

5 La radiación solar



El sol suministra cerca del 99% de la energía requerida para los procesos físicos y biológicos que ocurren en el sistema terrestre. La radiación solar es uno de los principales elementos que determina el microclima del cultivo; su energía condiciona la temperatura del aire y del suelo, el movimiento del viento, la evapotranspiración y la fotosíntesis, de tal manera que su cantidad, el grado de interceptación y la eficiencia en su uso, son factores fundamentales en el crecimiento de las plantas.

La radiación solar está compuesta por ondas electromagnéticas de diferentes longitudes de onda. La cantidad de energía radiante recibida en el límite superior de la atmósfera terrestre a la distancia media entre el sol y la Tierra, se denomina *constante solar*, con un valor de 1.370 watt/metro² (1,96 calorías/centímetro².minuto). La atmósfera absorbe y dispersa selectivamente la radiación solar, modificando el flujo y la calidad del espectro que incide en la superficie terrestre. La magnitud de ese fenómeno depende de la masa relativa de la atmósfera (Bonhomme, 1993).

La Tierra es el tercer planeta de nuestro sistema solar y se mueve alrededor del sol en una órbita elíptica cada 364,25 días. Al punto más cercano se le llama perihelio y al más lejano afelio. El movimiento de translación elíptica origina durante el año cambios en la cantidad de radiación solar que alcanza la Tierra (Figura 5.1).

Procesos que modifican la radiación solar durante su paso por la atmósfera

Reflexión o albedo

Es la fracción de la radiación incidente reflejada por las nubes (33%, en promedio, para el sistema terrestre).

Difusión y absorción

La difusión ocurre cuando una parte de la radiación solar choca contra las moléculas del aire, del agua y contra el polvo atmosférico al atravesar la atmósfera. La absorción, cuando otra parte (la radiación en las franjas azul, violeta y ultravioleta del espectro solar) se absorbe por el ozono. Parte de la radiación visible se absorbe por el oxígeno y una buena parte del infrarrojo se absorbe por el dióxido de carbono, por el vapor de agua, por otros gases, por otras moléculas pequeñas suspendidas en el aire y por el polvo atmosférico.

La radiación que no es modificada por la acción de los componentes atmosféricos se denomina radiación *directa*. La radiación *difusa* es aquella parte de la radiación que se dispersa hacia otras regiones de la bóveda celeste, antes de salir de la atmósfera, o antes que llegue a la superficie terrestre. La suma de la radiación directa y la radiación difusa se denomina radiación *global*.

Si se acepta que las radiaciones de longitudes de onda (λ) menores de 3.000 nm se pueden considerar como de onda corta, entonces la radiación global es de onda corta. La radiación global se divide en varias franjas de acuerdo con su longitud de onda (Figura 5.2):

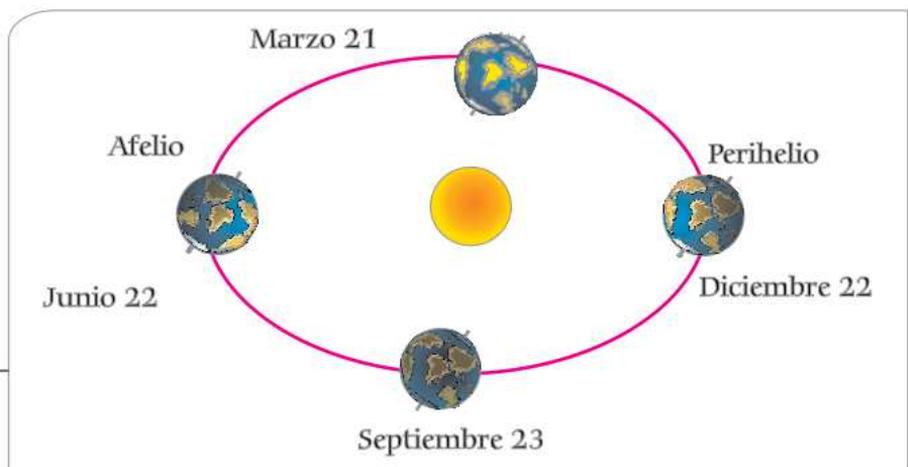


Figura 5.1.
Movimiento
de translación
de la Tierra.

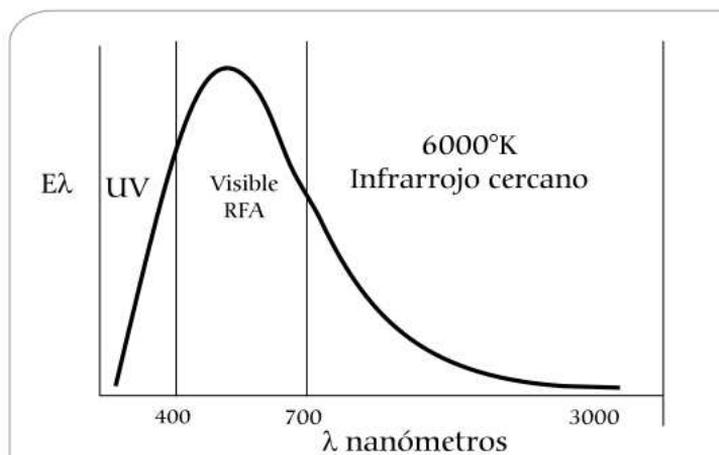


Figura 5.2.
Espectro de radiación de onda corta

Radiación ultravioleta (UV) ($\lambda < 320\text{ nm}$). En condiciones naturales, estas radiaciones son absorbidas en gran parte por el ozono y el oxígeno atmosféricos.

Radiación visible ($400 < \lambda < 700\text{ nm}$). Es la parte del espectro electromagnético denominada “luz visible”, esta atraviesa la atmósfera perdiendo poca energía, y es la franja donde ocurren los procesos fotobiológicos como la fotosíntesis (Radiación Fotosintéticamente Activa, RFA), la actividad del fitocromo en los vegetales, y la visión, en los animales superiores.

Radiación infrarroja cercana (IRC) ($750 < \lambda < 3.000\text{ nm}$). La mayor parte de esta radiación es absorbida por el dióxido de carbono y el vapor de agua atmosféricos.

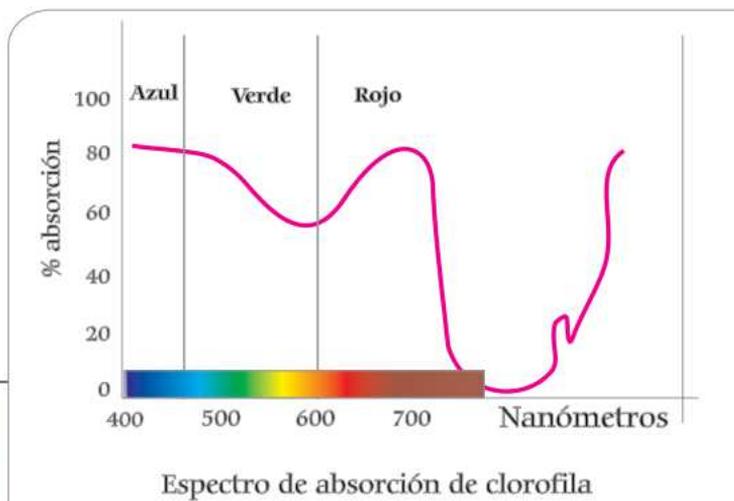
Características de la radiación visible

Las plantas verdes utilizan la RFA para convertir el CO_2 y el agua en biomasa y oxígeno molecular durante el proceso de la fotosíntesis. Las principales características de la RFA que afectan el comportamiento biológico son la calidad, la intensidad y la duración (Figura 5.3).

La radiación fotosintéticamente activa es convertida a través de la fotosíntesis en energía química y posteriormente en biomasa. Las principales características de la luz son la calidad, la intensidad y la duración.

La calidad, se refiere a los diferentes rangos de longitudes de onda que constituyen el espectro electromagnético visible y que se asocian al concepto de color. Está relacionada con el efecto de los diferentes colores que constituyen la luz: violeta, azul, verde, amarillo, naranja y rojo. Cada uno de estos colores es absorbido en diferentes proporciones por la clorofila en el proceso de la fotosíntesis. Por ejemplo, en un alto porcentaje de los ecosistemas se absorbe la mayoría del rojo y del azul, transmitiéndose el verde y el rojo lejano. La calidad de la luz es un factor que limita el crecimiento de muchas plantas debajo del follaje, aunque la cantidad parezca la adecuada.

Figura 5.3.
Espectro de absorción de la radiación solar por la clorofila



La intensidad se refiere a la cantidad de energía que alcanza una superficie en unidad de tiempo. A altas intensidades de luz los pigmentos de la fotosíntesis se saturan, esto significa que una cantidad adicional no significa un incremento en la tasa de fotosíntesis.

La duración es el tiempo de incidencia de la radiación solar.

El crecimiento de las plantas está influenciado por las diferentes longitudes de onda del espectro solar (Klar, 1984):

- 1ª banda, longitudes de onda (λ), mayores de 1.000 nanómetros (nm) son absorbidas por la planta sin afectar los procesos bioquímicos.
- 2ª banda, $1000 > \lambda > 720$ nm, es la región que afecta la elongación de las plantas, actuando sobre el fotoperiodismo, el control de la floración, la germinación de las semillas y la coloración de los frutos.
- 3ª banda, $720 > \lambda > 600$ nm, produce gran actividad fotosintética por actuar directamente sobre la clorofila.
- 4ª banda, $610 > \lambda > 500$ nm, produce un pequeño efecto sobre la actividad fotosintética en el verde y débil actividad de formación.
- 5ª banda, $510 > \lambda > 400$ nm, es la región de mayor absorción de clorofila y de los pigmentos amarillos; es una región de fuerte actividad fotosintética en el azul-violeta y en los efectos de formación.
- 6ª banda, $400 > \lambda > 315$ nm, produce efectos en el desarrollo de la planta, dando origen a plantas más pequeñas y a hojas más gruesas.

- 7ª banda, $315 > \lambda > 280$ nm, es perjudicial para la mayoría de las plantas.
- 8ª banda, $\lambda < 280$ nm, mata rápidamente a las plantas.

La Radiación Fotosintéticamente Activa (RFA), está comprendida entre los 400 y 700 nanómetros y corresponde aproximadamente a la mitad de la radiación global (Ross, 1981).

Radiación termal o calor

La superficie terrestre emite radiación de onda larga con longitudes de onda entre 5.000 y 10.000 nanómetros. Todos los objetos con temperaturas superiores al cero absoluto emiten radiaciones proporcionales a la cuarta potencia de su temperatura absoluta. Cerca del 90% de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre al espacio es absorbida por la atmósfera, especialmente por el vapor de agua, el gas carbónico y por las nubes. Gran parte de ella regresa a la superficie terrestre (Figura 5.4).

Leyes de la radiación

(Dogniaux, 1994; Rosenberg, 1974)

Diferentes leyes describen las propiedades de la radiación electromagnética emitida por un radiador perfecto, usualmente llamado *cuerpo negro*, un objeto hipotético que absorbe toda la radiación que incide en él, y no refleja ni transmite la radiación. En realidad, no existe un radiador perfecto en la naturaleza pero el sol y la Tierra se aproximan a un cuerpo negro.

Un resumen de los conceptos y de las leyes de la radiación se presenta a continuación:

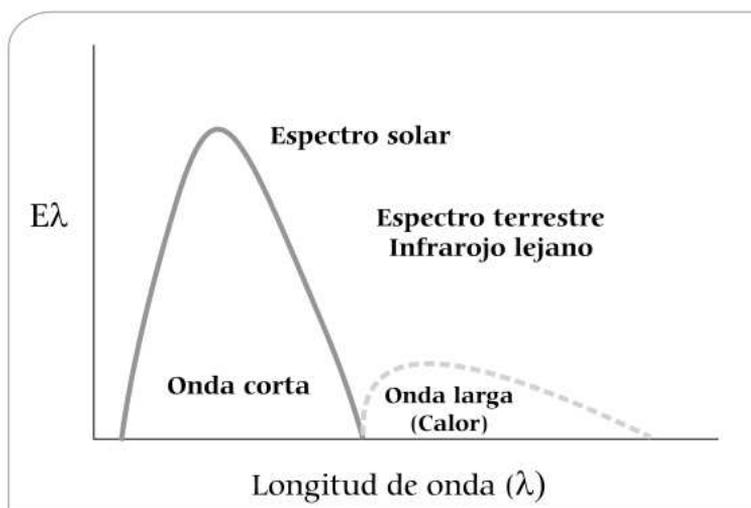


Figura 5.4.
Espectros de radiación
de onda corta y onda
larga

Irradiancia (I) o densidad de flujo de radiación solar

Es la cantidad de energía recibida por unidad de tiempo y por unidad de área (Figura 5.5). Las unidades de Irradiancia se pueden expresar en ergios/centímetro².minuto, o en Watt/metro² o en calorías./centímetro².minuto. Los valores de irradiancia cambian con la altitud solar (altura del sol sobre el horizonte), a menor altitud solar menor irradiancia.

Ley del Coseno de Lambert

La irradiancia de una superficie depende de la exposición relativa a la fuente de radiación. Una superficie, por ejemplo, una hoja expuesta a un rayo perpendicular a ella (ángulo recto), recibe la máxima radiación por unidad de área. Si la superficie está inclinada al rayo la energía se distribuye sobre una área mayor y por tanto, la irradiancia es menor. La irradiancia en la superficie mayor (I) se calcula con la ley del coseno (Figura 5.6):

La altitud solar, es el ángulo del sol sobre el horizonte; cuando se incrementa la irradiancia recibida sobre la superficie de la tierra también aumenta.

Figura 5.5.
Densidad de flujo de radiación solar

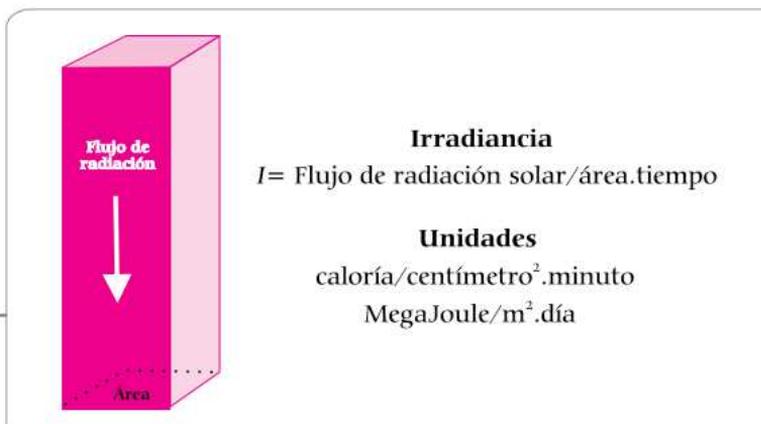
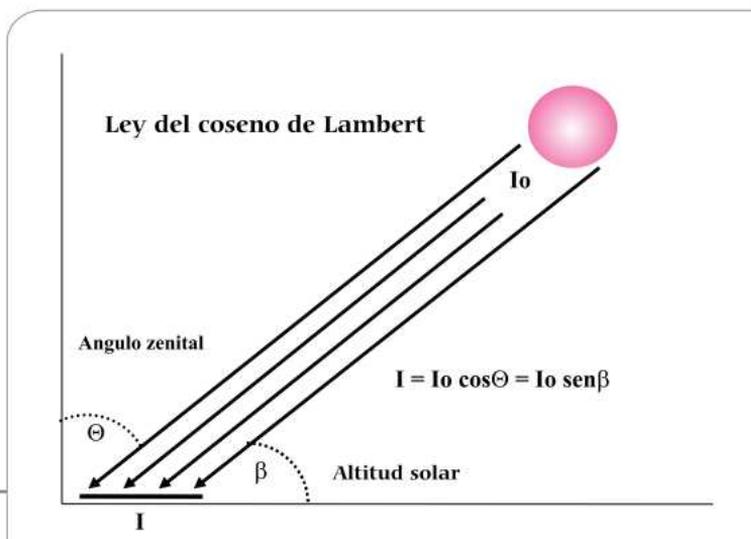


Figura 5.6.
Ley del coseno de Lambert



De acuerdo con el principio de conservación de la energía (Figura 5.7), del total de energía que ingresa a un sistema una cantidad de energía (E) se refleja, otra se absorbe y otra se transmite.

$$\text{Energía total} = E \text{ reflejada} + E \text{ absorbida} + E \text{ transmitida}$$

Si dividimos cada uno de los términos de la expresión anterior por la energía total, se tiene:

$$1 = r + a + t$$

en donde r , a y t que se conocen respectivamente como reflexión (r), absorción (a) y transmisión (t).

Ley de Kirchhoff

Establece que el coeficiente de absorción de un material para radiación de una longitud de onda específica es igual a su emisividad en la misma longitud de onda.

Ley de Planck.

La tasa de radiación emitida por un cuerpo negro depende de la temperatura absoluta del cuerpo y de la longitud de onda específica de la radiación.

Ley de desplazamiento de Wien

La máxima intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro es inversamente proporcional a la temperatura absoluta del cuerpo negro.

$$\lambda_{\text{max}} = 0,2898 \text{ (cm}^\circ\text{K)} / T(^{\circ}\text{K)}$$

Ley de Stefan-Bolzman

Establece que la tasa a la cual un cuerpo negro irradia energía (Emisividad, E) es directamente proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo radiante (T, °Kelvin) (Figura 5.8)

$$E = \sigma T^4$$

σ es la constante de Stefan-Boltzman igual a $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

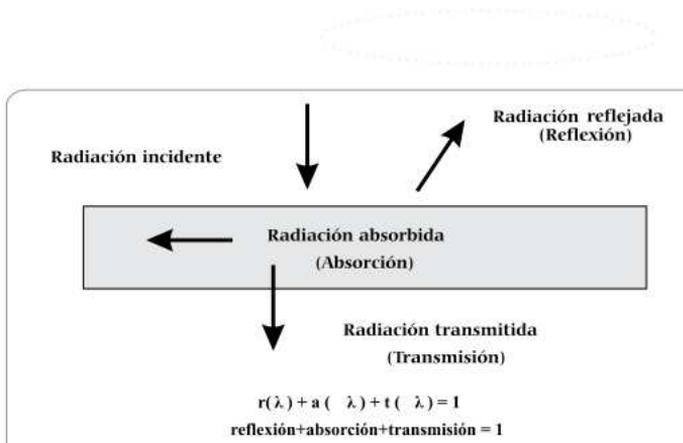
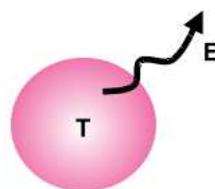


Figura 5.7.
Principio de conservación de la energía

Ley de Stefan-Boltzman

$$E = \sigma T^4$$



E , emisividad del cuerpo negro

σ , constante $5,67 \cdot 10^{-5} \text{ ergios cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ K}^{-4}$

T temperatura en $^{\circ}\text{K}$

Figura 5.8.
Emisividad de un
cuerpo negro. Ley de
Stefan-Boltzman

Balance de radiación y de energía

La disponibilidad de la radiación solar necesaria para los procesos físicos y biológicos que ocurren en un cultivo, está determinada en primer término por el macroclima de la región (latitud y día del año), por las condiciones de nubosidad que determinan las cantidades de radiación directa y difusa, y por las propiedades del follaje como el tamaño y disposición de las hojas, estructura de la planta, distancia de siembra. Estas características determinan cambios en los procesos de evaporación, calentamiento del aire y calentamiento del suelo.

Balance de radiación solar

La radiación neta es la diferencia entre la radiación solar entrante y la saliente tanto de onda corta como de onda larga. Un balance de energía dentro del cultivo permite conocer de que manera las plantas o el suelo utilizan y distribuyen la radiación neta en sus diferentes componentes. Los balances de radiación son aplicables a la atmósfera, la superficie terrestre, la superficie del océano, en la planta o en la hoja.

El balance de radiación sobre una superficie se puede expresar de la siguiente manera:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot (K_{D\downarrow} + K_{d\downarrow}) + (L_{\uparrow} - L_{\downarrow})$$

En donde:

- R_n radiación neta
- α albedo, es la proporción de radiación de onda corta reflejada por la superficie
- $K_{D\downarrow}$ radiación directa de onda corta (Longitud de onda desde 300 a 3.000 nanómetros, nm) que entra a la superficie
- $K_{d\downarrow}$ radiación difusa de onda corta que entra a la superficie
- L_{\uparrow} radiación de onda larga (mayor de 3.000 nm) emitida por la superficie
- L_{\downarrow} radiación de onda larga que llega a la superficie

Balance de energía

Un balance de energía se presenta a continuación (Rosenberg, 1974):

$$R_n = H + \lambda E + G + P + M$$

- R_n radiación neta
 H flujo de calor sensible, utilizado para calentar el aire
 λE flujo de calor latente empleado para evaporar el agua
 (λ, calor latente de evaporación, E, es la cantidad de agua evaporada)
 G flujo de calor en el suelo.
 P, M representa la fotosíntesis y otros intercambios de energía (actividad metabólica y almacenamiento de calor en los tejidos de la planta).

La radiación solar y el brillo solar en Colombia

La cantidad de radiación solar realmente absorbida por la superficie en un período de tiempo dado es afectada por la latitud. Por encontrarse Colombia cerca de la zona ecuatorial recibe abundante radiación solar durante todo el año. La radiación solar media varía entre 35,7 y 36,1 MJ/m².día¹ para las latitudes de 12° Norte y 0° respectivamente; los valores máximos se presentan en marzo y septiembre (Figura 5.9).

La radiación global presenta modificaciones en sus cantidades diarias debido a la exposición de la ladera y a la ocurrencia de nubosidad por la influencia de la circulación atmosférica local (vientos valle-montaña-valle). Este comportamiento se observa claramente en un transecto situado en la vertiente occidental de la Cordillera Oriental, (Figura 5.10), en donde el máximo valor de la radiación solar ocurre a una altitud de 172 m (Palanquero - Cundinamarca) sobre el valle del río Magdalena (20,5 MJ/m².día). Desde este nivel hacia arriba se observa una disminución progresiva de la radiación hasta una altitud de 1.550 m (Tibacuy - Cundinamarca) en donde se presenta un valor mínimo de 13,8 MJ/m².día. A partir de esta altitud se registra un aumento de la radiación hasta un valor de 15,3 MJ/m².día a 2.553 m (Tibaitatá - Cundinamarca). La región de disminución

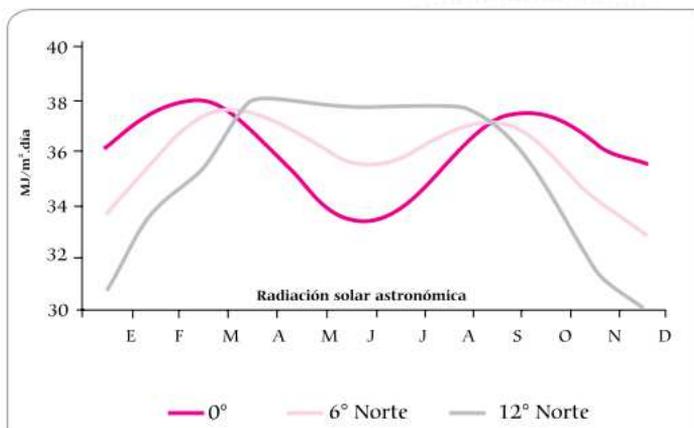


Figura 5.9.
Radiación solar astronómica entre 0 y 12° Norte

de la radiación solar se explicaría en parte por la presencia de la zona de neblina o bosques de niebla presentes en las laderas de la Zona Andina.

Insolación (Brillo Solar)

La insolación puede expresarse como el número de horas de brillo solar de una localidad (número de horas de radiación directa).

El valor máximo de brillo solar que llega al tope de la atmósfera entre la línea ecuatorial y los 12° de latitud norte varían entre 11,3 horas.día y 12,6 horas/día. Estos valores se reducen al llegar a la superficie terrestre influidos por el ciclo diario de la nubosidad, la orientación y exposición de las laderas y por la amplitud del horizonte (Figura 5.11).

El transcurso anual del brillo solar en la zona andina sigue una onda opuesta a la distribución de las lluvias, originada por el movimiento de la Zona de Confluencia Intertropical -ZCIT-.

Figura 5.10.
Variación de la radiación solar con la altitud.

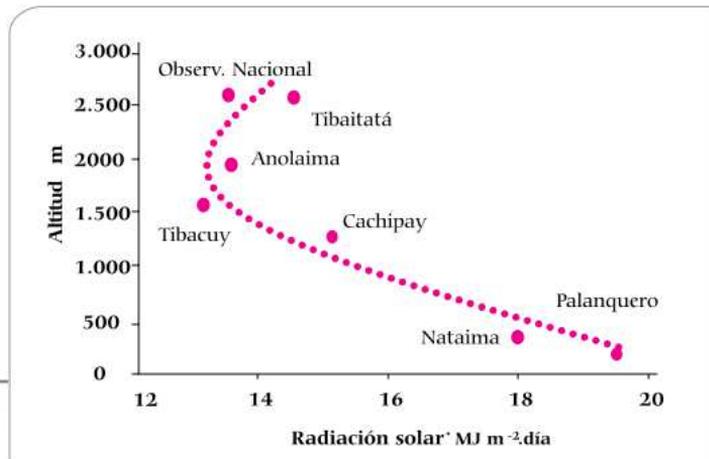
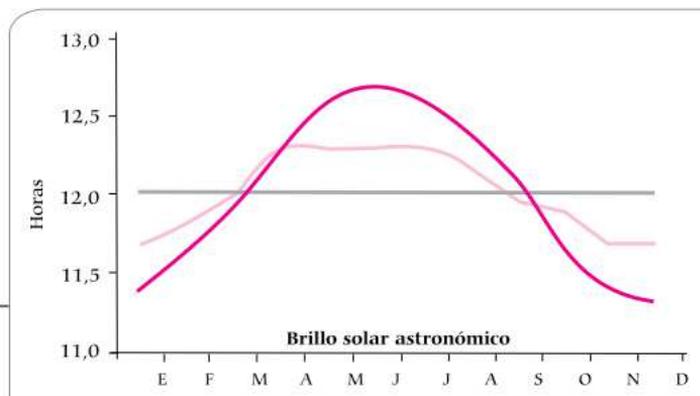


Figura 5.11.
Variación del brillo solar astronómico entre 0 y 12° Norte.



En los valles interandinos de los ríos Cauca y Magdalena, la distribución del brillo solar es bimodal con sus valores máximos en los meses de menor lluvia como enero-febrero y julio-agosto. En las regiones externas de las cordilleras como los Llanos Orientales y la Costa Atlántica la distribución tiende a ser unimodal con valores máximos en diciembre-enero y valores mínimos en junio-julio. Para Colombia, los mayores valores de brillo solar se registran en la península de la Guajira con cantidades anuales próximas a las 3.000 horas; los valores más bajos en el litoral Pacífico con 900 horas al año (Bernal, 1987; Chaves y Jaramillo, 1997).

Un ejemplo se presenta en la Figura 5.12 en donde se observan comportamientos para tres localidades de Colombia con valores altos y bajos de brillo solar.

En la mayoría de las localidades de la zona Andina ocurren cantidades entre 1.600 y 1.800 horas de brillo solar al año (Tabla 5.1). El brillo solar anual promedio para la región está próximo a las 1.550 horas/año que representa un 36% del brillo solar máximo astronómico, lo que indica alta presencia de nubosidad y en consecuencia, altas proporciones de radiación difusa; se observan valores extremos superiores a las 2.050 horas/año (47% del brillo solar máximo). El menor valor registrado está próximo a 1.050 horas/año (24% del brillo solar astronómicamente posible).

Para cada vertiente de una cuenca hidrográfica el brillo solar varía con la altitud por las diferencias en la nubosidad diurna; como un ejemplo se tiene que para la cuenca del río Chinchiná localizada en la vertiente occidental de la cordillera Central, el máximo brillo solar presenta un valor anual de 1.980 horas a 1.000 metros de altitud (Estación Santágueda) y disminuye progresivamente hasta 1.000 horas a 4.200 m (Estación Gualí).

Dependiendo de las condiciones de nubosidad las proporciones de la radiación solar incidente (radiación solar observada / radiación solar astronómica) en la superficie terrestre varían en cada localidad. Para Colombia estas proporciones están entre un valor mínimo del 20% en Bahía Solano -Chocó- y un 68% en Uribia – Guajira (Tabla 5.2).

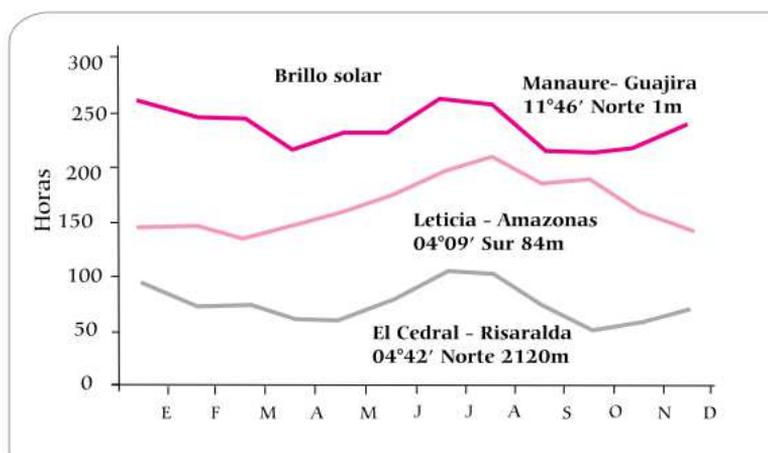


Figura 5.12. Transcurso del brillo solar mensual para tres localidades de Colombia.

Tabla 5.1. Brillo solar mensual y anual (horas) en la zona cafetera de Colombia

ESTACIÓN	E	F	M	A	M	J	JL	A	S	O	N	D	Año
Pueblo Bello	247	198	168	141	155	161	183	175	159	161	175	224	2147
F. Romero	108	85	84	78	119	114	153	152	145	117	98	98	1351
Blonay	140	106	90	84	105	111	125	134	125	118	105	122	1365
Aguas Blancas	132	104	95	116	132	164	147	124	102	102	97	108	1423
Bertha	186	144	125	116	119	116	133	139	119	127	139	163	1626
Montelíbano	158	123	119	111	133	146	182	169	146	128	132	140	1687
M. Santa Inés	145	110	109	98	111	116	127	134	114	108	97	120	1389
Misiones	148	112	104	75	71	79	99	102	103	89	92	117	1191
Tibacuy	167	124	117	99	111	116	127	123	119	116	114	152	1485
M. Valencia	160	143	140	129	133	160	186	168	129	117	123	139	1727
El Rosario	206	170	170	145	153	184	221	203	159	131	139	170	2051
Santágueda	200	167	169	148	146	144	190	177	158	142	159	179	1979
Cenicafé	185	160	160	131	129	140	173	170	145	134	137	165	1829
Naranjal	183	158	155	130	128	139	175	170	142	127	131	159	1797
Agronomía	165	125	124	97	98	111	132	127	110	97	109	140	1435
R. Escobar	180	150	146	122	124	145	166	170	143	126	126	154	1752
Llanadas	135	112	102	109	127	129	162	164	144	117	106	117	1524
Santa Helena	140	110	105	101	127	161	187	197	160	116	102	117	1623
El Jazmín	150	125	120	101	96	117	145	148	117	96	100	125	1440
El Sena	136	110	113	96	101	119	161	148	112	93	90	117	1396
La Bella	143	116	123	97	100	114	143	144	117	98	102	118	1415
Paraguacito	185	147	144	122	122	138	163	157	133	124	131	154	1720
Maracay	146	121	140	111	117	136	170	175	134	112	121	136	1619
J. Fernández	174	160	163	134	144	151	175	175	160	142	132	156	1866
M. Mallarino	154	132	135	113	116	127	167	167	134	112	110	132	1599
H. Uribe	120	111	109	92	101	120	158	148	120	98	89	103	1369
A. Gómez	167	143	147	125	117	129	172	162	138	125	128	138	1691
M. Mejía	159	141	138	121	123	138	164	164	140	127	128	132	1675
La Florida	172	158	149	120	126	143	169	170	156	130	122	154	1769
El Sauce	119	97	106	107	106	142	181	172	137	116	103	104	1490
O. Pérez	155	125	129	116	128	145	172	174	147	123	136	144	1694
La Trinidad	143	108	103	94	111	147	186	189	153	108	105	123	1570
G. Libano	152	138	134	120	143	155	197	196	174	131	116	140	1796
Chapetón	167	145	142	128	158	161	181	175	163	135	128	149	1832
El Limón	148	115	118	113	142	142	146	147	130	119	106	130	1556
L. Bustamante	97	83	82	72	81	94	103	105	89	80	72	90	1048

Tabla 5.2. Valores de transmisividad para algunas localidades de Colombia (Simbaqueva, *et al.* , 1988).

Localidad (Departamento)	Proporción de radiación %
Bahía Solano (Chocó)	20
El Mira (Nariño)	23
Villarrica (Tolima)	24
Florencia (Caquetá)	33
Moniquirá (Boyacá)	35
Manizales (Caldas)	37
Tibaitatá (Cundinamarca)	38
Chinchiná (Caldas)	42
alanquero (Cundinamarca)	45
Venecia (Antioquia)	47
Pueblo Bello (Cesar)	49
Cabo de La Vela (Guajira)	59

El albedo

Un índice utilizado en el balance de radiación solar dentro de los cultivos es el albedo, definido como la relación entre la radiación reflejada por una superficie y el total de la radiación incidente sobre la misma. Esta proporción constituye una radiación que no es utilizada en los procesos de fotosíntesis y transpiración de las plantas. En la Tabla 5.3, se relacionan algunos valores de albedo para diferentes superficies. Un rango frecuente de albedo para la mayoría de los cultivos está entre el 10 y el 20%.

Relación entre el brillo solar y la radiación solar en Colombia

La cantidad de horas de brillo solar es una medida frecuente en muchas estaciones climáticas. A partir de este valor se puede determinar la cantidad de radiación global incidente en una localidad, por medio de la relación de Angstrom:

$$R_o/RA = a + b * BSo/BSA$$

En donde:

- Ro radiación global diaria observada en la superficie terrestre (MJ/m². día, cal /cm².día).
- RA radiación global diaria astronómicamente posible (MJ/m². día, cal /cm².día).
- BSo brillo solar diario observado, horas.
- BSA brillo solar diario astronómicamente posible, horas.
- a, b coeficientes de la regresión.

La radiación solar y el brillo solar astronómicamente posible dependen de la latitud de la localidad y del día del año.

Para las condiciones de Cenicafé, Gómez y Guzmán en 1995, estimaron los coeficientes a y b de la relación de Angstrom, con un valor de $a= 0,26$ y $b= 0,51$ y un coeficiente de determinación de 0,88. Los valores de a y b están dentro de los rangos encontrados para 42 localidades situadas en un rango latitudinal muy amplio a escala mundial (Frere *et al.*,1978, Rietveld 1978).

Dentro del estudio de la radiación solar es importante conocer las proporciones de la radiación directa y difusa que inciden en una región, para su aplicación posterior en la productividad de los cultivos o para la utilización en el secamiento de productos agrícolas, calefacción del aire, calentamiento del agua u otros usos.

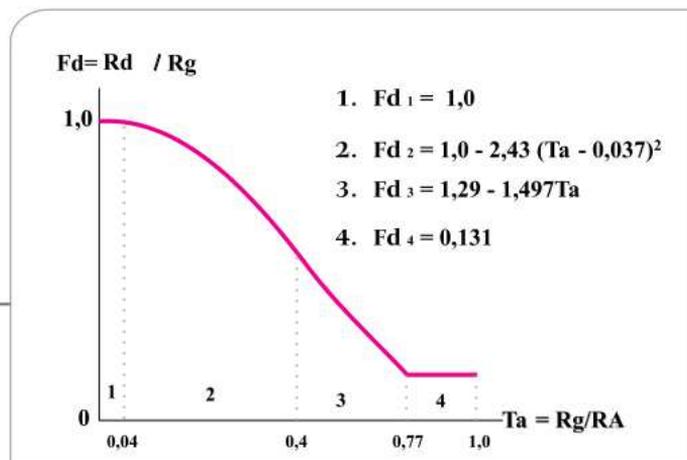
Para las condiciones de la sabana de Bogotá, Aragón *et al.*, 1996, calcularon las expresiones para estimar la radiación difusa a partir de los valores de transmisividad (Figura 5.13):

Como se observa, la proporción de la radiación difusa puede presentar relaciones de tipo lineal o cuadrático dependiendo del rango de transmisividad atmosférica que ocurra en el día. Estas expresiones pueden ser utilizadas para las condiciones climáticas de la zona cafetera.

Tabla 5.3. Albedo en varios tipos de superficies (Rosenberg, 1974; Sellers, 1974; Ayoade, 1983).

Superficie	Albedo %
Suelo negro	8-14
Bosque coníferas	5-15
Bosque tropical	15-20
Cultivos verdes	15-25
Desierto	25-30
Ciudad	14-18
Agua	5-10
Nieve	80-95
Hielo	50-70
Nube	36-90
La Tierra	33

Figura 5.13. Relación entre la fracción de radiación difusa (R_d/R_g) y la transmisividad atmosférica (R_g/RA), para las condiciones de Colombia. Aragón *et al.*, 1996.



Balances de radiación solar y de energía en una cuenca hidrográfica

La radiación solar es empleada por las comunidades vegetales principalmente en evaporar el agua, calentar el aire, calentar el suelo y una poca proporción en el proceso de la fotosíntesis, entre otros. Las tasas de evapotranspiración son mayores en un bosque que en una área deforestada. Se estima que la cuenca hidrográfica del río Amazonas en la evapotranspiración emplea alrededor del 50% de la radiación solar y en situaciones particulares puede utilizar el 80%. Se considera que por una tala masiva del bosque la proporción anterior se disminuiría y la cantidad de lluvia decrecería entre un 10% y 20%, generando cambios sustanciales en el régimen hidrológico de la Amazonia y de las áreas circunvecinas.

En el interior de un bosque el calentamiento del aire es menor, debido a que la radiación es reflejada por la parte superior y absorbida en las capas superficiales de la parte aérea (95%), quedando una proporción muy pequeña de radiación solar disponible para calentar el aire y el suelo, explicando así las menores diferencias entre la temperatura registrada en el día y en la noche.

En superficies deforestadas la mayor proporción de la radiación solar se emplea en calentar el suelo y el aire, ocurriendo grandes diferencias entre la temperatura máxima y la temperatura mínima, por ejemplo, en un desierto la temperatura del aire puede variar desde 2°C en la noche y 45°C en el día. En estas condiciones se utiliza alrededor del 93% de la radiación solar incidente.

Balace de radiación solar en un cultivo

La disponibilidad de la radiación solar necesaria para los procesos físicos y biológicos que ocurren en un cultivo está determinada en primer término por el macroclima de la región (latitud y día del año), las condiciones de nubosidad que a su vez determinan las cantidades de radiación directa y difusa y por las propiedades del follaje como son el tamaño y la disposición de las hojas, la estructura de la planta, la distancia de siembra, que determinan cambios en los procesos de evaporación, calentamiento del aire y calentamiento del suelo (Figura 5.14).

Un balance de radiación dentro de un cafetal a libre exposición solar indica que el 15% es reflejada por el cultivo (albedo), un 75% es retenida por la planta y un 10% incide en la superficie del suelo. Las proporciones anteriores varían con el manejo del cultivo y las distancias de siembra, entre otras variables.

Los valores encontrados para cafetales a libre exposición solar son semejantes a los medidos en otros cultivos como papa, pasto, caña de azúcar (Montieth, 1969) y los medidos en bosques, manzanos y cítricos (Jarvis *et al.*, 1976; Landsberg *et al.*, 1973; Proctor *et al.*, 1972; Stanhill, *et al.*, 1966) los cuales se hallan entre el 10 y 20%.

La radiación solar dentro del árbol

Las comunidades vegetales presentan un sistema de capas sucesivas de hojas parcialmente superpuestas y sombreadas unas con otras. La luz incidente es absorbida progresivamente al pasar a través de las capas. Debido a la heterogeneidad de la arquitectura de la planta, el estudio de la transferencia de radiación solar dentro del follaje es difícil de explicar y por tal razón, se tiende a simplificarla; una generalización muy aceptada considera el follaje horizontal uniforme y establece que las características de su disposición foliar y de radiación no cambian dentro de las capas horizontales y solamente dependen del índice de área foliar.

Uno de los primeros modelos para explicar la radiación solar dentro de los cultivos fue el propuesto por Monsi y Saeki en 1960 (Saeki, 1993) el cual considera que el logaritmo de la radiación relativa a una determinada altura dentro de la comunidad vegetal decrece linealmente con el incremento del índice de área foliar acumulado. En la Figura 5.15, se observa el comportamiento de la radiación solar dentro de un árbol de café de la variedad Catuai.

Figura 5.14. Esquema de un balance de radiación solar sobre un cultivo.

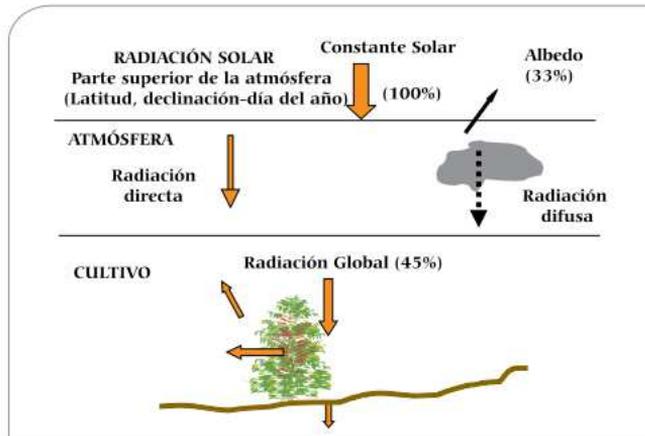
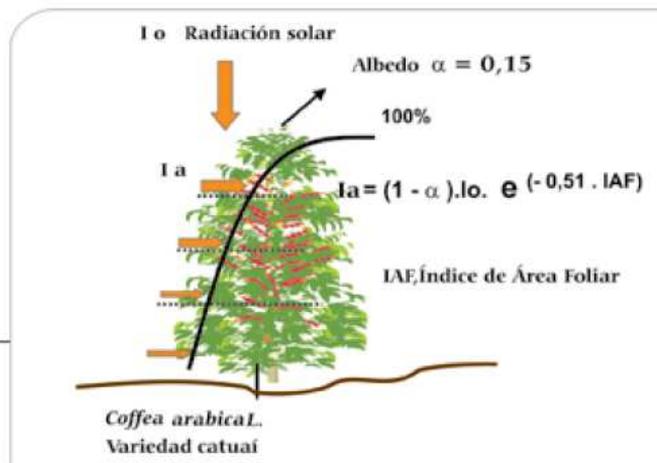


Figura 5.15. Variación de la radiación solar dentro de un árbol de café. (Jaramillo & Dos Santos, 1980)



La tasa de absorción de energía debida al follaje (coeficiente de extinción, k) estimado en el modelo de Monsi y Saeki, tiende a ser mayor en especies de hoja ancha y relativamente horizontales (k entre 0,6 y 0,9), y a presentar menores valores en especies de hojas pequeñas y erectas (k entre 0,3 y 0,5).

En árboles de café de la variedad catuaí y para las condiciones de Brasil, Jaramillo & Dos Santos, 1980 encontraron un valor para el coeficiente de extinción de 0,51. En observaciones realizadas en Chinchiná - Colombia- Castillo *et al.*, 1997, aplicaron el modelo de Monsi y Saeki para la Radiación Fotosintéticamente Activa (400 a 700 nm, RFA) estimando coeficientes de extinción (k), entre 0,41 y 0,60 para la radiación difusa y valores de 0,51 a 0,72 para la radiación directa (Tabla 5.4).

La proporción de radiación solar retenida por los árboles de café variedad Caturra es del orden de 75% para valores diarios. Los valores de transmisividad e interceptación de la radiación solar están modificados por las ramas y frutos presentes en el árbol, por el grado de defoliación, el estado vegetativo, la edad de la planta, la disposición de hojas y ramas y la distancia de siembra. Para densidades de siembra de 10.000 plantas/ha de café variedad Colombia de 3,5 años de edad se encontró una interceptación del 97% (Castillo *et al.*, 1996, 1997).

La capa externa de hojas en un árbol de café absorbe la mayor proporción de la radiación solar incidente; por ejemplo, en árboles de café de la variedad Borbón amarillo el primer estrato interceptó el 93% de la radiación incidente en la parte externa (Jaramillo y Dos Santos, 1980).

La proporción de radiación incidente en la superficie del suelo de una plantación de café con alta densidad de siembra y cobertura total sobre el terreno es muy baja, los valores medidos varían un 6 al 16% del total de la radiación incidente en la parte externa del cultivo.

Tabla 5.4. Coeficientes de extinción (k) de la radiación fotosintéticamente activa (RAF) en *Coffea arabica* L. para diferentes densidades de siembra (Castillo *et al.*, 1997)

Densidad plantas/ha	Coeficiente de extinción		
	Radiación directa	Radiación difusa	Radiación global
2.500	0,51	0,41	0,46
5.000	0,56	0,47	0,48
7.500	0,72	0,57	0,60
10.000	0,63	0,60	0,60
12.500	0,61	0,60	0,61

La radiación neta se usa principalmente en el calentamiento del aire (flujo de calor sensible, H), en evapotranspiración (flujo de calor latente, λE , \bar{e} es el calor latente de vaporización del agua que equivale a 2.442 J/g a 25°C), y en el calentamiento del suelo (flujo de calor en el suelo, G). Se incluyen además los componentes de la productividad primaria como son la fotosíntesis (F) y la respiración (R). En el proceso de la fotosíntesis las plantas utilizan una proporción muy pequeña del total de la radiación neta (1 a 5%).

El término *calor sensible* se utiliza para describir el proceso de transferencia de calor de un medio a otro por conducción y convección. El calor es transferido de un medio más caliente a un medio más frío; debido a que el aire es un mal conductor de calor, la convección es mucho más importante que la conducción para transferir calor dentro de la atmósfera.

El *calor latente* se refiere al movimiento de calor de un lugar a otro como una consecuencia de cambio en la fase del agua. Dependiendo del estado de fase, el agua absorbe o libera calor del ambiente. La cantidad de calor que utiliza cada cambio de fase es conocida como calor latente. El calor específico del hielo es de 0,5 cal/g. °C esto es para llevar 20 gramos de hielo de -20°C a 0°C, requiere cerca de 20 calorías; para transformarse en agua líquida requiere un calor adicional de 80 calorías (calor latente de fusión). La temperatura del agua y el hielo permanecen en 0° hasta que el hielo se transforme en agua líquida. El calor específico del agua líquida es de 1,0 cal/g. °C. Para transformar el agua líquida en vapor (evaporación) se requieren alrededor de 590 cal/g. °C.

En medidas realizadas en Cenicafé dentro de cafetales de *Coffea arabica* L. variedad Caturra, se observó que un 67% de la radiación neta se emplea en la evapotranspiración, un 30% en calentar el aire circundante y un 3% en calentar el suelo (Figura 5.16). Los

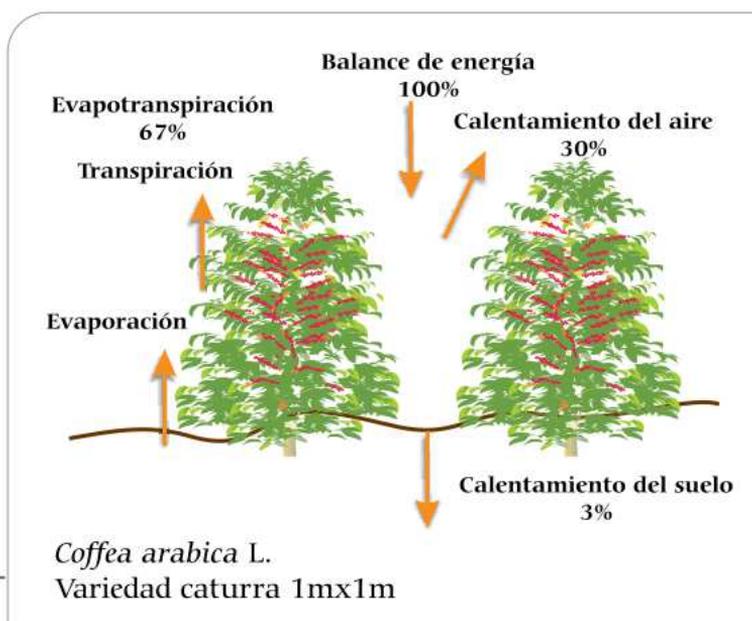


Figura 5.16.
Balance de energía en un cafetal.

valores encontrados indican una situación de ambiente húmedo sin limitaciones de agua en el suelo (Escobar y Jaramillo, 1983, Jaramillo, 1986; Jaramillo & Escobar, 1984).

En ambientes húmedos donde el agua no limita la evapotranspiración, la mayoría de la radiación neta es usada para evaporar el agua; para las regiones desérticas con disponibilidad de agua limitada, la radiación se emplea en su mayor proporción en calentar el aire o el suelo. Los balances de energía realizados en la región amazónica en la estación cálida y húmeda indican que entre el 80 y 90% de la radiación solar se utiliza en el proceso de evapotranspiración (Schubart y Salati, 1982).

Índice Normalizado de Vegetación

La reflectancia en la vegetación viva es mucho más baja en la región del rojo (580 – 680 nm) que en el infrarrojo cercano (730 – 1100 nm), mientras que la reflectancia en la vegetación muerta o el suelo desnudo, es más alta en el rojo y más baja en el infrarrojo cercano. Estas diferencias permiten distinguir estos dos tipos de cobertura terrestre con relativa facilidad y además estimar variables de interés ecológico como son la biomasa, la productividad, el Índice de área foliar y el porcentaje de cobertura vegetal (China, 2002), mediante el Índice Normalizado de Diferencias en la Vegetación (INDV o NDVI):

$$\text{INDV} = (\text{Infrarrojo cercano} - \text{rojo}) / (\text{Infrarrojo cercano} + \text{rojo})$$

Los valores de este índice varían entre -1 y +1; en general las áreas con vegetación verde presentan valores altos, mientras que las nubes, los cuerpos de agua y la nieve tienden a mostrar valores negativos. Las rocas y el suelo desnudo resultan con valores cercanos a cero. Este Índice se ha utilizado para medir procesos de deforestación y fenología.

Para las condiciones de Colombia el Índice Normalizado de Vegetación presenta una alta correlación (0,7 a 0,9) con el Índice de Oscilación del Sur, con disminución de la actividad vegetal durante los eventos de El Niño (Poveda *et al.*, 2000, 2001).

Instrumentos para medir la radiación solar

(Brock y Richardson, 2001, Strangeways, 2000)

Los instrumentos que miden la radiación solar se denominan radiómetros; sin embargo, reciben diferentes nombres cuando miden radiaciones específicas:

- El heliógrafo, instrumento para medir la cantidad de horas de brillo solar
- Piranómetro mide la radiación global (radiación directa más difusa).

- Radiómetro neto, que mide la diferencia entre las radiaciones de todas las longitudes de onda que entran y las que salen de las superficies.
- Ceptómetro, instrumento para medir la radiación fotosintéticamente activa dentro de los cultivos.
- Placa de Flujo, para medir el flujo de radiación entrante y saliente del suelo.

Otros instrumentos para medir la radiación solar son:

- Pirheliómetro, que mide la radiación solar directa
- Pirradiómetro, que mide en total de radiación de onda corta y onda larga.
- Pirgeómetro, que mide la radiación de onda larga.

