenes del trabajo de campo realizado para la lectura de reflectancia con el espectroradiómetro.

b. Imágenes térmicas

El uso de cámaras térmicas no refrigeradas montadas en VANT nos permiten estimar la Temperatura de superficie de una manera sencilla y a una mayor resolución espacial, lo que nos permite diferenciar entre pixeles de suelo y vegetación (Quille *et al.*, 2021; García *et al.*, 2016; Pérez, 2020) presentando ventajas en comparación de las imágenes satelitales las cuales estiman de manera indirecta la Ts por diferentes algoritmos, como en el caso de

imágenes Landsat que emplea el algoritmo para el mapeo automatizado de la temperatura de la superficie terrestre (Martínez-Barbáchano, 2020; Galvis y Prada 2017). Los valores de temperatura se calibraron a partir de información de campo medidas con un radiómetro infrarrojo portátil a diferentes tipos de coberturas (suelo desnudo, grass, hojarasca y agua descongelada) que se ubicaron en un marco de PVC de un 1m x 1m de lado. Las lecturas se realizaron a 1m de altura con 9 puntos de muestreo por cobertura haciendo un total de 45 puntos de muestreo. Los datos se tomaron al mismo tiempo que se realizó el vuelo del VANT, que posteriormente se procesaron en gabinete.

En el ANEXO 1 se observa el trabajo de campo realizado con el radiómetro en la Yarada Los Palos, Tacna.

3.3.3. Índices de vegetación (NDVI, SAVI, IAF) y albedo

a. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El índice de vegetación NDVI se determinó en función a las bandas infrarrojo cercano y roja, cuyo rango varía entre -1 y 1 donde los valores que tienden a 0 indican áreas escasas de vegetación.

$$NDVI = \frac{IRC-R}{IRC+R} \quad (10)$$

Dónde; IRC corresponde a la banda infrarrojo cercano; R corresponde a la banda roja.

Se obtuvo valores de NDVI en campo para una posterior calibración; los cuales se determinación con ayuda del Green Seeker. Para la toma de datos se colocó el sensor a un promedio de 100 cm de altura sobre la cobertura; cuando el gatillo se encuentra presionado el sensor emite ráfagas continuas de pulsos de luz roja e infrarroja mientras muestrea la zona escaneada; la intensidad de la luz detectada es un indicador del vigor de la planta. En la Figura 7 se puede visualizar el area de muestreo del equipo como el rango de altura adecuado.

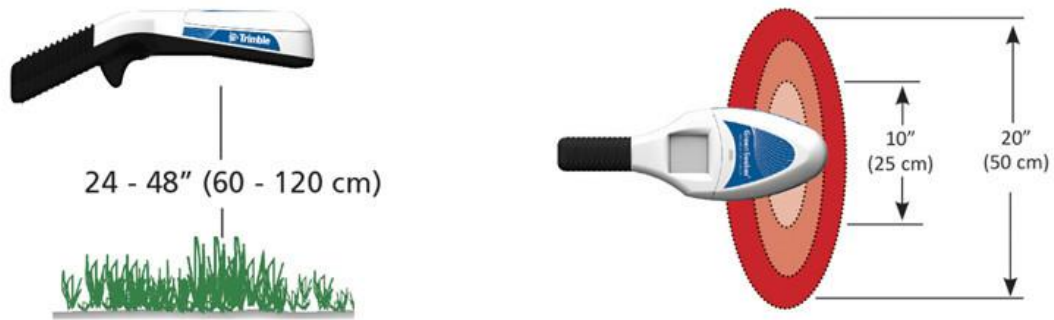


Figura 7: Equipo Green Seeker para medición del NDVI en campo

b. Índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

El índice de vegetación SAVI (Huete, 1988), es empleado en estudios en donde exista una baja densidad vegetal y el área de la superficie del suelo sea más relevante, con el fin de disminuir las alteraciones presentadas por el NDVI en zonas de escasa vegetación.

$$SAVI = \frac{(1+L)(IRC-R)}{(L+IRC+R)} \quad (11)$$

Donde; L es una constante que varía entre 0 (para zonas con una densidad vegetal alta) y 1 (para zonas con densidad vegetal escasa); en suelos medianamente expuestos se adopta un valor de L de 0,5. Según Muñoz Aguayo (2013) la estimación de L se puede realizar en función a la densidad de vegetación del cultivo, y, siendo que el olivar en estudio posee un marco de plantación de 7 x 7 m con una densidad de plantación de 200 árboles/ ha., en el presente estudio se asumió un L de 0,5, valor que corresponde a un olivar intensivo, según Bueno y Oviedo (2014), clasifican tres modelos de plantación para olivares: tradicionales (70 a 150 árboles/ ha), intensivos (200 a 800 árboles/ ha) y superintensivos (aproximadamente 1500 árboles/ ha), que usualmente corresponden a densidades de vegetación baja, medias a altas, y altas a súper altas, según Gómez del Campo *et al.* (2012).

c. Índice de área foliar (IAF)

El índice de vegetación IAF es una variable adimensional, es definida como la división entre el área de las hojas de un cultivo y el área de suelo sobre el cual se encuentra. Según Velasco y Bernabe. (2004) define el IAF como el área de la hoja verde de un solo lado por unidad de área de superficie del suelo en el dosel de la hoja ancha y se calcula como:

$$IAF = -\frac{\ln\left(\frac{0.69-SAVI}{0.59}\right)}{0.91} \quad (12)$$

Dónde; las constantes 0,69, 0,59, 0,91 son valores empleados en diversos estudios (Allen *et al.* 2002).

El ceptómetro Modelo LP-80, Marca Accupar, permite medir el IAF in situ, la intensidad lumínica debajo del dosel con una varilla (a) colocada por encima del suelo a una altura aproximada de 20 cm, y medición de la intensidad lumínica por encima del dosel, con un sensor externo (b) adherido a un soporte en L. a través del cable de conexión al equipo (ver Figura 8).



Figura 8: Equipo ceptómetro para medición del IAF en campo

La información colectada por el ceptómetro y Green Seeker, se realizaron después del vuelo del VANT. En la Figura 9 se visualiza los puntos de muestreo del IAF y el NDVI.

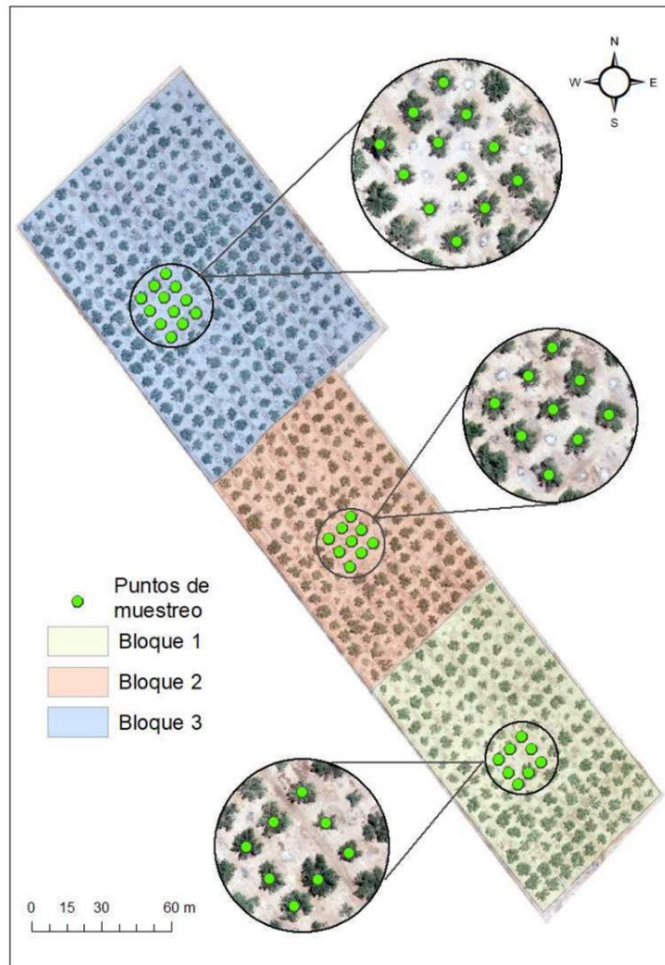


Figura 9: Puntos de muestreo del IAF y NDVI distribuido en tres bloque del campo de olivo

d. Albedo

El albedo (α) se calculó en función a las bandas roja (R) e infrarroja cercano (IRC) de las imágenes multiespectrales, como un valor medio de ambas, mediante la ecuación 13, desarrollada principalmente para imágenes satelitales (Tsouni *et al.*, 2008), pero empleada también en imágenes de alta resolución obtenidas por VANT (Quille *et al.*, 2021) mostrando resultados adecuados en cultivos.

$$\alpha = \frac{R+IRC}{2} \quad (13)$$

Donde; IRC corresponde a la banda infrarrojo cercano; R corresponde a la banda roja.

3.3.4. Componentes del balance de energía

El modelo METRIC permite el procesamiento de imágenes satelitales para estimar la ETC como un residuo del balance de energía (Niu *et al.*, 2019), utiliza un gradiente de temperatura cercano a la superficie (dT), el cual permite al modelo eliminar la precisión de calibrar absolutamente la temperatura de la superficie (Allen *et al.*, 2011). El flujo de calor latente (LE), se calcula como un residual del balance de energía a partir de la ecuación (6). El cálculo de la R_n ($W m^{-2}$) se realiza en función a la ecuación (2), en donde $R_{S\downarrow}$ es la radiación de onda corta incidente (Wm^{-2}) se determina en lo siguiente ecuación:

$$R_{S\downarrow} = G_{SC} \cdot \cos\theta \cdot dr \cdot \tau_{sw} \quad (14)$$

Dónde: G_{SC} es la constante solar ($1367 W m^{-2}$), θ es el ángulo de incidencia solar y dr es el cuadro inverso de distancia entre la tierra y el sol, τ_{sw} es la transmisividad atmosférica (Bastiaanssen, 1995), la cual se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$\tau_{sw} = 0.75 + 2 \cdot 10^{-5} \cdot Z \quad (15)$$

Dónde: Z es la elevación sobre el nivel del mar (metros).

La $R_{L\uparrow}$ (radiación de onda larga emitida) y $R_{L\downarrow}$ (radiación de onda larga incidente), se calculan mediante la ecuación de Stefan – Boltzmann:

$$R_{L\uparrow} = \varepsilon_0 \cdot \sigma \cdot T_s^4 \quad (16)$$

$$R_{L\downarrow} = \varepsilon_a \cdot \sigma \cdot T_a^4 \quad (17)$$

Donde: ε_0 , es la emisividad térmica de la superficie, σ es la constante de Stefan – Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}$), T_s y T_a son temperatura superficial y ambiental que se encuentran medidas en grados Kelvin (Allen *et al.*, 2007) y ε_a , es la emisividad atmosférica efectiva (Bastiaanssen, 1995), se calculan generalmente a partir de las siguientes ecuaciones empíricas:

$$\varepsilon_0 = 0.95 + 0.01 IAF \quad (18)$$

$$\varepsilon_a = 0.85 \cdot (-\ln(\tau_{sw}))^{0.09} \quad (19)$$

El flujo de calor sensible (H) se calcula a partir de la rugosidad de la superficie, la velocidad del viento y los rangos de temperatura de la superficie, los cuales son componentes para su cálculo y se determinan con la ecuación (3).

El cálculo de r_{ah} es la resistencia aerodinámica ($s\ m^{-1}$) durante una primera iteración para condiciones de estabilidad atmosférica neutrales se determina en función a la ecuación (4); en donde u_* es la velocidad de fricción ($m\ s^{-1}$) y se determina en función a la ecuación (5). La ecuación para el cálculo de dT en función a la temperatura de la superficie se muestra en la ecuación (1)

Para el cálculo de Z_{om} se empleó la siguiente ecuación propuesta por Tasumi (2003).

$$Z_{om} = 0.018 \cdot IAF \quad (20)$$

G es el almacenamiento de calor en el suelo y en la vegetación. Este valor se puede estimar por medio de la temperatura de la superficie, radiación neta y el índice de vegetación (Niu *et al.*, 2019).

$$G = \frac{T_s - 273.15}{a} (0.0038a + 0.0074a^2) (1 - 0.98NDVI^4) \cdot Rn \quad (21)$$

Donde; T_s es la Temperatura de superficie (K), a es el albedo de la superficie, el NDVI es el índice de vegetación normalizada y Rn es la radiación neta.

Existen otras variaciones de ecuaciones que fueron propuestas por Tasumi (2003) en función al índice de área foliar.

$$G = R_n (0.05 + 0.18e^{-0.521LAI}) \quad IAF \geq 0.5 \quad (22a)$$

$$G = R_n \left(\frac{1.8(T_s - 273.15)}{R_n} + 0.084 \right) \quad IAF < 0.5 \quad (23b)$$

Donde; el IAF es el índice de área foliar

a. Selección de pixel frío y caliente

Una de las tareas más importantes en la evaluación de la ETc es la selección correcta del píxel frío y caliente. Este píxel está en función de la homogeneidad entre sus píxeles vecinos y la distancia a la estación meteorológica. Los puntos de anclaje (píxel frío y píxel caliente), definieron las condiciones límites para el equilibrio energético. Para el píxel frío, se identificó en el campo de olivo, un subconjunto de píxeles fríos con valores de temperatura en el rango $\pm 0,2K$ del promedio del 2% más frío, extraído del área de los valores del 5% más

alto del NDVI; y para el valor del NDVI del pixel frio, se seleccionó un 1% del 5% de los valores más altos, siendo el pixel candidato final el promedio del 1%. En la selección del pixel caliente, se identificó las temperaturas que se encontraban en el rango del $\pm 0,2K$ del promedio del 2% más caliente, extraído del área del 10% más bajos del NDVI; para el valor del NDVI en el pixel caliente, se seleccionó el 10% de los pixeles más bajos, siendo el pixel candidato final el promedio del 10%. La selección de los pixeles finales se da en función de la proximidad del valor promediado y la homogeneidad entre sus pixeles vecinos (Allen *et al.*, 2013). Una vez ubicados los pixeles (frio y caliente) se extrae sus atributos y se inicia la iteración para la calibración del dt definidas en la ecuación (1).

3.3.5. Evapotranspiración del cultivo de olivo (ETc)

El flujo de calor latente representa el calor de la superficie instantáneo, debido a la ETc en el momento de captura de las imágenes; se calcula mediante la ecuación (6). Para la estimación de la ET instantánea (ET_{inst}), el valor de la ETc se calcula en $mm\ h^{-1}$ aplicando la siguiente ecuación:

$$ET_{inst} = \frac{3600LE}{\lambda} \quad (26)$$

Donde ET_{inst} es la ET instantánea ($mm\ h^{-1}$), 3600 es la conversión de tiempo de segundos a horas, LE es el flujo de calor latente ($W\ m^{-2}$) y λ es el calor latente de vaporización ($J\ kg^{-1}$), en donde λ es el calor latente de vaporización o el calor absorbido cuando un kilogramo de agua se evapora ($J\ kg^{-1}$), se determina en función a la siguiente ecuación:

$$\lambda = [2.501 - 0.00236(T_s - 273.15)] \times 10^6 \quad (27)$$

La fracción de ET de referencia se define como la relación entre la ET instantánea (ET_{inst}) para cada pixel y la ET de referencia (ET_o) estimado mediante información meteorológica recopilada:

$$ET_r F = \frac{ET_{inst}}{ET_o} \quad (28)$$

Donde: ET_r es la ET de referencia para la alfalfa de 0,5 metros de alto para el paso de tiempo de la imagen. La ET_o fue calculada por el método de Penman Monteith ($mm\ h^{-1}$) mediante datos de estación meteorológica automática. La $ET_r F$ es similar al Kc, pero agrega las

características propias del cultivo y la zona evaluada.

El modelo METRIC calcula la ET_{24} en función a la multiplicación ET_{rF} y ET_{r-24} . Los valores de ET_{24} diarios son más utilizados que la información brindada por ET_{inst} (Allen *et al.*, 2007).

$$ET_{24} = ET_{rF} \times ET_{r-24} \quad (29)$$

En la Figura 10 se muestra el procedimiento secuencial para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c) mediante el modelo METRIC.

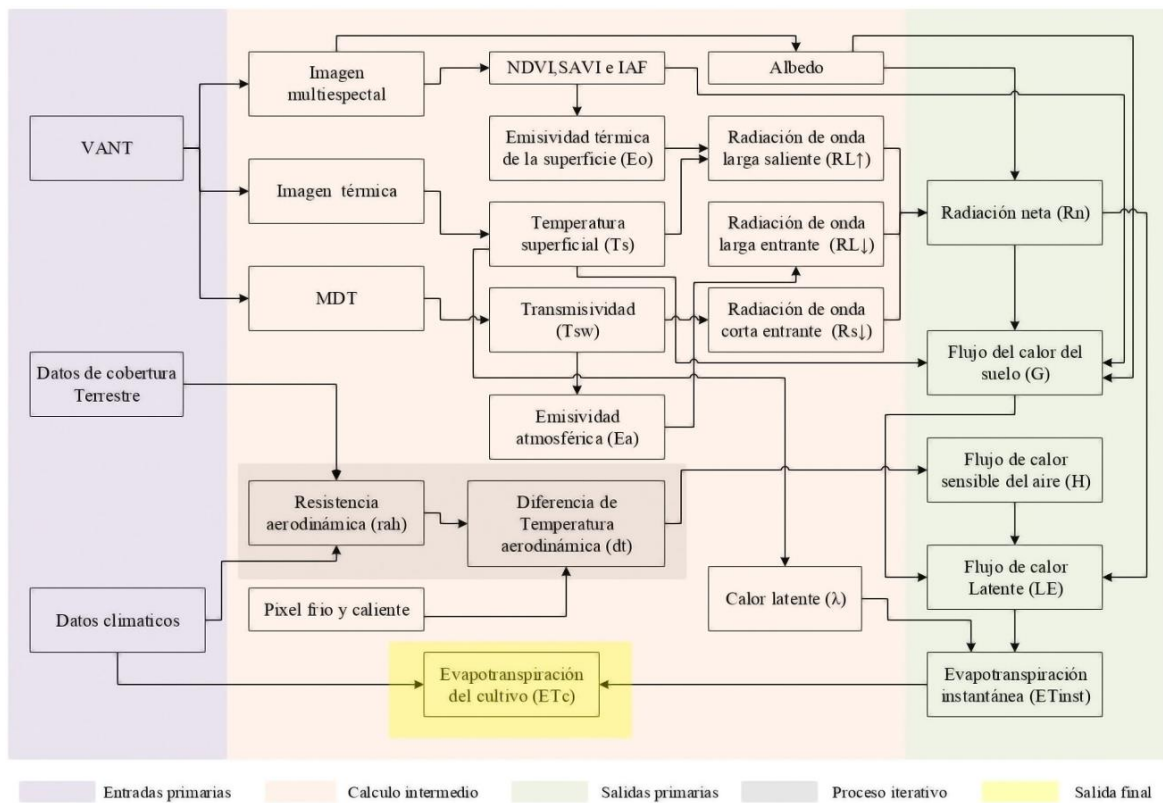


Figura 10: Procedimiento secuencial para estimar la evapotranspiración del cultivo (ET_c), mediante el modelo METRIC

FUENTE: Adaptada de Numata et al. (2017)

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CALIBRACIÓN DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES Y TÉRMICAS

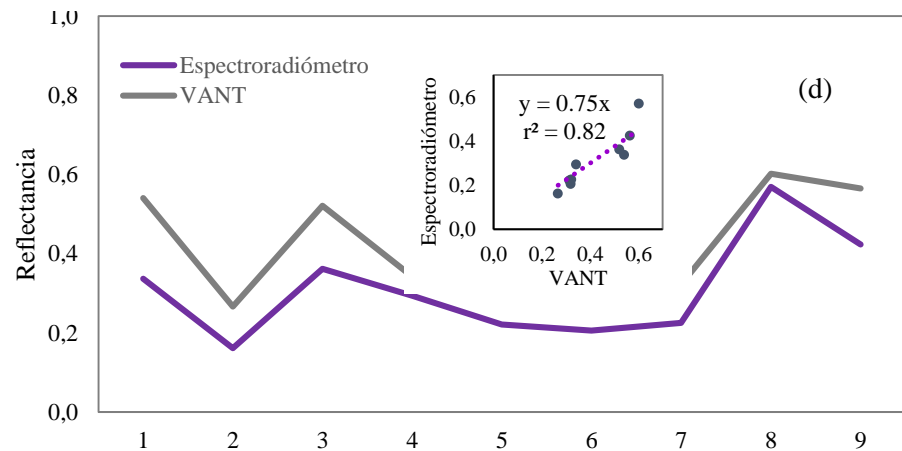
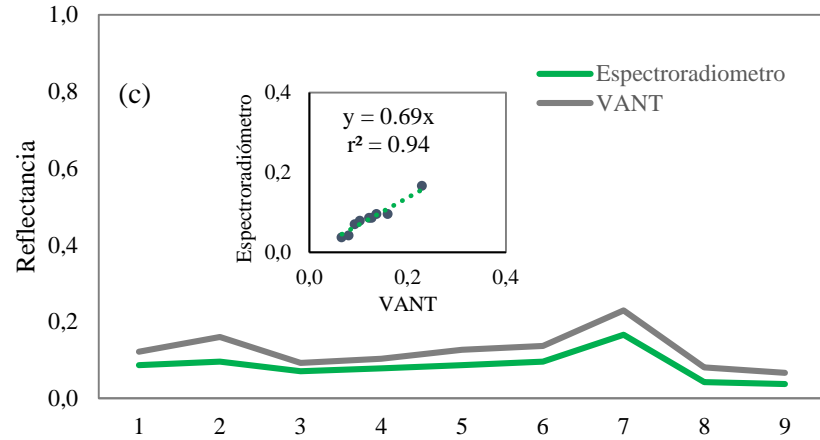
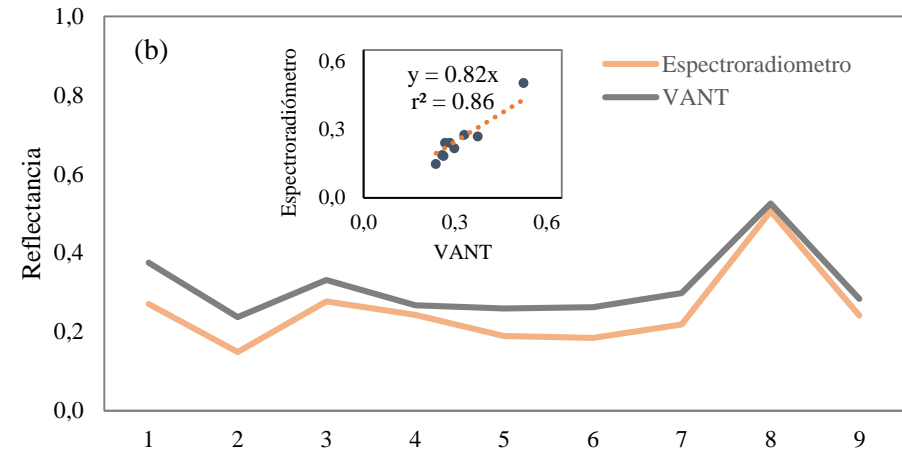
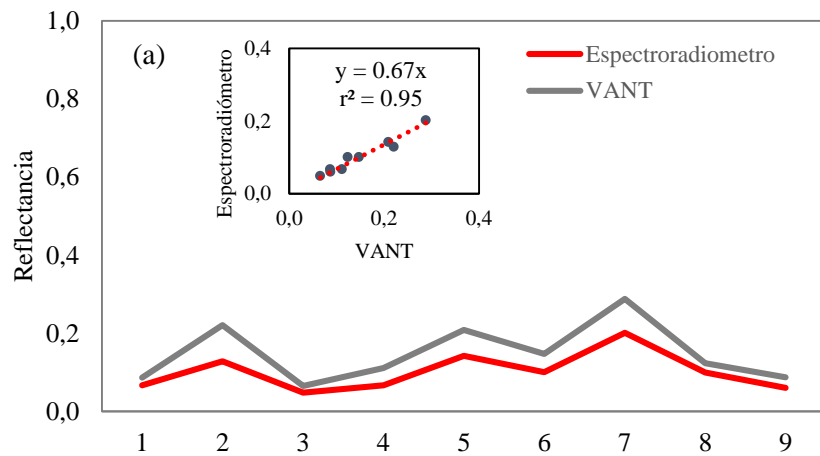
La relación lineal entre la reflectancia de la imagen obtenida con una cámara multiespectral montada en un VANT y datos obtenidos por un espectroradiómetro, según bandas multiespectrales (rojo, borde rojo, verde e infrarrojo cercano), se presentan en la Figura 11; y en la Tabla 3, se visualiza las ecuaciones de ajuste para cada banda, con sus respectivos coeficientes de determinación (r^2), los cuales son mayores a 0,80, lo que indica una buena concordancia entre las reflectancias.

Cubero-Castan *et al.* (2018) obtienen valores de reflectancias superiores al 75%, que representan una sobreestimación promedio por banda de un 8%, sin embargo materiales naturales como la hoja de cultivo, no exhiben una reflectancias tan alta. Estos resultados se confirman en el estudio, con un coeficiente de Pearson de 0,96 para las cuatro bandas evaluadas, con un RMSE promedio de 7%. Además, en la Figura 12 se representa la relación lineal entre el NDVI estimado a partir de las imágenes multiespectrales e información del espectroradiómetro, con un r^2 de 0,972, y coeficiente de correlación de Pearson de 0,98 que indica una buena relación y con un RMSE de 5% resultados similares a los presentados a los de Cubero-Castan *et al.* (2018) el cual menciona que existe un menor ajuste en superficies no vegetales en comparación que los de vegetación.

Tabla 3: Ecuaciones de regresión lineal y coeficiente de determinación r^2 para la calibración de bandas multiespectrales

Ecuación	r^2
$Y_{\text{rojo}} = 0,67X_{\text{rojo}}$	0,95
$Y_{\text{borde rojo}} = 0,82X_{\text{borde rojo}}$	0,86
$Y_{\text{verde}} = 0,69X_{\text{verde}}$	0,94
$Y_{\text{infrarrojo cercano}} = 0,75X_{\text{infrarrojo cercano}}$	0,82

X = Banda original, Y= Banda corregida



1 (Pasto), 2(suelo con humedad), 3 (Pasto), 4 (Vegetación con estrés) 5 (Vegetación muerta), 6 (Suelo seco), 7 (Roca), 8 (Superficie de color negro), 9 (Superficie de color azul)

Figura 11: Reflectancia obtenida con una cámara multispectral SEQUOIA y un espectroradiómetro para las bandas multispectrales: (a) rojo, (b) borde rojo, (c) verde, (d) infrarrojo cercano. Regresión lineal

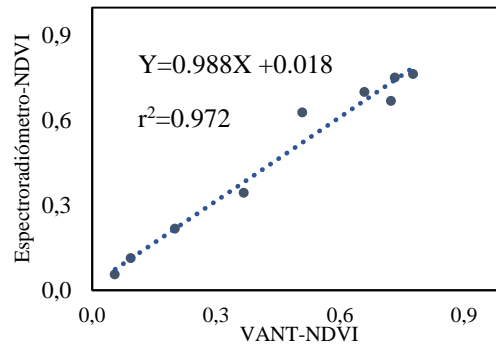


Figura 12: Relación lineal del NDVI calculado con imágenes de una cámara multispectral y un espectroradiómetro

Según Niu *et al.* (2020) el uso de cámaras térmicas es importante dado que determinan la T_s , la cual es empleada en hallar el flujo de energía superficial, en diversos estudios se utilizan cámaras térmicas no refrigerantes debido a un bajo costo y peso ligero que favorecen su uso en el VANT, las cuales requieren calibración. Por lo que se realizó la calibración mediante distintos tipos de coberturas, desde superficies con baja temperaturas a más altas para representar el comportamiento de la cámara en un rango amplio; según Jiménez y Celestino (2017) y Gomez (2016), realizar el ajuste de las cámaras térmicas en un amplio de rango de temperaturas, mejoran los resultados de nivel de la temperatura de superficie. En el estudio, se obtuvo una relación entre la temperatura obtenida de la cámara térmica FLIR, en función a las lecturas de un radiómetro portátil indicando, la buena concordancia entre las temperaturas para coberturas de suelo desnudo, hojarasca, grass y agua descongelada. En la Figura 13 se observa la relación de temperaturas entre el radiómetro y la cámara térmica; y en la Tabla 4, se presenta la ecuación de ajuste y coeficiente de determinación, además un R de Pearson de 0,98 y un RMSE de 7 °C, valores cercanos a los obtenidos por Gomez *et al.* (2017).

Tabla 4: Ecuación de regresión lineal y coeficiente de determinación r^2 para la Temperatura de superficie

Ecuación	r^2
$Y_{\text{cámara térmica}} = 1,10X_{\text{cámara térmica}} - 10,84$	0,97

X = original, Y= corregida

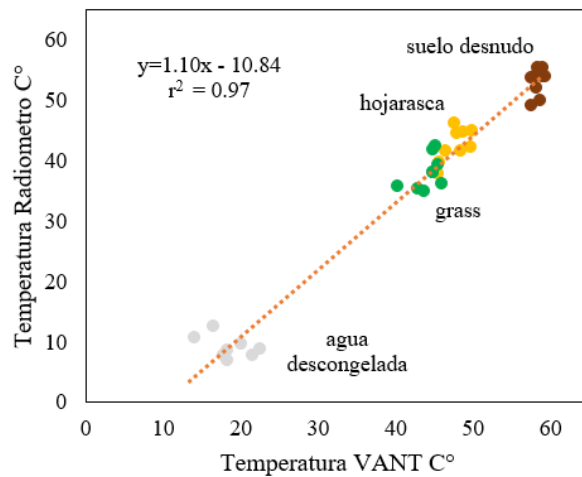


Figura 13: Temperaturas registradas por un radiómetro y una cámara térmica FLIR (VANT). Regresión lineal

4.2. ÍNDICES DE VEGETACIÓN (NDVI, IAF, SAVI) Y ALBEDO

4.2.1. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

En la Figura 14 y Tabla 5 se observa la relación lineal entre el NDVI y ecuación de ajuste calculado a partir de las imágenes multiespectrales corregidas por bandas y las lecturas del sensor Green Seeker, obteniéndose un r^2 mayores e iguales a 0,70 para invierno y verano.

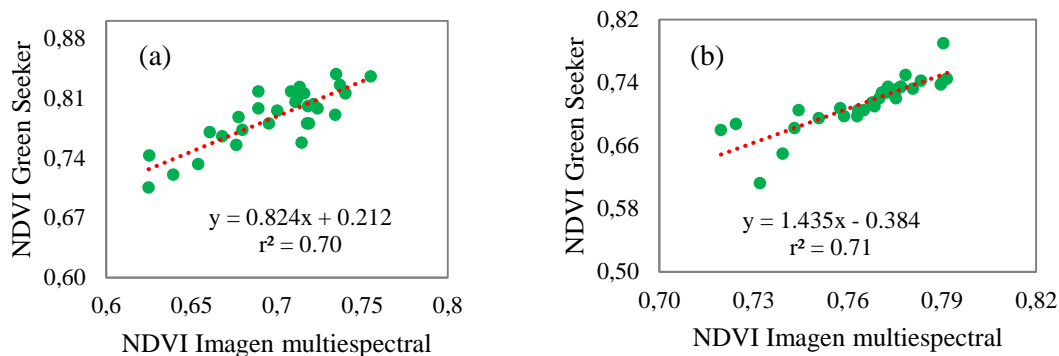


Figura 14: NDVI obtenido a partir de imágenes multiespectrales y el sensor Green Seeker para invierno (a) y verano (b)

La calibración a nivel de campo y del NDVI son de suma importancia, debido a que ajustan los valores obtenidos por VANT a nivel de suelo es por eso que equipos como el Green Seeker debido a su costo adquisitivo y manejo en campo se emplea en la calibración (Duan

et al., 2017). Felipetto (2016) realiza comparaciones de datos de NDVI entre un sensor multiespectral, un espectroradiómetro y el equipo Green Seeker, encontrando correlaciones de 0,75 entre espectroradiómetro y Green Seeker y 0,80 entre el sensor multiespectral y el Green Seeker, el cual menciona que los ajustes son adecuados. Mikami (2017) encuentra datos de correlación promedios de 0,70.

4.2.2. Índice de área foliar (IAF)

En la Figura 15 y Tabla 5 se muestra la relación lineal y ecuación de ajuste calculado entre el IAF de imágenes multiespectrales y un ceptómetro, obteniéndose r^2 mayores a 0,75 para invierno y verano.

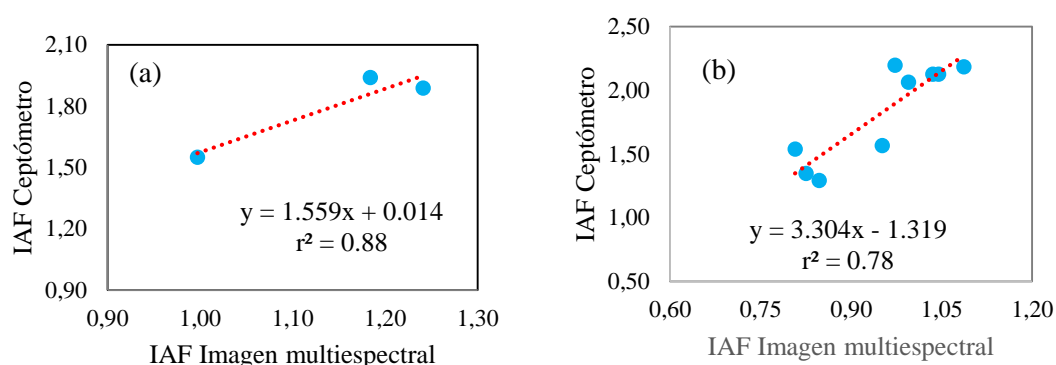


Figura 15: IAF obtenido a partir de imágenes multiespectrales y un ceptómetro para invierno (a) y verano (b)

Cavalli *et al.* (2016) mencionan que el uso del ceptómetro Accupar LP-80 presenta buena precisión, además de una ventaja de mayor velocidad, menor costo y no implica destrucción foliar encontrando una correlación de 0,93 entre el ceptómetro y método directo; por lo cual el uso del equipo frente a métodos destructivos es adecuado; Mendoza-Pérez *et al.* (2017) y Carvalho *et al.* (2017) presentan resultados de correlación de 0,9, los cuales recomienda el uso del ceptómetro (Accupar LP-80) para calibraciones a nivel de campo.

Tabla 5: Ecuaciones de regresión lineal y coeficiente de determinación r^2 para la calibración de bandas para los índices de vegetación (NDVI e IAF)

Ecuación	r^2
$Y_{NDVI}=0,824X_{NDVI}+0,212$ (invierno)	0,70
$Y_{NDVI}=1,435X_{NDVI}-0,384$ (verano)	0,71
$Y_{IAF}=1,559X_{IAF}+0,014$ (invierno)	0,88
$Y_{IAF}=3,304X_{IAF}-1,319$ (verano)	0,78

X = original, Y= corregida

En las figuras 16 y 17 se presenta la variación espacial y diagramas de caja de los índices de vegetación (NDVI, SAVI e IAF) y albedo. Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, según variedad (sevillana y ascolana) y condición de estrés (Tabla 6).

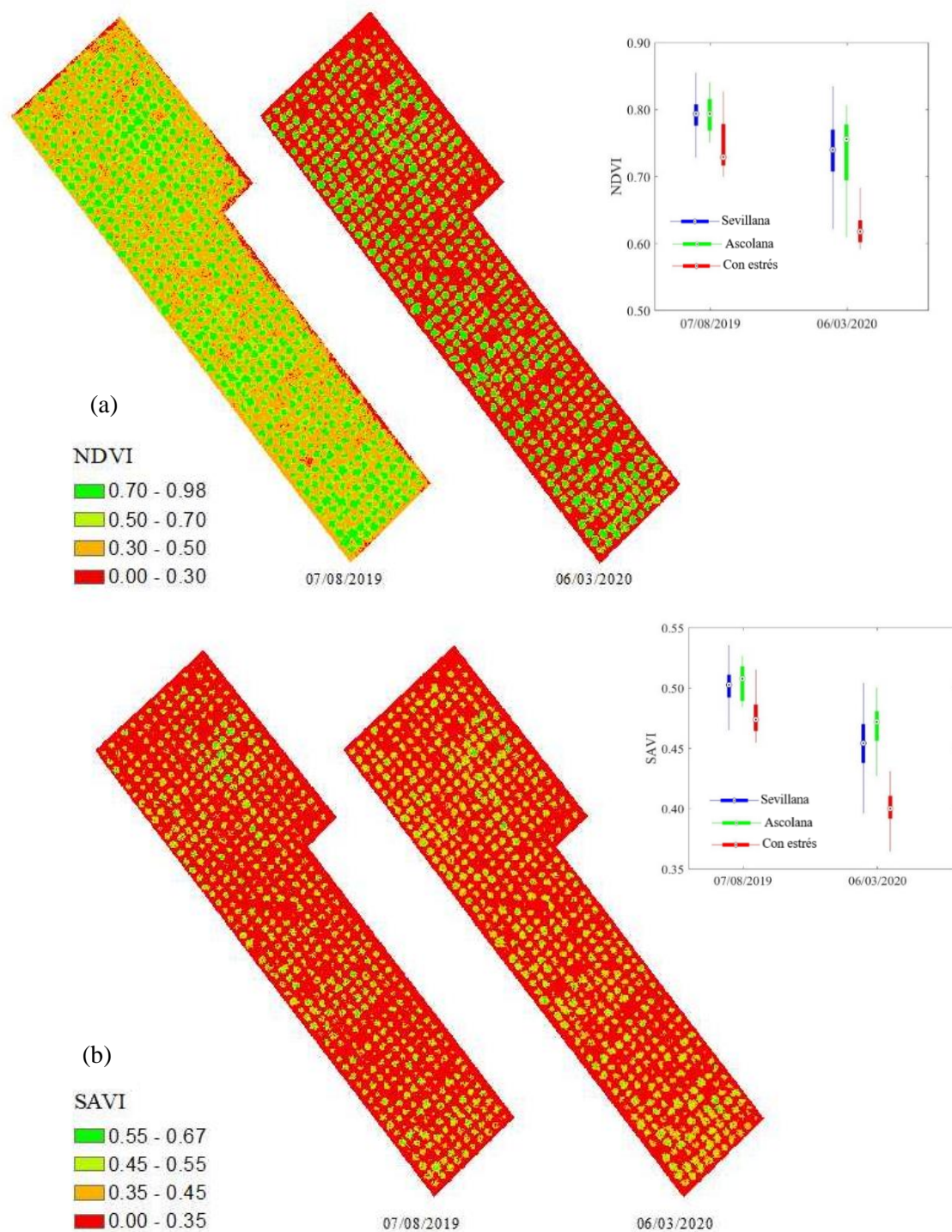


Figura 16: Distribución espacial y diagramas de caja de los índices de vegetación NDVI(a) y SAVI(b) según variedad de olivo y condición de estrés, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna

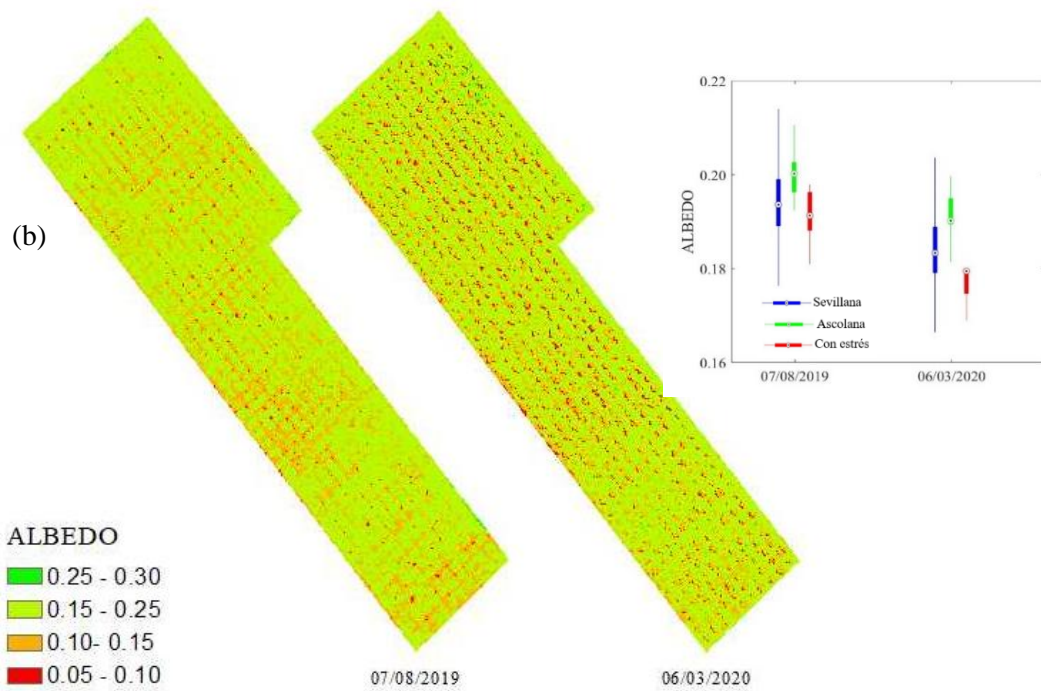
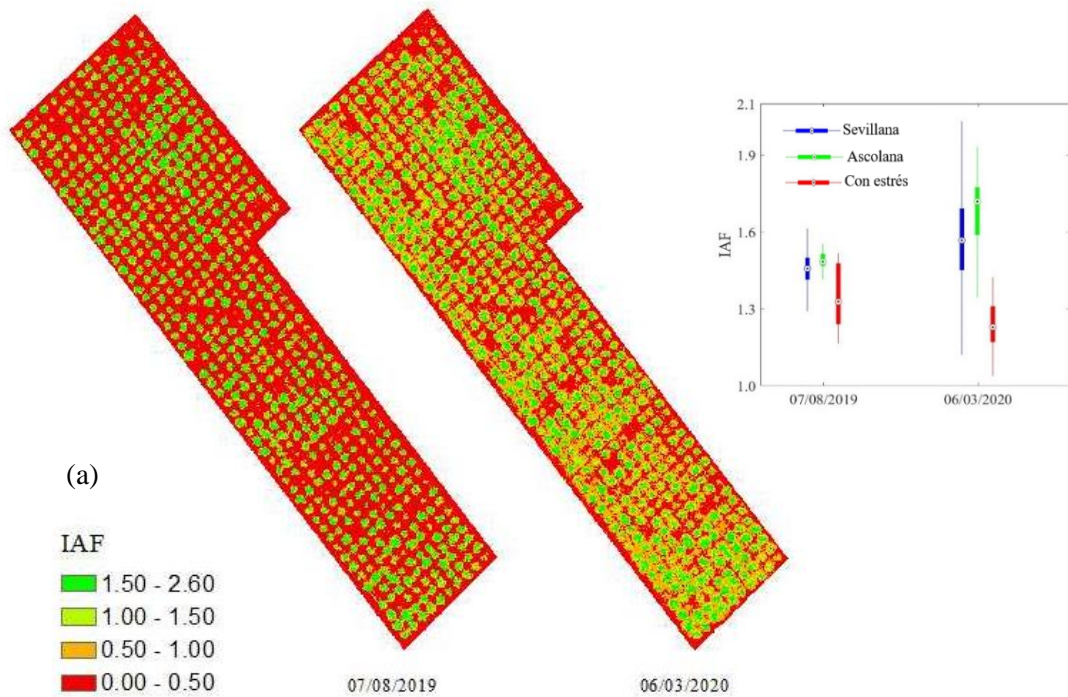


Figura 17: Distribución espacial y diagramas de caja del índice de vegetación IAF(a) y el albedo (d) según variedad de olivo y condición de estrés, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna

Tabla 6: Valores (\tilde{x} , S) de los índices de vegetación (NDVI, SAVI e IAF) y albedo, según variedades y condición de estrés

Detalle	Invierno			Verano		
	sin estrés		con estrés	sin estrés		con estrés
	sevillana	ascolana		sevillana	ascolana	
NDVI	0,794±0,025	0,793±0,027	0,729±0,047	0,740±0,046	0,756±0,056	0,618±0,036
SAVI	0,503±0,014	0,508±0,015	0,474±0,023	0,454±0,025	0,472±0,023	0,400±0,020
IAF	1,457±0,073	1,484±0,043	1,328±0,129	1,567±0,183	1,718±0,163	1,228±0,118
albedo	0,194±0,008	0,200±0,005	0,191±0,012	0,183±0,008	0,190±0,004	0,179±0,005

El NDVI y el SAVI presenta un mismo comportamiento obteniendo valores más elevados en la estación de invierno y valores más bajos en la estación de verano, y las diferencias con otros estudios pueden deberse a la fecha de evaluación, condiciones climáticas y características propias de los olivares. Los resultados obtenidos con estrés en verano, están acorde con Ortega-Farias *et al.* (2016), en un olivar del valle Penciahue (Chile) en verano.

Los valores de IAF se acercan a los presentados en la investigación de Pôças *et al.* (2014) realizadas en olivares los cuales se encuentran en un rango de 0,62 y 1,23, encontrándose valores más bajos en invierno, lo cual se replica en la presente investigación.

Los valores de albedo se encuentran en el rango obtenido en el estudio de Ramírez *et al.* (2019), realizado en olivares ubicados entre Córdoba, Málaga y Sevilla (España), quienes obtuvieron valores de 0,14 a 0,24 con el uso de albedómetros, resultándoles un r^2 de 0,77 con imágenes Landsat, siendo muy relevantes en la estimación de la R_n , mientras que con imágenes de una cámara hiperespectral, presentaron valores de r^2 cercanos a uno.

Se realizó la prueba T de Student para un alfa del 5% encontrando que no existe diferencia significativa entre las variedades de olivo (Sevillana y Ascolana)

Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, para condición de sin estrés y con estrés los cuales se visualizan en la Tabla 7. En la Figura 18 se presenta los diagramas de cajas para condición de sin estrés y con estrés para los índices de vegetación (NDVI, SAVI e IAF) y albedo.

Tabla 7: Valores de (\tilde{x} , S) de los índices de vegetación (NDVI, SAVI e IAF) y albedo, según condición de sin estrés y con estrés

Detalle	Invierno		Verano	
	sin estrés	con estrés	sin estrés	con estrés
NDVI	0,794±0,025	0,729±0,047	0,741±0,047	0,618±0,036
SAVI	0,503±0,014	0,474±0,023	0,454±0,025	0,400±0,020
IAF	1,458±0,073	1,328±0,129	1,571±0,184	1,228±0,118
albedo	0,194±0,008	0,191±0,012	0,183±0,008	0,179±0,005

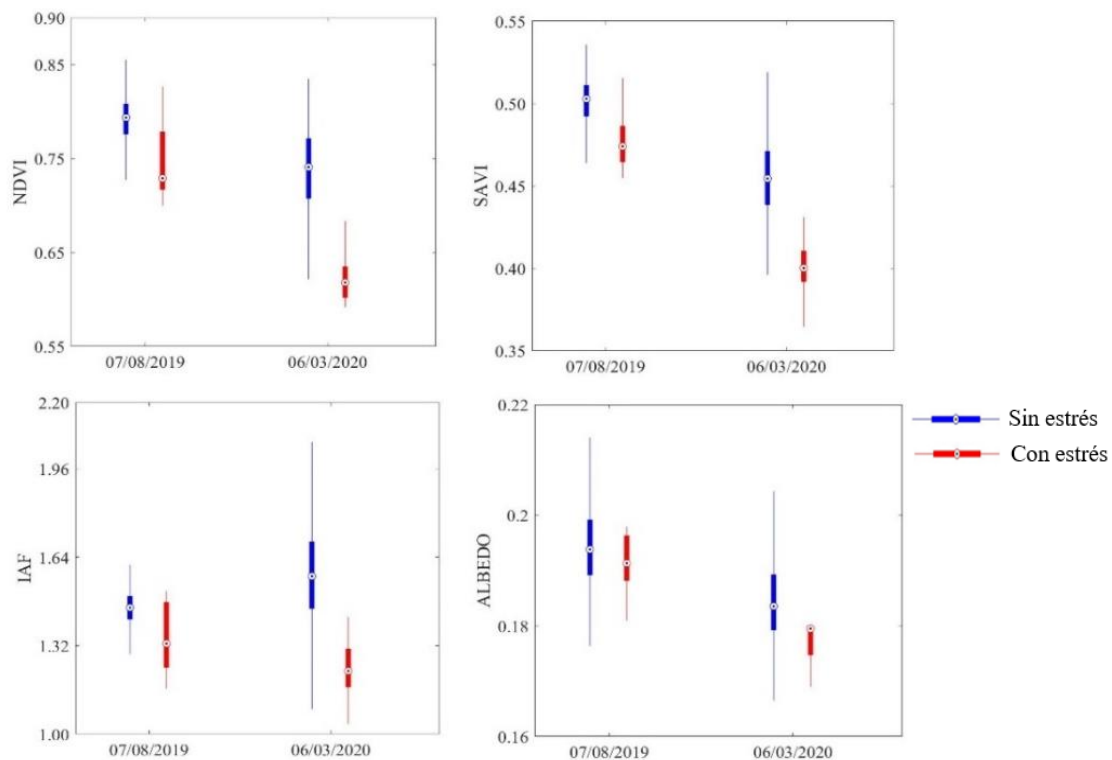


Figura 18: Diagramas de cajas de los índices de vegetación NDVI, SAVI, e IAF y el albedo en condición de sin estrés y con estrés del cultivo de olivo del distrito La Yarada-Los Palos de la región Tacna

4.3. TEMPERATURA SUPERFICIAL Y COMPONENTES DE BALANCE DE ENERGIA

4.3.1. Temperatura superficial (Ts)

En la Figura 19 se presenta la variación espacial y diagrama de caja de la temperatura de superficie. Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, según variedad (sevillana y ascolana) y condición de estrés (Tabla 10).

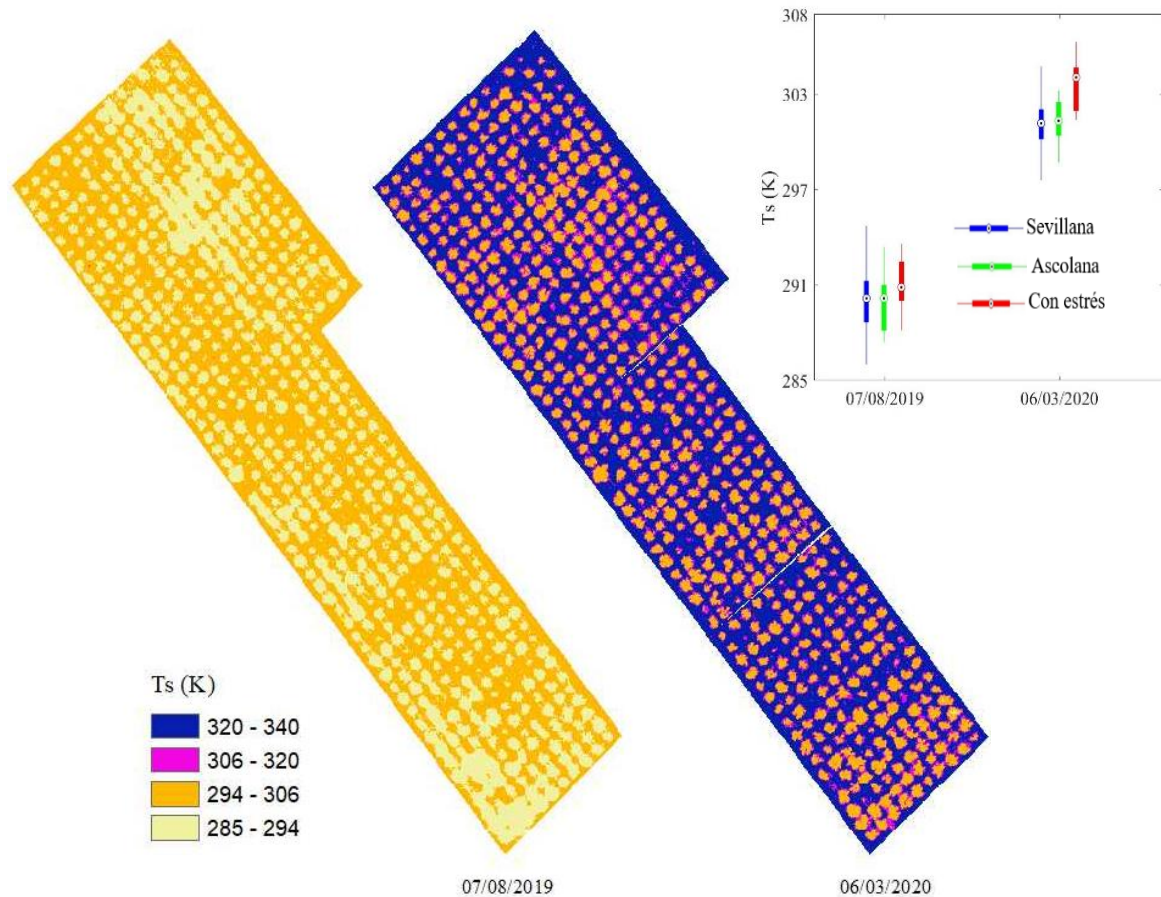


Figura 19: Distribución espacial y diagrama de caja de la temperatura superficial (Ts) según variedad de olivo y condición de estrés del cultivo, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna

4.3.2. Componentes del balance de energía

a. Radiación neta (Rn)

En la Figura 20 se presenta la variación espacial y diagrama de caja de la Rn. Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, según variedad (sevillana y ascolana) y condición de estrés (Tabla 10).

Se observa en la Figura 20-a, valores mayores de radiación neta en la copa de los árboles debido a las características propias de la arquitectura de los olivos y los marcos de plantación, los cuales difieren de cultivos no arbóreos que tienen mayor uniformidad. La propia característica de las hojas del olivo, que poseen una estructura coriácea y lanceoladas, generan ciertas sombras, sobre todo en la copa del árbol, que influyen en la estimación de la radiación neta. Al respecto, Gómez del Campo *et al.* (2012) mencionan que la distancia entre

plantas y la arquitectura de los árboles influyen en la captación de radiación, por lo que no es uniforme en la copa de los árboles, encontrando que a un menor marco de plantación la distribución de la radiación presenta una menor homogeneidad, logrando que ciertas áreas de la copa del árbol capten una mayor radiación que otras, lo cual afecta la producción de aceitunas y calidad de sus aceites. Además, la presencia de mayor humedad del suelo favorece también valores altos de radiación neta (Allen *et al.*, 2011). Por otro lado, Quille *et al.* (2021) indican que la variabilidad de la R_n se ve afectada con la emisividad, el albedo de la superficie, el ángulo de inclinación solar (θ) asociado a la estacionalidad del año y los estados fenológicos del cultivo.

Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para las RS_{\downarrow} , RL_{\downarrow} y RL_{\uparrow} en invierno y verano, para condición de sin estrés y con estrés los cuales se visualizan en la Tabla 8.

Tabla 8: Valores de (\tilde{x} , S) las RS_{\downarrow} , RL_{\downarrow} y RL_{\uparrow} , según condición de sin estrés y con estrés

Detalle	Invierno		Verano	
	Sin estrés	Con estrés	Sin estrés	Con estrés
$R_{S\downarrow}(Wm^{-2})$	820,578±0,013	820,570±0,015	1020,246±0,022	1020,229±0,025
$R_{L\downarrow}(Wm^{-2})$	299,331±0,002	299,332±0,002	299,336±0,002	299,338±0,002
$R_{L\uparrow}(Wm^{-2})$	388,780±9,765	392,050±9,836	457,252±12,117	468,736±13,459

Según Allen *et al.* (2002) los valores de RL_{\uparrow} varían en un rango de 200 a 700 Wm^{-2} encontrando valores más bajos en áreas agrícolas, en el estudio los resultados de RL_{\uparrow} se encuentra dentro del rango mencionado.

Los valores de $R_{S\downarrow}$ son los que presenta mayor diferencias entre ambas etapas de evaluación, debido a la fechas de evaluación las cuales influyen en las variables para la estimación; los valores de $R_{S\downarrow}$ se encuentra dentro del rango propuesto por Allen *et al.* (2002).

Los valores de RL_{\downarrow} se encuentra en el rango presentado por Allen *et al.* (2002) el cual presenta valores de 200 a 500 Wm^{-2} .

b. Flujo de calor del suelo (G)

En la Figura 20 se presenta la variación espacial y diagrama de caja del G. Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, según variedad (sevillana y ascolana) y condición de estrés (Tabla 10). Valores similares fueron reportados por Koksall *et al.* (2018) y Hoffmann *et al.* (2016). Según Huaman (2015), valores promedios de G menores a 60 Wm^{-2} son

mayormente localizadas en áreas agrícolas y varían según el estado de desarrollo de los cultivos.

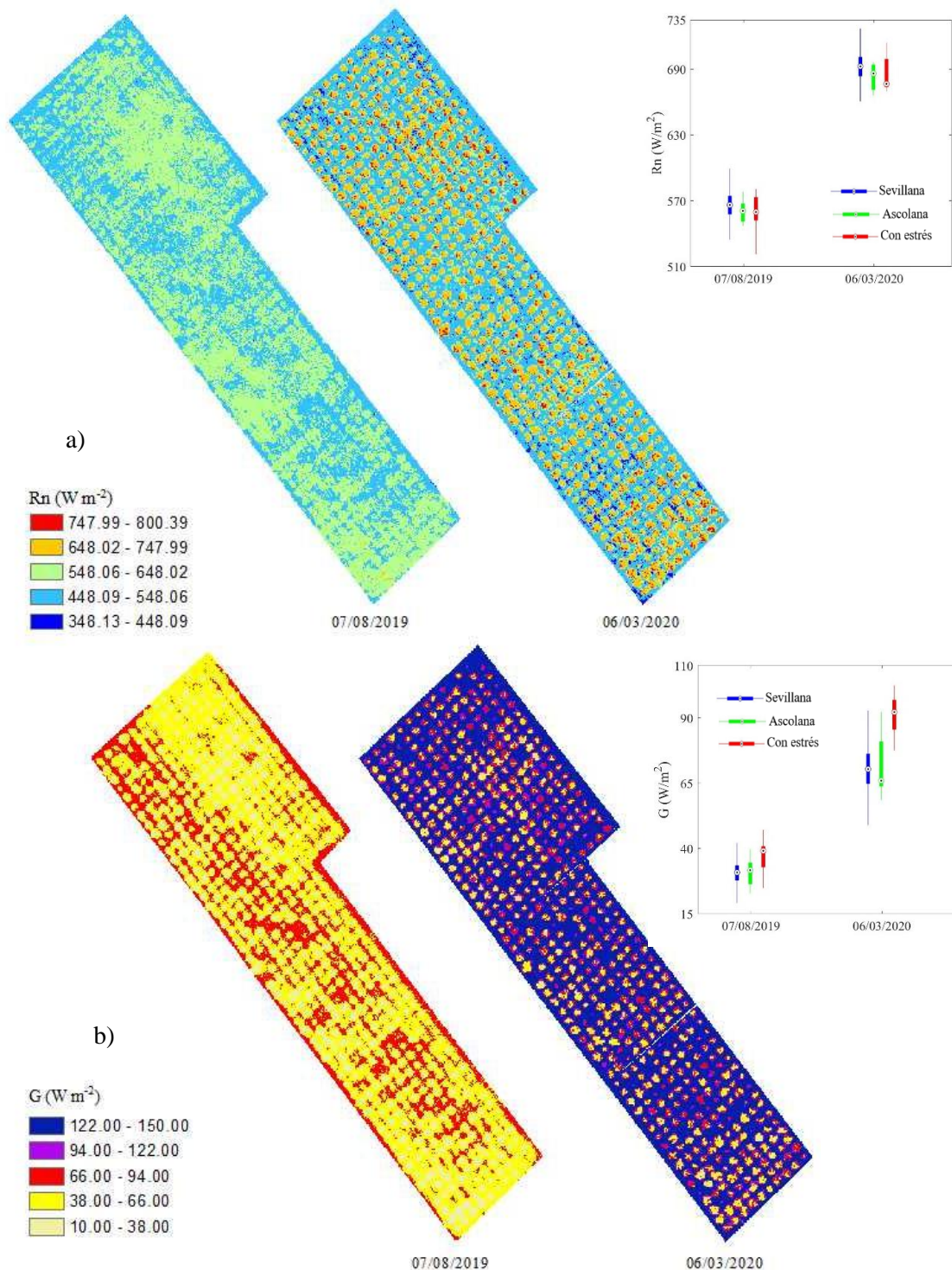


Figura 20: Distribución espacial y diagrama de caja de los componentes de energía Rn(a) y G(b) según variedad de olivo y condición de estrés, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna

c. Flujo de calor sensible (H)

En la Figura 23 se presenta la variación espacial y diagrama de caja de H. Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, según variedad (sevillana y ascolana) y condición de estrés (Tabla 10). Se presentó resultados similares en estudios realizados por Castañeda *et al.* (2018), donde al aplicar el modelo METRIC y variación de SEBAL, reportan valores estimados para H que varían desde 37 Wm^{-2} a 420 Wm^{-2} .

Para el píxel frío se seleccionó y definió sobre el olivar bien regado, obteniéndose rangos del NDVI, de 0,86 a 0,97 y el rango de α de 0,18 a 0,2; mientras que el píxel caliente se seleccionó y definió para un suelo agrícola seco homogéneo y desnudo con NDVI inferior a 0,307 y α de 0,16 a 0,21. Esto en comparación con los resultados obtenidos por Hardin y Jensen (2011); para píxel frío que oscilan entre un rango de 0,76 a 0,84 para NDVI y α de 0,18 a 0,24 y en caso de píxel caliente con NDVI inferior a 0,2 y α de 0,17 a 0,23, esta diferencia del NDVI es debido a una alta humedad en la primera fecha de vuelo. La variación de la temperatura para la estimación de los coeficientes a y b de la ecuación $dT=b+aT_s$ (ecuación (1)) (Allen *et al.*, 2011), se obtuvieron a partir de la selección del píxel frío y caliente para el cálculo del flujo de calor del aire (H); los resultados se muestran en la Tabla 9. En la Figura 21, se observa la variación de la diferencia de la temperatura para la estimación de los coeficientes a y b de la ecuación $dT=b+aT_s$ (Allen *et al.*, 2011), a partir de la selección de píxel frío y caliente para el cálculo del flujo de calor sensible del aire.

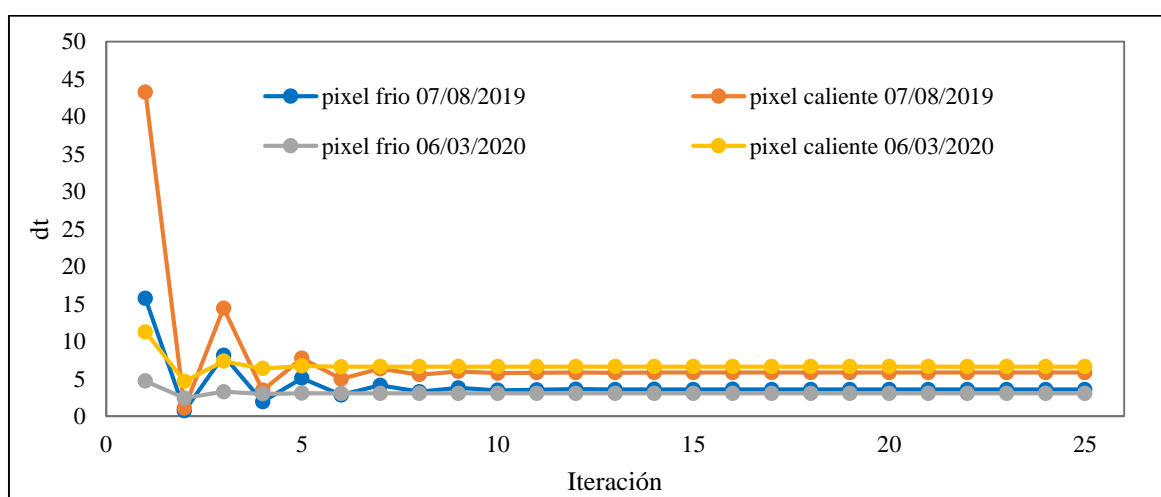


Figura 21: Variación de la diferencia de la temperatura cerca de la superficie (dt) para la estimación de los coeficientes a y b a de la ecuación $dT=b+aT_s$ (Allen *et al.*, 2011) en la selección del píxel frío y caliente en el cálculo de flujo de calor del aire (H)

En la Figura 22 se observa la selección de los pixeles frío y caliente para ambas fechas de vuelo.

Tabla 9: Selección del píxel frío y caliente en cada vuelo del VANT para los valores de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), albedo, Ts y las constantes de calibración a y b de la ecuación $dT=b+aTs$ (Allen *et al.*, 2011)

Píxel	Coordenadas (WGS84. UTM)		NDVI	Albedo	Ts(K)	a	b
	X	Y					
07/08/2019 (invierno)							
P. Frío	338130,85	7988880,01	0,89	0,20	284,40	0,12	-30,34
P. Caliente	338033,91	7989149,97	0,31	0,16	303,30		
06/03/2020 (verano)							
P. Frío	338009,13	7989158,05	0,95	0,18	294,40	0,11	-30,37
P. Caliente	338107,22	7988910,43	0,02	0,21	325,80		

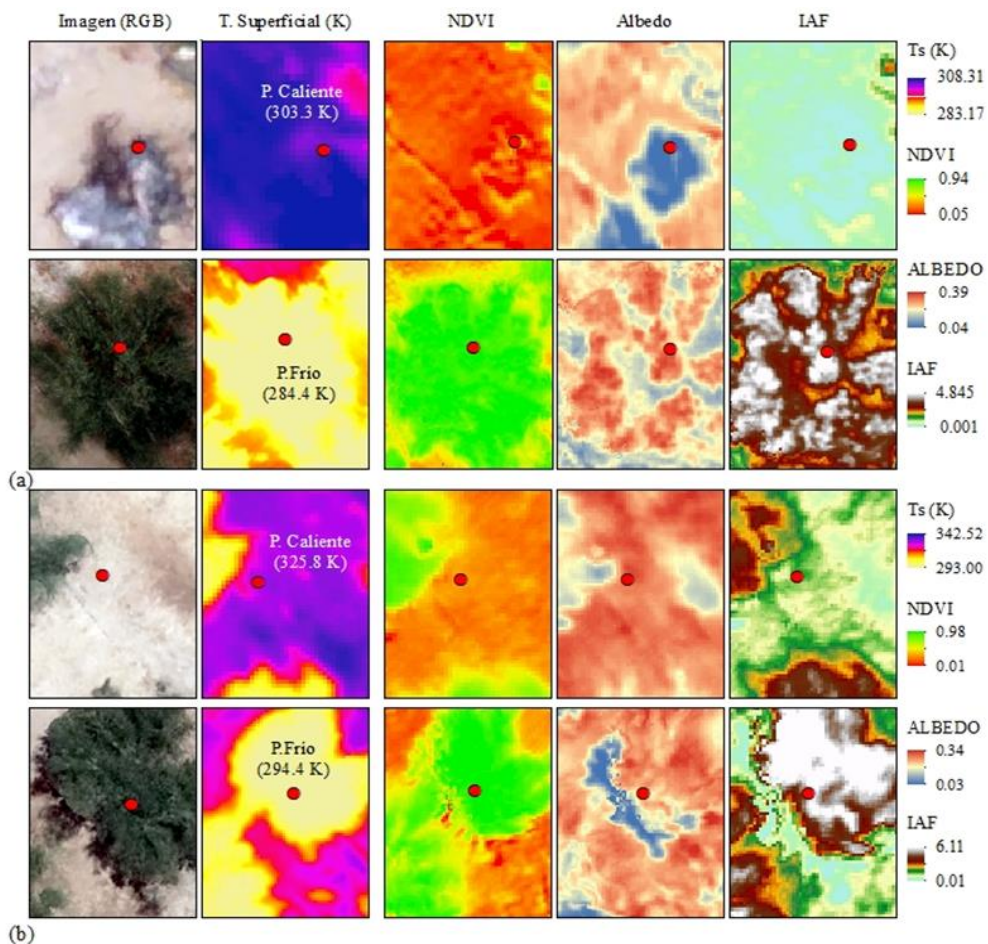


Figura 22: Imagen de la cobertura con el píxel frío y píxel caliente a partir de los índices de vegetación, albedo y temperatura superficial: (a) 07/08/2019 (invierno) y (b) 06/03/2020 (verano)

En la Figura 23-a, se observa valores de H mayores en el suelo desnudo en comparación a la copas de los árboles, debido a las propias características de los olivares y cultivos arbóreos; Ortega-Farias *et al.* (2016) encuentran valores de H mayores en suelo en comparación de los árboles de olivo, a causa que los flujos turbulentos en olivares son bajos, información que fue corroborada por torres de eddy covariance; valores similares se presentan en el estudio de Ramírez *et al.* (2019) en campos de olivo donde encontraron valores mayores de H en suelo en comparación de los árboles.

d. Flujo de calor latente (LE)

En la Figura 23 se presenta la variación espacial y diagrama de caja del LE. Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, según variedad (sevillana y ascolana) y condición de estrés (Tabla 10).

Huaman (2015) encuentra valores promedio máximos de 450 Wm^{-2} para áreas de cultivo, en el estudio los valores de \tilde{x} del LE se encuentran cercanos a lo mencionado.

En la Figura 23-b se observa valores mayores de LE en el suelo en la estación de invierno debido a una mayor humedad ocasionada por un riego diario a causa de salinidad del suelo y la presencia de alta humedad en el ambiente, en comparación a la estación de verano, en donde se presenta suelos con una menor humedad; al respecto, Allen *et al.* (2011) mencionan que la humedad en el suelo influye en los componentes del balance de energía, los cuales afectan la estimación del LE. Los valores de LE en los árboles de olivo estimados por el modelo METRIC en el estudio, se encuentra dentro del rango presentado en olivares intensivos y superintensivos (Ortega-Farias *et al.*, 2016 y Ramírez *et al.*, 2019).

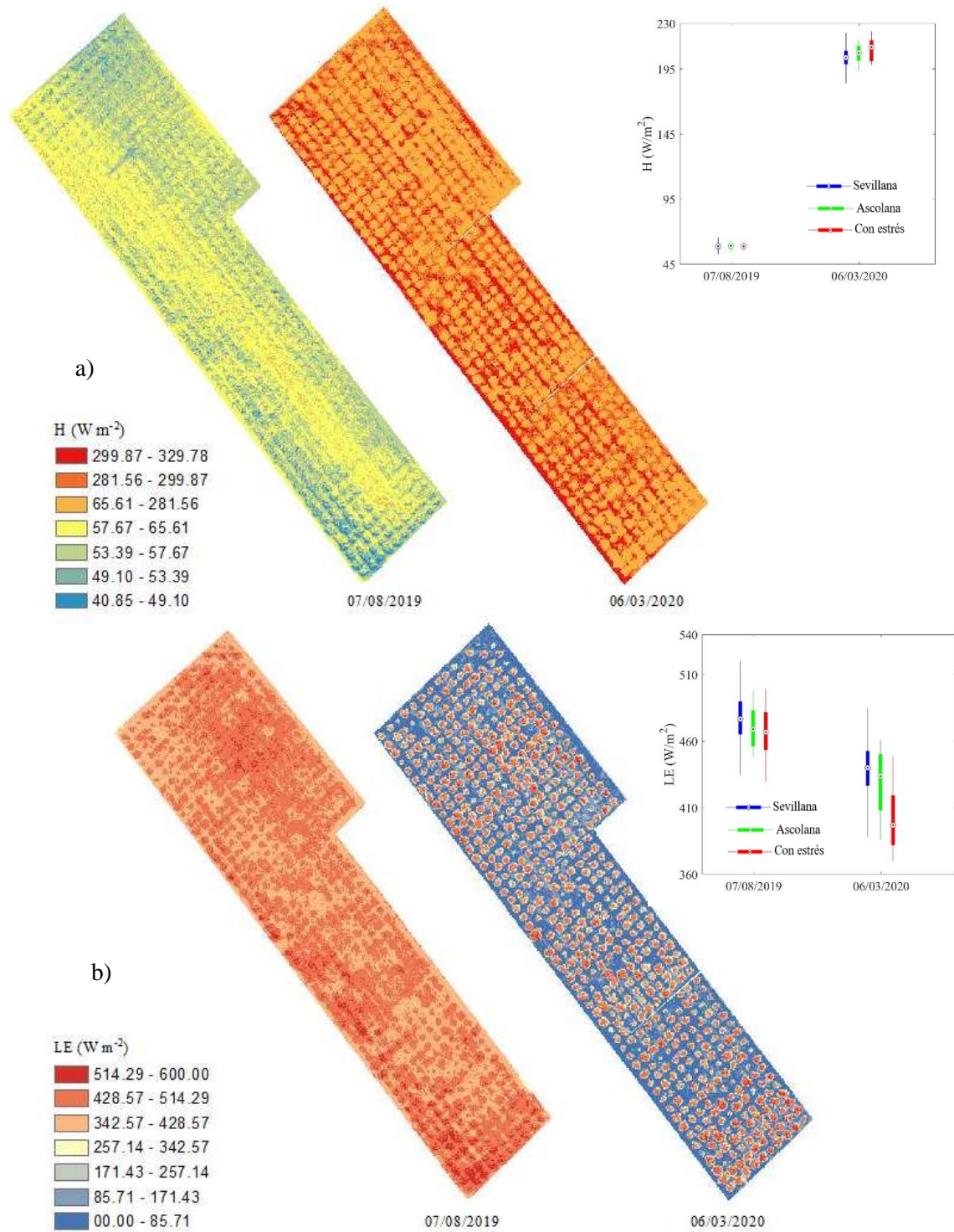


Figura 23: Distribución espacial y diagrama de caja de los componentes de energía H(a) y LE (b) según variedad de olivo y condición de estrés, por árbol, del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna

Tabla 10: Valores (\tilde{x} , S) de la Ts y los componentes del balance de energía (Rn, G, H y LE), según variedades y condición de estrés

Detalle	Invierno			Verano		
	sin estrés		con estrés	sin estrés		con estrés
	sevillana	ascolana		sevillana	ascolana	
Ts (K)	290,162±1,714	290,165±1,911	290,858±1,622	301,165±1,531	301,328±1,506	304,051±1,824
Rn (Wm ⁻²)	566,111±12,821	560,766±11,002	559,757±17,091	692,567±14,524	686,059±11,049	676,671±15,788
G (Wm ⁻²)	30,812±4,294	31,693±4,937	39,108±7,009	70,378±9,202	65,964±10,499	92,180±8,094
H (Wm ⁻²)	58,748±2,523	59,175±2,693	58,668±1,907	203,755±8,157	207,342±7,827	211,801±9,524
LE (Wm ⁻²)	476,617±17,108	468,891±16,410	466,789±21,147	440,039±21,685	433,738±25,327	396,860±25,765

Los valores obtenidos de Rn, G, H y LE para los 580 árboles con una resolución espacial de 12 x 12 cm donde muestran un rango de Rn entre 521 y 741, G entre 19 y 107, H entre 53 y 228, y LE entre 342 y 520; los valores encontrados se encuentran cercanos y dentro de los rangos obtenidos por Ortega-Farias *et al.* (2016), pero con una 9% de sobreestimación en la Rn, esto podría deberse a las diferencias de la densidad de plantación, la arquitectura propia de los árboles, la edad del olivar y el riego. Además, el flujo de calor del suelo (G) y el flujo de calor sensible del aire (H) fueron mayor en un 7% y 18,5% respectivamente según Ramírez *et al.* (2019), el autor menciona que existe una mayor variación de G, H y LE entre diferentes tipos de resoluciones espaciales.

Los valores de las medianas (\tilde{x}) de Rn, G, H y LE, se encuentra dentro de los rangos presentados en el estudio de Häusler *et al.* (2018) desarrollados en un olivar intensivo.

Se realizó la prueba T de Student para un alfa del 5% encontrando que no existe diferencia significativa entre las variedades de olivo (Sevillana y Ascolana) en los componentes de balance de energía.

Se obtuvieron valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, para condición de sin estrés y con estrés los cuales se visualizan en la Tabla 11. En la Figura 24 se presenta los diagramas de cajas para condición de sin estrés y con estrés para la Ts y los componentes de balance de energía (Rn, G, H y LE).

Tabla 11: Valores (\tilde{x} , S) de la Ts y los componentes del balance de energía (Rn, G, H y LE), según condición de sin estrés y con estrés

Detalle	Invierno		Verano	
	sin estrés	con estrés	sin estrés	con estrés
Ts (K)	290,163±1,718	290,858±1,622	301,166±1,530	304,051±1,824
Rn (Wm ⁻²)	565,976±12,795	559,757±17,091	692,456±14,514	676,671±15,788
G (Wm ⁻²)	30,832±4,307	39,108±7,009	70,306±9,228	92,180±8,094
H (Wm ⁻²)	58,785±2,525	58,668±1,907	203,860±8,153	211,801±9,524
LE (Wm ⁻²)	476,531±17,098	466,789±21,147	440,009±21,814	396,860±25,765

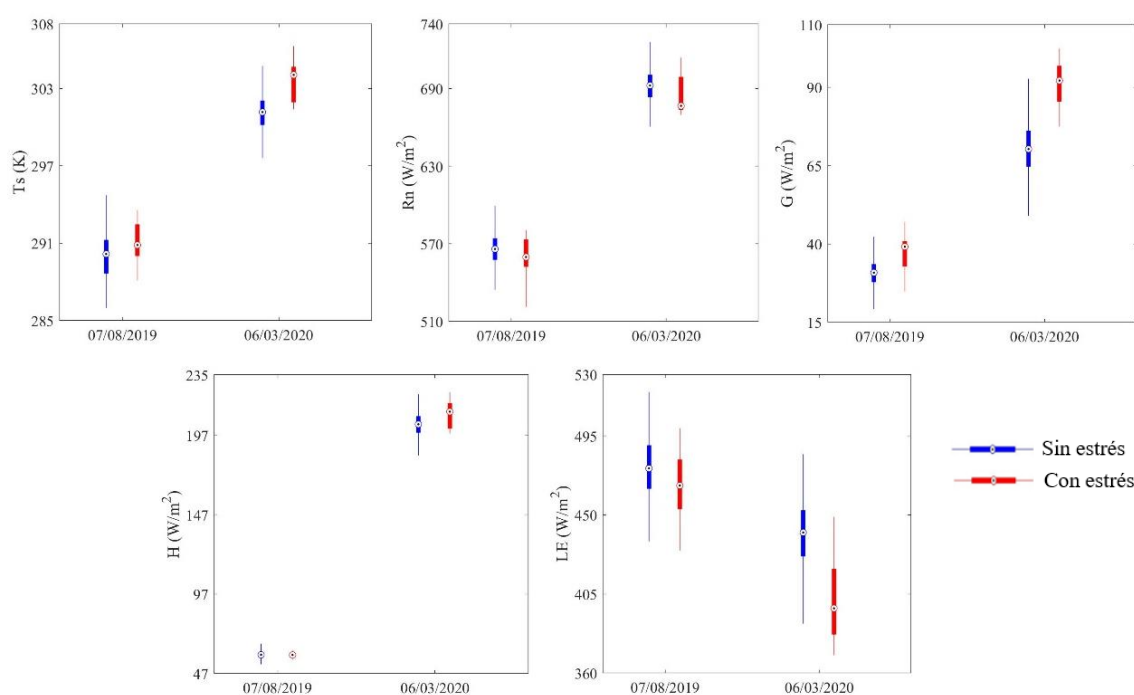


Figura 24: Diagramas de caja de la temperatura de superficie (Ts) los componentes de balance de energía, en condición sin estrés y con estrés del cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna

4.4. EVAPOTRANSPIRACIÓN DEL CULTIVO (ETC)

En la Figura 25 se presenta la variación espacial de la evapotranspiración del cultivo. Se obtuvo valores (\tilde{x} , S), para invierno y verano, según condición de estrés y sin estrés (Tabla 12). Para la estimación de la ETC del modelo METRIC se recolectó datos de la estación meteorológica la Yarada, con coordenadas geográficas latitud: 18°15'33,98" S, longitud: 70°24'00,02"O, tipo Davis Vantage

Pôças *et al.* (2014) mencionan que hay una tendencia en METRIC a sobreestimar la ET obtenida con cálculos terrestres, debido a que su valor es un promedio de píxeles, en comparación a información colectada del suelo, que son valores puntuales y locales, que incorporan las incertidumbres inevitables asociadas con el muestreo. Además, la observación y calibración de los datos de campo tienen sus propios errores e incertidumbres que pueden afectar el sesgo calculado.

Ramírez-Cuesta *et al.* (2019) indican que el modelo METRIC ha sido ampliamente validado en cultivos homogéneos, sin embargo, su aplicación sobre cultivos heterogéneos presenta algunas incertidumbres por lo cual, se requiere una mejor comprensión del comportamiento de los componentes del balance de energía en entornos no homogéneos, con especial atención a la resistencia aerodinámica caracterizada por la arquitectura del dosel.

En la Figura 26 se visualiza el comportamiento de la evapotranspiración de referencia (ET_o) desde invierno 2019 (01/08/2019) hasta verano 2020 (07/03/2020), con valores máximos y mínimos en verano e invierno respectivamente, estimadas a partir de diferentes métodos indirectos basados en componentes de balance de energía y datos climáticos.

La presencia de la humedad del suelo y sombras en los campos de olivo afectan a la estimación de la ET_c por el modelo METRIC. Al respecto, en la Figura 25-b se presentan imágenes RGB en donde se visualizan una presencia mayor de humedad en el suelo en la estación de invierno, a diferencia de verano. Allen *et al.* (2011) mencionan que los métodos de balance de energía como METRIC, nos permiten conocer la ET_c en función a las características propias del cultivo en el campo, la cual se ve influenciada por las tensiones causadas por enfermedades, salinidad, humedad en el suelo, características propias de los cultivos y sus estados fenológicos, presentando una mayor ventaja frente a otros métodos que no contemplan las características del campo y los cultivos.

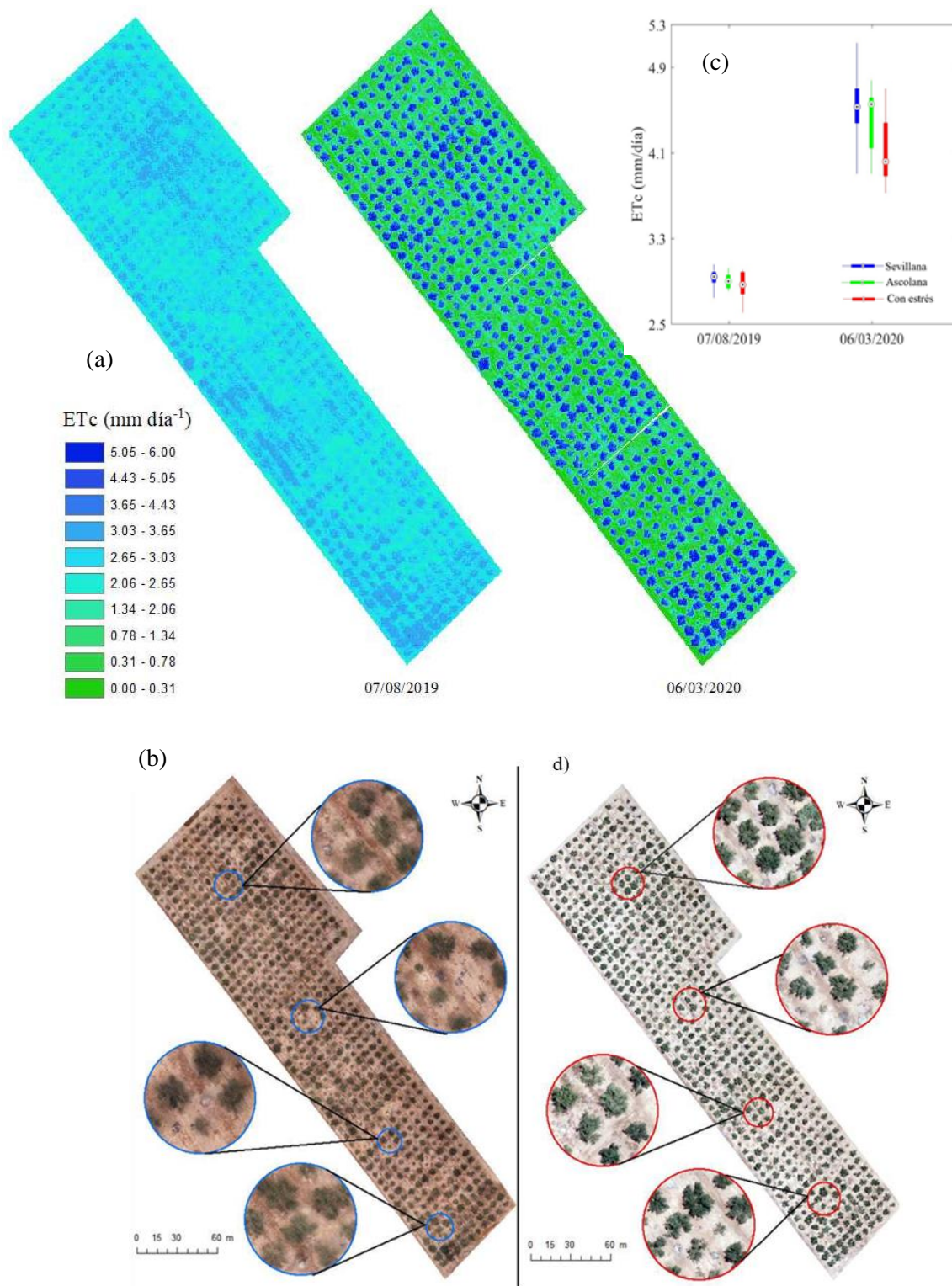


Figura 25: Distribución espacial de la ETc mediante el modelo METRIC (a), imagen RGB de los campos de olivo en invierno (izquierda) y verano (derecha) (b) y diagrama de caja de la ETc según variedades y condición de estrés del cultivo, por árbol (c), del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna

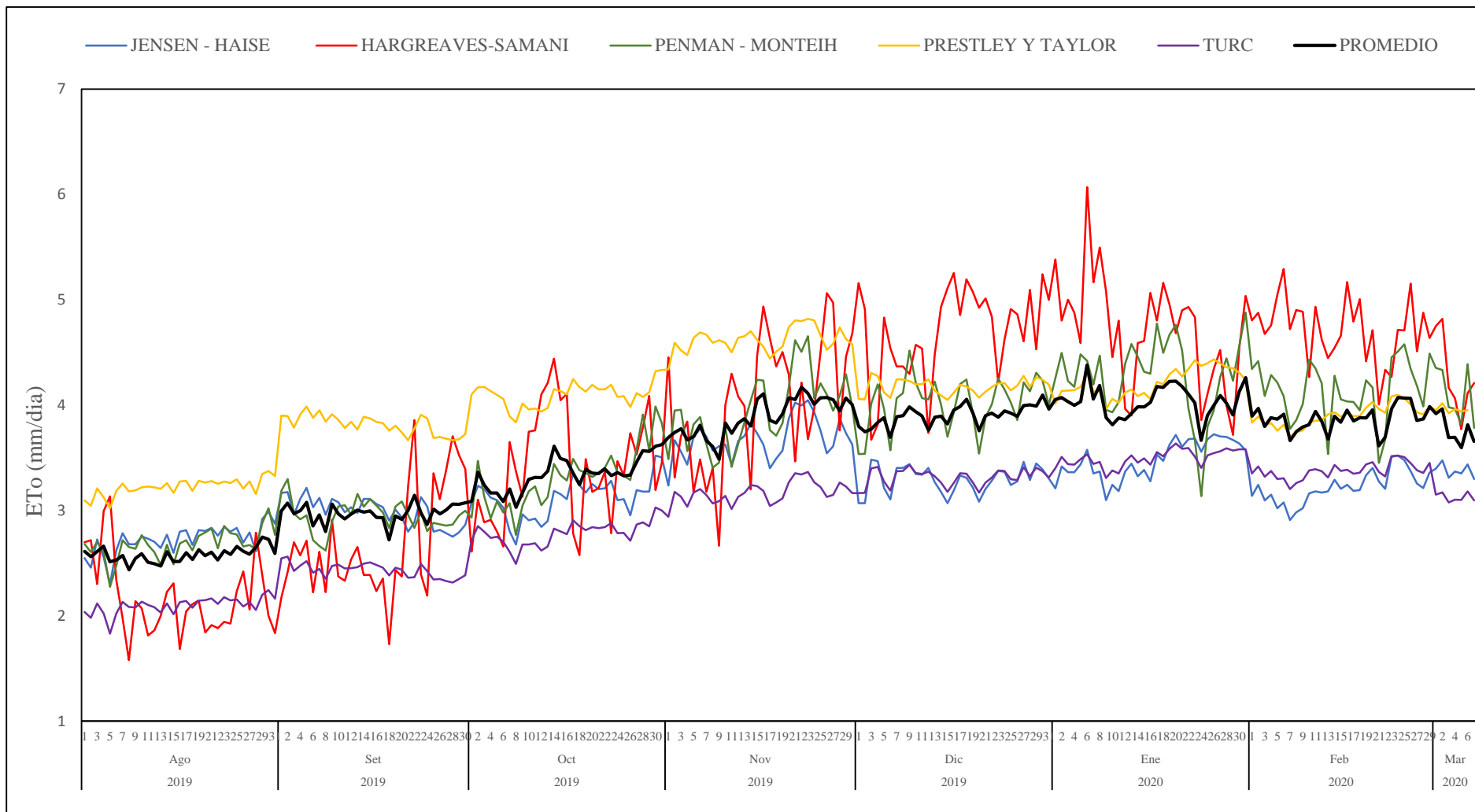


Figura 26: Evapotranspiración de referencia (ETo) estimada a partir de métodos indirectos (Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Penman-Monteih, Prestley y Taylor, Turc y promedio de todas), de agosto 2019 a marzo 2020, en La Yarada-Los Palos (Tacna)

4.4.1. Validación

Los valores de ETc de olivo obtenidos en la investigación, se muestran en la Tabla 12, encontrando valores bajos en inviernos y altos en verano; no existiendo diferencias significativas entre las variedades de olivo (Sevillana y Ascolana) según la prueba T de Student para un alfa del 5%.

Tabla 12: Valores (\bar{x} , S) de la ETc y ETrF según condición de estrés y sin estrés

Detalle	Invierno		Verano	
	sin estrés	con estrés	sin estrés	con estrés
ETc (mm d ⁻¹)	2,942±0,074	2,868±0,131	4,533±0,270	4,021±0,331
ETrF	1,231±0,269	1,200±0,262	1,132±0,138	1,000±0,122

Los valores de ETc, están acorde a lo obtenido por diversos autores (Tabla 13, Figura 27b). Es así que en la Tabla 13 se puede observar valores de ETc y ETrF estimadas a partir de diversos métodos y diferentes condiciones climáticas, de suelo y de manejo. Al respecto, Villalobos *et al.* (2000) encuentran que al migrar de un sistema de secano a de riego por goteo, los valores de ET medidos excedieron a los de ET estimados en 0,5-1 mm d⁻¹ debido a una mayor evaporación del suelo por mayor frecuencia de riego. En la Figura 27 se presentan los valores de ETo, ETc y ETrF obtenidos en el estudio; siendo la ETo, estimada por métodos indirectos (Jensen-Haise, Hargreaves-Samani, Penman-Monteith, Priestley-Taylor y Turc), con valores (\bar{x}) de 2,606 y 3,950 mm d⁻¹ en invierno y verano respectivamente.

Los valores del ETrF, están en el rango de [(0,88 a 1,67), (0,92 a 1,42)] para invierno y verano respectivamente (Figura 25 c), valores obtenidos de la relación entre la ETc por el modelo METRIC y las ETo de métodos indirectos. Estos valores tienen mayor variabilidad y son más altos en invierno debido a un aumento de la evaporación del suelo que ha captado la alta humedad del aire (camanchacas). Al respecto Paço *et al.* (2014) indican que, en invierno y otoño, valores de ETrF > 1, es debido a un aumento de la evaporación del suelo por la precipitación. Testi *et al.* (2006) encuentran valores de ETrF > 1,5 en invierno, que atribuye a una mayor humedad, por causa de precipitaciones, y los valores disminuyen hacia verano.

Tabla 13: Valores de ETc y ETrF según diversos investigadores

Clasificación climática Köppen-Geiger	Sistema de riego	Tamaño de pixel (m)	Método para estimar ETc	ETc (mm/d)	ETrF	Zona de estudio	Referencia
Mediterráneo típico (Csa)	Secano 70% y goteo 30%	5 x 5	METRIC	1,74-5,27	0,31-0,81	Córdoba, Málaga y Sevilla, España	Ramírez-Cuesta <i>et al.</i> (2019)
Mediterráneo típico (Csa)	Goteo	30 x 30	METRIC	0,92-6,00		Viana del Alentejo, Portugal	Pôças <i>et al.</i> (2014)
Mediterráneo típico (Csa)	Goteo	30 x 30	METRIC	0,90-6,00	0,40-1,20	Viana del Alentejo, Portugal	Paço <i>et al.</i> (2014)
Mediterráneo típico (Csa)	Goteo		Torre de flujo (Eddy covariance)	2,00-5,50	0,50-1,28	Córdoba, España	Villalobos <i>et al.</i> (2000)
Mediterráneo típico (Csa)	Goteo		Torre de flujo (Eddy covariance)		0,50-1,67	Córdoba, España	Testi <i>et al.</i> (2006)
Mediterráneo con influencia oceánica (Csb)	Goteo	30 x 30	Modelo de Wallace (SW)	1,34-3,69		Pencahue-Maule, Chile	Fuentes-Peñailillo <i>et al.</i> (2018)
Estepario (BSk)	Secano y goteo		Torre de flujo (Eddy covariance)	3,30 promedio	0,40-1,00	Zaragoza, España	Martínez-Cob y Faci (2010)
Pampeano (Cfa)	Goteo		Lisímetro de drenaje	1,00-5,50	0,60-0,78	Montevideo, Uruguay	Puppo <i>et al.</i> (2019)

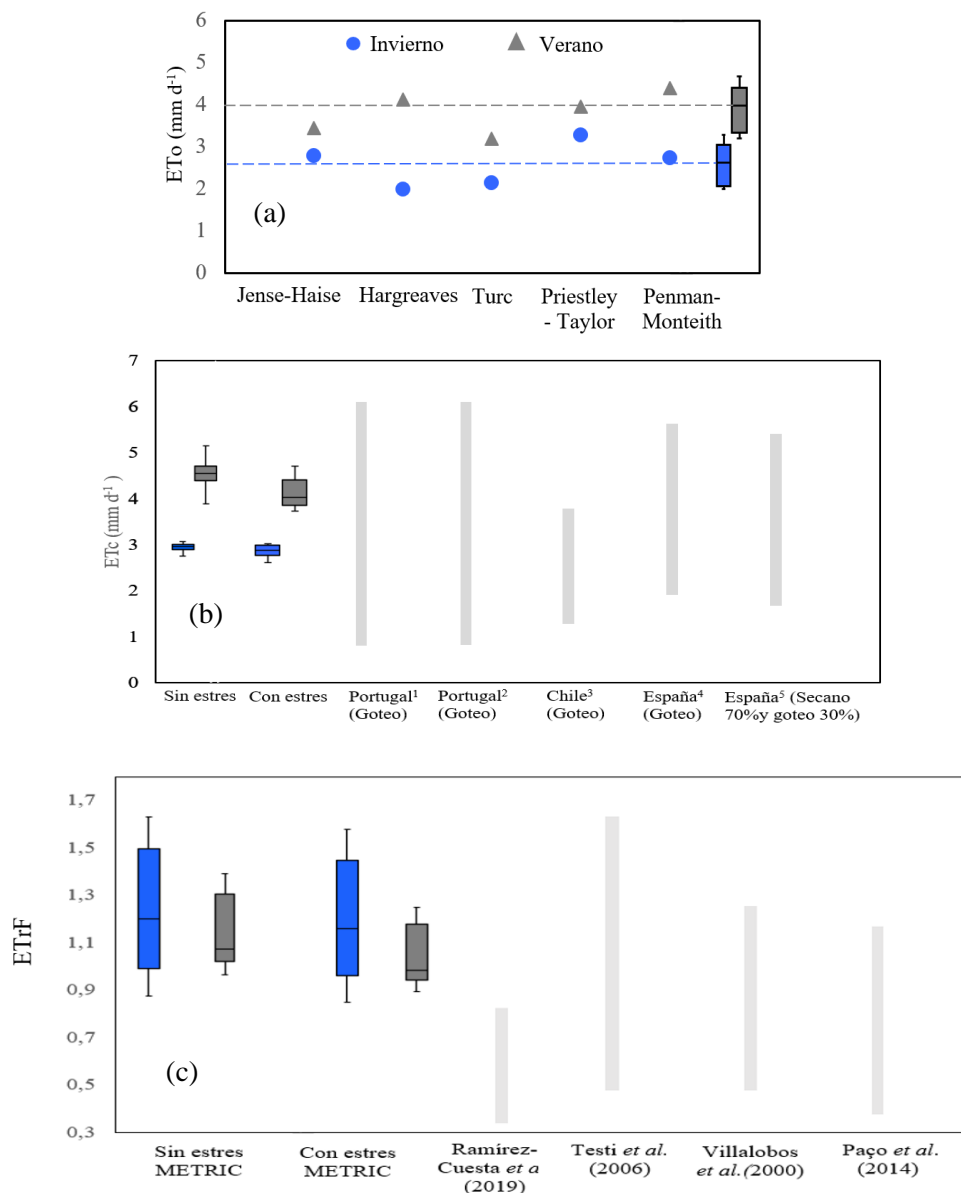


Figura 27: ET₀ estimada por métodos indirectos (a), ET_c estimada con el modelo METRIC y rango de valores de ET_c del olivo por diferentes autores (Pôças *et al.* (2014) (1), Paço *et al.* (2014) (2), Fuentes-Peñailillo *et al.* (2018) (3), Villalobos *et al.* (2000) (4) y Ramírez-Cuesta *et al.* (2019)(5)) (b) y valores de ETrF mediante el modelo METRIC y distintos autores(c) en La Yarada-Los palos (Tacna)

También, los valores de ETrF > 1, son debido a un manejo de riego diario, para evitar la tensión osmótica en el suelo por un agua de riego con problemas de salinidad (C3-S3) y suelo salino con valores de CE de 4,66, 3,43, 2,88, 2,37 dSm⁻¹ a profundidades de 20, 40, 60, 80 cm. (Ver Figura 32 a 35, Anexo 3). Según Bueno y Oviedo, (2014) para un normal crecimiento y producción del olivo adulto, los valores de CE en el suelo deberían ser menores

a 4 dS m^{-1} , se estima que la producción de fruto disminuya el 10% si la $\text{CE} > 4 \text{ dS m}^{-1}$; con un nivel de salinidad de suelo cercano a 8 dS m^{-1} el crecimiento y la producción puede verse severamente disminuida; en la Tabla 14 se visualiza valores de CE del suelo y como afectan en la producción.

Tabla 14: Reducción de la productividad en un olivar adulto, en función de la salinidad del suelo expresada como CE

CE (dSm^{-1}) del suelo	2,7	3,8	5,5	8,4
Reducción de producción (%)	0	10	25	50

FUENTE: Bueno y Oviedo, (2014)

Los valores de ETrF se relacionan principalmente con la transpiración y en consecuencia se deben a la cubierta verde del olivo, con mayor valor bajo riego constante, en comparación a olivares de secano. El ETrF es afectado también, por prácticas de poda, además de la propia arquitectura del dosel y otras tensiones abióticas como las sales en el suelo. Debe tenerse en cuenta que los olivos muestran un importante control estomático, cerrando las estomas en condiciones de alta demanda evaporativa y teniendo las estomas más abiertas en la mañana en la relación con la tarde (Ramírez-Cuesta *et al.*, 2019).

V. CONCLUSIONES

1. La ETc (mm d⁻¹) de un olivar bajo riego por goteo y sistemas de cultivo intensivo, obtuvieron con el modelo METRIC, valores \bar{x} de [(2,94 y 2,8) invierno; (4,53 y 4,02) verano], para arboles con estrés y sin estrés respectivamente. Los valores de ETrF variaron de 0,88 a 1,67 más alto en invierno debido a la frecuencia de riego diaria, para evitar las tensiones abióticas por las sales del agua de riego y suelo. Los valores de ETc se encuentra dentro del rango de valores de la bibliografía.
2. La calibración de los sensores es importante. por lo cual la calibración de imágenes térmicas y multiespectrales son prioritarias para la estimación de los componentes del balance de energía; obteniéndose r^2 de 0,97 en la calibración térmica y en la calibración multiespectral $r^2 > 0,80$.
3. La calibración de las variables con información de campo permite ajustar las variables a nivel terrestre, obteniéndose ajustes del NDVI y IAF para invierno y verano con $r^2 > 0,70$ lo que indica un buen ajuste entre el sensor multiespectral y los equipos de medición de campo.
4. Se obtuvieron valores del balance de energía en los rangos de 521 a 741, 19 a 107, 53 a 238, y 342 a 520, para Rn, G, H y LE respectivamente, valores mayores en 9 %, 7% y 18,5% para Rn, G, H, obtenidos por otros autores en condiciones similares de riego, pero con diferentes condiciones de arquitectura del árbol, clima, sistema de cultivo, densidad de plantación y variedad de olivo.

VI. RECOMENDACIONES

1. Incrementar las fechas de vuelo, en diferentes épocas del año para una mayor caracterización del campo.
2. Incrementar el número de mediciones del IAF en arboles de olivo para una mayor caracterización de la heterogeneidad del campo.
3. Instalar Torres de flujo para estimar la ETc por el método covarianza de remolinos, que permitan contrastar y corroborar con los datos del modelo METRIC a nivel de campo.
4. Establecer procesos de automatización mediante lenguaje de programación para la estimación del modelo METRIC.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Allen, R., Bastiaanssen, W., Tasumi, M., Trezza, R., & Waters, R. (2002). *SEBAL Surface Energy Balance Algorithms for Land Idaho Implementation Advanced Training and Users Manual List of Symbols*.
- Allen, R.G.; Tasumi, M. & Trezza, R. (2007). Satellite-Based Energy Balance for Mapping Evapotranspiration with Internalized Calibration (METRIC)—Model. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 133(4), 380–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2007\)133:4\(380\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2007)133:4(380))
- Allen, R.G. & Pereira, L.S. (2009). Estimating crop coefficients from fraction of ground cover and height. *Irrigation Science*, 28(1), 17-34. <https://doi.org/10.1007/s00271-009-0182-z>
- Allen, R.; Irmak, A.; Trezza, R.; Hendrickx, J.M.H.; Bastiaanssen, W. & Kjaersgaard, J. (2011). Satellite-based ET estimation in agriculture using SEBAL and METRIC. *Hydrological Processes*, 25(26), 4011–4027. <https://doi.org/10.1002/hyp.8408>
- Allen, R.G.; Burnett, B.; Kramber, W.; Huntington, J.; Kjaersgaard, J.; Kilic, A.; Kelly, C.; & Trezza, R. (2013). Automated Calibration of the METRIC-Landsat Evapotranspiration Process. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 49(3), 563-576. <https://doi.org/10.1111/jawr.12056>
- Bastiaanssen. (1995). Regionalization of surface flux densities and moisture indicators in composite terrain: A remote sensing approach under clear skies in Mediterranean climates (p.) [Phd, SC-DLO]. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/28279>

- Bueno, L. A., & Oviedo, A. S. (2014). Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria Ediciones Plantación del Olivo.
- Carvalho, H. F. de S., Moura, M. S. B. de, Silva, T. G. F. da, Silva, G. D., & Rodrigues, C. T. A. (2017). Calibração do ceptômetro Accupar para determinação do índice de área foliar na cana-de-açúcar. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1084785>
- Castañeda-Ibáñez, C.R.; Flores-Magdaleno, H.; Martínez-Menes, M.; Esparza-Govea, S.; Fernández-Reynoso, D.; Prado-Hernández, V.; Pascual-Ramírez, F.; Castañeda-Ibáñez, C.R.; Flores-Magdaleno, H.; Martínez-Menes, M.; Esparza-Govea, S.; Fernández-Reynoso, D.; Prado-Hernández, V. & Pascual-Ramírez, F. (2018). Estimación de la evapotranspiración mediante un balance de energía utilizando sensores remotos. *Ecosistemas y recursos agropecuarios*, 5(15), 537-545. <https://doi.org/10.19136/era.a5n15.1647>
- Cavalli, J.; Aragão, L.S.; Carvalho, P. de, Pereira, D.H. & Pedreira, B.C. e. (2016). Comparação de dois métodos para avaliação de índice de área foliar em cultivares de *panicum maximum*. <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1060743>
- Costales, G.A. (2018). Análisis comparativo entre los software de prueba Agisoft Photoscan y Pix4D para el procesamiento de datos obtenidos con fotogrametría de vehículo aéreo no tripulado (UAV) de bajo costo aplicado a proyectos de medio ambiente. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/19825>
- Cubero-Castan, M.; Schneider-Zapp, K.; Bellomo, M.; Shi, D.; Rehak, M. & Strecha, C. (2018). Assessment Of The Radiometric Accuracy In A Target Less Work Flow Using Pix4D Software. 2018 9th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 1-4. <https://doi.org/10.1109/WHISPERS.2018.8746910>
- Dou, X. & Yang, Y. (2018). Evapotranspiration estimation using four different machine learning approaches in different terrestrial ecosystems. *Computers and Electronics in Agriculture*, 148, 95-106. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.03.010>

- Duan, T.; Chapman, S.C.; Guo, Y. & Zheng, B. (2017). Dynamic monitoring of NDVI in wheat agronomy and breeding trials using an unmanned aerial vehicle. *Field Crops Research*, 210, 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.05.025>
- Felipetto, H. dos S. (2016). Desempenho de um vant na determinação de índices de vegetação da cultura de crambe. <http://tede.unioeste.br/handle/tede/2729>
- Fuentes-Peñailillo, F.; Ortega-Farías, S.; Acevedo-Opazo, C. & Fonseca-Luengo, D. (2018). Implementation of a Two-Source Model for Estimating the Spatial Variability of Olive Evapotranspiration Using Satellite Images and Ground-Based Climate Data. *Water*, 10(3), 339. <https://doi.org/10.3390/w10030339>
- Galvis Causil, S. & Prada Castellanos, R.V. (2017). Uso de imágenes satelitales Landsat 8 para la estimación de temperatura superficial de la tierra, caso de estudio: Ibagué – Tolima. <https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/handle/20.500.12746/3215>
- García, L.G.S.; Gennaro, F.S.D.; Langreo, A.H.; Jiménez, C.M.; Díaz, J.B.R. & Matese, A. (2016). Uso de imágenes térmicas de alta resolución y modelos de extrapolación bidimensional para estimar la variabilidad espacial y temporal del estado hídrico del viñedo. II Jornadas de Viticultura: comunicaciones técnicas: Madrid, 3-4 de noviembre de 2016, 2016, ISBN 978-84-617-6515-7, págs. 254-260, 254-260. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6018024>
- Gomes, K.R. (2016). Calibración de cámaras térmicas no refrigeradas para generación de productos geomáticos obtenidos por drones para uso en la agricultura. VI Jornadas doctorales de la Universidad de Castilla-La Mancha (Resúmenes de comunicaciones): Toledo, 18 de octubre de 2016. Programa y resúmenes, 2016, ISBN 978-84-16393-82-4, pág. 235, 235. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6365493>
- Gomes, K.R.; López, D.; Ortega, J.F.; Ballesteros, R.; Poblete, T. & Moreno, M. (2017). Calibración de Cámaras Térmicas No Refrigeradas Embarcadas En UAVs Para Aplicaciones Agronómicas. <https://doi.org/10.7127/IV-INOVAGRI-MEETING->

- Gómez del Campo, M.; Trentacoste, E.R. & Connor, D.J. (2012). Diseño y manejo del olivar en seto: Efecto en la producción y calidad del aceite. En *Revista de Fruticultura (España)* 24: 66-73 (2012) [Info:ar-repo/semantics/artículo]. Editorial Tècnica Quatrebcn (España). <http://repositorio.inta.gob.ar:80/handle/20.500.12123/6864>
- Hardin, P.J. & Jensen, R.R. (2011). Small-Scale Unmanned Aerial Vehicles in Environmental Remote Sensing: Challenges and Opportunities. *GIScience & Remote Sensing*, 48(1), 99-111. <https://doi.org/10.2747/1548-1603.48.1.99>
- Hoffmann, H.; Nieto, H.; Jensen, R.; Guzinski, R.; Zarco-Tejada, P.; & Friborg, T. (2016). Estimating evaporation with thermal UAV data and two-source energy balance models. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(2), 697-713. <https://doi.org/10.5194/hess-20-697-2016>
- Huaman Gutiérrez, A.H. (2015). Estimación espacial de la evapotranspiración real usando imágenes de satélite mediante algoritmo SEBAL caso: Irrigación Majes I - Arequipa. Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2163>
- Huete, A.R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25(3), 295-309. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(88\)90106-X](https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X)
- Häusler, M.; Conceição, N.; Tezza, L.; Sánchez, J.M.; Campagnolo, M.L.; Häusler, A.J.; Silva, J.M.N.; Warneke, T.; Heygster, G. & Ferreira, M. I. (2018). Estimation and partitioning of actual daily evapotranspiration at an intensive olive grove using the STSEB model based on remote sensing. *Agricultural Water Management*, 201, 188-198. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.01.027>
- Jiménez, L. & Celestino, P. (2017). Desarrollo de una plataforma para adquisición de imágenes basada en dron y cámara térmica con aplicación en agricultura.

<https://repositorio.upct.es/handle/10317/6093>

Koksal, E.S.; Artik, C. & Tasan, M. (2018). Crop Evapotranspiration Estimations of Red Pepper Using Field Level Remote Sensing Data and Energy Balance. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28. <https://doi.org/10.15244/pjoes/85351>

Martínez-Barbáchano, R. (2020). Estimación de la temperatura superficial en imágenes históricas Landsat 5 mediante corrección atmosférica monocanal en el término para la cuenca del río Tempisque-Bebedero (Costa Rica). *Revista Geográfica de América Central*, 65, 17-32. <https://doi.org/10.15359/rgac.65-2.1>

Martínez-Cob, A. & Faci, J.M. (2010). Evapotranspiration of an hedge-pruned olive orchard in a semiarid area of NE Spain. *Agricultural Water Management*, 97(3), 410-418. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.10.013>

Mendoza-Pérez, C.; Ramírez-Ayala, C.; Ojeda-Bustamante, W.; Flores-Magdaleno, H.; Mendoza-Pérez, C.; Ramírez-Ayala, C.; Ojeda-Bustamante, W. & Flores-Magdaleno, H. (2017). Estimation of leaf area index and yield of greenhouse-grown poblano pepper. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(1), 37-50. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.04.009>

Mikami, M.M. (2017). Arquitetura de software para otimização do uso de aeronaves remotamente pilotadas na agricultura de precisão utilizando raciocínio baseado em casos. <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/145>

Muñoz Aguayo, P. (2013). Apuntes de teledetección: Índices de vegetación. <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/123456789/26389>

Niu, H.; Hollenbeck, D.; Zhao, T.; Wang, D. & Chen, Y. (2020). Evapotranspiration Estimation with Small UAVs in Precision Agriculture. *Sensors*, 20(22), 6427. <https://doi.org/10.3390/s20226427>

- Niu, H.; Zhao, T.; Wang, D. & Chen, Y. (2019). *Evapotranspiration Estimation with UAVs in Agriculture: A Review*. <https://doi.org/10.20944/preprints201907.0124.v1>
- Numata, I.; Khand, K.; Kjaersgaard, J.; Cochrane, M.A. & Silva, S.S. (2017). Evaluation of Landsat-Based METRIC Modeling to Provide High-Spatial Resolution Evapotranspiration Estimates for Amazonian Forests. *Remote Sensing*, 9(1), 46. <https://doi.org/10.3390/rs9010046>
- Ortega-Farías, S.; Ortega-Salazar, S.; Poblete, T.; Kilic, A.; Allen, R.; Poblete-Echeverría, C.; Ahumada-Orellana, L.; Zuñiga, M. & Sepúlveda, D. (2016). Estimation of Energy Balance Components over a Drip-Irrigated Olive Orchard Using Thermal and Multispectral Cameras Placed on a Helicopter-Based Unmanned Aerial Vehicle (UAV). *Remote Sensing*, 8(8), 638. <https://doi.org/10.3390/rs8080638>
- Paço, T.A.; Pôças, I.; Cunha, M.; Silvestre, J.C.; Santos, F.L.; Paredes, P. & Pereira, L.S. (2014). Evapotranspiration and crop coefficients for a super intensive olive orchard. An application of SIMDualKc and METRIC models using ground and satellite observations. *Journal of Hydrology*, 519, 2067-2080. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.09.075>
- Pérez Cubas, H.S. (2020). Estimación del estrés hídrico del cultivo de arroz a partir de imágenes térmicas de un VANT en Ferreñafe, Lambayeque. <http://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/8251>
- Pino, V.E.; Montalván, D.I.; Vera, M.A.; Ramos, F.L.; Pino, V.E.; Montalván, D.I.; Vera, M.A. & Ramos, F.L. (2019). Stomatal conductance and its relationship with leaf temperature and soil moisture in olive cultivation (*Olea europaea* L.), in the period of fruit ripening, in arid zones. *La Yarada, Tacna, Perú. Idesia (Arica)*, 37(4), 55-64. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292019000400055>
- Pôças, I.; Paço, T.A.; Cunha, M.; Andrade, J.A.; Silvestre, J.; Sousa, A.; Santos, F.L.; Pereira, L.S. & Allen, R.G. (2014). Satellite-based evapotranspiration of a super-

intensive olive orchard: Application of METRIC algorithms. *Biosystems Engineering*, 128, 69-81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.06.019>

Puppo, L.; García, C.; Bautista, E.; Hunsaker, D.J.; Beretta, A. & Girona, J. (2019). Seasonal basal crop coefficient pattern of young non-bearing olive trees grown in drainage lysimeters in a temperate sub-humid climate. *Agricultural Water Management*, 226, 105732. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105732>

Quille Mamani, J.A. (2019). Evapotranspiración del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) estimada de imágenes multiespectrales obtenidas de un vehículo aéreo no tripulado (Vant). Universidad Nacional Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/4210>

Quille Mamani, J.A.; Ramos Fernández, L. & Ontiveros Capurata, R.E. (2021). Estimation of rice crop evapotranspiration in Peru based on the METRIC algorithm and UAV images. *Revista de Teledetección*, 58, 23-38. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.1369>

Ramírez-Cuesta, J.M.; Allen, R.G.; Zarco-Tejada, P.J.; Kilic, A.; Santos, C. & Lorite, I.J. (2019). Impact of the spatial resolution on the energy balance components on an open-canopy olive orchard. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 74, 88-102. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.09.001>

Ruzgienė, B.; Berteška, T.; Gečyte, S.; Jakubauskienė, E. & Aksamitauskas, V.Č. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*, 73, 619-627. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.04.018>

Tasumi, M. (2003). Progress in operational estimation of regional evapotranspiration using satellite imagery. Thesis (Ph. D.)--University of Idaho.

Tasumi, M.; Allen, R.G. & Trezza, R. (2008). At-Surface Reflectance and Albedo from Satellite for Operational Calculation of Land Surface Energy Balance. *Journal of*

Hydrologic Engineering, 13(2), 51-63. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:2\(51\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(51))

Tasumi, M.; Allen, R.G.; Trezza, R. & Wright, J.L. (2005). Satellite-Based Energy Balance to Assess Within-Population Variance of Crop Coefficient Curves. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 131(1), 94-109. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(2005\)131:1\(94\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(2005)131:1(94))

Testi, L.; Villalobos, F.J.; Orgaz, F. & Fereres, E. (2006). Water requirements of olive orchards: I simulation of daily evapotranspiration for scenario analysis. *Irrigation Science*, 24(2), 69-76. <https://doi.org/10.1007/s00271-005-0011-y>

Torres-Rua, A.; Ticlavilca, A.M.; Aboutalebi, M.; Nieto, H.; Alsina, M.M.; White, A.; Prueger, J.H.; Alfieri, J.; Hipps, L.; McKee, L.; Kustas, W.; Coopmans, C. & Dokoozlian, N. (2020). Estimation of evapotranspiration and energy fluxes using a deep-learning-based high-resolution emissivity model and the two-source energy balance model with sUAS information. *Autonomous Air and Ground Sensing Systems for Agricultural Optimization and Phenotyping V*, 11414, 114140B. <https://doi.org/10.1117/12.2558824>

Tsouni, A.; Kontoes, C.; Koutsoyiannis, D.; Elias, P. & Mamassis, N. (2008). Estimation of Actual Evapotranspiration by Remote Sensing: Application in Thessaly Plain, Greece. *Sensors*, 8(6), 3586-3600. <https://doi.org/10.3390/s8063586>

Velasco, E.; Bernabe, R.M. (2004). Emisiones biogénicas. Las emisiones de compuestos orgánicos volátiles no metano de la vegetación y óxido nítrico del suelo. Instituto Nacional de Ecología.

Villalobos, F.J.; Orgaz, F.; Testi, L. & Fereres, E. (2000). Measurement and modeling of evapotranspiration of olive (*Olea europaea* L.) orchards. *European Journal of Agronomy*, 13(2), 155-163. [https://doi.org/10.1016/S1161-0301\(00\)00071-X](https://doi.org/10.1016/S1161-0301(00)00071-X)

VIII. ANEXOS

ANEXO 1: PANEL FOTOGRÁFICO



a. Inicio de trabajo en el Área Experimental de Riego



b. Instalación de sensores del espectroradiómetro TriOs-Ramses



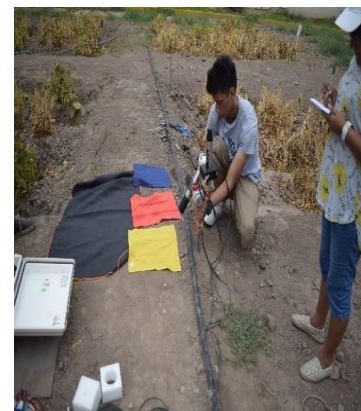
c. Medición de datos en cobertura de vegetación verde



d. Toma de datos en cobertura de suelo



e. Toma de datos en vegetación seca



f. Medición de datos en cobertura de colores

Figura 28: Lectura de la reflectancia en diferentes coberturas en el AER: 22 de enero del 2020 (12:00 y 1:00 pm)



a. Superficie de suelo desnudo.



b. Superficie de hojarasca.



c. Superficie de grass



d. temperatura del césped medido con radiometro



e. temperatura de una superficie blanca con agua descongelada medido con radiometro



f. Equipo de trabajo

Figura 29: Medición de la temperatura en diferentes coberturas con un radiómetro portátil en la Yarada Los Palos-Tacna: 06 de marzo del 2020 (12:00 y 2:00 pm)

ANEXO 2: FLUJO DE CALOR SENSIBLE (H)

Tabla 15: Iteración para el cálculo de flujo de calor sensible (H) del 07 08-2019

Iteraton #	a	b	Cold rah. s/m	Cold dT. C	Hot rah. s/m	Hot dT. C	Cold rah-change%	Hot rah-change%
1	1.46	-398.86	86.38	15.73	108.54	43.25		
2	0.02	-4.71	4.33	0.72	3.07	1.08	-1893.09	-3440.40
3	0.33	-86.63	46.07	8.12	35.06	14.41	90.59	91.26
4	0.08	-21.05	11.32	1.94	8.83	3.47	-306.90	-296.96
5	0.14	-34.90	28.95	5.08	18.97	7.74	60.89	53.44
6	0.11	-29.56	16.34	2.84	12.41	4.99	-77.19	-52.91
7	0.12	-29.52	23.52	4.12	15.65	6.35	30.54	20.72
8	0.12	-31.23	18.78	3.27	13.77	5.56	-25.22	-13.61
9	0.12	-29.37	21.64	3.78	14.77	5.98	13.18	6.75
10	0.12	-31.06	19.82	3.46	14.21	5.75	-9.17	-3.90
11	0.12	-30.73	20.23	3.53	14.35	5.80	2.05	0.94
12	0.12	-30.06	20.67	3.61	14.44	5.84	2.11	0.63
13	0.12	-30.52	20.40	3.56	14.39	5.82	-1.34	-0.35
14	0.12	-30.21	20.57	3.59	14.42	5.83	0.82	0.19
15	0.12	-30.42	20.46	3.57	14.40	5.83	-0.52	-0.10
16	0.12	-30.28	20.53	3.58	14.41	5.83	0.32	0.06
17	0.12	-30.37	20.48	3.57	14.41	5.83	-0.20	-0.03
18	0.12	-30.31	20.51	3.58	14.41	5.83	0.12	0.02
19	0.12	-30.35	20.49	3.58	14.41	5.83	-0.08	-0.01
20	0.12	-30.33	20.50	3.58	14.41	5.83	0.05	0.01
21	0.12	-30.34	20.50	3.58	14.41	5.83	-0.03	0.00
22	0.12	-30.34	20.50	3.58	14.41	5.83	0.01	0.00
23	0.12	-30.34	20.50	3.58	14.41	5.83	0.01	0.00
24	0.12	-30.34	20.50	3.58	14.41	5.83	0.00	0.00
25	0.12	-30.34	20.50	3.58	14.41	5.83	0.00	0.00

Tabla 16: Iteración para el cálculo de flujo de calor de aire (H) del 06-03-2020

Iteration #	a	b	Cold rah. s/m	Cold dT. C	Hot rah. s/m	Hot dT. C	Cold rah-change%	Hot rah-change%
1	0.21	-56.83	21.11	4.69	24.91	11.25		
2	0.07	-18.60	10.96	2.41	9.59	4.65	-92.57	-159.85
3	0.13	-35.01	14.79	3.28	14.86	7.36	25.89	35.49
4	0.11	-28.78	13.52	2.98	12.98	6.37	-9.44	-14.51
5	0.12	-30.93	13.95	3.08	13.63	6.71	3.13	4.76
6	0.11	-30.17	13.81	3.05	13.40	6.59	-1.07	-1.68
7	0.11	-30.44	13.86	3.06	13.48	6.63	0.36	0.58
8	0.11	-30.34	13.84	3.06	13.45	6.62	-0.12	-0.20
9	0.11	-30.38	13.84	3.06	13.46	6.62	0.04	0.07
10	0.11	-30.36	13.84	3.06	13.46	6.62	-0.01	-0.02
11	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.01
12	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
13	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
14	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
15	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
16	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
17	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
18	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
19	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
20	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
21	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
22	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
23	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
24	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00
25	0.11	-30.37	13.84	3.06	13.46	6.62	0.00	0.00

ANEXO 3: ANÁLISIS DEL AGUA DE RIEGO Y SUELO



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
 DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
 LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO
 Av. La Molina s/n Teléfono: 614 7800 Anexo 226 Lima Email: las-fia@lamolina.edu.pe



Nº 009246

ANÁLISIS DE AGUA - RUTINA

SOLICITANTE : EDWIN M. PINO VARGAS (UNJBG- TACNA)
PROYECTO : USO DE VEHICULOS AEROS NO TRIPULADOS PARA OBTENER HUMEDAD DEL SUELO EN EL OLIVO CON FINES DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN TIEMPO REAL EN LA YARADA, TACNA, PERÚ
PROCEDENCIA : La Yarada, Tacna, Perú
RESPONSABLE ANÁLISIS : Ing. Nore Arévalo Flores
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 22 de marzo 2019

Nº LABORATORIO	9246	
Nº DE CAMPO	Pozo IRHS 27	
CE mmhos/cm		1.35
pH		7.13
Calcio meq/l		0.62
Magnesio meq/l		0.81
Sodio meq/l		11.65
Potasio meq/l		0.38
SUMA DE CATIONES		13.47
Cloruro meq/l		5.06
Sulfato meq/l		5.85
Bicarbonato meq/l		1.92
Nitratos meq/l		0.01
Carbonatos meq/l		0.00
SUMA DE ANIONES		12.85
SAR		13.77
CLASIFICACION		C3-S3
Boro mg/L		1.04
Solidos suspendidos mg/L		1.20
Turbidez NTU		0.57
Dureza total mg/L		71.19
Alcalinidad total mg/L		95.92
Hierro mg/L		<0.08
Cobre mg/L		<0.035
Zinc mg/L		<0.012
Manganeso mg/L		<0.03
Plomo mg/L		<0.001
Cadmio mg/L		<0.005
Cromo mg/L		<0.05

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO

Ing. Msc. Miguel A. Sanchez Delgado
 JEFE DE LABORATORIO



Figura 30: Análisis de rutina del agua de riego utilizada en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna



**ANÁLISIS FÍSICO-QUÍMICO
 DE AGUA**

SOLICITANTE : EDWIN M. PINO VARGAS (UNJBG- TACNA)
PROYECTO : USO DE VEHICULOS AEREOs NO TRIPULADOS PARA OBTENER HUMEDAD DEL SUELO EN EL OLIVO CON FINES DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN TIEMPO REAL EN LA YARADA, TACNA, PERÚ
PROCEDENCIA : La Yarada, Tacna, Perú
RESPONSABLE ANALISIS : Ing. Nore Arévalo Flores
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 25 de marzo 2019

Nº LABORATORIO	4274	
Nº DE CAMPO	Pozo IRHS 27	
Turbiedad	NTU	0.57
Sólidos Totales	mg/L	971.50
Hierro	mg/L	<0.08
Plomo	mg/L	<0.001
Cobre	mg/L	<0.035
Cadmio	mg/L	<0.005
Manganeso	mg/L	<0.03
Zinc	mg/L	<0.012
Boro	mg/L	1.04
Magnesio	mg/L	9.70
Sulfatos	mg/L	296.64
Cloruros	mg/L	177.24
Dureza Total	mg/CaCO ₃ /L	71.19
Alcalinidad Total	mg/CaCO ₃ /L	95.92
pH		7.13
Nitratos	mg/L	0.77
Sodio	mg/L	268.00

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO
 Ing. Msc. Miguel A. Sanchez Delgado
 JEFE DE LABORATORIO



Figura 31: Análisis físico-químico del agua de riego utilizada en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO
 Av. La Molina s/n Teléfono: 614 7800 Anexo 226 Lima Email: las-fia@lamolina.edu.pe



Nº 014995

Análisis de Suelo - Salinidad y Sodicidad

SOLICITANTE : EDWIN M. PINO VARGAS (UNJBG- TACNA)
PROYECTO : USO DE VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS PARA OBTENER HUMEDAD DEL SUELO EN EL OLIVO CON FINES DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN TIEMPO REAL EN LA YARADA, TACNA, PERÚ
PROCEDENCIA : La Yarada, Tacna, Perú
RESP. ANÁLISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 22 de marzo 2019

Número de muestra		CE dS / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	MO %	P ppm	K ₂ O ppm	CaCO ₃ %	Cambiables						Microelementos totales				N %
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC TOTAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺ +H ⁺	Fe	Cu	Zn	Mn	
												Cmol (+) / Kg						ppm	ppm	ppm	ppm	
14995	M-1 0-20 cm	4.66	67.23	27.87	4.90	Franco arenoso	7.74	0.14	7.15	588.00	0.07	9.35	6.36	1.34	0.57	1.09	-	19785.00	35.16	119.90	279.55	0.10

MUESTRA		Saturación %	pH Suelo : Agua 1:3	C.E. dS/m 1:3	CATIONES SOLUBLES (meq/l)					ANIONES SOLUBLES (meq/l)						Yeso Soluble %	Boro Soluble ppm	Elementos pesados totales			Parámetros Hídricos	
Lab	Campo				Ca ⁺⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SUMA	Cl ⁻	SO ₄ ⁼⁼	CO ₃ ⁼⁼	HCO ₃ ⁼⁼	NO ₃	SUMA			Pb	Cd	Cr	Cc (%)	Pm (%)
14995	M-1 0-20 cm	33.20	7.87	6.81	12.08	3.49	3.12	50.48	69.17	26.48	39.87	0.00	2.66	0.01	69.03	0.16	0.00	33.51	1.14	<0,05	11.03	5.31

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO
 Ing. Msc. Miguel A. Sanchez Delgado
 JEFE DE LABORATORIO



Figura 32: Análisis de salinidad y sodicidad del suelo a una profundidad de 0 a 20 cm en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO
 Av. La Molina s/n Teléfono: 614 7800 Anexo 226 Lima Email: las-fia@lamolina.edu.pe



Nº 014996

Análisis de Suelo - Salinidad y Sodicidad

SOLICITANTE : EDWIN M. PINO VARGAS (UNJBG- TACNA)
PROYECTO : USO DE VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS PARA OBTENER HUMEDAD DEL SUELO EN EL OLIVO CON FINES DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN TIEMPO REAL EN LA YARADA, TACNA, PERÚ
PROCEDENCIA : La Yarada, Tacna, Perú
RESP. ANÁLISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 22 de marzo 2019

Número de muestra		CE dS / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	MO %	P ppm	K ₂ O ppm	CaCO ₃ %	Cambiales					Microelementos totales				N %	
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC TOTAL	Ca ^{**}	Mg ^{**}	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺ +H ⁺	Fe ppm	Cu ppm	Zn ppm		Mn ppm
												Cmol (+) / Kg										
14996	M-2 20 -40 cm	3.43	81.23	13.80	4.97	Arena franca	7.95	0.12	6.23	358.00	0.13	7.02	4.74	1.02	0.52	0.74	-	17475.00	24.95	93.15	283.45	0.10

MUESTRA		Saturación %	pH Suelo : Agua 1:3	C. E. dS/m 1:3	CATIONES SOLUBLES (meq/l)					ANIONES SOLUBLES (meq/l)					Yeso Soluble %	Boro Soluble ppm	Elementos pesados totales			Parámetros Hídricos		
Lab	Campo				Ca ^{***}	Mg ^{**}	K ⁺	Na ⁺	SUMA	Cl ⁻	SO ₄ ^{**}	CO ₃ ^{**}	HCO ₃ ^{**}	NO ₃			SUMA	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm	Cc (%)	Pm (%)
14996	M-2 20 -40 cm	32.40	7.75	5.10	5.70	1.47	1.50	42.39	51.06	19.82	29.91	0.00	1.44	0.05	51.23	0.04	0.00	23.93	1.59	<0,05	9.11	4.10

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO
 Ing. Msc. Miguel A. Sanchez Delgado
 JEFE DE LABORATORIO



Figura 33: Análisis de salinidad y sodicidad del suelo a una profundidad de 20 a 40 cm en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO

Av. La Molina s/n Teléfono: 614 7800 Anexo 226 Lima Email: las-fia@lamolina.edu.pe



Nº 014997

Análisis de Suelo - Salinidad y Sodicidad

SOLICITANTE : EDWIN M. PINO VARGAS (UNJBG- TACNA)
PROYECTO : USO DE VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS PARA OBTENER HUMEDAD DEL SUELO EN EL OLIVO CON FINES DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN TIEMPO REAL EN LA YARADA, TACNA, PERÚ
PROCEDENCIA : La Yarada, Tacna, Perú
RESP. ANÁLISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 22 de marzo 2019

Número de muestra		CE dS / m	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	MO %	P ppm	K ₂ O ppm	CaCO ₃ %	Cambiables						Microelementos totales				N %
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC TOTAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺ +H ⁺	Fe ppm	Cu ppm	Zn ppm	Mn ppm	
		Relación 1:1					Cmol (+) / Kg															
14997	M-3 40 -60 cm	2.88	91.16	3.80	5.04	Arena	7.28	0.03	3.18	278.00	0.12	5.18	3.30	1.05	0.35	0.48	-	21570.00	23.86	81.60	257.75	0.00

MUESTRA		Saturación %	pH Suelo : Agua 1:3	C.E. dS/m 1:3	CATIONES SOLUBLES (meq/l)					ANIONES SOLUBLES (meq/l)					Yeso Soluble %	Boro Soluble ppm	Elementos pesados totales			Parámetros Hídricos		
Lab	Campo				Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SUMA	Cl ⁻	SO ₄ ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻			SUMA	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm	Cc (%)	Pm (%)
14997	M-3 40 -60 cm	33.00	7.78	3.94	1.99	0.86	0.65	36.52	40.02	15.32	23.27	0.00	1.00	0.00	39.59	0.03	0.00	29.04	2.04	<0,05	7.75	3.25

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO
 Ing. Msc. Miguel A. Sanchez Delgado
 JEFE DE LABORATORIO



Figura 34: Análisis de salinidad y sodicidad del suelo a una profundidad de 40 a 60 cm en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna



UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA

FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

DEPARTAMENTO DE RECURSOS HÍDRICOS DRH
LABORATORIO DE AGUA, SUELO, MEDIO AMBIENTE Y FERTIRRIEGO

Av. La Molina s/n Teléfono: 614 7800 Anexo 226 Lima Email: las-fia@lamolina.edu.pe

Análisis de Suelo - Salinidad y Sodicidad



Nº 014998

SOLICITANTE : EDWIN M. PINO VARGAS (UNJBG- TACNA)
PROYECTO : USO DE VEHICULOS AEREOS NO TRIPULADOS PARA OBTENER HUMEDAD DEL SUELO EN EL OLIVO CON FINES DE PROGRAMACIÓN DE RIEGO EN TIEMPO REAL EN LA YARADA, TACNA, PERÚ
PROCEDENCIA : La Yarada, Tacna, Perú
RESP. ANÁLISIS : Ing. Elizabeth Monterrey Porras
FECHA DE ANÁLISIS : La Molina, 22 de marzo 2019

Número de muestra		CE dS / m Relación 1:1	Análisis Mecánico				pH Relación 1:1	MO %	P ppm	K ₂ O ppm	CaCO ₃ %	Cambiabiles						Microelementos totales				N %
Lab.	Campo		Arena %	Limo %	Arcilla %	Textura						CIC TOTAL	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺ +H ⁺	Fe ppm	Cu ppm	Zn ppm	Mn ppm	
												Cmol (+) / Kg										
14998	M-4 60 -80 cm	2.37	87.09	6.87	6.04	Arena franca	7.02	0.03	4.56	250.00	0.11	5.10	3.05	1.17	0.30	0.57	-	14400.00	25.81	80.70	209.20	0.00

MUESTRA		Saturación %	pH Suelo : Agua 1:3	C.E. dS/m 1:3	CATIONES SOLUBLES (meq/l)					ANIONES SOLUBLES (meq/l)					Yeso Soluble %	Boro Soluble ppm	Elementos pesados totales			Parámetros Hídricos		
Lab	Campo				Ca ⁺⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	SUMA	Cl	SO ₄ ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃			SUMA	Pb ppm	Cd ppm	Cr ppm	Cc (%)	Pm (%)
14998	M-4 60 -80 cm	31.60	7.62	3.17	0.89	0.51	0.51	30.00	31.92	12.34	18.30	0.00	0.72	0.01	31.37	0.03	0.00	25.62	1.43	<0.05	8.64	3.81

LABORATORIO DE ANÁLISIS DE AGUA Y SUELO
 Ing. Msc. Miguel A. Sanchez Delgado
 JEFE DE LABORATORIO



Figura 35: Análisis de salinidad y sodicidad del suelo a una profundidad de 60 a 80 cm en el cultivo de olivo del distrito Yarada-Los Palos de la región Tacna