

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"  
UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**



**RELACIÓN ENTRE EL FLUJO DE CALOR EN LA SUPERFICIE DEL  
SUELO Y LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN EL CULTIVO DE MAÍZ  
EN LAS ZONAS ÁRIDAS DEL NORTE DE MÉXICO.**

**POR**

***JUAN CARLOS CASTILLO VÁZQUEZ***

**T E S I S**

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL  
TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

**TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO**

**DICIEMBRE DE 2002**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"  
UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**RELACIÓN ENTRE EL FLUJO DE CALOR EN LA SUPERFICIE DEL  
SUELO Y LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN EL CULTIVO DE MAÍZ  
EN LAS ZONAS ÁRIDAS DEL NORTE DE MÉXICO.**

**JUAN CARLOS CASTILLO VÁZQUEZ**

**TESIS**

**QUE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL COMITÉ ASESOR COMO  
REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

ASESOR PRINCIPAL:



Ph.D. Alejandro Zermeño González

ASESOR:

P.A.



MC. Jabulani Jiyane

ASESOR:

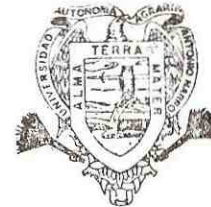
Ph.D. Vicente De Paul Alvarez Reyna

ASESOR:

Dr. José Alfredo Montemayor Trejo

**COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE  
CARRERAS AGRONÓMICAS**

**ING. ROLANDO LOZA RODRÍGUEZ**



COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN  
DE CARRERAS AGRONÓMICAS  
UNIDAD LAGUNA

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO DICIEMBRE DE 2002

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA AGRARIA "ANTONIO NARRO"  
UNIDAD LAGUNA**

**DIVISIÓN DE CARRERAS AGRONÓMICAS**

**RELACIÓN ENTRE EL FLUJO DE CALOR EN LA SUPERFICIE DEL  
SUELO Y LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE EN EL CULTIVO DE MAÍZ  
EN LAS ZONAS ÁRIDAS DEL NORTE DE MÉXICO.**

**POR**

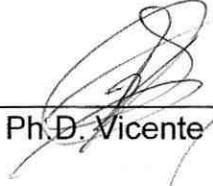
**JUAN CARLOS CASTILLO VÁZQUEZ**

**TESIS**

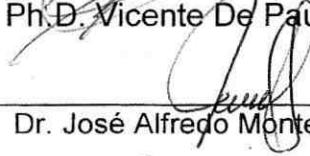
**QUE SE SOMETE A CONSIDERACIÓN DEL H. JURADO EXAMINADOR  
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO AGRÓNOMO EN IRRIGACIÓN**

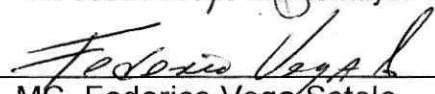
PRESIDENTE:

  
Ph.D. Vicente De Paul Alvarez Reyna

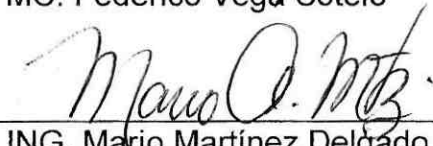
VOCAL:

  
Dr. José Alfredo Montemayor Trejo

VOCAL:

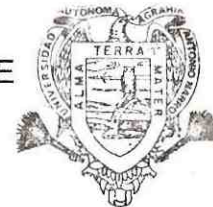
  
MC. Federico Vega Sotelo

VOCAL SUPLENTE:

  
ING. Mario Martínez Delgado

COORDINADOR DE LA DIVISIÓN DE  
CARRERAS AGRONÓMICAS

  
ING. ROLANDO LOZA RODRÍGUEZ



COORDINACIÓN DE LA DIVISIÓN  
DE CARRERAS AGRONÓMICAS  
TAAAN UL

TORREÓN, COAHUILA, MÉXICO DICIEMBRE DE 2002

## **DEDICATORIAS**

### **A mi Padre Celestial**

Por darme la oportunidad de vivir y amar.

### **A mis Padres**

La Sra. Martha Vázquez Jiménez y Sr. Sabas Castillo López, a quienes dedico este trabajo, por el infinito amor, cariño y comprensión que me dan día a día, por su incansable esfuerzo lo he logrado, sinceramente gracias.

### **A mi novia**

Blanca Luna Mena, por apoyarme incondicionalmente y dar felicidad a mi existir, por estar junto a mi en los momentos difíciles y en los momentos mas hermosos de mi vida.

### **A mis hermanos**

Rosario, Camelia, Juan de Dios y Juan Pablo con todo mi cariño.

### **A la familia Luna Mena**

Por su cariño y confianza que me brindaron.

### **A mi sobrino**

Víctor Manuel Jr.

### **A mis cuñados**

Víctor y Adrián

### **A mis amigos**

Jorge y Mariano, por su amistad que incondicionalmente me han ofrecido y por ser mi familia en mi Alma Terra.

**A mi familia**

Por la gran familia que formamos, por su apoyo y amor.

**A mis compañeros y amigos de la generación de Irrigación 98-2002**

Jorge, Aldegundo, Amador, Jesús O, Luz Areli, Alfonso, Eziquio, Sergio,  
Gabriel, Omar, Gonzalo, Juan Manuel, Rigoberto, Manuel de J, Diego,  
Wilfredo, Osvaldo.

## AGRADECIMIENTOS

### **A mi "Alma Terra Mater"**

Por darme el lugar y los conocimientos para lograr la culminación de mis estudios.

**Al Ph.D. Alejandro Zermeño González**, mi más profundo agradecimiento por su valiosa contribución en mi formación profesional y por haber depositado su confianza en mi y brindarme la oportunidad de realizar este trabajo de investigación.

**Al Ph.D. Vicente de Paul Alvarez Rena**, mi mas sincero agradecimiento por su ayuda en el presente trabajo y contribuir en mi formación profesional.

**Al MC. Jabulany Jiyane**, mi mas profundo agradecimiento por su valiosa contribución para la culminación de este trabajo.

**Al MC. Gabriel García** por su amistad y consejos.

**Al MC. Carlos Efrén Ramírez Contreras**, por su valiosa contribución en mi formación profesional.

**Al MC. Federico Vega Sotelo**, por su valiosa contribución en mi formación profesional y por su amistad.

**Al MC. Abel Román López**, por su valiosa contribución en mi formación profesional y amistad.

**Al Dr. Esteban Favela Chávez**, por su amistad.

**Al CENID-RASPA**, por su apoyo material para la realización de esta investigación.

## ÍNDICE

	Paginas
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>i</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE DE CUADROS</b> .....	<b>iv</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>v</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>OBJETIVO</b> .....	<b>4</b>
<b>HIPÓTESIS</b> .....	<b>4</b>
<b>REVISIÓN DE LITERATURA</b> .....	<b>5</b>
Ciclo vegetativo y desarrollo del maíz .....	5
Espectro de la radiación solar.....	6
Factores que determinan el flujo de calor en la superficie del suelo y su medición.....	8
Evapotranspiración a equilibrio.....	10
Factor de advección.....	12
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
Ubicación geográfica del área de estudio.....	15
Características climáticas de la región.....	15
Dimensiones y orientación del lote experimental.....	17
Propiedades físicas y químicas del suelo del lote experimental.....	18
Características del cultivo.....	18
Manejo agronómico del cultivo.....	19
Medición de la radiación solar total incidente.....	19

Medición del flujo de calor en el suelo.....	20
Relaciones entre el flujo de calor en la superficie del suelo y la radiación solar incidente.....	22
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>23</b>
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>32</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>33</b>
<b>LITERATURA CITADA.....</b>	<b>34</b>
<b>PAGINAS WEB CONSULTADAS.....</b>	<b>37</b>



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura No.	Pagina
1.1 Espectro de la radiación electromagnética solar.....	7
2.1 Localización geográfica del CENID-RASPA.....	16
2.2 Representación esquemática del lote experimental y ubicación del equipo de Medición (E) y (L).....	17
2.3 Piranometro de silicón (modelo LI200X, LI-COR's Silicon Pyranometer).....	20
2.4. Colocación de transductores de calor modelo HFT3 (Campbell Scientific Inc., Logan UT).....	21
3.1 Relación entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G) y la radiación solar incidente diaria (RSW) durante la etapa vegetativa del cultivo.....	26
3.2 Relación entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G) y la radiación solar incidente diaria (RSW) durante la etapa de floración-llenado de grano del cultivo.....	29
3.3 Relación entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G) y la radiación solar incidente diaria (RSW) durante la etapa senescencia del cultivo.....	31

## ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro No.	Pagina
2.1 Valores de densidad bruta ( $\rho_b$ ), pH y conductividad electrica (CE) de los estratos 0-30 y 30-60 cm de profundidad en el suelo del lote experimental.....	18
3.1 Valores de la radiación solar total incidente diaria (Rsw) y flujo de calor en la superficie en el suelo (G),durante la etapa vegetativa del cultivo.....	24
3.2 Valores de la radiación solar total incidente diaria (Rsw) y flujo de calor en la superficie en el suelo (G),durante la etapa de floración y llenado de grano del cultivo.....	27
3.3 Valores de la radiación solar total incidente diaria (Rsw) y flujo de calor en la superficie en el suelo (G),durante la etapa de senescencia del cultivo.....	30

## RESUMEN

En este trabajo se desarrollaron relaciones empíricas para generar valores de flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ) en función de la radiación solar total incidente ( $R_{sw}$ ), para su aplicación en el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio, el cual una vez calibrado para la región de interés, permite estimar la evapotranspiración real de los cultivos en forma diaria en las zonas áridas del norte de México. El trabajo se desarrollo con el cultivo de maíz (*Zea mays L.*, variedad Asgrow 7573) durante el ciclo verano 2001 en el campo experimental del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID RASPA), ubicado en el km. 6.5 Margen Derecha del Canal Sacramento, en Gómez Palacio, Durango, México.

El ciclo de desarrollo del cultivo se dividió en: Etapa vegetativa, floración-llenado de grano y senescencia.  $G$  se midió usando dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific Inc., Logan UT) los cuales se enterraron a una profundidad de 8 cm por debajo de la superficie del suelo. El flujo de calor en la superficie del suelo se obtuvo añadiendo los cambios en almacenamiento de la energía en el estrato superior de 8 cm, debido ha cambios en la temperatura del suelo y el valor del contenido de humedad del suelo (Kimball et al., 1976).  $G$  fue medido a una frecuencia de dos segundos para obtener promedios de 20 min, en forma continua a través del desarrollo del cultivo.  $R_{sw}$  se midió con un piranometro de silicón (modelo LI200X, LI-COR's Silicon

Pyranometer) instalado a una altura de 1.0 m por encima del dosel del cultivo, las mediciones se realizaron a una frecuencia de 2 segundos y promedios de 20 min, en forma continua a través del ciclo de desarrollo del cultivo. Los datos se registraron automáticamente utilizando un datalogger modelo CR7X (Campbell Scientific, Inc) la estación de mediciones fue establecida dentro del cultivo de maíz. Los valores promedio de 20-minutos de G y Rsw se integraron de las 8 a las 20 hrs, para obtener los totales diarios.

Las relaciones empíricas entre G y RSW que se encontraron para cada etapa son:

Etapa Vegetativa	$G = -42.812 - 3.486 * R_{sw} - 0.072 * R_{sw}^2$	$r^2 = 0.606$
Etapa de floración-llenado de grano	$G = -0.149 - 0.00639 * R_{sw} - 0.00093 * R_{sw}^2$	$r^2 = 0.527$
Etapa Senescencia	$G = 0.522 - 0.0421 * R_{sw} - 0.00114 * R_{sw}^2$	$r^2 = 0.949$

Donde G es el flujo de calor total diario en la superficie del suelo ( $MJm^{-2}$ ) y Rsw es la radiación solar total incidente diaria ( $MJm^{-2}$ ), el coeficiente de determinación de cada ecuación indican que es posible realizar estimaciones aceptables de G en función Rsw.

Se sugiere desarrollar este tipo de relaciones empíricas para los cultivos más importantes en cada región agrícola, para generar la información de flujo de calor en la superficie del suelo en función de la radiación solar incidente, para su aplicación en la estimación de la evapotranspiración real de los cultivos con base al enfoque de la evapotranspiración a equilibrio. Su aplicación en la programación de la irrigación de los cultivos de una determinada región, mejorara la eficiencia en uso del agua.

## INTRODUCCIÓN

El maíz destaca como uno de los cultivos más importantes, en México ocupa el primer lugar entre los cultivos anuales básicos. Las principales zonas áridas del mundo se distribuyen a lo largo de dos cinturones que pasan por los trópicos de Cáncer y de Capricornio respectivamente. Comprenden una superficie del orden de 20 millones de kilómetros cuadrados, equivalente al 14 % de la superficie total del planeta. Se entiende por zonas áridas aquellas áreas cuya precipitación es menor a 350 mm anuales, que presentan una distribución de lluvias muy irregular durante el ciclo vegetativo, que cuentan con una temperatura media anual que oscila entre los 15 y 25°C y con no menos de 7 meses de sequía y cuya cubierta vegetal es menor del 70 %. En México, existen 56 millones de kilómetros cuadrados cubiertos por zonas áridas y 23 de zonas semiáridas, que sumadas equivalen a aproximadamente el 40 % de la superficie total del país (Parra, 1981; Villareal, 1981).

En estas regiones el agua es el recurso limitante para la producción agrícola, de tal forma que para incrementar la productividad y la producción total de los cultivos en estas regiones, es necesario desarrollar metodologías que permitan mejorar la eficiencia en el uso del agua.

Para incrementar esta eficiencia, es necesario medir o estimar el consumo de agua en base diaria (evapotranspiración), de los diferentes cultivos en estas regiones, determinando el momento y la cantidad de agua requerida, para lo cual se han desarrollado un gran número de ecuaciones. Sin embargo, para realizar estimaciones de la evapotranspiración en base diaria, estas ecuaciones requieren del flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ) que es típicamente el término más pequeño de la Evapotranspiración a equilibrio ( $E_{\text{equ}}$ ), se estima a menudo como una función constante de la radiación neta (Brutsaert, 1982), como un término residual de la ecuación del balance de energía, o se asume que es un término despreciable en periodos de 24 hrs. (Kustas et al., 1993).

La radiación neta y el flujo de calor en la superficie del suelo no se generan en las estaciones climatológicas ordinarias, ya que dependen de las características de la superficie vegetal. Por el contrario, la radiación solar total incidente ( $R_{\text{sw}}$ ), es información que comúnmente se genera en las estaciones climatológicas ordinarias. El enfoque de la evapotranspiración a equilibrio, una vez calibrado para la región de interés, permite estimar la evapotranspiración real de los cultivos en forma diaria y requiere de muy poca información comparada con otras ecuaciones. La información requerida por este método es: radiación neta, flujo de calor en la superficie del suelo, temperatura y humedad relativa del aire. Para aplicar el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio a partir de la información disponible en las estaciones climatológicas, es

necesario desarrollar relaciones empíricas que permitan estimar el flujo de calor en la superficie del suelo en función de la radiación solar total incidente ( $G =$  función  $R_{sw}$ ), para cada cultivo de una determinada localidad.

La Evapotranspiración real de cultivos (LE) se puede medir utilizando algún método micrometeorológico como la relación Bowen o la Covarianza Eddy (Pal Arya, 1988; Stull, 1991; Verma et al., 1986; Baldocchi et al., 1988). Estos proporcionan valores muy precisos de (LE) en base diaria. Sin embargo, el equipo requerido para estos métodos es muy costoso lo que los hace inaccesibles para la mayoría de los productores.

## **OBJETIVO**

El objetivo de esta investigación fue desarrollar relaciones empíricas para generar valores de flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ) en función de la radiación solar total incidente ( $R_{sw}$ ), para el cultivo de maíz a través de sus diferentes etapas de desarrollo, en las condiciones áridas del norte de México.

## **HIPÓTESIS**

Existe una relación directa entre el flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ) y la radiación solar total incidente ( $R_{sw}$ ).



## REVISIÓN DE LITERATURA

### Ciclo vegetativo y etapas de desarrollo del maíz

El maíz es una planta anual y determinada, con las etapas de germinación, iniciación floral, la floración y la madurez fisiológica; delineando respectivamente las fases vegetativa, reproductiva y llenado de grano. La duración de cada una de estas fases depende del genotipo, fotoperíodo y la temperatura. (agronegocios.gob.).

El estudio de los eventos periódicos naturales involucrados en la vida de las plantas se denomina fenología (Volpe, 1992; Villalpando y Ruiz, 1993; Schwartz, 1999).

Según Michael (1993), Elizondo y Contreras (1996), la tasa de evapotranspiración (LE) depende de la etapa o desarrollo fenológico de un cultivo. La etapa del desarrollo de un cultivo tiene una gran influencia en LE de un determinado cultivo. LE se incrementa rápidamente de un valor pequeño al máximo desde el periodo de la emergencia hasta el periodo de su desarrollo vegetativo completo, su maduración y su fructificación. LE empieza a disminuir después de la maduración y fructificación. La fase de desarrollo de un cultivo determina el dosel del cultivo, el desarrollo de sus raíces y el índice de área foliar (IAF). LE se incrementa con el aumento en la área foliar hasta que

alcanza la cobertura completa (Ahmad y El-Sayed, 1996). Los efectos combinados del dosel y fenología a menudo han sido representados por los coeficientes de los cultivos. La resistencia de la planta al flujo del agua, el ajuste fisiológico de la planta al estrés hídrico, la profundidad radical, la densidad de raíces, las propiedades del suelo, transpiración y la demanda por la atmósfera determinan la absorción actual de las plantas (Santini y Romano, 1996).

### **Espectro de la radiación solar**

El sol se comporta como un «cuerpo negro», es decir, emite radiación con la intensidad máxima posible y absorbe toda la que recibe. La temperatura en su superficie es de unos 6.000 °K, con un 99% de su energía radiante dentro del intervalo de longitudes de onda entre 150 y 4000 nm, que incluye la luz visible (400 a 700 nm) y una porción de la luz ultravioleta e infrarroja. Considerando la totalidad de la radiación solar, un 9% corresponde al ultravioleta y un 46% al infrarrojo. El 45% restante se encuentra en el espectro visible con una intensidad máxima en las proximidades de los 474 nm (porción azul-amarillo del espectro). La Figura 1.1 muestra el espectro electromagnético indicándose las características de la radiación según su longitud de onda.

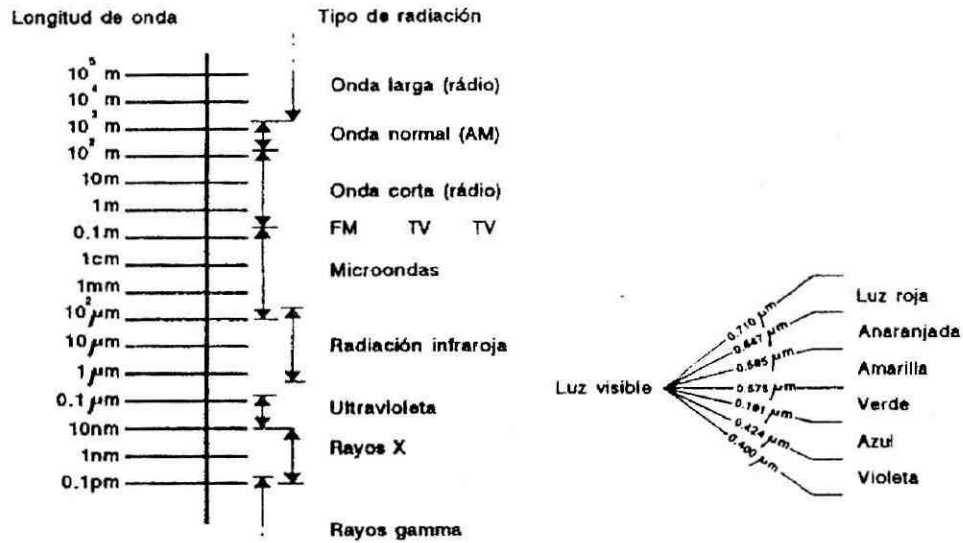


Figura 1.1 Espectro de la radiación electromagnética solar.

La radiación electromagnética consiste en un flujo de partículas o «quantum» de energía. Cada «quantum» tiene una energía  $E = h \cdot \nu$  ( $h$  es la constante de Planck =  $6.626 \times 10^{-34}$  J.s, y  $\nu$  es la frecuencia en Hz ( $\text{s}^{-1}$ ) de la relación anterior, se observa que a mayor frecuencia, mayor contenido energético del quantum. Este aspecto tiene una especial importancia cuando se trata de fenómenos que implican la interceptación de la radiación, como por ejemplo la fotosíntesis.

En términos generales, la radiación solar al atravesar la atmósfera se reduce en un 25 % en días despejados, en un 50 % en días de nubosidad media y en un 90 % en días densamente nublados.

## **Factores que determinan el flujo de calor en la superficie del suelo y su medición.**

La proporción de flujo de calor en un suelo esta determinado por el gradiente de temperatura y la conductividad térmica (K). El último se define como la cantidad de flujo de calor en unidad tiempo a través de una unidad de sección transversal de suelo en respuesta a un gradiente de temperatura específico. K tiene unidades de  $W m^{-1} K^{-1}$ .

El flujo de calor en la superficie del suelo G, o flujo de calor dentro o fuera del suelo se da por:

$$G = K \frac{dT}{dZ} \quad (1)$$

Donde  $dT/dZ$ , es el gradiente de temperatura dentro del suelo. Por similitud con la ecuación del balance de energía, el flujo de calor hacia el interior el suelo se considera negativo, mientras que el flujo desde el interior y hacia la superficie se considera positivo.

La conductividad térmica depende de la porosidad, contenido de humedad, y el contenido de la materia orgánica del suelo. La difusividad térmica de un suelo es una función parabólica de contenido de humedad. Una cantidad pequeña de agua reduce el efecto aislante del espacio del poro llenado de aire. Pero aumentos grandes en volumen de agua incrementa notablemente la

capacidad calorífica. Esto es porque la capacidad calorífica del agua es mucho mayor que la del aire.

Para los propósitos de la mayoría de los estudios del microclima en el campo, el flujo de calor en el suelo ( $G$ ) puede medirse directamente con instrumentos diseñados específicamente para ese propósito. Para evaluaciones más refinadas de  $G$  en investigación de física de suelos, se necesitan laboratorios más complejos y procedimientos computacionales. Hanks y Jacobs (1971).

Kimball y Jackson (1975) Reportaron el método de "alineación-nulo" que puede usarse en el campo para calcular  $G$  de las medidas de temperatura y humedad del suelo en los 0.2 m superiores del suelo. Kimball et al. (1976) probaron el método de alineación nulo y otros contra una "gradiente de temperatura" método que involucra cálculo de valores de conductividad térmica para profundidades de referencia particulares. Se determinó que el último es adecuado si la profundidad de la referencia es 0.20 m debajo de la superficie pero se necesitan calibraciones específicas para cada suelo si la profundidad de la referencia es más cercana a la superficie. El método de gradiente de temperatura es computacional, mucho más simple que el método del alineación-nulo y, también evita problemas de barreras de humedad y térmicos.

El flujo de calor en el suelo ( $G$ ) esta en función de la hora del día, tipo de suelo, humedad, propiedades térmicas, cantidad de vegetación y altura (Kustas et al., 1993). Fuchs y Hadas (1972) y Idso et al. (1975) y otros han confirmado que para suelo desnudo y escasamente cubierto,  $G$  es máximo a medio día, y después disminuye para llegar a cero por la tarde.

En esta investigación  $G$  se midió usando dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific Inc., Logan UT) los cuales se colocaron a una profundidad de 8 cm por debajo de la superficie del suelo.

### **Evapotranspiración a Equilibrio**

La evaporación a equilibrio se puede definir como la tasa de evapotranspiración que ocurriría cuando la conductancia de la capa frontera es muy pequeña (McNaughton y Jarvis, 1983), de tal manera que la transferencia de masa y calor entre la superficie y la atmósfera es demasiado pequeña, cuando esto ocurre se dice que la superficie esta desacoplada de su ambiente.

La evapotranspiración a equilibrio ( $LE_{equ}$ ) se deriva de la ecuación de Penman Monteith, asumiendo que la resistencia aerodinámica del aire al flujo de calor y vapor de agua tiende a infinito (Zermeño y Hipps, 1997) y se representa con la siguiente relación.

$$LE_{\text{equ}} = \frac{S}{S + \gamma} (R_n - G) \quad (2)$$

Donde: S es la pendiente de la curva de presión de vapor a saturación contra temperatura (Pa/K)  $\gamma$  ( $\gamma = PC_p/0.622L$ ), es la constante psicrométrica (Pa/K) P es la presión barométrica local (Pa),  $C_p$  es el calor específico del aire ( $J/kg^{-1}K^{-1}$ ),  $R_n$  es la radiación neta ( $Wm^{-2}$ ) y G es el flujo del calor en el suelo ( $Wm^{-2}$ ).

En regiones con superficies aproximadamente homogéneas,  $LE_{\text{equ}}$  representa el límite inferior de la evapotranspiración potencial de una superficie sin restricciones hídricas y es función de la energía disponible ( $R_n - G$ ), de tal forma que la tasa de evapotranspiración actual se puede estimar con la tasa de evapotranspiración a equilibrio. Sin embargo, las superficies agrícolas de las zonas áridas y semiáridas no son homogéneas y se caracterizan por áreas de cultivo irrigadas, circundadas por superficies secas y calientes. Bajo estas condiciones generalmente se presenta un transporte horizontal de masas de aire con un déficit de presión de vapor mayor al que existe sobre las zonas de cultivo (advección), esto induce una mayor tasa de evaporación en las superficies cultivadas, de tal forma que para estimar la evapotranspiración actual en función de la evapotranspiración a equilibrio, es necesario considerar el efecto de advección. Esto se realiza multiplicando la tasa de evapotranspiración a equilibrio por un factor ( $\alpha$ ) el cual se define como el factor

de advección (McNaughton y Jarvis, 1983) de acuerdo con la siguiente relación.

$$LE = \alpha * LE_{equ} \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  es un valor empírico llamado constante de Priestley-Taylor, o factor de advección, cuyo valor medio es de 1.26 para superficies sin restricciones hídricas, trabajadas con cultivos cubiertos, superficies desnudas saturadas o en océanos Leite et al. (1990).

### **Factor de advección**

La advección es el transporte de calor sensible en el plano horizontal en la dirección del viento debido a los gradientes horizontales de temperatura y humedad que existen en zonas o áreas no homogéneas (Itier et al., 1996; Zermeno y Hippias, 1997). La advección del calor sensible que ocurre cuando el viento sopla cruzando una superficie que no tiene continuidad en temperatura, humedad o rugosidad, como de las áreas secas al terreno húmedo se le llama advección local. En zonas áridas, donde cultivos regados puedan ser rodeados por áreas relativamente no vegetadas, es posible que el aire esté significativamente más caliente y seco que en los cultivos, de esta manera se suministra una fuente extra de energía de tal manera que la pérdida del calor latente (lo que es en efecto evapotranspiración) exceda significativamente cualquier ganancia de la energía disponible ( $R_n - G$ ). Según Rosenberg (1969), Brakke et al. (1978), Williams y Stout (1981), Jury y Tumer (1975) y Shouse et



al. (1980) se aumenta la LE inducida por la advección horizontal del calor sensible de las áreas secas circundantes a las áreas húmedas. Mohseni-Saravi et al. (1996) reportaron que la LE de cultivos regados en Maricopa Agricultural Center (MAC), Arizona, incrementó sustancialmente (hasta 50 por ciento diario) por la advección del calor sensible de las regiones desérticas circundantes. Schuepp y Ya Guo (1994) atribuyeron a la advección local el aumento de LE por transporte local horizontal del aire más caliente y seco de las fajas de rastrojo a un suelo desnudo.

Investigaciones recientes muestran que los componentes del balance de energía varían siguiendo exactamente el mismo patrón de la radiación solar y flujo de calor en el suelo, alcanzando valores picos al medio día solar. Esto sugiere que las tasas instantáneas de los componentes del balance de energía son funciones primariamente de la radiación solar. La tasa de evapotranspiración actual y a equilibrio varía en forma muy similar a la radiación neta (fuente de energía). Esto indica que las dos tasas de evapotranspiración dependen en forma similar de la radiación neta. Jiyane y Zermeño (2002) encontraron que la evapotranspiración a equilibrio está por debajo de la evapotranspiración actual y varía en forma similar y paralela.

La diferencia entre la evapotranspiración actual (LE) y la evapotranspiración a equilibrio ( $LE_{equ}$ ) es mayor para los días despejados, lo cual sugiere que el factor de advección deberá ser mayor para días despejados

que para días nublados (Jiyane y Zermeño, 2002). Sin embargo, el factor de advección también depende de otros factores como la velocidad del viento, disponibilidad de humedad en el suelo y del cultivo (Rosenberg et al., 1983; Rosenberg, 1969; Williams y Stout, 1981)

La posibilidad de que el enfoque de la evapotranspiración a equilibrio pueda ser aplicable para estimación de la evapotranspiración real de los cultivos fue propuesta por Denmead y McIlroy (1970), y concluyeron que para muchos sitios  $LE_{\text{equ}} < LE$  debido a la advección. Davies (1972) y Leite et al. (1990) también concluyen que existe una buena relación entre evapotranspiración actual y evapotranspiración a equilibrio

Los resultados de estas investigaciones claramente indican que el modelo de la evapotranspiración a equilibrio está estrechamente relacionado con la evapotranspiración actual de los cultivos, y que es posible estimar la tasa de evapotranspiración actual obteniendo la tasa de evapotranspiración a equilibrio y conociendo el valor del coeficiente de advección para la localidad y tipo de superficie vegetal. Jiyane y Zermeño (2002), encontraron un coeficiente de advección de 1.247 para el cultivo de Maíz en las condiciones áridas del Norte de México. Priestley-Taylor (1972) obtuvieron valores de entre 1.08 y 1.34, para diferentes cultivos y condiciones climáticas. Similarmente, Rosenberg et al., (1983), Jury y Tumer (1975). Leite et al. (1990) reportaron coeficientes de advección de 1.3.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Ubicación geográfica del área de estudio

Este trabajo se realizó durante el ciclo de Verano del 2001 en el Campo Experimental del Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relación Agua-Suelo-Planta-Atmósfera (CENID-RASPA), ubicado en el Km 6+500 Margen Derecha del Canal Sacramento del Distrito de Riego No. 17 en la Región Lagunera, Coahuila, y Durango, México.

La posición geográfica del centro es 25°30' de latitud norte y 103°32' de longitud oeste. La altitud media sobre el nivel del mar es de 1130 m.

### Características climáticas de la región

El clima según la clasificación de C.W. Thornthwaite es: árido, con vegetación desértica, una precipitación media anual en la región de los 200 a 300 milímetros. La temperatura media anual es de 20 a 22 grados centígrados, existe una frecuencia de heladas dentro del rango de 0 a 20 días por año y una frecuencia de granizadas de 0 a 1 día por año.

En el periodo de la investigación, las áreas circundantes al sitio no estuvieron cultivadas excepto una superficie de aproximadamente 100 m al norte del sitio, que se encontraba cultivada con maíz.

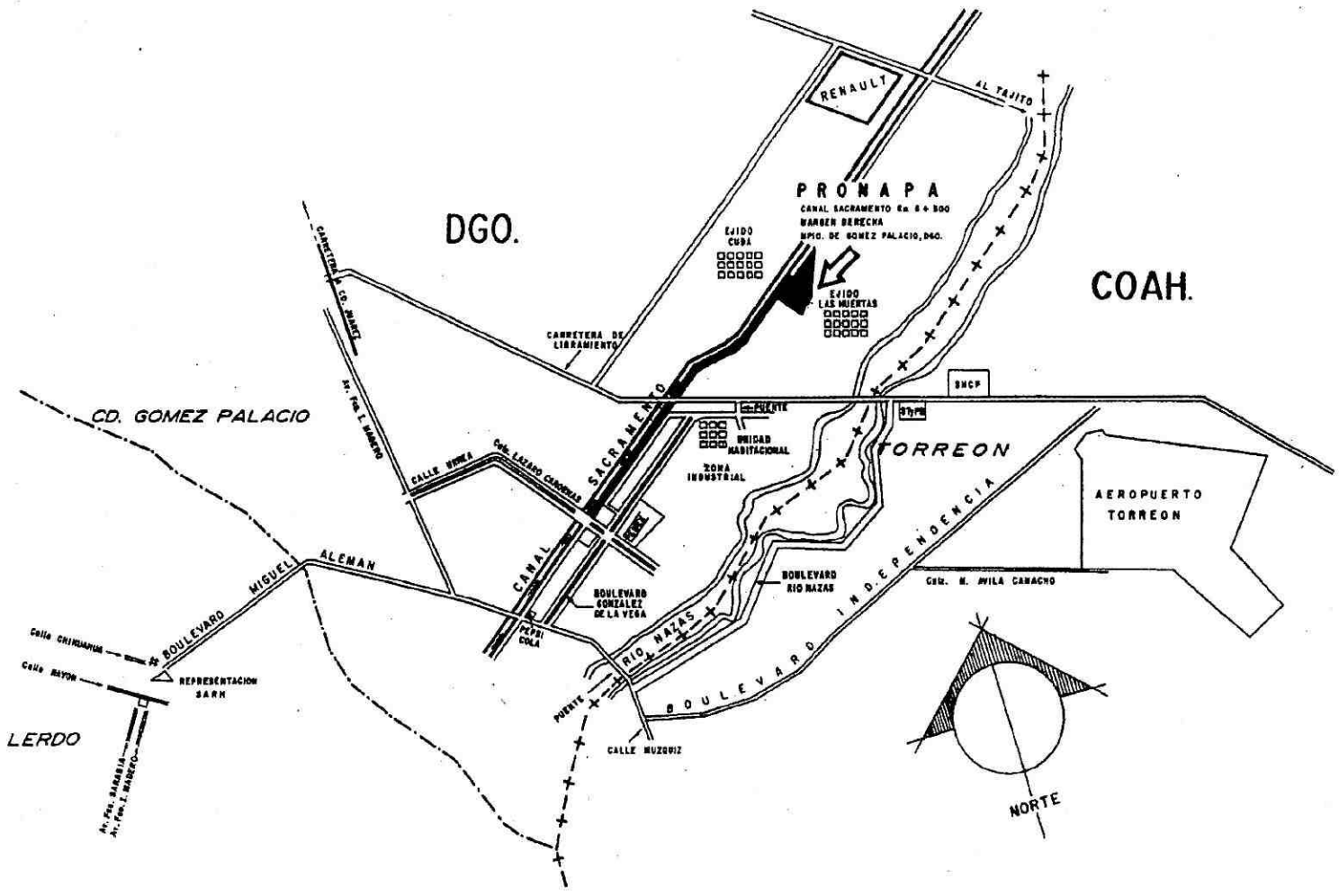


Figura. 2.1 Localización geográfica del CENID-RASPA.

## Dimensiones y orientación del lote experimental

Las dimensiones y características del sitio experimental se muestran en la figura 2.2. La superficie total cultivada fue de 1 ha aproximadamente, los surcos se trazaron en una orientación aproximada en la dirección Norte Sur en una superficie relativamente plana.

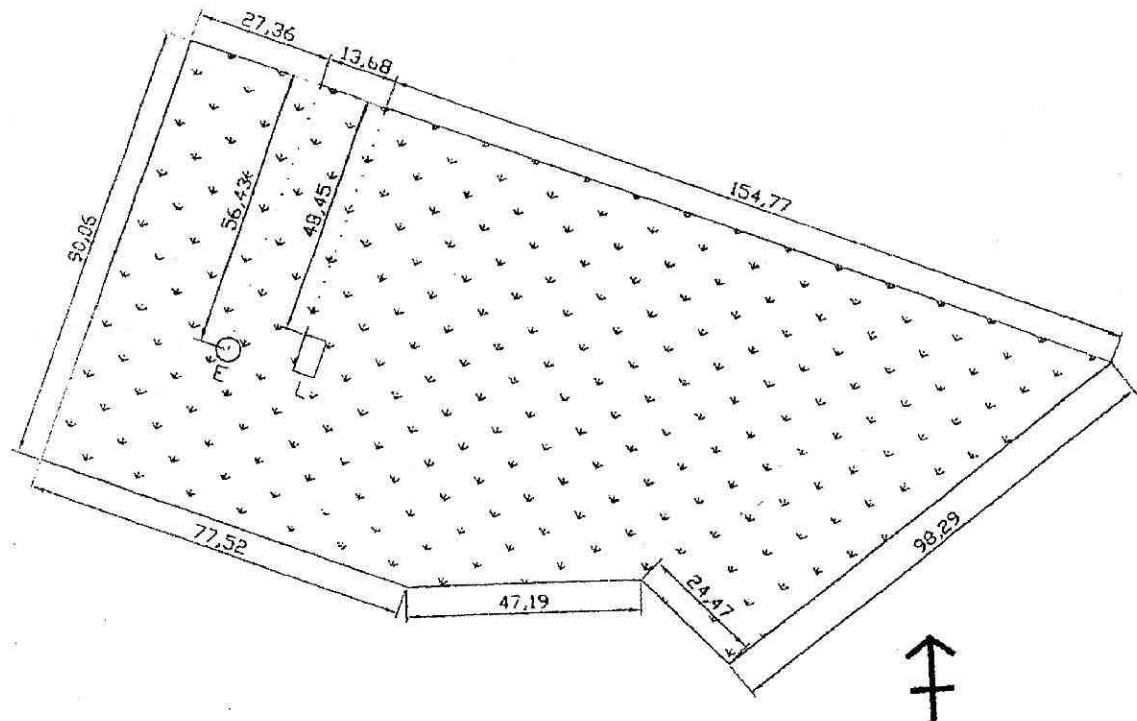


Figura 2.2 Representación esquemática del lote experimental y ubicación del equipo de medición (E) y (L).

## Propiedades físicas y químicas del suelo del lote experimental

La textura del suelo del sitio experimental es de franco a franco-arenoso con alta capacidad de retención de humedad. La densidad bruta del suelo se determinó con la barrena de corazones a profundidades de 0-30 y 30-60cm, así como también el pH y la conductividad eléctrica, cuadro 2.1.

Cuadro 2. 1 Valores de densidad bruta ( $\rho_b$ ), pH y conductividad eléctrica (CE) de los estratos 0-30 y 30-60 cm de profundidad en el suelo del lote experimental.

Profundidad	$\rho_b(\text{gr/cm}^3)$	Textura	pH		CE mmhos/cm	Salinidad
0-30	1.246	Franco	8.52	alcalino	0.413	No salino
30-60	1.393	Franco Arenoso	8.42	alcalino	0.932	Baja salinidad

## Características del cultivo

El área total sembrada fue de aproximadamente una hectárea, el cultivo utilizado fue maíz (*Zea mays L.*) la variedad Asgrow A7573, la cual se caracteriza por su buena calidad forrajera y producción de grano, con una densidad de siembra de aproximadamente 65,000 plantas por hectárea con un espaciamiento de 20 cm entre plantas y 75 cm entre surcos.

## **Manejo agronómico del cultivo**

El manejo agronómico del cultivo se realizó siguiendo las normas recomendadas por la compañía productora de la semilla para las condiciones de la región. La preparación del suelo se inicio con un riego de aniego o presiembra el 6 de junio de 2001 (DOY 157) a toda la parcela, el cual estuvo a punto el día de la siembra el 14 de Junio del 2001, día del año 165 (DOY 165), Se realizo un cultivo el 2 de julio de 2001 y el bordeo el 3 de julio de 2001. Se cultivo y se bordeo el 11 de julio de 2001, también se fertilizo y se fumigo. Se utilizó un sistema de riego por inundación, posteriormente, se aplicaron cuatro riegos de auxilio a los 20, 41, 53 y 63 días después de siembra. El control de plagas y enfermedades se realizó oportunamente para mantener un desarrollo adecuado del cultivo el día 28 de junio de 2001 se realizo la primera aplicación de insecticida. (Producto clover 480CE ingrediente activo: clorpirifos-etil. Dosis: 1 lt por hectárea en 200 lt de agua Adherente: Ingrediente activo: Alquil aril poliglicol eter Dosis: 250ml). La cosecha se realizó el 26 de Septiembre (104 días después de siembra).

## **Medición de la radiación solar total incidente**

La radiación solar total incidente se midió con un piranometro de silicón (modelo LI200X, LI-COR's Silicon Pyranometer) instalado a una altura de 1.0 m por encima del dosel del cultivo, las mediciones se realizaron a una frecuencia de 2 segundos, y promedios de 20 minutos, en forma continua a través del ciclo

de desarrollo del cultivo (Figura 2.3). El registro de datos se realizó con un datalogger modelo CR7 (Campbell Scientific, Inc)

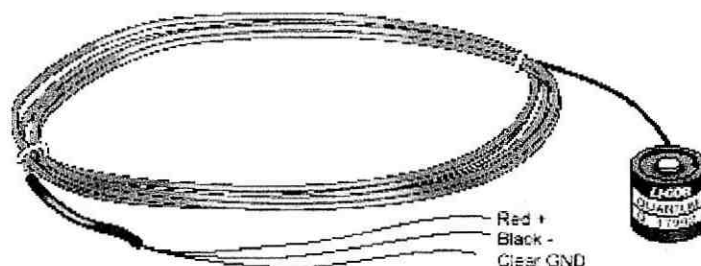


Figura 2.3 Piranometro de silicón (modelo LI200X, LI-COR's Silicon Pyranometer).

### Medición del flujo de calor en el suelo

El flujo de calor en el suelo se midió usando dos transductores de calor (modelo HFT3, Campbell Scientific Inc., Logan UT) los cuales se enterraron a una profundidad de 8 cm por debajo de la superficie del suelo (Figura 2.4). El flujo de calor en la superficie del suelo se obtuvo añadiendo los cambios en almacenamiento de la energía en el estrato superior de 8 cm, debido ha cambios en la temperatura del estrato superior del suelo, de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$G = G_8 + \frac{\rho b \Delta Z}{\Delta t} * \Delta T_s * C_s \quad (4)$$

$$C_s = C_d s + C_w * \theta w \quad (5)$$



Donde:  $G$  es el flujo de calor en la superficie del suelo ( $Wm^{-2}$ ),  $G_8$  es el flujo de calor medido a 8 cm bajo la superficie,  $\rho_b$  es la densidad bruta del suelo ( $Kg/m^3$ ),  $\Delta Z$  es la profundidad del estrato de suelo (8 cm),  $\Delta t$  es el intervalo de tiempo entre mediciones de temperatura (20 minutos),  $\Delta T_s$  es la diferencia de temperatura del estrato de suelo entre mediciones consecutivas (K),  $C_s$  es la capacidad calorífica del suelo ( $Jkg^{-1}K^{-1}$ ),  $C_{ds}$  es la capacidad calorífica de los minerales del suelo ( $840 JKg^{-1}K^{-1}$ ),  $C_w$  es la capacidad calorífica del agua ( $4200 JKg^{-1}K^{-1}$ ) y  $\theta_w$  es el contenido de humedad del suelo en base a peso ( $Kg/Kg$ ).  $G$  fue medido a una frecuencia de dos segundos para obtener promedios de 20 minutos, en forma continua a través del desarrollo del cultivo. El registro de datos se realizó con un datalogger modelo CR7 (Campbell Sci, Inc.)

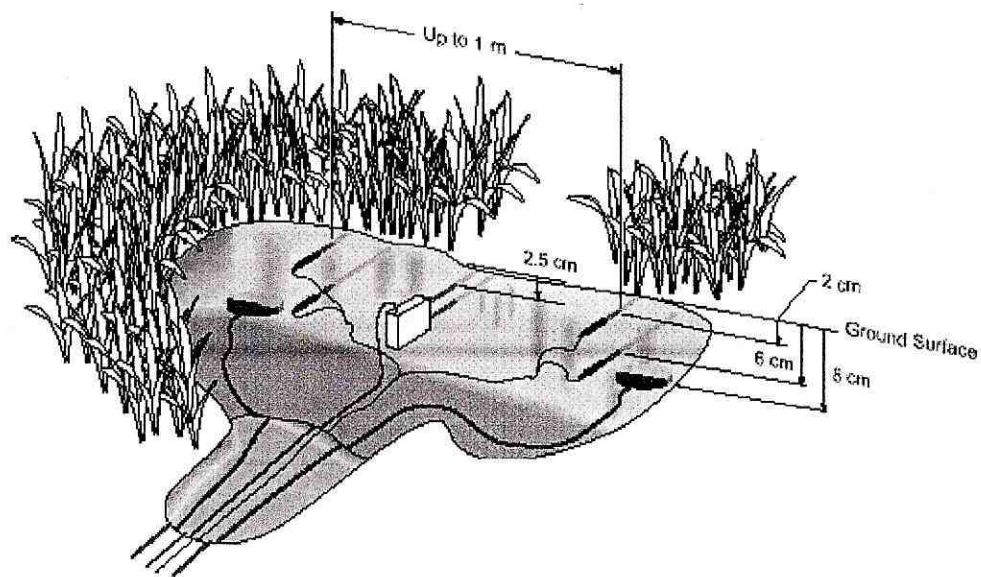


Figura 2.4 Colocación de transductores de calor modelo HFT3 (Campbell Scientific Inc., Logan UT).

## Relaciones entre el flujo de calor en la superficie del suelo y la radiación solar incidente

La relación empírica que se adoptó para estimar el flujo de calor en la superficie del suelo ( $G$ ) en función de la radiación solar total incidente fue un polinomio de segundo grado de acuerdo con la siguiente relación.

$$G = a + b * R_{sw} + c * R_{sw}^2 \quad (6)$$

Donde  $G$  es el flujo de calor en la superficie del suelo durante el día ( $\text{MJm}^{-2}$ ),  $a$ ,  $b$ ,  $c$  son los coeficientes de regresión del polinomio y  $R_{sw}$  es la radiación solar total incidente durante el día ( $\text{MJm}^{-2}$ ). Los valores de flujo de calor total diarios en la superficie del suelo y radiación solar total incidente se obtuvieron integrando los valores promedio de 20 minutos de las 8 a las 20 Hrs., de acuerdo con las siguientes relaciones:

$$G_{(\text{diario})} = \int_{t=8:00}^{t=20:00} G_{(20\text{min})} dt \quad (7)$$

$$R_{sw(\text{diario})} = \int_{t=8:00}^{t=20:00} R_{sw(20\text{min})} dt \quad (8)$$

Estas ecuaciones se aplicaron a través del ciclo de desarrollo del cultivo para obtener los coeficientes de regresión de las relaciones empíricas en las diferentes etapas de desarrollo del cultivo.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis de la relación entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo ( $G$ ) y la radiación solar total incidente ( $R_{sw}$ ) se dividió en tres etapas principales de desarrollo del maíz, etapa vegetativa, etapa de floración y llenado de grano, y etapa de senescencia. El cuadro 3.1 muestra los valores de  $R_{sw}$  y los valores correspondientes de  $G$  en  $MJ/m^2$ , observados durante la etapa vegetativa del cultivo (24 a 50 días después de germinación.). Note que a valores bajos de  $R_{sw}$ ,  $G$  es aproximadamente constante con valor promedio de alrededor de  $-0.75 MJ/m^2$ . A valores altos de  $R_{sw}$  y a medida que se incrementa, se observa que también se incrementa el flujo negativo de calor en la superficie del suelo, lo cual implica un mayor flujo de calor de la superficie hacia el interior del suelo. Note también que al inicio de la etapa vegetativa, el flujo de calor desde la superficie hacia el interior del suelo es alto (valores negativos mayores) y decrece al final de la etapa (valores negativos menores), esto indica que el flujo de calor hacia el interior del suelo decrece a medida que se incrementa la cobertura vegetal debido al desarrollo propio del cultivo.

Durante la etapa vegetativa o de crecimiento, la relación  $G/R_{sw}$  es  $-0.0573$ , lo cual indica que durante esta etapa en promedio el 5.73 % de la radiación solar total incidente se transforma en flujo de calor hacia el interior el suelo.

Cuadro 3.1 Valores de la radiación solar total incidente diaria (Rsw) y el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G), durante la etapa vegetativa del cultivo.

Días después de Germinación	Rsw (MJ/m <sup>2</sup> )	G (MJ/m <sup>2</sup> )
24	29	-3.14
25	29	-2.95
26	29	-2.80
27	29	-2.28
28	28	-2.29
30	27	-1.97
31	29	-1.89
32	29	-1.72
33	29	-1.80
34	29	-1.95
35	28	-1.86
36	28	-1.26
37	28	-1.34
38	24	-0.88
41	24	-0.77
42	22	-0.57
43	28	-0.93
44	28	-0.89
46	27	-0.95
47	27	-1.02
48	26	-1.23
49	28	-0.69
50	24	-0.93
Total	630	-36.0972

La relación entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G) y la radiación solar total incidente (Rsw) durante la etapa vegetativa del cultivo se muestra en la Figura 3.1. Note que la grafica muestra una dispersión muy marcada de los puntos observados y la curva que describe la tendencia de la relación. Esto se debe a que durante la etapa de crecimiento, la proporción de cobertura vegetal cambia muy rápido por el desarrollo propio del cultivo, de tal forma que las características del sistema suelo-cobertura vegetal cambian frecuentemente, modificando la proporción de radiación solar incidente que llega a la superficie del suelo y la temperatura de la superficie, lo cual afecta directamente la relación entre G y Rsw.

La relación empírica que describe la relación entre G y Rsw durante esta etapa es:

$$G = -42.812 + 3.486 * Rsw - 0.072 * Rsw^2 \quad (9)$$

Donde G es el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (MJ/m<sup>2</sup>) y Rsw es la radiación solar incidente diaria (MJ/m<sup>2</sup>), el coeficiente de determinación de la ecuación es  $r^2 = 0.606$ . El valor de este coeficiente indica que es posible realizar estimaciones aceptables de G en función Rsw.

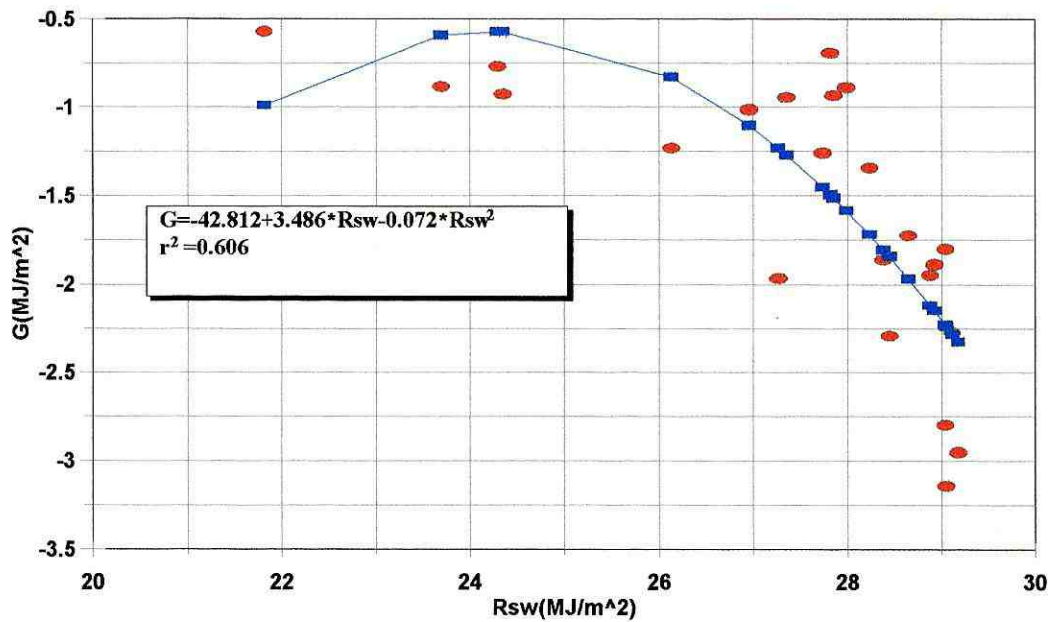


Figura 3.1. Relación entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G) y la radiación solar total incidente diaria (Rsw) durante la etapa vegetativa del cultivo.

El cuadro 3.2 muestra los valores de la radiación solar total incidente diaria y los valores correspondientes de flujo de calor total diario en la superficie del suelo durante la etapa de floración-llenado de grano (51 a 86 días después de germinación.) Durante esta etapa, la relación de G/Rsw promedio es de -0.0352, lo cual indica que el 3.52 % de la Rsw se transforma en G.

Cuadro 3.2 Valores de la radiación solar total incidente diaria (Rsw) y el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G), durante la etapa de floración-llenado de grano del cultivo.

Días después de Germinación	Rsw (MJ/m <sup>2</sup> )	G (MJ/m <sup>2</sup> )
51	27	-0.86
55	26	-0.90
56	27	-0.87
57	27	-1.02
58	27	-1.41
59	25	-0.57
60	22	-0.58
61	22	-0.71
62	27	-0.88
63	24	-0.79
64	23	-0.59
65	25	-0.88
67	25	-0.89
68	26	-0.59
69	20	-0.44
70	20	-0.65
71	18	-0.62
72	20	-0.70
74	26	-0.98
75	26	-1.06
76	26	-1.05
77	23	-1.03
78	26	-0.97
79	26	-0.95
80	25	-1.13
82	22	-0.87
83	11	-0.25
84	12	-0.47
85	22	-0.94
86	24	-1.00
Total	701	-24.65

La Figura 3.2. Muestra la relación entre G y Rsw durante la etapa de floración-llenado de grano. Note que a medida que aumenta la radiación solar incidente (Rsw), los valores negativos de G aumentan, lo cual indica que a mayor incidencia de radiación solar, mayor flujo de calor hacia el interior del suelo.

La relación empírica entre G y Rsw es:

$$G = -0.149 - 0.00639 * Rsw - 0.00093 * Rsw^2 \quad (10)$$

El coeficiente de determinación de la ecuación es  $r^2 = 0.527$ , lo cual sugiere que en la etapa de floración y llenado de grano, es posible realizar estimaciones razonables de G en función de Rsw.

Note que los valores negativos de flujo de calor son pequeños, comparados con los observados en la Figura 3.1, esto indica que una menor proporción de energía solar se convierte en flujo de calor hacia el interior del suelo, debido a que en la etapa de floración-llenado de grano se presenta la máxima cobertura vegetal y una menor proporción de radiación solar llega a la superficie del suelo.

También se observa que para días nublados, la proporción de Rsw que se transforma en G es menor que para días despejados. Por ejemplo, para el



día 83 después de germinación (día nublado),  $R_{sw}$  es  $11 \text{ MJ/m}^2$  y  $G$  es  $-0.25 \text{ MJ/m}^2$ , lo cual resulta en una relación  $G/R_{sw}$  de  $-0.0227$ , indicando que el 2.272% de la  $R_{sw}$  se transforma en  $G$ ; mientras que para el día 62 después de germinación (día despejado)  $R_{sw}$  es  $27 \text{ MJ/m}^2$  y  $G$  es  $-0.88 \text{ MJ/m}^2$ , con una relación  $G/R_{sw}$  de  $-0.0325$  indicando que el 3.259 % de la radiación solar se transforma en flujo de calor hacia el suelo.

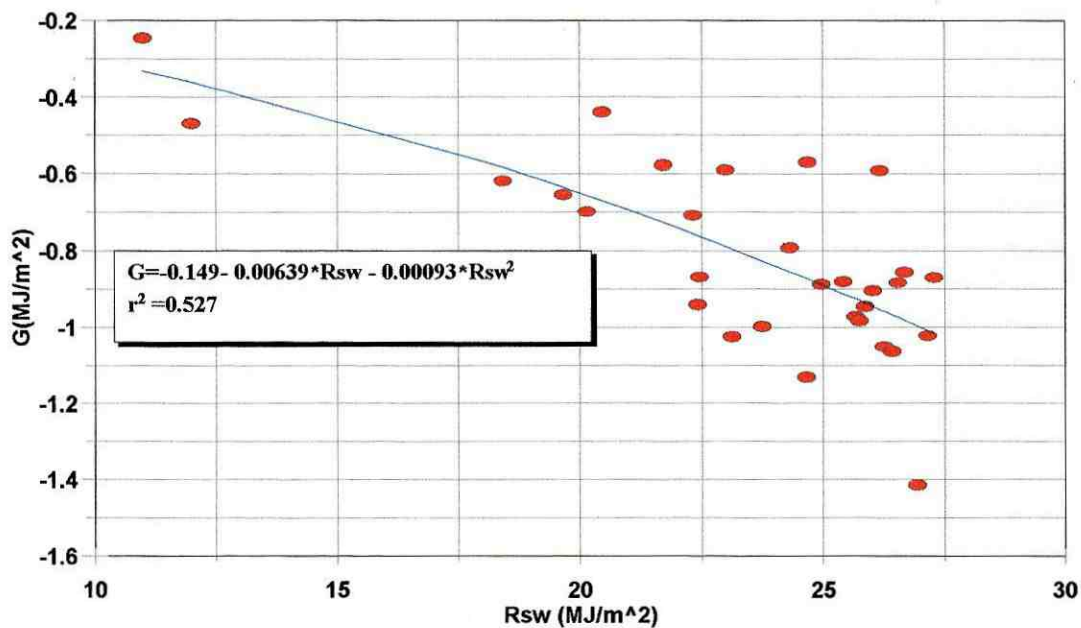


Figura 3.2. Relación entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo y la radiación solar total incidente durante la etapa de floración-llenado de grano.

El cuadro 3.3 muestra los valores de Rsw y G observados durante la etapa de senescencia del cultivo (88 a 98 días después de germinación.) Durante esta etapa, la relación de G/Rsw es de 0.0456 indicando que en promedio el 4.56% de la radiación solar total incidente se transforma en flujo de calor hacia el interior del suelo.

Cuadro 3.3 Valores de la radiación solar total incidente diaria (Rsw) y el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G), durante la etapa de senescencia del cultivo.

Días después de Germinación	Rsw (MJ/m <sup>2</sup> )	G (MJ/m <sup>2</sup> )
88	24	-1.06
89	24	-1.18
90	24	-1.23
91	24	-1.29
92	24	-1.13
93	24	-1.13
94	23	-1.04
96	22	-0.96
97	14	-0.32
98	23	-1.02
Total	227	-10.37

La Figura 3.3 muestra la relación entre G y Rsw observada durante la etapa de senescencia. Note como se muestra una clara relación lineal directa entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo y la radiación solar total incidente. Se observa que a medida que la radiación solar total aumenta, el flujo de calor hacia el interior del suelo se incrementa (mayores valores negativos). Note que en la etapa de senescencia los valores negativos de flujo de calor son mayores que los observados en la etapa de floración-llenado de

grano (Figura 3.2) esto se debe a que durante la senescencia, las plantas se empiezan a marchitar, seguido por caída de hojas y como consecuencia una mayor proporción de radiación solar llega a la superficie del suelo.

La ecuación que describe la relación entre G y Rsw es:

$$G = 0.522 - 0.0421 * Rsw - 0.00114 * Rsw^2 \quad (11)$$

G y Rsw en MJ/m<sup>2</sup>, el coeficiente de determinación es alto,  $r^2 = 0.949$ , lo cual indica que durante la etapa de senescencia del cultivo es posible realizar muy buenas estimaciones de G en función de Rsw.

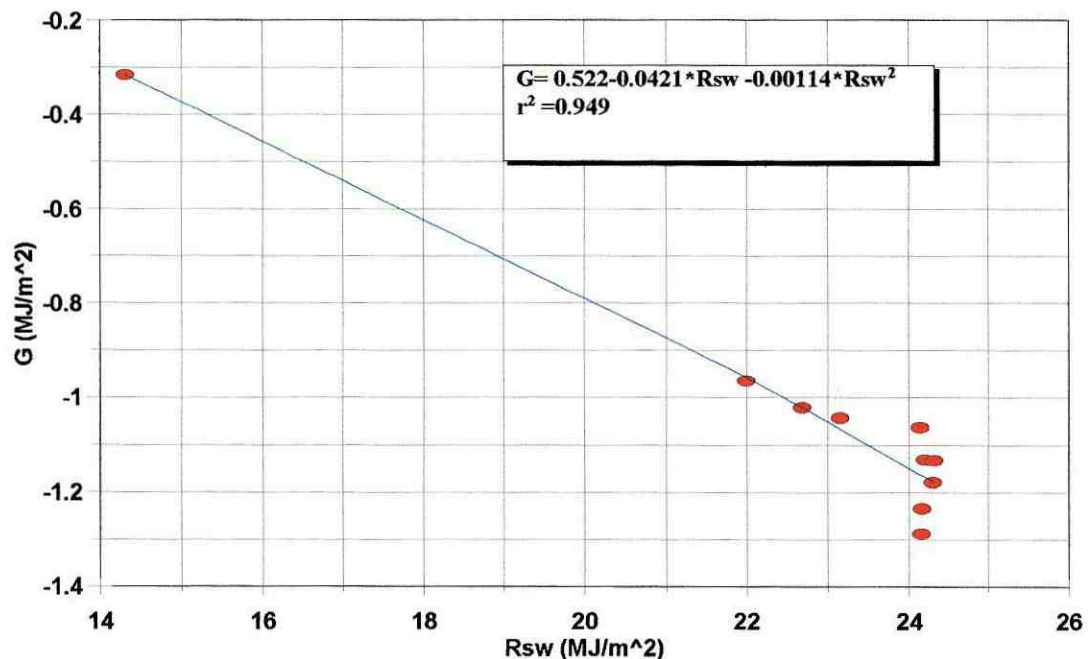


Figura 3.3. Relación entre el flujo de calor total diario en la superficie del suelo (G) y la radiación solar total incidente (Rsw) durante la etapa de senescencia.

## CONCLUSIONES

Las características del sistema suelo-vegetación cambian a través de las etapas de desarrollo del cultivo, modificando el índice de reflectividad de la radiación solar y la temperatura de la superficie del suelo, lo cual a su vez cambia la relación entre  $G$  y  $R_{sw}$ , por lo que es necesario desarrollar relaciones para cada etapa de desarrollo.

Las ventajas de las relaciones empíricas son que una vez desarrolladas y calibradas para cada cultivo en una determinada localidad, permiten generar la información de flujo de calor en la superficie del suelo, conociendo únicamente la radiación solar total incidente, el cual es un dato disponible en muchas estaciones climatológicas.

Los valores del coeficiente de determinación de las ecuaciones obtenidas en la etapa vegetativa, etapa de floración-llenado de grano y la etapa de senescencia indican que es posible realizar buenas estimaciones de  $G$  en función de  $R_{sw}$ . A pesar de que durante la etapa vegetativa y la etapa de floración - llenado de grano los coeficientes de determinación de la ecuación de ajuste no son tan altos como el de la etapa de senescencia.

## RECOMENDACIONES

Se sugiere desarrollar este tipo de relaciones empíricas para los cultivos más importantes en cada región agrícola, para generar la información de flujo de calor en la superficie del suelo en función de la radiación solar incidente, para su aplicación en la estimación de la evapotranspiración real de los cultivos con base al enfoque de la evapotranspiración a equilibrio. Su aplicación en la programación de la irrigación de los cultivos de una determinada región, mejorara la eficiencia del uso del agua.

## LITERATURA CITADA

- Ahmadi Z. Mirkhalegh. 1996. Reference Evapotranspiration Estimation of Mazandaran Province. *En: Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proc. of the International Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA.* (p 376 - 380)
- Ahmadi A. Al-Shooshan y E-S., El-Sayed Ismail. 1996. Alfalfa Microclimate and Evapotranspiration Under Arid Climate Conditions. *En: Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proc. of the International Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA.* (p 48 - 53)
- Brakke, T.W., S.B. Verma, y N.J. Rosenbetg. 1978. Local and Regional Components of Sensible Heat Advection. *J. Appl. Meteorology.* 17: 955-963.
- Casillas Ignacio García y Briones Gregorio Sánchez. 1997. Sistemas de Riego Por Aspersión y Goteo. Trillas. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. México. p(26-61)
- Contreras F. Robles, Garatura J. Payan, y Watts C. J. Thorp. 2001a. Comparación de Modelos de Evapotranspiración en Chile Bell en el Valle del Yaqui, Sonora. XI Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 1. Ingeniería de Riego, Septiembre 19-21, 2001, ANEI-S10115, Guanajuato, México.
- Contreras F. Robles, Garatura J. Payan y L.C. Valdez Torrez. 200 Ib. Coeficientes de Cultivo para Chile Bell en el Valle del Yaqui, Sonora. XI Congreso Nacional de Irrigación, Simposio 1. Ingeniería de Riego, Septiembre 19-21, 2001, ANEI-S 10116, Guanajuato, México.
- Davies, J.A. 1972. Actual, Potential and Equilibrium Evaporation for a Bean field in Southem Ontario. *Agricultural. Meteorology* 10: 331-348.
- Elizondo Rene Martínez y Contreras Mauricio Aguilera. 1996. Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Universidad Autónoma Chapingo. México. p(29, 165 - 250)
- Fritschen, L.J. 1967. Net and solar-radiation relations over irrigated field crops. *Agricultural. Meteorology.* 4: 55-62.
- Jones, H. G. 1992 plants and microclimate. A. Cuantitative approach to environmental plant physiology Second edition. Cambridge University Press.

- Itier, B. e Y. Brunet. 1996. Recent Developments and Present Trends in Evapotranspiration Research: A partial Survey. *En: Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proc. of the International Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA.* (p 1-20).
- Itier, B., Y. Brunet, K.J. McAneney y J.P. Lagouarde. 1996. Evapotranspiration under Advective Conditions: Downwind evolution over Irrigated Fields. *En:Evapotranspiration and Irrigation. Scheduling, Proc. of the International Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA.* (p 167-172).
- Jury, W.A., y C.B. Tanner. 1975. Advective Modification of the Priestly and Taylor Evapotranspiration Formula. *Agron. J.* 67: 840-842.
- Leite Maysa Lima, Gilberto C. Sedyama, Dirceu Teixeira Coelho y Helio Al ves Vieira. 1990. Determinação da Evapotranspiração de Equilíbrio numa superfície Cultivada com Feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), em duas densidades de Plantio. *Revista Ceres* 37(210): 99-110.
- Linacre, E.T. 1967. Climate and the Evaporation from Crops. *J. Irrig. Drainage Div. ASCE* 93: 61-69.
- Linacre, E.T. 1968. Estimating net radiation flux. *Agric. Meteorology.* 5: 49-63.
- McNaughton, K.G. y P.G Jarvis. 1983. Predicting Effects of Vegetation Changes on Transpiration and Evaporation. *En: T.T Kozíowsky (Editor), Water Déficit and Plant Growth. Vol. VII, Academic Press, New York.* p(2-47).
- Mohseni-Saravi M., Lloyd W. Gay y Paúl W. Brown. 1996. Application of Penman's Model in an Arid Environment. *En: Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proc. of the Intemational Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA.* (p864-869).
- Pal Arya, S. 1988. Introduction to Micrometeorology. Academic Press Inc.. U.S.A. p 307.
- Rosenberg, N.J., B.L. Blad, S.B. Venna. 1983. Microclimate: The Biological Environment, 1<sup>nd</sup> Edition. John Wisley & Sons. U.S.A. p(209 - 287).
- Rosenberg, N.J. 1969. Advective Contribution of Energy Utilized in Evapotranspiration by Alfalfa in the East Central Great Plains. *Agricultural. Meteorology.* 6: 179-184.

- Rosenberg, N.J. 1969. Seasonal patterns in evapotranspiration by alfalfa in the central Great Plains. *Agron. J.* 61: 879-886.
- Santini, A. y N. Romano. 1996. Use of a Soil-Plant-Atmosphere Model for Irrigation Problems. *En: Evapotranspiration and Irrigation Scheduling, Proc. of the International Conference, 1996, San Antonio, Texas, USA.* (p992-998).
- Schuepp, P.H. y Ya Guo. 1994. An Analysis of Local Heat Advection on Evaporation over Wet and Dry Surface Strips. *J. Climate* 7(5): 641-652.
- Shouse, P., W.A. Jury y L.H. Stolzy. 1980. Use of Deterministic and Empirical Mode is to Predict Potential Evapotranspiration in an Advective Environment. *Agron. J.* 72: 994-998.
- Schwartz, M. D. 1999. Advancing to full bloom: planning phenological research for the 21st century. 42:113-118.
- Villalpando, J. y A. Ruiz, 1993. Observaciones Agrometeorológicas y su uso en la agricultura. Editorial Lumusa, México. p. 133.
- Volpe, C. A. 1992. Citrus Phenology. In: *Proceedings of the Second International Seminar on Citrus Physiology*, p. 103-122.
- Williams, R.J. y D.G. Stout. 1981. Evapotranspiration and Leaf Water Status of Alfalfa Growing Under Advective Conditions. *Canadian J. Plant Sci.* 61: 601-607.
- Zermeño González, A. y L.E. Hipps. 1997. Downwind Evolution of Surface Fluxes over a Vegetated Surface during Local Advection of Heat and Saturation Deficit. *Journal of Hydrology* 192: 189-210.
- Zermeño González, A. 2001. Métodos Micrometeorológicos para Medir Flujos de Calor y Vapor de Agua entre los Cultivos y la Atmósfera. XIII Semana Internacional de Agronomía. 5-7 de Septiembre, Gómez Palacio, Durango, México. (p53-57)



### PAGINAS WEB CONSULTADAS

\* [www.agronegocios.gob.sv/Media/Gra2MaiText.htm](http://www.agronegocios.gob.sv/Media/Gra2MaiText.htm))

\* [www.ceniap.gov.ve/bdigital/monografias/fenologia/fenologia.htm](http://www.ceniap.gov.ve/bdigital/monografias/fenologia/fenologia.htm)

\* <http://maize.agron.iastate.edu/>

\* [www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/cuantica/negro/radiacion/radiacion.htm)