

# REGIONALIZACIÓN DE LA DISTRIBUCIÓN DEL BRILLO SOLAR EN COLOMBIA POR MÉTODOS DE CONGLOMERACIÓN ESTADÍSTICA

Bernardo Chaves-Córdoba\*, Alvaro Jaramillo-Robledo\*

---

## RESUMEN

CHAVES C., B.; JARAMILLO R., A. Regionalización de la distribución del brillo solar en Colombia por métodos de conglomeración estadística. *Cenicafé* 48 (2): 120-132. 1997.

El estudio plantea una regionalización de la distribución mensual del brillo solar utilizando conceptos de macroclima (Zona de Confluencia Intertropical), de topoclima a nivel de cuenca hidrográfica y métodos estadísticos de agrupación (Cluster analysis). El análisis de agrupamiento por el método de Ward permitió seleccionar en el territorio colombiano 29 grupos de acuerdo con el brillo solar. Para cada patrón mensual se determinó su correspondiente intervalo de confianza con un 95% de confiabilidad. En Colombia se presentan comportamientos en la distribución del brillo solar de tipo unimodal, bimodal e interacciones entre los dos anteriores. En la región Oriental se presenta un comportamiento unimodal en los Llanos Orientales y en la vertiente del Amazonas. Características bimodales se presentan en la región andina, cuencas de los ríos Cauca, Magdalena y Patía e interacción entre las dos distribuciones ocurre en la región limítrofe entre la cordillera oriental y las regiones Amazónica y del Orinoco.

**Palabras claves:** Brillo solar, estadísticas, estudios meteorológicos

---

## ABSTRACT

Monthly sunshine distribution was grouped in regions using concepts of macroclimate (Inter-Tropical Confluence Zone), topographic (at the level of local watersheds) and cluster analysis. The Ward method of cluster analysis produced 29 Colombian territorial sunshine groupings. For each monthly pattern the corresponding 95% confidence intervals were calculated and distributions encountered were unimodal, bimodal or a mixture of the two. In the eastern region of Colombia (Amazon watershed and the Eastern Plains) sunshine is unimodal; in the Andean region (Cauca, Magdalena and Patía) the pattern is bimodal. Intermediate distributions occur in the eastern mountain ranges in both the Amazonas and Orinoco regions.

**Keywords:** Sunshine, statisticals, meteorological studies

---

\* Investigador Científico II. Biometría y Agroclimatología, respectivamente. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé, Chinchiná, Caldas, Colombia.

El territorio continental de Colombia está situado en la zona tropical entre los 4° de latitud Sur y los 12° - 30' de latitud Norte, posición que determina una alta disponibilidad de radiación astronómica y días solares aproximadamente iguales.

Los estudios sobre el brillo solar en Colombia realizados por Bernal (1), Rodríguez y González (10) y Simbaqueva *et al.* (13), demuestran que la región de mayor brillo solar es la península de la Guajira, con valores entre los 2800 a 3000 horas/año. Los valores más bajos se observan en la región suroccidental de Colombia (Mocoa-Putumayo) y la del pacífico con 800 a 1000 horas/año.

En los mapas de isohelias elaborados por Bernal (1), se observa una clara influencia de la altitud sobre el brillo solar, determinada por la nubosidad dentro de las diferentes conformaciones fisiográficas que dominan el país, como son las cuencas de los ríos Patía, Cauca y Magdalena, las llanuras del Atlántico y Pacífico y la región oriental con las llanuras del Orinoco y el bosque Amazónico.

En la zona cafetera Colombiana, localizada en altitudes entre los 1000 y 2000 msnm, se presentan valores frecuentes de brillo solar entre 1600 y 1.800 horas/año (9).

Colombia está ampliamente influenciada por masas de aire marítimas que provienen de los océanos Atlántico y Pacífico y masas continentales que provienen del amazonas; estos tres sistemas convergen a las tres cordilleras de los Andes, situación que explica la gran variabilidad de los climas que ocurren en el país.

Trojer (14) determinó la existencia de secuencias climáticas en el norte y en el sur de la zona cafetera; entre los dos extremos existe una zona con un ciclo climático que comprende dos estaciones secas y dos húmedas denominada "Ecuador climático" que determina a su vez un

ecuador fenológico en las regiones de cultivo del café.

El comportamiento del brillo solar en Colombia debe asociarse con la circulación general de las masas del aire, en la cual se destacan tres sistemas de circulación atmosférica a saber:

- Los alisios del noreste (NE), que determinan en Colombia las épocas de máximo brillo solar en los meses de diciembre a marzo, cuando alcanzan la máxima penetración en el continente. En las vertientes de las cordilleras los alisios se convierten en corrientes ascendentes que generan regiones de alta nubosidad y lluvia durante todo el año. Los alisios del noreste (NE) no llegan a la línea ecuatorial.
- Los alisios del sureste (SE), que dominan la parte suroriental del país hasta más o menos 8° de latitud Norte pero no pasan de la cordillera oriental hacia el occidente.
- La zona de confluencia intertropical (ZCIT), que se origina por el encuentro de los alisios del noreste y del sureste y se desplazan hacia el norte o hacia el sur según la época del año y la ubicación del sol. El eje de esta franja de confluencia coincide con el Ecuador climático que atraviesa el país, entre más o menos dos y cinco grados de latitud Norte (11, 14).

Existe además, la influencia de las masas húmedas provenientes del océano pacífico, las cuales originan grandes cantidades de lluvia en el continente (12.700 mm/año en Lloró-Chocó), asociadas con alta nubosidad y bajo brillo solar registrado en la llanura pacífica (4).

Guhl (7) divide el país de acuerdo con la distribución de lluvias en nueve regiones a saber: Guajira, Llanura del Caribe, Cordillera Oriental (4°-8°N); Llanuras orientales, Monta-

ñas de Antioquia y Caldas; Zona andina Central y Ecuador Climático; Valles del Cauca y Alto Magdalena, Altiplanicie de Popayán, Montañas del sur, Costa del Pacífico y Hoya Amazónica.

La distribución del brillo solar sigue un comportamiento análogo aunque es opuesta a la lluvia diaria.

Para Oster (11) en las regiones ecuatoriales la cantidad de radiación que alcanza el suelo no es tanto función de la exposición como de la nubosidad. La nubosidad es una barrera importante que impide la penetración de la radiación reduciendo el número de horas de brillo solar.

Gadgil y Joshi (6) conceptúan que la identificación de las regiones homogéneas, respecto a patrones, es un problema importante en la clasificación climática, pero normalmente se realiza subjetivamente sin acudir a las herramientas de los métodos estadísticos de clasificación.

El análisis estadístico multivariado de componentes principales ha sido empleado en varios estudios climatológicos (2,8) para examinar la variación espacial y temporal. El principal objetivo de este análisis consiste en explicar las relaciones entre las variables, reduciendo la dimensionalidad de la información para identificar características recurrentes e independientes dentro de un conjunto de datos con lo cual se resume la información inicial.

El análisis de agrupamiento "cluster analysis" conforma grupos de acuerdo a la similitud de las observaciones o grupos, medida por la distancia multivariada entre las observaciones o grupos. Este método de agrupamiento es de tipo jerárquico, es decir, que el número inicial de grupos es igual al número de observaciones y el final es un solo grupo que reúne todas las observaciones. Lo anterior indica que se debe seleccionar el número de grupos

considerando las medidas de distancia que ofrece la metodología (10).

La distribución temporal del brillo solar está determinada por efectos latitudinales y la cantidad de brillo solar por efectos altitudinales generados por la circulación valle-montaña. El comportamiento de la distribución del brillo solar para el territorio colombiano está asociado al ciclo anual de las lluvias, que depende a su vez de la circulación general de la zona de confluencia intertropical (Z CIT); de factores regionales de topografía como son las llanuras Atlántica y Pacífica, los valles interandinos del Cauca, Magdalena y Patía, y la región Amazónica.

A escala local, las diferencias en la elevación del terreno y la orientación de la superficie controlan la cantidad de insolación recibida. El relieve del terreno puede influir en la cantidad de insolación y en el tiempo de exposición, ya que una cadena montañosa reduce las horas de sol durante ciertos momentos a lugares que están situados en sus valles y laderas.

Este estudio, tuvo como propósito proponer una regionalización de la distribución mensual del brillo solar en Colombia, utilizando aproximaciones de macroclima, de topoclima y métodos de agrupación estadística.

## MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo consideró la información de brillo solar presentada por la Federación Nacional de Cafeteros (5) y en los estudios de Rodríguez y González (12) y Simbaqueva *et al.* (13).

Del archivo de datos, las filas u observaciones fueron las 206 estaciones y las columnas o variables, el total promedio del brillo solar de cada uno de los doce meses, el total promedio anual y la ubicación geográfica.

La red de estaciones climáticas operadas por diferentes instituciones utiliza como instrumento de medida del brillo solar el Heliógrafo Campbell-Stokes.

Los métodos multivariados de análisis de componentes principales, «cluster analysis» y otros, se han utilizado recientemente en varios trabajos de agrupación de características agroclimáticas (2,3). Para la regionalización de la distribución del brillo solar se usó el método de Ward de «cluster analysis». Este método de agrupación es de tipo jerárquico y se usó la distancia de Mahalanovis como criterio de conglomeración. De acuerdo con Massart y Kaufman (10), el método de Ward se usa con bastante frecuencia debido a las propiedades que lo caracterizan, aunque la comparación de métodos de aglomeración es un problema que no está completamente resuelto.

El método de Ward aplica un criterio de aglomeración a posteriori; para ello, se propone el grupo que se puede formar y luego se decide conformar aquel grupo para el cual el incremento en heterogeneidad es menor. La heterogeneidad de cada grupo se calcula a través de la suma de la distancia al cuadrado de cada elemento al centroide del grupo. El centroide simplemente es el promedio de los elementos del grupo. No existe un criterio satisfactorio para seleccionar el número de grupos, sin embargo, la agrupación se puede evaluar mediante el análisis discriminante y algunas pruebas estadísticas.

La agrupación inicial se hizo de acuerdo con dos criterios climatológicos; como primer criterio se dividió el país en tres fajas latitudinales:

1. Areas menores de 3° de latitud norte.
2. Areas en latitudes entre 3 y 7°.
3. Areas mayores de 7° de latitud norte.

Se buscó con esta agrupación, establecer zonas homogéneas como control a la variabilidad generada por la influencia que tiene la Zona de Convergencia Intertropical, la cual determina la nubosidad y las épocas de lluvia. Este se denominó como nivel macroclimático.

El segundo criterio de agrupación fue el fisiográfico, que corresponde a influencias de tipo local representadas por la circulación vallemontaña-valle, y fue llamado nivel Topoclimático. Estas regiones fueron:

1. Pacífico.
2. Cuenca del río Patía.
3. Cuenca del río Cauca.
4. Cuenca del río Magdalena.
5. Región Amazónica.
6. Cuenca río Catatumbo.
7. Sierra Nevada.
8. Atlántico.
9. Llanos Orientales.
10. Región Cundiboyacense.
11. Nariño.

La agrupación dentro de las zonas establecidas previamente se hizo a través del «cluster analysis» con el método jerárquico de Ward. Para el agrupamiento se tuvo en cuenta el brillo solar promedio mensual, de series de estaciones con al menos diez años de datos diarios, la ubicación geográfica y el promedio total de brillo anual en cada estación.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De las 215 estaciones del estudio se descartaron las que presentaron información inconsistente y las correspondientes a otras regiones no definidas en la agrupación fisiográfica. En la Tabla 1, se consigna el número de estaciones dentro de cada región fisiográfica considerada. De la latitud menor de 3° se descartaron la

TABLA 1. Grupos de regiones según la distribución del brillo solar en Colombia, elaborados con base en el análisis de conglomerado de acuerdo con la región fisiográfica y la latitud.

Latitud	Región	Nº Estaciones	Grupos
menores de 3°	Pacífico	2	-
menores de 3°	Cuenca río Patía	6	2
menores de 3°	Cuenca río Cauca	4	1
menores de 3°	Cuenca río Magdalena	7	2
menores de 3°	Región Amazónica	8	2
menores de 3°	Llanos Orientales	2	-
menores de 3°	Nariño	5	2
3° - 7°	Pacífico	4	-
3° - 7°	Cuenca río Cauca	39	3
3° - 7°	Cuenca río Magdalena	33	2
3° - 7°	Llanos Orientales	12	2
3° - 7°	Región Cundiboyacense	28	2
mayores de 7°	Cuenca río Cauca	7	2
mayores de 7°	Cuenca río Magdalena	6	2
mayores de 7°	Cuenca río Catatumbo	9	2
mayores de 7°	Sierra Nevada	10	2
mayores de 7°	Atlántico	31	3
mayores de 7°	Región Cundiboyacense	2	-

región Pacífico y los Llanos Orientales por tener solo dos estaciones climatológicas, de la latitud entre 3° y 7° se eliminó la región Pacífico y para la latitud mayor de 7° no se tuvo en cuenta el área de Santander del Sur.

La aplicación del método de agrupamiento de Ward dio como resultado la selección de varios grupos (Tabla 1) en cada una de las regiones y latitudes.

El análisis de agrupamiento (Cluster analysis) permitió seleccionar para Colombia

29 grupos de acuerdo con la distribución del brillo solar, incluidos en la Figura 1. Para cada uno de los grupos determinados se trazó un patrón mensual con su correspondiente intervalo de confianza, con un 95% de confiabilidad (Figura 2). En algunas regiones se aprecia alta variabilidad debido al escaso número de estaciones analizadas.

En Colombia se presentan comportamientos en la distribución del brillo solar con características unimodales, bimodales e interacciones de las dos anteriores.

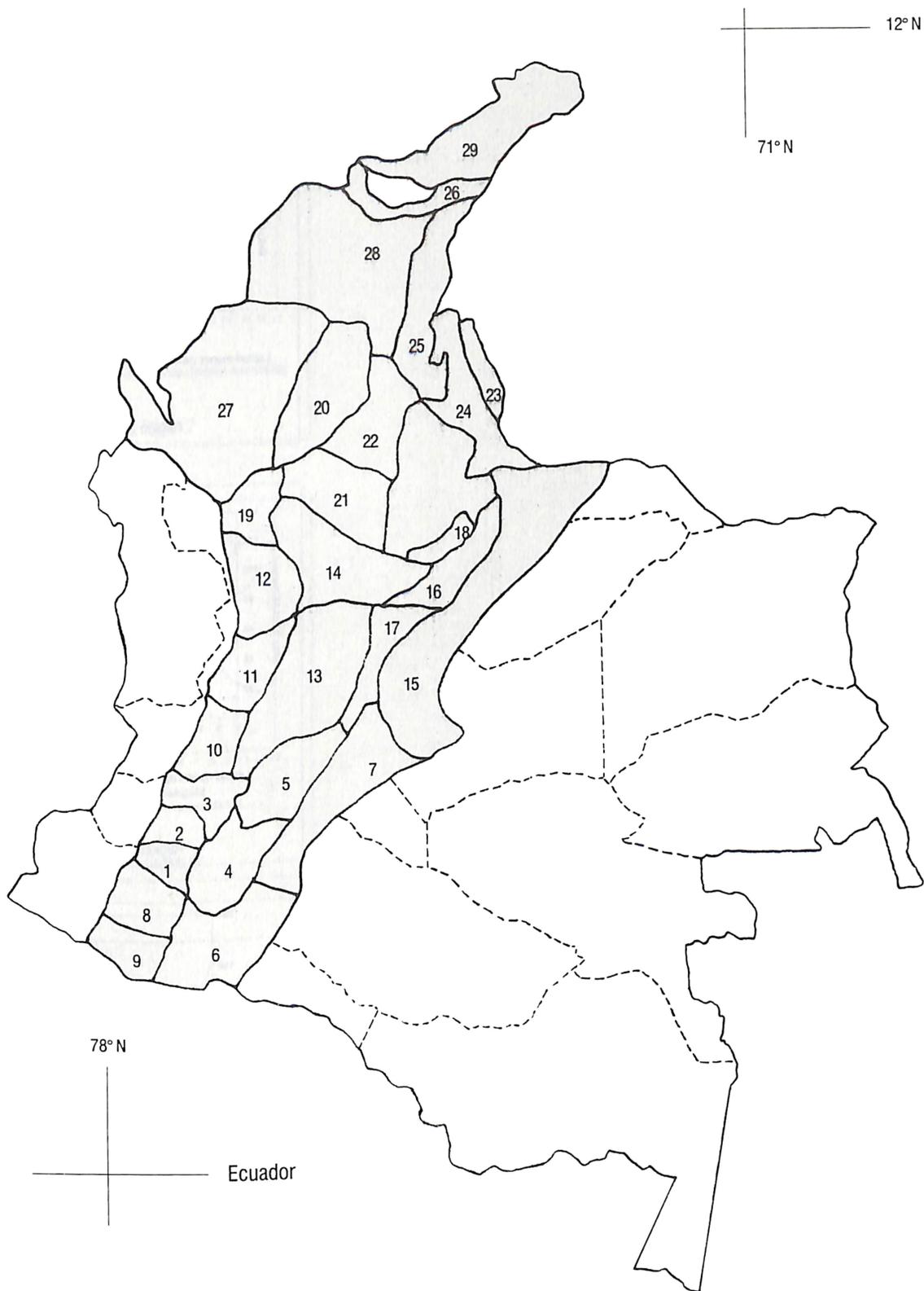


Figura 1. Distribución regional del brillo solar en Colombia. Análisis de conglomerados.

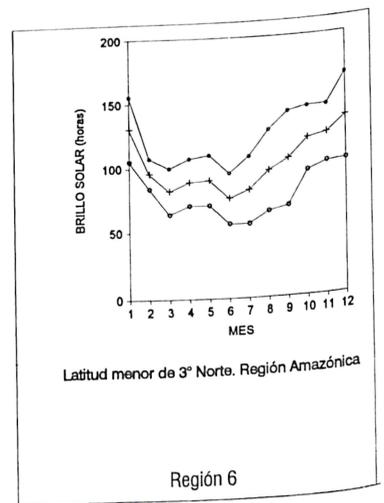
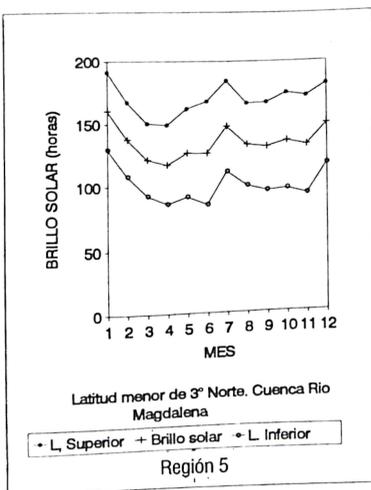
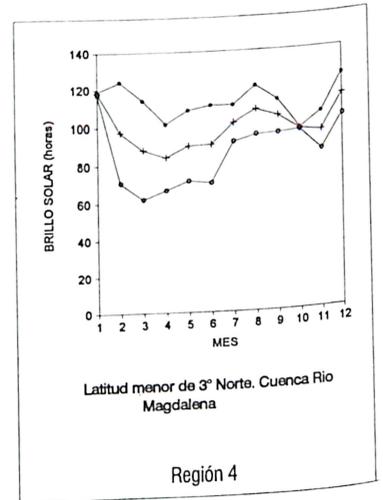
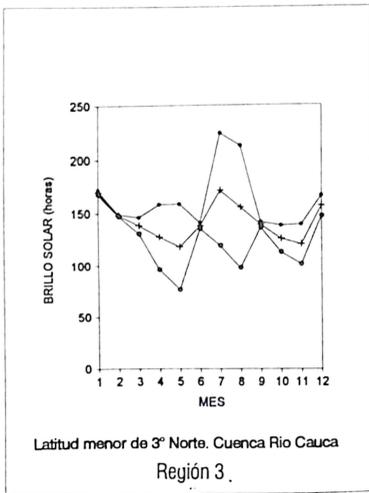
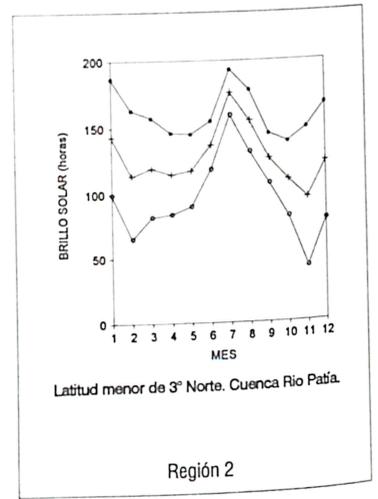
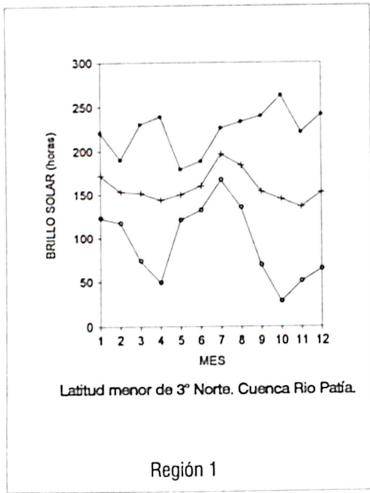
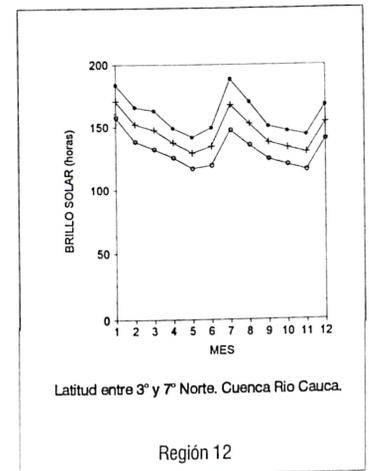
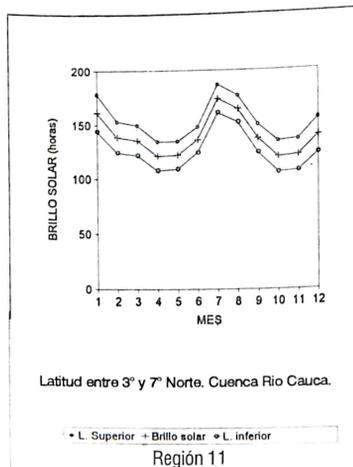
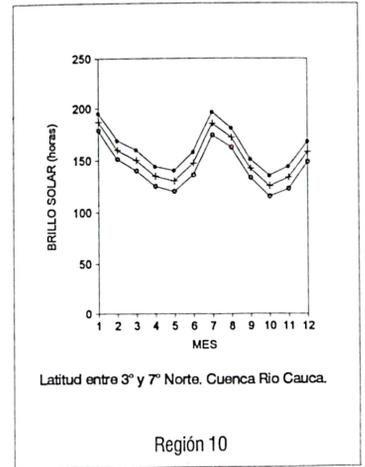
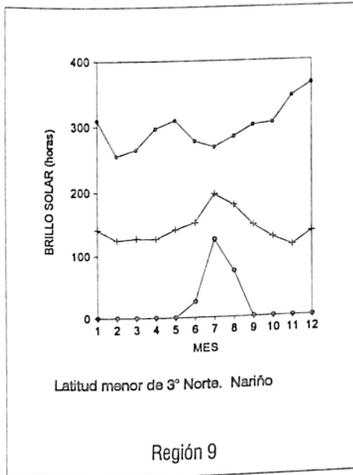
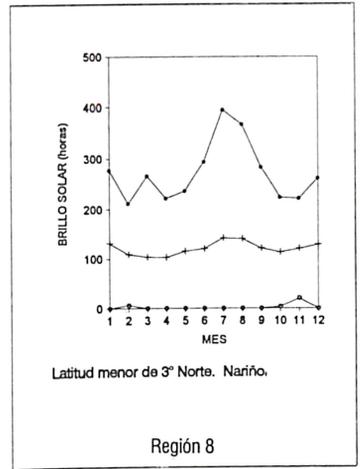
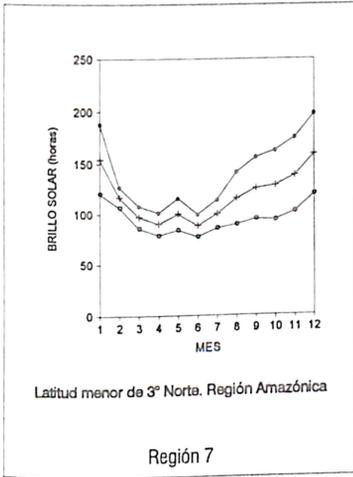
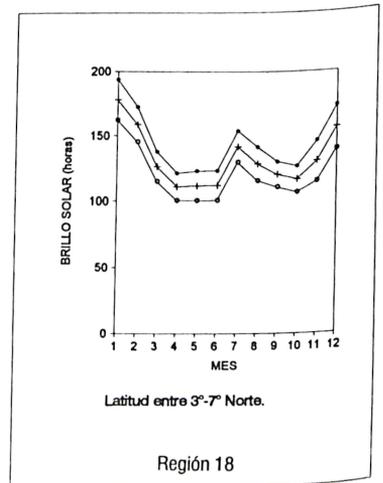
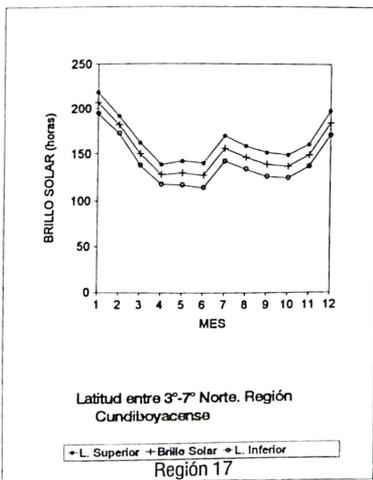
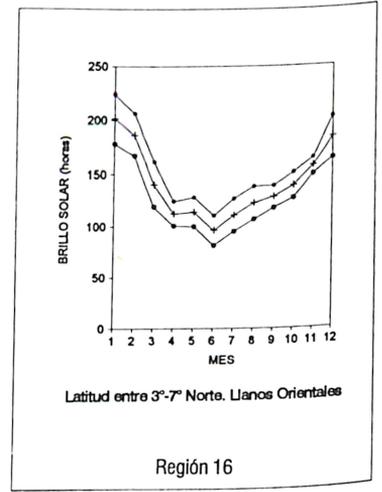
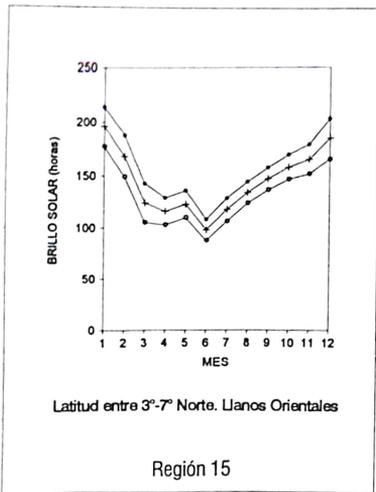
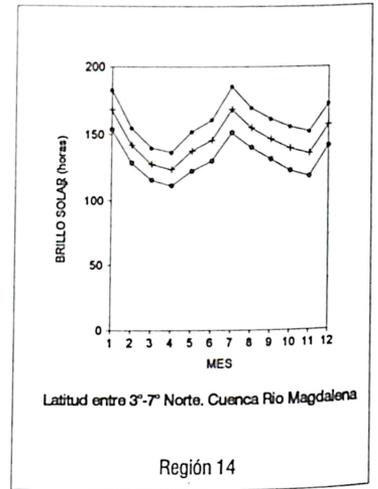
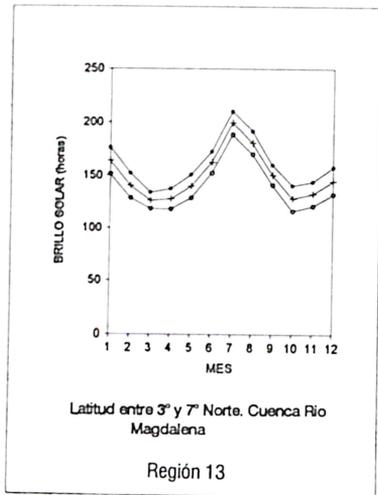
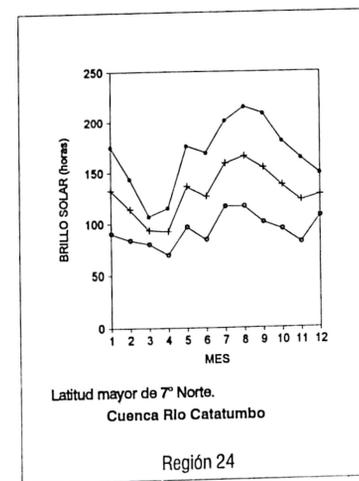
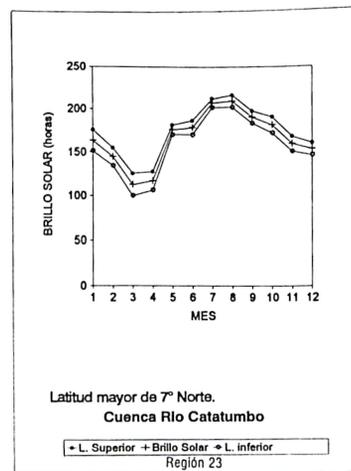
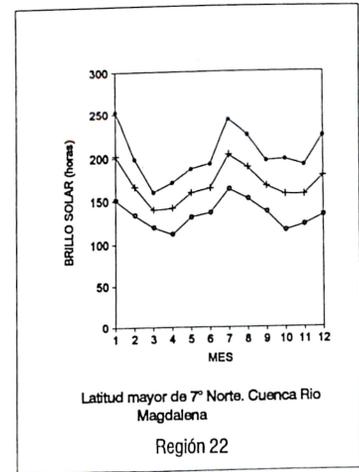
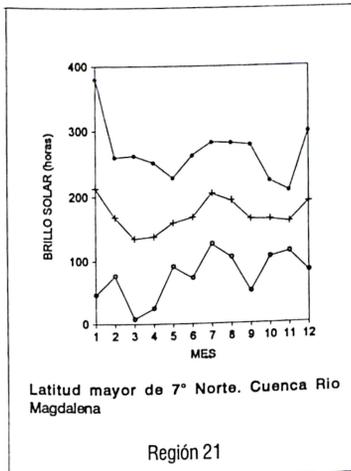
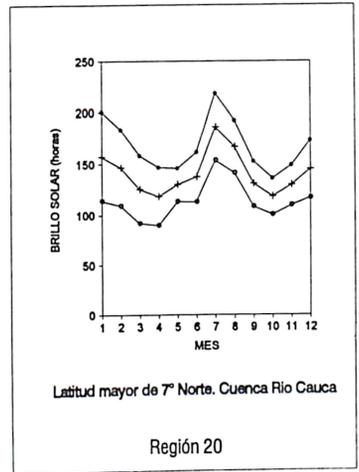
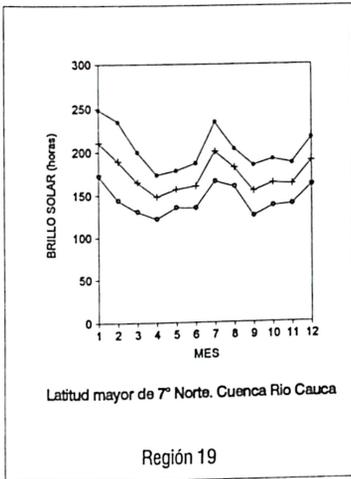
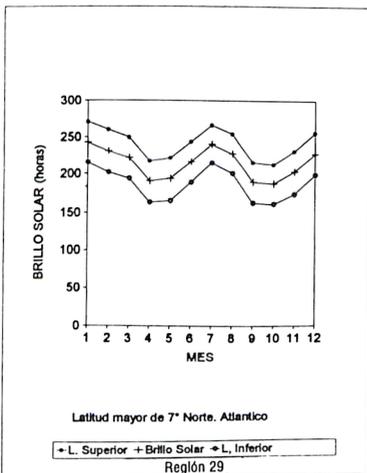
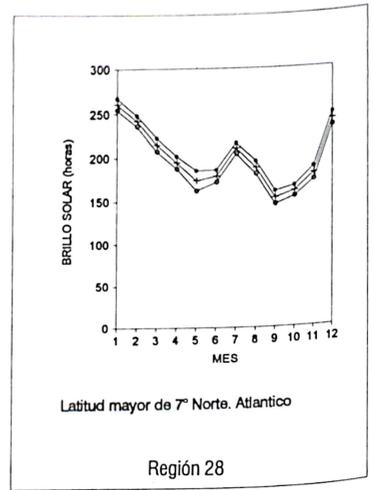
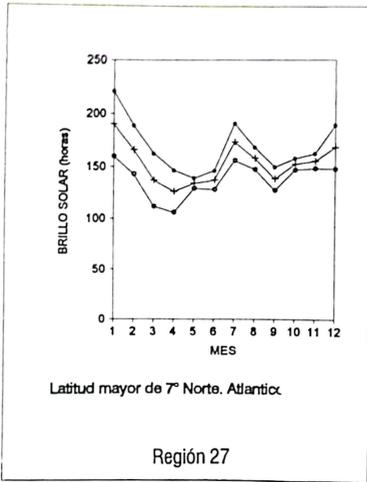
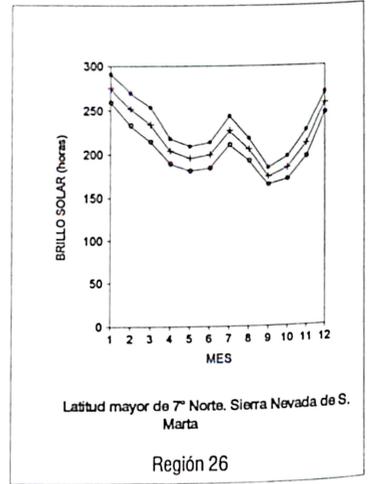
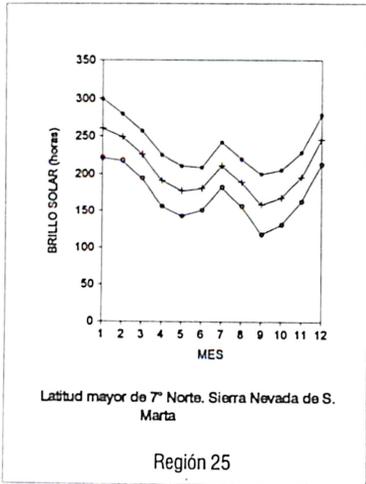


Figura 2. Patrón de distribución del brillo solar para cada región resultante del estudio de regionalización por conglomeración estadística.









Comportamientos unimodales ocurren en la región Oriental de Colombia, en los Llanos Orientales, y en la vertiente del Amazonas, con valores máximos en diciembre-enero y mínimos en junio-julio.

Características bimodales se presentan en la región andina (Cauca, Magdalena y Patía), con dos máximos en diciembre-enero y julio-agosto. Un comportamiento en donde se presenta la influencia de las dos distribuciones se observa en la región límite entre la cordillera oriental y las regiones Amazónica y la del Orinoco.

En el presente estudio se hallaron en total 29 áreas que caracterizan la distribución del brillo solar; no se tuvieron en cuenta dentro del trabajo las regiones Pacífica, Los Llanos Orientales, ni el área marítima de Colombia. La existencia de una variada cantidad de regiones se explica por la heterogeneidad de topoclimas presentes en el área andina y la incidencia en el país de los vientos alisios procedentes del noreste (NE) y del sureste (SE), que determinan la presencia de la Zona de Convergencia Intertropical. Bernal (1) había planteado para el país 8 grandes áreas que diferenciaban la distribución del brillo solar en Colombia; es de anotar que dentro de su metodología no utilizó análisis de conglomerados para su caracterización.

La cantidad del brillo solar está determinada a nivel local por los sistemas de nubosidad asociados a la circulación de valle-montaña de cada ladera y a su vez condicionada por la altitud, la disposición orográfica y la actividad convectiva de cada localidad.

En el territorio colombiano, según Bernal (1), la región de mayor brillo solar se ubica en la península de la Guajira con valores próximos a las 3000 horas/año. Áreas con brillo solar entre 2000 y 3000 horas se encuentran en la llanura Atlántica, valles del río Cesar, Sinú, Cauca, Magdalena y Patía. Las regiones con

brillo solar inferior a 1000 horas se encuentran en la llanura Pacífica, Nudo de los Pastos y en las cabeceras de los ríos Magdalena y Caquetá, y representan un 25% del área de Colombia.

El brillo solar promedio para la zona cafetera está próximo a 1550 horas/año, lo cual representa el 36% del brillo solar máximo astronómico, e indica las condiciones de alta nubosidad diurna y altas proporciones de radiación difusa. Como valores extremos observados en la región cafetera se han registrado en Pueblo Bello - Cesar y El Rosario - Antioquia valores próximos a 2100 horas/año. El menor valor, 945 horas/año, se registró en la localidad de Villa Rica - Tolima. Una gran proporción de las localidades de la zona cafetera presentan entre 1600 y 1800 horas de brillo solar al año.

El presente estudio integra, para la determinación de áreas homogéneas, elementos de tipo climático y estadístico que dan seguridad y confiabilidad en los resultados. Clímicamente considera la circulación general de la ZCIT de acuerdo con la latitud y la circulación de valle-montaña, debidas a la topografía presente. Estadísticamente se hace uso de una de las herramientas de mayor solidez existentes en el momento actual para analizar este tipo de información.

## LITERATURA CITADA

1. BERNAL G., G. Distribución espacial del brillo solar en Colombia. Bogotá, HIMAT. 1989. 98 p.
2. DYER, T.G.J. The assignment of rainfall stations into homogeneous groups: An application of principal component analysis. Quarterly Journal Royal Meteorological Society 101:1005-1013. 1975.
3. EDER, B.K.; DAVIS, J.M.; MONAHAN, J.F.. Spatial and temporal analysis of the palmer drought severity index over the south-eastern United States. International Journal of Climatology 7(1): 31-56. 1987.

4. ESLAVA R., J.A. Climatología del Pacífico Colombiano. Santafé de Bogotá. Academia Colombiana de Ciencias Geofísicas, 1994. 79 p.(Colecciones Erastotenes N° 1).
5. FEDERACION NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA. CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIONES DE CAFÉ. CENICAFE. Archivo Histórico de Brillo Solar 1950 - 1993. Chinchiná, Cenicafé, 1993.
6. GADGIL, S.; JOSHI, N.V. Climatic clusters of the Indian region. *International Journal of Climatology* 3(1): 47-63. 1983.
7. GUHL, E. Colombia: Bosquejo de su geografía tropical. Bogotá, Instituto Colombiano de Cultura, 1975. 236 p.
8. HUTH, R.; NEMESOVA, I.; KLIMPEROVA, N. Weather categorization based on the average linkage clustering technique: an application to european mid latitude. *International Journal Climatology* 13 (8):813-835. 1993.
9. JARAMILLO R., A. Características climáticas de la zona cafetera In: *TECNOLOGÍA del cultivo del café*. Chinchiná, Cenicafé, 1987. p 7-55.
10. MASSART, D.L.; KAUFMAN, L. The interpretation of analytical chemical data by the use of cluster analysis. New York, John Wiley Sons. 1983. 237p.
11. OSTER, R. Las precipitaciones en Colombia. *Revista Geográfica IGAC* 6 (2): 5-147. 1979.
12. RODRIGUEZ M., H.; GONZÁLEZ B., F. Manual de radiación solar en Colombia; radiación sobre superficies horizontales. Bogotá, Universidad Nacional de Colombia. 1992.148 p.
13. SIMBAQUEVA, F.O.; BASTOB., L. C.; HURTADO M.,G. Estudios de la radiación solar en Colombia. Bogotá, HIMAT-IAN, 1986. 113p.
14. TROJER H. The phenological equator for coffee planting in Colombia In: *AGROCLIMATOLOGICAL Methods* Proceedings of the Reading Symposium. París, Unesco, 1968. Vol. 7,p. 107-117