



DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE UN EQUIPO PARA MONITOREO DE LA TEMPERATURA FOLIAR DE UN CULTIVO DE JITOMATE (*Solanum lycopersicum* L.) EN INVERNADERO.

Antonio Martínez-Ruiz^{1*}; Julio Torres-Sandoval²; Cándido Mendoza-Perez³; Agustín Ruiz-García⁴; José Guillermo Cebada-Reyes⁵; Rutilo López López⁶

¹Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Campo experimental, San Martinito, km. 56.5, C.P. 74100, carretera federal México-Puebla.

amartinezr8393@gmail.com - 5951070923 (*Autor de correspondencia)

²Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), km. 38.5 C.P. 56230. Texcoco, Méx.

³Colegio de Postgraduados, Posgrado en hidrociencias, km 36.5, C.P. 56230. campus Montecillo, estado de México.

⁴Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación, carretera México- Texcoco km. 38.5 C.P. 56230.

⁵Universidad del Valle de Puebla, Calle 3 Sur 5759, El Cerrito, km 4.1, C.P. 72440, Puebla, Pue.

⁶Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), km 1 carretera Huimanguillo, Tabasco México.

Resumen

Medir con precisión la temperatura de los cultivos, puede ayudar a entender las relaciones entre la energía interna, estado fisiológicos y factores ambientales, por lo que en este trabajo de investigación se presenta un equipo desarrollado para monitoreo de esta variable, el cual está compuesto de cinco sensores infrarrojos modelo MLX90614 su calidad de medición se comparó con 4 sensores termopares tipo T insertados en la nervadura del envés de las hojas, se tomaron dos bloques de datos para hacer las comparaciones, ajustes y evaluación del equipo. Para ello se establecieron dos ciclos de cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) uno en otoño-invierno y primavera-verano ambos en cultivos hidropónicos, con densidades de 3.5 plantas por m². Se obtuvo la diferencia entre la temperatura del aire y la temperatura foliar para mostrar el estado hídrico del cultivo. Para lo cual se instalaron un sensor de temperatura y humedad relativa y radiación solar en el centro del invernadero. El valor de ajuste de temperatura para los datos nocturnos, registrados por el equipo fue de 1.03 resultado de un análisis de frecuencia como el promedio del percentil 75, y los estadísticos de ajuste entre las temperaturas corregidas del equipo y los termopares tipo T(testigo) fueron un R² de 94%, RMSE de 0.93, y sesgo de 0.27, además de presentar la gráfica 1:1 para mostrar la calidad de las mediciones respecto al testigo. El equipo desarrollado mostró una medición precisa de la temperatura foliar por lo que es factible su aplicación en investigaciones sobre evapotranspiración, manejo de riego, incidencia de enfermedades y rendimiento de cultivos, la ventaja de este equipo es su bajo costo respecto a los sensores termopares tipo T.

Palabras claves: índice estrés hídrico, programación de riegos, transpiración, déficit de presión de vapor.



Introducción

La temperatura de las hojas de las plantas es la temperatura de la superficie de la hoja que está expuesta a la atmósfera. La temperatura del cultivo está influenciada por la estructura fisiológica de la planta misma, y de los factores meteorológicos, tales como la radiación solar, temperatura del aire, velocidad de viento. Medir con precisión la temperatura de los cultivos, puede ayudar a entender las relaciones entre la energía interna, estado fisiológicos y factores ambientales. Estudiar el cambio de la temperatura del cultivo es importante en la investigación de la evapotranspiración en campo y predicción de rendimientos (Lu et al., 2016; Çolak et al., 2015). La temperatura de la hoja afecta al balance de energía en los cultivos y a las tasas de varios procesos fisiológicos tales como la respiración, fotosíntesis, y transpiración (Miller, 1971). Temperaturas arriba de la temperatura óptima de la hoja, limita la fijación de dióxido de carbono a través de la limitación de la actividad enzimática fotosintética de la RUBISCO (Isoda, 2010). El déficit hídrico es uno de los factores más importantes que limitan el rendimiento de los cultivos, por lo tanto, el monitoreo del estado hídrico es importante para dar riegos razonables y ahorro de agua por los cultivos. La temperatura de la hoja es un factor importante para controlar el estado hídrico de la hoja en condiciones de déficit. Usar la temperatura de cultivo para caracterizar el estado hídrico es un nuevo método de monitoreo. Se ha encontrado que la temperatura del cultivo usualmente es más baja que la temperatura del aire en condiciones suficientes de agua en el suelo, condiciones de estrés hídrico la diferencia entre la temperatura del cultivo y el aire son mayores (Zhang et al., 2007). Una gran parte del agua absorbida del suelo se consume por transpiración, previniendo incrementos de temperaturas, la tasa de transpiración está directamente relacionada con el gradiente de concentración de vapor de agua en los espacios intercelulares de las hojas y el aire del ambiente (Surendar et al., 2013). El objetivo de esta investigación fue desarrollar un equipo de bajo costo para el monitoreo de la temperatura foliar en un cultivo de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), comparar la precisión de sus mediciones y evaluar su funcionamiento con dos bloques de datos uno para el ciclo otoño-invierno y otro para primavera-verano.

Materiales y Métodos

Establecimiento del cultivo

El presente trabajo de investigación se realizó a cabo en un invernadero tipo capilla de vidrio de 8 x 8 m y en otro invernadero tipo cenital de plástico de dimensiones de 8 x 15 m, ambos localizados en la Universidad Autónoma Chapingo, 19°29' LN, 98°53' LW y 2240 m de altitud. Se establecieron dos cultivos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.), cultivar "CID F1" durante la estación otoño-invierno y primavera-verano, en sistema hidropónico, usando como sustrato tezontle, con una densidad de siembra de 3.5 plantas por m². El primer cultivo se trasplantó el 21 de agosto de 2015 y el segundo el 24 de abril de 2016.

Desarrollo e instalación del equipo

El sistema está conformado por cinco sensores infrarrojo modelo MLX 90614 (rangos de temperaturas de -20 a 120 °C con resolución de 0.14 °C). Las mediciones de los sensores se almacenaron en una memoria flash microSD, se utilizó un lector de micro SD CATALEX V1.1, así mismo las mediciones se mostraron en una pantalla LCD de 16x4. Los sensores, el adaptador de memoria, la pantalla LCD y el reloj de tiempo real se conectaron a un microcontrolador Arduino Mega modelo ATmega 2560, en este microcontrolador se programó la adquisición de las mediciones de los sensores, almacenamiento de los datos, y se mostraron los valores de temperatura foliar correspondiente a cada sensor, los componentes electrónicos se montaron en un protoboard de dimensión 165.1 x 54.29x 9.68 mm (Figura 1). El circuito armado se insertó en un contenedor de plástico para protección y para facilitar la instalación en el cultivo. Alimentado de un convertidor-regulador de voltaje de 9 Volts de salida.



Figura 1. Fase de prueba del prototipo

Variables medidas

En ambos experimentos se instaló un sensor de temperatura y humedad relativa modelo S-TMB-M006 a 1.5 m sobre el suelo y la radiación solar global con un sensor S-LIB-M003 conectado a un datalogger U-30-NRC. Para comparar los datos de la temperatura foliar medido por el equipo de sensores infrarrojos, se instalaron 4 termopares tipo T (rango de medición -260°C a 400°C , precisión de ± 0.6 °C) uno en cada hoja, dos ubicados en la parte media de la planta y dos a 30 cm arriba de la parte media, insertados en la nervadura del envés de las hojas que alcanzaron la madurez fisiológica, conectados a un datalogger modelo UX100-014 (Onset computer corporation) para el almacenamiento de los datos. De la misma forma se instalaron los sensores del equipo desarrollado, ubicados a una distancia de 20 cm y 45° sobre las hojas muestreadas, almacenándose en un sistema de adquisición de datos integrado al mismo, en ambos equipos se registraron datos del 06 al 21 de noviembre de 2015 para el ciclo de otoño-invierno (Figura 2) y del 02 al 08 de junio de 2016 para el ciclo de

cultivo de primavera-verano (Figura 3), los datos se registraron cada minuto en ambos ciclos de cultivo. La transpiración se midió con un lisímetro de pesada con una balanza marca sartorius COMBICS 3 (150 kg, ± 2 g de precisión).



Figura 2. Instalación de los sensores infrarrojos y termopares Tipo T en el cultivo otoño-invierno.



Figura 3. Monitoreo del cultivo de jitomate con el equipo de sensores infrarrojos durante primavera-verano.

Resultados y Discusión

En la figura 4 a) se muestran los valores registrados de temperatura foliar en $^{\circ}\text{C}$ por los sensores termopares tipo T y el equipo construido con sensores infrarrojos. Se observa que para las mediciones durante el día que corresponden a las temperaturas mayores de 18°C , los valores de ambos equipos fueron muy similares y durante la noche los valores menores a 18°C , registrados por el equipo son ligeramente superiores a los termopares tipo T, por lo que fue necesario buscar el valor de temperatura para ajustar estas diferencias y hacerlas coincidir con los sensores testigos. El valor de ajuste para las temperaturas nocturnas fue de 1.03°C , resultado de un análisis de frecuencia de las desviaciones entre los sensores testigos y el equipo construido, tomándose el promedio de los valores del percentil 75, sustrayendo este valor encontrado a las mediciones registradas por el equipo durante la noche, estas correcciones se reportan en las gráficas 4b) y 4c).

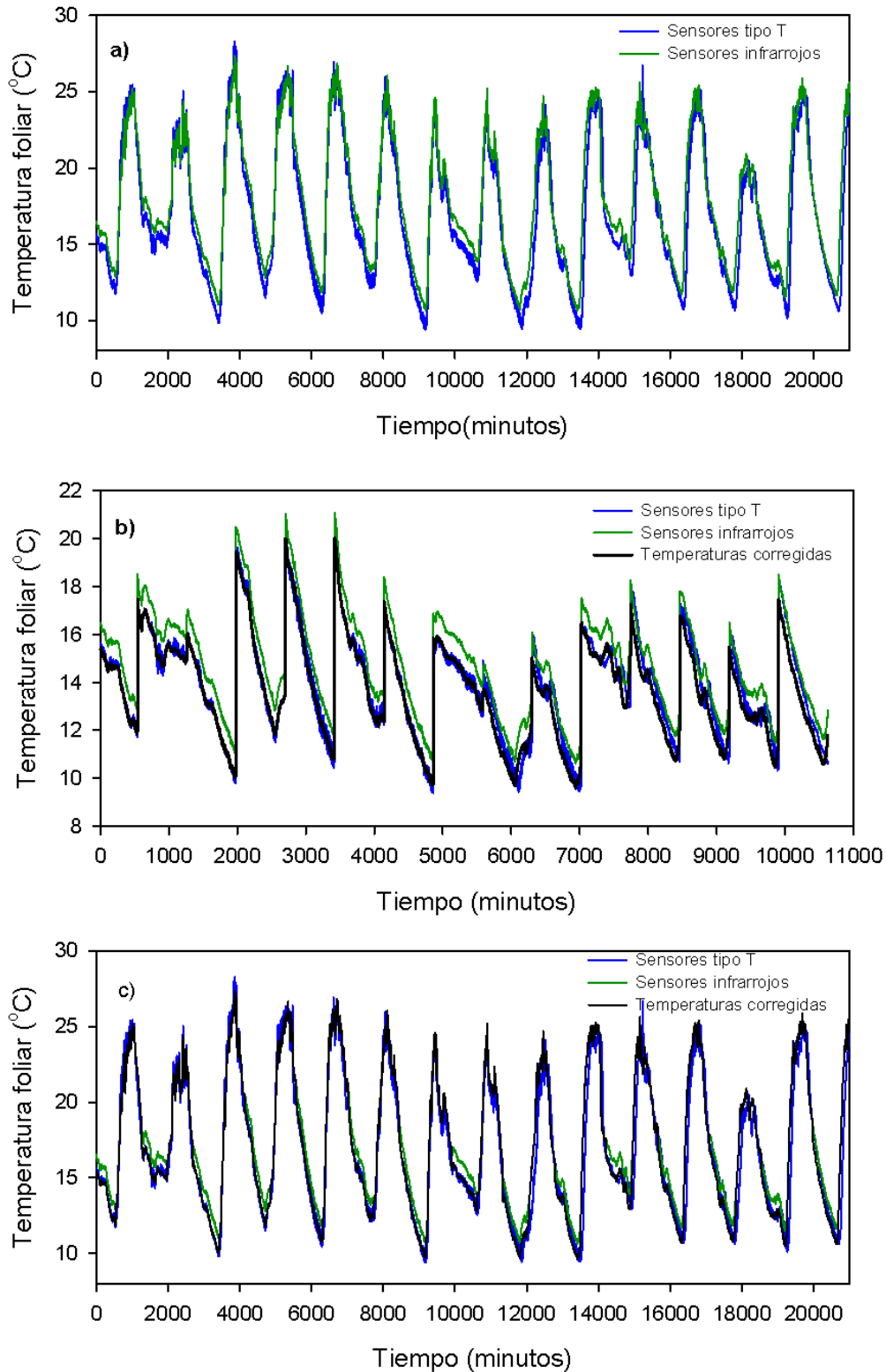


Figura 4. Valores de temperatura foliar de los termopares tipo T y sensores infrarrojos a) durante el día sin correcciones, b) durante la noche y c) durante el día con correcciones.

La figura 5a y 5b) muestran la dispersión de los pares de datos de los sensores testigos (termopares tipo T) y el equipo construido con sensores infrarrojos antes y después de hacer las correcciones de los datos registrados durante la noche.

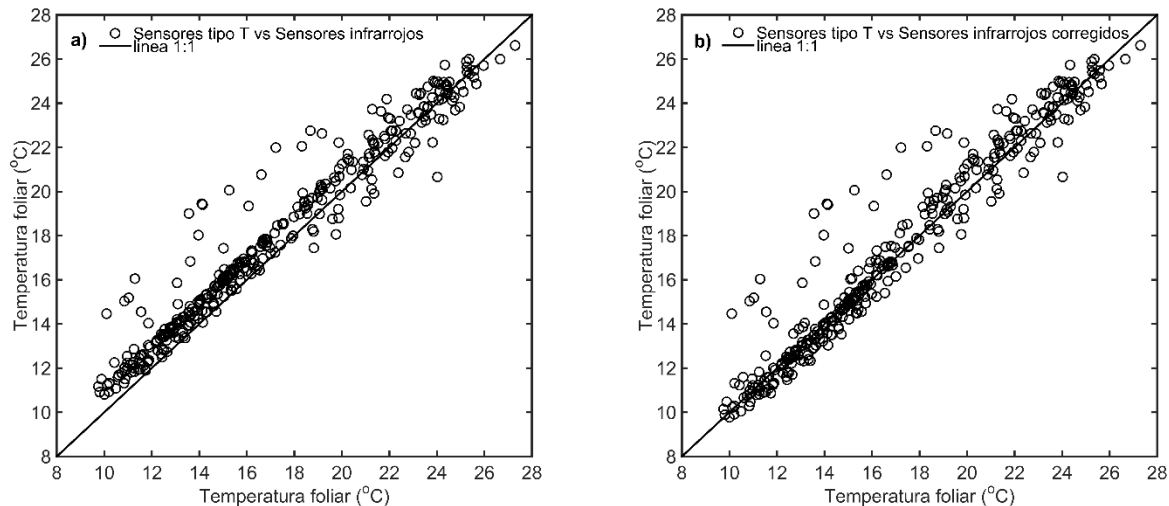


Figura 5. Valores promedio de cada hora de temperatura foliar de los termopares tipo T y sensores infrarrojos, a) sin corrección y b) con correcciones.

El valor del sesgo antes del ajuste fue -0.78 por lo que las mediciones del equipo diseñado tienden a sobrestimar la temperatura foliar particularmente en las noches cuando la humedad relativa aumenta por arriba de 70% y una vez corregido los datos desfasados durante la noche, el sesgo disminuyó a 0.27 , logrando así un acercamiento a los valores registrados con los termopares tipo T, durante el día se observa que las mediciones de ambos equipos son parecidas, por lo que para fines de aplicación de monitoreo del índice de estrés hídrico con propósito del manejo de la programación de riegos el resultado es alentador. Los índices de ajuste como son el RMSE y coeficiente de determinación (R^2) resultaron parecidos tanto para los gráficos de dispersión a) y b), encontrándose valores de RMSE (0.94 y 0.93) y R^2 (94% , 94%) para los pares de datos en la gráfica de dispersión sin y con correcciones respectivamente. La grafica 1:1 de la figura 5 b) indican que los valores medidos por los sensores del equipo construido son similares en la mayoría de los casos a los valores medidos con los sensores termopares tipo T ya que la gran mayoría de puntos se ubican sobre la línea de 45° (línea 1:1).

En la figura 6 y 7 se presentan los datos de temperatura del aire y la temperatura del cultivo, así como las diferencias entre estas, para los dos bloques de datos. Donde se observa que las diferencias son más marcadas para el cultivo de la estación de primavera-verano, cabe resaltar que ambos cultivos se manejaron en condiciones sin restricción de agua y nutrientes. Con la finalidad de entender las variaciones entre las diferencias de temperaturas del aire y del cultivo entre un ciclo y otro, en la figura 8, se muestra la transpiración, humedad relativa y radiación global para los días 7,8 y 9 de noviembre del ciclo otoño-invierno y 10, 11 y 12 de junio para primavera-verano para un índice de área foliar de 3.7 y 2.8 respectivamente.

Para el ciclo otoño invierno los valores de humedad relativa en la mayoría de los días están por encima del 65%, mientras que para el ciclo primavera verano se registraron valores hasta de 30%. Probablemente las ligeras diferencias encontradas para los datos de temperatura del aire y de la hoja durante otoño invierno haya sido a la alta humedad relativa registrada en el interior del invernadero. Se sabe que los cultivos a alta humedad relativa o días nublados disminuyen su tasa de transpiración, por el contrario, en el ciclo de primavera verano, la temperatura foliar resulto ser mucho menor que la temperatura del aire para la mayoría de los días muestreados, este efecto de refrigeración es provocado por los altos niveles de transpiración (Çolak et al., 2015), esto implica que las plantas se encuentran bajo condiciones de suficiente humedad (Zhang et al., 2007). Con la figura 8 se corrobora que las pocas diferencias encontradas entre la temperatura foliar y del aire durante otoño-invierno es debido a la alta humedad relativa más que el nivel de radiación, si bien es cierto que durante primavera-verano el nivel de radiación global es más alto, no es razón suficiente para atribuirle a este factor el efecto en la reducción de la tasa de transpiración y en consecuencia la mínima diferencia entre la temperatura del aire y de cultivo. Durante la noche los valores de la temperatura del aire y del cultivo tienden a igualarse debido que no existe aporte de energía y la transpiración del cultivo disminuye de manera significativa sin llegar a ser cero como lo reporta Martínez et al. (2012) esta ligera diferencia entre las temperaturas del aire y del cultivo se observa en las figuras 6 y 7. El gradiente de temperatura entre el aire y las hojas es un claro indicativo del estado hídrico del cultivo como lo menciona Lu et al. (2016) en este caso tales diferencias oscilan entre 3-4°C para primavera-verano, estos valores se han reportado para el cultivo de uvas bien regados (Çolak et al., 2015) para un híbrido de maíz por Lu et al. (2016) y reportado por (López-López et al., 2009) para tomate de cascara y de 1-2°C para otoño-invierno.

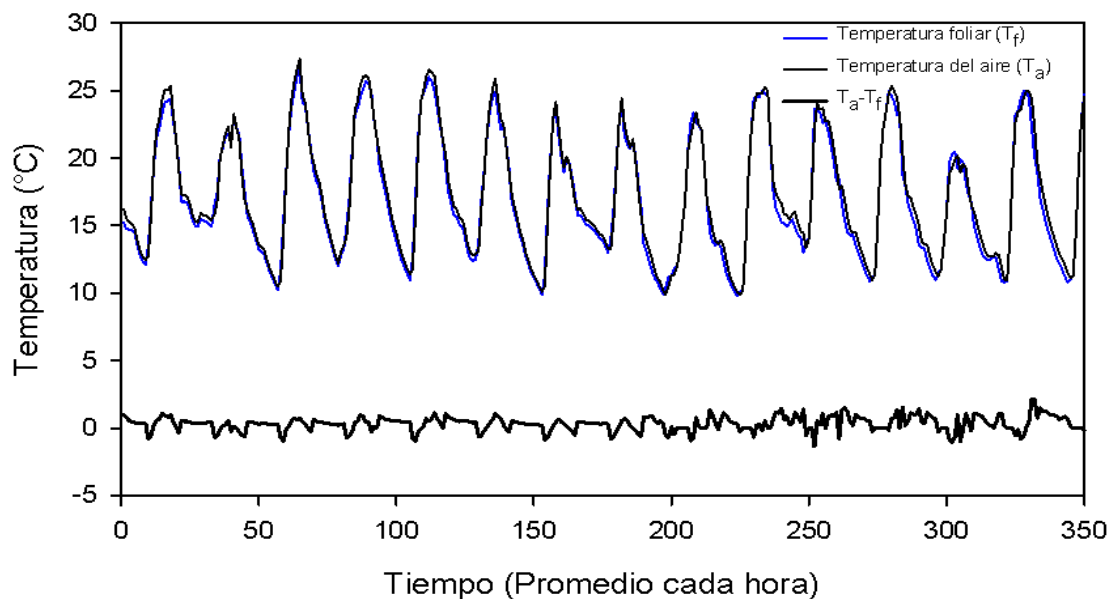


Figura 6. Temperatura foliar (T_a), temperatura del aire (T_f) y diferencias entre la temperatura del aire y temperatura foliar ($T_a - T_f$) del 6 al 21 de noviembre del 2015.

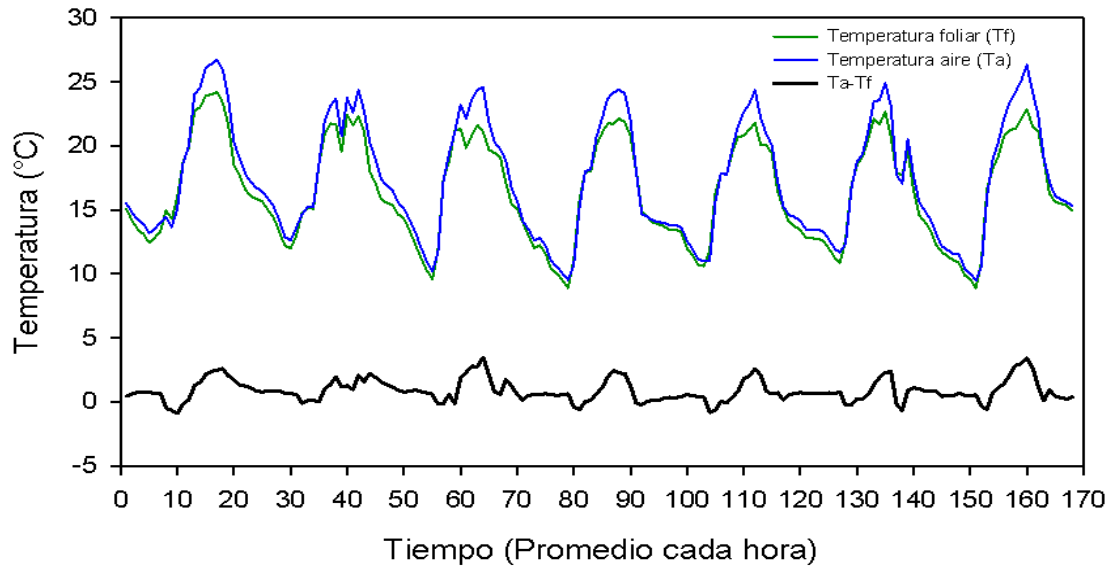


Figura 7. Temperatura foliar (T_a), temperatura del aire (T_f) y diferencias entre la temperatura del aire y temperatura foliar (T_a-T_f) del 02 al 08 de junio del 2016.

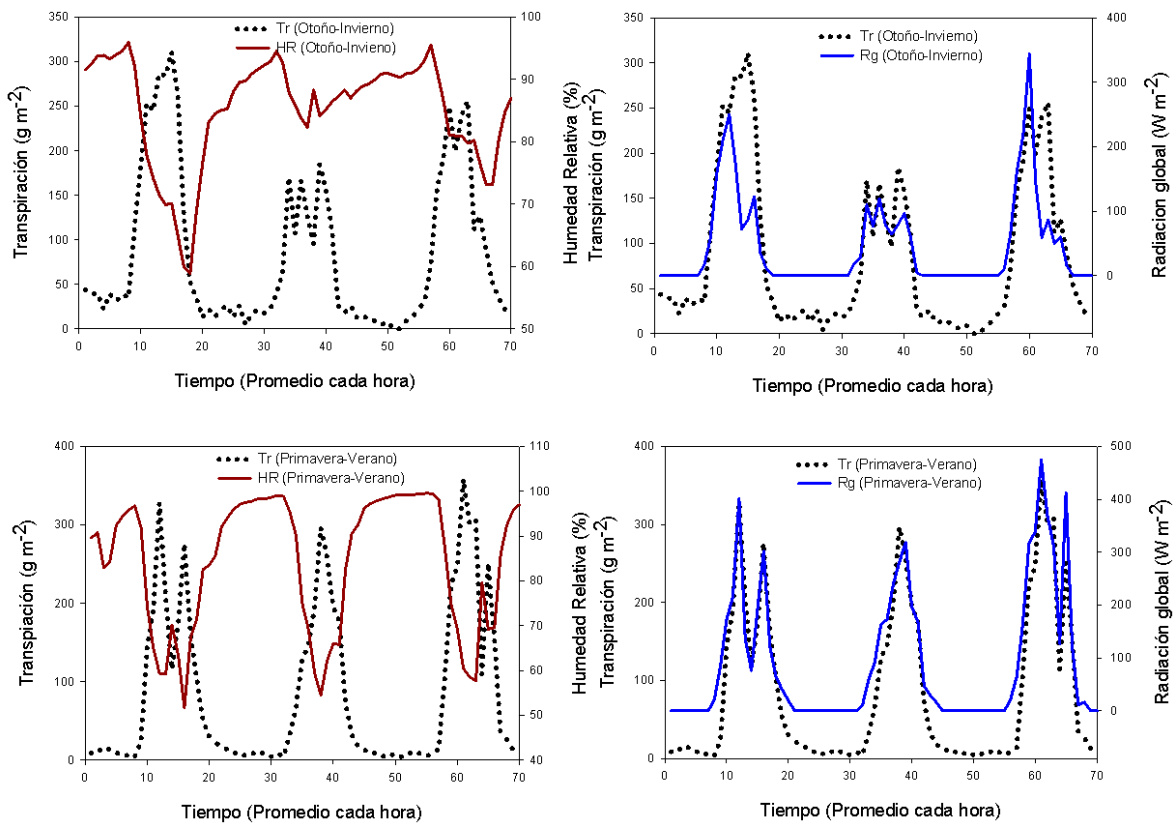


Figura 8. Humedad relativa, radiación global y transpiración para tres días del ciclo otoño-invierno y primavera-verano.



Conclusiones

El equipo de medición de la temperatura del cultivo, mostraron mediciones confiables al compararse con los registrados por los termopares tipo T, para valores durante la noche el equipo mostró un pequeño desfase entre las mediciones de los termopares y el equipo, sin embargo estas diferencias fueron ajustados de manera precisa, por lo que de acuerdo con los resultados encontrados se concluye que el equipo es factible de ser aplicado para fito-monitoreo, específicamente para medición de la temperatura foliar ya que como se mencionó anteriormente esta variable es un indicador del estado hídrico del cultivo y puede ser utilizado en la programación de riegos a partir de caracterizar el índice de estrés hídrico de un cultivo. Las mediciones de los cinco sensores en conjunto mostraron mayor estabilidad que los cuatro sensores termopares tipo T. Otra ventaja de los sensores infrarrojos es que no están en contacto con las hojas y no se requiere lastimarlas para su instalación como en el caso de los termopares que constantemente se tienen que cambiar de hoja por la necrosis provocada en el punto de inserción. La ventaja de este equipo es el bajo costo de su desarrollo lo que requiere una inversión de aproximadamente 2500 pesos además de que se pueden conectar más de cinco sensores, comparado con el costo de los termopares tipo T que supera los 10000 pesos y con el inconveniente de que solo se pueden registrar información de cuatro sensores en el dataloger.

Referencias Bibliográficas

- Çolak, Y. B., Yazar, A., Çolak, İ., Akça, H., & Duraktekin, G. (2015). Evaluation of crop water stress index (CWSI) for eggplant under varying irrigation regimes using surface and subsurface drip systems. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 4, 372–382.
- Isoda, A. (2010). Effects of water stress on leaf temperature and chlorophyll fluorescence parameters in cotton and peanut. *Plant Production Science*, 13(3), 269–278.
- López-López, R., Arteaga-Ramírez, R., Vázquez-Peña, M. A., López-Cruz, I. L., Sánchez-Cohen, I., & Ruiz-García, A. (2009). Índice de estrés hídrico del cultivo de tomate de cáscara (*Physalis ixocarpa* Brot.). *Revista Chapingo. Serie Horticultura*, 15(3), 259–267.
- Lu Y., Wenly W., Zhang X., Zheng W. 2016. A review on leaf temperatura sensor: measurement methods and applications. *Computer and computing technologies in agriculture IX*.
- Martínez-Ruiz, A., López-Cruz, I. L., Ruiz-García, A., & Ramírez-Arias, A. (2012). Calibración y validación de un modelo de transpiración para gestión de riegos de jitomate (*Solanum lycopersicum* L.) en invernadero *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, núm. 4, noviembre-diciembre, (2012), pp. 757-766 Instituto Nacional de Investigaciones. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (4), 757–766.



Miller, P. C. (1971). Sampling to estimate mean leaf temperatures and transpiration rates in vegetation canopies. *Ecology*, 52(5), 885–889.

Surendar, K. K., Devi, D. D., Ravi, I., Jeyakumar, P., & Velayudham, K. (2013). Effect of water stress on leaf temperature, transpiration rate, stomatal diffusive resistance and yield of banana. *Plant Gene and Trait*, 4(1).

Zhang, W.-Z., Han, Y.-D., & Du, H.-J. (2007). Relationship between canopy temperature at flowering stage and soil water content, yield components in rice. *Rice Science*, 14(1), 67–70.