



# Balance de energía a escala local y regional

## Instrumental y tratamiento de datos

Dr. Raúl Rivas

[rrivas@rec.unicen.edu.ar](mailto:rrivas@rec.unicen.edu.ar)

# Temario

- **La Ecuación de Balance de Energía (EBE). Radiación neta ( $R_n$ ), flujo de calor latente ( $LE$ ), flujo de calor en el suelo ( $G$ ) y flujo de calor sensible ( $H$ ). Comportamiento diario de los términos de la EBE sobre una superficie vegetal en la estación Tandil. Instrumental utilizado para la medición. Descripción. Estimación del  $LE$  a escala regional usando datos captados desde satélite ( $S$ ). Modelos de una capa, de dos capas y semi-empíricos. Ecuaciones de estimación de  $R_n$ ,  $G$  y  $H$  desde  $S$ . Validación de datos de satélite. Ejemplo de aplicación con datos del sensor MODIS.**



# Evapotranspiración

- La evaporación ( $E_v$ ) representa la cantidad de agua que, en forma de calor latente ( $LE$ ), se transfiere a la atmósfera proveniente del suelo y las masas de agua. En un suelo con cubierta vegetal, existe además otra aportación de agua a la atmósfera: la transpiración ( $T$ ) de las plantas (Rivas, 2004). Este es el objetivo principal de los estudios hidrológicos desarrollados en el IHLLA.



# ET desde el punto de vista energético

- De acuerdo con la ley de conservación de la energía los procesos de intercambio entre el sistema tierra-superficie-atmósfera pueden ser descritos por la EBE:

$$\mathbf{R_n + H + LE + G + A + Ah = dw/dt} \quad (1)$$

$R_n$  es la radiación neta,  $H$  el flujo de calor sensible,  $LE$  el flujo de calor latente,  $G$  el flujo de calor en el suelo,  $A$  es la energía utilizada por las plantas y animales (considerado despreciable),  $A_h$  es la energía de advección horizontal en la capa y  $dw/dt$  es la variación de energía del sistema (considerado nulo en régimen permanente y prácticamente nulo en transitorio). La unidad utilizada, en la generalidad de los casos, es  $W m^{-2}$ . A nivel de la superficie se define que el flujo que ingresa a ésta es positivo y el flujo saliente negativo.



# Balance de Energía (BE)

- La ecuación operativa, en una dimensión, que gobierna el balance de energía (BE) viene dada por la forma en que se distribuye la radiación neta ( $R_n$ ) a nivel de superficie, por medio del flujo de calor en el suelo ( $G$ ), el flujo de calor sensible ( $H$ ) y el flujo de calor latente ( $LE$ ) (Brutsaert, 1984):

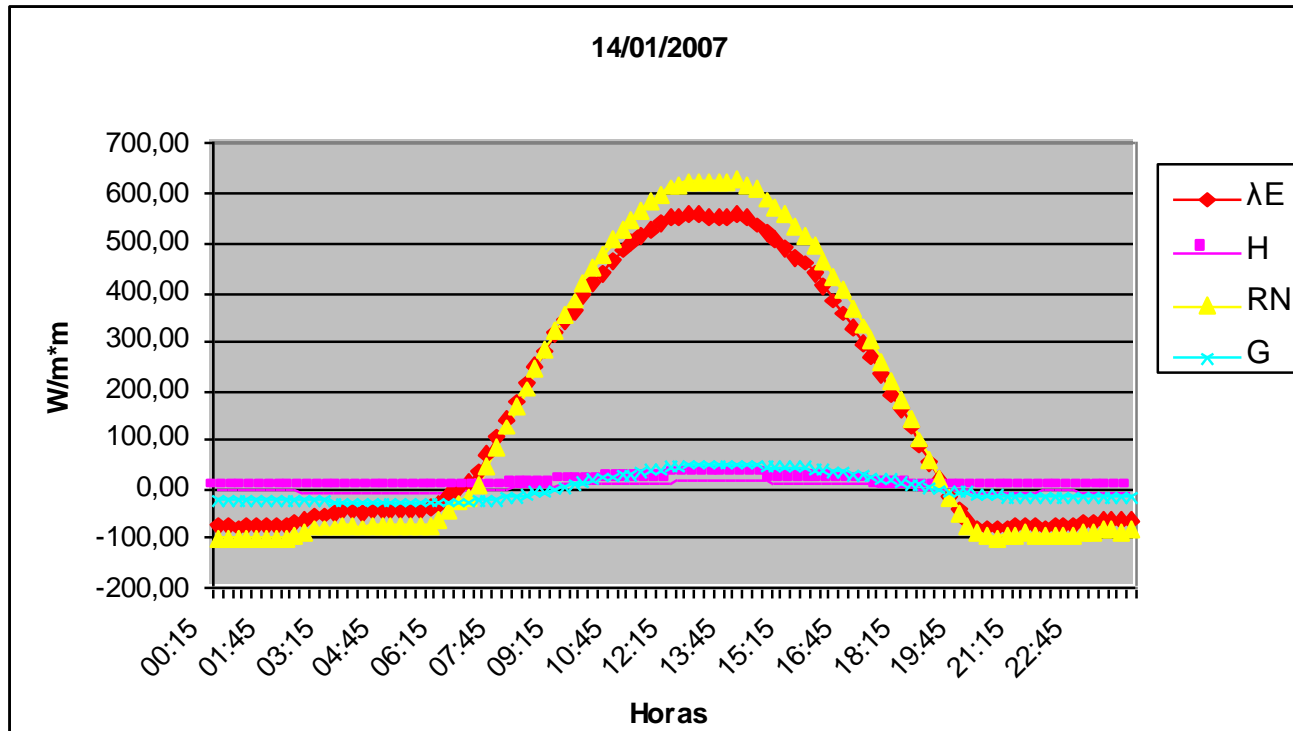
$$R_n + G + H + LE = 0 \quad (2)$$

Los términos de la ecuación de BE vienen dados en unidades de flujo por unidad de superficie ( $W \text{ m}^{-2}$ )



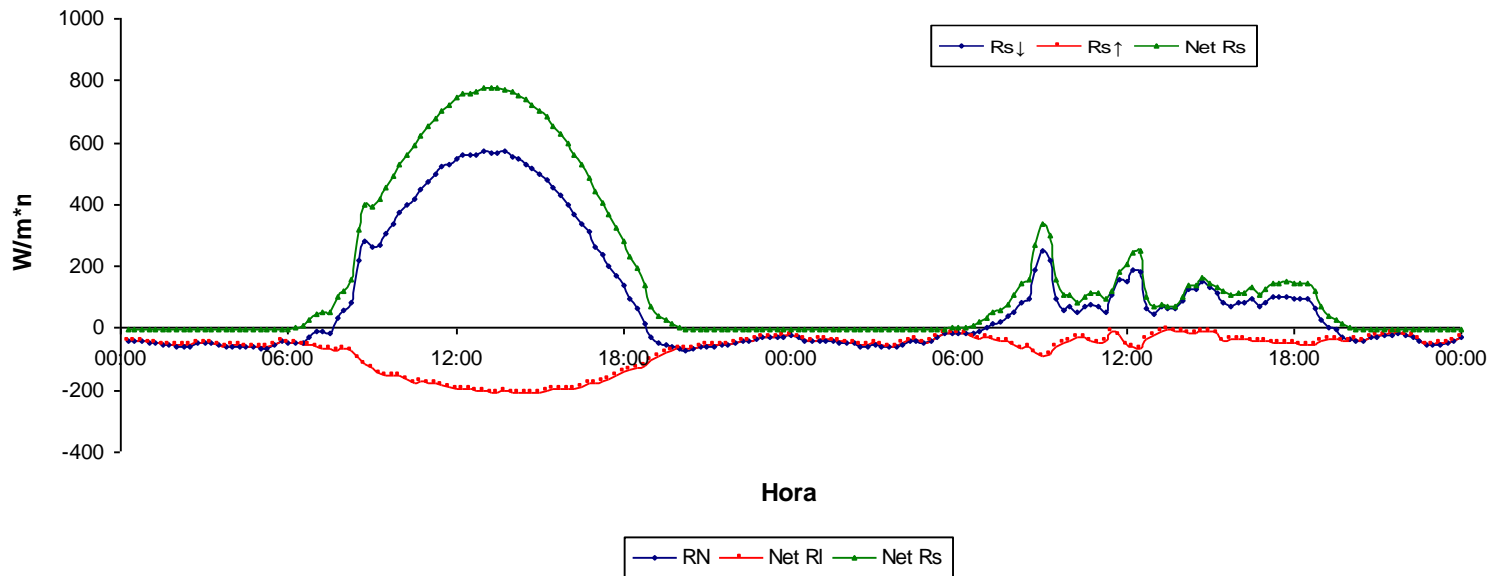
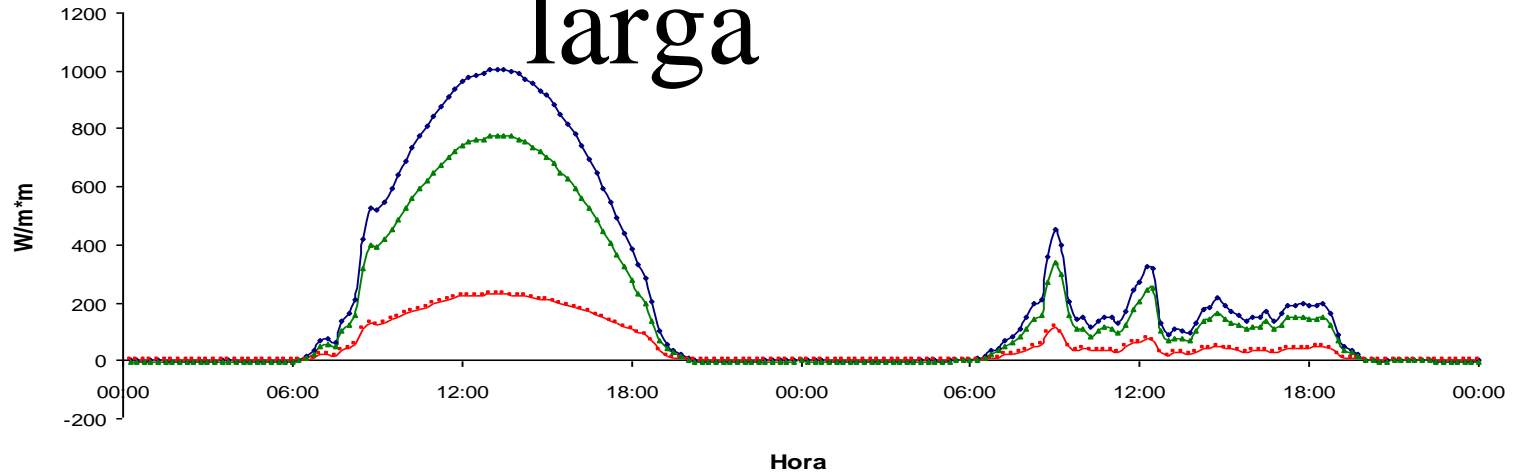
# Radiación neta

- La radiación neta en la superficie se puede distribuir de la siguiente manera:



La ecuación de cálculo es:  $Rn = Rs_{\downarrow} - Rs_{\uparrow} + Rl_{\downarrow} - Rl_{\uparrow}$  (3)

# Radiación neta de onda corta y larga



# Flujo de calor en el suelo

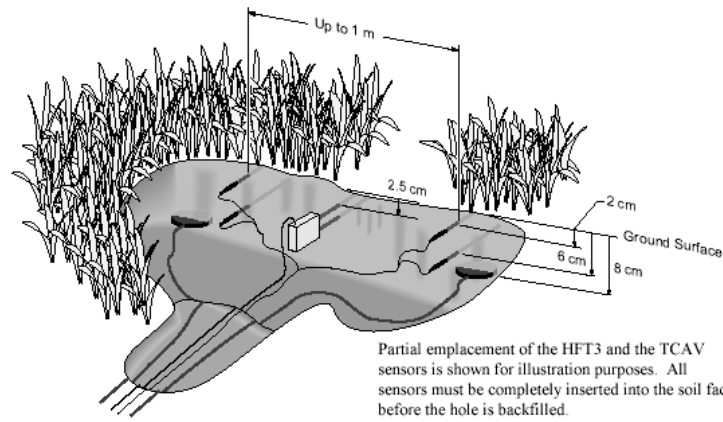
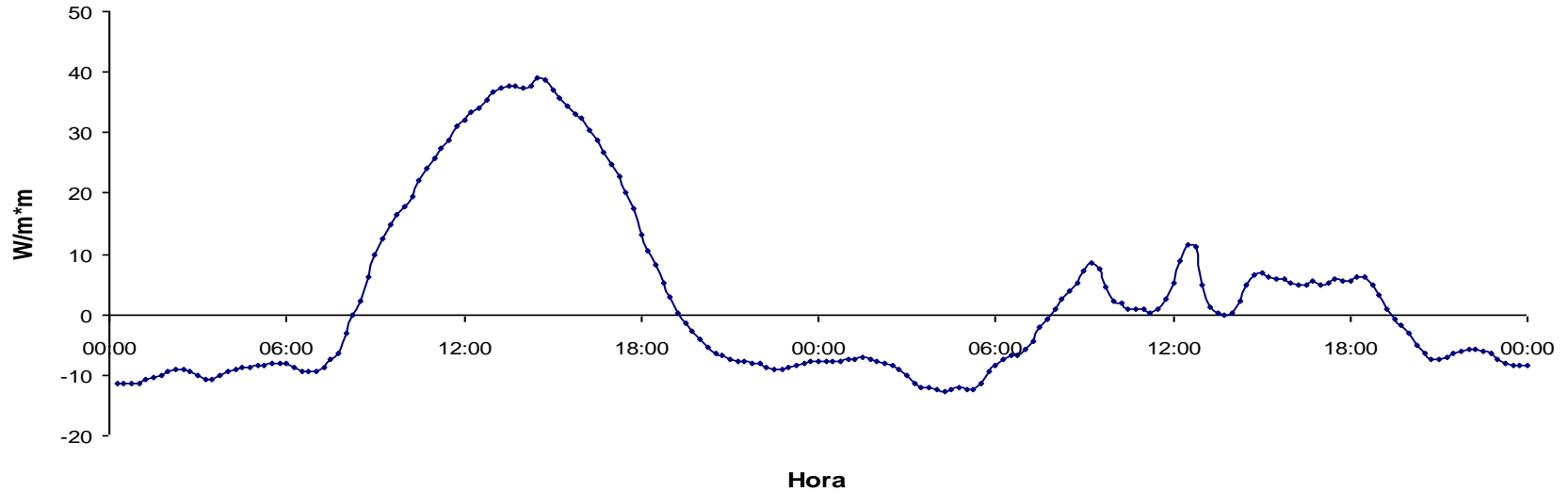
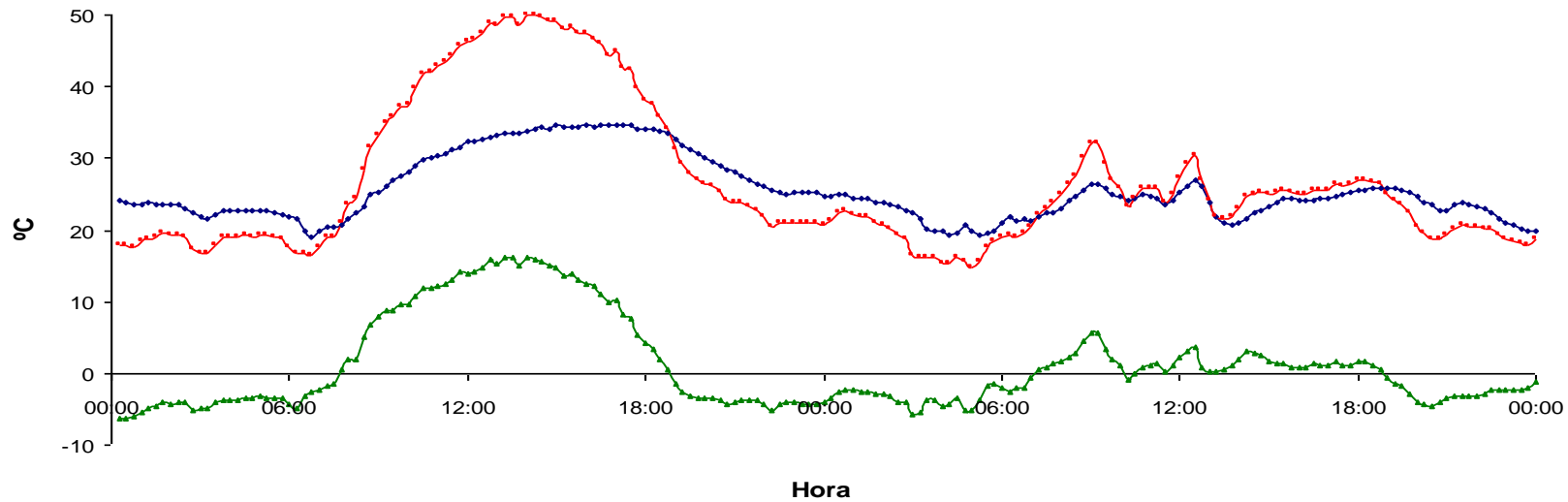
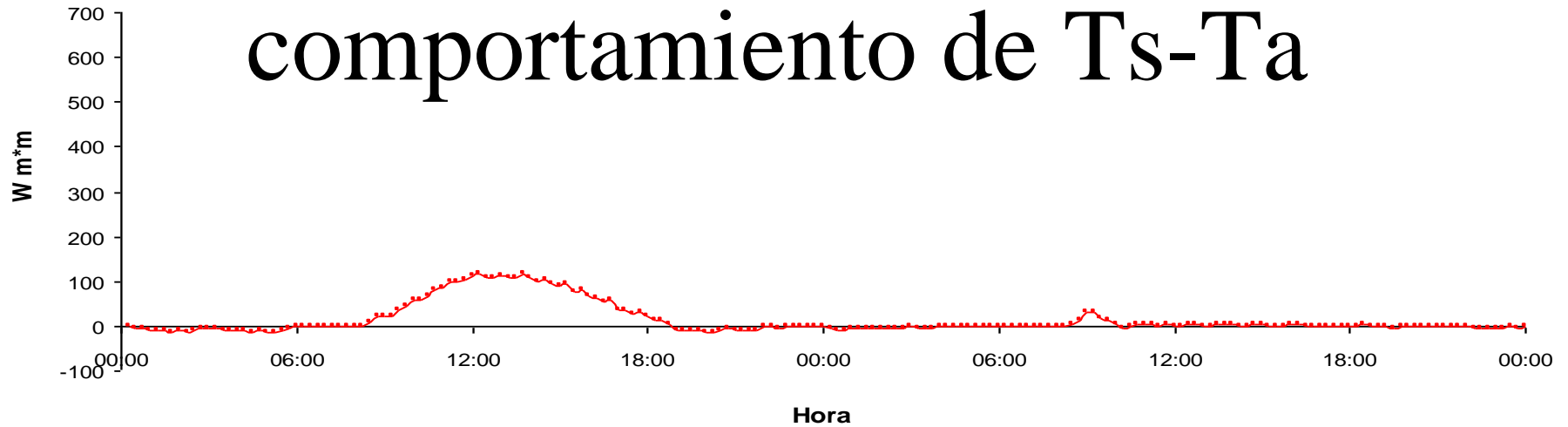


Figura tomada del manual del sensor HFT3 (Campbell).



# Flujo de calor sensible y comportamiento de Ts-Ta



# BE día-noche y en una superficie húmeda y una seca

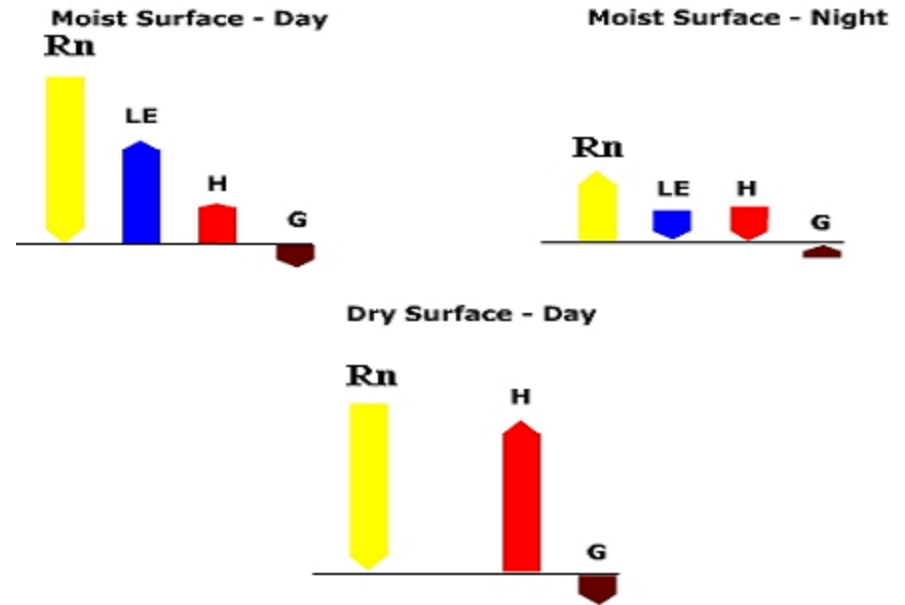
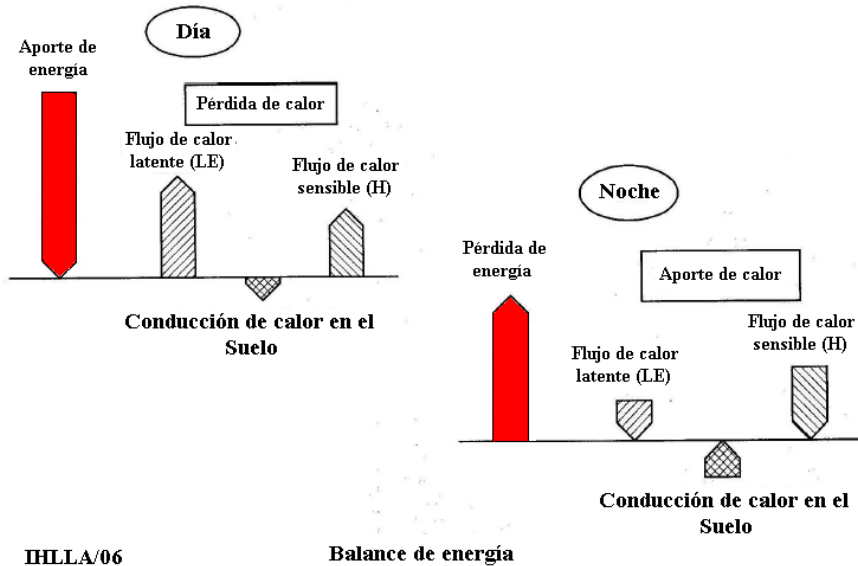


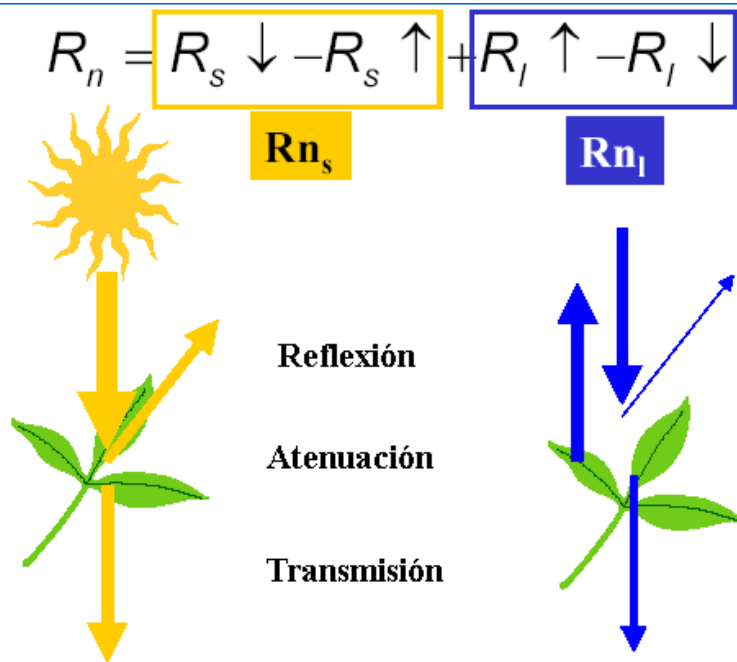
Figura tomada de Rouse 1979

IHLLA/06

Balance de energía

Figura adaptada de Vidal 1996 (GDTA France).

# Estimación de Rn



Los términos de la ecuación de Rn se pueden obtener a partir de medidas realizadas con sensores en estaciones Ad Hoc (sensor instalado en Tandil)



Siendo Rs la radiación solar (entrante ↓ y saliente ↑) y Rl la radiación de onda larga (entrante ↓ y saliente ↑).

# Estimación de G



$$C_s = \rho_b (C_d + \theta_m C_w) = \rho_b C_d + \theta_v \rho_w C_w \quad (4)$$

$$\theta_m = \frac{\rho_w}{\rho_b} \theta_v \quad (5)$$

where  $C_s$  is the heat capacity of moist soil,  $\rho_b$  is bulk density,  $\rho_w$  is the density of water,  $C_d$  is the heat capacity of a dry mineral soil,  $\theta_m$  is soil water content on a mass basis,  $\theta_v$  is soil water content on a volume basis, and  $C_w$  is the heat capacity of water.

$$S = \frac{\Delta T_s C_s d}{t} \quad (6)$$

(modelo instalado en la estación IHLLA-Tandil)

El G es medido por un sensor (el de la foto es el modelo HFT3) a 7 cm de profundidad. Existen diferentes modelos. El modo de operación del sensor HFT3 se sustenta en ecuaciones 4, 5 y 6.

# Sensor de flujo de calor sensible



Medidor de velocidad de viento en 3D relacionado con el transporte turbulento de calor y humedad en la atmósfera

# Estimación de H en ausencia de sensor sonico

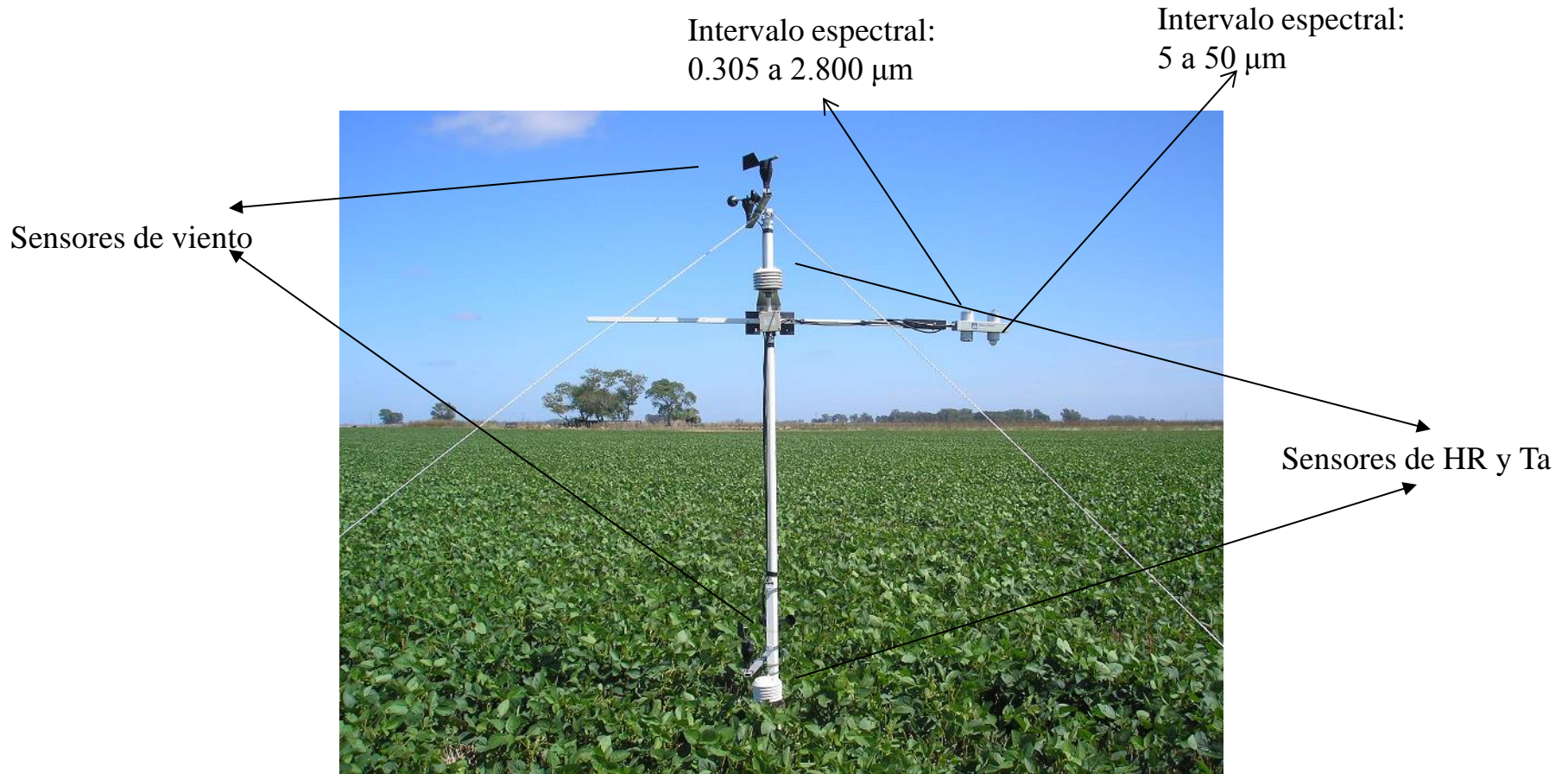
$$H = \rho c_p \frac{T_o - T_a}{r_a} \quad (7)$$

donde  $\rho$  es la densidad del aire,  $c_p$  es el calor específico del aire húmedo a una presión constante y  $r_a$  la resistencia aerodinámica.  $T_o$  y  $T_a$  son la temperatura de la vegetación en el plano de flujo cero y del aire.



$$r_a = \frac{\ln\left(\frac{z_m - d}{z_{om}}\right) \cdot \ln\left(\frac{z_h - d}{z_{oh}}\right)}{k^2 \cdot U_z} \quad (8)$$

# Ejemplo de instalación de los sensores descriptos

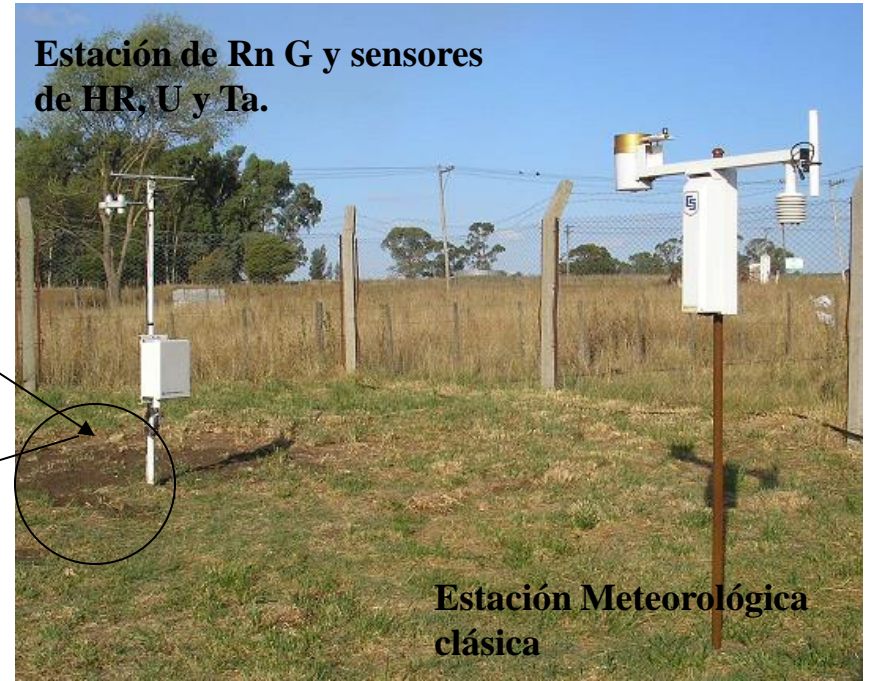


Instalado en un predio con cultivo de soja de segunda campaña 2006/07. Mayores detalles consultar el trabajo (Schirmbeck y Rivas, 2007 Libro de Teledetección “libre acceso en [www.aet.org.ar](http://www.aet.org.ar)” pp 317-322).

# Sensor de G en un sector con suelo

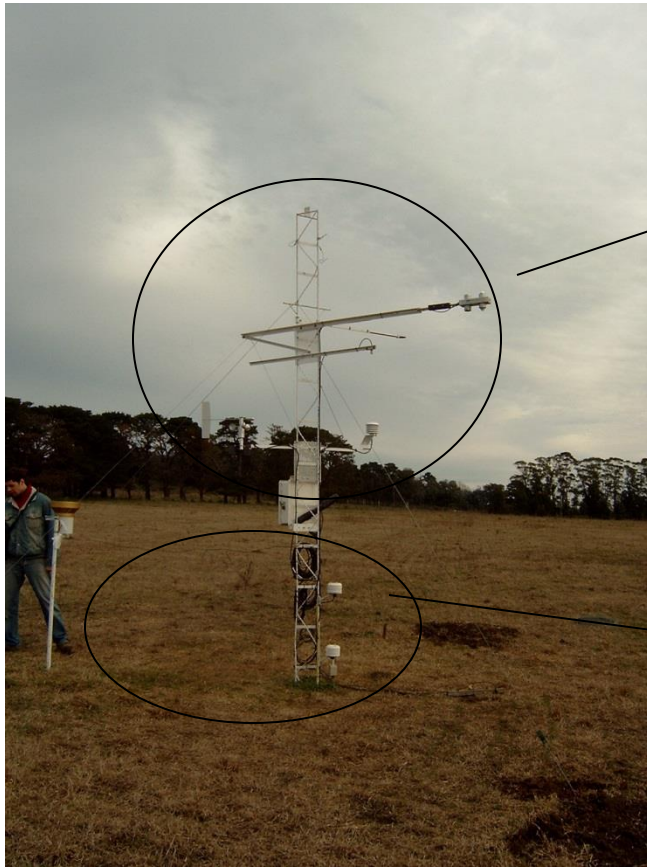


Testeo en un sector con suelo desnudo

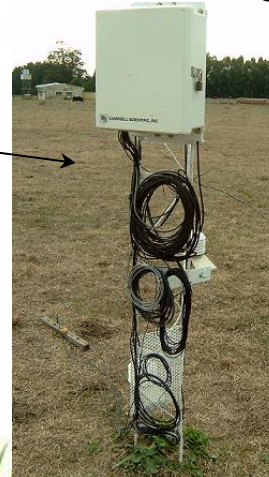




# Monitoreo de LE sobre un campo con siembra directa

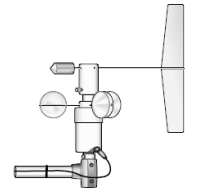


Configuración PICTO 22825 UNCPBA



# Sensores con ubicados para hacer la aplicación de la EBE en soja

**CSI Met One  
034B Windset**



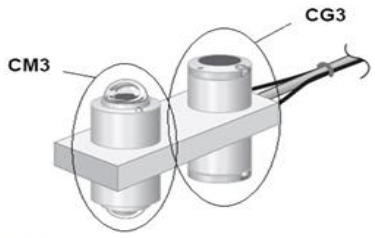
**CSI CS215-  
L16  
Temperature  
and humidity sensor**



**AII-CSI IRR-P  
1505 Precision  
Infrared  
Temperature Sensor**



**CSI CNR1 Net Radiometer  
0,305-2,800 μm y 5-50 μm**



**CSI NR-LITE  
Net Radiometer  
0,2-100 μm**



$$R_n = R_{s\downarrow} - R_{s\uparrow} + R_{l\downarrow} - R_{l\uparrow}$$



# *Sensores soja (continuación)*



*CSI HFT3  
Soil Heat  
Flux Plate*

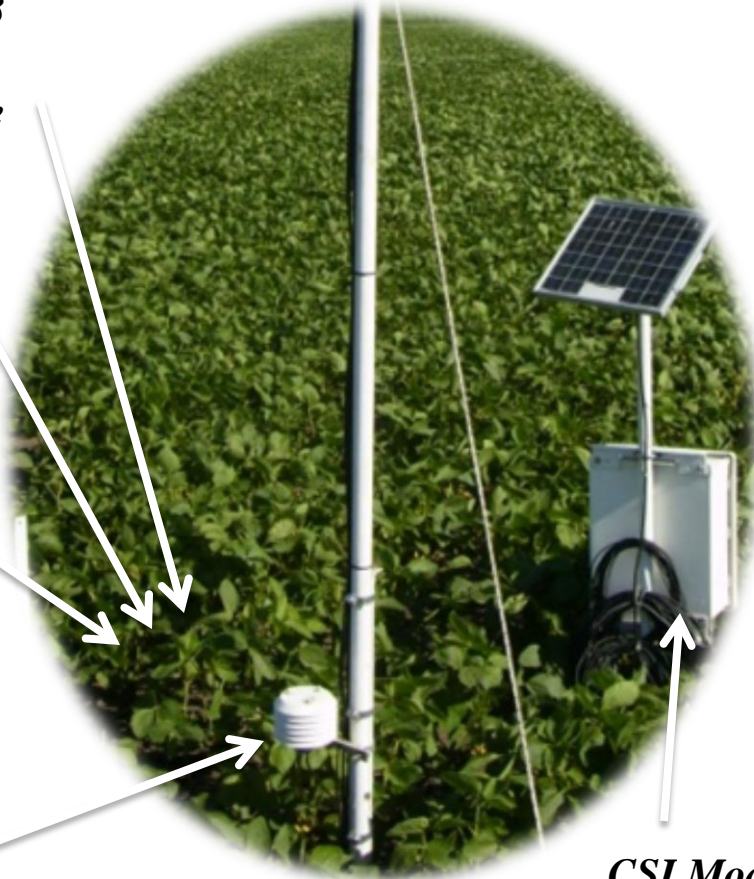


*DDI EC H2O  
Soil Moisture  
Sensor-EC-  
10/20 cm*

*Sensores de  
temperatura  
enterrados*



*CSI Model 107  
Temperature  
Probe*



*CSI Model 10X  
datalogger; panel solar de  
20 W; batería de 12 V*

# Sensores de mano para medidas en parcelas

*Humedad del suelo*



*Sensores de  
Temperatura  
radiativa*



**Sensores de terreno para complementar y controlar las medidas**

# Calibrado de sensores

La consistencia de los datos es fundamental. Por lo tanto es recomendable calibrar los sensores de terreno con la periodicidad que cada uno requiere.



Tanque de evaporación utilizado para evaluar la evaporación desde cuerpos de agua.

Se calibran en gabinete siguiendo las especificaciones del fabricante.