

La Radiación Solar en Florencia, Centro de Investigaciones Macagual Caquetá

Nelson Reyes Guzman* & Maria del Pilar España Aristizabal*

**Ingeniero Agroecologo. Facultad de Ingeniería. Universidad de la Amazonia.*

Recibido, 18 de Noviembre de 2007; aceptado 23 de Abril de 2008

Resumen

Se hallaron los valores de radiación solar global utilizando el método empírico determinado por el modelo Ångström, producto del análisis, mediante estadística descriptiva, calculando los promedios anuales, mensuales, diarios, y la desviación estandar de las series históricas de 1985 a 2005 para brillo solar, y temperatura del aire medido a 2 m sobre la superficie, obtenidos en la Estación Meteorológica en superficie del C.I. Macagual, ubicado a una latitud $1^{\circ} 36''$ N y una longitud de $75^{\circ}36''$ W a 280 msnm. La información de brillo solar (horas/día) se obtuvo a través de un Heliografo Campbell - Stokes. Las temperaturas máximas, medias y mínimas fueron medias en termómetros de vidrio y un termógrafo, y su calibración se adelantó con el patron nacional. El brillo solar totaliza 1.558 horas al año y la radiación solar 4.553 W/m².día con un Coeficiente de Correlación ($R=0,92$). En ambos casos estas variables ocurren por debajo de la mitad del máximo posible indicando alta nubosidad en el área. El promedio anual de irradiancia alcanza un 45.5% del máximo valor en el límite de la atmósfera. El periodo seco de noviembre a enero aporta 26.9% al total anual y los meses lluviosos de Mayo a julio un 22.2%. El fotoperíodo fluctúa alrededor de las 12 horas y la diferencia entre el día más largo (22 de junio) y el más corto (22 de diciembre) es de 12 minutos. La temperatura media anual es de $24,9^{\circ}\text{C}$ con una variación estacional de $2,4^{\circ}\text{C}$, con importantes fluctuaciones diarias alrededor de los 9°C . Las temperaturas mínimas y máximas medias anuales alcanzaron $20,2$ y $29,4^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Se halló un Coeficiente de Correlación ($R=0,79$) entre la Radiación Solar y la Temperatura. La ZICT como factor climático de escala global es el principal responsable en los cambios anuales de la Radiación Solar y a nivel diario lo son los fenómenos de meso – escala y el efecto orográfico. El Niño/Oscilación del Sur ENSO, como fenómeno de escala de tiempo interanual no influye notablemente en la variación de la Radiación Solar Global al área de influencia de la Estación Macagual.

Palabras claves: Radiación solar, fotoperíodo, efecto orográfico, ZICT, Macagual.

Abstract

The global solar radiation values were found by using the empirical method determined by the Ångström model, with the historical registers, from 1985 to 2005, of sun shining and air temperature at 2 m height from the ground, of the Macagual meteorological station, located at $1^{\circ} 36''$ N latitud and $75^{\circ}36''$ W longitud and 280 masl, in Florencia, Colombia. Descriptive statistics with mean and standard deviation of the annual, monthly and daily values were used. The solar shine (hours/day) was measured with an Heliograph Campbell - Stokes. The maximum, mean and minimum temperatures were obtained with glass thermometers and one thermograph, calibrated with a national pattern. The total sun shine reached 1.558 hours.year-1 and the solar radiation 4.553 W/m².day with a correlation coefficient ($R=0,92$). In both cases these variables were below the half of the maximum possible indicating high presence of clouds in the area. The mean annual irradiance reached 45.5% of the maximum value in the limit of the atmosphere. The dry period between November and January yield 26.9% to the total annual and the rainy months between Mayo and July yield 22.2%. The photoperiod fluctuated around 12 hours and the difference between the longest day (June 22nd) and the shortest one (December 22nd) is 12 minutes. The mean annual temperature is $24,9^{\circ}\text{C}$ with a seasonal variation of $2,4^{\circ}\text{C}$, with important daily fluctuations of around 9°C . The average annual minimum and maximum temperatures reached $20,2$ and $29,4^{\circ}\text{C}$, respectively. An $R=0,79$ between the solar radiation and temperature was found. The ZICT as a climatic factor at a global scale was considered as the main responsible for the annual changes of the solar radiation and the meso-scale and orographic phenomena for the daily variations. El Niño/Oscilation of the south ENSO, as inter-annual time scale phenomenon did not noticeable influenced the global solar radiation variation of the area of influence of the Macagual station.

Key words: Solar radiation, Photoperiod, orographic effect, ZICT, Macagual

Introducción

La irradiación solar es una de las variables más importantes, por ser la fuente de energía utilizada en la gran mayoría de los procesos en nuestro planeta. No obstante, a la importancia de esta

variable, su medición es escasa debido a los altos costos del instrumental de precisión requerida, así como su mantenimiento, por lo que la red de medición en la región amazónica es limitada. De otro lado, las condiciones topográficas y climáticas del Piedemonte Caquetense obligan a tener que

‡Autor para correspondencia, E-mail: vrinvestigaciones@uniamazonia.edu.co

considerar redes mas densas y ampliamente distribuidas a nivel local.

A pesar de los esfuerzos investigativos para conocer en forma integral la Amazonia Colombiana mediante el proyecto Radargramétrico del Amazonas PRORADAM, y el programa INPA en el occidente del Departamento del Caquetá, aun son insuficientes las herramientas que nos permitan conceptuar en el balance del proceso climático, ya que la poca información local disponible es mínima para prestar servicios para la agricultura en sus diferentes aspectos, como son, la planificación del uso del suelo, crecimiento, desarrollo y rendimiento de las plantas y animales, en el manejo de las plagas, enfermedades y en la evaluación de riesgos meteorológicos.

En la actualidad después de la crisis energética y el continuo agotamiento de ciertos recursos no renovables, la búsqueda de fuentes alternativas como la energía solar ha recibido un notable impulso y ya se cuenta con registros básicos de su medida en varios lugares del mundo, los cuales necesitan de su análisis.

A nivel Agroclimatológico, el piedemonte se caracteriza por presentar altos índices de brillo solar que sobrepasan las 60 horas/luz.mes. Es por ello que consideramos prioritario profundizar en el estudio climático, no solo para conocer el estado actual del recurso radiación, sino tambien para identificar y analizar las causas tanto endógenas como exógenas locales que ocasionan sus mutaciones.

El presente documento, hace una síntesis de la situación actual de la radiación en Colombia, comenzado con la presentación del marco general del clima en Colombia, luego en los antecedentes y justificación se recogen los trabajos más importantes que se han realizado en los últimos años en el país para luego hacer una presentación de los principales avances en los métodos de estimación en Radiación.

En este contexto, el planteamiento del problema que motivo la realización del presente documento, se hace énfasis en la importancia que merecen los estudios de esta variable climática y su aplicación. Al entrar en el marco conceptual y teórico se destaca la incidencia que tiene el efecto orográfico en la distribución de la radiación para una localidad. Así como también se hace un recuento de los elementos que componen la radiación.

El objetivo central de este trabajo es analizar la

dinámica de la Radiación Solar Global obtenida a través de los registros históricos de brillo solar en la estación meteorológica de C. I. Macagual, utilizando para ello el modelo de Ångström con coeficientes a y b para Colombia, hallados en otros trabajos.

En tal sentido, este trabajo, pretende suministrar información estadística básica de las mediciones de la radiación incidente a partir del brillo solar para el área de influencia de la Estación Meteorológica Macagual Florencia, Caquetá Colombia, utilizando expresiones ajustadas para la zona de influencia de la estación, que permita mostrar el estado actual de este recurso, como tambien se hace una correlación entre los valores de la radiación y los aumentos de la temperatura a través del año para la misma localidad, que permitan ser utilizados en los futuros balances de radiación y de energía para la región.

Cada día crece la demanda de información sobre variables climatológicas particularmente de la temperatura del aire, la radiación y de la precipitación, para determinados sitios que en la mayoría de los casos no coinciden con los lugares donde se encuentran ubicadas las estaciones de observaciones y mediciones meteorológicas, para el caso de la región del piedemonte caqueteño: Existe un registro climático de brillo solar (h/día) acumulado de varios años, que no ha sido analizado cuantitativamente en más detalle ni mucho menos se le ha dado el uso que este merece.

En la región se cuenta con la ubicación de diez estaciones climáticas, entre ellas la estación Macagual ubicada en el C.I. Macagual (Florencia), pero falta validar estadísticamente estos registros climáticos. La información heliográfica suministrada por el parámetro brillo solar no se puede utilizar directamente para determinar el balance de energía radiante. Siendo necesaria su transformación a través de modelos matemáticos. La razón principal esta dada por el poco interés científico del comportamiento mesoclimático de la región, agregándose a esto la no existencia de un profesional especialista en el área agroclimática. En este sentido Escobar 1992, analiza algunos parámetros climáticos con base en la información registrada durante un periodo de 12 años por la estación Macagual del C.I. Macagual. Por ello en la actualidad se hace necesario analizar con más detalle la información que existe, para que esta sirva de soporte real y que nos permita iniciar a entender el comportamiento y la variación climática que ha sufrido la región en los últimos

años, después de los procesos de tala intensiva y de consolidación ganadera; además de los efectos que estos procesos pueden tener en el cambio climático en especial de los cambios en la radiación solar, debido a que esta puede influir notablemente en las decisiones que se tomen en un futuro cercano con lo relacionado a los procesos agropecuarios que se plantean para la región.

Recursos y Metodología

Localización geográfica. El área de estudio se encuentra en el flanco oriental de la cordillera oriental, en la jurisdicción del municipio de Florencia Caquetá, localidad que se extiende a lo largo del piedemonte amazónico.

Las coordenadas geográficas teniendo como punto de referencia la estación Macagual del C.I. Macagual que forma parte de la red meteorológica nacional son las siguientes: 75°36" de Longitud Oeste y 1°36" de Latitud Norte, situándose en un paisaje de lomerío. Se utilizó toda la información disponible que nos permitió comprender la influencia que ejerce la radiación solar con relación a la temperatura registrada en la estación Macagual.

También se utilizó el método documental para determinar la influencia de la ZICT y del relieve en la fluctuación de los volúmenes de radiación para el área de influencia de Macagual.

La información relacionada con la irradiancia solar es producto del análisis de los datos diarios históricos de 21 años de las variables climáticas de brillo solar y temperatura del aire tomados a dos metros sobre la superficie, obtenidos en la estación meteorológica en superficie Macagual del C.I. Macagual, fué necesario sistematizar dicha información, debido a que solo se encontraba almacenada en el respectiva planilla de campo para datos climáticos del C.I Macagual ICA-Corpoica.

Métodos de estimación. Se hizo uso del método empírico, determinado por el modelo de Ångström, el cual estima el valor de la radiación solar (R_0) a partir de modelos estadísticos elaborados con información de otras variables climatológicas, en donde el brillo solar es el estimador más significativo de la radiación solar.

Modelo Ångström-Prescott. El modelo a utilizar en el presente proyecto corresponde al modelo de Ångström-Prescott es el más frecuentemente usado para estimar la irradiancia solar relativa (

$H_h/0$) basado en las horas de sol relativas (n/N). Esta ecuación fue sugerida por Prescott 1940, citado por Atlas de energía solar del Perú 2003, como una modificación del modelo de Ångström propuesto en 1924. Esta ecuación está dada por: $H_n = a + b H_0 N$

Donde H es la irradiancia solar medida en superficie, H_0 es la irradiancia solar en el tope de la atmósfera, n son las horas de sol efectivas o heliofanía y N es la duración astronómica del día para una fecha del año y latitud específicos. Los coeficientes empíricos a y b tienen un significado físico, donde $a + b$ representa el valor máximo de la transmisividad de la atmósfera (τ) mientras que el coeficiente a representa el mínimo valor de τ .

Instrumental. Las medidas de brillo solar (horas/día) tomadas entre 1985 -2005 se hicieron en una superficie horizontal con un Heliógrafo N° 1603 según Campbell -Stokes utilizable en las zonas ecuatoriales norte y sur entre los 0 y 40°<, con bola de cristal pulimentada: de materiales inoxidables, superficie barnizada de negro maté; con nivel redondo sobre la placa básica y con placa de montaje adicional, ubicado a una latitud 1°36" N y una longitud de 75°36" W y a 280 msnm, el cual fue calibrado regularmente con el patrón nacional del Instituto de hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM (antes HIMAT); la exposición, nivelación y mantenimiento estuvieron de acuerdo con las normas indicadas por la Organización Meteorológica Mundial. Las temperaturas máximas, medias y mínimas fueron medias en termómetros de vidrio y un termógrafo.

Las mediciones se tomaron manualmente y se acumularon diariamente entre 1985 y 2005 en su respectiva planilla de campo.

Análisis Estadístico de los resultados de Brillo Solar y Temperatura. Las series de brillo solar se analizaron mediante estadística descriptiva, calculando los promedios anuales, mensuales y diarios, y la desviación estándar. Igualmente se estimó la radiación solar global (RG) promedio mensual diaria y se determinó el porcentaje con respecto al máximo atmosférico estimado según hoja de cálculo Microsoft Excel para el modelo de Ångström. Giraldo 2006, utilizando la ecuación obtenida en otros trabajos Gomez 1995, citados por Guzmán & Gomez 1998 y que tiene la siguiente expresión: $RG / RA = 0,261 + 0,506n/N$, Donde: RG = Radiación global calculada en $W/m^2 \cdot día$. RA = Radiación en el tope de atmosfera en $W/m^2 \cdot día$. Guzman et al 1992, citado por

Guzman & Gomez (1998). $0,261$ y $0,506$ = Constantes locales para Macagual halladas por Guzman & Gómez (1998). n = Número de horas de brillo solar registradas en la estación de Macagual. N = Número máximo de horas de brillo solar astronómicamente posible. Guzman et al.,(1992) citado por Guzmán & Gomez (1998).

Para los registros de temperatura se calcularon los promedios mensuales diarios y la desviación estándar, al igual que para las máximas y mínimas. Para todas las variables se reportaron los valores mínimos y máximos absolutos históricos. Todos los resultados se analizaron utilizando el paquete estadístico SAS 2002.

Resultados y discusión

Brillo solar anual. Analizando la información, se encontró un promedio anual de 1.558 horas de brillo solar, en donde el año con más horas de brillo solar fue 1999 con 1.826 horas. El año de menor brillo ocurrió en 1998 con 1.357 horas, se observa que en general, los valores no superan las 1.900 horas de brillo solar, lo que puede ser un factor limitante en el desarrollo de especies con requerimientos altos de Luminosidad. En la serie histórica se alcanzan a documentar tres fases completas del ENSO; registrándose la respectiva fase Niña en los años 1988 - 1989, 1994 -1995 y 1999 - 2000, se evidencia que fueron fases que superaron el promedio anual a excepción de los años 94 y 95 que presentaron 1.526 y 1557 horas/año respectivamente, en general se alcanza a observar que para la fase Niña del ENSO se pueden presentar aumento de brillo solar; posiblemente se deba a que en estos años las precipitaciones se dan en horario nocturno. Mientras que los años documentados como Niño fase cálida del ENSO, 1986 - 1987, 1991 - 1992 y 1998 muestran una menor cantidad de horas luz, presentándose como años con menor cantidad de brillo solar que la misma Niña. Se alcanza a mostrar que el evento el El Niño/oscilación del Sur ENSO no afecta de manera directa la región (Figura 1)

Figura 1. Brillo solar (Horas/año) y temperatura media anual (°C) en el periodo 1985 - 2005 en la estación C. I. Macagual - Caquetá, Colombia. Ubicando los tres eventos El Niño/Oscilación del Sur ENSO.

Lo que en realidad sucede en la localidad de

Florencia es un continuo aumento en los volúmenes de precipitación generando reducción en horas de brillo solar, lo que muestra que la región se ve afectada por un notable aumento en la nubosidad de tipo convectivo lo que reduce ampliamente las horas de brillo solar principalmente entre los meses de marzo y agosto, además esto se traduce en reducción de irradiación, cambios en los valores de temperatura diaria, Según el IDEAM (1998), IDEAM (2002), pueden haber aumentos de un 40% o mas en los volúmenes de precipitación. Comparamos los valores de temperatura media anual, encontrándose el mismo comportamiento antes descrito para el brillo solar, lo que indica que no hay una alteración significativa en la amplitud térmica diaria para cada año.

Se hace una comparación entre la información climática documentada en el proyecto IGAC - INPA (1993), para las estaciones Aeropuerto Capitolio y Macagual con relación a la información analizada en este proyecto, se muestra claramente una misma tendencia en la oferta de brillo solar a través del año, presentándose los máximos valores en los meses que van de noviembre a febrero, con un significativo aumento a partir de septiembre y los mínimos valores se ubican entre los meses de marzo y agosto, donde abril es el mes con mas bajo brillos solar para las dos estaciones

Brillo solar diario. De acuerdo con la latitud de este sitio ($01^{\circ} 36' N$) astronómicamente los días más extensos se registran de abril a agosto , cuando la longitud oscila entre 12,0 y 12,1 horas, y los más cortos se sitúan entre octubre a febrero con longitudes que van de 11,9 a 12,0 horas. El día más largo ocurre el 22 de junio (coincidiendo con el solsticio de verano del hemisferio norte e invierno del hemisferio sur) y el más corto el 22 de diciembre (solsticio de invierno) (y su diferencia asciende a 12 minutos (0,2 horas).

El promedio anual diario de brillo solar llega a 4,2 horas de un máximo posible que es de 12,0 horas, lo cual corrobora la importante nubosidad reinante en la zona. El numero de horas de sol recibido está en función de la longitud del día y además, del régimen estacional de la precipitación. Lo anterior explica que en diciembre y enero, que hacen parte del periodo seco (coincidiendo con el verano para el hemisferio sur), se registran las mas altas cantidades de brillo solar con 5,5 y 5,6 horas diarias respectivamente equivalentes casi a la

mitad del máximo posible a pesar de que son de los meses de menor longitud del día (11,9 horas). Al contrario, en los meses de junio y julio caracterizados por un día más largo (12,1 horas) pero a su vez uno de los más lluviosos, se recibe el brillo solar más bajo de 3,32 y 3,19 horas diarias respectivamente, que corresponden solamente al 26,4 y 26,9% del máximo astronómico, esto en virtud a que en este periodo ejerce su máxima influencia el efecto ortográfico de la cordillera oriental para toda la región del piedemonte del Caquetá.

El primer equinoccio (21 de marzo - 20 de junio) marca el comienzo de la temporada de lluvias, producto de la continua formación de nubes que traen consigo los fenómenos de mezo - escala propios de esta época y que finalmente se traducen en la reducción del brillo solar con su consecuente menor oferta de radiación. El segundo equinoccio (21 de septiembre - 20 de diciembre) marca el final del periodo mas lluvioso del año y comienzan la época de mayor oferta de luz solar para la región.

El máximo de brillo solar registrado en la serie de datos es de 11,3 horas del día 07 de octubre de 1987 que alcanzó un 94,2% del valor máximo. Se aprecia que la desviación estándar en todos los meses está por encima de dos (2) horas lo cual se traduce en coeficientes de variación por encima del 40%. También se aprecian los valores máximos y mínimos absolutos históricos que se pueden llegar a registrar en la estación C.I Macagual de Florencia Caquetá (Tabla 1)

Tabla 1. Brillo solar mensual promedio diario y valores mínimos y máximos absolutos históricos (Horas/día) en la estación C.I. Macagual, Florencia Caquetá 1985-2005

Mes	Promedio (h/día)	Desviación Estándar	Mínimo (h/día)	Máximo (h/día)
Enero	5,63	2,77	0,1	10,7
Febrero	4,36	2,82	0,1	10,5
Marzo	3,4	2,44	0,1	10,4
Abril	3,32	2,41	0,1	10,8
Mayo	3,49	2,53	0,1	10,7
Junio	3,19	2,58	0,1	11,0
Julio	3,25	2,69	0,1	10,7
Agosto	4,09	2,82	0,1	11,0
Septiembre	4,66	2,89	0,1	11,0
Octubre	4,68	2,73	0,1	11,3
Noviembre	5,05	2,54	0,1	10,9
Diciembre	5,5	2,49	0,1	10,2
Anual	4,2	2,75	0,1	10,8

Radiación solar diaria. La radiación solar media mensual diaria sigue una distribución similar a la del brillo solar. Se registra la radiación solar global

diaria en Macagual; el promedio diario anual llega a los 4.553 W/m².día o 16,4 Mj/m².día (391,5 cal/cm².día) los cuales alcanzan un 45.5% del máximo valor en el límite de la atmósfera, lo cual no coincide con la radiación de 33 %, hallada para Florencia (Caquetá) por Simbaqueva et al., 1986 citado por Jaramillo 2005 y los valores más altos se sitúan en el periodo de menos lluvias (noviembre - enero) donde diciembre y enero alcanzan a superar el 50% del máximo extraterrestre. Coincidiendo con los valores reportados por Rodríguez & Gonzáles 1992 para el sur occidente Colombiano. La distribución es de tipo unimodal pero sin embargo se alcanza a observar una ligera disminución de la radiación en el primer semestre en donde el mes que aporta la mayor cantidad de radiación corresponde a enero con 4.948 W/m².día (50,0% del máximo teórico). Para el mes de marzo, tercer mes con menor cantidad de radiación y que aporta 4.423 W/m².día (42,2% del máximo valor atmosférico) en donde se debiera esperar los máximos aportes de radiación en razón de que ocurre simultáneo al primer equinoccio y por tanto, posee el mayor potencial de radiación (10.488 W/m².día) sucede algo bien particular, y es en virtud a que para la región del piedemonte climático amazónico comienza la verdadera temporada de lluvias, gobernada por los fenómenos de mezo - escala, producto de la ZICT y el efecto foehn. Se representan las fluctuaciones del brillo solar y la radiación solar global a través del año y se observa en forma clara la estrecha relación que existe entre el brillo solar y la radiación solar con un factor de correlación (R= 0,92) evidenciando una asociación negativa de estas dos últimas con la lluvia de manera que en los periodos de menos lluvias se aumenta el brillo solar y la radiación, y en las temporadas lluviosas sucede lo contrario.

El máximo del segundo periodo se localiza en diciembre y tiene 4.952 W/m².día (50,9% del máximo extraterrestre). Este último debería ocurrir en el segundo equinoccio en septiembre pero las condiciones de aumento de nubosidad características de la continuación de la temporada de lluvias ocasionadas por la permanente formación de fenómenos de meso - escala, propios de esta zona húmeda tropical y posiblemente por efecto de la acumulación de humo producto de algunas quemadas que se realizan en la localidad acompañados de los vientos propios de la ZCIT.

Junio es el mes que capta la menor radiación con

3.956 W/m².día (41,7% del máximo potencial) y luego siguen en su orden julio y mayo con 4.086 y 4.129 W/m².día. Se destaca que abril, a pesar de formar parte del periodo con más lluvia, recibe más radiación que los otros meses lluviosos, por el mayor potencial de radiación que tiene y posiblemente, debido al periodo seco que le antecede que es el más marcado.

El periodo seco que se extiende de noviembre a enero es el que más contribuye al total mensual diario de la radiación solar global con 26,9% y los meses lluviosos de junio y julio son los de menor aporte con 7,24 y 7,47% respectivamente. La radiación que se recibe el primer semestre es menor a la que se recibe en el segundo semestre en 1.652 W/m².día equivalentes al 36,16% del total anual y esto se debe a que el periodo que va de marzo a junio se ve afectado por una mayor formación de fenómenos de meso - escala producto del efecto orográfico u efecto foehn y en fin de la influencia directa de la ZICT sobre la localidad.

Las quemadas que principalmente se realizan en el periodo de diciembre a febrero y ocasionalmente en septiembre, generan gran cantidad de partículas sólidas que se suspenden en el aire, por lo tanto el humo puede interceptar un 90% de luz. Aún más nocivas son los efectos de las partículas de humo, las cuales se asientan fuera del aire y se acumulan formando películas sobre las superficies de la planta, disminuyendo la cantidad de luz disponible para el clorénquima.

Los valores diarios mensuales de radiación global y radiación neta o radiación fotosintéticamente activa (RAF) en (W/m².día) y (Cal/cm².día) hallados en la estación Macagual con base a los registros históricos del periodo 1985 a 2005 muestran la misma tendencia descrita anteriormente para la radiación global mensual diaria, se muestra que en la temporada invernal (marzo - julio) los mas bajos valores en Cal/m².día para efectos de los procesos propios de la RAF.

Al realizar la correlación entre los valores de temperatura y radiación se encontró un coeficiente R = 0,79 lo que indica una relación directamente proporcional entre las dos magnitudes; es así, que en días despejados cuando aumentan los volúmenes de radiación, también aumentan las magnitudes de temperatura (Tabla 2).

Los valores máximos y mínimos históricos encontrados en la serie; el máximo histórico de

radiación solar global se presentó el 07 de Octubre /87 con 7.667 W/m².día que corresponde a 73,9% del potencial máximo; estos valores tienden a aparecer en el segundo semestre del año, principalmente por la reducción de la temporada invernal y los porcentajes con respecto al límite de la atmósfera no llegan al 80% Guzmán & Gómez 1998.

Tabla 2. Radiación solar global promedio mensual diaria y Radiación fotosintéticamente activa (RAF) en (W/m².día) y (Cal/cm².día) hallados en la Estación C.I. Macagual, Florencia Caquetá (1985 - 2005).

Mes	Radiación Global (W/m ² .día)	Radiación (Cal/cm ² .día)	Radiación Neta (RAF) (W/m ² .día)	Radiación Neta (RAF) (Cal/cm ² .día)
Enero	4,94	425,45	2,34	201
Febrero	4,73	407,48	2,24	193
Marzo	4,42	380,31	2,09	180
Abril	4,29	369,30	2,03	175
Mayo	4,12	355,03	1,95	168
Junio	3,95	340,15	1,87	161
Julio	4,08	351,33	1,93	166
Agosto	4,53	389,94	2,14	184
Septiembre	4,86	418,06	2,30	198
Octubre	4,86	418,66	2,30	198
Noviembre	4,83	415,99	2,28	197
Diciembre	4,95	425,80	2,34	201
Anual	4,55	391,50	2,15	185

Las cantidades mínimas históricas de radiación se registran en los días en que el brillo solar es cero, pero varían de acuerdo con el tipo de nubosidad presente. Los mínimos más bajos han ocurrido en los meses lluviosos el 17 de junio/03 y los días 08 de Julio/92 y el 06 Julio/96 con 2.444 y 2.500 W/m².día que solamente llegan a un 4,47 y 4,57%, respectivamente del máximo potencial en el exterior de la atmósfera. Donde los meses de marzo y septiembre muestran un ligero aumento de (W/m².día) en relación a los meses que le anteceden y preceden respectivamente mostrando una tendencia bimodal a lo largo del año. El comportamiento de los valores de Irradiancia máximos y mínimos históricos en relación con la media, evidencia que para la radiación máxima y mínima existe una tendencia bimodal, mientras que para la radiación media la tendencia es unimodal.

Para permitir la comparación, se incluyen los datos de la radiación solar global en Macagual junto con los medidos en otros sitios del mundo en (Mj/m².día); se destaca de allí el efecto que tiene la latitud sobre la cantidad de radiación recibida. Es así como en las latitudes bajas la variación mensual es relativamente pequeña mientras que en las latitudes altas debido a la presencia de las estaciones hay una notable diferencia entre los

meses de invierno y verano, tanto para el hemisferio norte como para el hemisferio sur. Esto conduce a que en estas últimas latitudes se observen los valores mensuales más bajos de radiación en el invierno (menor número de horas de sol), pero a su vez, los más altos, producto del prolongado brillo solar en el verano, respectivamente. Así mismo, se aprecia la tendencia a presentarse la mayor recepción anual de radiación en los subtropicos, lo cual está ligado a la circulación general de la atmósfera que sufre un descenso hacia los 30° de latitud en ambos hemisferios y produce unas condiciones generalizadas de buen tiempo que aumentan considerablemente el número de horas de sol recibidas en esos lugares.

Se puede apreciar las diferencias en la disponibilidad de radiación solar para seis lugares y se puede observar que aquellos lugares que se encuentran influenciados por la ZICT tienden a presentar comportamientos similares, pero que al analizar los factores que más influyen en cada localidad encontramos grandes diferencias como son el caso de Macagual (Colombia) y Río de Janeiro en el Brasil.

En este caso para ambos lugares, se registra un comportamiento unimodal para la radiación solar global, pero en contraste se observa que en Río de Janeiro en los meses de Octubre a Febrero, hay mayor oferta de radiación, debido a que por ser una ciudad costera hay bastante influencia de los vientos del Atlántico impidiendo que esta región se vea afectada por la ZCIT. Mientras que para la temporada invernal (Mayo - Agosto) la radiación incidente disminuye drásticamente debido a que la presión de la ZCIT genera que la masa ecuatorial continental (MEC) y la masa ecuatorial atlántica (MEA) se desplacen hacia el occidente del Brasil, creando un núcleo de abundantes precipitaciones que reducen los volúmenes de brillo solar y por lo tanto de radiación. Mientras que para Turrialba en Costa Rica sucede el fenómeno de forma inversa, ya para otros lugares de altas latitudes como Venecia en Italia y Santiago en Chile son apreciables las diferencias en la oferta de este recurso debido a la influencia estacional.

El índice de claridad o transmisión se refiere a la proporción de la radiación solar global medida y la radiación solar global del límite de la atmósfera (RG/RA). Los valores derivados para Macagual, se presentan en la Tabla 2 y están condicionados igualmente por el patrón estacional de la lluvia y

varían entre un máximo de 0,510 en el mes de diciembre y un mínimo de 0,418 para los meses de abril y junio. El mayor índice que se registra en los meses de noviembre a enero en comparación con otros meses que reciben más radiación, se debe a hecho que hacia finales del año se presenta el menor potencial de radiación en el límite de la atmósfera, lo cual permite que dichos índices aumenten. Si se considera que los días claros ocurren cuando el índice está alrededor de 0,600 se observa que ninguno de los meses alcanza este valor y se confirma que en esta zona de lomerío con frecuente nubosidad predominan los días relativamente poco claros en el transcurso del año.

Temperatura del aire. Se registran las Temperaturas anuales diarias en la serie histórica (1985-2005). La temperatura media anual es de 24,9°C con una ligera variación estacional de 2,4°C, proveniente de la diferencia entre el mes con valores más altos y más bajos (enero y julio) respectivamente, lo cual coincide con los valores reportados por Jaramillo 2004. Sin embargo, a nivel diario las variaciones son muy importantes y pueden llegar alrededor de los 9°C. El primer periodo seco del año (enero, febrero y marzo) es el de mayor temperatura con valores entre 25,9 y 25,2°C y luego está el de finales del año (octubre, noviembre y diciembre) con valores entre 25,1 y 25,6°C como consecuencia de una mayor frecuencia de días despejados que permite un aumento en la interceptación de radiación solar y por consiguiente una elevación en la temperatura del aire. Por el contrario, en el periodo lluvioso que va de abril a julio es cuando la temperatura alcanza sus valores más bajos, de 24,8°C a 23,5°C, en razón de un notable aumento de la nubosidad que disminuye la llegada de la radiación y favorece un menor calentamiento del aire circundante. El otro periodo que va de agosto a septiembre registra menos temperatura que el anterior como consecuencia de la llegada del segundo equinoccio en septiembre que trae una mayor oferta de radiación y por consiguiente un aumento en la temperatura. El régimen térmico del primer semestre es mayor que el del segundo semestre en cerca de 0,25°C. El día con mayor temperatura de toda la serie histórica se presentó el 02 de febrero de 2004 cuando la temperatura media solo alcanzó 18,0°C y el más caluroso con 29,3°C ocurrió el 12 de marzo de 1988.

Se observan los promedios mensuales diarios, así como la desviación Standard que no sobrepasa los 1,50°C, también se encuentran los valores

mínimos y máximos absolutos históricos observados en la estación C.I Macagual del municipio de Florencia. A manera de ilustración se tiene que para el mes de septiembre se espera una temperatura media de 24,8°C con una desviación Standard de 1,25°C, en donde pueden presentarse valores medios mínimos de 18,8°C o quizás valores medios máximos de 28,1°C.

Las temperaturas mínimas y máximas medias anuales corresponden a 20,2 y 29,4°C. registran una amplia variación estacional que llega a 4,7 y 4,5°C respectivamente. Las mínimas medias más bajas se localizan en la temporada más lluviosa de Junio a Agosto con registros de 16,7 a 17,3°C. Esto se puede atribuir a la alta nubosidad presente asistida por una disminución del brillo solar y por consecuente también de la radiación directa, así como por el aumento superior a un 80% de la humedad relativa, lo que provoca mayor aumento en los procesos de evapotranspiración favoreciendo así una pérdida de energía del ambiente en general, situación que también se aprecia con la temperatura media en este periodo. Por su parte las temperaturas mínimas medias más altas se registran de noviembre a febrero, están alrededor de los 22°C, esto es debido principalmente a que la radiación recibida se disminuye en menor grado y ello impide que la temperatura mínima descienda más que en el caso precedente. La temperatura máxima media presenta sus mayores valores en las temporadas secas de noviembre a marzo (29,0 a 32,6°C) con un sobre salto en diciembre de 35,1°C luego entre julio y agosto se alcanza a percibir un ligero aumento con 28,9 y 29,9°C respectivamente producto de la mayor recepción de radiación solar. En las épocas lluviosas de abril a junio (28,2 a 27,3°C) y septiembre - octubre (28,1 - 28,4°C) (Tabla 3) ocurren las temperaturas máximas medias más bajas particularmente por las mismas razones ya expuestas para la temperatura mínima media. La temperatura mínima media del primer semestre es superior 0,5°C y la máxima media o es a así mismo en 0,9°C.

Al realizar la correlación entre los valores de temperatura y radiación se encontró un coeficiente R = 0,79, lo que indica una relación directamente proporcional; es así que en días despejados cuando aumentan los volúmenes de radiación, también se registran magnitudes altas de temperatura.

En el Figura 1 se observan los Valores mínimos, máximos y promedio mensual absolutos

históricos observados en la estación C.I Macagual del municipio de Florencia, así como la desviación estándar. A manera de ilustración en la Tabla 9, se tiene que para el mes de abril se espera una temperatura mínima promedio de 21,7°C con una desviación estándar de 0,91°C, en donde pueden presentarse valores mínimos de 18,0°C o quizás valores máximos de 24,0°C.

Tabla 3. Temperatura mensual promedio diario y valores medios mínimos y Máximos absolutos históricos (°C) en la estación C.I. Macagual, Florencia Caquetá 1985-2005

Mes	Promedio (°C)	Desviación Estándar	Mínima (°C)	Máxima (°C)
Enero	25,9	1,15	22,3	28,9
Febrero	25,6	1,44	21,8	29,0
Marzo	25,2	1,39	19,5	32,6
Abril	24,8	1,18	20,9	28,2
Mayo	24,7	1,16	21,2	27,7
Junio	23,9	1,32	16,7	27,3
Julio	23,5	1,50	18,4	28,9
Agosto	24,2	1,38	17,3	29,9
Septiembre	24,8	1,25	18,8	28,1
Octubre	25,1	1,23	21,1	28,4
Noviembre	25,3	1,16	21,6	29,0
Diciembre	25,6	1,05	22,3	35,1

La temperatura mensual mínima absoluta histórica más baja hasta ahora registrada es de 13,0°C y se presentó el 5 de julio de 1986 y el 9 de agosto de 1988 en tanto que la mínima máxima absoluta subió a 24,5°C el 2 de enero de 1999. Mientras que las temperaturas mensuales máximas mas altas se registraron el 27 de marzo de 1997 con 37,0°C coincidiendo con la ocurrencia de un Evento Cálido del Pacífico (fenómeno Niño), mientras que las temperaturas máximas mínimas se registraron el 07 de julio de 1989 y el 16 de agosto de 1999 con 19,5 y 19,0°C respectivamente, coincidiendo con la ocurrencia de un ENSO (fenómeno Niña).

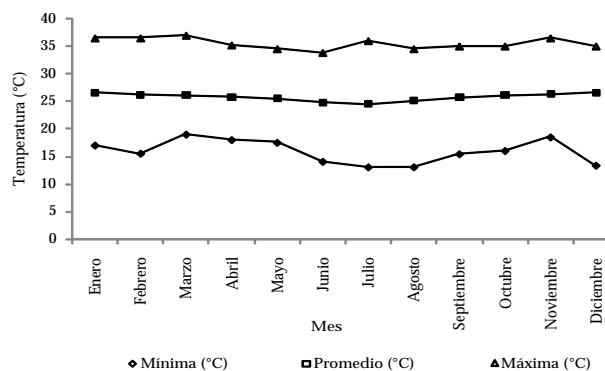


Figura 1. Temperatura mensual máxima promedio diario y valores mínimos y máximos absolutos históricos (°C) en la estación C.I. Macagual, Florencia Caquetá 1985-2005.

Temperaturas altas se pueden presentar en cualquier mes del año, independiente de la estacionalidad de la lluvia, se pueden presentar temperaturas del aire relativamente altas durante las horas del día (entre las 12 y 15 horas, particularmente) y, en algunos casos, se alcanzan o superan los valores máximos registrados hasta ahora. Por el contrario, en horas de la madrugada, las temperaturas descienden a valores muy cercanos a los mínimos históricos, como consecuencia de las condiciones relativamente secas que se pueden asociar a la influencia del Fenómeno El Niño, y como ya se mencionó se puede incrementar la frecuencia de heladas durante los meses de julio, agosto. La Estación Macagual presente cambios diarios en su régimen térmico, ya que la región ha sufrido grandes cambios de sustitución del bosque tropical, por sabanas y praderas para uso extensivo de ganadería, lo que se traduce en cambios de reflexión o albedo.

En conclusión el Modelo Ångström arrojó un total de Radiación solar global anual diaria (RG) de $4,55 \text{ W/m}^2 \cdot \text{día}$ ($16,40 \text{ Mj/m}^2 \cdot \text{día}$), la cual dispone de una radiación líquida (RAF) de $185 \text{ cal/cm}^2 \cdot \text{día}$, presentando una Desviación Estándar de $1,11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{día}$. El promedio anual de Brillo Solar es de 1,56 horas, arrojando un promedio de 4,20 (h/día), con una Desviación Estándar de 2,75 lo que se traduce en un Coeficiente de Variación que está por encima del 40%. La temperatura media anual es de $24,90 \text{ }^\circ\text{C}$ con una ligera variación estacional de $2,40 \text{ }^\circ\text{C}$ que provienen de la diferencia entre el mes de mayor temperatura (enero) y el de menor temperatura (julio), presentando una desviación Standard de 1,30. La influencia que ejerce la Radiación solar en los cambios de Temperatura es directamente proporcional, y depende de la presencia una ausencia de días despejados, con un $R = 0,79$.

El ciclo anual de la Radiación Solar, está dominado por la oscilación meridional de la zona de convergencia intertropical (ZICT), que es empujada por el efecto Coriolis y por la dinámica del transporte de humedad de los vientos alisios del este quienes interactúan con el ciclo diario inherente a los Sistemas Convectivos de meso - escala, influenciados por el efecto orográfico.

Es posible que, El Niño/Oscilación del Sur ENSO, como fenómeno de escala de tiempo interanual influye en la variación de la Radiación Solar Global (RG) para el área de la estación C. I.

Macagual, debido a que los frentes fríos que regresan de los Andes para el segundo semestre arrastren volúmenes extra de precipitación, lo que puede reducir la cantidad de horas luz.

Literatura citada

- Andrade, I. G. Adriana, H. G. Etter A. & Torres R. 1992. Amazonía Colombiana; diversidad y conflicto. 1 - 91p.
- ATLAS de Energía Solar del Perú. 2003. Proyecto PER/98/G31: Electrificación Rural a base de Energía Fotovoltaica en el Perú. 32p.
- Ayoade, J. O. 1983. Introduction to climatology for the tropics. Chichester, John Wiley and Sons. 258p.
- Baldión, J. V. & Hurtado, G., 1992. Estudio Agroclimático del trópico húmedo de Colombia. Instituto Colombiano de Hidrología, meteorología y adecuación de tierras. Santa Fe de Bogotá, 187p.
- Baron, A. L. 2002. Modelos geoespaciales de la distribución de variables climatológicas en el territorio colombiano. Santafé de Bogotá, Universidad nacional de Colombia. 164p (Tesis: magister).
- Becker, P.; Weingarten, D.S. 1991. A comparison of several models for separating direct and diffuse components of solar irradiation. Agricultural and Forest Meteorology 53:347 - 353p.
- Cuartas, L. A., & G. Poveda, 2002. Balance atmosférico de humedad y estimación de la precipitación reciclada en Colombia según el Reanálisis NCEOP/NCAR. Meteorología Colombiana, 5: 49 - 57p.
- Escobar A., C., J. 1992. Bioclimatología, Piedemonte Amazónico, ICA regional 6, boletín N° 57, Florencia, Caquetá Colombia. 18p.
- Eslava, R., J. A. 1993. Climatología y diversidad climática de Colombia. Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas y Naturales 18(71): 507-538p.
- García, G. R., 1986. Características Pluviométricas y sus variaciones por la altitud: Un aporte para el análisis de los Pisos Bioclimáticos en Colombia. En: Análisis Geográficas. IGAC. 104p.
- Giraldo, José Fernando J., 2006. Hoja de calculo Microsoft Excel para hallar Radiación Solar Global (RG) a partir del modelo de Ångström para Colombia. Cenicafé Colombia.
- González, B., F. 1984. Régimen de la radiación solar en la Sabana de Bogotá. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 122p (Tesis: magister).
- Guzman M., O.; Gómez. 1998. La radiación solar global en Chinchiná, Caldas. Cenicafé 49 (1) 32 - 43p.
- IDEAM. 2005. Atlas de radiación solar de Colombia. Bogotá, Colombia.
- IDEAM. 2002. Efectos naturales y socioeconómicos del Fenómenos El Niño en Colombia.
- IDEAM, 1998. El medio ambiente en Colombia. Bogotá, Colombia.
- IGAC-INPA., 1993. Aspectos Ambientales para el Ordenamiento Territorial del Occidente del Departamento del Caquetá. Tomo III. Págs. 1248-1309 p.
- Jaramillo, R., A. 2005. La redistribución de la Radiación Solar y la lluvia dentro de plantaciones de Café (*Coffea arabica* L.). Rev. Acad. Colom. Cienc. 25 p.
- Jaramillo, R., A. 2004. El clima y su influencia en la producción Agrícola. Cenicafé Colombia. 18 - 43p.
- Jaramillo, R., A. & Quiroga Z., F. 1999. Dinámica de la Radiación solar en cafetales. Chinchiná. Cenicafé 20p.

- Jaramillo, R., A.; Dos Santos, J. M. 1980. Balance de radiación solar en *Coffea arabica* L. variedades catuaí y borbón amarillo. *Cenicafé* 31: 86 - 104p.
- Jaramillo, R., A.; Escobar, E., E. 1984. Balance de energía en *Coffea arabica* L. *CENICAFÉ* 34(4): 115 - 126p.
- Lowry, W. P. 1973. Compendio de apuntes de climatología para la formación de personal meteorológico de la clase IV. Organización Meteorológica Mundial - OMM -Ginebra. 167p.
- Mesa, O. J., G Poveda, & L. F. Carvajal, 1997. Introducción al Clima de Colombia, Imprenta Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, 330p.
- Montealegre A. Fernando L. 2003. Análisis Climatológico General del flanco Oriental de la Cordillera Occidental en la Jurisdicción del municipio de Yotocó Valle del Cauca. UNAL, sede Palmira. 13p.
- Oster, R., 1979. Las precipitaciones en Colombia, Colombia Geográfica, 4(2): 144p.
- Pabon, J.D; Zea, J; Leon, G; Montealegre, J.E; Hurtado G & Gonzalez, O.C. 1998. La atmósfera, el tiempo y el clima. *In: Leyva, P.(Editor). El medio ambiente en Colombia. IDEAM, Colombia. 38 - 86p.*
- Poveda, G. 2004. La hidroclimatología de Colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diaria. *Rev. Acad. Colomb. Cienc. 28 (107): 201-222. ISSN: 0370 - 3908p.*
- Rodriguez, M., H.; Gonzalez B., F. 1992. Manual de radiación solar en Colombia. Santafé de Bogotá, Universidad Nacional de Colombia, 148p.SANTOS, Luis Fernando. 1980. Estudio Agroclimático del piedemonte llanero.HIMAT. Bogotá, Colombia.
- SAS, 2002. Getting Started with the SAS Learning Edition. Cary, N.C., SASInstitute Inc. USA.VAN Der Hammen, T. 1992. Historia, Ecología y Vegetación. COA. 105 - 119p.<http://www.noaa.gov>.<http://www.ideam.gov.co>