



RPAS para precisión de la evapotranspiración en arrozales y reducir el consumo de agua*

Use of RPAS for precision evapotranspiration in rice fields and water consumption reduction

David Junior Quispe-Tito¹, Lia Ramos-Fernández¹, Edwin Pino-Vargas², Javier Quille-Mamani¹,
Alfonso Torres-Rua³

* Recepción: 25 de septiembre, 2023. Aceptación: 8 de enero, 2024. Este trabajo formó parte del proyecto “Uso de sensores remotos para determinar índice de estrés hídrico en el mejoramiento del manejo de riego de arroz (*Oryza sativa*) en zonas áridas, para enfrentar al cambio climático”. Convenio N° 008-2016-INIA-PNIA/UPMSI/IE

¹ Universidad Nacional Agraria La Molina, Departamento de Recursos Hídricos. Lima, Perú. 20211471@lamolina.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0003-3325-5512>); liarf@lamolina.edu.pe (autor para la correspondencia, <https://orcid.org/0000-0003-3946-7188>); jquille@unjb.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0002-5283-7211>).

² Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú. epinov@unjb.edu.pe (<https://orcid.org/0000-0001-7432-4364>).

³ Utah State University. Utah, USA. alfonso.torres@usu.edu (<https://orcid.org/0000-0002-2238-9550>).

Resumen

Introducción. La estimación de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) permite conocer los requerimientos de agua del cultivo, que ayudan a proponer técnicas de riego con ahorro de agua. **Objetivo.** Usar el sistema de aeronave pilotada remotamente (RPAs) para mayor precisión de la evapotranspiración en arrozales a fin de reducir el consumo de agua. **Materiales y métodos.** Para el estudio la distribución de parcelas siguió un diseño de bloques completamente al azar con estructura factorial de dos experimentos: riego inundado (E1) y riego con secas controladas (E2), y tres variedades de arroz (IR43, IR71706, Sahod Ulan 12); se llevó a cabo en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. Entre enero y febrero del 2019 se realizaron ocho vuelos, de un RPAs, distribuidos entre las etapas de macollamiento y punto de algodón. **Resultados.** El análisis combinado de tratamientos con análisis de varianza y prueba de Duncan con $p < 0,05$, reveló diferencia significativa de la ET_c, entre E1 y E2. Sin embargo, no se encontró diferencia significancia entre las variedades de arroz. Se obtuvo valores máximos de ET_c y rendimiento para E1 de 4,50 mm/d y 10 389 kg/ha, y para E2 de 3,7 mm/d y 9710 kg/ha, respectivamente. **Conclusiones.** El uso de un sistema de aeronave pilotada remotamente permitió mejorar la resolución temporal y espacial de las imágenes multiespectrales y térmicas para obtener mayor precisión en la evapotranspiración del cultivo (ET_c) bajo dos regímenes de riego. En el riego con secas controladas se obtuvo una reducción del 24 % de la ET_c lo que permitió un ahorro de agua de 855 m³/ha.

Palabras claves: arrozales, balance de energía, drone, riego con secas controladas.



Abstract

Introduction. Estimating crop evapotranspiration (ETc) helps determine water requirements, enabling the proposal of irrigation techniques that save water. **Objective.** To use remotely piloted aircraft system (RPAs) for greater precision in measuring evapotranspiration in rice fields, aiming to reduce water consumption. **Materials and methods.** The study utilized a randomized complete block design with a factorial structure of two experiments: flooded irrigation (E1) and irrigation with controlled drying (E2), and three rice varieties (IR43, IR71706, Sahod Ulan 12). The study was conducted at the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Peru. Eight RPAS flights were carried out between January and February 2019, distributed between the tillering and cotton point stages. **Results.** The combined analysis of treatments using analysis of variance (ANOVA) and Duncan's test with $p < 0.05$ revealed a significant difference in ETc between E1 and E2. However, no significant difference was found between the rice varieties. Maximum values of ETc and yield were obtained for E1 at 4.50 mm/day and 10389 kg/ha, and for E2 at 3.7 mm/day and 9710 kg/ha, respectively. **Conclusions.** The use of a remotely piloted aircraft system improved the temporal and spatial resolution of multispectral and thermal images, providing greater accuracy in crop evapotranspiration (ETc) under two irrigation regimes. Controlled drying irrigation resulted in a 24% reduction in ETc, allowing for a water saving of 855 m³/ha.

Keywords: rice paddies, energy balance, drone, controlled dry irrigation.

Introducción

El crecimiento de la población mundial lleva a un incremento en la necesidad de agua para la producción de alimentos (Ouda & Zohry, 2022). Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), aproximadamente 4000 millones de personas en el mundo experimentan escasez de suministro de agua durante un mes al año (Hussain et al., 2022). Además, el cambio climático está relacionado con el agua, lo que provoca alteraciones en el ciclo hidrológico y una distribución irregular de las precipitaciones. También se observa un aumento de la temperatura en diferentes partes del mundo, lo que resulta en una mayor evaporación y evapotranspiración (ET) de los cultivos (Ouda & Zohry, 2022; Roy et al., 2022; Zobeidi et al., 2022). La evapotranspiración (ETc), que es un componente clave del ciclo hidrológico y es necesario para planificar el riego de manera eficiente, influye en la demanda de agua de los cultivos (Shabir et al., 2023).

El Perú, se encuentra entre los países que presentan escasez de agua media a alta (20 – 40 %), según la relación de extracción y disponibilidad del recurso hídrico en el mundo (Hussain et al., 2022). Sin embargo, uno de sus principales cultivos demandantes de agua es el arroz (Fonseca Salazar et al., 2012), con un consumo de 12 000 m³/ha y 20,000 m³/ha en la costa del Perú (Neira Huamán et al., 2020), por lo que será uno de los más afectados por el cambio climático (Zhou et al., 2020). Este cultivo es fundamental para más de la mitad de la población mundial y se espera que la demanda aumente un 28 % para el año 2050 (Jiang et al., 2019). Además, el consumo per cápita anual por persona es de 63,5 kg de arroz, se siembran 4 175 970 m² en los que se producen 3 436 637 t, con un rendimiento promedio de 0,00082 t/m² (Food and Agriculture Organization [FAO], n.d). En este sentido, en la costa norte de Perú (Piura, Lambayeque y La Libertad), dominadas por planicies costeras áridas, se sembró un aproximado de 715 000 m² con una producción de 1 017 267 t para el periodo del 2021 (FAO, n.d).

Ante escenarios futuros de sequías es necesario nuevas técnicas de ahorro de agua, como el riego alternativo de humedecimiento y secado (AWD), el trasplante en suelos no encharcados, el cultivo en suelos saturados, el sistema de camas elevadas (Cheng et al., 2022; Ishfaq et al., 2020; Kumar & Rajitha, 2019). Se han realizado numerosos

esfuerzos para promover la técnica AWD, en su mayoría en países asiáticos, por ejemplo, China tiene el 41 % de sus campos de arrozales irrigados con AWD, seguido de Tailandia, Bangladesh, Vietnam y Filipinas (Cheng et al., 2022; Chu et al., 2018; Ishfaq et al., 2020).

La ET puede estimarse con base en ecuaciones empíricas o algoritmos de detección remota, además de métodos tradicionales de medición como lisímetros, sensores de humedad y torres de flujo turbulento; sin embargo, tienen un costo elevado de adquisición e instalación y ofrecen información puntual (Niu et al., 2020; Saha et al., 2022). Con la implementación de los sensores remotos, se dispone de información de imágenes, que permite caracterizar la fenología del cultivo (Saha et al., 2022) y, con el balance de energía en la superficie, estimar la ET. Es así que el modelo METRIC™ (Mapping Evapotranspiration at High Resolution using Internalized Calibration) calcula la ET como un residual en el balance de la energía de la superficie (Allen et al., 2007).

Las plataformas satelitales presentan limitación en términos de resolución espacial y la disponibilidad de datos en tiempo real (Ortega-Farías et al., 2016). No así, la utilización del sistema de aeronaves pilotadas remotamente (RPAs) con sensores ópticos y multiespectrales de alta resolución espacial, pero requieren un alto tiempo computacional (Niu et al., 2020). Utilizar RPAs permite obtener datos precisos a nivel espacial y temporal, lo que facilita una mejor gestión del riego, se optimiza así el uso del agua en las parcelas agrícolas, además de tener acceso a áreas más extensas o difíciles de alcanzar y proporcionar una visión más completa del consumo hídrico en diferentes zonas del campo, para garantizar la seguridad hídrica frente a probables sequías en el futuro (Nhamo et al., 2020). Algunas investigaciones han estimado ET a partir de imágenes de un RPAs: arrozales (Quille-Mamani et al., 2021), algodón (Bian et al., 2019), menta verde, papa y alfalfa (Chandel et al., 2022).

Las imágenes de alta resolución espacial pueden ser útiles para identificar respuestas espacialmente heterogéneas al estrés hídrico, lo que permitiría una gestión del agua más eficiente. Será importante realizar un monitoreo a largo plazo para registrar la variabilidad de la ET en relación al tiempo (Niu et al., 2020). En este contexto, esta investigación estableció como objetivo usar el Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente (RPAs) para mayor precisión de la evapotranspiración en arrozales a fin de reducir el consumo de agua.

Materiales y métodos

Zona de estudio

El estudio se realizó en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Distrito La Molina, Lima, Perú (coordenadas geográficas latitud: 12° 04' 50" S; longitud: 76° 57' W), a una altitud de 244 m s. n. m. (Figura 1).

La información climática se registró en una estación automática instalada en la zona de estudio. Se registraron de la estación meteorológica (Davis Pro2): temperatura horaria máxima y mínima promedio de 27,17 y 19,53 °C (Ta), respectivamente, velocidad de viento de 0,67 m/s (u), precipitación de 0,01mm (pp), humedad relativa de 79,07 % (Hr) y evapotranspiración de referencia de 3,13 mm/h (Eto). El agua de riego provenía del río Rímac, con conductividad eléctrica (CE) de 0,63 dS/m, pH de 7,78 y relación de absorción de sodio (RAS) de 0,535. Esta agua se considera de tipo C2-S1, lo que significa que tiene un bajo contenido de sodio y una salinidad media. Se dispuso de un reservorio de 12 m³ y un tanque de 25 m³ en el AER. El suelo fue franco arcillo arenoso con densidad aparente de 1,65 g/cm³, humedad a capacidad de campo y saturación de 28,8 cm³/cm³ y 44,9 cm³/cm³, respectivamente, con CE de 0,76 dS/m y pH de 7,36.

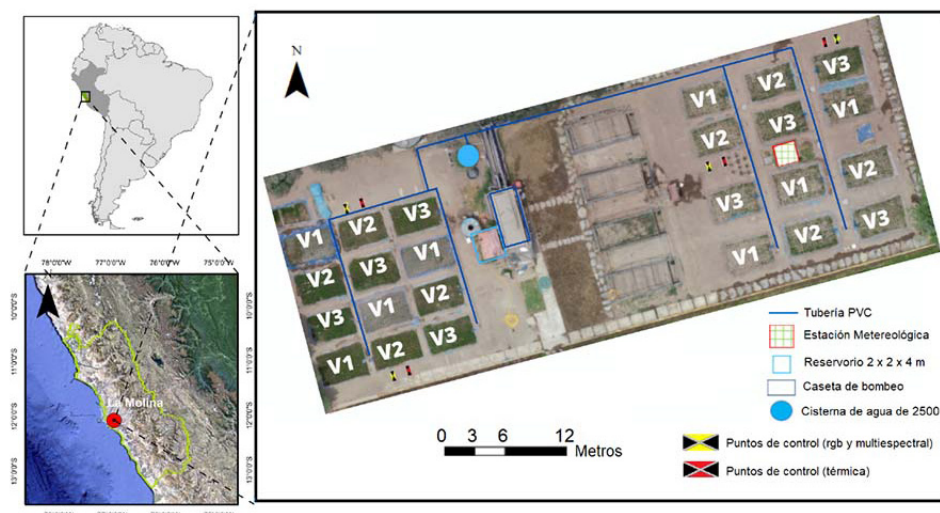


Figura 1. Ubicación del experimento de arroz (*Oryza sativa*), en el Área Experimental de Riego, Universidad Nacional Agraria la Molina, 2019.

Sistema de referencia WGS 84-17S.

Figure 1. Location of the rice experiment (*Oryza sativa*), in the Experimental Irrigation Area, Universidad Nacional Agraria la Molina, 2019.

Reference system WGS 84-17S.

Diseño y tratamientos

La distribución de parcelas siguió un diseño de bloques completamente al azar con estructura factorial de dos experimentos y cuatro repeticiones con tres variedades de arroz: IR43 (Heros Aguilar et al., 2023), IR71706 (Villar Barraza et al., 2021) y Sahod Ulan 12 (Abebe et al., 2017), variedades distribuidas en veinticuatro parcelas de 4,0 m x 2,5 m. De estas parcelas, doce fueron sometidas a riego inundado con una lámina de agua ≤ 5 cm (E1), mientras que las otras doce fueron regadas con secas controladas (E2), con un 65 % de humedad en el suelo saturado. Los tratamientos se realizaron durante los estadios de macollamiento a punto de algodón (E2), que correspondían de 48 a 101 días después de siembra (DDS). Además, la fecha de siembra fue el 27 de noviembre de 2019 con evaluaciones a los 49, 52, 56, 61, 64, 65 y 68 días después de la siembra (DDS). En el cultivo se diferenciaron tres etapas fenológicas (estadios): 1) vegetativa (emergencia, plántula, macollamiento), 2) reproductiva (primordio floral, estado de uso y floración) y 3) maduración (grano lechoso, grano ceroso, grano maduro y madurez fisiológica). Estas fases se distinguieron mediante la observación de características propias de cada estadio (Porras-Jorge et al., 2020).

Medición en campo de NDVI e IAF

La medición en campo del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), se realizó con un sensor portátil GreenSeeker, que registró lecturas a 30 cm sobre las plantas de arroz. Se realizaron seis mediciones por parcela con un total 144 datos por fecha de registro.

Las mediciones del índice de área foliar se realizaron con un ceptómetro portátil ACCUPAR LP-80 (METER Group, Pullman, WA, USA), que consta de una matriz lineal de ochenta sensores independientes de radiación

fotosintéticamente activa (PAR) y mide en el rango de longitud de onda de 400 a 700 nm y en unidades $\mu\text{mol m}^2/\text{s}$, su función se basa en la cantidad de luz interceptada en el dosel del cultivo. El ceptómetro se ubicó a 5 cm de altura sobre el suelo, y el sensor externo a 1,5 m sobre el suelo, se realizaron tres mediciones por cada parcela, con un total de 72 datos por fecha de registro.

Colecta de imágenes multiespectrales, térmicas y RGB.

Se colectaron imágenes multiespectrales con una cámara Parrot Sequoia (Parrot S.A., France). Esta cámara tiene un sensor RGB y cuatro sensores multiespectrales que capturan en las bandas espectrales verde (550 nm), rojo (660 nm), borde rojo (735 nm) e infrarrojo cercano (790 nm).

El sensor térmico corresponde a una cámara FLIR Vue Pro R 640, fabricado por FLIR Systems (Wilsonville, EE.UU.). Esta cámara cuenta con un lente de 13 mm y frecuencia de 30 Hz, para registrar mediciones de temperatura en el rango de 7,5 – 13,5 μm . Su precisión es de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ y sensibilidad térmica de $0,05^\circ\text{C}$. Se utilizó la aplicación FLIR UAS, V2.2.4, obteniéndose la imagen en formato TIFF (temperatura relativa) y el formato Radiometric-JPG ($^\circ\text{C}$).

Los valores de temperatura se calibraron a partir de información medida con sensores termocuplas (modelo TT-T-36-SLE-500, tipo T) que estuvieron en contacto directo con las hojas, por medio de una malla adhesiva, y se registró la temperatura del cultivo. Se colectaron lecturas cada 5 min, almacenadas en el datalogger Campbell Scientific (Utah, EE.UU.) Las cámaras se acoplaron a un RPAS multirotor, modelo Matrice 210, Pekín, China.

Las imágenes se corrigieron radiométrica, atmosférica y geométricamente. Para la calibración radiométrica de las imágenes multiespectrales, se utilizó un panel de reflectancia calibrada (tarjeta AIRNOV) y un sensor de luz solar (Sushine) que ajusta automáticamente las lecturas a la luz ambiental. Además, se aplicó la ecuación de calibración obtenida de la corrección de la cámara multiespectral con un espectrorradiómetro (Machaca-Pillaca et al., 2022). La calibración atmosférica se realizó a las imágenes térmicas. Con el software Flir vue Pro se registraron los datos de temperatura del ambiente, humedad relativa y emisividad (Durán Gómez et al., 2021).

Se georreferenciaron seis puntos de control geodésico (GCPs) posicionados con equipo geodésico GNSS. Los GCPs se ubicaron en los límites y acceso de parcelas con mayor visibilidad.

Plan de vuelo y generación de ortomosacios

El plan de vuelo para RPAS se programó con la aplicación DJI Gsp Pro, v2.0.15, con una velocidad de 2 m/s, altura de 20 m, traslape frontal de 80 % y lateral de 75 %. Se obtuvieron las imágenes con resolución de 5472 x 3648 pixeles, 1280 x 960 pixeles y 640 x 512 pixeles, con las cámaras RGB, multiespectral y térmica, respectivamente. Y de acuerdo al plan de vuelo, las imágenes resultaron con una resolución de 2,20 x 2,20 cm en cámara multiespectral que se ajustaron a pixeles de 2,5 x 2,5 cm.

Se realizaron nueve vuelos en la etapa de macollamiento entre las 12:00 pm y 13:00 pm a cielo despejado. Las imágenes RGB, multiespectrales y térmicas, fueron procesadas en el software fotogramétrico Pix4D V4.4.12 para la conformación de ortomosaicos y modelos digitales de superficie (MDS).

Se calculó el NDVI con base en las bandas espectrales RED y NIR, y se comparó con el NDVI medido en campo con el GreenSeekerTM, obteniéndose una ecuación lineal que permitió estimar los valores de NDVI calculados. La fórmula empírica para hallar el NDVI se presenta a continuación en la ecuación 1.

$$NDVI = \frac{IRC - R}{IRC + R} \quad (1)$$

Donde, NDVI es el índice de vegetación de diferencia normalizada, el IRC es la banda del infrarrojo cercano y el R es la banda roja.

El IAF, que representa la cantidad de radiación que las plantas utilizan en la fotosíntesis, se obtuvo de la relación entre el IAF medido en campo por el ceptómetro y NDVI corregido con datos recolectados en campo, acorde con lo realizado por Fan et al. (2009).

Modelo de balance de energía

El mapeo de la evapotranspiración en alta resolución y con calibración internalizada (METRIC, por sus siglas en inglés), es un modelo de procesamiento de imágenes satelitales para estimar la ET, se obtiene como un residuo del balance energético (ecuación 2) (Allen et al., 2007).

$$LE = R_n - G - H \quad (2)$$

Donde, LE es el flujo de calor latente (W/m^2), R_n es la radiación neta en la superficie (W/m^2), G es el flujo de calor del suelo (W/m^2) y H es el flujo de calor sensible al aire (W/m^2).

METRIC realiza un balance completo de la radiación según Niu et al. (2020). Además, se apoya con la energía junto con las resistencias para el impulso, el calor y el transporte de vapor de agua para cada píxel en un área determinada.

El cálculo de la radiación neta (R_n) se basa en la ecuación 3, con la cual se suma la radiación entrante y se resta la saliente.

$$R_n = (1 - \alpha)R_{s\downarrow} + R_{L\downarrow} - R_{L\uparrow} - (1 - \epsilon_o)R_{L\downarrow} \quad (3)$$

Donde, $R_{s\downarrow}$ es la radiación de onda corta incidente (W/m^2), α es el albedo de la superficie, $R_{L\downarrow}$ es la radiación de onda larga incidente (W/m^2), $R_{L\uparrow}$ es la radiación de onda larga emitida (W/m^2) y ϵ_o es la emisividad térmica de la superficie, la cual es adimensional.

El albedo se calculó como la media entre las reflectancias normalizadas de las bandas rojo (R) e infrarrojo cercano (IRC) de las imágenes multiespectrales (Machaca-Pillaca et al., 2022; Quille-Mamani et al., 2021; Tsouni et al., 2008). En relación con las variables internas de la R_n , es importante destacar que se utilizaron las ecuaciones propuestas por Allen et al. (2007). Sin embargo, estas ecuaciones fueron desarrolladas para el análisis de imágenes satelitales, mientras que en este estudio se aplicaron a imágenes capturadas por un RPA.

Para la obtención del flujo de calor del suelo (G) se aplicaron la ecuación 4 y 5, que dependen del IAF (Suwanlertcharoen et al., 2023).

$$G = R_n(0,05 + 0,18e^{-0,521IAF}) \quad IAF \geq 0,5 \quad (4)$$

$$G = R_n \left(\frac{1,8(T_s - 273,15)}{R_n} + 0,084 \right) \quad IAF < 0,5 \quad (5)$$

Donde, G es flujo de calor del suelo (W/m^2), R_n es radiación neta (W/m^2), IAF es índice de área foliar y T_s es temperatura superficial ($^{\circ}C$); dichos valores se obtuvieron de del mosaico generado a partir de las imágenes de la cámara térmica.

El flujo de calor sensible del aire (H) se calcula con el uso de una función aerodinámica (ecuación 6). Se inició con el cálculo de la rugosidad de la superficie, la velocidad del viento y los rangos de temperatura de la superficie. Donde r_{ah} es la resistencia aerodinámica (s/m). El valor de H se calcula a partir de la rugosidad de la superficie, la velocidad del viento y los rangos de temperatura.

$$H = \rho_{\text{aire}} C_p \frac{dT}{r_{ah}} \quad (6)$$

Donde, r_{ah} es la resistencia aerodinámica ($s\ m^{-1}$) entre dos alturas superficiales. C_p es la capacidad de calor específico del aire, su valor equivale a $1004\ J/kg\ K$, y ρ es la densidad del aire kg/m^3 . Las ecuaciones requeridas para H están indicadas por Allen et al. (2007) y Quille-Mamani et al. (2021).

Los píxeles fríos y calientes definen el límite del flujo de calor sensible. El píxel frío generalmente se selecciona de un área bien regada sin estrés hídrico (H mínimo y ET máximo). El píxel caliente se toma de un campo seco y desnudo (H máximo y ET es casi cero) (Niu et al., 2020). El modelo METRIC recomienda seleccionar píxeles fríos en un lugar homogéneo y bien regados con NDVI de 0,76 a 0,84 y α de 0,18 a 0,24, recomendado por Allen et al. (2007) y Hardin y Jensen (2011). Los píxeles calientes se deben seleccionar en suelo árido, desnudo y homogéneo con NDVI $< 0,2$ y α de 0,17 a 0,23.

La fracción de ET de referencia (ET_rF), se calcula de la relación entre la ET instantánea (ET_{inst}) de cada píxel y la ET de referencia (ET_o) (Allen et al., 2007). La ET_o fue calculada por el método de Penman Monteith (mm/h) con datos extraídos de la estación meteorológica automática Davis-modelo Vantage PRO 2, instalada en la zona de estudio.

El modelo METRIC calcula la ET_{24} (ecuación 7) del producto de la ET_oF (similar al coeficiente del cultivo K_c). Con la ET_{o-24} , que resultó este último igual a la sumatoria de las ET_o de cada hora del día (Allen et al., 2007).

$$ET_{24} = ET_rF \times ET_{o-24} \quad (7)$$

Donde, ET_{24} es la ET diaria (mm/d) y el ET_{o-24} es la sumatoria de la ET de cada hora de todo el día.

La colecta de información de campo y los equipos utilizados durante el monitoreo del cultivo, se muestran en la Figura 2.

Resultados

Calibración de imágenes térmicas

Los valores de la temperatura absoluta de la superficie, proporcionada por las imágenes radiométricas en formato RJPG de la cámara FLIR, se calibraron mediante una correlación lineal con los valores registrados a partir de sensores termopar, en las hojas del cultivo de arroz. Esto se realizó en concordancia con las condiciones ambientales de la zona de estudio. Se obtuvo una ecuación de corrección ($Y_{\text{termopar}} = 0,6329 X_{\text{cámara-termica}} + 11,598$) con un coeficiente de Pearson de 0,76 (Figura 3).

Índices de vegetación

Se logró establecer una relación lineal entre el NDVI medido en el campo y el estimado a partir de imágenes multispectrales. La ecuación de corrección resultante fue $Y_{\text{GREENSEEKER}} = 0,959 X_{\text{CÁMARA-Multiespectral}} - 0,0238$, y el coeficiente de determinación (R^2) alcanzó 0,604 (Figura 4a). Para la estimación espacial del IAF, se realizó una correlación con el NDVI. Los datos recolectados en campo (IAF, NDVI) generaron una correlación exponencial con la ecuación $Y_{\text{IAF}} = 0,0202e^{(3,888 X_{\text{ndvi}})}$, que presentó un coeficiente de determinación (R^2) de 0,539 y un error cuadrado medio (RMSE) de 0,35 (Figura 4b). Estos valores son específicos para las condiciones climáticas locales y el dosel del cultivo, observados durante el período entre macollamiento y punto de algodón.

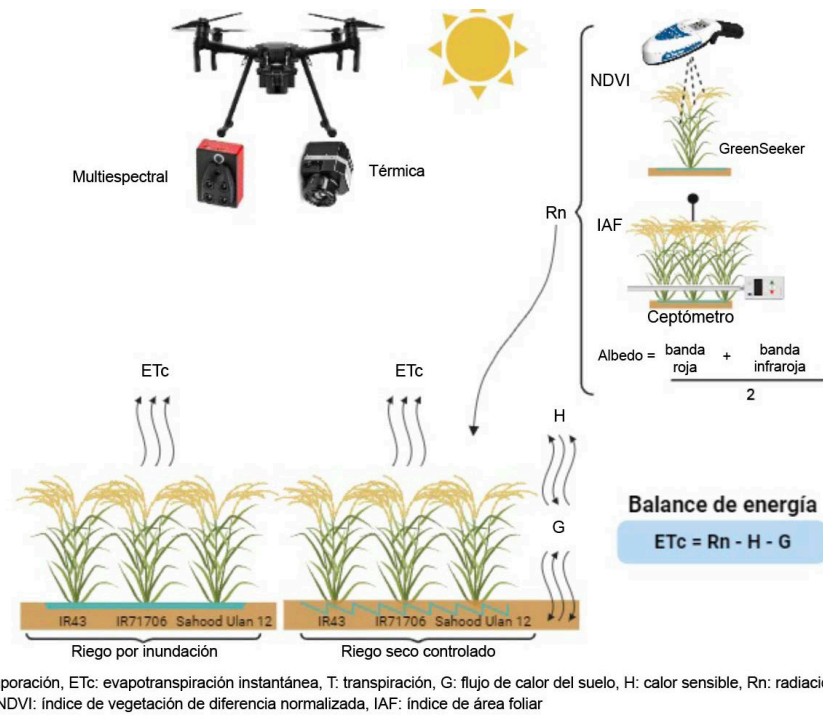


Figura 2. Recolección de información durante el monitoreo del cultivo de arroz (*Oryza sativa*), en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Noviembre 2019.

Figure 2. Data collection during the monitoring of rice cultivation (*Oryza sativa*) in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru. November 2019.

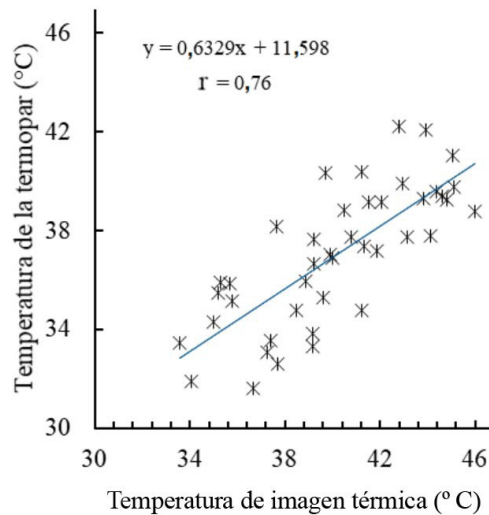


Figura 3. Relación de la temperatura del cultivo de arroz (*Oryza sativa*), registrado por el termopar y la temperatura registrada por la cámara térmica, en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Noviembre, 2019.

Figure 3. Relationship between the temperature of rice cultivation (*Oryza sativa*) recorded by the thermocouple and the temperature recorded by the thermal camera in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru. November 2019.

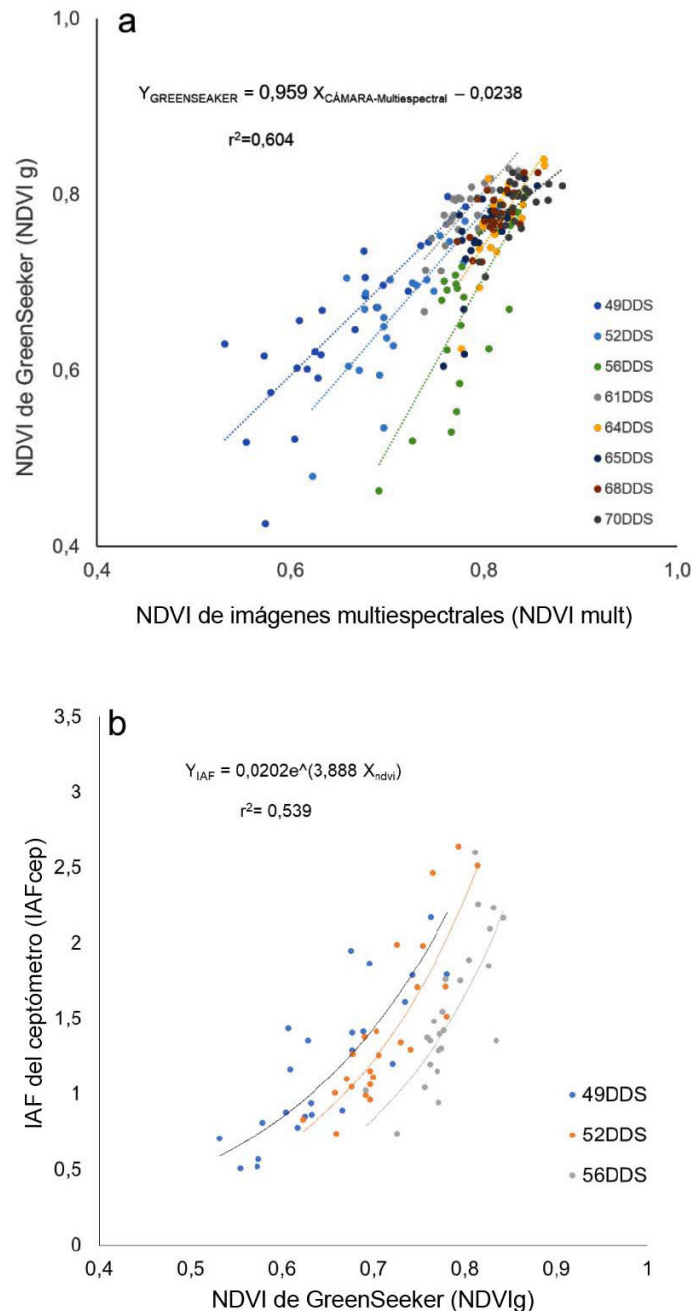


Figura 4. Relación del índice de vegetación diferencia normalizada medido con GreenSeeker (NDVIg) y el estimado a partir de imágenes multiespectrales (NDVI mult) (a), y relación del índice de vegetación diferencia normalizada medido con GreenSeeker (NDVIg) e índice de área foliar del ceptómetro (IAFcep) (b), durante el monitoreo del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. Noviembre 2019.

Figure 4. Ratio of the normalized difference vegetation index measured with a GreenSeeker (NDVIg) and that estimated from multispectral imagery (NDVI mult) (a), and the ratio of NDVI measured with GreenSeeker (NDVIg) and leaf area index measured by ceptometer (IAFcep) (b), during the monitoring of rice cultivation (*Oryza sativa*) in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru. November 2019.

Selección del píxel frío y caliente

Los valores de las variables NDVI, IAF, albedo y temperatura superficial que fueron seleccionadas para realizar el ajuste del píxel frío y caliente, se aprecia en el Cuadro 1. Estos valores se obtuvieron a través de las constantes a y b en todas las fechas de vuelo. Valores que permiten la estimación del flujo del calor sensible del aire (H), y su variación respecto al píxel frío o píxel caliente en cada día de monitoreo. Se obtuvieron valores de NDVI cercanos a uno para el píxel frío, y cercanos a cero para el píxel caliente. Además, se puede notar que los valores del NDVI, al igual que el IAF, en su mayoría tienden a aumentar a medida que pasa el tiempo desde el día después de la siembra (DDS). Sin embargo, hubo algunas fechas en las que se observó una reducción en el IAF, como en el caso del 68DDS, y también una reducción en el NDVI en el 52DDS. Estas variaciones solo se presentaron en el píxel frío.

Cuadro 1. Selección del píxel frío y caliente en cada vuelo del RPAS para los valores de Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), albedo, el índice de área foliar (IAF), la temperatura (T) en grados Kelvin las constantes a y b de ajuste aplicada a la ecuación de diferencial de temperatura (dt), para cada día de vuelo identificada según su día después de siembra (DDS), durante el monitoreo del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú. 2019.

Table 1. Selection of cold and hot pixels in each RPAS flight for values of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), albedo, leaf area index (LAI), temperature (T) in Kelvin, and the adjustment constants a and b applied to the temperature differential equation (dt), for each flight day identified by days after sowing (DDS), during the monitoring of rice cultivation (*Oryza sativa*) in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru. 2019.

Fecha	DDS	Píxel	Coordenadas (WGS84, UTM)		NDVI	Albedo	IAF	T(K)	a	b
			X	Y						
14-Ene	49	P. Frío	288171,48	8664022,83	0,797	0,24	1,40	304,34	0,18263	-52,08205
		P. Cal.	288165,38	8664034,78	0,218	0,31	0,07	317,28		
17-Ene	52	P. Frío	288171,06	8664023,41	0,730	0,21	1,48	302,24	0,10826	-28,12427
		P. Cal.	288189,63	8664040,06	0,218	0,26	0,06	317,28		
21-Ene	56	P. Frío	288159,15	8664028,21	0,811	0,23	1,79	305,99	0,21663	-61,84569
		P. Cal.	288196,85	8664032,31	0,214	0,20	0,03	316,90		
26-Ene	61	P. Frío	288158,18	8664028,03	0,803	0,20	2,07	305,81	0,12900	-36,12062
		P. Cal.	288171,63	8664021,58	0,213	0,21	0,02	333,98		
29-Ene	64	P. Frío	288159,75	8664019,66	0,798	0,24	2,67	304,04	0,08842	-22,03315
		P. Cal.	288188,68	8664041,84	0,228	0,24	0,04	327,12		
30-Ene	65	P. Frío	288159,86	8664028,25	0,820	0,23	3,28	307,36	0,15645	-45,09445
		P. Cal.	288193,20	8664027,86	0,214	0,21	0,06	332,80		
2-Feb	68	P. Frío	288159,99	8664020,81	0,793	0,21	2,81	303,25	0,12040	-32,80977
		P. Cal.	288200,36	8664045,98	0,215	0,24	0,04	330,40		
4-Feb	70	P. Frío	288159,10	8664027,40	0,835	0,23	3,35	306,21	0,07882	-18,57096
		P. Cal.	288203,59	8664030,64	0,225	0,20	0,15	326,40		

Balance de energía

Durante toda la campaña y monitoreo, se obtuvieron valores de radiación neta (R_n) ($\bar{X} \pm S$) de $658,35 \pm 62,06$ W/m^2 (E1) y $619,18 \pm 59,27$ W/m^2 (E2). En cuanto al flujo de calor del suelo (G), valores ($\bar{X} \pm S$) de $83,73 \pm 27,59$ W/m^2 (E1) y $85,17 \pm 26,81$ W/m^2 (E2). Para el flujo calor sensible del aire (H) valores ($\bar{X} \pm S$) de $340,83 \pm 75,26$ W/m^2 (E1) y $359,46 \pm 77,66$ W/m^2 (E2). Además, para el flujo de calor latente (LE) valores ($\bar{X} \pm S$) de $233,79 \pm 101,10$ W/m^2 (E1) y $176,40 \pm 95,54$ W/m^2 (E2), y valores máximos de $466,10$ (E1) y $371,38$ (E2).

El promedio y la desviación estándar para NDVI, IAF Albedo, R_n , G , H y LE , por variedades y tratamiento, se muestra en el Cuadro 2. En el caso de las parcelas con riego y secas controladas (E2), una reducción del 4, 15, 6 y 25 % para NDVI, IAF, R_n y LE , y un incremento del 10, 2 y 5 % para Albedo, G y H . No hubo diferencia significativa entre variedades según análisis de varianza y la separación de medias de Duncan con $p < 0,05$.

Cuadro 2. Valores promedio ($\bar{X}$) de índice de vegetación normalizado diferenciado (NDVI), índice de área foliar (IAF) Albedo, radiación neta (R_n), flujo de calor del suelo (G), flujo de calor sensible del aire (H), flujo de calor latente (LE), para las variedades IR43 (V1), IR71706 (V2) y Sahod Ulan 12 (V3), durante el monitoreo del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2019.

Table 2. Average values ($\bar{X}$) of normalized difference vegetation index (NDVI), leaf areaindex (IAF) Albedo, net radiation (R_n), soil heat flux (G), sensible heat flux (H), and latent heat flux (LE), for the varieties IR43 (V1), IR71706 (V2) and Sahod Ulan 12 (V3), during the rice cultivation (*Oryza sativa*) monitoring in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Peru, 2019.

Detalle	NDVI	IAF	Albedo	R_n ($W\ m^{-2}$)	G ($W\ m^{-2}$)	H ($W\ m^{-2}$)	LE ($W\ m^{-2}$)
E1							
V1	$0,72 \pm 0,10$	$1,69 \pm 0,80$	$0,20 \pm 0,04$	$671,83 \pm 35,02$	$87,61 \pm 21,00$	$339,81 \pm 69,22$	$244,44 \pm 83,27$
V2	$0,73 \pm 0,07$	$1,73 \pm 0,77$	$0,21 \pm 0,04$	$657,03 \pm 35,49$	$84,73 \pm 20,62$	$341,78 \pm 67,87$	$230,51 \pm 79,70$
V3	$0,75 \pm 0,05$	$1,88 \pm 0,62$	$0,22 \pm 0,04$	$646,18 \pm 41,15$	$78,84 \pm 16,87$	$340,89 \pm 67,18$	$226,42 \pm 83,32$
$\bar{X}$	0,73	1,77	0,21	658,35	83,73	340,83	233,79
E2							
V1	$0,67 \pm 0,11$	$1,27 \pm 0,76$	$0,22 \pm 0,04$	$626,93 \pm 40,95$	$92,43 \pm 20,65$	$360,69 \pm 68,44$	$176,09 \pm 89,50$
V2	$0,71 \pm 0,08$	$1,58 \pm 0,74$	$0,24 \pm 0,04$	$614,24 \pm 39,09$	$82,07 \pm 18,55$	$358,65 \pm 70,51$	$175,17 \pm 93,12$
V3	$0,72 \pm 0,08$	$1,64 \pm 0,73$	$0,23 \pm 0,04$	$616,37 \pm 40,90$	$81,00 \pm 18,96$	$359,04 \pm 70,29$	$177,94 \pm 85,40$
$\bar{X}$	0,70	1,50	0,23	619,18	85,17	359,46	176,40

La variación espacial de los componentes del balance de energía para el día 70 DDS, correspondiente a la etapa de macollamiento del cultivo se observa en la Figura 5.

Evapotranspiración del cultivo (ETc)

La variación espacial y temporal de la ETc con valores ($\bar{X} \pm S$) de $2,39 \pm 1,01$ (V1), $2,25 \pm 0,97$ (V2), $2,19 \pm 1,01$ (V3) en E1 y $1,72 \pm 1,03$ (V1), $1,72 \pm 1,05$ (V2), $1,74 \pm 1,05$ (V3) en E2 (Figura 6). Además, se observó que en el riego con secas controladas (reducción hasta 65 % de humedad del suelo saturado) hubo una reducción del 28, 24 y 21 %, según variedades de arroz IR43, IR71706 y Sahod Ulan 12, respectivamente (Cuadro 3).

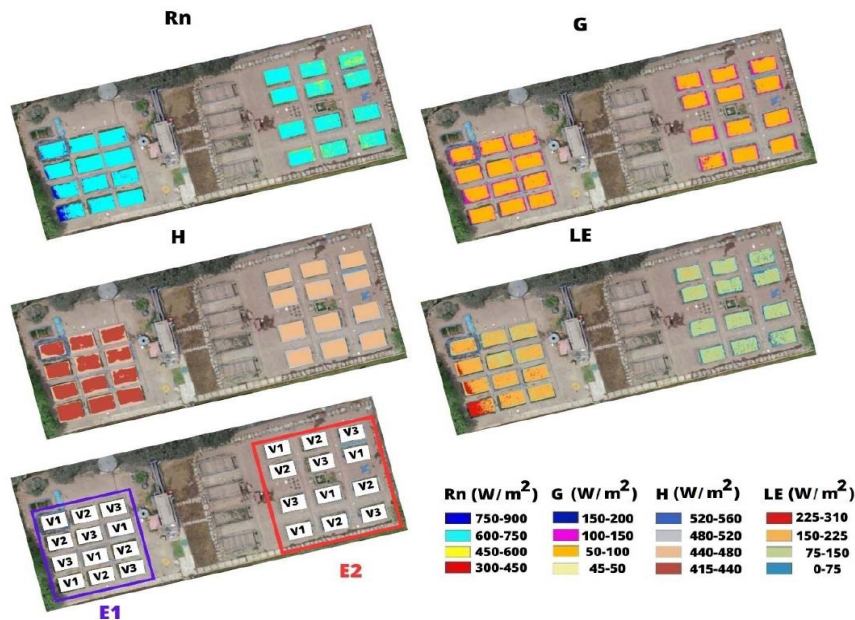


Figura 5. Distribución espacial de la radiación neta (Rn), el flujo de calor del suelo (G), el flujo de calor sensible (H) y flujo de calor latente (LE) en la etapa de macollamiento del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) (70 DDS), en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2019.

Figure 5. Spatial distribution of net radiation (Rn), soil heat flux (G), sensible heat flux (H), and latent heat flux ((LE) during the tillering stage of the rice (*Oryza sativa*) (70 DAS), in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Peru, 2019.

La variación temporal de la ET_c durante los estadios de macollamiento hasta punto de algodón se observa en la Figura 6a. En este periodo se realizó las secas controladas hasta el 65 % de humedad del suelo saturado (49 a 70 DDS). En el riego inundado (E1) se obtuvo valores mayores de la ET_c . Al igual que la fracción de evapotranspiración (ET_{rF}) (Figura 7b), cuyos valores variaron entre 0,2 y 0,8 durante todo el monitoreo.

El análisis combinado de experimentos, junto con el análisis de varianza y la prueba de Duncan con $p < 0,05$, reveló una diferencia significativa entre el riego inundado (E1) y el riego con secas controladas (E2). Sin embargo, no se encontró diferencia significancia entre las variedades de arroz (tratamientos). La relación ET_c/ET_o conocido como ET_{rF} , presentó valores ($\bar{x} \pm S$) (máximo) de $0,55 \pm 0,21$ (1,15) en E1 y de $0,42 \pm 0,19$ (0,93) en E2. Además, presentó una reducción del 26 %, 12 % y 19 % para IR43, IR71706 y Sahod Ulan 12, respectivamente. Para el volumen consumido y el rendimiento de cada experimento (Figura 8), se observó una diferencia de volumen consumido entre tratamientos.



Figura 6. Distribución espacial de la evapotranspiración de cultivo (ETc) obtenida por balance de energía del modelo METRIC en el cultivo de arroz (*Oryza sativa*), en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2019.

Figure 6. Spatial distribution of crop evapotranspiration (ETc) obtained from the METRIC energy balance model for rice (*Oryza sativa*), in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Peru, 2019.

Cuadro 3. Valores promedio ($\bar{X}$, S) y máximos de la evapotranspiración del cultivo (ETc) y la Fracción de evapotranspiración (ETrF) durante el monitoreo del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2019.

Table 3. Average values ($\bar{X}$, S) and maximums of the crop evapotranspiration (ETc) and the evapotranspiration fraction (ETrF) during the monitoring of rice (*Oryza sativa*) in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru, 2019.

Detalle	ETc (mm/d)	ETrF (max)
E1		
V1	2,39±0,95 (5,28)	0,57±0,20 (1,15)
V2	2,25±0,90 (4,67)	0,54±0,19 (1,01)
V3	2,19±0,90 (4,62)	0,53±0,19 (1,01)
$\bar{x}$	2,28	0,55
E2		
V1	1,72±0,95 (3,98)	0,42± 0,20 (0,92)
V2	1,72±0,97 (3,98)	0,42±0,21 (0,92)
V3	1,74±0,98 (4,02)	0,43±0,21 (0,93)
$\bar{x}$	1,73	0,42

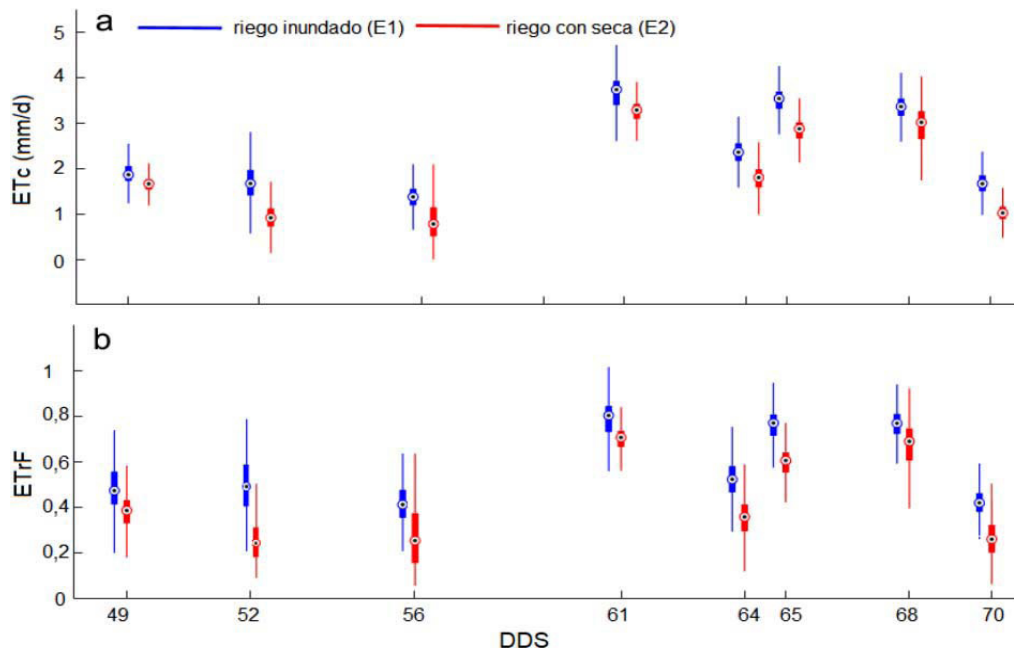


Figura 7. Evapotranspiración del cultivo (ETc.) de arroz (*Oryza sativa*) (a) y Fracción de evapotranspiración de referencia (ETrF) (b), con color azul bajo riego inundado y con color rojo en las secas controladas, en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2019.

Figure 7. Crop evapotranspiration for rice (*Oryza sativa*) (ETc.) (a) and reference evapotranspiration fraction (ETrF) (b), with blue indicating flooded irrigation and red indicating controlled dry conditions, in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Peru, 2019.

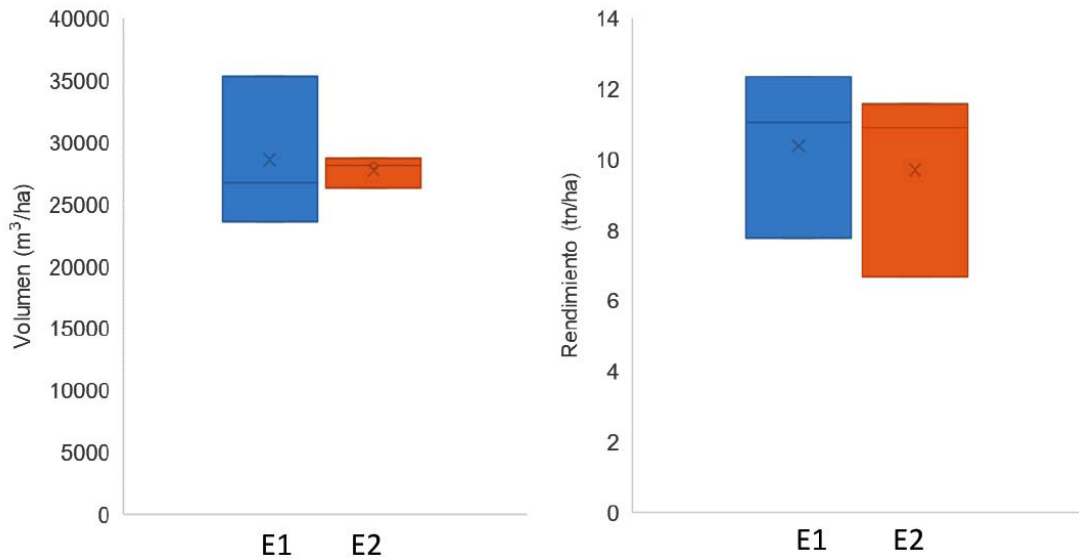


Figura 8. Valores de volumen (a) y rendimiento (b) durante el monitoreo del cultivo de arroz (*Oryza sativa*) obtenidos en el Área Experimental de Riego (AER) de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú, 2019.

Figure 8. Volume (a) and yield (b) values during the monitoring of rice (*Oryza sativa*) obtained in the Experimental Irrigation Area (AER) of the Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima Peru, 2019.

Discusión

El NDVI del dispositivo GreenSeeker y el NDVI de las imágenes multiespectrales presentaron una correlación moderada. Según Maresma et al. (2020), durante las etapas iniciales de escaneo, el GreenSeeker captura tanto el suelo como las plantas, lo que afecta los resultados y la relación entre ambos sensores. Las lecturas del NDVI podrían estar influenciadas por gotas de agua sobre el cultivo, por ello, según Maresma et al. (2020), para mejorar las lecturas del NDVI, es recomendable realizar el escaneo después de que el rocío se haya evaporado y antes del mediodía.

Se obtuvo la ecuación del IAF en función del NDVI con coeficiente de determinación (R^2) de 0,62 a 0,76, con un mejor resultado que el de Sisheber et al. (2022), quienes obtuvieron una relación lineal del IAF (ceptómetro) con un índice de vegetación estimado de imágenes LANDSAT ($R^2 = 0,45$). La resolución grosera de la imagen satelital influyó en una baja relación. Además, cabe mencionar que el uso del ceptómetro para recolección de IAF es confiable, como se observó en un estudio sobre cultivos de ají (*Capsicum annuum*) en invernaderos realizado por Mendoza-Pérez et al. (2017), donde se obtuvo un coeficiente R^2 de 0,99 para las mediciones del índice de área foliar (IAF), en que se utilizó tanto el ceptómetro como el método extractivo. Por ello, se sugiere aplicar el método extractivo para verificar la data recopilada con sensores.

Los resultados obtenidos de radiación neta (R_n), están acorde al rango (100 a 800 W/m²) obtenido por Montibeller (2017) y Nassar et al. (2021). Se observa en la Figura 3, valores más altos en bordes de la parcela, lo cual puede ser debido a la presencia de sombra de la vegetación cercana. Esto sugiere una mejor ejecución de los planes de vuelo, al establecer un mejor horario de las capturas de las imágenes. Sin embargo, los valores que corresponden a las parcelas de arroz, coincidieron con las investigaciones mencionadas, lo que corrobora que los valores obtenidos de R_n se ajustan a lo que corresponde en los cultivos de arroz.

En cuanto al flujo de calor del suelo (G), los resultados obtenidos corresponden al rango indicado por Nassar et al. (2021) de 0 a 180 W/m². No obstante, durante ciertos días de observación se detectó un intervalo más amplio, puede ser debido a variaciones en la distribución espacial del albedo y las condiciones meteorológicas, tal como indicó Montibeller (2017). El flujo de calor sensible (H) bajo riego inundado (E1) están acorde al obtenido por Acharya & Sharma (2021) en rango de valores de 50 a 400 W/m². Además, estos autores mencionaron que este valor estimado por el modelo METRIC, por su calibración interna, da un mejor resultado en comparación a otros modelos.

Los valores de la evapotranspiración del cultivo (ETc) resultaron cercanos a los obtenidos con balance hídrico por Neira Huamán et al. (2020) en la misma zona de estudio (3,78 mm/d a 5,16 mm/d). Sin embargo, los valores resultaron ser inferiores a los reportados por Quille-Mamani et al. (2021) bajo riego por goteo; esto podría deberse a la diferencia de tiempo entre el vuelo y la colecta de datos de campo del ceptómetro y GreenSeeker. Diversos autores estimaron la evapotranspiración en arrozales por balance de energía con RPAS, con valores en un rango de 1,05 a 7,48 mm/d (Lee & Kim, 2016; Liu et al., 2018; Quille-Mamani et al., 2021; Saha et al., 2022; Sawadogo et al., 2020; Wei et al., 2022) y por balance hídrico con valores de 1,75 a 10,50 mm/d (Anupouju & Kambhammettu, 2020; Djaman et al., 2019; Neira Huamán et al., 2020; Taherparvar & Pirmoradian, 2018).

El modelo METRIC aplicado en el estudio a sido empleado por Castañeda-Ibáñez et al. (2018) y Folhes et al. (2009), que compararon resultados con un equipo que mide la ETc a partir de la ecuación de balance de energía. Estos estudios concluyeron que METRIC es una herramienta viable para estimar la variabilidad espacial y temporal de la ETc.

Conclusiones

La utilización de imágenes espectrales y térmicas de alta resolución espacial y temporal, obtenidas mediante un RPAS, junto con datos de campo, permitió realizar una estimación más precisa de la evapotranspiración en arrozales. Los resultados sugieren que esta tecnología de teledetección podría ser eficaz para el monitoreo remoto de los arrozales. Además, se observó que el mayor ahorro de agua se produjo en el manejo de riego bajo secas controladas, lo cual permitió una reducción del 24 % en el consumo de agua, equivalente a un ahorro de 855 m³/ha.

Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento al Proyecto “Uso de sensores remotos para determinar índice de estrés hídrico en el mejoramiento del manejo de riego de arroz (*Oryza sativa*) en zonas áridas, para enfrentar al cambio climático”. Convenio N° 008-2016-INIA-PNIA/UPMSI/IE.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

Referencias

Abebe, T., Alamerew, S., Tulu, L. (2017). Genetic variability, heritability and genetic advance for yield and its related traits in rainfed lowland rice (*Oryza sativa* L.) genotypes at Fogera and Pawe, Ethiopia. *Advances in Crop Science and Technology*, 5, Article 272. <https://doi.org/10.4172/2329-8863.1000272>

- Acharya, B., & Sharma, V. (2021). Comparison of satellite driven surface energy balance models in estimating crop evapotranspiration in semi-arid to arid inter-mountain region. *Remote Sensing*, 13(9), Article 1822. <https://doi.org/10.3390/rs13091822>
- 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))
- Anupaju, V., & Kambhammettu, B. (2020). Role of deficit irrigation strategies on ET partition and crop water productivity of rice in semi-arid tropics of south India. *Irrigation Science*, 38, 415–430. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00684-1>
- Bian, J., Zhang, Z., Chen, J., Chen, H., Cui C., Li, X., Chen, S., Fu, Q. (2019). Simplified evaluation of cotton water stress using high resolution unmanned aerial vehicle thermal imagery. *Remote Sensing*, 11(3), Article 267. <https://doi.org/10.3390/rs11030267>
- 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>
- Chandel, A. K., Molaei, B., Khot, L. R., Peters, R. T., & Stöckle, C. O. (2022). High resolution geospatial evapotranspiration mapping of irrigated field crops using multispectral and thermal infrared imagery with METRIC energy balance model. *Journal of the. Drone*, 4(3), Article 52. <https://doi.org/10.3390/drones4030052>
- Cheng, H., Shu, K., Zhu, T., Wang, L., Liu, X., Cai, W., Qi, Z., & Feng, S. (2022). Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield, water and nitrogen use, and greenhouse gas emissions in rice paddy fields. *Journal of Cleaner Production*, 349, Article 131487. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131487>
- Chu, G., Chen,T., Chen, S., Xu, C., Wang, D., & Zhang, X. (2018). The effect of alternate wetting and severe drying irrigation on grain yield and water use efficiency of Indica-japonica hybrid rice (*Oryza sativa* L.). *Food and Energy Security*, 7(2), Article e00133. <https://doi.org/10.1002/fes3.133>
- Djaman, K., Rudnick, D. R., Moukoumbi, Y. D., Sow, A., & Irmak, S. (2019). Actual evapotranspiration and crop coefficients of irrigated lowland rice (*Oryza sativa* L.) under semiarid climate. *Italian Journal of Agronomy*, 14(1), 19–25. <https://doi.org/10.4081/ija.2019.1059>
- Durán Gómez, M. R., Ramos Fernández, L., Altamirano Gutiérrez, L., & Arapa Quispe, J. (2021). Thermal imaging and thermocouple sensors for estimating water stress index of rice cultivation under drip irrigation. *Idesia (Arica)*, 39(1), 109–118. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292021000100109>
- Fan, L., Gao, Y., Brück, H., & Bernhofer, C. (2009). Investigating the relationship between NDVI and IAF in semi-arid grassland in Inner Mongolia using in-situ measurements. *Theoretical and Applied Climatology*, 95(1–2), 151–156. <https://dx.doi.org/10.1007/s00704-007-0369-2>
- Fonseca Salazar, S., Verano Zelada, C., & Mariluz Silva, J. P. (2012, octubre 26). *Huella hídrica del cultivo del arroz. Huella hídrica del arroz en el Perú*. Oficina del Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/546>
- Food and Agriculture Organization. (n.d.). *FAOSTAT. Crop and livestock products*. Retrieved February 23, 2022, from <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>

- Folhes, M. T., Rennó, C. D., & Soares, J. V. (2009). Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management*, 96(10), 1398–1408. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.021>
- 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>
- Heros Aguilar, E. C., Lozano-Isla, F., & Casas Diaz, A. V. (2023). Tecnologías para la producción de arroz: recomendaciones para el Perú basadas en investigaciones científicas. *South Sustainability*, 4(1), Article e069. <https://doi.org/10.21142/SS-0401-2023-e069>
- Hussain, Z., Wang, Z., Wang, J., Yang, H., Arfan, M., Hassan, D., Wang, W., Azam, M. I., & Faisal, M. (2022). A comparative appraisal of classical and holistic water scarcity indicators. *Water Resources Management*, 36(3), 931–950. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03061-z>
- Ishfaq, M., Farooq, M., Zulfiqar, U., Hussain, S., Akbar, Ahmad, N., Nawaz, A., & Ahmad Anjum, S. (2020). Alternate wetting and drying: A water-saving and ecofriendly rice production system. *Agricultural Water Management*, 241, Article 106363. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106363>
- Jiang, Y., Carrijo, D., Huang, S., Chen, J., Balaine, N., Zhang, W., van Groenigen, K. J., & Linquist, B. (2019). Water management to mitigate the global warming potential of rice systems: A global meta-analysis. *Field Crops Research*, 234, 47–54. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.02.010>
- Kumar, A., & Rajitha, G. (2019). Alternate Wetting and Drying (AWD) irrigation - A smart water saving technology for rice: A review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 8(3), 2561–2571. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2019.803.304>
- Lee, Y., & Kim, S. (2016). The modified SEBAL for mapping daily spatial evapotranspiration of South Korea using three flux towers and terra MODIS data. *Remote Sensing*, 8(12), Article 983. <https://doi.org/10.3390/rs8120983>
- Liu, X., Xu, J., Yang, S., & Zhang, J. (2018). Rice evapotranspiration at the field and canopy scales under water-saving irrigation. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 130, 227–240. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0507-z>
- Machaca-Pillaca, R., Pino-Vargas, E., Ramos-Fernández, L., Quille-Mamani, J., & Torres-Rua, A. (2022). Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar a partir de imágenes de un dron en zonas áridas, caso La Yarada, Tacna, Perú. *Idesia (Arica)*, 40(2), 55–65. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292022000200055>
- Maresma, A., Chamberlain, L., Tagarakis, A., Kharel, T., Godwin, G., Czymmek, K., Shields, E., Ketterings, Q. M. (2020). Accuracy of NDVI-derived corn yield predictions is impacted by time of sensing. *Computers and Electronics in Agriculture*, 169, Article 105236. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105236>
- Mendoza-Pérez, C., Ramírez-Ayala, C., Ojeda-Butamante, 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>
- Montibeller, Á. G. (2017). *Estimating energy fluxes and evapotranspiration of corn and soybean with an unmanned aircraft system in Ames, Iowa* [Master of Arts thesis, University of Northern Iowa]. UNI Scholar Works. <https://scholarworks.uni.edu/etd/416>
- Neira Huamán, E., Ramos Fernández, L., & Razuri Ramírez, L. R. (2020). Coeficiente del cultivo (Kc) del arroz a partir de lisímetro de drenaje en La Molina, Lima-Perú. *Idesia (Chile)*, 38(2), 49–55. <https://doi.org/10.4067/s0718-34292020000200049>

- Nassar, A., Torres-Rua, A., Kustas, W., Alfieri, J., Hipps, L., Prueger, J., Nieto, H., Alsina, M. M., White, W., McKee, L., Coopmans, C., Sanchez, L., & Dokoozlian, N. (2021). Assessing daily evapotranspiration methodologies from one-time-of-day sUAS and EC information in the GRAPEX project. *Remote Sensing*, 13(15), Article 2887. <https://doi.org/10.3390/rs13152887>
- Nhamo, L., Magidi, J., Nyamugama, A., Clulow, A. D., Sibanda, M., Chimonyo, V. G. P., & Mabhaudhi, T. (2020). Prospects of improving agricultural and water productivity through unmanned aerial vehicles. *Agriculture*, 10(7), Article 256. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070256>
- Niu, H., Hollenbeck, D., Zhao, T., Wang, D., & Chen, Y. (2020). Evapotranspiration estimation with small UAVs in precision agriculture. *Sensors*, 20(22), Article 6427. <https://doi.org/10.3390/s20226427>
- 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), Article 638. <https://doi.org/10.3390/rs8080638>
- Ouda, S., & Zohry, A. E. H. (2022). Water-smart practices to manage water scarcity. In S. Ouda, & A. El-Hafeez Zohry (Eds.), *Climate-smart agriculture* (pp. 3–26). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-93111-7_1
- Porras-Jorge, R., Ramos-Fernández, L., Ojeda-Bustamante, W., & Ontiveros-Capurata, R. (2020). Performance assessment of the AquaCrop model to estimate rice yields under alternate wetting and drying irrigation in the coast of Peru. *Scientia Agropecuaria*, 11(3), 309–321. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2020.03.03>
- Quille-Mamani, J., Ramos-Fernández, L., & Ontiveros-Capurata, R. (2021). Estimación de la evapotranspiración del cultivo de arroz en Perú mediante el algoritmo METRIC e imágenes VANT. *Revista de Teledetección*, (58), 23–38. <https://doi.org/10.4995/raet.2021.13699>
- Roy, D., Hossain, M. B., Bin Hafiz Pranto, M. R., & Islam, M. T. (2022). Drought management by integrated approaches in T. Aman rice season to escalate rice productivity in drought prone regions of Bangladesh. In G. m. Tarekul Islam, S. Shampa, & A. I. A. Chowdhury (Eds.), *Water management: A view from multidisciplinary perspectives* (pp. 351-364). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95722-3_17
- Saha, S., Ahmmmed R., & Jahan, N. (2022). Actual evapotranspiration estimation using remote sensing: Comparison of Sebal and Metric models. In G. M Tarekul Islam, Shampa, & A. I. Amin Chowdhury (Eds.), *Water management: A view from multidisciplinary perspectives* (pp. 365–383). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-95722-3_18
- Sawadogo, A., Kouadio, L., Traoré, F., Zwart, S. J., Hessels, T., & Gündoğdu, K. S. (2020). Spatiotemporal assessment of irrigation performance of the Kou Valley irrigation scheme in Burkina Faso using satellite remote sensing-derived indicators. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(8), Article 484. <https://doi.org/10.3390/ijgi9080484>
- Shabir, K., Kumar, R., & Maryam, M.(2023). Evapotranspirationin contest of climate change: Evapotranspiration. In M. Kumar, R. Kumar, & V. P. Singh (Eds.), *Advances in water management under climate change* (1st ed., Capter 15, pp. 274–290). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003351672>
- Sisheber, B., Marshall, M., Mengistu, D., & Nelson, A. (2022). Tracking crop phenology in a highly dynamic landscape with knowledge-based Landsat–MODIS data fusion. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 106, Article 102670. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102670>

- Suwanlertcharoen, T., Chaturabul, T., Supriyasit, T., & Pongput, K. (2023). Estimation of Actual Evapotranspiration Using Satellite-Based Surface Energy Balance Derived from Landsat Imagery in Northern Thailand. *Water*, 15(3), Article 450. <https://doi.org/10.3390/w15030450>
- Taherparvar, M., & Pirmoradian, N. (2018). Estimation of rice evapotranspiration using reflective images of Landsat satellite in sefidrood irrigation and drainage network. *Rice Science*, 25(2), 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.rsci.2018.02.003>
- 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>
- Villar Barraza, H. D., Ramos Fernández, L., & Alminagorta Cabezas, O. (2021). Evaluación del estrés hídrico del cultivo de arroz (IR 71706) a través del uso de termografía calibrada del área del dosel en Lima, Perú. *Idesia (Arica)*, 39(4), 59–70. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292021000400059>
- Wei, G., Cao, J., Xie, H., Xie, H., Yang, Y., Wu, C., Cui, Y., & Luo, Y. (2022). Spatial-temporal variation in paddy evapotranspiration in subtropical climate regions based on the SEBAL model: A case study of the Ganfu Plain irrigation system, southern China. *Remote Sensing*, 14(5), Article 1201. <https://doi.org/10.3390/rs14051201>
- Zobeidi, T., Yaghoubi, J., & Yazdanpanah, M. (2022). Farmers' incremental adaptation to water scarcity: An application of the model of private proactive adaptation to climate change (MPPACC). *Agricultural Water Management*, 264, article 107528. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107528>
- Zhou, S., Sun, H., Bi, J., Zhang, J., Riya, S., & Hosomi, M. (2020). Effect of water-saving irrigation on the N₂O dynamics and the contribution of exogenous and endogenous nitrogen to N₂O production in paddy soil using 15N tracing. *Soil & Tillage Research*, 200, Article 104610. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104610>