

ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA ENREDADERA MEDIANTE TERMOGRAFÍA INFRARROJA

Nicolás Castro¹, Silvana Flores Larsen², Silvina González.

Instituto de Investigaciones en Energías No Convencionales (INENCO)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta
Tel. 0387-4255424 – Fax: 0387-4255389 – E-mail: nicocastro7@gmail.com

Recibido 11/08/16, aceptado 08/10/16

RESUMEN: El objetivo del presente trabajo es el estudio del comportamiento térmico de una enredadera a través de imágenes termográficas y la determinación de su relación con la irradiación solar de la hora anterior. Para ello se determinó un método para medir el perfil de temperaturas del follaje en profundidad a través del análisis cuantitativo de datos termográficos, y así se determinaron las temperaturas para capas superficiales y profundas. Se encontraron correlaciones lineales entre la diferencia de estas temperaturas con la temperatura ambiente y la energía solar recibida durante la hora anterior, al mediodía solar en condiciones invernales. Se analizaron los alcances del método y como mejorarlo para futuras aplicaciones en la validación de modelos de simulación térmica de la envolvente de edificios.

Palabras clave: Fachadas verdes, termografía infrarroja, enredaderas, radiación solar.

INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Las dobles fachadas verdes

La utilización de plantas en la cobertura de las fachadas de edificios ha adquirido importancia en los últimos años dados sus beneficios a través de múltiples mejoras: en el comportamiento térmico de la envolvente, en la calidad de aire en el interior y en cuestiones estéticas que inciden en el confort visual y psicológico de los habitantes. Con respecto al comportamiento térmico los efectos se deben principalmente al sombreado de la radiación solar incidente que reduce las temperaturas superficiales, al enfriamiento pasivo del aire circundante por el mecanismo de evapotranspiración y a la reducción de la velocidad del viento cerca de la fachada, que en conjunto tienden a reducir el flujo de calor entre el edificio y el exterior. La suma de estos efectos se manifiesta como un microclima alrededor de la fachada que podría contribuir a mitigar los efectos de la isla de calor urbano y disminuir emisiones de CO₂ (Flores Larsen et al., 2015)(Susorova et al., 2014).

Se han desarrollado modelos en los últimos años para describir y simular el comportamiento térmico de los elementos de una fachada verde. Estos modelos han comenzado como primeras aproximaciones, que sólo tienen en cuenta el sombreado de la radiación, hasta modelos más complejos donde también interactúan los mecanismos de evapotranspiración, el balance radiativo entre el material vegetal y la fachada y los efectos del viento (Bailey et al., 2015).

A fin de validar los modelos propuestos ha surgido la necesidad de medir las temperaturas de los componentes de las fachadas verdes. La determinación de las temperaturas de las hojas tradicionalmente ha presentado diversos desafíos: a través de la superficie de las hojas la temperatura varía, siendo las diferencias mayores cuando están expuestas al sol; los métodos tradicionales de medición de temperaturas, como las termocuplas, implican un contacto que para ser efectivo a veces puede dañar el material verde, alterar sus mecanismos de regulación térmica e interactuar

¹ Becario doctoral ANPCyT

² Investigador Adjunto CONICET

energéticamente (Bailey et al., 2015). Surge así el interés en la termografía infrarroja como un método propicio para la estimación de las temperaturas en estos ámbitos.

Termografía Infrarroja

La termografía infrarroja es una técnica no invasiva que permite determinar temperaturas superficiales, sin necesidad de contacto y a distancia. Se basa en el principio físico de que cualquier cuerpo con una temperatura mayor al cero absoluto emite radiación modelizada por la Ley de Planck. La radiación infrarroja se ubica en las longitudes de onda entre 0,75 μm hasta los 1000 μm , dividida a su vez en cuatro regiones: infrarrojo cercano, medio, lejano y extremo. Las cámaras termográficas modernas consisten en una matriz de sensores dispuestos en un arreglo focal plano (FPA, Focal Plane Array), sensibles a la radiación incidente en alguna banda del espectro infrarrojo, que en general coincide con una ventana atmosférica. Los sensores producen una señal eléctrica proporcional a la energía recibida que tiene aportes del objeto a medir, el aire entre el objetivo y la cámara y el entorno. Es decir, para determinar la temperatura de un objeto en la imagen se deben conocer: su emisividad (ϵ), la temperatura ambiente (T_{amb}) y la transmitancia del aire en el rango efectivo del detector (τ_{aire}). Con estos datos el software de la cámara termográfica es capaz de calcular la temperatura medida por cada sensor de la matriz y luego la transforma en una imagen visible asignando una escala de colores o grises a la escala de temperaturas sensadas (Flores Larsen y Hongn, 2012).

La aplicación de la termografía infrarroja a la medición de temperaturas de hojas y follaje viene siendo utilizada en el campo de la fisiología vegetal y la ecofisiología, para el monitoreo de cultivos agronómicos. En este sentido la termografía infrarroja ha resultado una herramienta muy útil para el estudio de los mecanismos térmicos que forman parte del balance energético de las plantas. El balance energético de una hoja puede ser escrito como:

$$R_n + M - \lambda E - C = S \quad (1)$$

Donde R_n es el flujo neto de energía radiante absorbida, M es el calor metabólico generado por unidad de área, λE es la potencia perdida por evaporación del agua, C es la potencia perdida por conducción y convección al ambiente y S es el aumento del contenido de energía en forma de calor del tejido por unidad de tiempo ($S = 0$ en el estado estacionario)(Jones, 2004). El término de mayor peso en la ecuación es R_n seguido de λE , que es el que más importancia tiene en las aplicaciones agronómicas.

Objetivos

El objetivo general del trabajo es profundizar el conocimiento sobre la influencia de las fachadas verdes en la envolvente edilicia, a través de una primera aproximación al estudio del comportamiento térmico debido a la radiación incidente. En el siguiente trabajo estudiaremos un método para determinar las temperaturas en el perfil de una enredadera a través de un análisis cuantitativo de valores obtenidos mediante termografía infrarroja. Se buscará la relación entre las temperaturas medidas con la energía radiante absorbida en la hora anterior, parámetro que determina en gran parte el balance radiativo de la planta.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se registraron imágenes termográficas del perfil en profundidad de una enredadera *Bignonia (Campsis x Tagliabuana)* crecida en el campus de la Universidad Nacional de Salta (UNSa) sobre un alambrado olímpico de frente al Norte. Al momento de las mediciones presentaba un buen estado fitosanitario, con sus hojas aún verdes y sanas, un tamaño de 5 m de largo por 2,5 m de alto y 0,5 cm de ancho y 5 años de edad. Se seleccionó esta enredadera por su factibilidad de ser usada como doble fachada verde, montada sobre alambrados o enrejados ubicados a centímetros de la pared a cubrir. Su rápido desarrollo en biomasa, el tamaño de sus hojas y su caducidad en invierno, sumado a su valor estético, hacen de esta especie una buena opción para las fachadas verdes. En esta etapa inicial de estudio la enredadera no está adosada a un edificio por lo que estamos limitados al análisis de su comportamiento debido sólo a la radiación incidente.

Se realizaron tomas de imágenes en 8 días especialmente seleccionados entre los meses de junio y julio de 2016. Se eligieron días de sol y cielo despejado, con velocidades de viento bajas y con un

rango amplio de temperaturas ambientes. Se diseñó el montaje experimental en invierno para tener temperaturas ambientes y humedades relativas bajas. Esto permite disminuir los efectos de la evapotranspiración de las plantas y poder asumir como hipótesis que la diferencia de temperatura entre el follaje y el ambiente está dada mayormente por la energía radiante recibida. Además, al ser días distribuidos alrededor del solsticio de invierno permitieron estudiar el fenómeno cuando la radiación solar llega de manera más perpendicular a la fachada cubierta por la enredadera, que hace frente al Norte, permitiendo maximizar la energía solar absorbida para las condiciones de radiación en esta época del año.

Todas las mediciones se realizaron al mediodía solar, 13:20 p.m. hora local aproximadamente. Para cada instancia de medición se tomaron al menos dos imágenes de perfil de la enredadera, a una distancia fija de 0,5 m, con una diferencia de tiempo de un minuto entre ellas, para elevar el nivel de confianza de los resultados eliminando las fluctuaciones a corto plazo al realizar un promedio entre las imágenes (Jones et al., 2002). El período de toma de datos concluyó cuando se notó el comienzo de la fase de caída de hojas, a mediados del mes de Julio. Cabe destacar que en otras regiones o climas el ciclo fenológico de ésta planta puede ser diferente, pudiendo presentar la caída de hojas un tiempo antes que en nuestro caso de estudio.

Se utilizó una cámara termográfica Fluke TI55FT que cuenta con un detector de microbolómetro de óxido de Vanadio (VO_x), no refrigerado, con una resolución de 320 x 240 píxeles en un arreglo focal plano. La banda espectral sensible se encuentra entre los 8 y los 14 μm . Presenta una sensibilidad térmica de 0,05 $^{\circ}\text{C}$ (a una temperatura de 30 $^{\circ}\text{C}$) y una precisión de ± 2 $^{\circ}\text{C}$ o el 2% (Fluke, 2016). La cámara realiza automáticamente la captura de imágenes infrarrojas correlacionadas con una correspondiente imagen en el rango visible y, mediante la tecnología de IRFusion, entrega la imagen termográfica montada sobre su correspondiente imagen visible. Posee una pantalla LCD para previsualizar las imágenes en tiempo real, permitiendo obtener primeros resultados in-situ. Para esto se deben ingresar de forma manual los datos de la emisividad de la superficie, la temperatura ambiente y la transmitancia del aire.

Los parámetros climáticos y la irradiancia global se obtuvieron de una estación meteorológica Vantage PRO2, instalada en el edificio del INENCO también en el campus de la UNSa. La estación permite recopilar un amplio rango de datos de interés para nuestro estudio: irradiancia global, temperatura ambiente, velocidad y dirección de viento, humedad relativa y presión, proveyendo datos promedio cada quince minutos y los valores máximos sensados a cada intervalo. Estima además una serie de parámetros a partir de estos datos: la energía radiante recibida durante el intervalo (irradiación), la evapotranspiración, la temperatura de rocío y el índice TWH (temperatura-humedad-viento).

Para el posterior tratamiento y análisis cuantitativo de los datos se utilizó el software Smartview, distribuido junto con la cámara termográfica. Entre las aplicaciones del software se encuentran herramientas de selección de áreas de diferentes formas y tamaños dentro de las cuales se puede calcular los puntos caliente y frío, el promedio, y graficar la distribución de temperaturas en 3D. El software permite realizar correcciones sobre los valores de emisividad de la superficie, temperatura ambiente y transmitancia del aire, para la estimación correcta de los valores de temperatura de superficie. El producto final que obtiene el usuario es la distribución de temperaturas, calculadas automáticamente a partir de los valores de energía sensados y los datos introducidos. El usuario en ningún momento tiene acceso a la imagen radiométrica, es decir, a los valores de energía de cada píxel. Para el correcto análisis de los datos se permite una variación de la emisividad de la superficie de entre 0,1 y 1,0 con incrementos de 0,01 y a partir de esto las temperaturas son calculadas con la sensibilidad y el error especificados para la cámara. La herramienta de selección de áreas se maneja con el ratón y nos permite una variabilidad que introduce otro error de paralaje de $\pm 0,1$ $^{\circ}\text{C}$ que puede despreciarse frente al error nominal de la cámara. Por lo tanto el error total en la determinación de las temperaturas con este método resulta de ± 2 $^{\circ}\text{C}$.

Para el tratamiento de los datos obtenidos se hicieron las siguientes suposiciones:

- El perfil observado por la cámara corresponde totalmente al follaje de la enredadera. Se considera que desde la posición en que se tomaron las imágenes, y por las dimensiones de la enredadera, no estamos captando píxeles de cielo o de fondo, o éstos son despreciables.

- La superficie correspondiente a las hojas en la imagen es mucho mayor que la correspondiente al material leñoso y tallos de la enredadera, haciendo que los efectos de éstos últimos sean despreciables.
- Los valores de temperatura promedio en una región de la imagen son representativos de la temperatura media de las hojas en esa región.
- La emisividad de las hojas es, en promedio, de 0,95 (Jones, 2004). Las variaciones en éste parámetro (que puede ir entre 0,92 y 0,96) no alterarían los resultados de nuestro análisis.
- El software Smartview realiza correctamente la extracción de la energía proveniente del ambiente y del aire, a través de los valores introducidos para cada medición.

A continuación se muestra el montaje experimental:



Figura 1: Izquierda: montaje experimental para medición termográfica del perfil de la enredadera en un día de finales de julio. Derecha: vista de frente de la bignonia en los primeros días de mediciones. Puede notarse un sutil cambio en el color de las hojas y la densidad del follaje entre ambas fotos.

RESULTADOS

Se muestran a continuación las imágenes obtenidas para el día 28 de junio de 2016. En Figura 2, a la izquierda se observa la imagen termográfica fusionada con la correspondiente en el rango visible, abajo se ve la escuadra graduada que se utilizó como referencia para los puntos de profundidad. A la derecha un gráfico en 3-D que nos proporciona el software y da una idea de la distribución y amplitud de los valores sensados. En la Figura 3, se observa la zona de registro termográfico en con sus correspondientes imágenes visible y termográfica pura, donde se puede notar las hojas calientes (iluminadas por el sol) cercanas al borde de la enredadera y las hojas frías hacia profundidad del follaje.

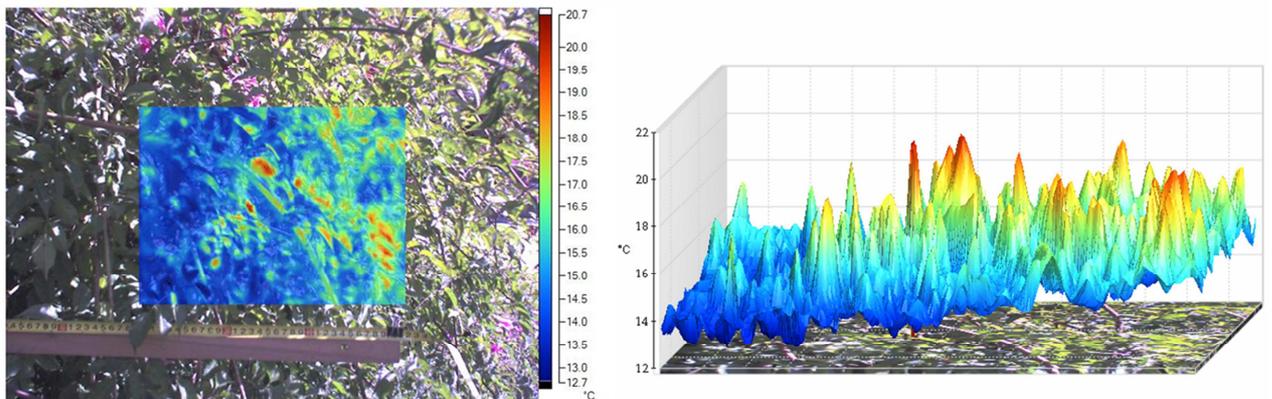


Figura 2: Imágenes tomadas el día 28 de Junio. Izquierda: imagen fusionada visible-infrarrojo del objetivo a medir. Derecha: gráfico en 3-D de la distribución de temperaturas para la zona de registro termográfico, montado sobre la imagen visible.

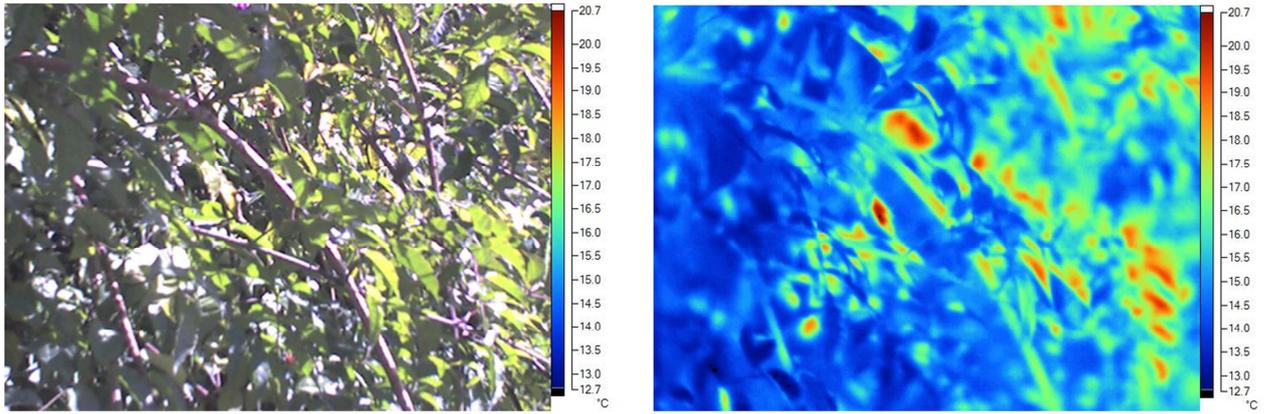


Figura 3:Detalle de las áreas donde se realiza la medida termográfica, a la izquierda se vé la imagen en el rango visible y a la derecha la correspondiente imagen termográfica con la escala de temperaturas. Notar la correspondencia entre las zonas iluminadas y las de mayor temperatura.

Cabe destacar que las hojas no tienen una temperatura homogénea en toda su superficie, sino que ésta varía a través de la cara que enfrenta el sol según el ángulo de incidencia de la radiación, llegando a diferencias con la cara sombreada de hasta casi 5 °C (Jones, 2004; Jones et al., 2003). Para mitigar este efecto y poder sensar en promedio la misma cantidad de hojas en las caras anterior y posterior se ubicó a la cámara termográfica a la misma altura de la sección de follaje a medir, apuntando de manera perpendicular al perfil de la planta. Esto aseguró también que en la trayectoria óptica se encuentre todo el volúmen de la planta y la menor cantidad posible de píxeles de fondo.

El análisis cuantitativo se realizó con la herramienta de selección de áreas del software Smartview, y ajustando cuidadosamente los bordes de las áreas con la referencia métrica en la imagen se determinaron las temperaturas promedio del follaje cada dos centímetros de profundidad.

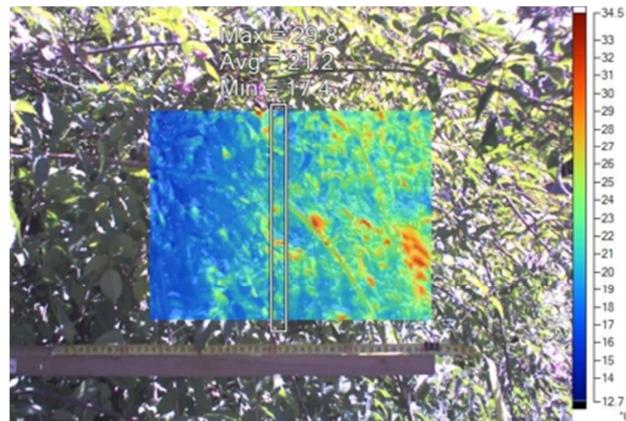


Figura 4: Análisis cuantitativo: Selección de áreas de 2cm de ancho para la confección del perfil de temperaturas en profundidad.

Como resultado de este procesamiento de las imágenes termográficas se pudo obtener un perfil de temperaturas en profundidad de la enredadera, considerándose el cero como el límite exterior del follaje.

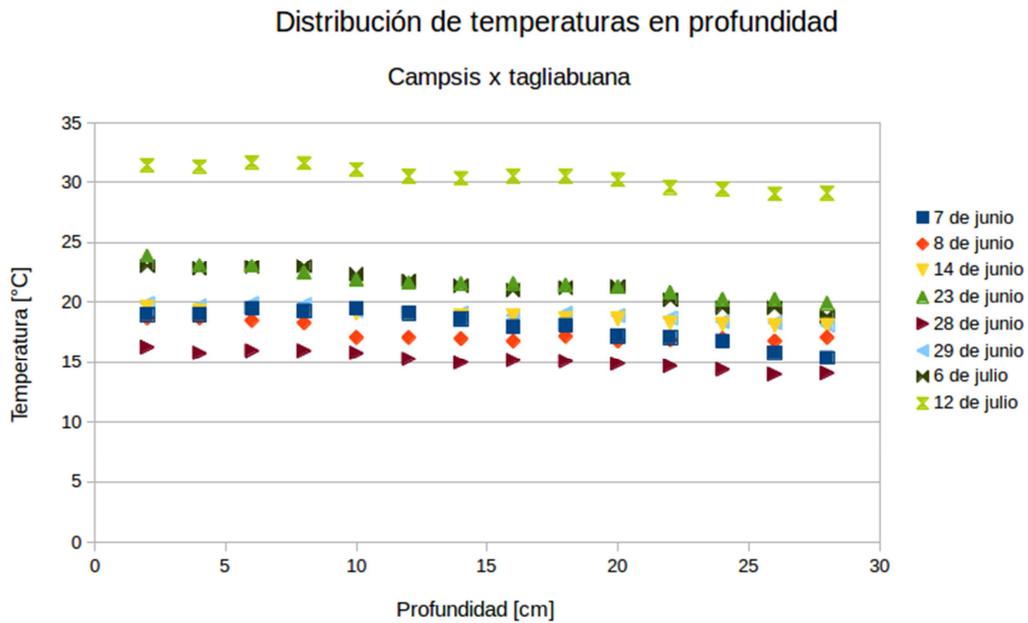


Figura 5: Distribución de temperaturas en profundidad en el follaje de una enredadera bignonia, para 8 días de invierno.

Se puede observar claramente un perfil de temperaturas decreciente a medida que nos internamos en la profundidad de la planta. Dada la naturaleza cuasi-aleatoria del follaje y el movimiento natural del mismo, el perfil no es estrictamente decreciente sino levemente fluctuante, aunque es posible definir zonas o rangos de menores variaciones, probablemente determinadas por la disposición en capas del follaje de la bignonia.

Analizando los perfiles de temperatura obtenidos en la Figura 5 se decidió elegir dos zonas para el análisis térmico en las que la variación de temperatura sea mínima entre puntos adyacentes: la capa exterior, consistente en los primeros 8 cm de follaje; y una capa interna entre los 26 y los 30 cm de profundidad.

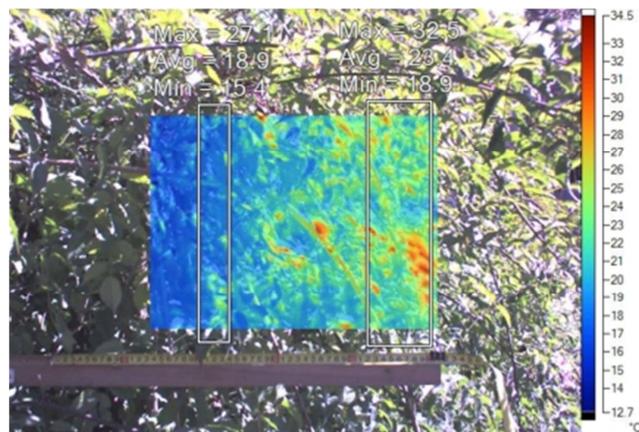


Figura 6: Análisis cuantitativo: selección de dos áreas en una imagen termográfica (cerca a la superficie y a 30 cm de profundidad), para estudiar su comportamiento respecto de la energía radiante incidente.

Con las temperaturas calculadas en estas zonas se buscó comprobar la hipótesis de que la diferencia de temperaturas entre el follaje y el ambiente ($T_f - T_a$) se debe a la energía radiante absorbida. Para ello se utilizaron los valores de la irradiación horaria sobre el plano horizontal (I_h , [Wh/m²]) medida en la última hora antes del mediodía solar, para evitar fluctuaciones en la medida instantánea que pudieran

introducir errores. Es necesario notar en este punto que la magnitud que interactúa con el follaje es la radiación medida en el plano perpendicular al haz. Si bien la estación meteorológica mide la radiación global en el plano horizontal podemos considerarla como una medida de la irradiación en nuestro plano de interés a menos de un factor $\cos(\theta_z)^{-1}$ que amplifica la componente directa (en días claros un 80% de la global). Para el rango de días y en la localización geográfica donde se midió este factor puede aproximarse constante durante la hora de medición (varía entre 0,65 y 0,67).

Se presentan a continuación las variables de interés para el análisis térmico del follaje.

Fecha	Temperatura ambiente [°C]	Irradiación horaria, I_h [Wh/m ²]	Humedad relativa [%]
07/06/16	12,8	643	65
08/06/16	14,7	614	62
14/06/16	17,5	524	63
23/06/16	17,9	622	55
28/06/16	12,1	575	66
29/06/16	15,8	578	55
06/07/16	15,6	665	55
12/07/16	24	675	40

Tabla 1: Datos obtenidos de la estación meteorológica para el momento de la toma de imágenes.

Considerando a nuestro sistema como una sucesión de capas de follaje a una temperatura media, si buscamos la correlación de la diferencia de temperaturas con la energía radiante, para la capa más externa obtenemos:

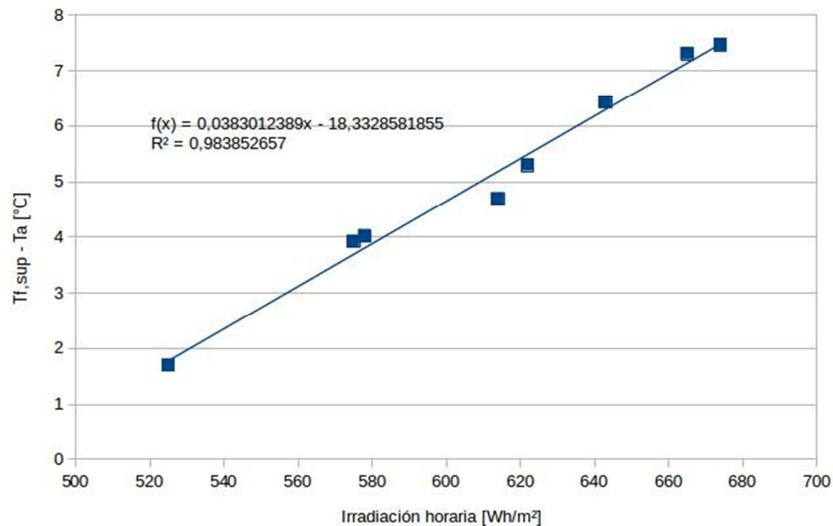


Figura 7: Relación entre $T_f - T_{amb}$ con I_h para la capa superficial de follaje y su aproximación por una función lineal. Cada valor representa un día diferente de medición.

Aproximando con una regresión lineal obtenemos la siguiente correlación:

$$T_{f,superf} - T_{amb} = 0,0383 \cdot I_h - 18,33 \quad (2)$$

Donde $T_{f,superf}$ es el promedio de temperaturas en la capa de 8 cm de follaje más cercano a la superficie. La regresión se obtuvo con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,98$.

De la misma manera buscamos la correlación para las temperaturas de la capa más profunda ($T_{f,int}$), y en este caso se obtuvo:

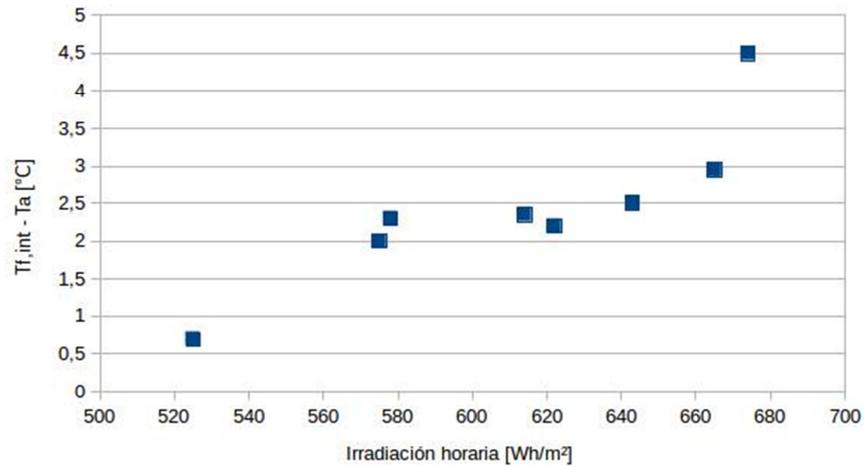


Figura 8: Relación entre $T_f - T_{amb}$ con I_h para la capa profunda de follaje. Cada valor representa un día diferente de medición.

De la figura podemos observar que nuestra hipótesis parece ser cierta, los valores se acomodan de una manera creciente, aproximable por una función lineal, con excepción de un punto con valores (674; 4,5). Este valor corresponde al día 11 de julio, donde la enredadera ya había empezado a perder hojas, siendo las primeras en caer las de la capa más externa, que permitieron el ingreso de mayor radiación a las capas internas. Si excluimos este punto para el análisis podemos aproximar el comportamiento con una nueva función lineal y se obtiene:

$$T_{f,inte} - T_{amb} = 0,0134 \cdot I_h - 5,96 \quad (3)$$

Con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,82$. Cabe destacar que estas correlaciones sólo indican el comportamiento en los rangos de irradiaciones horarias sensados (entre 500 y 700 Wh/m²) y en las dadas condiciones experimentales.

CONCLUSIONES

Se realizaron medidas termográficas de perfil al follaje de una enredadera del género Campsis y se pudieron determinar los valores de temperatura media en profundidad. Los datos de temperatura para las diferentes capas del follaje se obtuvieron con un error máximo del 2 °C, dado principalmente por la cámara termográfica.

Se comprobó que durante los días de sol y cielo despejado, en el invierno, las temperaturas del follaje decrecen a medida que nos alejamos de las capas superficiales expuestas al sol, y se van acercando a la temperatura ambiente en la profundidad de la planta.

La correlación entre $T_f - T_{amb}$ con la Irradiación solar horaria de la última hora, sobre el plano horizontal, se encontró que es linealmente creciente para el mediodía solar. La pendiente de la recta resultó mayor para las capas externas del follaje, como era de esperarse, indicando una mayor absorción de la radiación incidente. Si bien para las capas interiores también se verificó una relación creciente, en la regresión lineal se cometen más errores. Estos pueden ser originados por los movimientos naturales del follaje en las capas más externas que determina la radiación variable que llega a la profundidad. También hay que destacar que en el análisis de $T_{f,int} - T_a$ los valores de temperatura se acercan al error de la cámara, por lo que la confiabilidad de los valores disminuye.

Hay que notar también que para un estudio más preciso de los procesos de absorción de radiación por parte de las plantas sería necesario poder separar del espectro incidente las porciones fotosintéticamente activas de las que producen efectos térmicos (Jones, 2002). A futuro se prevee estudiar las dependencias de los efectos térmicos con el espectro incidente.

El método de medición resulta útil como una primera aproximación a la obtención de estos parámetros que servirán para validar los modelos térmicos de fachadas verdes en edificios. Para mejorarlo se necesita un tratamiento digital de las imágenes que elimine píxeles de fondo y pueda extenderse a plantas con otras geometrías y menor densidad foliar. Además se espera realizar la experiencia para otras épocas del año (primavera/otoño y verano) para estudiar el efecto con otras condiciones climáticas, mayores intensidades de radiación incidente y distintos ángulos.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado a través del proyecto PICT-2014-2605.

REFERENCIAS

Bailey, Stoll, Pardyjak, Miller. 2015. A new three-dimensional energy balance model for complex plant canopy geometries: Model development and improved validation strategies. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 218 – 219, 146 – 160.

Flores Larsen, Hongn. 2012. Termografía infrarroja en la edificación: Aplicaciones cualitativas. *Avances en energías renovables y medio ambiente*, Vol. 16.

Flores Larsen, Filippín, Lesino. 2015. Modeling double skin green facades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, Vol. 121, 56 - 67.

Fluke, 2016. Catálogo de productos y Manuales del usuario, disponibles en <http://www.fluke.com/fluke/eses/support/default.htm>

Jones, Stoll, Santos, de Sousa, Chaves, Grant. 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: application to grapevine. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 53, 2249-2260.

Jones, Archer, Rotenberg, Casa. 2003. Radiation measurement for plant ecophysiology. *Journal of Experimental Botany*, Vol. 54, 879 – 889.

Jones, 2004. Application of thermal imaging and infrared sensing in *Plant Physiology and Ecophysiology*. *Advances in Botanical Research*, Vol. 41.

Susorova, Azimi, Stephens. 2014. The effects of climbing vegetation on the local microclimate, thermal performance, and air infiltration of four building facade orientations. *Building and Environment*, Vol. 76, 113 – 124.

ABSTRACT: The objective of this work is to study the thermal behaviour of a climbing plant through infrared thermography and the determination of its dependence on the solar irradiation. For that aim a method was developed to measure the temperature profile in the depth of the climbing plant canopy through a quantitative analysis of thermographic images, and the temperature distribution was determined for superficial and profound canopy layers. A linear correlation was found between the differences of these temperatures with the ambient temperature and the total incident radiant energy during the hour before solar noon, for winter conditions. The scope of the method was analyzed and the means to improve it for future applications in the validation of thermal simulation models of the building's envelope.

Keywords: green façades, infrared thermography, climbing plant, solar radiation.