

PARTE II. UNIDAD 3

SENSORES BASADOS EN EL ESTADO FISIOLÓGICO DE LA PLANTA



Para controlar el clima del invernadero se pueden utilizar indicadores del estado de estrés de la planta, o de su dinámica de crecimiento. La ventaja de estas medidas es que dan una información directamente relacionada con el comportamiento de la planta. Si se interpreta correctamente esta información, en términos de respuesta fisiológica a las condiciones del medio ambiente (aire, suelo), se podrá por consiguiente programar el clima (consignas climáticas) o el riego a partir de este tipo de medidas. Esta Unidad presenta los principios de funcionamiento de algunos sensores desarrollados a este fin.

riego a partir de este tipo de medidas. Esta Unidad presenta los principios de funcionamiento de algunos sensores desarrollados a este fin.

Se presentan en esta Unidad tres tipos de sensores que dan una información sobre el estado fisiológico de la planta:

- Los sensores (dendrómetros) basados en la micromorfometría, es decir en medidas de variaciones de tamaño (diámetro) de órganos de la planta (tallo, pecíolos, frutos, etc.).
- Los sensores de medida del flujo de savia.
- La medida de la temperatura de superficie.

1- MEDIDA DEL DIÁMETRO DE ÓRGANOS

1.1- INTERÉS DE LA MEDIDA DEL DIÁMETRO DE ÓRGANOS VEGETALES

La evolución temporal del diámetro de los órganos vegetales permite determinar dos componentes (Figura 1) que son útiles para estudiar su crecimiento y la respuesta de las plantas a las condiciones medio ambientales:

-Una componente que depende de la tasa de crecimiento del órgano (componente de crecimiento, DM). A partir de esta componente se puede evaluar el aumento neto que presenta el diámetro de un órgano por unidad de tiempo ($\Delta D/\Delta t$: mm h⁻¹ mm día⁻¹, etc.).

- Una componente asociada con la pérdida de agua que experimenta el órgano durante el día. Esta componente se conoce como amplitud máxima de la contracción diurna, AC, y es la resultante de un desequilibrio que se establece entre la tasa de transpiración y la de absorción radicular.

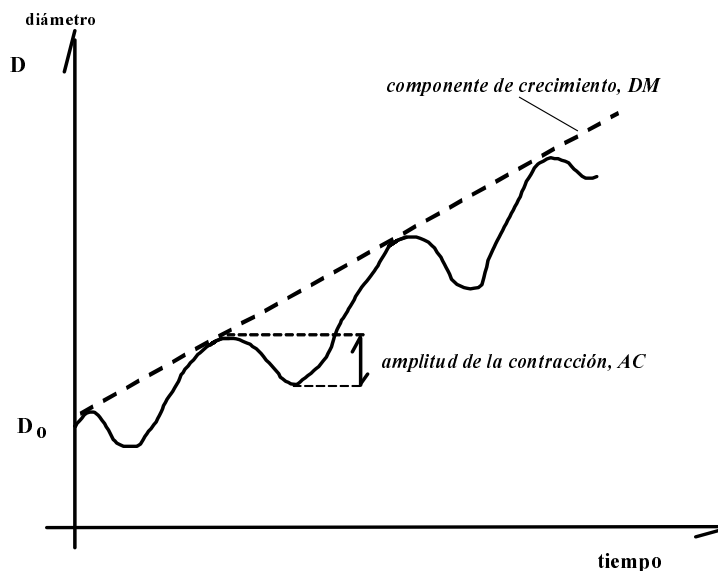


Figura 1. Representación esquemática de la evolución típica del diámetro de un tallo, D , en función del tiempo. D_0 = valor inicial del diámetro

El estudio de la dinámica del diámetro de órganos vegetales (Figura 2) es útil para comprender la respuesta de las plantas a las variaciones de clima y de estrategias de riego. De día, el diámetro de los órganos vegetales disminuye debido a que la planta pierde más agua por transpiración de la que absorbe. De noche, las pérdidas por transpiración son inferiores a la absorción radicular de agua, lo que induce un almacenamiento de agua en los órganos vegetales contribuyendo a un aumento de su diámetro (Figura 3).

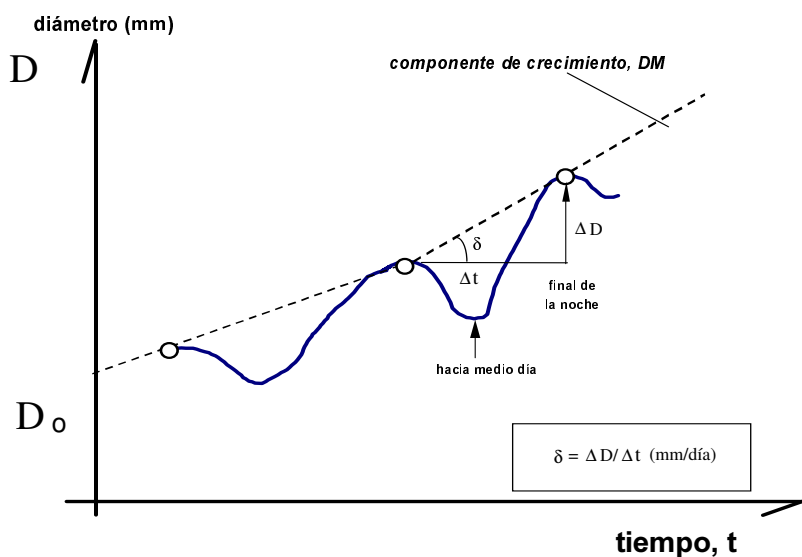


Figura 2. Ejemplo de evolución de la componente de crecimiento de un tallo entre dos días consecutivos. La tasa de crecimiento del órgano es $\delta = \Delta D / \Delta t$, siendo D_0 el diámetro inicial del órgano.

1.2- INTERPRETACIÓN

Las microvariaciones que se observan en órganos vegetales corresponden a un cierto número de mecanismos y de respuestas que dependen del estado hídrico de la planta. El diámetro de los tallos vegetales presenta una evolución típica a lo largo del día, que se caracteriza por:

- Un valor máximo, que se alcanza al final de la noche (período en el que la hidratación de los órganos es máxima)
- Un valor mínimo, que se alcanza en torno a medio día.

El valor mínimo del diámetro es concomitante con la pérdida máxima de agua que experimenta la planta a través del proceso de transpiración. La diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo se conoce como amplitud de la contracción (AC, Figura 3). El valor máximo de AC es, al igual que la transpiración máxima, una característica de la especie y varía, como la transpiración, en función de la demanda climática (radiación, temperatura y humedad relativa), de la reserva hídrica del suelo y de las condiciones de salinidad del sustrato.

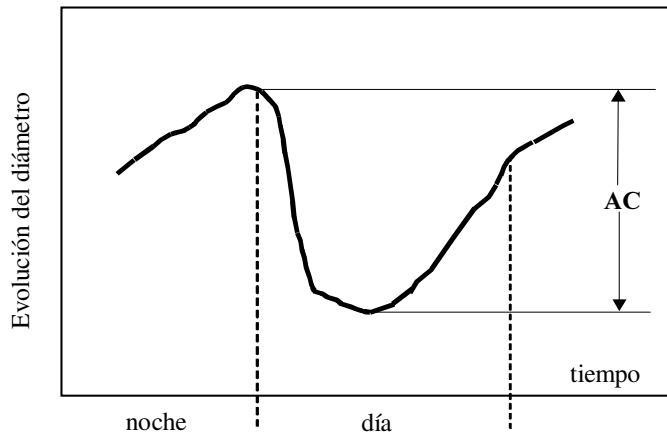


Figura 3. Ejemplo típico de evolución del diámetro de un tallo vegetal a lo largo del día. AC es la amplitud de la contracción de día.

La información bruta que proporcionan los dendrómetros (es decir, la evolución temporal del diámetro), puede utilizarse como *criterio cualitativo* para evaluar la respuesta del cultivo a las condiciones medioambientales o bien para determinar el momento de riego. Para generar una estrategia de riego es preciso identificar, para una determinada especie, los valores de la tasa de crecimiento ($\Delta D/\Delta t$) y de AC que corresponden a situaciones de restricción hídrica.

Sin embargo, la manifestación de una contracción diurna anormal (es decir, un valor de contracción típica de condiciones de estrés) no siempre está asociada con un déficit de agua. La reserva hídrica de la planta disminuye cuando el flujo de transpiración sobrepasa el flujo de absorción. Esta situación puede ocurrir debido a causas diversas: déficit de oxígeno o niveles térmicos inadecuados a nivel del sustrato, problemas de salinidad o bien por un desequilibrio entre el desarrollo de las raíces y el desarrollo de la parte aérea.

1.3- LOS SENSORES

La dendrometría, o medida de la evolución del diámetro de órganos vegetales, se lleva a cabo a partir de transductores de desplazamiento lineal (LVDT = Linear Voltaje Diferencial Transformer, Figura 4).

El sensor es un transformador que produce una tensión proporcional al desplazamiento de un núcleo magnético. Está integrado por:

- Un bobinado primario alimentado por una corriente alterna
- Dos bobinados secundarios
- Un núcleo ferromagnético asociado a un vástago, no magnético.

El vástago (o varilla de desplazamiento) está en contacto con el órgano cuyo diámetro se quiere medir, arrastrando al núcleo a medida que varía el diámetro del órgano. Esto provoca el desplazamiento del núcleo al interior de las bobinas generando voltajes inducidos en cada una de las bobinas secundarias (V1 y V2). Los voltajes inducidos son proporcionales al desplazamiento del núcleo.

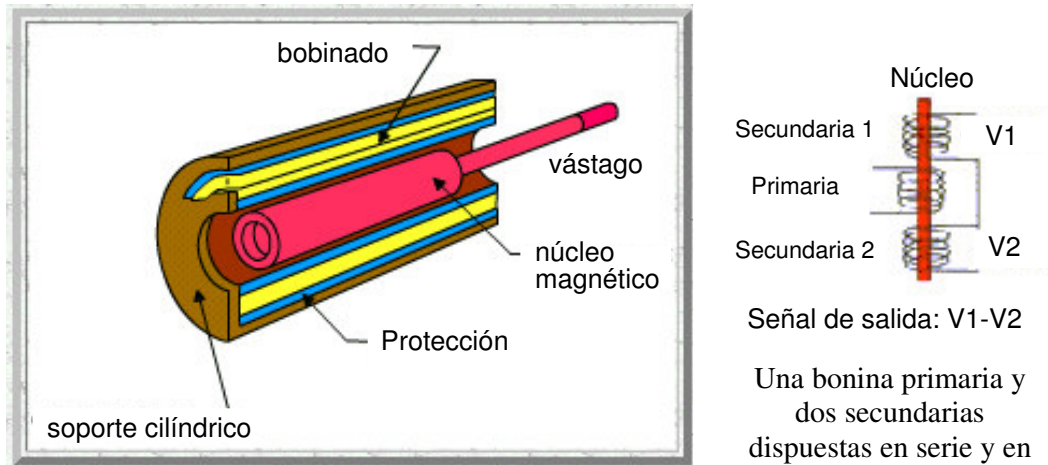


Figura 4. Esquema de funcionamiento de un sensor de desplazamiento lineal

Con el objeto de que la señal de salida sea la diferencia entre V1 y V2, las bobinas secundarias se montan en serie y en fases opuestas. A partir de este montaje la tensión de salida es cero cuando el núcleo se encuentra en el centro (las dos tensiones V1 y V2 se anulan, ver Figura 5).

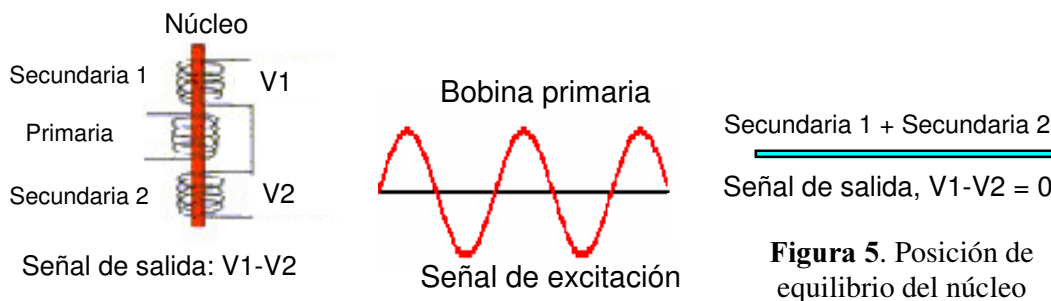
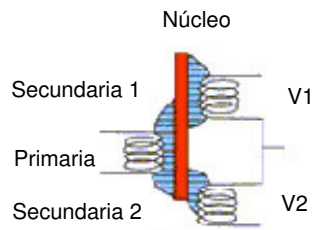


Figura 5. Posición de equilibrio del núcleo

Cuando el núcleo se desplaza hacia una de las extremidades la diferencia de tensión aumenta (Figura 6). La señal de salida es una función del desplazamiento del núcleo. Esta señal debe de corregirse para obtener una tensión continua que sea función de la posición del núcleo, lo que asegura una relación lineal entre la señal de salida y la distancia recorrida por el núcleo.



Posición del núcleo

Figura 6. Posición de desequilibrio del núcleo que se desplaza, en este caso, hacia la secundaria 1.

Cuando el núcleo al desplazarse se aleja de la bobina secundaria 2, la señal predominante corresponde a la que da la secundaria 1 (V1).

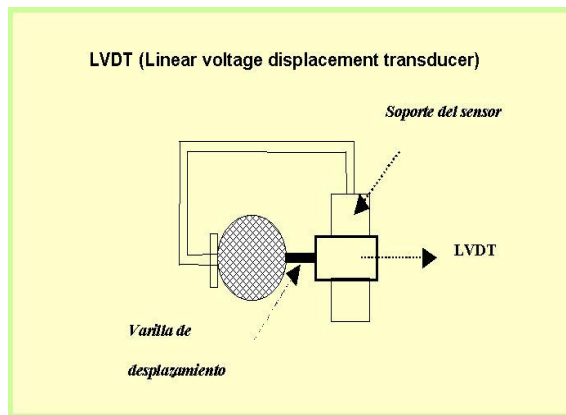
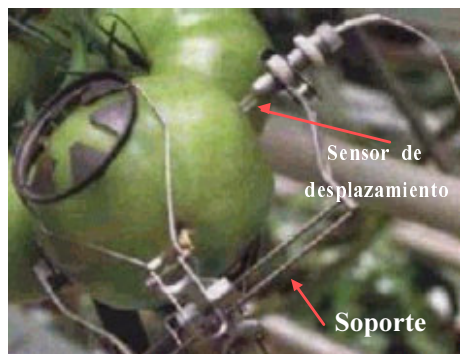


Figura 7. Esquema de montaje de un sensor de desplazamiento

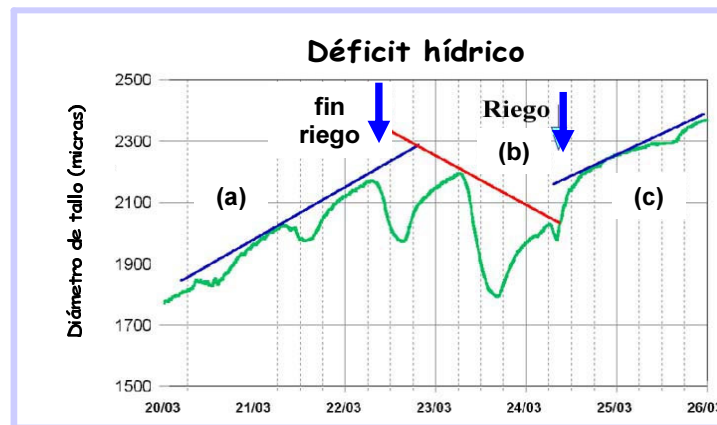
1.4- EJEMPLOS DE SENSORES

En lo que sigue, se presentan algunos tipos de sensores de desplazamiento, adaptados para la medida de la evolución del diámetro de diferentes órganos (frutos, tallos).





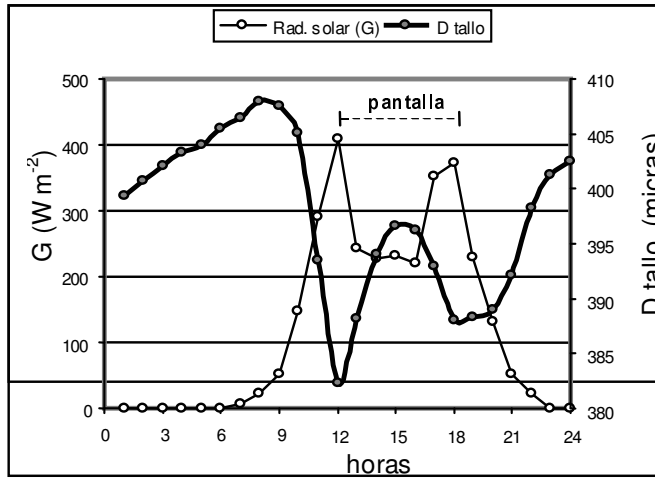
1.5- EJEMPLOS DE RESULTADOS



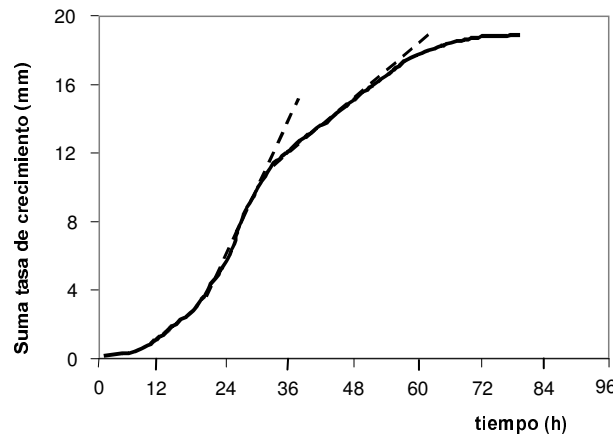
Evolución del diámetro de un tallo: (a) sin restricción hídrica, (b) cuando se para el riego y (c) cuando se restablece el riego.



Evolución del diámetro de un tallo con una frecuencia de 4 riegos al día y de 8 riegos al día



Influencia del despliegue de una pantalla de sombreo sobre la evolución del diámetro (D) de un tallo de pepino (Junio, Cartagena). Despliegue de la pantalla de 12 a 18h cuando la radiación solar en invernadero (G) es superior a unos 400 W m^{-2} .



Evolución de la tasa de crecimiento acumulada de un fruto de pepino

2- MEDIDA DEL FLUJO DE SAVIA

2.1- PRINCIPIO DE LA MEDIDA

La medida del flujo de savia permite obtener una evaluación directa de la transpiración. El principio de la medida se basa en aplicar calor en la corriente de la savia bruta o en sus inmediaciones. El campo de temperatura en las cercanías de la fuente de calor se modifica en función de la tasa de savia. Existen varios métodos para evaluar el flujo de savia, entre los que cabe destacar el método del pulso de calor y el método del balance energético. Este último método, basado en el balance de energía de un tallo o tronco de dimensión conocida, es el que desarrollaremos en lo que sigue (Figura 8):

2.2- BALANCE DE ENERGÍA

Cuando se aplica a un elemento de volumen V (tronco, tallo, pecíolo, etc.) un flujo de calor W, y se mide el campo de temperatura en las cercanías de la fuente de calor, se puede evaluar el balance de energía del elemento a partir de la relación:

$$W = q_{av} - q_{am} + q_L + q_C$$

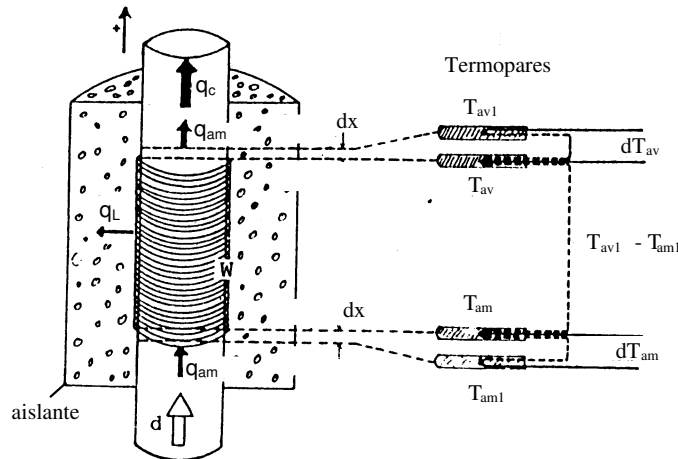
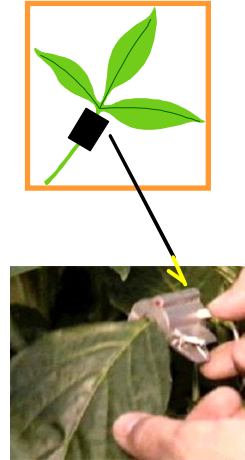


Figura 8. Flujos que intervienen en el balance de energía de un tallo

q_c = convección al interior de los vasos conductores

q_a = conducción al interior del xilema

q_L = conducción a través del material aislante



siendo:

W = Flujo de calor aplicado a un volumen V del tronco ($J s^{-1}$)

q_{am} = flujo de calor por conducción ($J s^{-1}$) a la entrada del volumen V

$$q_{am} = k S_{am} (dT_{am} / dx)$$

S_{am} = Superficie del tronco a la entrada (m^2)

dT_{am} y dx = diferencia de temperatura y distancia entre los termopares ubicados a la entrada del volumen V .

q_{av} = flujo de calor por conducción ($J s^{-1}$) a la salida del volumen V :

$$q_{av} = k S_{av} (dT_{av} / dx)$$

k = conductividad del tronco $J s^{-1} m^{-1} K^{-1}$

S_{av} = Superficie del tronco a la salida (m^2)

dT_{av} y dx = diferencia de temperatura y distancia entre los termopares ubicados a la salida del volumen V .

q_L = flujo de calor por conducción, considerado despreciable si se dispone de un aislante perfecto en torno al volumen considerado.

q_c = flujo de calor por convección ($J s^{-1}$) asociado a un caudal de savia d :

$$q_c = C_v d(T_{av} - T_{am})$$

$d =$ caudal de savia ($m^3 s^{-1}$)

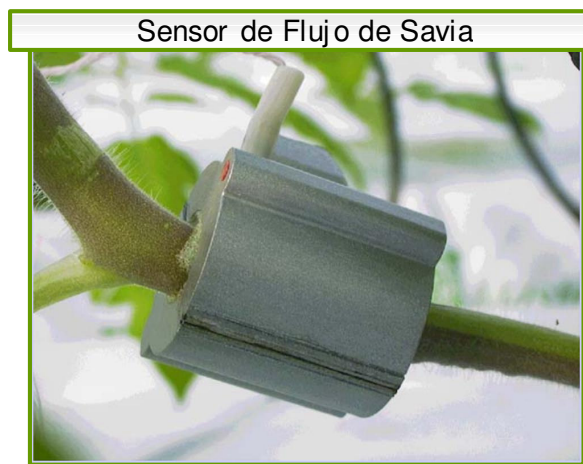
$C_v =$ Capacidad calorífica volumétrica de la savia ($\approx C_v$ del agua = $4,18 \cdot 10^6 J m^{-3} K^{-1}$)

Si la diferencia de temperatura $T_{av}-T_{am}$ es diferente de cero, el caudal de savia se puede evaluar a partir de:

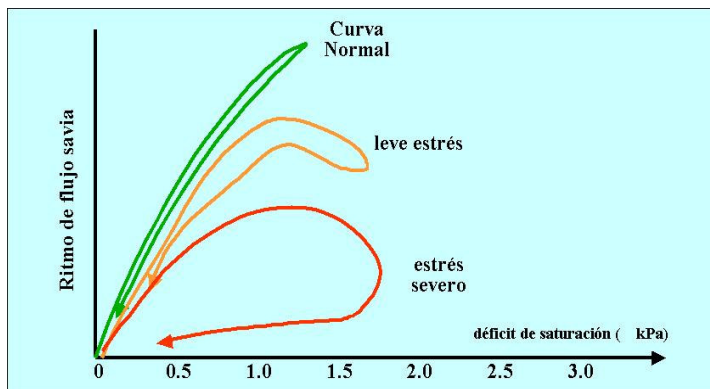
$$d = (W - q_{av} + q_{am} - q_L) / (C_v(T_{av} - T_{am}))$$

2.3- EJEMPLOS

Ejemplos de instalación de sensores de flujo de savia

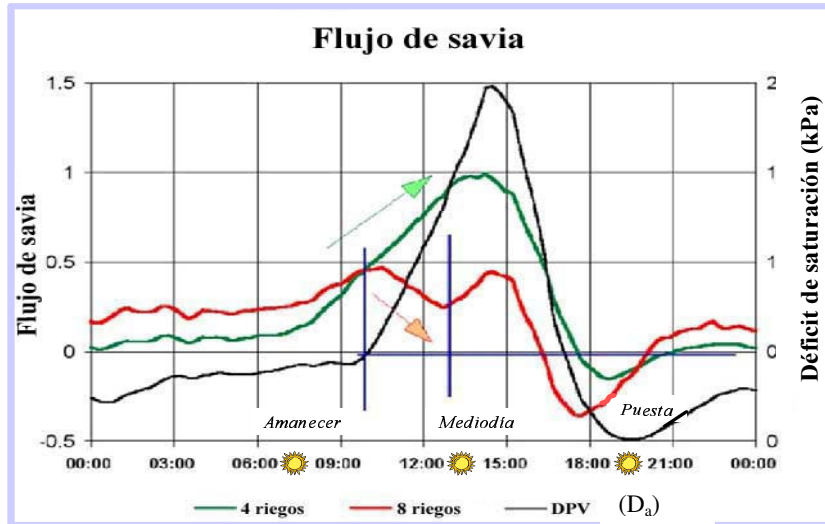


El flujo de savia presenta a lo largo del día una evolución típica que depende de las condiciones de radiación solar y del déficit de saturación del aire^(*). Cuando los valores del déficit de saturación no inducen condiciones de estrés, los valores máximos de flujo de savia se alcanzan con valores máximos de radiación solar y los valores mínimos se obtienen de noche.

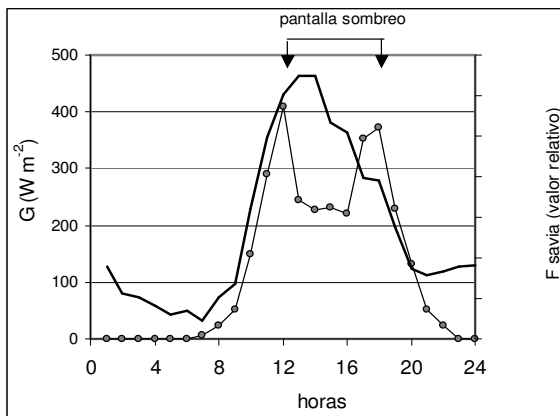


Variación del déficit de presión de vapor, D

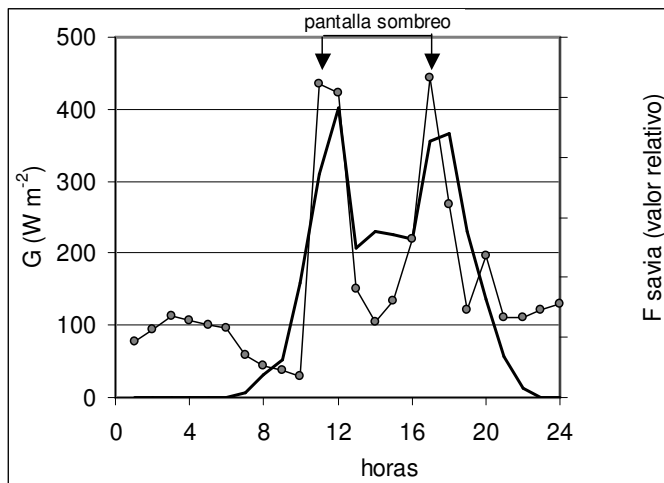
- Si aumenta la radiación solar, aumenta D
- Si aumenta la velocidad del viento, aumenta D
- Si aumenta la temperatura del aire, aumenta D
- Si aumenta la humedad relativa del aire, disminuye D



Evolución del flujo de savia cuando se aplican 4 riegos y 8 riegos al día, en condiciones de valores moderados del déficit de saturación del aire (D_a).



Evolución de la radiación global solar (G) y del flujo de savia con: (i) control de la humedad del aire (nebulización: $HR \approx 60\%$) y (ii) despliegue de la pantalla de sombreo (cuando G en invernadero $> 400 \text{ W m}^{-2}$)



Evolución de la radiación global solar (G) y del flujo de savia: (i) sin control de la humedad del aire y (ii) despliegue de la pantalla de sombreo (cuando G en invernadero $> 400 \text{ W m}^{-2}$)

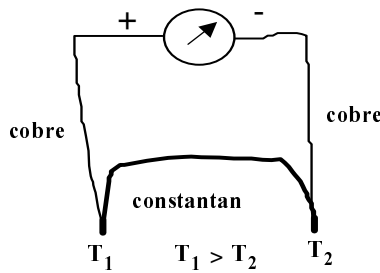
3- MEDIDA DE LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA HOJA/AIRE

3.1- PRINCIPIO DE LA MEDIDA DE LA TEMPERATURA FOLIAR

El principio de la medida se basa en la utilización de termopares. Un termopar es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes (o aleaciones de metales diferentes). Cuando los metales se unen en sus extremos para formar un circuito, y cada unión se coloca a temperatura diferente, se genera una fuerza electromotriz que es función de la diferencia de temperatura entre las dos uniones:

$$\text{fuerza electromotriz : } E = \alpha + \beta (T_1 - T_2) + \gamma (T_1 - T_2)^2 \dots$$

Para los valores de temperatura ambiente se puede utilizar una relación lineal. Los coeficientes α y β dependen del tipo de termopares utilizados. Por ejemplo, para termopares de cobre-constantan $\alpha = -0.09 \mu\text{V}$ y $\beta = 38.7 \mu\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$.



A partir de estos sensores se obtiene una diferencia de temperatura ($T_1 - T_2$). Por lo tanto, debe de conocerse una de las temperaturas (temperatura de referencia, T_r) con el objeto de poder deducir la temperatura de superficie, T_s , a partir de la relación $E = \alpha + \beta (T_s - T_r)$. Los termopares son útiles en trabajos de investigación (fisiología: para la medida temperatura foliar; entomología: para la medida de la temperatura de insectos; etc.).

3.2- LA DIFERENCIA DE TEMPERATURA HOJA AIRE: UN INDICADOR DE ESTRÉS

La temperatura foliar se ajusta continuamente de manera que alcanza un equilibrio entre la energía absorbida por las hojas y las pérdidas. Las hojas regulan su temperatura por medio de la transpiración, por lo que el nivel al que se establece la temperatura foliar, respecto a la del aire, refleja la intensidad del flujo de transpiración a un instante dado. Esto explica que la medida de la diferencia de temperatura entre la hoja y el aire se utilice como un indicador de la restricción hídrica y/o medioambiental que experimenta el cultivo.

La restricción del flujo de transpiración bajo condiciones de estrés tiene un impacto preponderante en el balance energético a nivel foliar puesto que una fracción importante de la energía solar que reciben las hojas es transformada en calor latente a través del proceso de transpiración. Es decir, una reducción temporal de la transpiración resulta, en contrapartida, en un aumento de los intercambios por convección y por radiación térmica y, como consecuencia, en un aumento de la temperatura de las hojas respecto a

la del aire. La temperatura foliar es pues la resultante del equilibrio que se establece entre los intercambios por calor sensible y por calor latente a nivel de su superficie.

Cuando se mide la diferencia de temperatura hoja-aire, en condiciones reales de cultivo $(T_h - T_a)_{real}$, se pueden calcular por fórmulas las diferencias de temperatura que corresponden:

- A condiciones de estrés severo (transpiración mínima), bajo las cuales se alcanzan los valores máximos de la diferencia: $(T_h - T_a)_{max}$
- A condiciones de transpiración máxima bajo las cuales se alcanzan los valores mínimos de la diferencia, $(T_h - T_a)_{min}$

A partir de estas tres diferencias se puede definir un índice de estrés, IS, que varía de 0, cuando no hay condiciones de estrés, a 1 (estrés severo):

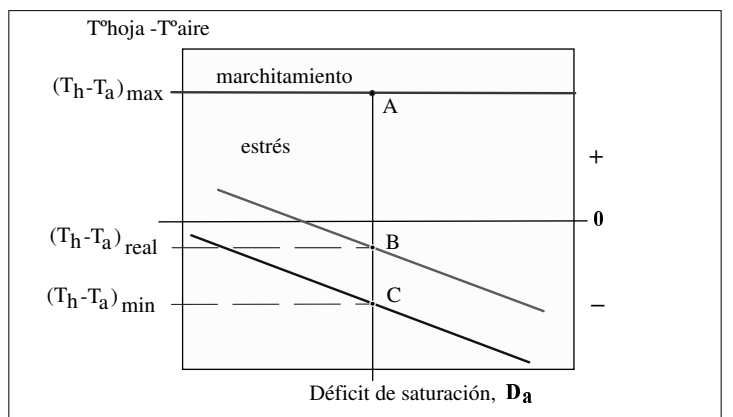
$$IS = \frac{(T_h - T_a)_{real} - (T_h - T_a)_{min}}{(T_h - T_a)_{max} - (T_h - T_a)_{min}}$$

Se puede demostrar que esta relación es equivalente a la que se utiliza para definir el índice de estrés en función de la transpiración real del cultivo (E_{real}) y de su transpiración máxima (E_M):

$$IS = 1 - \frac{E_{real}}{E_M}$$

E_{real} y E_M se pueden evaluar a partir de la fórmula de Penman-Monteith

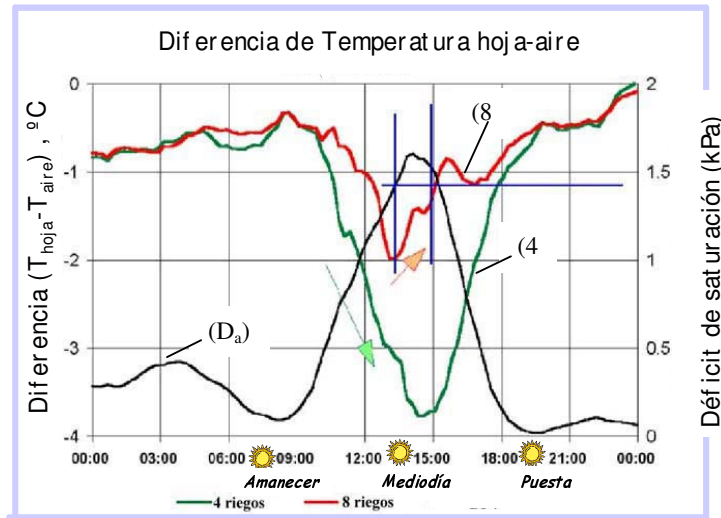
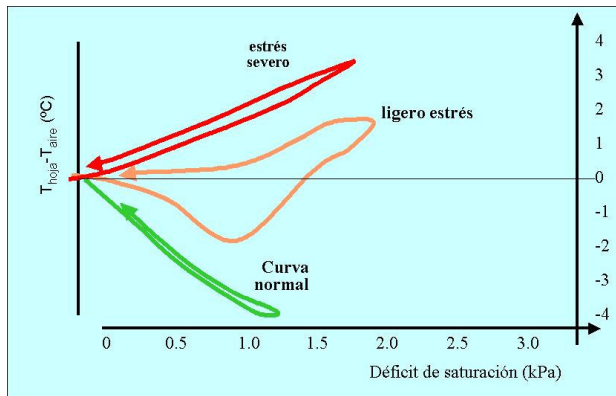
Definición de un índice de estrés, IS



$$IS = BC / AC = 1 - \frac{E_{real}}{E_M} \quad E = \text{transpiración}$$

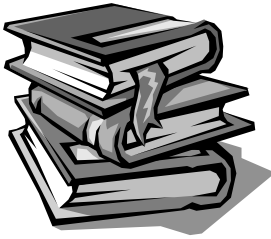
Representación esquemática de la evolución de la diferencia de temperatura hoja-aire en función del déficit de saturación, para un nivel determinado de radiación solar.

3.3- SENSORES PARA MEDIR LA TEMPERATURA DE HOJAS



Evolución de la diferencia de temperatura hoja-aire cuando se aplican 4 riegos y 8 riegos al día, en condiciones de valores moderados del déficit de saturación del aire (D_a).

Referencias bibliográficas



Parte II.

EL CLIMA DEL INVERNADERO VARIABLES CARACTERÍSTICAS Y MEDIDA

ASHRAE, 1977. *Brochure on psychrometry.* ASHRAE., Atlanta, GA.

ACTA HORTICULTURAE. Vol. 421. *International Symposium on sensors in Horticulturae, Denmark.*

COULON G., 1993. *Les capteurs climatiques, meteorologiques et energetiques utilices pour les ordinateurs de conduite du climat des serres.* ADEME-ADERSA (Eds.), France.

FRITSCHEN L.J., GAY L.W., 1979. *“Environmental instrumentation”.* New York: Springer Verlag, New York.

GUYOT G., 1997. *Climatologie de l’environnement. De la plante aux écosystèmes.* Editorial Masson S.A. 505 pp.

INRA., 1970. *“Techniques d’étude des facteurs physiques de la biosphère”.* Institut National de la Recherche Agronomique., France. INRA. Publ. 70-5. 543 pp.

PALLAS J.E., Jr. 1986. CO₂ measurement and control. In: *Carbon Dioxide Enrichment of Greenhouse Crops.* Enoch H.Z., Kimball B.A. (Eds.), Vol II. CRS Press, Boca Raton Florida.

SCHON J-P., RIEUTORD E., CHARNAY G., 1980. *Les méthodes de mesure en transfert thermiques.* In: *Initiation aux transferts thermiques,* p:406-421. 2eme tirage, Lavoisier Techniques et Documentation, Paris, 446 pp.

WILHELM L.R., 1976. Numerical calculation of psychrometric properties in SI units. *Transactions of the ASAE 19(2), 318-321, 325 pp.*

WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION 1965. *“Guide to meteorological instruments and observing practices”.* WMO. No 8. TP3, Supplement 5.