

Desarrollo de cámara térmica para RPAS utilizada en monitoreo del estado hídrico de cultivos

Juan José Pérez-Paredes¹
Gilberto de Jesús López-Canteñas^{1,5}
Ramón Arteaga-Ramírez¹
Eugenio Romantchik-Kriuchkova¹
Juan Carlos Olguín-Rojas¹
Ronald Ernesto Ontiveros-Capurata²

1 Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua-Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Chapingo, Estado de México, México. CP. 56230.

2 Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Paseo Cuauhnáhuac 8532, Colonia Progreso, Jiutepec, Morelos, México. CP. 62550.

Autor para correspondencia: alelopez10@hotmail.com .

Resumen

El monitoreo y la evaluación del estado hídrico de cultivos son fundamentales para optimizar el uso del agua y promover una producción agrícola sostenible. La medición de la temperatura del dosel mediante imágenes térmicas se ha consolidado como una técnica confiable para estimar el estado hídrico de las plantas; sin embargo, su adopción se ve limitada por el alto costo de las cámaras térmicas y los sistemas aéreos no tripulados. Debido a lo anterior, se desarrolló una cámara térmica de bajo costo basada en el sensor infrarrojo MLX90640 de 32 x 24 píxeles y el microcontrolador Teensy 3.6, con capacidad de almacenamiento en una tarjeta microSD. El dispositivo fue integrado en un sistema aéreo no tripulado y evaluado en un cultivo de maíz, comparando sus mediciones con un porómetro LI-COR LI-1600 (precisión ± 0.5 °C). Las imágenes térmicas fueron mejoradas mediante interpolación bicúbica y fusionadas con imágenes RGB para obtener imágenes con resolución de 640 x 480 píxeles que se procesaron y segmentaron apoyándose en imágenes binarias para aislar los píxeles correspondientes a la temperatura del dosel del cultivo. Posteriormente, se compararon los valores de temperatura de las imágenes térmicas y el porómetro LI-COR LI-1600 en cada sitio de muestreo, con la raíz del error cuadrático medio de 0.74 °C. Los resultados demuestran que la cámara térmica desarrollada ofrece una precisión adecuada, bajo costo (135 USD) y alta representatividad espacial, posicionándose como una herramienta prometedora para la monitorización térmica del dosel en aplicaciones de agricultura de precisión y gestión eficiente del recurso hídrico.

Palabras clave:

cámara térmica, estrés hídrico, RPAS, sensores infrarrojos, temperatura del dosel.



Introducción

El monitoreo del estado hídrico de los cultivos es esencial para mantener la productividad y la calidad, ya que son indicadores fiables de estrés hídrico no solo describen la disponibilidad de agua en las plantas, sino que también permiten predecir los efectos del riego deficitario en el rendimiento (Noguera *et al.*, 2020 ; Abioye *et al.*, 2022 ; Jiménez *et al.*, 2022).

Se requieren optimizar y mejorar las técnicas para el reconocimiento de estrés hídrico, que respalden la gestión del riego de precisión, disminuyendo el daño de la producción y la pérdida de rendimiento (Bijanzadeh *et al.*, 2022 ; Bwambale *et al.*, 2022 ; Melo *et al.*, 2022).

En este contexto, estudios han demostrado que la temperatura del dosel de las plantas se puede utilizar para detectar niveles moderados a severos de estrés hídrico en los cultivos (García-Tejero *et al.*, 2018 ; Gheysari *et al.*, 2021 ; Bo *et al.*, 2023).

La relación entre la temperatura de las hojas y la regulación estomática establece que cuando un cultivo posee un suministro de agua adecuado aumenta la conductancia estomática y mejora la transpiración de las hojas generando una disminución de temperatura debido al enfriamiento por la evaporación del agua, ya que al perderse agua a través de los estomas se reduce la temperatura (Gheysari *et al.*, 2021 ; Ouma *et al.*, 2024).

Por otro lado, las plantas con un déficit hídrico reducen la conductancia estomática de la hoja y la tasa de transpiración, en consecuencia, aumenta la temperatura del dosel, ya que no se produce disipación de calor por evaporación, alterando el balance energético de la planta (Sagan *et al.*, 2019 ; Noguera *et al.*, 2020).

Por lo anterior, la temperatura de las hojas que transpiran debe ser cercana a la temperatura del aire, mientras que en el caso de las estresadas debe ser mayor. Este es el supuesto que permite estimar el estrés hídrico a través de la temperatura del dosel (López-López *et al.*, 2009 ; Bijanzadeh *et al.*, 2022).

La obtención de imágenes radiométricas infrarrojas constituye una herramienta valiosa en aplicaciones de teledetección para la agricultura de precisión, ya que permite el monitoreo del riego, la evaluación del estado fisiológico de los cultivos y la estimación del rendimiento. En este contexto, las cámaras IR no radiométricas, no refrigeradas y de bajo costo han emergido como alternativas viables para nuevas implementaciones en la gestión agrícola (Gomes *et al.*, 2017 ; Dong *et al.*, 2023 ; Paciolla *et al.*, 2025).

Las cámaras infrarrojas, permiten medir cambios sutiles en la temperatura del dosel mediante la radiación de onda larga emitida (Sagan *et al.*, 2019 ; Yun *et al.*, 2024). Su implementación en vehículos aéreos no tripulados (RPAS) posibilita la obtención de mapas espaciales y temporales con alta resolución (García-Tejero *et al.*, 2018 ; Wu *et al.*, 2023). Permite comprender con mayor precisión la variabilidad de las condiciones hídricas y fisiológicas de los cultivos, así como de las características del suelo (Wu *et al.*, 2023 ; Oz *et al.*, 2025).

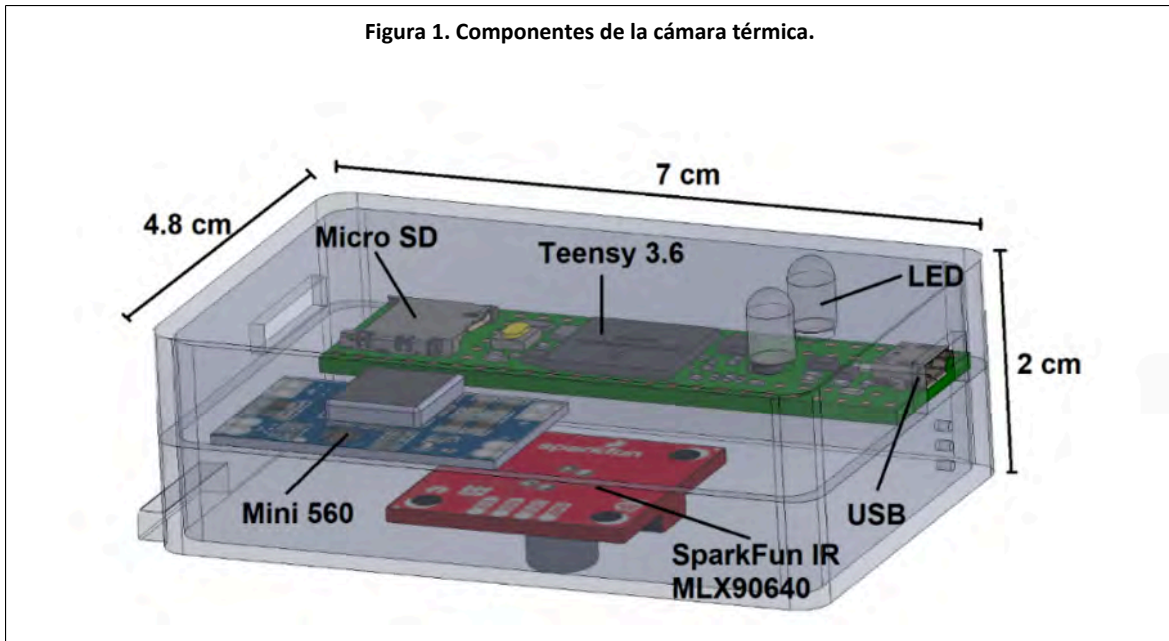
En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo desarrollar una cámara térmica de bajo costo basada en una tarjeta de desarrollo Teensy 3.6 y un sensor infrarrojo MLX90640 de 768 píxeles para monitorear la temperatura del dosel utilizado en la determinación del estrés hídrico en cultivos agrícolas con una precisión comparable a instrumentos comerciales de referencia.

El sistema se integró en una plataforma RPAS para adquirir información georreferenciada de la temperatura del dosel y evaluar el estado hídrico de los cultivos, aportando una herramienta accesible para la gestión de riego de precisión.

Materiales y métodos

Descripción del dispositivo

Se desarrolló un dispositivo de cámara térmica de bajo costo para la medición de la temperatura del dosel de cultivos agrícolas y la monitorización del estado hídrico (Figura 1).



El sistema se basa en un sensor infrarrojo MLX90640 (Melexis, Ieper, Bélgica), integrado en una placa de desarrollo SparkFun (SparkFun Electronics, Niwot, Colorado, EE. UU.), el sensor consta de una matriz térmica de 32 x 24 píxeles, que permite obtener información de temperatura de superficies a partir de la radiación térmica emitida por los objetos en función de su emisividad.

El sensor infrarrojo MLX90640 corresponde a una termopila de tipo transductor electrónico que convierte la energía térmica en una señal eléctrica, operando bajo el principio de que todo cuerpo emite radiación térmica en la región del infrarrojo lejano (Elsayed *et al.*, 2017; Paciolla *et al.*, 2025). Es capaz de realizar mediciones de temperatura remotas sin contacto, con resolución de 16 bits y con un rango de operación, de -40 a 85 °C, considerado adecuado para aplicaciones agrícolas.

Para el procesamiento de datos se empleó la placa de desarrollo Teensy 3.6, equipada con un procesador de 32 bits a 180 MHz, pines digitales con capacidad de interrupción y tolerancia de 3.3 V, además de conectividad USB. El microcontrolador fue programado en el entorno Arduino IDE con el complemento 'Teensyduino', lo que permitió calcular los valores correspondientes a los 768 píxeles del sensor MLX90640 y almacenar la información de temperatura en una tarjeta microSD, aprovechando el zócalo incorporado en la placa.

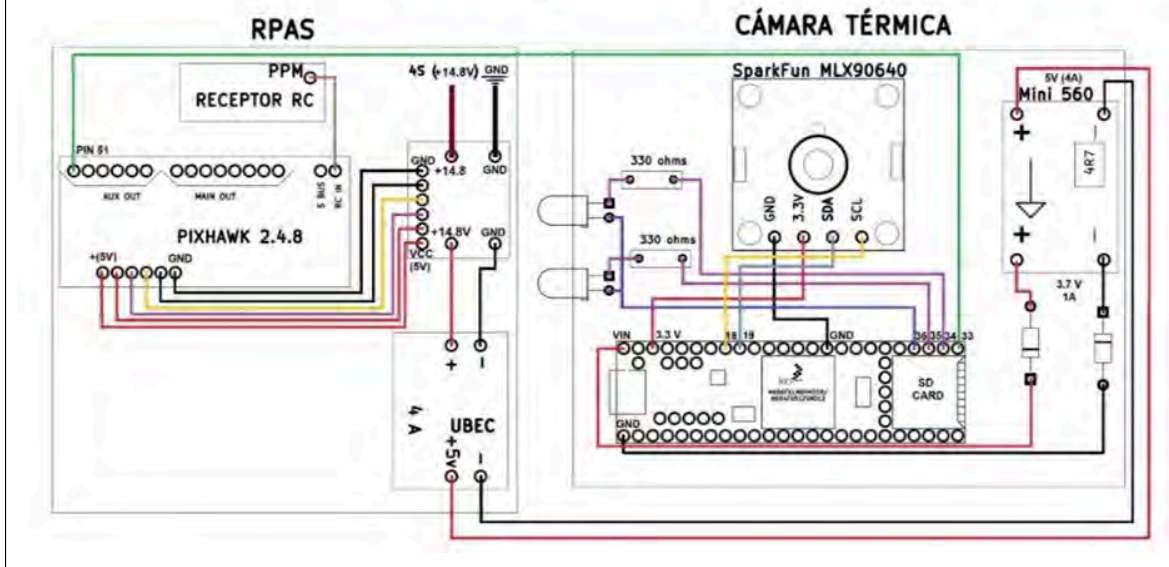
Diagrama del circuito electrónico

El circuito electrónico fue diseñado para garantizar la correcta alimentación y funcionamiento de la cámara térmica, cumpliendo con los requerimientos de voltaje y consumo de corriente de los dispositivos empleados: tarjeta de desarrollo Teensy 3.6 (100 mA), sensor MLX90640 (23 mA) y diodos emisores de luz (leds, 10 mA).

El diagrama electrónico (Figura 2) muestra la alimentación y operación del sistema, que posee una batería LiPo de cuatro celdas con un voltaje nominal de 14.8 V y 4 000 mAh, encargada de suministrar energía a la controladora de vuelo. El voltaje de la batería se regula mediante un circuito eliminador universal de batería, que proporciona una salida de 5 V con una capacidad de hasta 4 A.



Figura 2. Diagrama esquemático de conexión de todos los componentes.



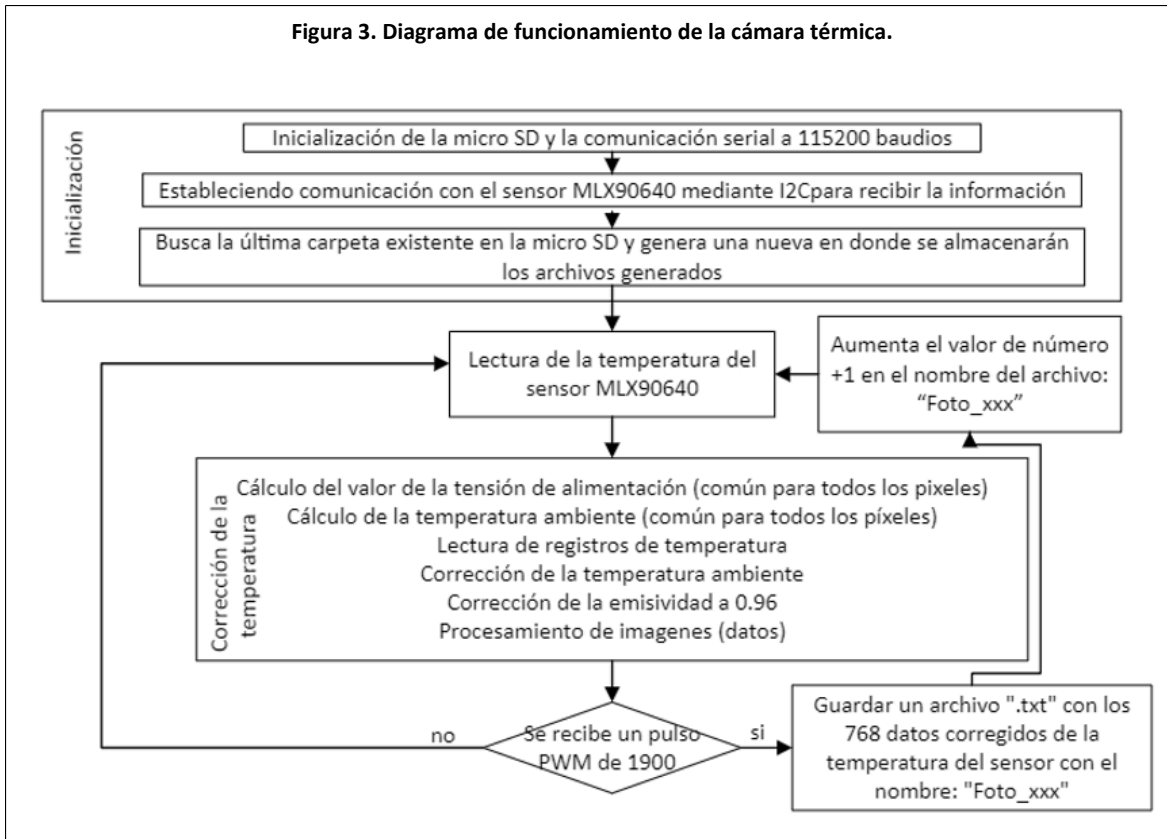
El sistema de la cámara térmica integra un regulador Mini560, encargado de reducir el voltaje de entrada de 5 V a 3.7 V con una corriente máxima de 1 A, para alimentar al Teensy 3.6. Adicionalmente, se implementaron diodos 1N4007 en la salida con el fin de proteger el circuito frente a picos de corriente, voltajes inversos y reducir el ruido eléctrico presente en la señal principal.

Programación del microcontrolador Teensy 3.6

El programa utilizado en la placa controladora del dispositivo fue desarrollado en el entorno de Arduino IDE (versión 1.8.12). La Figura 3 ilustra la rutina completa, detallando las funciones ejecutadas por el microcontrolador Teensy 3.6 y el sensor MLX90640.



Figura 3. Diagrama de funcionamiento de la cámara térmica.



Los datos de temperatura fueron corregidos para estimar los valores reales de la temperatura del dosel. Los datos de salida del sensor se procesaron junto con los coeficientes de calibración almacenados, con el fin de normalizar la respuesta del sensor y obtener $T_0(i, j)$, temperatura correspondiente a cada píxel, mediante la ecuación descrita en el manual del sensor MLX90640 (Melexis, 2019), la cual se presenta a continuación.

$$T_0(i, j) = 4VIR(i, j)_{COMPENSATED} \alpha(i, j) + (T_a + 273.15)^4 - 273.15$$

Donde: $\alpha(i, j)$ = coeficiente de sensibilidad de cada píxel calculado a partir de los datos almacenados en la EEPROM; T_a = corrección por temperatura ambiente; $VIR(i, j)_{COMPENSATED}$ = señal IR compensada libre de ruido.

Corrección de la temperatura ambiente:

$$T_a = -KT_1 + K_2 T_1 - 4KT_2 (V_{TH25} - PTAT_data) 2KT_2 + 25$$

Donde: KT_1 y KT_2 y V_{TH} = constantes (fijadas durante la calibración en fábrica) almacenadas en la EEPROM del MLX90640 (definidas por el fabricante; $PTAT_data$ = valor medido por el sensor de temperatura en chip.

Corrección de emisividad: se estableció en 0.98, ya que se ha reportado que este valor induce errores inferiores a 1 °C al medir la cobertura vegetal de diferentes cultivos hortícolas (Noguera *et al.*, 2020).

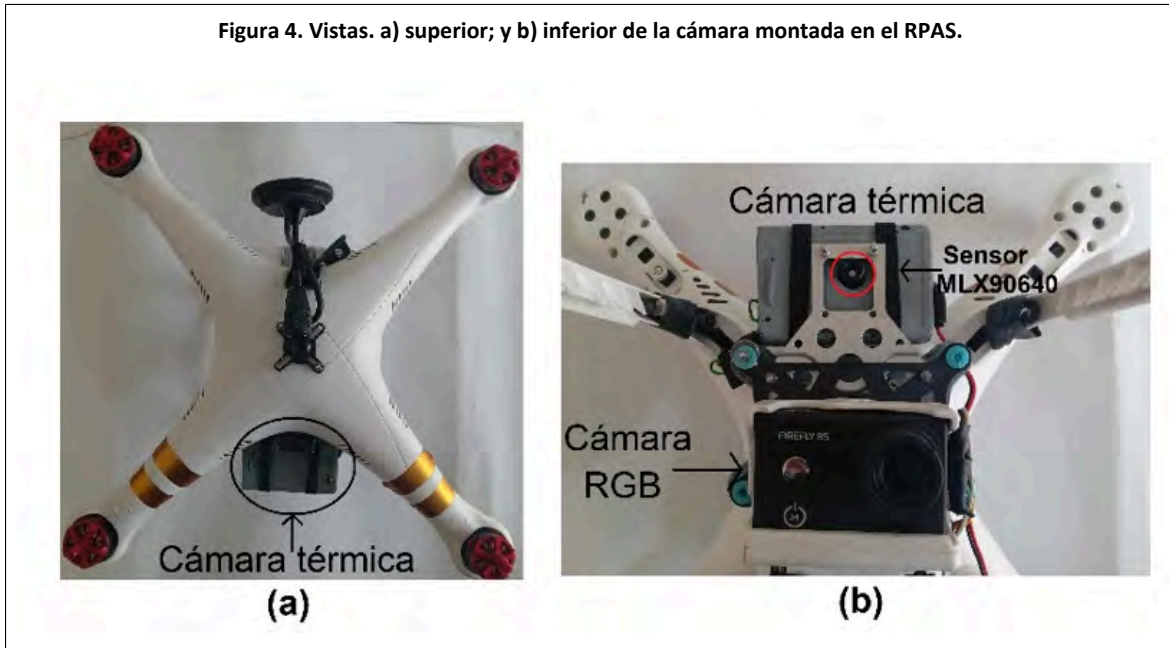
$$VIR(i, j)_{COMPENSATED} = VIR(i, j)_{TGC_COMP} \epsilon$$

Donde: ϵ = emisividad; $VIR(i, j)_{TGC_COMP}$ = valor térmico del píxel tras el proceso de compensación de sensibilidad y offset del píxel, tal y como se describe en la ficha técnica del MLX90640.

Montaje en el sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) y configuración de captura

En este estudio se empleó un RPAS de tipo cuadricóptero equipado con una controladora de vuelo Pixhawk 2.4.8, la cual permite la ejecución de vuelos autónomos para la adquisición de imágenes georreferenciadas mediante GPS. La cámara térmica se implementó en la parte frontal del vehículo aéreo (Figura 4), acompañada de una cámara RGB, para la obtención de información complementaria sobre el estado del cultivo.

Figura 4. Vistas. a) superior; y b) inferior de la cámara montada en el RPAS.

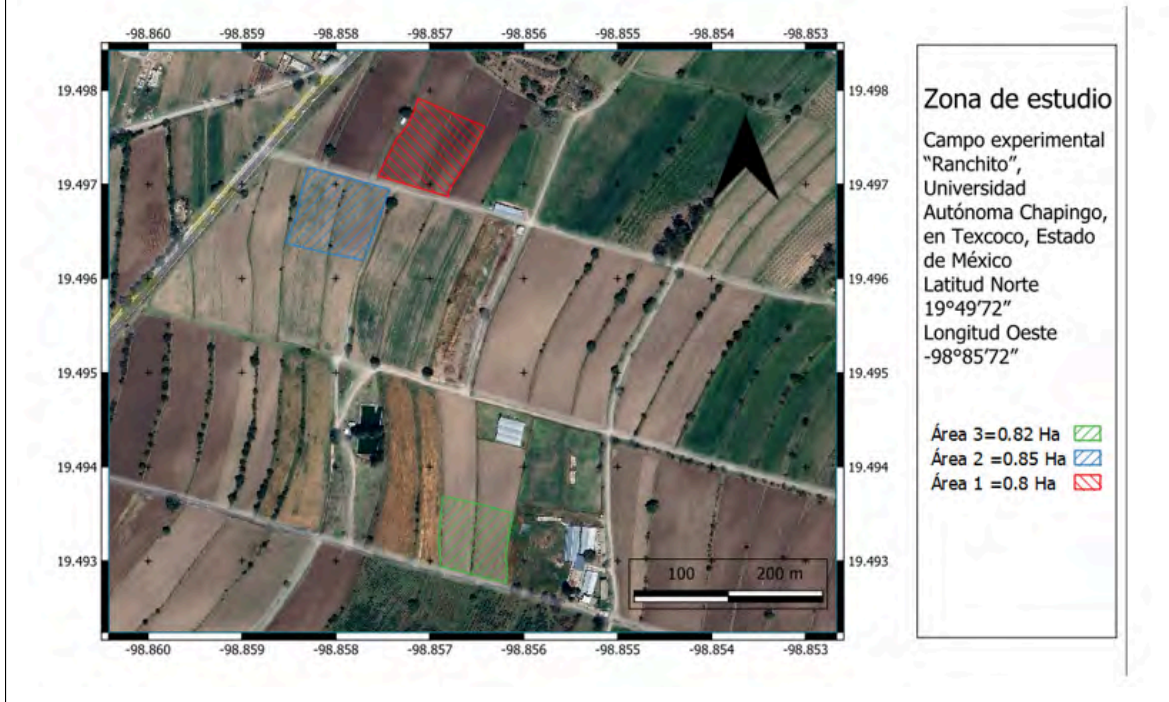


Evaluación de la cámara térmica

Para la evaluación de la cámara térmica se realizaron 18 vuelos entre los meses de julio y septiembre de 2024, en un horario comprendido entre las 12:00 am y las 2:30 pm, en tres parcelas sembradas con maíz con una superficie de 0.8 ha cada una (Figura 5), en el campo experimental 'Ranchito', de la Universidad Autónoma Chapingo (UACH), en Texcoco, Estado de México, ubicado en las coordenadas: 19° 49' 72" latitud norte y -98° 85' 72" longitud oeste.



Figura 5. Zona de estudio de datos fotogramétricos con el RPAS.



Adicionalmente se utilizó como referencia el porómetro de estado estacionario LI-1600 (LI-COR Biosciences, Lincoln, Nebraska, EE. UU.). El sensor de temperatura de las hojas es un termopar de contacto ubicado en la cámara de medición tipo pinza (Figura 6), diseñado para estar en contacto directo con el follaje para registrar la temperatura real de la hoja durante la medición de la conductancia estomática (LI-COR Inc., 1989).



Figura 6. Cámara de medición de temperatura tipo pinza del porómetro LI-1600.



El instrumento se utilizó para medir la temperatura del dosel del cultivo de maíz en alrededor de 40 sitios de muestreos por día, seguidamente se utilizó el RPAS para la adquisición de imágenes térmicas y RGB mediante vuelos autónomos.

Generación de imágenes térmicas y segmentación de la temperatura del dosel

Los archivos con extensión '.txt' fueron convertidos a imágenes en formato TIF mediante un script desarrollado en C++ y ejecutado en MATLAB (MathWorks, 2021). Este procedimiento permitió procesar carpetas con archivos '.txt' que contenían 768 datos de temperatura cada uno, generando imágenes térmicas de 32 x 24 píxeles. La georreferenciación de las imágenes se realizó utilizando las coordenadas GPS correspondientes a los puntos de captura (waypoints) del plan de vuelo.

Adicionalmente, se adquirieron imágenes RGB, mediante una cámara Firefly 8S de gran angular (90°), con el propósito de complementar la información térmica y permitir su comparación directa. Además, para optimizar la resolución espacial, las imágenes térmicas iniciales, fueron sometidas a un proceso de interpolación bicúbica y vecino más cercano, para aumentar la resolución a 640 x 480 píxeles.

Generación de imágenes fusionadas

Se generó una imagen final mediante la fusión de la información de la imagen térmica mejorada y con la luminancia del canal Y del espacio de color YCbCr, transformado de la imagen RGB. Este proceso se aplicó de manera diferenciada según la clasificación de cada región.

Regiones correspondientes al follaje: la luminancia moduló el rango de temperatura asignado a la planta, permitiendo conservar la variabilidad radiométrica capturada por la cámara térmica.

Regiones correspondientes al suelo: se utilizó directamente el rango térmico de esta categoría.

Este procedimiento permitió integrar de manera eficiente la información radiométrica de la cámara térmica con el contraste estructural proporcionado por las imágenes RGB, asegurando una

estimación más confiable y precisa de la temperatura del dosel del cultivo de maíz y una diferenciación clara entre los valores correspondientes a cultivo y suelo.

A partir de las nuevas imágenes, fusionadas térmica-RGB, se llevó a cabo la segmentación de los píxeles correspondientes al dosel del cultivo, con el fin de aislar las áreas asociadas a la temperatura foliar. Los valores obtenidos fueron extraídos y analizados para cada imagen correspondiente a las plantas de maíz en las que se realizaron mediciones directas de temperatura mediante el sensor LI-COR LI-1600, con el propósito de establecer una comparación entre ambos conjuntos de datos.

Resultados y discusión

Caracterización de la cámara térmica desarrollada

El circuito suministró una corriente estable de 1A y un voltaje de 5V, incorporando protecciones contra corrientes inversas y picos de voltaje para proteger el microcontrolador y el sensor. La programación del microcontrolador permitió que, ante un pulso PWM mayor a 1600 μ s, el sistema guardó automáticamente los datos de temperatura de los 768 píxeles en archivos '.txt', los cuales se almacenaron en la microSD en carpetas numeradas secuencialmente, con un registro ordenado y sin sobrescrituras.

Los valores de resolución espacial (GSD) obtenidos para diferentes alturas de vuelo, con el ángulo de visión del sensor ($55^\circ \times 35^\circ$), se presentan en el Cuadro 1. Los resultados muestran que, a medida que aumenta la altura de vuelo, se incrementa el tamaño del píxel proyectado en superficie y disminuye la resolución espacial de la imagen. Esta relación permite definir la altura de vuelo adecuada según el nivel de detalle requerido para el análisis de la temperatura del dosel.

Cuadro 1. Resolución de la cámara térmica.

Altura / (m)	Largo / (m)	Ancho / (m)	Largo píxel / (cm)	Ancho píxel / (cm)	Área / (cm ²)	GSD / (cm píxel ⁻²)
10	10.4	6.3	32.5	26.3	854.9	29.4
15	15.6	9.5	48.8	39.4	1923.4	44.1
20	20.8	12.6	65.1	52.5	3419.5	58.8

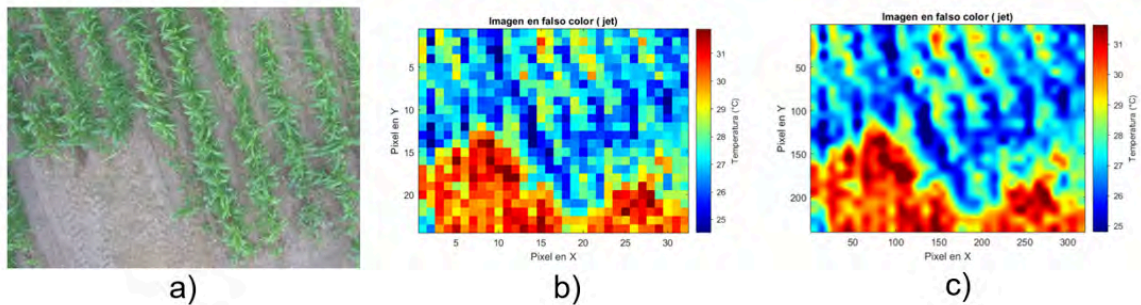
El costo de materiales del dispositivo es de 135 USD (considerando únicamente los componentes electrónicos), tiene un valor significativamente inferior al de las cámaras térmicas comerciales con especificaciones similares. Por ejemplo, la FLIR ONE Edge Pro, diseñada para drones y con una resolución de 60 x 60 píxeles, tiene un costo aproximado de 450 USD, mientras que la FLIR Vue Pro R, con una resolución de 640 x 512 píxeles, alcanza un costo cercano a 5 000 USD (Noguera *et al.*, 2020).

Imágenes térmicas

El sensor Mlx90640 generó imágenes térmicas con valores confiables de temperatura del cultivo. La interpolación bicúbica y vecino más cercano aplicado mejoró la resolución de 32x24 a 640x480 píxeles (Figura 7). Este procedimiento mejoró la calidad visual y facilitó la fusión de imágenes térmicas con las imágenes RGB, integrando información estructural y mejorando la interpretación espacial de los datos.

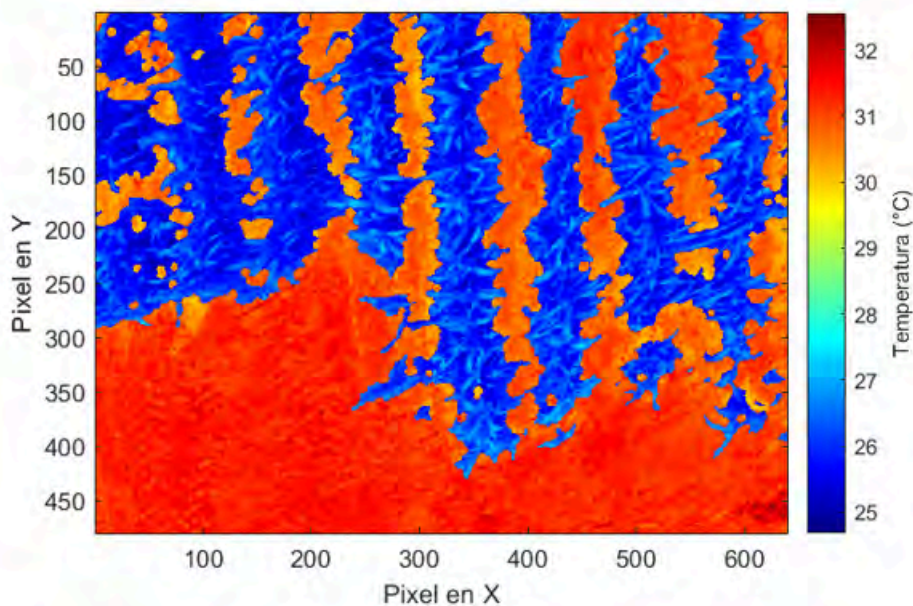


Figura 7. a) imagen RGB; b) imagen térmica en falso color; y c) imagen térmica interpolada en falso color.



La fusión de la imagen térmica mejorada con la luminancia del canal Y del espacio de color YCbCr, obtenido a partir de la imagen RGB, permitió generar una imagen con mayor calidad radiométrica y estructural (Figura 8). Este procedimiento conservó la información radiométrica del follaje del maíz, lo que permitió una segmentación con mayor precisión de la temperatura del dosel y del suelo.

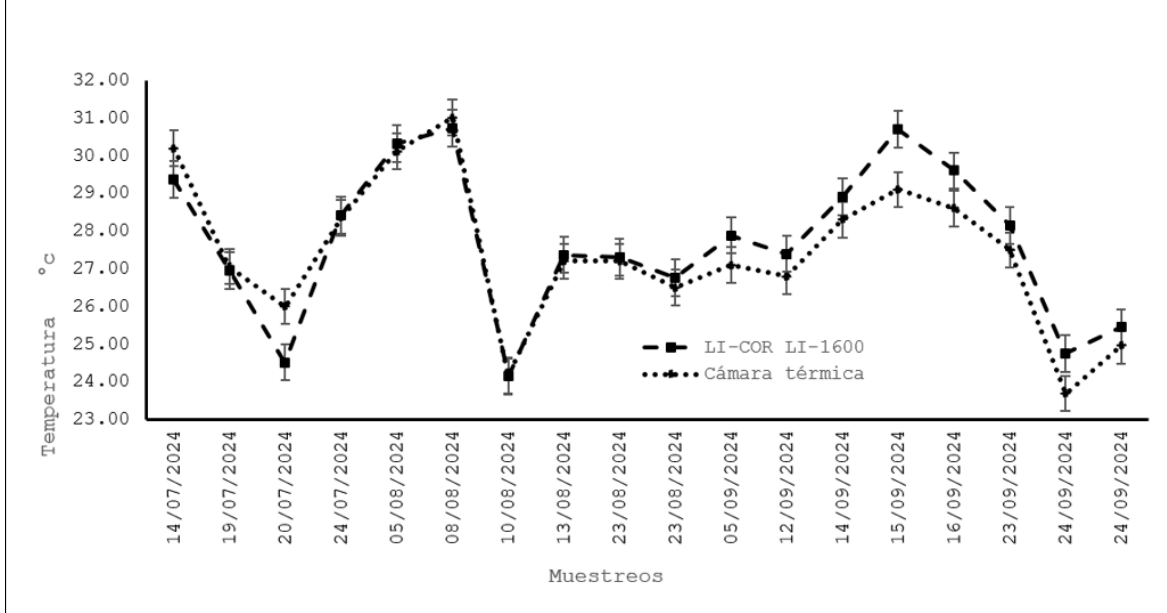
Figura 8. Imagen térmica fusionada en falso color.



Además, la transformación de las imágenes RGB al espacio de color YCbCr y la aplicación del método adaptativo de Otsu sobre el canal Cr lograron una separación efectiva entre dosel y suelo. La máscara optimizada eliminó ruido y generó segmentaciones consistentes en las imágenes analizadas. Estos resultados coinciden con los reportados por Kamath *et al.* (2022) , quienes destacan la utilidad del canal Cr para discriminar vegetación del fondo en plantas.

Con los valores promedio de temperatura de los 25 pixeles segmentados en las imágenes térmicas fusionadas, en donde también se realizaron mediciones con el porómetro LI-COR LI-1600, se calculó la raíz del error cuadrático medio (RMSE)= 0.74 °C y el error absoluto medio (MAE)= 0.57 °C, entre las dos mediciones, lo cual confirma la consistencia de los datos obtenidos entre ambos métodos, además se elaboró la gráfica comparativa de temperaturas (Figura 9).

Figura 9. Temperaturas obtenidas con las imágenes térmicas y con el porómetro Licor LI-600.



Los valores más altos de diferencia ($\Delta T > 1.4 \text{ }^\circ\text{C}$) se registraron en fechas del 15 de septiembre de 2024 ($1.6 \text{ }^\circ\text{C}$) y el 20 julio de 2024 ($1.48 \text{ }^\circ\text{C}$), los cuales se asocian a variaciones ambientales registradas durante las mediciones, como fue el caso de cambios en la radiación incidente por nubosidad, que influyen en la temperatura del dosel.

En contraste, los días 19 de julio de 2024 ($0.11 \text{ }^\circ\text{C}$), 24 de julio de 2024 ($0.07 \text{ }^\circ\text{C}$), 23 de agosto de 2024 ($0.11 \text{ }^\circ\text{C}$) y 10 de agosto de 2024 ($0.01 \text{ }^\circ\text{C}$) presentaron las menores diferencias entre ambos métodos, lo que refleja condiciones atmosféricas estables y una radiación solar uniforme durante el muestreo.

En términos generales, las temperaturas promedio del dosel registradas fueron de $27.71 \text{ }^\circ\text{C}$ para el porómetro LI-COR LI-1600 y de $27.2 \text{ }^\circ\text{C}$ para las imágenes térmicas. Los valores máximos fueron de 30.73 y $31.92 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente, mientras que los mínimos fueron de 24.15 y $23.09 \text{ }^\circ\text{C}$.

Conclusiones

Se desarrolló una cámara térmica a partir de la tarjeta Teensy 3.6 y el sensor infrarrojo MLX90640 de 768 píxeles, la cual es apta para integrarse en plataformas RPAS para el monitoreo de la temperatura del dosel en cultivos agrícolas. El peso total del dispositivo de 50 g lo convierte en una alternativa ligera y versátil, por lo tanto, fue una solución adecuada para la implementación en RPAS de pequeño y mediano tamaño sin afectar de forma significativa la autonomía de vuelo.

La metodología implementada permitió la obtención de imágenes térmicas georreferenciadas y su fusión mediante super resolución con información RGB, mejoró notablemente la resolución espacial y facilitó la segmentación precisa de las áreas de interés. Se demostró un alto nivel de confiabilidad al compararse con el porómetro LI-COR LI-1600, obteniendo un $\text{RMSE} = 0.74 \text{ }^\circ\text{C}$ y un $\text{MAE} = 0.57 \text{ }^\circ\text{C}$, lo que respalda su precisión en la estimación de la temperatura foliar del cultivo de maíz.

En conjunto, la cámara térmica para el RPAS presenta una óptima relación entre resolución, peso, costo y tamaño, consolidándose como una herramienta accesible, eficiente y escalable para la adquisición de información térmica en agricultura de precisión y como una alternativa viable para la medición de la temperatura del dosel en cultivos agrícolas, utilizado en la evaluación del estrés hídrico.

Bibliografía

- 1 Abioye, E. A.; Hensel, O.; Esau, T. J.; Elijah, O.; Abidin, M. S. Z.; Ayobami, A. S.; Yerima, O. and Nasirahmadi, A. 2022. Precision Irrigation management using machine learning and digital farming solutions. *AgriEngineering*. 4(1)70-103. <https://doi.org/10.3390/agriengineering4010006>.
- 2 Bijanzadeh, E.; Moosavi, S. M. and Bahadori, F. 2022. Quantifying water stress of safflower (*Carthamus tinctorius* L.) cultivars by crop water stress index under different irrigation regimes. *Heliyon*. 8(3):1-20. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e09010>.
- 3 Bo, L.; Guan, H.; and Mao, X. 2023. Diagnosing crop water status based on canopy temperature as a function of film mulching and deficit irrigation. *Field Crops Research*, 304(1):1-10. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109154>.
- 4 Bwambale, E.; Abagale, F. K. and Anornu, G. K. 2022. Smart irrigation monitoring and control strategies for improving water use efficiency in precision agriculture: a review. *Agricultural Water Management*. 260(1):1-12. Elsevier B. V. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.107324>.
- 5 Dong, M.; Shen, H.; Jia, P.; Sun, Y.; Liang, C.; Zhang, F. and Hou, J. 2023. Calibration method for airborne infrared optical systems in a non-thermal equilibrium state. *Sensors*. 23(14):1-18. <https://doi.org/10.3390/s23146326>.
- 6 Elsayed, S.; Elhoweity, M.; Ibrahim, H. H.; Dewir, Y. H.; Migdadi, H. M. and Schmidhalter, U. 2017. Thermal imaging and passive reflectance sensing to estimate the water status and grain yield of wheat under different irrigation regimes. *Agricultural Water Management*. 189(1):98-110. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.05.001>.
- 7 García-Tejero, I. F.; Gutiérrez-Gordillo, S.; Ortega-Arévalo, C.; Iglesias-Contreras, M.; Moreno, J. M.; Souza-Ferreira, L. and Durán-Zuazo, V. H. 2018. Thermal imaging to monitor the crop-water status in almonds by using the non-water stress baselines. *Scientia Horticulturae*. 238(1):91-97. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2018.04.045>.
- 8 Gheysari, M.; Pirnajmedin, F.; Movahedrad, H.; Majidi, M. M. and Zareian, M. J. 2021. Crop yield and irrigation water productivity of silage maize under two water stress strategies in semi-arid environment: two different pot and field experiments. *Agricultural Water Management*, 255(1):1-9. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106999>.
- 9 Gomes, K. R.; López, D.; Ortega, J. F.; Ballesteros, R.; Poblete, T. y Moreno, M. A. 2017. Calibración de cámaras térmicas no refrigeradas embarcadas en uavs para aplicaciones agronómicas. *INOVAGRI International Meeting*. 26(4):1-11. <https://doi.org/10.7127/iv-inovagri-meeting-2017-res0240343>.
- 10 Jiménez, A. F.; Cárdenas, P. F. and Jiménez, F. 2022. Intelligent IoT-multiagent precision irrigation approach for improving water use efficiency in irrigation systems at farm and district scales. *Computers and Electronics in Agriculture*. 192(20):1-19. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106635>.
- 11 Kamath, R.; Balachandra, M.; Vardhan, A. and Maheshwari, U. 2022. Classification of weeds of paddy fields using deep learning. *ECTI Transactions on Computer and Information Technology*. 16(4):365-377. <https://doi.org/10.37936/ecti-cit.2022164.246857>.
- 12 LI-COR inc. 1989. LI-1600 steady state porometer service manual (issue 82100030). <https://licor.app.boxenterprise.net/s/auoxn0ewmmka5r5inwcf>.
- 13 López-López, R.; Arteaga-Ramírez, R.; Vázquez-Peña, M. A.; López-Cruz, I. y Sánchez-Cohen, I. 2009. Índice de estrés hídrico como un indicador del momento de riego en cultivos agrícolas. *Agricultura Técnica en México*. 35(1):97-111.
- 14 Melexis. 2019. MLX90640 32x24 IR array, Datasheet. <https://github.com/melexis/mlx90640->

- 15 Melo, L. L. de; Melo, V. G. M. L.; Marques, P. A. A.; Frizzone, J. A.; Coelho, R. D.; Romero, R. A. F. and Barros, T. H. da S. 2022. Deep learning for identification of water deficits in sugarcane based on thermal images. *Agricultural Water Management*. 272(1):1-13. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107820>.
- 16 Noguera, M.; Millán, B.; Pérez-Paredes, J. J.; Ponce, J. M.; Aquino, A. and Andújar, J. M. 2020. A new low-cost device based on thermal infrared sensors for olive tree canopy temperature measurement and water status monitoring. *Remote Sensing*. 12(1):1-20. <https://doi.org/10.3390/rs12040723>.
- 17 Ouma, G.; Wanyama, J.; Kabenge, I.; Jagwe, J.; Diana, M. and Muyonga, J. 2024. Assessing the effect of deficit drip irrigation regimes on crop performance of eggplant. *Scientia Horticulturae*, 325(1):1-14. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2023.112648>.
- 18 Oz, N.; Sochen, N.; Mendlovic, D. and Klapp, I. 2025. End-to-end pipeline for simultaneous temperature estimation and super resolution of low-cost uncooled infrared camera frames for precision agriculture applications. *Electrical Engineering and Systems Science*. 250(1):1-24. <http://arxiv.org/abs/2502.13985>.
- 19 Paciolla, F.; Popeo, G.; Farella, A. and Pascuzzi, S. 2025. Agronomic information extraction from UAV-based thermal photogrammetry using MATLAB. *Remote Sensing*. 17(1)1-17. <https://doi.org/10.3390/rs17152746>.
- 20 Sagan, V.; Maimaitijiang, M.; Sidike, P.; Eblimit, K.; Peterson, K. T.; Hartling, S.; Esposito, F.; Khanal, K.; Newcomb, M.; Pauli, D.; Ward, R.; Fritschi, F.; Shakoore, N. and Mockler, T. 2019. UAV-based high resolution thermal imaging for vegetation monitoring and plant phenotyping using ICI 8640 P, FLIR Vue Pro R 640 and thermomap cameras. *Remote Sensing*. 11(1)1-29. <https://doi.org/10.3390/rs11030330b>.
- 21 Wu, Y.; Jiang, J.; Zhang, X.; Zhang, J.; Cao, Q.; Tian, Y.; Zhu, Y.; Cao, W. and Liu, X. 2023. Combining machine learning algorithms and multi-temporal temperature indices to estimate the water status of rice. *Agricultural Water Management*. 289(1)1-18. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108521>.
- 22 Yun, H.; Lo, S.; Diepenbrock, C. H.; Bailey, B. N.; and Earles, J. M. 2024. VisTA-SR: improving the accuracy and resolution of low-cost thermal imaging cameras for agriculture. *Computer Vision*. 240(1):1-10. <http://arxiv.org/abs/2405.19413>.
- 23 MathWorks. 2021. MATLAB.

Desarrollo de cámara térmica para RPAS utilizada en monitoreo del estado hídrico de cultivos

Journal Information
Journal ID (publisher-id): remexca
Title: Revista mexicana de ciencias agrícolas
Abbreviated Title: Rev. Mex. Cienc. Agríc
ISSN (print): 2007-0934
Publisher: Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Article/Issue Information
Date received: 01 March 2026
Date accepted: 01 May 2026
Publication date: 08 July 2026
Publication date: 2026
Volume: 17
Issue: 4
Electronic Location Identifier: e4097
DOI: 10.29312/remexca.v17i4.4097

Categories

Subject: Artículo

Palabras clave:

Palabras clave:

cámara térmica
estrés hídrico
RPAS
sensores infrarrojos
temperatura del dosel

Counts

Figures: 9
Tables: 1
Equations: 3
References: 23