

BALANCE DE RADIACION SOLAR EN *Coffea arabica* L., VARIEDADES CATUAI Y BORBON AMARILLO*

Alvaro Jaramillo-Robledo**
Jesús Marden dos Santos***

INTRODUCCION

Antes de alcanzar la superficie terrestre la radiación solar sufre modificaciones cuantitativas y cualitativas en la atmósfera. Al penetrar a la cobertura vegetal esta energía es empleada en el calentamiento de las plantas, del aire y del suelo, así como en los procesos de evaporación, transpiración y fotosíntesis.

Un análisis del balance energético de los cultivos muestra que la fotosíntesis en el estado actual de desarrollo agrícola solamente utiliza 1 a 20/0 de la radiación líquida de onda corta.

Autores como Loomis, Williams y Duncan (12), Monteith (15) y Nichiporovitch (17), han demostrado que este límite se encuentra entre 5 y 100/0 dependiendo de la planta, del metabolismo fotosintético por ella utilizado (C₃, C₄, CAM) y de las técnicas de cultivo empleadas.

* Resumen del trabajo de tesis presentado por el autor principal para la obtención del título de M. S. en Agrometeorología, en la Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidad de Sao Paulo, Brasil.

** Asistente de la Sección de Agroclimatología del Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Chinchiná, Caldas, Colombia.

*** Profesor Libre Docente del Departamento de Física y Meteorología, Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidad de Sao Paulo, Brasil.

Monsi y Saeki, citados por Saeki (20) aplicaron el Índice de Área Foliar a la ley de Bouguer-Lambert para explicar el comportamiento de la energía solar dentro de bosques y comunidades herbáceas. Estos autores demostraron que el logaritmo de la intensidad luminosa relativa a una determinada altura, dentro de una comunidad vegetal, decrece linealmente con el incremento del índice de área foliar acumulado.

A partir del primer modelo se han generado modelos más complejos como son el de Kasanaga-Monsi citado por Monsi (13) que incorpora al de Monsi-Saeki la energía transmitida por la hoja; otro es el de Monteith (14) que explica el comportamiento de la radiación solar dentro de los cultivos mediante una expresión binomial, considerando como variables la fracción de la radiación directa en las diferentes capas del follaje y la fracción transmitida por la hoja.

Lemeur y Blad (10) presentan otros modelos matemáticos más sofisticados de tipo geométrico o estadístico, para explicar el régimen de radiación de las comunidades vegetales.

Para Ross (18, 19), el régimen de radiación de los cultivos está determinado por los siguientes factores: a) condiciones de radiación incidente (directa y difusa); b) propiedades ópticas del follaje (estructura de la hoja, edad); c) propiedad óptica de la superficie del suelo; d) arquitectura de la planta, siendo éste el factor más importante que determina el régimen de radiación especialmente por la presencia de áreas sombreadas y manchas de sol.

Debido a la gran heterogeneidad de la arquitectura de la planta, el estudio de la transferencia de radiación dentro del follaje es complicado, motivo por el cual se asumen simplificaciones; una generalización muy aceptada es aquella que considera el follaje horizontalmente uniforme, estableciéndose que las características de su disposición foliar y de la radiación no cambian dentro de las capas horizontales y dependen solamente de la altura (19).

Para Monsi (13), los coeficientes de extinción k (tasa de absorción de energía debida al follaje), tienden a ser mayores para especies de hojas anchas y relativamente horizontales (k entre 0,6 y 0,9), que para especies de hojas pequeñas y erectas (k entre 0,3 y 0,5).

En investigaciones realizadas en Brasil, en árboles de cacao y utilizando el modelo de Monsi-Saeki se encontraron coeficientes de extinción de 0,62 para distancias entre plantas de 2,0 x 2,0 m y de 0,57 para distancias de 3,0 x 3,0 m; esta variación se explicó por los ángulos de las ramas (1).

Un índice utilizado en el balance de radiación en comunidades vegetales es el albedo, que se define como la relación entre la radiación reflejada por una superficie y el total de ra-

diación incidente sobre la misma. Este flujo de energía no es aprovechado en los procesos de transpiración y fotosíntesis.

Los valores de albedo tienen una variación diaria, presentando el valor más alto al nacer y al ponerse el sol y menor al medio día. Según Budyko (2), esta variación está asociada con la variación en la reflexión de la superficie rugosa para diferentes ángulos de incidencia de los rayos solares y por la variación de la composición espectral de la radiación solar a diferentes altitudes. Otros factores que afectan el albedo son el contenido de clorofila y de agua de las hojas (4).

En bosques, los valores de albedo hallados están entre 0,1 y 0,2 (9,23); para cítricos este valor es 0,17 (26). Para el cultivo del café no se encontró información.

Según Cannel (3), el café presenta una arquitectura adecuada para una mejor interceptación de luz, lo cual se comprueba por los siguientes hechos: a) utiliza 40 a 45% de producción de materia seca para incrementar su área foliar; b) los árboles jóvenes, con espaciamientos estrechos, presentan características adecuadas para transmitir la radiación solar tales como los ángulos agudos de las ramas superiores con relación a la vertical y la estructura cónica del árbol. Esto permite que el follaje reciba sombra moderada lo cual es una ventaja, ya que las hojas del café tienen su máxima fotosíntesis a bajas intensidades de radiación.

Kumar (8), estudiando la interceptación de la radiación solar en *Coffea arabica*, encontró que la radiación fotosintéticamente activa, para densidades superiores a 12.700 plantas por hectárea, es prácticamente interceptada en la parte superior del follaje, hallando valores insignificantes de radiación entre la parte media del cultivo y la superficie del suelo.

El presente estudio tiene por objetivos estudiar en *Coffea arabica* L., variedades Catuai y Borbón amarillo: a) el balance de los flujos de radiación global (0,3 - 3,0 μm), y de radiación utilizada en la fotosíntesis (PI) (0,3 - 0,75 μm); b) el albedo para radiación global y c) los coeficientes de extinción para radiación global y fotosintéticamente activa.

MATERIALES Y METODOS

Localización.

La información se obtuvo en lotes experimentales de *Coffea arabica* L., variedades Catuai y Borbón amarillo, situados en la Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz",

Piracicaba, Brasil, con las siguientes coordenadas geográficas: latitud sur 22°31', longitud oeste 47°38' y altitud de 576 m.

Equipo de medida.

Para la medida de los flujos de radiación global y radiación utilizada en la fotosíntesis, en la parte superior del cultivo y transmitida en las diferentes capas del árbol, fueron utilizados piranómetros de termopila diseñados por Jaramillo y Santos (6).

Para medir los flujos de radiación utilizada en el proceso de fotosíntesis (PI), comprendidos entre 0,3 μm y 0,75 μm , se utilizaron filtros Wratten 88A de la Kodak, los cuales permiten el paso de radiación solar con longitudes de onda superiores a 0,75 μm . Este tipo de filtro ha sido ampliamente utilizado en Inglaterra por varios investigadores (16, 24, 25).

Para la adquisición de las señales de los piranómetros se utilizó un potenciómetro Cambridge Instrument Tipo 44228, el cual mide diferencias de potencial hasta de 101 milivoltios con una precisión de más o menos 10/0.

Balance de radiación.

El balance de radiación sobre una superficie cualquiera es el siguiente (Ver significado de los símbolos en el Apéndice No 1):

$$Q^* = (1 - \alpha) \cdot (K_{D\downarrow} + K_{d\downarrow}) + (L\downarrow - L\uparrow) \dots \dots \dots (1)$$

Como el elemento sensible del piranómetro está protegido por una cúpula de vidrio, ésta limita el espectro de radiación solar a longitudes de onda corta entre 0,3 μm - 3,0 μm , por lo tanto la ecuación (1) queda:

$$K^* = (1 - \alpha) \cdot (K_{D\downarrow} + K_{d\downarrow}) \\ = K_{D\downarrow} + K_{d\downarrow} - \alpha K_{D\downarrow} - \alpha K_{d\downarrow} \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{Como } -\alpha K_{D\downarrow} = K_{D\uparrow} \dots \dots \dots (3)$$

$$-\alpha K_{d\downarrow} = K_{d\uparrow} \dots \dots \dots (4)$$

Sustituyendo (3) y (4) en (2) se tiene:

$$K^* = (K_{D\downarrow} + K_{d\downarrow}) - (K_{D\uparrow} + K_{d\uparrow}) \dots \dots \dots (5)$$

$$\text{Como } K = K_D + K_d \dots \dots \dots (6)$$

Sustituyendo (6) en (5) se tiene:

$$K^* = K\downarrow - K\uparrow \dots\dots\dots (7)$$

La ecuación (7) es aplicable a la radiación global o para determinadas longitudes de onda.

Para medir el flujo de radiación con piranómetros provistos de filtro Kodak Wratten 88A, se utiliza la expresión (5).

$$K^* = (K_{DF}\downarrow + K_{dF}\downarrow) - (K_{DF}\uparrow + K_{dF}\uparrow) \dots\dots\dots (8)$$

$$K^*_F = K_F\downarrow - K_F\uparrow \dots\dots\dots (9)$$

La determinación de PI es hecha por la diferencia de las expresiones (7) y (9).

$$K^* - K^*_F = (K\downarrow - K\uparrow) - (K_F\downarrow - K_F\uparrow) \dots\dots\dots (10)$$

$$K^* - K^*_F = (K\downarrow - K_F\downarrow) - (K\uparrow - K_F\uparrow) \dots\dots\dots (11)$$

$$K^*_{PI} = K_{PI}\downarrow - K_{PI}\uparrow \dots\dots\dots (12)$$

De las consideraciones anteriores se verifica que los flujos a ser medidos encima del cultivo son $K\downarrow$, $K_F\downarrow$, $K\uparrow$, $K_F\uparrow$. Los flujos que deben medirse en el interior del cultivo en las diferentes capas son $K\downarrow$ y $K_F\downarrow$.

De cada variedad de café se consideraron cuatro árboles y los balances de radiación se hicieron durante cuatro días por variedad.

Para medir los flujos en la parte superior de la planta se colocaron dos piranómetros (uno con filtro y otro sin filtro) a 30 cm de la parte superior de la planta. La radiación reflejada se cuantificó dirigiendo la superficie sensora del piranómetro hacia la planta.

Para estudiar los flujos de radiación en el interior de la planta, ésta se dividió en cuatro capas en función de su altura. En cada nivel se colocaron dos piranómetros (con filtro y sin filtro).

Las lecturas fueron realizadas de media en media hora y en días con nubosidad cero. Para la variedad Catuai las observaciones se realizaron los días 12, 14, 21, y 22 de julio de 1979; para la variedad Borbón amarillo los días 27, 30 y 31 de julio y 1º de agosto de 1979.

Determinación del área foliar.

Para estimar el área foliar se utilizó el método de Heller (5), empleado para cuantificar el área foliar en bosques.

De cada árbol se retiraron sus hojas por capas; del total de hojas se tomaron 200 hojas de diferentes tamaños y con sacabocados se obtuvieron 200 discos de $4,71 \text{ cm}^2$ cada uno. El total de discos para cada variedad fue de 800.

Las muestras de hojas verdes y discos se llevaron a un horno de circulación forzada a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta alcanzar peso constante. Estas se pesaron en una balanza electrónica con aproximación de 10 mg.

Para la variedad Catuai se encontró una relación de $130,0 \text{ cm}^2$ de disco verde/gramo de peso seco de disco; para la variedad Borbón amarillo, esta relación fue de $131,4 \text{ cm}^2/\text{gramo}$. Las constantes anteriores se multiplicaron por el peso seco de hojas en cada capa, obteniéndose así el área foliar.

El índice del área foliar se determinó por unidad de volumen considerando una distancia de siembra de $3,5 \times 3,0 \text{ m}$ para la variedad Catuai y de $4,0 \times 3,5$ para la variedad Borbón amarillo.

Modelo de Monsi - Saeki.

El modelo utilizado para el estudio de la interacción de los flujos de radiación solar con el follaje de la planta fue el propuesto por Monsi - Saeki, aplicado para la radiación medida a las 12 horas.

El modelo está definido por la expresión siguiente:

$$\ln \frac{K\downarrow}{K_0^*} = -k \cdot \text{IAF}$$

En donde:

$K\downarrow$ es el flujo de radiación global de onda corta que alcanza determinado nivel en el interior del follaje.

K_0^* es el balance de radiación global de onda corta que alcanza la parte superior del follaje.

k es el coeficiente de extinción o tasa de absorción de energía debida al follaje.

IAF es el índice de área foliar.

De cada árbol se retiraron sus hojas por capas; del total de hojas se tomaron 200 hojas de diferentes tamaños y con sacabocados se obtuvieron 200 discos de $4,71 \text{ cm}^2$ cada uno. El total de discos para cada variedad fue de 800.

Las muestras de hojas verdes y discos se llevaron a un horno de circulación forzada a $75 \text{ }^\circ\text{C}$ hasta alcanzar peso constante. Estas se pesaron en una balanza electrónica con aproximación de 10 mg.

Para la variedad Catuai se encontró una relación de $130,0 \text{ cm}^2$ de disco verde/gramo de peso seco de disco; para la variedad Borbón amarillo, esta relación fue de $131,4 \text{ cm}^2/\text{gramo}$. Las constantes anteriores se multiplicaron por el peso seco de hojas en cada capa, obteniéndose así el área foliar.

El índice del área foliar se determinó por unidad de volumen considerando una distancia de siembra de $3,5 \times 3,0 \text{ m}$ para la variedad Catuai y de $4,0 \times 3,5$ para la variedad Borbón amarillo.

Modelo de Monsi - Saeki.

El modelo utilizado para el estudio de la interacción de los flujos de radiación solar con el follaje de la planta fue el propuesto por Monsi - Saeki, aplicado para la radiación medida a las 12 horas.

El modelo está definido por la expresión siguiente:

$$\ln \frac{K_{\downarrow}}{K_0^*} = -k \cdot \text{IAF}$$

En donde:

K_{\downarrow} es el flujo de radiación global de onda corta que alcanza determinado nivel en el interior del follaje.

K_0^* es el balance de radiación global de onda corta que alcanza la parte superior del follaje.

k es el coeficiente de extinción o tasa de absorción de energía debida al follaje.

IAF es el índice de área foliar.

El producto $k \cdot IAF$ representa la fracción de luz absorbida en cada capa sucesiva del follaje de espesor ΔIAF .

La determinación del coeficiente de extinción (k) se realizó gráficamente.

RESULTADOS Y DISCUSION

Interceptación de la radiación solar.

Las características de las plantas utilizadas en cuanto al espesor de cada capa considerada, Índice de Area Foliar (I. A. F.) e Índice de Area Foliar acumulado, se presentan en las tablas 1 y 2.

El I. A. F. acumulado por unidad de volumen para la variedad Catuai varió entre 2,94 y 3,72 con un valor promedio de 3,27. El valor de I. A. F. acumulado para la variedad Borbón amarillo, presentó un menor valor, variando entre 1,77 y 2,23 con un promedio de 1,98. En ambas variedades se observó gran variabilidad de I. A. F. por estrato.

El balance de los flujos de radiación global y de radiación utilizada en la fotosíntesis para las variedades Catuai y Borbón amarillo se presenta en las tablas 3 y 4. La proporción de radiación global de onda corta retenida por la variedad Catuai fue de 95,80%, siendo 95% la proporción de radiación fotosintéticamente activa. Para la variedad Borbón amarillo el valor observado fue de 94,70% tanto para la radiación global como para la radiación fotosintéticamente activa.

En las dos variedades, y para las dos clases de radiación, los porcentajes interceptados no difieren apreciablemente y éstos valores concuerdan con los encontrados por Alvim (1) en árboles de cacao, quien halló valores de interceptación de radiación solar que variaron entre 90 y 97%.

Se observa en la variedad Catuai, 10% más de radiación solar que en la variedad Borbón amarillo; este hecho puede ser explicado en parte, por un mayor I.A.F. en la variedad Catuai (promedio de 3,27) que en la variedad Borbón amarillo (promedio de 1,98). Otro hecho que puede explicar el mayor porcentaje de radiación solar retenida por la variedad Catuai es el menor valor de albedo presentado a las horas del medio día, comparado con el Borbón amarillo (figura 1).

La variación horaria del porcentaje de radiación global de onda corta y de la radiación fotosintéticamente activa interceptada por la planta no es apreciable, existiendo una tendencia a presentar valores un poco más altos, en las horas de mayor irradiancia.

TABLA 1.- INDICE DE AREA FOLIAR POR CADA ESTRATO EN *Coffea arabica* L., VARIEDAD CATUAI, PIRACICABA 1979.

Planta	Estrato			
	E. 1 Superior	E. 2	E. 3	E. 4 Inferior
1. Espesor (cm)	170-130	130-85	85-50	50-15
I. A. F.	0,42	0,64	1,19	1,13
I. A. F. acumulado	0,42	1,06	2,25	3,38
2. Espesor (cm)	175-135	135-95	95-56	56-20
I. A. F.	0,62	0,78	0,67	0,97
I. A. F. acumulado	0,62	1,40	2,07	3,04
3. Espesor (cm)	168-135	135-96	96-60	60-20
I. A. F.	0,43	0,84	0,66	1,79
I. A. F. acumulado	0,43	1,27	1,93	3,72
4. Espesor (cm)	165-125	125-90	90-60	60-20
I. A. F.	0,32	1,10	0,56	0,96
I. A. F. acumulado	0,32	1,42	1,98	2,94
Promedio I. A. F. acumulado por planta				3,27

TABLA 2.- INDICE DE AREA FOLIAR POR CADA ESTRATO EN *Coffea arabica* L., VARIEDAD BORBON AMARILLO, PIRACICABA 1979.

Planta	Estrato			
	E. 1 Superior	E. 2	E. 3	E. 4 Inferior
1. Espesor (cm)	230-170	170-115	115-70	70-20
I. A. F.	0,12	0,41	0,79	0,48
I. A. F. acumulado	0,12	0,53	1,32	1,80
2. Espesor (cm)	220-170	170-120	120-70	70-20
I. A. F.	0,17	0,30	0,57	0,73
I. A. F. acumulado	0,17	0,47	1,04	1,77
3. Espesor (cm)	180-140	140-110	110-65	65-20
I. A. F.	0,19	0,41	0,72	0,91
I. A. F. acumulado	0,19	0,60	1,32	2,23
4. Espesor (cm)	200-170	170-120	120-70	70-20
I. A. F.	0,17	0,21	0,76	1,01
I. A. F. acumulado	0,17	0,38	1,14	2,15
Promedio I. A. F. acumulado por planta				1,98

TABLA 3.- BALANCE DE LOS FLUJOS DE RADIACION GLOBAL Y FOTOSINTETICAMENTE ACTIVA ($\text{Cal cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$) PARA *Coffea arabica* L., VARIEDAD CATUAI. PROMEDIO DE CUATRO DIAS. PIRACICABA, 1979.

Hora	Sobre el cultivo						En la superficie del suelo		Porcentaje interceptado por la planta	
	$K \downarrow$	$K \uparrow$	K^*	$K_{PI} \downarrow$	$K_{PI} \uparrow$	K_{PI}^*	$K \downarrow$	$K_{PI} \downarrow$	$\frac{K \downarrow}{K^*}$	$\frac{K_{PI} \downarrow}{K_{PI}^*}$
08:30	.429	.111	.314	.175	.051	.124	.009	.006	97,1	95,2
09:00	.519	.120	.399	.199	.060	.139	.029	.012	92,7	91,4
09:30	.694	.154	.540	.266	.063	.203	.031	.012	94,3	94,1
10:00	.744	.160	.584	.277	.068	.209	.031	.013	94,7	93,8
10:30	.927	.184	.743	.383	.071	.312	.033	.015	95,6	95,2
11:00	.898	.175	.723	.380	.072	.308	.029	.013	96,0	95,8
11:30	.973	.184	.789	.423	.068	.355	.027	.013	96,6	96,3
12:00	1.012	.179	.833	.465	.073	.392	.032	.013	96,2	96,7
12:30	1.022	.160	.862	.462	.059	.403	.033	.016	96,2	96,0
13:00	1.004	.161	.843	.475	.058	.417	.029	.012	96,6	97,1
13:30	.990	.147	.843	.475	.052	.403	.027	.013	96,8	96,8
14:00	.816	.120	.696	.416	.047	.369	.021	.010	97,0	97,3
14:30	.709	.103	.606	.352	.037	.315	.020	.009	96,7	97,1
15:00	.625	.098	.527	.324	.028	.296	.020	.010	96,2	96,6
15:30	.506	.089	.417	.246	.033	.213	.020	.009	95,2	95,8
16:00	.350	.075	.275	.190	.029	.161	.015	.008	94,5	95,0
Promedio									95,8	95,6

TABLA 4.- BALANCE DE LOS FLUJOS DE RADIACION GLOBAL Y FOTOSINTETICAMENTE ACTIVA ($\text{Cal cm}^{-2} \text{min}^{-1}$) PARA *Coffea arabica* L., VARIEDAD BORBON AMARILLO. PROMEDIO DE CUATRO DIAS. PIRACICABA, 1979.

Hora	Sobre el cultivo						En la superficie del suelo		Porcentaje interceptado por la planta	
	$K\downarrow$	$K\uparrow$	K^*	$K_{PI}\downarrow$	$K_{PI}\uparrow$	K^*_{PI}	$K\downarrow$	$K_{PI}\downarrow$	$\frac{K\downarrow}{K^*}$	$\frac{K_{PI}\downarrow}{K^*_{PI}}$
08:30	.479	.112	.367	.204	.054	.150	.007	.005	98,1	96,7
09:00	.602	.122	.480	.235	.049	.186	.042	.018	91,3	90,3
09:30	.732	.150	.582	.290	.058	.232	.043	.014	92,6	94,0
10:00	.878	.173	.705	.355	.065	.290	.050	.021	92,9	92,8
10:30	.987	.185	.802	.408	.069	.339	.051	.022	93,6	93,5
11:00	1.073	.193	.880	.452	.080	.372	.042	.018	95,2	95,2
11:30	1.116	.194	.922	.476	.077	.399	.043	.020	95,3	95,0
12:00	1.148	.195	.953	.495	.073	.422	.045	.019	95,3	95,5
12:30	1.175	.193	.982	.513	.070	.443	.040	.017	95,9	96,2
13:00	1.149	.193	.956	.506	.076	.430	.038	.017	96,0	96,0
13:30	1.086	.179	.907	.481	.072	.409	.041	.018	95,5	95,5
14:00	1.006	.164	.842	.445	.065	.380	.038	.017	95,5	96,5
14:30	.895	.144	.751	.397	.057	.340	.031	.012	95,9	96,5
15:00	.810	.136	.674	.362	.062	.300	.032	.014	95,3	95,3
15:30	.634	.109	.525	.279	.049	.230	.027	.019	94,9	91,8
16:00	.518	.095	.423	.241	.042	.199	.026	.008	93,9	96,0
Promedio									94,8	94,8

El alto porcentaje de radiación retenido por el café no puede explicarse solamente por las características de absorción y transmisión de sus hojas, sino también por una gran área que tienen las ramas y los frutos que no es medida en el modelo de Monsi-Saeki y que según Ross(19) no transmiten radiación.

Comportamiento del Albedo.

La representación gráfica de los valores de albedo para radiación global de onda corta para las variedades Catuai y Borbón amarillo se presenta en la figura 1.

En las dos variedades de café los valores más altos fueron observados en las primeras horas de la mañana y al final de la tarde, siendo los menores valores al medio día cerca de las dos horas de la tarde. Este comportamiento del albedo es igual al descrito por Lemeur y Rosenberg (11) y Dos Santos (21).

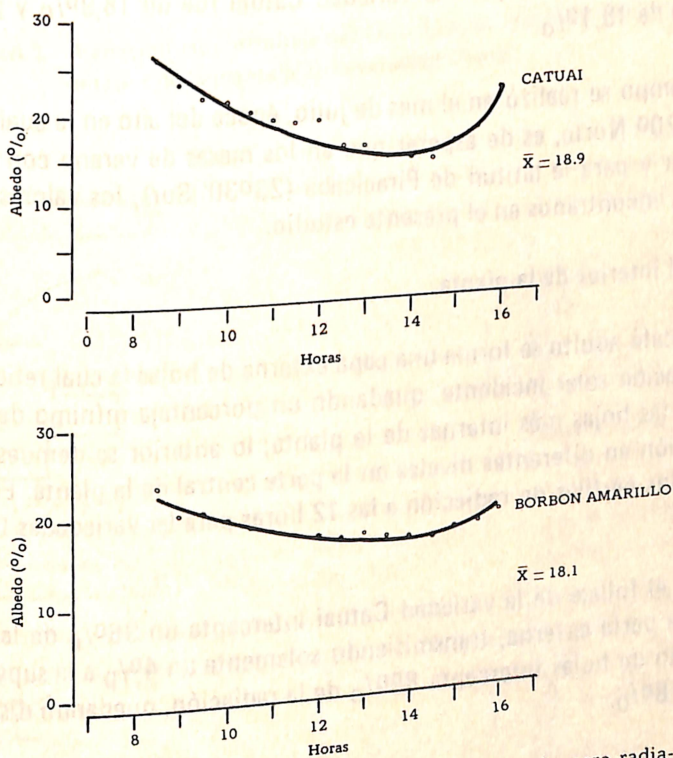


FIGURA 1.- Variación horaria de los valores de albedo para radiación global en *Coffea arabica* L., variedades Catuai y Borbón amarillo (promedio de 4 días). Piracicaba 1979.

El alto porcentaje de radiación retenido por el café no puede explicarse solamente por las características de absorción y transmisión de sus hojas, sino también por una gran área que tienen las ramas y los frutos que no es medida en el modelo de Monsi-Saeki y que según Ross(19) no transmiten radiación.

Comportamiento del Albedo.

La representación gráfica de los valores de albedo para radiación global de onda corta para las variedades Catuai y Borbón amarillo se presenta en la figura 1.

En las dos variedades de café los valores más altos fueron observados en las primeras horas de la mañana y al final de la tarde, siendo los menores valores al medio día cerca de las dos horas de la tarde. Este comportamiento del albedo es igual al descrito por Lemeur y Rosenberg (11) y Dos Santos (21).

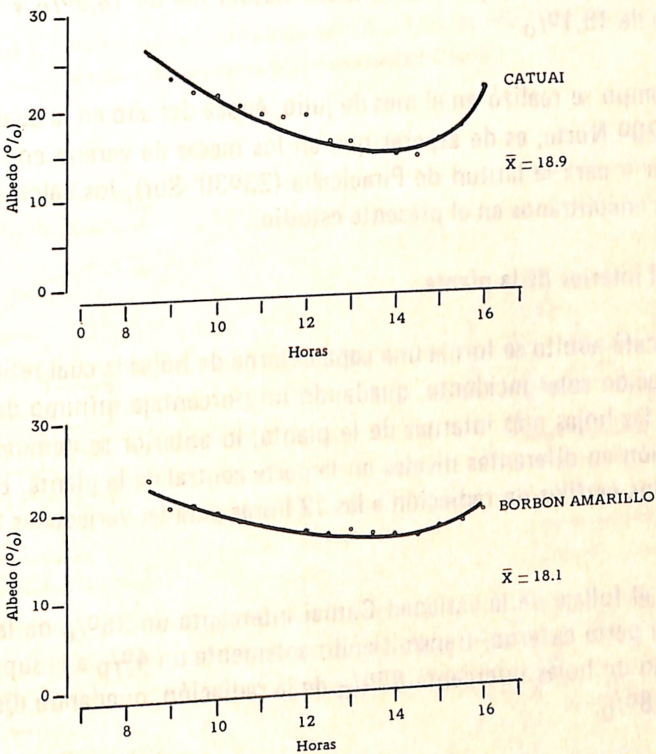


FIGURA 1.- Variación horaria de los valores de albedo para radiación global en *Coffea arabica* L., variedades Catuai y Borbón amarillo (promedio de 4 días). Piracicaba 1979.

En la variedad Catuai los valores de Albedo oscilaron entre 26,2^o/_o y 14,4^o/_o y para la variedad Borbón amarillo estos valores variaron entre 23,5^o/_o y 16,0^o/_o.

La variación diaria del albedo puede ser explicada por las modificaciones del ángulo zenital y por la variación de la composición espectral de la radiación solar (23); en plantas de una misma variedad, está asociado, según Budyko (2), con los cambios en la reflexión de la superficie rugosa para diferentes ángulos de la incidencia de los rayos solares.

La tendencia de la variedad Catuai a tener menores valores de albedo al medio día comparados con la variedad Borbón amarillo podría en parte ser explicada por la tonalidad más oscura del verde en la parcela experimental de la variedad Catuai.

Los menores valores de albedo al medio día presentados por la variedad Catuai, comparada con el Borbón amarillo, podrían estar indicando una mejor eficiencia del Catuai para retener la radiación solar en las horas de mayor irradiancia.

El valor promedio de albedo para la variedad Catuai fue de 18,9^o/_o y para la variedad Borbón amarillo de 18,1^o/_o.

El trabajo de campo se realizó en el mes de julio, época del año en la cual el sol tiene una declinación de 20^o Norte, es de esperar que en los meses de verano con una declinación solar de 23^o Sur y para la latitud de Piracicaba (23^o30' Sur), los valores de albedo sean menores que los encontrados en el presente estudio.

Irradiancia en el interior de la planta.

En el árbol de café adulto se forma una capa externa de hojas la cual retiene gran proporción de la radiación solar incidente, quedando un porcentaje mínimo de radiación solar disponible para las hojas más internas de la planta; lo anterior se demuestra al medir los flujos de radiación en diferentes niveles en la parte central de la planta. En las figuras 2 y 3 se presentan los perfiles de radiación a las 12 horas para las variedades Catuai y Borbón amarillo.

Se observa que el follaje de la variedad Catuai intercepta un 96^o/_o de la radiación solar que incide en la parte externa, transmitiendo solamente un 4^o/_o a la superficie del suelo. El primer estrato de hojas intercepta 88^o/_o de la radiación, quedando disponible para las demás capas un 8^o/_o.

La variedad Borbón amarillo intercepta un 95^o/_o de la radiación solar, siendo un 93^o/_o interceptado por el primer estrato de hojas y quedando disponible para el interior de la planta un 2^o/_o.

En la variedad Catuai los valores de Albedo oscilaron entre 26,20/0 y 14,40/0 y para la variedad Borbón amarillo estos valores variaron entre 23,50/0 y 16,00/0.

La variación diaria del albedo puede ser explicada por las modificaciones del ángulo zenital y por la variación de la composición espectral de la radiación solar (23); en plantas de una misma variedad, está asociado, según Budyko (2), con los cambios en la reflexión de la superficie rugosa para diferentes ángulos de la incidencia de los rayos solares.

La tendencia de la variedad Catuai a tener menores valores de albedo al medio día comparados con la variedad Borbón amarillo podría en parte ser explicada por la tonalidad más oscura del verde en la parcela experimental de la variedad Catuai.

Los menores valores de albedo al medio día presentados por la variedad Catuai, comparada con el Borbón amarillo, podrían estar indicando una mejor eficiencia del Catuai para retener la radiación solar en las horas de mayor irradiancia.

El valor promedio de albedo para la variedad Catuai fue de 18,90/0 y para la variedad Borbón amarillo de 18,10/0.

El trabajo de campo se realizó en el mes de julio, época del año en la cual el sol tiene una declinación de 20° Norte, es de esperar que en los meses de verano con una declinación solar de 23° Sur y para la latitud de Piracicaba (23°30' Sur), los valores de albedo sean menores que los encontrados en el presente estudio.

Irradiancia en el interior de la planta.

En el árbol de café adulto se forma una capa externa de hojas la cual retiene gran proporción de la radiación solar incidente, quedando un porcentaje mínimo de radiación solar disponible para las hojas más internas de la planta; lo anterior se demuestra al medir los flujos de radiación en diferentes niveles en la parte central de la planta. En las figuras 2 y 3 se presentan los perfiles de radiación a las 12 horas para las variedades Catuai y Borbón amarillo.

Se observa que el follaje de la variedad Catuai intercepta un 960/0 de la radiación solar que incide en la parte externa, transmitiendo solamente un 40/0 a la superficie del suelo. El primer estrato de hojas intercepta 880/0 de la radiación, quedando disponible para las demás capas un 80/0.

La variedad Borbón amarillo intercepta un 950/0 de la radiación solar, siendo un 930/0 interceptado por el primer estrato de hojas y quedando disponible para el interior de la planta un 20/0.

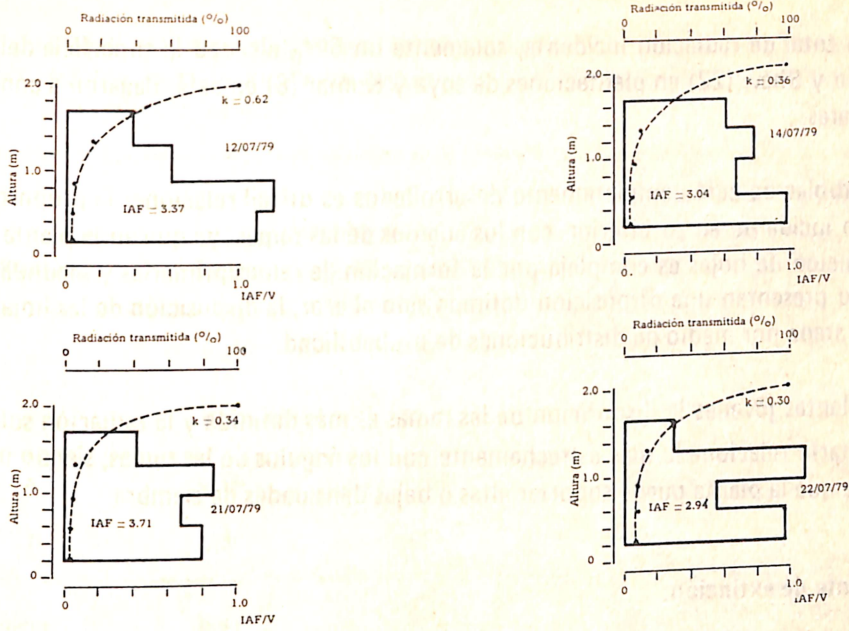


FIGURA 2.- Variación en porcentaje del flujo de radiación solar transmitida en el interior de la planta para la variedad Catuai.

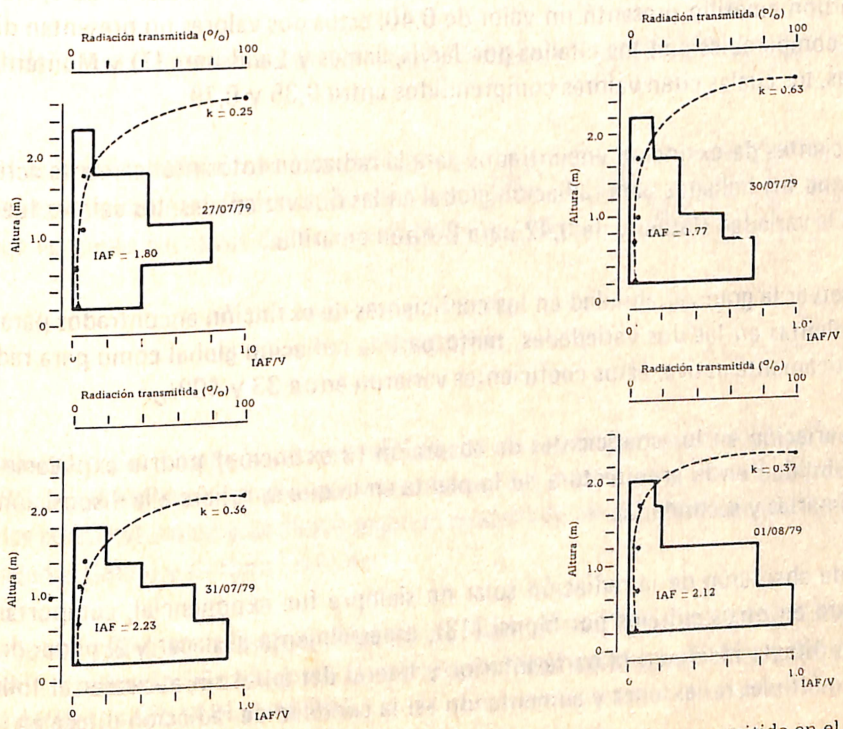


FIGURA 3.- Variación en porcentaje del flujo de radiación solar transmitida en el interior de la planta para la variedad Borbón amarillo.

Del flujo total de radiación incidente, solamente un 50% alcanzó la superficie del suelo. Sakamoto y Shaw (22) en plantaciones de soya y Kumar (8) en café, llegaron a conclusiones similares.

En los árboles de café completamente desarrollados es difícil relacionar la proporción de radiación incidente en su interior con los ángulos de las ramas, ya que en la planta adulta la disposición de hojas es compleja por la formación de ramas primarias y secundarias las cuales no presentan una disposición definida sino al azar; la disposición de las hojas debería ser tratada por medio de distribuciones de probabilidad.

En las plantas jóvenes la disposición de las ramas es más definida y la radiación solar incidente estaría relacionada más estrechamente con los ángulos de las ramas, siendo un indicativo de que la planta puede soportar altas o bajas densidades de siembra.

Coefficiente de extinción.

Los coeficientes de extinción para radiación global de onda corta y para radiación fotosintéticamente activa en las variedades Catuai y Borbón amarillo, se presentan en la tabla 5.

El coeficiente de extinción para radiación global en la variedad Catuai es de 0,41. La variedad Borbón amarillo presentó un valor de 0,40; estos dos valores no presentan diferencia y son comparables con los citados por Jarvis, James y Landsberg (7) y Monteith (15), en bosques, los cuales citan valores comprendidos entre 0,35 y 0,79.

Los coeficientes de extinción encontrados para la radiación fotosintéticamente activa son mayores que los hallados para radiación global en las dos variedades; los valores fueron de 0,49 para la variedad Catuai y de 0,42 para Borbón amarillo.

Es de observar la gran variabilidad en los coeficientes de extinción encontrados para las diferentes plantas en las dos variedades, tanto para la radiación global como para radiación fotosintéticamente activa; estos coeficientes variaron entre 33 y 40%.

La gran variación en los coeficientes de absorción (o extinción) podría explicarse por la gran variabilidad en la arquitectura de la planta en lo que se refiere a la disposición de las ramas primarias y secundarias.

La tasa de absorción de la radiación solar no siempre fue exponencial, comportamiento encontrado en otros cultivos por Monsi (13); especialmente al nacer y al poner del sol la radiación directa incide en la parte inferior y lateral del árbol sin atravesar el follaje originando múltiples reflexiones y aumentando así la cantidad de radiación difusa en la parte

Del flujo total de radiación incidente, solamente un 50% alcanzó la superficie del suelo. Sakamoto y Shaw (22) en plantaciones de soya y Kumar (8) en café, llegaron a conclusiones similares.

En los árboles de café completamente desarrollados es difícil relacionar la proporción de radiación incidente en su interior con los ángulos de las ramas, ya que en la planta adulta la disposición de hojas es compleja por la formación de ramas primarias y secundarias las cuales no presentan una disposición definida sino al azar; la disposición de las hojas debería ser tratada por medio de distribuciones de probabilidad.

En las plantas jóvenes la disposición de las ramas es más definida y la radiación solar incidente estaría relacionada más estrechamente con los ángulos de las ramas, siendo un indicativo de que la planta puede soportar altas o bajas densidades de siembra.

Coefficiente de extinción.

Los coeficientes de extinción para radiación global de onda corta y para radiación fotosintéticamente activa en las variedades Catuai y Borbón amarillo, se presentan en la tabla 5.

El coeficiente de extinción para radiación global en la variedad Catuai es de 0,41. La variedad Borbón amarillo presentó un valor de 0,40; estos dos valores no presentan diferencia y son comparables con los citados por Jarvis, James y Landsberg (7) y Monteith (15), en bosques, los cuales citan valores comprendidos entre 0,35 y 0,79.

Los coeficientes de extinción encontrados para la radiación fotosintéticamente activa son mayores que los hallados para radiación global en las dos variedades; los valores fueron de 0,49 para la variedad Catuai y de 0,42 para Borbón amarillo.

Es de observar la gran variabilidad en los coeficientes de extinción encontrados para las diferentes plantas en las dos variedades, tanto para la radiación global como para radiación fotosintéticamente activa; estos coeficientes variaron entre 33 y 40%.

La gran variación en los coeficientes de absorción (o extinción) podría explicarse por la gran variabilidad en la arquitectura de la planta en lo que se refiere a la disposición de las ramas primarias y secundarias.

La tasa de absorción de la radiación solar no siempre fue exponencial, comportamiento encontrado en otros cultivos por Monsi (13); especialmente al nacer y al poner del sol la radiación directa incide en la parte inferior y lateral del árbol sin atravesar el follaje originando múltiples reflexiones y aumentando así la cantidad de radiación difusa en la parte

TABLA 5.- COEFICIENTE DE EXTINCION (k) PARA RADIACION GLOBAL Y FOTOSINTETICAMENTE ACTIVA EN *Coffea arabica* L., VARIEDADES CATUAI Y BORBON AMARILLO, PIRACICABA 1979.

Planta	Radiación global		Radiación fotosintéticamente activa	
	Catuai	Borbón amarillo	Catuai	Borbón amarillo
1	0,62	0,25	0,69	0,19
2	0,36	0,63	0,53	0,47
3	0,34	0,36	0,30	0,55
4	0,30	0,37	0,45	0,47
Promedio	0,41	0,40	0,49	0,42
Desvío patrón	0,15	0,16	0,16	0,16
C. V. %	37	40	33	38

inferior del árbol, comparada con los valores observados en el interior de las capas superiores.

En las horas del medio día el comportamiento fue exponencial para la mayoría de las observaciones, ya que la disminución de la radiación se debía a la absorción de la energía solar por las capas sucesivas del follaje desde la parte superior hasta la inferior del árbol.

RESUMEN

El estudio tuvo por objetivos conocer el balance de los flujos de radiación solar de onda corta (0,3 a 3,0 μm) y fotosintéticamente activa (0,3 a 0,75 μm) y determinar las modificaciones cuantitativas de esos flujos según el modelo de Monsi y Saeki, en *Coffea arabica* L., variedades Catuai y Borbón amarillo.

El trabajo se realizó en la Escuela Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, SP, Brasil, utilizando piranómetros de termopila desarrollados por Jaramillo y Santos, con adaptación de filtros Wratten 88A.

Los balances de radiación se realizaron en la parte externa del cultivo y en cuatro niveles en el interior del árbol.

Los valores de albedo observados en las variedades Catuai y Borbón amarillo no difieren apreciablemente, siendo sus valores de 0,189 y 0,181 respectivamente.

El follaje de la variedad Catuai, intercepta 96^o/_o de la radiación solar que incide en la parte externa, transmitiendo solamente un 4^o/_o a la superficie del suelo. Para la variedad Borbón amarillo estos valores son de 95^o/_o y 5^o/_o respectivamente.

La primera capa de follaje en la variedad Catuai intercepta 88^o/_o de la radiación que alcanza la parte externa, quedando disponible para las capas internas un 8^o/_o. En las plantas de la variedad Borbón amarillo se observan valores de 93^o/_o y 2^o/_o.

El coeficiente de extinción para la radiación global de onda corta en la variedad Catuai es de 0,41, siendo de 0,40 para la variedad Borbón amarillo. Los coeficientes de extinción para la radiación fotosintéticamente activa en las variedades Catuai y Borbón amarillo fueron de 0,49 y 0,42 respectivamente. Se observó gran variabilidad en los coeficientes de extinción en las plantas de las dos variedades.

SUMMARY

An experiment was carried out in order to know the balance of the flows of solar radiation of both short wave (0,3 - 3,0 μm) and photosynthetically active (0,3 - 0,75 μm) radiation and to determine the quantitative modifications of these flows according to the model of Monsi and Saeki, in *Coffea arabica* L., varieties Catuai and Borbon. The work was done in The Superior School of Agriculture "Luiz de Queiroz", Piracicaba - SP - Brazil. Thermocouple pyranometers, developed by Jaramillo and Santos, were used adapted with Wratten 88A filters.

Radiation balances were determined in the external part of the crop as well as in four levels within the tree.

Albedo values recorded on both Catuai and yellow Borbon varieties were similar and on the order of 0.189 and 0.181, respectively.

The canopy of the Catuai variety intercepted 96 percent of the solar radiation which hits the external part of the plant, thus transmitting only 4 percent to the soil surface. For the Borbon variety, these values were 95 and 5 percent, respectively.

Los balances de radiación se realizaron en la parte externa del cultivo y en cuatro niveles en el interior del árbol.

Los valores de albedo observados en las variedades Catuai y Borbón amarillo no difieren apreciablemente, siendo sus valores de 0,189 y 0,181 respectivamente.

El follaje de la variedad Catuai, intercepta 96% de la radiación solar que incide en la parte externa, transmitiendo solamente un 4% a la superficie del suelo. Para la variedad Borbón amarillo estos valores son de 95% y 5% respectivamente.

La primera capa de follaje en la variedad Catuai intercepta 88% de la radiación que alcanza la parte externa, quedando disponible para las capas internas un 8%. En las plantas de la variedad Borbón amarillo se observan valores de 93% y 2%.

El coeficiente de extinción para la radiación global de onda corta en la variedad Catuai es de 0,41, siendo de 0,40 para la variedad Borbón amarillo. Los coeficientes de extinción para la radiación fotosintéticamente activa en las variedades Catuai y Borbón amarillo fueron de 0,49 y 0,42 respectivamente. Se observó gran variabilidad en los coeficientes de extinción en las plantas de las dos variedades.

SUMMARY

An experiment was carried out in order to know the balance of the flows of solar radiation of both short wave (0,3 - 3,0 μm) and photosynthetically active (0,3 - 0,75 μm) radiation and to determine the quantitative modifications of these flows according to the model of Monsi and Saeki, in *Coffea arabica* L., varieties Catuai and Borbon. The work was done in The Superior School of Agriculture "Luiz de Queiroz", Piracicaba - SP - Brazil. Thermocouple pyranometers, developed by Jaramillo and Santos, were used adapted with Wratten 88A filters.

Radiation balances were determined in the external part of the crop as well as in four levels within the tree.

Albedo values recorded on both Catuai and yellow Borbon varieties were similar and on the order of 0.189 and 0.181, respectively.

The canopy of the Catuai variety intercepted 96 percent of the solar radiation which hits the external part of the plant, thus transmitting only 4 percent to the soil surface. For the Borbon variety, these values were 95 and 5 percent, respectively.

In the Catuai variety, the first canopy layer intercepted 88 percent of the radiation which reaches the external part, the remaining 8 percent was available for the internal layers. In plants of the yellow Borbon variety, values of 93 and 2 percent were observed.

The extinction coefficient for total short wave radiation measured for the Catuai variety was 0.41 and 0.40 for the Borbon variety. Extinction coefficients for photosynthetically active radiation were 0.49 for the Catuai variety and 0.42 for the yellow Borbon. Large variability was observed in the extinction coefficients for the plants of the two varieties.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- ALVIM, P. de T. Cacao. In: Alvim, P. de T.; Kozlowoski, T. T. eds. Ecophysiology of tropical crops. New York, Academy Press. 1977. p. 279-310.
- 2.- BUDYKO, M. L. Climate and life. New York. Academy Press. 1974. 507.p. (International Geophysics Series. vol. 18).
- 3.- CANNEL, M. G. R. Crop physiological aspects of coffee bean Yield. Kenya Coffee (Kenya) 41 (484):245-253. 1976.
- 4.- GAUSMAN, H. W.; ALLEN, W. A.; CARDENAS, R.; RICHARDSON, J. Reflectance discriminations of cotton and corn and four growth Stage. Agronomy Journal (EE. UU.) 65(2): 194-198. 1973.
- 5.- HELLER, H. Estimations of photosynthetically active leaf area in forest. In: Integrated experimental ecology; methods and results ecosystem in the German Solling Protect. Berlin. Springer-Verlang. 1971. p. 29-31.
- 6.- JARAMILLO R., A.; SANTOS, J. M. dos. Diseño de un piranómetro para medir el flujo de radiación de onda corta en los cultivos. Cenicafé (Colombia) 31(2):77-83. 1980.
- 7.- JARVIS, P. G.; JAMES, G. B.; LANDSBERG, J. J. Coniferous forest. In: Monteith, J. L. ed. Vegetation and the atmosphere. Londres. Academy Press. 1976, vol. 2, p. 171-240.
- 8.- KUMAR, D. Investigation into some physiological aspects of high density planting of *Coffea arabica* L. Kenya Coffee (Kenya) 43(510):263-272. 1978.
- 9.- LANDSBERG, J. J.; JARVIS, P. G.; SLATER, M. B. The radiation regime of a spruce forest. In: Slayter, R. O. ed. Plant response to climate factors. Proceedings of the Uppsala Symposium. Paris, UNESCO. 1973, p. 411-418.
- 10.- LEMEUR, R. I.; BLAD, B. L. A critical review of light models for estimating the Shortwave radiation, regime of plant canopies. Agricultural Meteorology (Holanda) 14(1/2):255-286. 1974.
- 11.- LEMEUR, R. L.; ROSENBERG, N. J. Reflectant induce modification of soybean canopy radiation balance II. A quantitative and qualitative analysis of radiations reflected from a green soybean canopy. Agronomy journal (EE. UU.) 67(3):301-306. 1975.

- 12.- LOOMIS, R. S.; WILLIAMS, W. A.; DUNCAN, W. G. Community architecture and the productivity of terrestrial plant communities. In: San Pietro, F. A. ed. Harvesting the sun. New York, Academy Press, 1967, p. 291-308.
- 13.- MONSI, M. Mathematical models of plan communities. In: Eckhart, F. E. ed. Functioning of terrestrial ecosystems at the primary productions level. Proceedings of the Copenhagen Symposium. Paris, UNESCO. 1968, p. 131-149.
- 14.- MONTEITH, J. L. Light distribution and photosynthesis in field crops, *Annals of Botany* (Inglaterra) 29(113):17-37. 1965.
- 15.- MONTEITH, J. L. Light interception and radiative exchange in crops stands. In: Eastin, J. D. ed. Physiological aspects of crop yield. Madison, American Society of Agronomy, 1969, p. 89-111.
- 16.- NEWTON J., E.; BLACKMAN, G. E. The penetration of solar radiation through leaf canopies different Structure. *Annals of Botany* (Inglaterra) 34(135):329-348, 1970.
- 17.- NICHIPOROVITCH, A. A. Aims of research of the photosynthesis of plants as a factor in productivity. In: Nichiporovitch, A. A. ed. Photosynthesis of productive systems. Jerusalem, Program for Scientific translation. 1967, p. 3-36.
- 18.- ROSS, J. Role of solar radiation in the photosynthesis of crops. In: Nichiporovitch, A. A. ed. Photosynthesis of productive system. Jerusalem, Program for Scientific Translation. 1957, p. 44-52.
- 19.- ROSS, J. Radiative transfer in plant communities. In: Monteith, J. L. ed. Vegetation and the atmosphere. Londres, Academy Press 1975, v. 1, p. 13-55.
- 20.- SAEKI, T. Light relations in plant communities. In: Evans, T. L. ed. Environmental control of plant growth. New York, Academy Press. 1963, p. 79-94.
- 21.- SANTOS, J. M; dos. Contribução aos estudos para a determinação do albedo. Piracicaba, ESALQ-USP. 1957, 48 p.
- 22.- SAKAMOTO, C. M.; SHAW, R. S. Light distribution in field Soybeans Canopies. *Agronomy Journal* (EE. UU.) 59(1):7-9, 1967.
- 23.- SELLERS, W. D. Physical climatology. Chicago, The University of Chicago Press. 1965, 242 p.
- 24.- SZEICZ, G.; MONTEITH, J. L.; SANTOS, J. M. dos. Tube solarimeter to measure radiation among plants. *Journal Applied Ecology* (Inglaterra) 1:169-174, 1964.
- 25.- SZEICZ, G. Solar radiation in crop canopies. *Journal Applied Ecology* (Inglaterra) 11(3):1117-1131, 1974.
- 26.- STANHILL, G.; HOFSTEDE, J.; KALMA, J. D. Radiation balance of Natural and agricultural vegetation. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society* (Inglaterra) 92(392):128-140. 1966.

APENDICE N° 1.- SIMBOLOS UTILIZADOS.

Los símbolos utilizados en este estudio son los recomendados por la Organización Meteorológica Mundial.

- K ↓ Densidad del flujo de radiación solar global de onda corta, en el sentido de arriba hacia abajo y que incide en una superficie plana horizontal.
- K ↑ Idéntico al anterior pero en el sentido de abajo hacia arriba.
- K_D ↓ Densidad del flujo de radiación solar directa de onda corta, en el sentido de arriba hacia abajo y que incide en una superficie plana horizontal.
- K_D ↑ Idéntico al anterior pero en el sentido de abajo hacia arriba.
- K_d ↓ Densidad del flujo de radiación solar difusa de onda corta, en el sentido de arriba hacia abajo y que incide en una superficie plana horizontal.
- K_d ↑ Idéntico al anterior pero en el sentido de abajo hacia arriba.
- K^* Densidad del flujo del balance de radiación solar de onda corta.
- L ↓ Densidad del flujo de radiación de onda larga de arriba hacia abajo (desde la atmósfera a la superficie).
- L ↑ Idéntico al anterior pero de abajo hacia arriba.
- K_{PI} ↓ Irradiancia fotosintética que incide en el cultivo de arriba hacia abajo.
- K_{PI} ↑ Idéntico al anterior pero de abajo hacia arriba.
- K_{PI}^* Balance de irradiancia fotosintética.
- ρ Albedo.
- Q^* Flujo correspondiente al balance de radiación global.

Los símbolos: K_F ↓ , K_F ↑ , K_{DF} ↑ , K_{dF} ↑

K_{DF} ↓ , K_{dF} ↓ y K_F^*

tienen las mismas definiciones ya mencionadas con la diferencia de que se refieren a la faja de radiación con longitud de onda superiores a 0,75 μm .