

MEDICIÓN DE TRANSPIRACIÓN EN ÁRBOLES: MÉTODO DE LA SONDA DE DISIPACIÓN TÉRMICA (GRANIER)

De Lorenzi, F.⁽¹⁾; M. González Loyarte⁽²⁾; R. Dell'Aquila⁽¹⁾; A. Balsamo⁽¹⁾
y S. Salatino⁽³⁾

(1) Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo (ISAFOM-CNR) (Nápoles, Italia).
f.delorenzi@isafom.cnr.it, gloyarte@lab.cricyt.edu.ar

(2) Instituto Argentino de Investigaciones de las Zonas Áridas. CONICET-CRICYT-ME.

(3) Instituto Nacional del Agua - Centro Regional Andino. Mendoza, Argentina

RESUMEN

El cambio climático y la creciente demanda de agua para uso urbano y rural hacen imprescindible conocer el consumo por la vegetación, tanto en ecosistemas naturales como cultivados. Este consumo se manifiesta en el agua transpirada, cuya medición es compleja, particularmente en árboles. Se presenta el método de la Sonda de Disipación Térmica (TDP) a través de una medición experimental de transpiración, a nivel de todo el árbol, de un mandarino (*Citrus reticulata*) en forma continuada durante 15 días. Este método, desarrollado por Granier, detecta el flujo de savia en un sector del tronco mediante dos sondas insertadas en la albura. Una de ellas es calentada y se mide la diferencia térmica entre ambas sondas; ésta, al ser proporcional al flujo de savia, permite su estimación mediante una ecuación empírica. El flujo de savia para todo el árbol es estimado extrapolando la medición del sector del tronco a toda el área de albura conductiva. La medición experimental abarcó también la medición en el campo, cerca del mandarino, de variables meteorológicas (radiación, temperatura y humedad del aire y velocidad de viento), variables del suelo como humedad y variables de la misma planta ya que se estimó el área foliar y se midieron los diámetros de las ramas. La transpiración estimada varió entre 6 y 15 lts/día/árbol, según condiciones meteorológicas. Se analizó la transpiración en relación a la radiación solar, la variable meteorológica de mayor correlación ($r = 0,89$).

Palabras clave: *Citrus reticulata*, flujo de savia, radiación solar, TDP.

INTRODUCCIÓN

Las restricciones futuras en el uso del agua, debido por un lado a los cambios climáticos y por otro al aumento de la población, hacen necesario lograr un uso muy eficiente del recurso. El 90-95% del agua absorbida por las plantas es transpirada de modo que resulta imprescindible conocer cuánto transpiran las plantas para determinar cuánto regar. Los métodos de medición de la transpiración adquieren así importancia, en especial aquellos que estiman transpiración en plantas leñosas, particularmente árboles debido al gran volumen transpirado por ellos. En este trabajo se presenta un sistema de medición del flujo de savia mediante el Método de la Disipación Térmica (Thermal Dissipation Probe - TDP) desarrollado por Granier (1985), a través de los resultados de una prueba experimental, realizada en mandarino en el Istituto per i Sistemi Agricoli e Forestali del Mediterraneo (ISAFOM-CNR) de Ercolano (Nápoles, Italia).

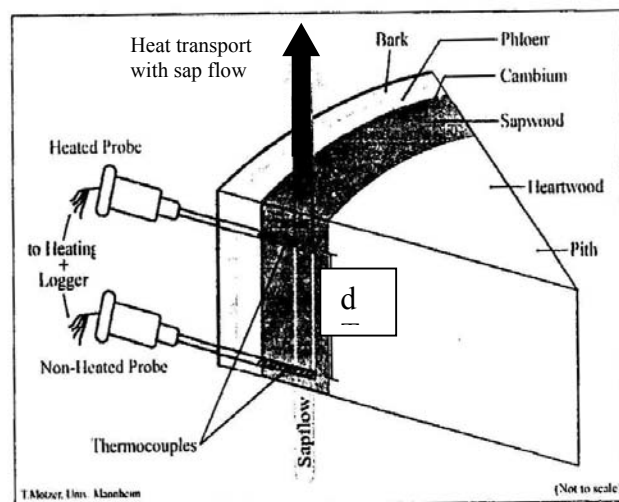
Esta prueba experimental se realizó en el marco del proyecto "Ecofisiologia delle piante da frutto in coltura irrigua: analisi dei processi e sua applicazione al miglioramento della produttività", desarrollado en el ámbito del Acuerdo de Cooperación Científica entre el CNR (Italia) y el CONICET (Argentina), Proyecto CNR-CONICET (2005-2006).

MÉTODO DE DISIPACIÓN TÉRMICA DE GRANIER

Este método de la Sonda de Disipación Térmica de Granier para medir el flujo de savia en árboles ha sido descrito en detalle (Granier, 1985; Lu et al., 2004). Se utiliza un sensor que consiste en dos sondas (agujas) idénticas de 1 mm de diámetro y 33 mm de longitud; cada sonda contiene una termocupla de aleación de cobre (Tipo T) y una espiral de resistencia que crea una zona de calentamiento de 20 mm de largo. Ambas termocuplas están conectadas de modo tal que la señal se corresponda directamente con la diferencia de temperatura entre las dos sondas del sensor. Las dos sondas son instaladas en el tronco o rama, una más arriba que la otra, a una distancia que depende del tipo de árbol; las sondas son insertadas en la albura dentro de tubitos de aluminio.

La sonda superior es calentada con una corriente constante. La sonda inferior, es la sonda de referencia ya que no es calentada y se mantiene a la temperatura del leño. El

Figura 1. Esquema del sensor constituido por las dos sondas (agujas), testigo y calentada, según fabricante UP Sap Flow-System.



sistema mide la diferencia de temperatura entre las dos termocuplas (dT) (Figuras 1 y 2).

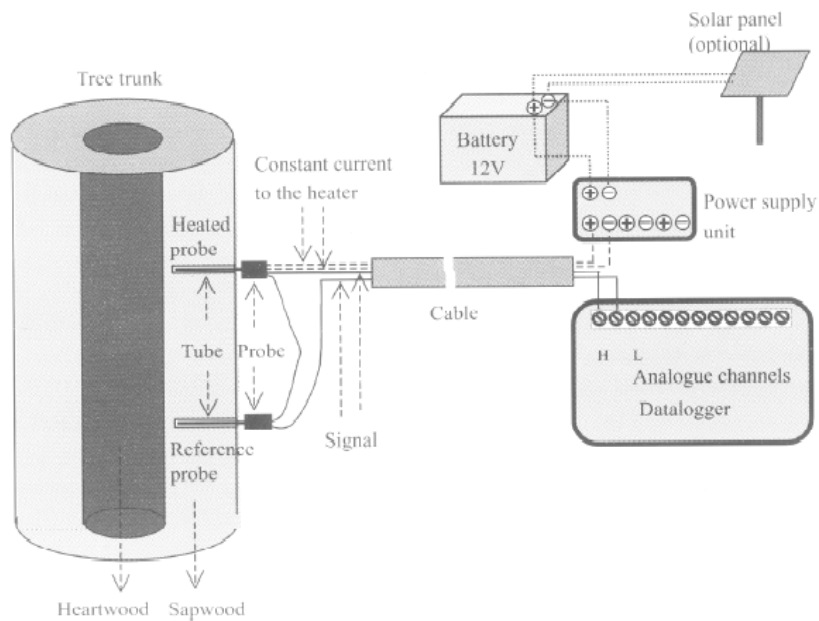


Figura 2. Configuración del Sistema Granier para medir flujo de savia (extraído de Lu et al., 2004).

La diferencia de temperatura entre las dos sondas depende de la velocidad del flujo de savia en la vecindad de la sonda calentada. Cuando no hay flujo de savia durante la noche toda la energía es disipada por conducción en el leño y se produce un máximo de dT . Cuando la savia circula por la albura, dT disminuye porque la sonda calentada es enfriada por la fracción de calor disipado por convección (Granier, 1985). La transformación de los dT en velocidad de flujo de savia se calculó mediante la fórmula:

$$u = 0,714 \cdot ((dT_{\text{noche}} / dT_{\text{actual}}) - 1)^{1,231}$$

donde:

dT_{noche} : es la diferencia de temperatura máxima debido al flujo de savia mínimo o nulo durante la noche,

dT_{actual} : es la diferencia de temperatura medida,

u : es la densidad de flujo de savia y se expresa en $\text{ml cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

Protocolo de medición aplicado

Las mediciones se realizaron en un mandarino (*Citrus reticulata*, var. clementina) de 25 años de edad y 4,5 m de altura y 3,20 m de diámetro de copa, ubicado en los jardines del mismo instituto (Figura 3). Se instalaron dos sensores de flujo de savia (UP Umweltanalytische Produkte GmbH, D), uno en cada una de las dos ramas en que se divide el tronco principal y se identificaron según su posición relativa: sonda oeste (sonda 1) y sonda este (sonda 2) (Figura 4). Cada sonda fue instalada en la albura dentro del cilindro protector de aluminio de 23 mm de largo, colocado en el tronco en la perforación realizada con taladro (Figura 5) y perfectamente ajustada por enduido plástico y aislada térmicamente del exterior (Figura 6). Los datos que se registran de cada sensor fueron: la

diferencia de voltaje (ΔV) y la diferencia de temperatura (dT) entre la sonda calentada y la sonda de referencia y la corriente provista a la sonda. Se instaló una estación de registro continuo de: temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento (Figura 7) y de radiación global (Figura 8). El suministro de energía se realizó mediante un panel solar y un sistema de baterías para asegurar un suministro continuo y de voltaje adecuado (Figura 2).

Un datalogger registró el conjunto de los datos meteorológicos y de los sensores. Todos los datos, leídos cada segundo, fueron promediados y registrados en el datalogger cada 10 minutos y descargados diariamente para controlar el buen funcionamiento de todo el equipamiento y para realizar los cálculos para estimar el flujo de savia.

Para analizar el balance hídrico se tomaron muestras de suelo bajo la copa del mandarino, a 75 cm del tronco y ubicados según los 4 puntos cardinales para elaborar el perfil de humedad (48 hs de secado a estufa a 105°C). Las muestras de suelo (0-20, 20-40, 40-60 y 60-70 cm) se tomaron en coincidencia con los cambios texturales del suelo; la profundidad máxima estuvo determinada por la presencia de material pétreo. Se asume que se cubre un importante volumen de suelo explorado por sus raíces ya que según González-Sicilia de Juan (1960) las raíces de los cítricos se desarrollan en su mayor parte (85%) a una profundidad menor a 75 cm. Cada perfil de humedad de suelo se repitió cada 4 o 5 días, en función de las lluvias.

Para estimar la superficie foliar de todo el árbol, se realizó el muestreo de una rama que representa aproximadamente el 5% de la copa. En dicha rama se relevó la estructura de bifurcaciones y midieron los diámetros de las ramas con calibre digital y contaron las hojas que estas ramas llevaban. Se midió la superficie foliar de una muestra de 110 hojas en un equipo LI-3100A cuyo promedio se consideró como la superficie foliar de la hoja media. Para poder extrapolar estas mediciones a todo el árbol, se midieron y graficaron todas las ramas del árbol hasta un diámetro ≤ 20 mm.

El estado fenológico del mandarino fue de total cobertura foliar con frutos en etapa de maduración y frutitos cuajados de 3-6 mm correspondientes a una segunda floración.

RESULTADOS PRELIMINARES

Los resultados reflejan la sensibilidad del método, prueba de ello es el registro de tres días consecutivos con condiciones climáticas muy distintas: 1) nublado con alta temperatura, 2) sol radiante y 3) lluvioso. En la Figura 9 se ha graficado la evolución del dT correspondiente a los tres días mencionados junto con la radiación solar global (R_g) y el déficit de presión de vapor del aire (VPD), variable meteorológica calculada a partir de los datos registrados de temperatura del aire y de la humedad relativa.

Se observa en la Figura 9 que los dT registrados por los sensores disminuyen durante el día, en correspondencia con la mayor transpiración, cuando la radiación global y el déficit de presión de vapor son más altos. Durante la noche, el déficit de saturación alcanza los valores mínimos al igual que la transpiración generando los mayores dT ya que la sonda superior no es enfriada por el flujo de savia. La respuesta del dT a las variaciones de la cobertura de nubes y lluvia se verifica muy rápidamente luego de ocurrida la variación meteorológica (día 292). En el primer día en cambio (día 290), debido a la elevada temperatura, el efecto de las nubes no es el mismo, ante la misma radiación global (R_g) se registran diferentes dT debido al mayor VPD. El registro de dT en el segundo día (día 291) es muy regular, fue un día sin nubes, con la máxima R_g registrada a mediodía.

Los sensores muestran un registro paralelo, el sensor oeste (1) registra permanentemente un dT más alto y se explica porque representa un menor volumen de copa y con menor exposición sur consecuentemente, es menor la transpiración y el correspondiente enfriamiento de la zona por disipación debido al flujo de savia. La pequeña variación sistemática de aumento del dT, sobre todo en la rama del sensor este (2), se explica por la sombra proyectada por un álamo.

La densidad de flujo de savia correspondiente a los tres días contrastados (Figura 10) muestra que responde a las variaciones de la R_g , variable con la que se correlaciona con $r = 0,89$, y del déficit de presión de vapor (Figura 9) que explica la alta transpiración del día 290 a pesar de estar nublado. Durante el día 291 la evolución de la densidad de flujo de savia es bastante constante con algunas inflexiones menores debido a sombras pasajeras proyectadas por árboles del jardín. El tercer día en cambio, se observan oscilaciones explicadas por la variación de la R_g y por la lluvia.

De este modo se logra graficar la evolución del flujo transpiratorio de cada rama expresado como velocidad de flujo de savia a lo largo de un cilindro que rodea la sonda. Para calcular la velocidad del flujo de savia para la totalidad del árbol esta medida tuvo que ser extrapolada a toda el área de la albura de cada rama. Se calculó, por ahora, el área transversal de la albura asumiendo un anillo de 20 mm de espesor (en coincidencia con la longitud de la sonda) para cada rama. Esta estimación será ajustada cuando se concluya el análisis anatómico del leño que determinará el espesor de la albura conductora (xilema sin obstrucción de vasos). De este modo, del registro de todos los datos del 13 de octubre al 1 de noviembre de 2005 se estima una transpiración entre 6 y 15 litros/día/árbol, según condiciones meteorológicas.

Agradecimiento

Los autores agradecen la valiosa colaboración del Dr. Francesco Cona en la extracción y análisis preliminar de las muestras de leño y el apoyo brindado por el ISAFOM-CNR de Ercolano (Italia). Este estudio se realizó con el apoyo del Proyecto CNR-CONICET (2005-2006).

BIBLIOGRAFÍA

- González-Sicilia de Juan, E.** (1960). *El cultivo de los agrios*. Instituto Nacional de Investigaciones Agronómicas, Madrid, 806 pp.
- Granier, A.** (1985) Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Ann Sci Forest* 42, 193-200
- Lu, P., L. Urban and P. Zhao** (2004). Granier's Thermal Dissipation Probe (TDP) Method for Measuring Sap Flow in Trees: Theory and Practice, *Acta Botanica Sinica* 46 (6): 631-646
- UP GMBH. (2005). *UP Sap Flow-System User Manual Version 2.6*. UP Umweltanalytische Produkte GmbH, 13 pp.



Figura 3. Ejemplar de *Citrus reticulata*, en el jardín del ISAFOM-CNR de Nápoles, utilizado en las mediciones del flujo transpiratorio por el método de Disipación Térmica de Granier.



La zona de las ramas donde están insertos los sensores está aislada térmica. Detalle del datalogger

Figura 4. Tronco del árbol con un sensor instalado en cada rama principal. Se observan las dos sondas que componen cada sensor, a 10 cm una de otra, sobre la misma rama.



Figura 5. Detalle de la perforación para instalar el tubito de aluminio dentro del cual irá la sonda superior. Vista de la sonda inferior ya fijada al árbol



Figura 6. Detalle de la fijación del sensor con enduido plástico e instalación de la placa de aislación térmica.



Figura 7. Estación automática de medición de viento, temperatura del aire y humedad relativa.



Figura 8. Detección de la radiación global mediante radiómetro instalado en la terraza del ISAFOM-CNR, Nápoles.

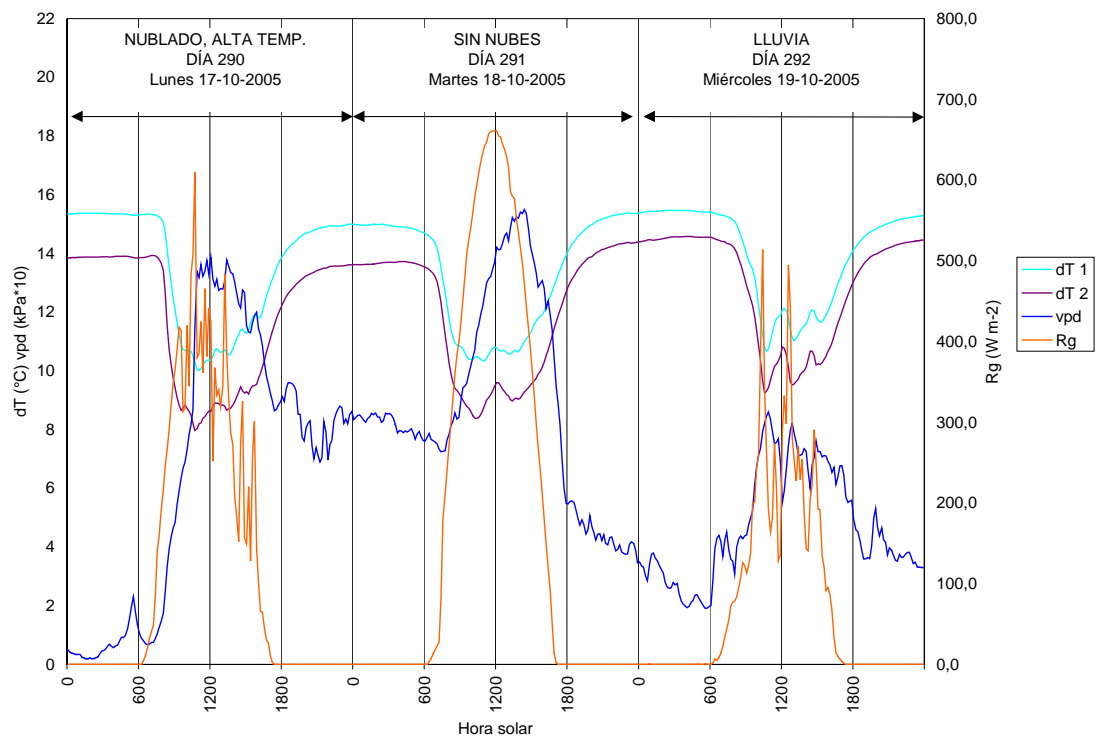


Figura 9. Evolución del dT medido en cada rama del mandarino (dT 1 y dT 2), del déficit de presión de vapor del aire (VPD) y de la radiación global (Rg) para tres días de condiciones meteorológicas contrastadas, desde el 17 al 19 octubre 2005, en Ercolano (Nápoles, Italia).

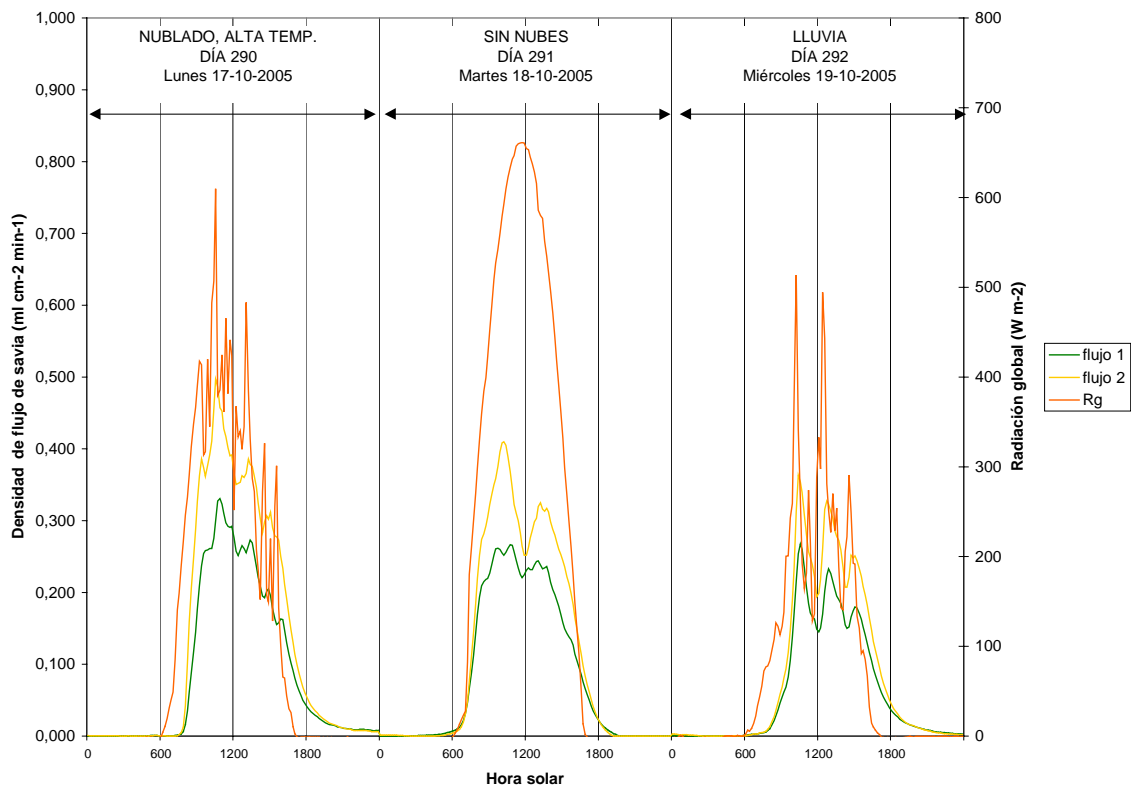


Figura 10. Evolución de la densidad de flujo de savia para cada rama (flujo1 y flujo2) calculado a partir de los dT y Rg para los días 17 a 19 de octubre 2005, en Ercolano, Na.