

# REFLECTIVIDAD Y ABSORTIBILIDAD DE LA RADIACIÓN EN TRES DENSIDADES DE PLANTA Y SU RELACIÓN CON EL RENDIMIENTO DE MAÍZ (VARIEDAD CAFIME)

## RADIATION REFLECTIVITY AND ABSORPTIVITY IN THREE PLANT DENSITIES AND ITS RELATION TO CORN YIELD (CAFIME VARIETY)

Alejandro Zermeño-González<sup>1</sup>, José A. Montemayor-Trejo<sup>2</sup>, Juan Munguía-López<sup>3</sup>  
Luis Ibarra-Jiménez<sup>3</sup> y Martín Cadena-Zapata<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Riego y Drenaje y <sup>4</sup>Departamento de Maquinaria Agrícola. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro. UAAAN. 25315. Saltillo, Coahuila, México. (azermeno@uaan.mx). <sup>2</sup>Instituto Tecnológico Agropecuario No. 10. Carretera Torreón-San Pedro. km 7.5. Torreón, Coahuila, México. <sup>3</sup>CIQA. Bulevar Enrique Reyna No. 140. 25100. Fraccionamiento Los Pinos. Saltillo, Coahuila, México.

### RESUMEN

Se desarrolló un experimento para evaluar la reflectividad y absorptividad de la radiación solar total y fotosintética activa en tres densidades de plantas (6.9, 8.9 y 12.5 plantas m<sup>-2</sup>) de maíz (*Zea mays* L.) variedad CAFIME, y sus relaciones con el desarrollo y rendimiento. La reflectividad y absorptividad de follaje en las densidades de plantas se evaluó mediante los índices de reflectividad y absorptividad a la radiación solar total (Rsw) y la radiación fotosintética activa (RFA), utilizando piranómetros de silicón y sensores cuánticos. En las tres densidades de población la Rsw absorbida fue 75% y la RFA 95%. Al aumentar la densidad de población se incrementó ligeramente la absorptividad a la RFA, pero se redujo la absorptividad a la Rsw. Los índices de reflectividad y absorptividad a la RFA en las tres densidades de plantas fueron más uniformes que los observados a la Rsw. La asimilación de bióxido de carbono fue mayor con menor densidad de plantas, lo cual corresponde a una menor resistencia de los estomas al flujo de CO<sub>2</sub>. No obstante, el rendimiento de grano (kg ha<sup>-1</sup>) fue superior con la mayor densidad de plantas; por tanto, la productividad de grano de la variedad CAFIME se puede incrementar aumentando la densidad de plantas, lo que se debe a una mayor absorptividad de la RFA por unidad de superficie.

**Palabras clave:** Fotosíntesis, índice de absorptividad, índice de reflectividad, radiación fotosintética activa, radiación solar.

### INTRODUCCIÓN

Una de las funciones de las hojas de las plantas es interceptar la radiación solar necesaria para la fotosíntesis; por tanto, los cultivos deben desarrollar suficiente área foliar para una máxima absorción de radiación para la formación de carbohidratos necesarios para su desarrollo (Monteith y Unsworth, 1990;

### ABSTRACT

An experiment was carried out to evaluate total solar radiation and photosynthetic active radiation reflectivity and absorptivity in three plant densities (6.9, 8.9, and 12.5 plants m<sup>-2</sup>) of CAFIME variety corn (*Zea mays* L.) and their relations with plant growth and yield. Reflectivity and absorptivity of the crop canopy in the plant densities was evaluated by the index of reflectivity and absorptivity to total solar radiation (Rsw) and photosynthetic active radiation (RFA), using silicon pyranometers and quantum sensors. In the three plant densities, Rsw absorbed was 75% and RFA 95%. As plant density was increased, absorbed RFA slightly increased, but absorptivity to Rsw showed a decrease. Reflectivity and absorptivity indexes to RFA at the three plant densities were more uniform than those observed for Rsw. Carbon dioxide fixation was higher at low plant densities, which corresponds to a lower stomatal resistance to CO<sub>2</sub> flux. However, grain yield (kg ha<sup>-1</sup>) was higher at greater plant density, which indicates that grain productivity of the CAFIME variety can be increased by increasing plant density, which is due to higher RFA absorptivity per unit area.

**Key words:** Photosynthesis, absorptivity index, reflectivity index, photosynthetic active radiation, solar radiation.

### INTRODUCTION

One of the functions of plant leaves is to intercept the solar radiation necessary for photosynthesis; therefore, crops must develop enough foliage area for a maximum absorption of radiation to form carbohydrates needed for their development (Monteith and Unsworth, 1990; Jones, 1992; Otegui *et al.*, 1995). The first effect of low visible radiation availability is a reduction of photosynthesis and consequently, supply of photosynthate for biomass production (Hashemi-Dezfouli and Herbert, 1992; Westgate *et al.*, 1997). With a management including appropriate irrigation, fertilization, pest and disease control, crop yield will be

Recibido: Febrero, 2004. Aprobado: Marzo, 2005.

Publicado como ARTÍCULO en *Agrociencia* 39: 285-292. 2005.

Jones, 1992; Otegui *et al.*, 1995). El primer efecto de una baja disponibilidad de radiación visible es una reducción de la fotosíntesis y el aporte de fotosintatos para la producción de biomasa (Hashemi-Dezfouli y Herbert, 1992; Westgate *et al.*, 1997). Con un manejo que incluya riegos oportunos, fertilización, control de plagas y enfermedades, el rendimiento de los cultivos será función de la acumulación neta de bióxido de carbono durante el ciclo de crecimiento (Gallegoher y Biscoe, 1978; Otegui *et al.*, 1995). Esto, a su vez, es función de la tasa de absorción de la radiación solar y la eficiencia de transformación de dicha energía para la fijación de moléculas de CO<sub>2</sub> (Shibles y Weber, 1965; Jones, 1992). El rendimiento máximo de un cultivo es función directa de su índice de área foliar óptimo (cantidad de follaje requerido para interceptar 95% de la radiación incidente), el cual está determinado por la densidad de población (Shibles y Weber, 1965; Williams *et al.*, 1965). A valores menores o mayores de este índice óptimo de área foliar, el rendimiento del cultivo decrece (Karlen y Camp, 1985; Hashemi-Dezfouli y Herbert, 1992; Andrade *et al.*, 1992): con valores menores, parte de la radiación solar no será interceptada por el follaje; con valores mayores, la proporción de follaje sombreado se incrementa, la relación fotosíntesis: respiración y el rendimiento decrecen (Andrade *et al.*, 1993; Wells, 1991).

La radiación solar total que incide sobre el dosel de los cultivos tiene un intervalo de longitud de onda de 0.380 a 4.00  $\mu\text{m}$ ; para la fotosíntesis las plantas utilizan sólo la radiación de 0.400 a 0.700  $\mu\text{m}$ , definida como la radiación fotosintética activa (RFA), y corresponde aproximadamente a 48% de la radiación solar total incidente (Nobel, 1991; Jones, 1992). El resto de la radiación solar absorbida por las hojas induce efectos térmicos, afectando la temperatura foliar y la tasa de transpiración (Gallo y Daughtry, 1986). La radiación solar influye también en el crecimiento y desarrollo de los cultivos por sus efectos en la fotomorfogénesis y mutamorfogénesis (Gates, 1980; Jones, 1992).

Mediciones en laboratorio muestran que, en la hoja, la eficiencia fotosintética es mayor con niveles bajos de radiación (Nobel, 1983; Norman y Arkebauer, 1991; Jones, 1992). Esto se debe a que las hojas se saturan de radiación cuando están expuestas a la radiación solar directa, lo que ocurre en todas las hojas de plantas C<sub>3</sub>. Aunque las hojas de las plantas C<sub>4</sub> no alcanzan la saturación, la eficiencia de la fotosíntesis también es mayor con niveles bajos de radiación. Las propiedades espectrales del dosel de los cultivos dependen de la densidad y distribución espacial de las hojas y pueden evaluarse mediante los índices de reflectividad, absorptividad y transmisividad, los cuales corresponden a la fracción de la radiación incidente que se refleja, absorbe y transmite (Jones, 1992). La suma de estos índices es igual a la unidad para

function of carbohydrate net accumulation during the growth cycle (Gallegoher and Biscoe, 1978; Otegui *et al.*, 1995). This, in turn, is function of solar radiation absorption rate and transformation efficiency of said energy for CO<sub>2</sub> molecule fixation (Shibles and Weber, 1965; Jones, 1992). Maximum crop yield is direct function of its optimal index of foliage area (amount of leaves required to intercept 95 % of incident radiation), which is determined by plant density (Shibles and Weber, 1965; Williams *et al.*, 1992). At lower or higher values of this optimal index of foliage area, crop yield decreases (Karlen and Camp, 1985; Hashemi-Dezfouli and Herbert, 1992; Andrade *et al.*, 1992): with lower values, part of the solar radiation will not be intercepted by the leaves, at higher values, the proportion of shaded foliage increases, ratio photosynthesis: respiration and yield decrease (Andrade *et al.*, 1993; Wells, 1991).

Total solar radiation incident on the crop canopy has a wave length interval of 0.380 to 4.00  $\mu\text{m}$ ; for photosynthesis, plants only utilize the radiation from 0.400 to 0.700  $\mu\text{m}$ , defined as photosynthetic active radiation (RFA), corresponding to approximately 48% of incident total solar radiation (Nobel, 1991; Jones, 1992). The remaining solar radiation absorbed by the leaves induces thermal effects, affecting leaf temperature and transpiration rate (Gallo and Daughtry, 1986). Solar radiation also influences crop growth and development through its effects on photo-morphogenesis and mutamorphogenesis (Gates, 1980; Jones, 1992).

Measurements taken in laboratory show that in the leaf, photosynthetic efficiency is greater at low radiation levels (Nobel, 1983; Norman and Arkebauer, 1991; Jones, 1992). This is owing to the fact that leaves are saturated by radiation when they are exposed to direct solar radiation, which happens in all C<sub>3</sub> plant leaves. Though the leaves of C<sub>4</sub> plants do not reach saturation, photosynthesis efficiency is also greater at low levels of radiation. The spectral properties of the crop canopy depend on density and spatial distribution of the leaves and may be evaluated by the indexes of reflectivity, absorptivity and transmissivity, which correspond to the fraction of incident radiation, that is reflected, absorbed, and transmitted (Jones, 1992). The sum of these indices is equal to the unit for any wave length band. The efficiency capture of radiation of a canopy might be evaluated by the indexes of reflectivity and radiation absorptivity: an efficient canopy has a high RFA absorptivity index, but with high reflectivity to the radiation band close to infrared (0.74-1.2  $\mu\text{m}$ ) for reducing the effects of foliage warming and the increment of transpiration rate caused by infrared radiation (Maddoni and Otegui, 1996). Regarding the aforesaid, the objective of this research was to study reflectivity and absorptivity of solar and photosynthetically active radiation in three

cualquier banda de longitud de onda. La eficiencia de captación de radiación de un dosel podría evaluarse por medio de los índices de reflectividad y absorptividad a la radiación: un dosel eficiente tiene un alto índice de absorptividad a la RFA, pero con alta reflectividad a la banda de radiación cercano al infrarrojo ( $0.74\text{-}1.2\ \mu\text{m}$ ) para reducir los efectos del calentamiento de las hojas y del incremento de la tasa de transpiración ocasionadas por la radiación infrarroja (Maddonni y Otegui, 1996). Por lo anterior, el objetivo de esta investigación fue estudiar la reflectividad y absorptividad de la radiación solar y fotosintéticamente activa en tres densidades de plantas de maíz variedad CAFIME y su relación con el rendimiento de grano.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló durante el ciclo primavera-verano de 1999 en el Campo Agrícola Experimental del municipio de Arteaga, Coahuila, México, del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), ubicado a  $26^{\circ} 15' \text{N}$  y  $100^{\circ} 46' \text{O}$  con una altura media de 2040 m; la precipitación media anual es 400 mm y la temperatura máxima y mínima promedio anual  $30.7$  y  $10^{\circ} \text{C}$ .

Se evaluaron tres densidades de planta 69 mil, 89 mil y 125 mil plantas  $\text{ha}^{-1}$  (6.9, 8.9 y 12.5 plantas  $\text{m}^{-2}$ ), que se obtuvieron con una planta cada 0.16 m y surcado a 0.90, 0.70 y 0.50 m. El diseño fue de bloques completos al azar con seis repeticiones. La parcela experimental consistió de ocho surcos de 5 m de longitud; los tres surcos centrales correspondieron a la parcela útil para evaluar el rendimiento. Las medias se compararon con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ).

La siembra se realizó manualmente en suelo húmedo el 26 de junio de 1999 utilizando la variedad de maíz CAFIME, la cual resiste al acame, tiene grano blanco y semiduro y un rendimiento potencial de  $6\ \text{t}\ \text{ha}^{-1}$ .

Para proporcionar condiciones de humedad apropiada se aplicaron cinco riegos (aspersión) durante el ciclo del cultivo. La dosis de fertilización fue 150-100-50; a la siembra se aplicaron 50 unidades de N y 100 de P, el resto de la dosis se aplicó 64 d después de siembra (dds). El control de malezas se realizó manualmente, y las plagas y enfermedades mediante agroquímicos de acuerdo con las recomendaciones para el cultivo en la región.

Se midió el índice de área foliar del cultivo (IAF) 90 dds tomando en cinco plantas de cada tratamiento el área de todas las hojas de la planta (largo $\times$ ancho $\times$ 0.75) para obtener el área foliar promedio por planta y extrapolar a número de plantas por ha.

La cosecha se realizó el 12 de noviembre de 1999 (140 dds), en forma manual, seleccionando las 10 plantas con competencia completa de la parcela útil de cada tratamiento y repetición.

### Mediciones de radiación e instrumentación

Se midió la radiación solar total incidente (Rsw) en un intervalo de  $0.380$  a  $1.2\ \mu\text{m}$  de longitud de onda y la radiación fotosintética activa (RFA) de  $0.400$  a  $0.700\ \mu\text{m}$ , incidente sobre el sitio experimental, con

plant densities of CAFIME variety maize and their relation to crop yield.

## MATERIALS AND METHODS

The experiment was carried out during the spring-summer cycle 1999 at the experimental field of the National Institute of Forestry, Agriculture, and Livestock Research (INIFAP) in the municipality of Arteaga, Coahuila, México, located at  $26^{\circ} 15' \text{N}$  and  $100^{\circ} 46' \text{W}$ , with an average height of 2040 m; annual mean precipitation is 400 mm, and annual average maximum and minimum temperature  $30.7$  and  $10^{\circ} \text{C}$ .

Three plant densities, 69 thousand, 89 thousand, and 125 thousand plants  $\text{ha}^{-1}$  (6.9, 8.9, and 12.5 plants  $\text{m}^{-2}$ ) were evaluated, obtained with one plant every 0.16 m and rows at 0.90, 0.70, and 0.50 m. The design was complete randomized blocks with six replications. The experimental plot consisted of eight 5 m-long rows; the three central rows corresponded to the useful plot for crop yield evaluation. The means were compared with the Tukey test ( $p \leq 0.05$ ).

Sowing was done by hand in humid soil, on June 26<sup>th</sup>, 1999, utilizing CAFIME variety maize. This variety is resistant to lodging, has white semi-hard grain and a potential yield of  $6\ \text{t}\ \text{ha}^{-1}$ .

In order to provide appropriate conditions of humidity, five (sprinkler) irrigations were applied during the crop cycle. Fertilizer dose was 150-100-50; at sowing, 50 units of N and 100 of P were applied, the remaining dose was applied 64 days after sowing (dds). Weed control was performed manually, and the control of pests and diseases through agricultural chemicals, according to the recommendations for the crop in the region.

The index of the crop leaf area (IAF) was measured 90 dds, taking the area of all the leaves of the plant (length $\times$ width $\times$ 0.75) in five plants of each treatment in order to obtain the average leaf area per plant and extrapolate a number of plants per hectare.

The harvest was carried out on November 12<sup>th</sup>, 1999 (140 dds) by hand, selecting the 10 plants with complete competence of the useful plot of each treatment and replication.

### Measurements of radiation and implementation

Incident total solar radiation (Rsw) in an interval of  $0.380$  to  $1.2\ \mu\text{m}$  wave length and photosynthetic active radiation (RFA) of  $0.400$  to  $0.700\ \mu\text{m}$ , incident over the experimental site, were measured with a silicon pyranometer and a quantum sensor, respectively, placed on a fix post at 3 m height, directed toward the zenith. Rsw and RFA reflected by the crop canopy in each plant density were measured, utilizing another pair of said sensors, installed on a mobile post at one meter height above the crop canopy and directed towards the foliage, moving above the plants after the crop had reached its maximum foliar development, in two ways. The first one was a quick rotation, in which the post was placed at the center of each experimental unit of a block for 10 min and the instruments taking readings every 2 s in order to generate averages every 5 min (mean of 150 observations). This was done to analyze reflectivity and absorptivity in the three plant densities at the same radiation incidence angle (same hour of the day); for the

un piranómetro de silicón y un sensor cuántico respectivamente, colocados en un poste fijo a 3 m de altura orientados hacia el cenit. Rsw y RFA reflejadas por el dosel del cultivo en cada densidad de plantas, se midieron utilizando otro par de dichos sensores instalados en un poste móvil a 1 m de altura sobre el dosel del cultivo y orientados hacia el follaje, el cual se desplazó sobre las plantas después de que el cultivo alcanzó su máximo desarrollo foliar, de dos formas. La primera fue una rotación rápida en la cual el poste se colocó al centro de cada unidad experimental de un bloque por 10 min, realizando lecturas cada 2 s para generar promedios cada 5 min (media de 150 observaciones). Esto se hizo para analizar la reflectividad y absorptividad en las tres densidades de plantas al mismo ángulo de incidencia de la radiación (misma hora del día); para el análisis sólo se consideraron eventos con cielo despejado durante el tiempo de medición (10 a 16:30 h). En la segunda forma se estacionó el poste móvil en cada densidad de planta de un bloque por 3 a 5 d; las mediciones se realizaron cada 5 s para obtener promedios cada 20 min (media de 240 observaciones), y tuvo el propósito de analizar los cambios en la reflectividad y absorptividad del dosel a través del día (8 a 19 h); para el análisis únicamente se consideraron días con cielo despejado. En las dos formas de medición los registros se realizaron electrónicamente conectando los sensores a un datalogger modelo CR7 de Campbell Sci. Inc.

Los índices de reflectividad a la radiación solar total ( $r_{Rsw}$ ) y a la fotosintética activa ( $r_{RFA}$ ) de cada densidad de planta se obtuvieron dividiendo Rsw y RFA incidente por Rsw y RFA reflejada. El índice de absorptividad para cada banda de radiación ( $a_{Rsw}$ ,  $a_{RFA}$ ) se determinó como el residuo de la unidad y el índice de reflectividad ( $a_{Rsw}=1-r_{Rsw}$ ;  $a_{RFA}=1-r_{RFA}$ ). Para ésto se supuso que la transmisividad del sistema suelo-vegetación es cero, es decir, Rsw y RFA incidente sobre el sistema suelo-vegetación son absorbidas o reflejadas en su totalidad.

También se midió la tasa de asimilación de bióxido de carbono y la resistencia de los estomas al flujo de vapor de agua y CO<sub>2</sub> con un sistema portátil de fotosíntesis modelo LI 6000 (LI-COR, Lincoln; Nebraska). Las mediciones se realizaron en cuatro hojas de cada tratamiento de un bloque a los 114 dds, cuando el cultivo se encontraba en la etapa de grano lechoso

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Reflectividad y absorptividad de la radiación en las densidades de planta

Las mediciones realizadas a la misma hora del día en las tres densidades de plantas (69 mil, 89 mil y 125 mil plantas ha<sup>-1</sup>), mostraron que en promedio la Rsw se refleja en 25% y se absorbe en 75%, mientras que la RFA se refleja en 4.2% y se absorbe en 95.8% (Cuadros 1 y 2), lo cual coincide con las propiedades espectrales promedio de las plantas (Nobel, 1983; Jones, 1992). Resultados similares fueron encontrados por Walter-Shea (1987) en un dosel de maíz.

La reflectividad tanto a Rsw como a RFA en las tres densidades de plantas fue ligeramente mayor a las

analysis only events with clear sky during measuring time (10:00-16:30 h) were considered. In the second way, the mobile post was placed at each plant density of a block for 3 to 5 d; the measurements were made every 5 s to obtain averages every 20 min (average of 240 observations), with the purpose to analyze the changes in reflectivity and absorptivity of the canopy throughout the day (8 -19 h); only days with cloudless sky were considered for the analysis. In the two ways of measuring, the records were performed electronically, connecting the sensors to a CR7 model datalogger of Campbell Sci.Inc.

The indexes of reflectivity to total solar ( $r_{Rsw}$ ) and to photosynthetic active radiation ( $r_{RFA}$ ) of each plant density were obtained dividing incident Rsw and RFA by reflected Rsw and RFA. The absorptivity index for each radiation band ( $a_{Rsw}$ ,  $a_{RFA}$ ) was determined as the unit residue and the reflectivity index ( $a_{Rsw}=1-r_{Rsw}$ ;  $a_{RFA}=1-r_{RFA}$ ). For this, it was assumed that the transmissivity of the soil-vegetation system is zero, in other words, Rsw and RFA incident on the soil-vegetation system are absorbed and reflected in their totality.

Also, carbon dioxide assimilation rate and stomata resistance to water vapor flux and CO<sub>2</sub> were measured, using a portable system of photosynthesis, model LI 6000 (LI-COR, Lincoln; Nebraska). The measurements were performed in four leaves of each treatment of a block at 114 dds, when the crop was at the stage of milky grain.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Radiation reflectivity and absorptivity in the plant densities

The measurements made at the same hour of the day in three plant densities (69 thousand, 89 thousand, and 125 thousand plants ha<sup>-1</sup>) showed that on an average Rsw is reflected by 25% and absorbed by 75%, while RFA is reflected by 4.2% and absorbed by 95.8% (Tables 1 and 2), which agrees with the mean spectral properties of the plants (Nobel 1983; Jones, 1992). Similar results were found in a maize canopy by Walter-Shea (1987).

Reflectivity to Rsw as well as to RFA in the three plant densities was slightly higher at 16:20 h than at 12:05, 13:20, and 14:50 h, which is due to a greater angle of incidence of the sun's rays. Reflectivity of total solar radiation increased with plant density (less distance among rows) owing to the reflectivity of plant leaves in the radiation band close to infrared (0.74 to 1.2  $\mu$ m) being high (Jones, 1992). So, the greater the foliage density, the higher the reflectivity and consequently, the lower the absorptivity; as the distance among rows increases, a greater fraction of Rsw reaches the surface and is absorbed by the soil, which results in less reflectivity of the soil-vegetation system to greater plant density. But reflectivity to photosynthetically active radiation is lower at greater plant density (higher absorptivity), because the leaves show great absorptivity to RFA, and at greater leaf density, higher total absorptivity. In the RFA range, mean reflectivity of leaves is slightly higher at 0.55  $\mu$ m wave

**Cuadro 1. Índices de reflectividad y absorptividad a la radiación solar total y fotosintética activa, observados 81 d después de siembra (dds).**  
**Table 1. Indexes of reflectivity and absorptivity to total solar radiation and photosynthetic active radiation, observed 81 d after sowing (dds).**

Hora	Distancia entre surcos (m)	Radiación solar total (Rsw)		Radiación fotosintética activa (RFA)	
		$r_{Rsw}$	$a_{Rsw}$	$r_{RFA}$	$a_{RFA}$
13:20	0.5	0.264	0.736	0.0374	0.9626
	0.7	0.241	0.759	0.0382	0.9617
	0.9	0.217	0.782	0.0439	0.9561
14:50	0.5	0.262	0.737	0.0378	0.9621
	0.7	0.277	0.723	0.0429	0.9570
	0.9	0.237	0.763	0.0459	0.9541
16:20	0.5	0.298	0.701	0.0403	0.9596
	0.7	0.282	0.717	0.0444	0.9555
	0.9	0.253	0.746	0.0485	0.9515

**Cuadro 2. Índices de reflectividad y absorptividad a la radiación solar total y fotosintética activa, observados 88 d después de siembra (dds).**  
**Table 2. Indexes of reflectivity and absorptivity to total solar radiation and photosynthetic active radiation, observed 88 d after sowing (dds).**

Hora	Distancia entre surcos (m)	Radiación solar total (Rsw)		Radiación fotosintética activa (RFA)	
		$r_{Rsw}$	$a_{Rsw}$	$r_{RFA}$	$a_{RFA}$
10:35	0.5	0.248	0.752	0.0377	0.9623
	0.7	0.255	0.745	0.0426	0.9574
	0.9	0.242	0.758	0.0440	0.9560
12:05	0.5	0.232	0.767	0.0414	0.9586
	0.7	0.219	0.780	0.0402	0.9598
	0.9	0.211	0.788	0.0427	0.9573

16:20 h que a las 12:05, 13:20 y 14:50, lo cual se debe a un mayor ángulo de incidencia de los rayos solares. La reflectividad de la radiación solar total aumentó con la densidad de plantas (menor distancia entre surcos), debido a que la reflectividad de las hojas de las plantas en la banda de radiación cercano al infrarrojo (0.74 a 1.2  $\mu\text{m}$ ) es alta (Jones, 1992). Así, a mayor densidad de follaje, mayor reflectividad, y consecuentemente menos absorptividad; al aumentar la distancia entre surcos, una fracción mayor de la Rsw alcanza la superficie y es absorbida por el suelo, lo que resulta en menor reflectividad del sistema suelo-vegetación a mayor densidad de plantas. Pero la reflectividad a la radiación fotosintéticamente activa es menor a mayor densidad de plantas (mayor absorptividad), porque las hojas muestran una alta absorptividad a la RFA y, a mayor densidad de hojas, mayor absorptividad total. En el rango de la RFA, la reflectividad promedio de las hojas es ligeramente mayor en la longitud de onda 0.55  $\mu\text{m}$  la cual corresponde al color verde (Nobel, 1983). Patrones similares se observaron en los demás días evaluados. Estos resultados sugieren que sería recomendable incrementar la densidad de plantas para aumentar la absorptividad a la radiación fotosintética activa y al mismo tiempo aumentar la reflectividad a la radiación solar total, para reducir los efectos térmicos de las bandas

length, which corresponds to the green color (Nobel, 1983). Similar patterns were observed on the rest of the evaluated days. These results suggest that it would be recommendable to increase the plant density in order to augment absorptivity to photosynthetic active radiation and at the same time increase reflectivity to total solar radiation, to reduce the thermal effects of the solar radiation bands different to RFA without inducing a negative effect of RFA radiation shortage, due to too many plants.

### Reflectivity and absorptivity to total solar radiation during the day in the plant densities

In the first hours of the morning and the last of the afternoon, the greatest reflectivity in the three plant densities was observed (Figure 1), due to a greater angle of radiation incidence (Campbell, 1986). Furthermore, in the treatment of the greatest plant density (0.50 m among rows), reflectivity and absorptivity indexes were more uniform throughout the day than in lower plant densities (Figure 1). Between 13:00 and 15:00 h, the lowest reflectivity index in the three plant densities was observed, due to a major verticality of the sun's rays. Similar results were observed on other dates after maximum coverage.

de radiación solar diferentes a la RFA, sin inducir un efecto negativo de déficit de radiación RFA por un exceso de plantas.

**Reflectividad y absorptividad a la radiación solar total durante el día en las densidades de plantas**

En las primeras hora de la mañana y las últimas de la tarde se observó la mayor reflectividad en las tres densidades de plantas (Figura 1), debido a un mayor ángulo de incidencia de la radiación (Campbell, 1986). Además, en el tratamiento de mayor densidad de plantas (0.50 m entre surcos) los índices de reflectividad y absorptividad fueron más uniformes a través del día que en las densidades de planta menor (Figura 1). Entre las 13 y las 15 h se observó el menor índice de reflectividad en las tres densidades de planta, debido a una mayor verticalidad de los rayos solares. Resultados similares se observaron en otras fechas después de cobertura máxima.

**Reflectividad y absorptividad de la radiación fotosintéticamente activa a través del día en las densidades de planta**

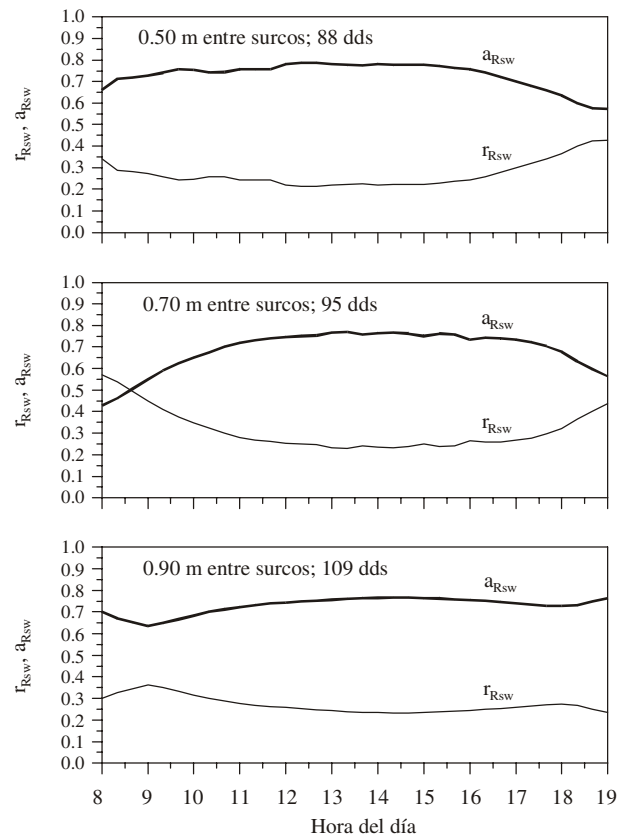
Los índices de reflectividad y absorptividad a la radiación fotosintéticamente activa (RFA) fueron mucho más uniformes a través del día (Figura 2) que los observados para la radiación solar total (Rsw). Además, en las tres densidades de planta la reflectividad es ligeramente mayor durante las primeras horas del día y las últimas de la tarde, y menor entre las 13 y las 15 h. Esto indica que el índice de reflectividad y absorptividad a la RFA también es afectado por el ángulo de incidencia de la radiación sobre el dosel del cultivo. Las variaciones en los índices de reflectividad y absorptividad a la RFA a través del día fueron muy similares en las tres densidades de planta. Patrones similares se observaron en otras fechas después del desarrollo foliar máximo en condiciones de cielo despejado.

**Densidad de plantas, tasa de fotosíntesis y rendimiento del cultivo**

La tasa de fotosíntesis fue afectada por la densidad de plantas (Cuadro 3). A mayor distancia entre surcos (menor densidad de plantas) correspondió una mayor tasa de asimilación de bióxido de carbono y menor resistencia estomática al flujo de bióxido de carbono, lo que sugiere que el efecto de sombreado debido a una mayor densidad de plantas reduce la tasa de fotosíntesis en la hoja. Sin embargo, el rendimiento del cultivo por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) no cambió por el incremento en la densidad de plantas (Cuadro 4); al contrario, el rendimiento de grano fue mayor en el tratamiento con mayor

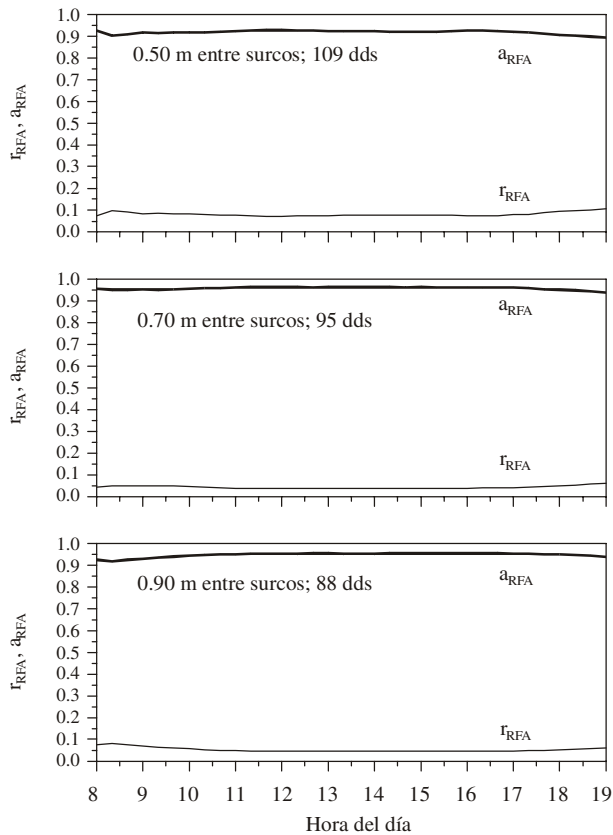
**Reflectivity and absorptivity of photosynthetically active radiation throughout the day in the plant densities**

Reflectivity and absorptivity indexes to photosynthetically active radiation (RFA) were much more uniform throughout the day (Figure 2) than those observed for total solar radiation (Rsw). Besides, in the three plant densities, reflectivity is slightly higher during the first hours of the day and the last of the afternoon, and lower between 13:00 and 15:00 h. This indicates that the reflectivity and absorptivity index to RFA is also affected by the angle of radiation incidence on the crop canopy. The variations in the indexes of reflectivity and absorptivity to RFA throughout the day were very similar in the three plant densities. Similar patterns were observed on other dates after maximum leaf development under conditions of clear sky.



**Figura 1. Índice de reflectividad ( $r_{Rsw}$ ) y absorptividad ( $a_{Rsw}$ ) a la radiación solar total a través del día en tres densidades de plantas (distancia entre surcos) y tres fechas después de siembra (dds).**

**Figure 1. Index of reflectivity ( $r_{Rsw}$ ) and absorptivity ( $a_{Rsw}$ ) to total solar radiation throughout the day in three plant densities (distance among rows) and three dates after sowing (dds).**



**Figura 2.** Índice de reflectividad ( $r_{RFA}$ ) y absorptividad ( $a_{RFA}$ ) a la radiación fotosintética activa a través del día en tres densidades de plantas (distancia entre surcos) y tres fechas después de siembra (dds).

**Figure 2.** Index of reflectivity ( $r_{RFA}$ ) and absorptivity ( $a_{RFA}$ ) to photosynthetic active radiation throughout the day in three plant densities (distance among rows) and three dates after sowing (dds).

densidad de plantas, a pesar de que el rendimiento promedio de plantas fue menor (Cuadro 4).

Aunque sólo se realizó una medición de fotosíntesis, los resultados sugieren que, para la variedad CAFIME, una mayor densidad de plantas causa una mayor absorptividad de la radiación fotosintética activa (Cuadros 1 y 2) y un mayor rendimiento por unidad de superficie, aunque la tasa de fotosíntesis por hoja fue menor. El rendimiento de grano en las tres densidades de plantas fue menor que el rendimiento potencial de la variedad debido a la ocurrencia de heladas tempranas que afectaron su productividad.

## CONCLUSIONES

La radiación solar total se reflejó en 75% y se absorbió en 25% en las densidades de planta evaluadas. La radiación fotosintéticamente activa se reflejó en 4.2% y se absorbió en 95.8%.

**Cuadro 3.** Tasa de asimilación de bióxido de carbono ( $ph$ ) y resistencia estomatosa ( $rs$ ) observados en los tratamientos a los 114 dds.

**Table 3.** Carbon dioxide assimilation rate ( $ph$ ) and stomata resistance ( $rs$ ), observed in the treatments at 114 dds.

Distancia entre surcos (m)	$ph$ ( $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )	$rs$ ( $\text{sm}^{-1}$ )
0.50	15.64	220
0.70	16.40	196.5
0.90	17.27	158.5

## Plant density, photosynthesis rate, and crop yield

The photosynthesis rate was affected by plant density (Table 3) Higher carbon dioxide assimilation rate and less stomata resistance to carbon dioxide flux corresponded to greater distance among rows (less plant density), which suggests that the effect of shading due to greater plants density reduces the photosynthesis rate in the leaf. However, crop yield per unit area ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) did not change because of the increase in plant densities (Table 4); on the contrary, grain yield was higher in the treatment with greater plant density in spite of average plant yield being lower (Table 4).

Although only one measurement of photosynthesis was made, the results suggest that, for CAFIME variety, greater plants density causes a greater absorptivity of photosynthetic active radiation (Tables 1 and 2) and higher yield per unit area, though photosynthesis rate per leaf was lower. Grain yield in the three plants densities was lower than the potential yield of the variety, due to the occurrence of early frosts affecting its productivity.

## CONCLUSIONS

Total solar radiation was reflected by 75% and absorbed by 25% in the plant densities evaluated. Photosynthetically active radiation was reflected by 4.2% and absorbed by 95.8%.

**Cuadro 4.** Peso de planta, índice de área foliar (IAF), y rendimiento de grano (RG) observados en los tratamientos.

**Table 4.** Plant weight, index of leaf area (IAF), and grain yield (RG) observed in the treatments.

Distancia entre surcos (m)	Peso de planta (g)	IAF	RG ( $\text{kg ha}^{-1}$ )
0.50	370 <sup>b</sup>	4.52 <sup>a</sup>	2890.5a
0.70	382 <sup>b</sup>	2.94 <sup>b</sup>	1512.5b
0.90	402 <sup>a</sup>	2.51 <sup>b</sup>	1083b

Medias con diferente letra en una columna son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ) ✦ Means with different letters in a column are statistically different (Tukey,  $p \leq 0.05$ )

A una mayor densidad de plantas correspondió mayor reflectividad de la radiación solar total y mayor absorptividad a la radiación fotosintética activa. Tanto la reflectividad como la absorptividad a la radiación solar total y la fotosintéticamente activa fueron afectadas por el ángulo de incidencia de la radiación en las tres densidades de plantas. La reflectividad fue mayor durante las primeras horas de la mañana y las últimas horas de la tarde. La menor reflectividad (mayor absorptividad) se observó de las 13 a las 15 h. El incremento de la reflectividad debido al ángulo de incidencia fue mayor en la radiación solar total que en la fotosintética activa. Los índices de reflectividad y absorptividad a la radiación fotosintética activa fueron más uniformes a través del día que los índices a la radiación solar total.

El efecto de sombreado debido a una mayor densidad de plantas redujo la tasa de fotosíntesis por hoja; pero el rendimiento del cultivo por unidad de superficie ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) no se afectó por el incremento en la densidad de plantas, y aumentó el rendimiento de grano en el tratamiento con mayor densidad.

Higher reflectivity of total solar radiation and greater absorptivity of photosynthetic active radiation corresponded to greater plant density. Reflectivity, as well as absorptivity to total solar radiation and photosynthetically active radiation was affected by the angle of radiation incidence in the three plant densities. Reflectivity was greater during the first hours of the afternoon. The lowest reflectivity (highest absorptivity) was observed from 13:00 to 15:00 h. The increase of reflectivity due to the angle of incidence was greater in total solar radiation than in photosynthetic active radiation. The indexes of reflectivity and absorptivity to photosynthetic active radiation were more uniform throughout the day than the indexes of total solar radiation.

The effect of shading due to greater plant density reduced photosynthesis rate per leaf, but the crop yield per unit area ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) was not affected by the increment of plant density, and the grain yield increased in the treatment with greater density.

—End of the English version—

#### AGRADECIMIENTOS

A la Dirección de Investigación de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro por el apoyo para realizar la investigación (proyecto 02-03-0305-2559) y al INIFAP de Arteaga, Coahuila, por su participación en los trabajos de campo.

#### LITERATURA CITADA

- Andrade, F. H., S. A. Uhart, G. G. Arguissain, and R. A. Ruiz. 1992. Radiation use efficiency of maize grown in a cool area. *Field Crop Res.* 28: 345-354.
- Andrade, F. H., S. A. Uhart, and I. M. Frugone. 1993. Intercepted radiation at flowering and kernel number in maize: Shade versus plant density effects. *Crop Sci.* 33: 482-485.
- Campbell, G. S. 1986. Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agric. For. Meteorol.* 36: 317-321.
- Gates, D. M. 1980. *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, New York, USA. 611 p.
- Gallagher, J. N., and P. V. Biscoe. 1978. Radiation absorption, growth and yield of cereals. *J. Agric. Sci. Camb.* 91: 47-60.
- Gallo, K. P., and C. S. T. Daughtry. 1986. Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in corn canopies. *Agron. J.* 78: 752-756.
- Hashemi-Dezfouli, A., and S. J. Herbert. 1992. Intensifying plant density response of corn with artificial shade. *Agron. J.* 84: 547-555.
- Jones, G. H. 1992. *Plants and Microclimate. A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology*. Second edition. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain. 428 p.
- Karlen, D. L., and C. R. Camp. 1985. Row spacing, plant population and water management effects on corn in the Atlantic Coastal Plain. *Agr. J.* 77: 711-715.
- Maddonni, G. A., and M. E. Otegui. 1996. Leaf area, light interception and crop development in maize. *Field Crop Res.* 48: 1, 87-87.
- Monteith, J. L., and M. H. Unsworth. 1990. *Principles of Environmental Physics*. Second edition, Chapman and Hall, Inc. London, United Kingdom. 291 p.
- Nobel, P. S. 1983. *Biophysical Plant Physiology and Ecology*. W. H. Freeman and Company, New York, U.S.A. 608 p.
- Nobel, P. S. 1991. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*. Academic Press, Inc. Los Angeles, Calif. pp: 345-392.
- Norman, J. M., and T. J. Arkebauer. 1991. Modeling crop photosynthesis from biochemistry to canopy. ASA and CSSA, Special Publication No 19. pp: 75-79.
- Otegui, M. E., M. G. Nicolini, R. A. Ruiz, and P. A. Dodds. 1995. Sowing date effects on grain yield components for different maize genotypes. *Agron. J.* 87: 29-33.
- Shibles, R. M., and C. R. Weber. 1965. Leaf area, solar radiation interception, and dry matter production by soybeans. *Crop Sci.* 5: 575-578.
- Walter-Shea, E. A. 1987. Laboratory and field measurements of leaf spectral properties and canopy architecture and their effects on canopy reflectance. Ph.D. diss. Univ. of Nebraska, Lincoln. U.S.A. 87 p.
- Wells, R. 1991. Soybean growth response to plant density: Relationships among canopy photosynthesis, leaf area and light interception. *Crop Sci.* 31: 755-761.
- Westgate, M. E., F. Forcella, D. C. Reicosky, and J. Somsen. 1997. Rapid canopy closure for maize production in the northern U S corn belt: Radiation use efficiency and grain yield. *Field Crop Res.* 49: 249-258.
- Williams, W. A., R. S. Loomis, and C. R. Lepley. 1965. Vegetative growth of corn as affected by population density. I. Productivity in relation to interception of solar radiation. *Crop Sci.* 5: 211-215.