

Detección temprana de la Marchitez letal (ML) en palma de aceite basada en ortomosaicos térmicos normalizados adquiridos con aeronaves remotamente pilotadas

Cristhian Giraldo Betancourt^{1,2}, Jorge Luis Torres León²
José Manuel Monsalve Téllez²

¹ Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia.

² Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma.

Notas del Director

Es bien sabido que la Marchitez letal (ML) es el mayor reto fitosanitario de la palmicultura en la Zona Oriental de Colombia, debido a que es una enfermedad con importante propagación en esta región. Hacia finales de 2020, la ML había provocado la pérdida acumulada de más de un millón de palmas, con una pérdida de ingresos del sector por 185 millones de dólares. Las prácticas para la detección de esta enfermedad tienen cierto grado de subjetividad, son intensivas en mano de obra y pueden ser poco eficientes, ya que dependen de la capacidad de diagnosticar la enfermedad sobre síntomas visuales. Esto justifica el desarrollo de metodologías y herramientas que permitan, de manera masiva y más automatizada, identificar síntomas en el estado más temprano posible, aun sin síntomas visibles, todo esto con el objeto de reducir la propagación del inóculo a otras palmas.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar las respuestas espectrales adquiridas de sensores transportados por aeronaves remotamente tripuladas (ART) y sensores próximos para el diagnóstico de Marchitez letal (ML) en el cultivo de palma de aceite (*Elaeis guineensis*), enfocándose principalmente en la variable de temperatura foliar, dado que investigaciones anteriores de Cenipalma han podido demostrar la ocurrencia de un aumento sensible de la temperatura en palmas infectadas con esta enfermedad, meses antes de la aparición de los síntomas identificables en campo.

Alexandre Patrick Cooman, PhD.
Director General Cenipalma

Introducción

La agroindustria de la palma de aceite en Colombia, cumple un papel importante en la economía nacional, generando más de 200.000 empleos formales. Actualmente, el país cuenta con una participación del 30,9 % de la producción de aceite de palma, ocupando el primer lugar en América y el cuarto en el mundo, luego de Indonesia, Malasia y Tailandia (Ortiz, 2019). El cultivo es considerado de alto rendimiento, por la cantidad de aceite que produce por hectárea y por la variedad de productos que se pueden obtener tanto de los frutos como de otras partes de la planta. Además de aprovecharse en el sector alimenticio, sirven como materia prima en la industria médica, cosmética y energética (Dangond, 2019). En Colombia, los departamentos productores se dividen en zonas palmeras: Oriental, Norte, Central y Suroccidental, consolidando un importante total de área sembrada de 590.188 hectáreas (Sispa, 2021). Esto hace indispensable la implementación de nuevas tecnologías, que permitan realizar a gran escala monitoreos y/o seguimientos de manera más detallada y precisa en las plantaciones.

Las pérdidas asociadas a enfermedades en los cultivos representan del 12 % al 13 %, y en conjunto con los ataques de plagas y competencia con malezas, se determinan que van desde el 33 % al 42 % de la cosecha alcanzable (Jiménez, 2017). Las enfermedades alteran los procesos fisiológicos de las plantas, producto de la

interacción entre el patógeno virulento, la planta hospedante, las condiciones ambientales y la intervención del hombre, reduciendo significativamente los rendimientos agrícolas potenciales.

Según datos de Cenipalma, entre 1997 y 2015 se dieron 320.000 casos de Marchitez letal (ML), mostrando una tendencia creciente que va de 524 casos anuales en 1997, hasta 81.287 en el 2020. Esto ha causado la desaparición de más de 5.636 hectáreas, cuyo efecto en pérdidas económicas es de más de 146 millones de dólares (Rivera & Romero, 2020).

Una palma de aceite afectada por esta enfermedad se caracteriza por presentar un complejo cuadro sintomatológico que incluye clorosis de las hojas jóvenes y secamiento progresivo de las de los tercios medio e inferior. Dicho secamiento avanza por los bordes de los foliolos a lo largo de la nervadura central, que gene-

ralmente va precedido de una franja amarilla que se hace más difusa a medida que la enfermedad avanza (Figura 1) (Martínez *et al.*, 2013). Además, se presentan afectaciones a la corona de los racimos, donde es posible observar necrosis en la base de los frutos sin olor fétido, generando el desprendimiento de frutos, racimos e inflorescencias (Martínez *et al.*, 2013).

El control de la Marchitez letal (ML) es uno de los retos fitosanitarios de la palmicultura colombiana, especialmente en la Zona Oriental, debido a que gran cantidad de palmas terminan muriendo a causa de esta enfermedad, lo que la convierte en una gran limitante para el cultivo en dicha región.

La tecnología de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por su sigla en inglés), nombrados según la Aeronáutica Civil colombiana como aeronaves remotamente pilotadas (ARP), o simplemente drones, pueden estar equi-



Figura 1. Síntomas de ML en palma joven del híbrido alto oleico (*E. oleifera* × *E. guineensis*), secamiento progresivo desde el ápice hacia la base foliar y secamiento inicial de foliolos mostrando una franja amarilla que precede el secamiento.

pados con sensores útiles para diversas aplicaciones, como la adquisición de imágenes térmicas de muy alta resolución. Estos sensores permiten hacer una medición detallada de la temperatura del dosel de la planta (Matese & Di Gennaro, 2018). Además, han demostrado ser una herramienta útil para la detección de diferentes tipos de estrés (Messina & Modica, 2020).

El presente trabajo describe la implementación de cámaras térmicas adaptadas a un dron, con lo que se pretende establecer una nueva metodología para la detección temprana de enfermedades como la ML en el cultivo de palma de aceite, y que a su vez pueda ser aplicable en grandes extensiones de tierra. Su objetivo es reducir la propagación del inóculo y/o enfermedad a palmas sanas y a zonas en las cuales no se ha reportado su presencia. La hipótesis es que exista una diferencia en la respuesta térmica de palmas sanas y palmas con síntomas de ML, a partir de imágenes térmicas aéreas procesadas con un método de normalización.

Materiales y métodos

El presente estudio se realizó en la Zona Oriental, en el municipio de San Carlos de Guaroa, Departamento del Meta, Colombia. La captura de los datos se llevó a cabo en la plantación Palmeras La Carolina, donde se seleccionó el lote No. 5, que cuenta con un área total de 7 hectáreas. Dentro del lote se eligieron 60 palmas enmarcadas en tres zonas de análisis, para observar el comportamiento térmico de palmas sanas y enfermas (Figura 2).

Los muestreos en campo se realizaron con una periodicidad de 15 días durante la ejecución del proyecto en 2019 y 2020, en los que se llevaron a cabo operaciones con un dron a la misma hora. Esto con la finalidad de que las condiciones climáticas en el momento de la adquisición de las imágenes fueran lo más homogéneas posibles. Se utilizó una cámara térmica Flir Duo Pro-R a

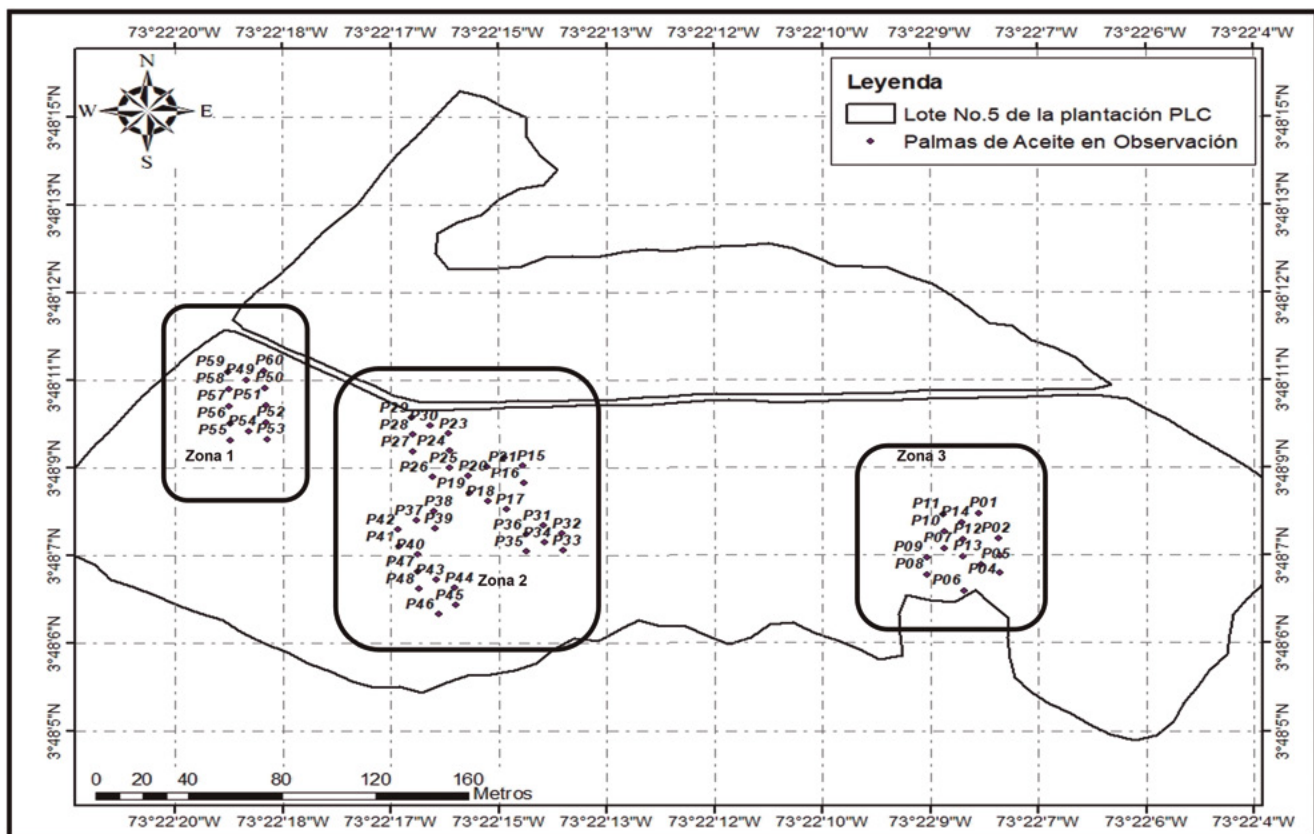


Figura 2. Zonas de análisis del comportamiento de la temperatura de las palmas dentro del lote.

● bordo de un dron multirrotor. La cámara calcula los valores de temperatura en grados Celsius (°C), con una alta resolución espacial de todos los objetos presentes en la escena, que se compilan mediante el *software* de procesamiento de imágenes Agisoft Metashape, generando así el ortomosaico térmico del lote. Las operaciones del dron se hicieron a 60 m de altura, configurando las líneas de vuelo con un traslape entre imágenes tanto horizontal como vertical del 75 % (Avtar *et al.*, 2020). Se realizaron dos vuelos por fecha de adquisición.

Para el correcto análisis y visualización de la información térmica dentro de los lotes, y con el objetivo de llevar a cabo monitoreos multitemporales del comportamiento de cada una de las palmas, se implementó una metodología de normalización de los datos obtenidos a través del sensor térmico. Esto, dado que los datos de temperaturas originales están determinados por las condiciones meteorológicas presentes en el momento de la captura de la imagen. Así se propuso el siguiente esquema metodológico (Figura 3).

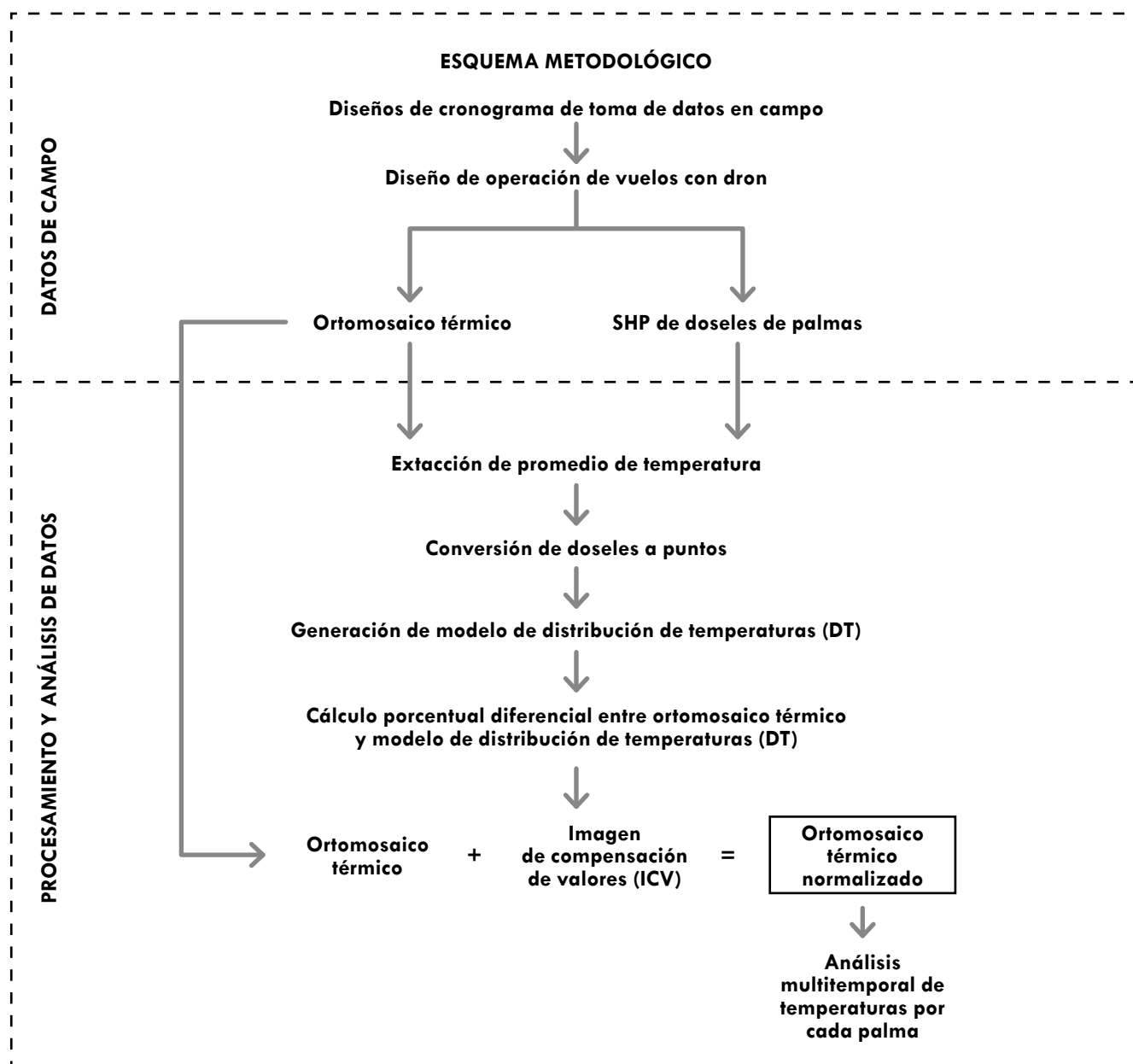


Figura 3. Esquema metodológico del proceso de normalización de ortomosaicos térmicos aplicado al cultivo de palma de aceite.

El proceso de normalización del ortomosaico térmico se basó en un modelo de distribución de temperatura (DT), que se generó utilizando un *Shapefile* que representa el dosel de cada una de las palmas. A través de este se calculó el valor promedio de los píxeles de temperatura dentro de cada uno. Los *Shapefiles* fueron creados a partir de la coordenada central de la palma, y con un búfer (área de influencia) de 2,5 m, adicionando para cada una de las palmas un código identificador único basado en el año de siembra, número de línea y número de palma dentro de la línea. Posteriormente, se estimó la diferencia en términos porcentuales entre el modelo de distribución de temperaturas (DT), y las temperaturas de cada palma registradas por el sensor. Este proceso dio como resultado la imagen de compensación de valores (ICV), la cual contiene valores positivos en las zonas con bajas temperaturas en el ortomosaico original, y negativos en las zonas con altas temperaturas en el mismo, que sirve como insumo principal para homogenizar el ortomosaico original. Finalmente, se realizó una operación de adición entre la ICV y el ortomosaico térmico original, dando como resultado el ortomosaico térmico normalizado.

Se realizó un análisis multitemporal de las temperaturas de cada una de las palmas registradas en los muestreos. Los datos se contrastaron con los de los censos de sanidad, que personal capacitado de la plantación hace semanalmente, con el objetivo de tener un punto

de referencia en campo y poder realizar así una detección temprana de la enfermedad.

Resultados y discusión

Durante la operación del dron se presentaron cambios en la escena (meteorológicos, nubosidad, incidencia del sol sobre los objetos, etc.), generando diferencias en los valores de temperaturas mencionados anteriormente. Este fenómeno ocasionó que las temperaturas registradas para cada una de las palmas en los ortomosaicos, no fueran comparables en el tiempo impidiendo establecer una detección temprana de la enfermedad. Así, se implementó el proceso de normalización del ortomosaico térmico, basándose en los valores del modelo de distribución de las temperaturas (DT) (Figura 4b), logrando observar zonas de altas o bajas temperaturas, sin alterar las diferencias existentes entre las de las palmas sanas y las de las enfermas (Figura 4c).

A continuación, se muestra el resultado del proceso de normalización. El generado por el sensor (Figura 4a), presenta zonas donde predominan temperaturas más bajas y otras donde priman las más altas, debido a las condiciones climáticas cambiantes que se dieron en el campo durante el momento de la captura de imágenes.

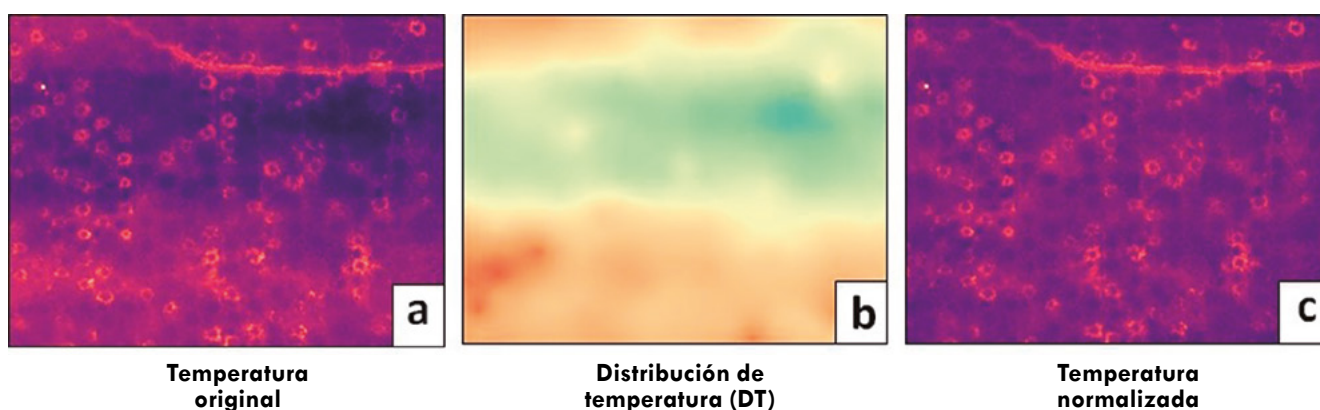


Figura 4. Diferenciación entre ortomosaicos térmicos. a) Ortomosaico térmico generado por el sensor. b) Modelo de distribución de las temperaturas (DT) registradas por las palmas dentro del lote. c) Ortomosaico térmico normalizado.

Una vez generado el ortomosaico térmico normalizado, se procedió a compararlo con el producido por el sensor. En la Figura 5 aparece el registro del promedio de las temperaturas de cada una de las palmas captadas por el sensor térmico (color azul), y el de las temperaturas normalizadas (color verde). Se evidencia que, a través del proceso de normalización, es posible determinar el comportamiento de la temperatura de las palmas sanas, e identificar con mayor claridad el grupo de aquellas que presentan algún síntoma de enfermedad, al exponer temperaturas elevadas que van desde 2 hasta 4 °C de diferencia respecto al promedio de las palmas sanas.

A partir de la implementación del proceso de normalización, se pueden realizar comparaciones multitemporales de los datos de temperaturas en cada una de las palmas, para analizar en el tiempo cuál ha sido su comportamiento histórico. Esto con el fin detectar de manera temprana la afectación por ML, asociada con el aumento de la temperatura foliar, en promedio 14 días antes de mostrar síntomas. En la Figura 6 se presentan las tres zonas seleccionadas dentro del lote de estudio, de las 60 palmas en observación: la línea verde corresponde a las temperaturas asociadas a

las palmas sanas; la línea continua roja a las palmas enfermas; y la línea discontinua roja, a las enfermas reportadas en el censo de la plantación, a través del tiempo representado en días julianos.

En las figuras 6a, 6b y 6c se observa la variación de la temperatura foliar, sin que sea posible discriminar claramente entre palmas sanas y enfermas, debido a las altas variaciones registradas en cada uno de los muestreos. Caso contrario sucede en las figuras 6d, 6e y 6f, que muestran cómo el proceso de normalización de los ortomosaicos térmicos discriminan con mayor claridad las palmas sanas de las enfermas. Se observó un aumento entre 1 a 2 °C para palmas enfermas sin síntomas, y de 3 °C para palmas enfermas con síntomas, respecto a las sanas.

Este avance está enmarcado en el proyecto de investigación de teledetección temprana de la ML en palma de aceite, en la plantación Palmeras La Carolina localizada en la Zona Oriental. Se puede concluir que las imágenes térmicas adquiridas con dron pueden ser utilizadas como método de detección temprana de esta enfermedad, y así mismo sirven como indicador para la toma de decisiones frente al manejo de la misma.

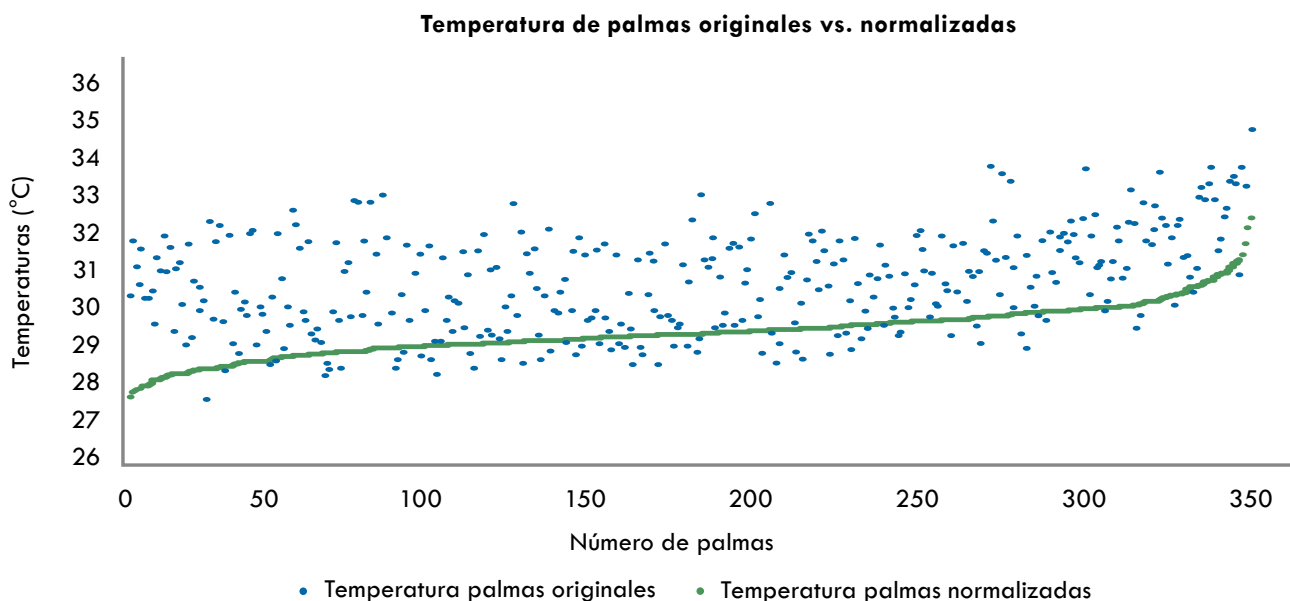
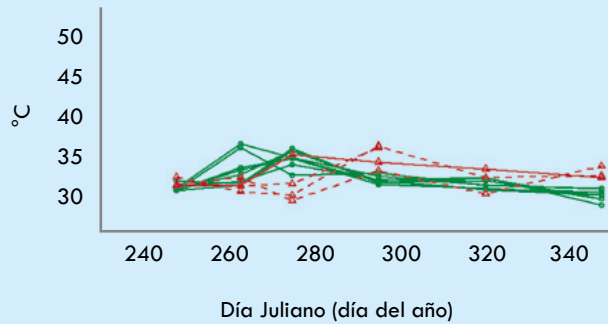


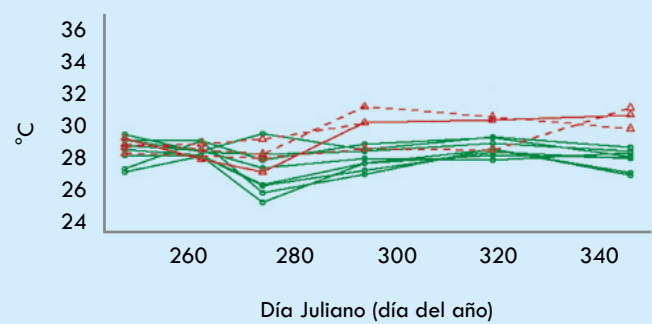
Figura 5. Gráfico comparativo entre los valores de temperaturas originales registrados por el sensor (puntos azules) y los valores de temperaturas obtenidos mediante el proceso de normalización (puntos verdes) de cada una de las palmas dentro del lote.

ZONA 1

A.

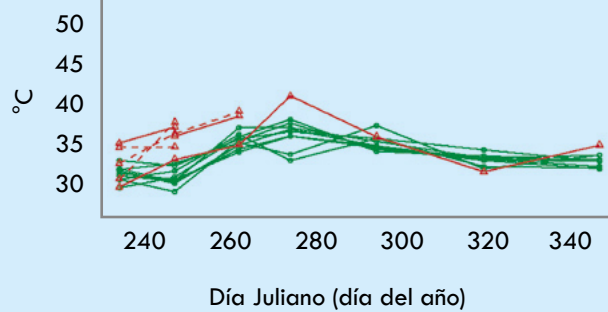


D.

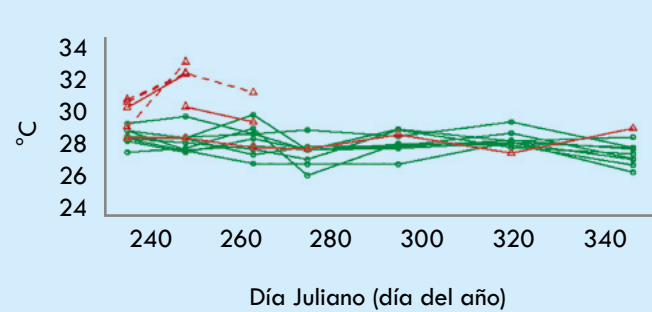


ZONA 2

B.

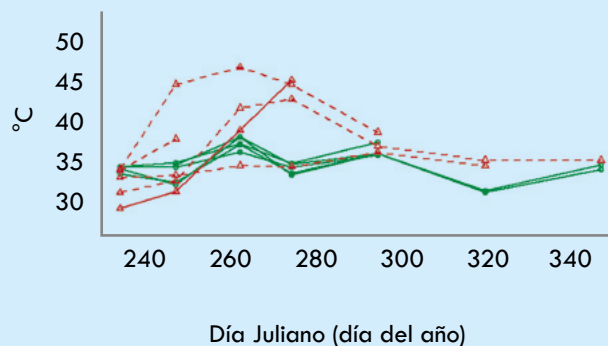


E.



ZONA 3

C.



F.

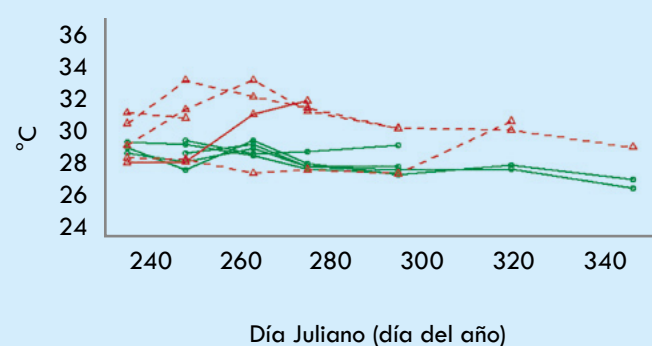


Figura 6. Comportamiento temporal de la temperatura foliar de diferentes palmas de aceite sanas (Palmas Sanas), palmas enfermas en observación (Palmas Enf. Obs) y palmas enfermas del censo de la plantación (Palmas Enf. Obs). Continúa.

Agradecimientos

Al personal y directivas de la plantación Palmeras La Carolina. A la Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma y al Fondo de Fomento Palmero, administrado por Fedepalma.

Referencias bibliográficas

Avtar, R., Suab, S. A., Syukur, M. S., Korom, A., Umarhadi, D. A., & Yunus, A. P. (2020). Assessing the influence of UAV altitude on extracted biophysical parameters of young oil palm. *Remote Sensing*, 12(18), 1–21. <https://doi.org/10.3390/RS12183030>

Dangond, L. F. (2019). El cultivo de la palma de aceite: oportunidad o amenaza para Colombia. *Palmas*, 40(2), 44–60.

Jiménez, R. (2017). Las enfermedades de las plantas: impactos, amenazas y control. *Boletín de la Real Academia de Córdoba*, 166, 111-130.

Martínez, G., Arango, M., Torres, G. A., Sarria, G. A., Vélez, D. C., Rodríguez, J., ... & Guest, D. I. (2013).

Avances en la investigación sobre las dos enfermedades más importantes de la palma de aceite en Colombia: la Pudrición del cogollo y la Marchitez letal. *Palmas*, 34(1), 39–47.

Matese, A., & Di Gennaro, S. F. (2018). Practical applications of a multisensor UAV platform based on multispectral, thermal and RGB high resolution images in precision viticulture. *Agriculture (Switzerland)*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/agriculture8070116>

Messina, G., & Modica, G. (2020). Applications of UAV thermal imagery in precision agriculture: State of the art and future research outlook. *Remote Sensing*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/RS12091491>

Ortiz, Y. A. (2019). La palma de aceite como ejemplo para la agroindustria en Colombia. Tesis de grado, Facultad de Economía, Fundación Universidad de América.

Rivera, Y. D., & Romero, H. M. (2020). Líneas Estratégicas de Investigación y Extensión de Cenipalma: el Nuevo Enfoque de Trabajo Articulado. *Ceniavances Edición Especial*, 1–16.

Sistema de Información Estadística del Sector Palmero, Sispa. (2021). <http://sispa.fedepalma.org/sispaweb/>

Esta publicación es propiedad del Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma, por tanto, ninguna parte del material ni su contenido, ni ninguna copia del mismo puede ser alterada en forma alguna, transmitida, copiada o distribuida a terceros sin el consentimiento expreso de Cenipalma. Al realizar la presente publicación, Cenipalma ha confiado en la información proveniente de fuentes públicas o fuentes debidamente publicadas. Contiene recomendaciones o sugerencias que profesionalmente resultan adecuadas e idóneas con base en el estado actual de la técnica, los estudios científicos, así como las investigaciones propias adelantadas. A menos que esté expresamente indicado, no se ha utilizado en esta publicación información sujeta a confidencialidad ni información privilegiada o aquella que pueda significar incumplimiento a la legislación sobre derechos de autor. La información contenida en esta publicación es de carácter estrictamente referencial y así debe ser tomada y está ajustada a las normas nacionales de competencia, Código de Ética y Buen Gobierno de la Federación, respetando en todo momento la libre participación de las empresas en el mercado, el bienestar de los consumidores y la eficiencia económica.



Director general: Alexandre Patrick Cooman, Ph.D.
 Revisión de textos: Comité de Publicaciones de Cenipalma
 Coordinación editorial: Yolanda Moreno Muñoz
 Diagramación: Ximena Díaz Ortiz
 Impresión: Estudio 45-8