

ESTIMACION DE LA DISTRIBUCION DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL
EN LA REPUBLICA DE BOLIVIA

(*) H. GROSSI GALLEGOS*, G. ATIENZA, M. GARCIA, G. RENZINI y M. PERALTA.
(**) I. SARAVIA UNZUETA y A. ARTEAGA TAMAYO

I. INTRODUCCION.

La República de Bolivia está ubicada en el corazón de América del Sur, entre los 9°45' y los 22°47' de latitud sur, en plena zona tropical. Es un país mediterráneo en la verdadera acepción de "la palabra"; está totalmente rodeado por tierras, condición que comparte con Paraguay, también sin acceso directo al mar.

Morfológicamente, se reconocen en el país cuatro unidades diferentes (figura 1): una elevada meseta en el Occidente (Altiplano norte y sur), la unidad de la Cordillera Oriental (zonas norte, centro y sur), una zona de transición entre el Occidente y el Oriente (unidad Subandina norte, centro y sur) y la zona Llanos debe mencionarse la presencia de las Sierras Chiquitas (1). Cada una de estas zonas se diferencia de las otras por el clima, la vegetación y la densidad y carácter de la población.

Esta división en zonas la determinan dos largas y elevadas cordilleras que provienen del Perú y que son poderosas bifurcaciones del nudo montañoso de Vilcanota o Apolobamba, de los Andes Peruanos. La rama occidental continúa rectilíneamente hacia el sur y se mantiene aproximadamente paralela a la costa del Pacífico; constituye el límite natural entre Bolivia y Chile y recibe los nombres de Cordillera Occidental o de la Costa, elevada, áspera, de aspecto desolado, con escasos pasos a gran altura. La bifurcación oriental es denominada Cordillera Real, en la cual numerosas cimas superan los 6000 metros de altitud, constituyendo su eje la espina dorsal de la cual arranca una rama denominada Cordillera Oriental, constituida por numerosos ramales, entre ellos la Cordillera de Cochabamba. Las abundantes cordilleras secundarias de este sistema actúan como divisorias de las aguas que alimentan el sistema lacustre interior y los ríos que van a las cuencas del Amazonas y del Río de La Plata.

Entre la Cordillera de la Costa y la Cordillera Real queda encerrado el Altiplano Central o Puna, meseta que se mantiene a una altura que oscila entre los 4060 m y los 3550 m y en la que abundan los salares.

Por el contrario, el descenso de la rama Oriental de la Cordillera Real a los Llanos es escalonado, suave y gradual, el clima se atempera y se crean condiciones favorables para los cultivos; es la región denominada las Yungas, de suelo muy fértil y de considerable importancia en la economía boliviana.

(*) Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales, Centro Espacial San Miguel, Av. Mitre 3100 -(1683)- San Miguel- Buenos Aires - ARGENTINA.

(**) Universidad Mayor de San Andrés, Instituto de Investigaciones Físicas, FCPN, Casilla No. 8635, La Paz, BOLIVIA.

* Miembro de la Carrera del Investigador del CONICET

Como consecuencia de lo expuesto, las variantes climáticas del país pueden reducirse fundamentalmente a dos tipos: uno, el que reina en la Puna, que debiera ser cálido por su latitud, pero que está atenuado por la altitud extrema de la región y por agentes climáticos diversos; en la estación invernal, de mayo a septiembre, se cubre con frecuencia de nieve, se deja sentir intenso frío en las zonas elevadas y las lluvias son escasas, mientras que en los valles bajos de la meseta el clima es más suave y las lluvias más abundantes. En la estación estival la intensidad de las precipitaciones se acrecienta y en los días nublados se registran bajas temperaturas.

El otro tipo de clima, reinante en los Llanos orientales, es cálido-húmedo, ecuatorial en el centro, con lluvias abundantes superiores a los 2600 milímetros anuales, y algo más reducidas en la sección meridional (2).

2. LA CUESTION ENERGETICA

Tradicionalmente, la política energética boliviana se ha centrado en la producción y consumo de hidrocarburos y electricidad; sin embargo, existen regiones en las que el equilibrio entre la oferta y la demanda de energía es crítico, como ocurre en los casos del Beni y del Altiplano, entre otras. El consumo de taquia y thola, en la Puna, y de leña, en los Valles y Trópicos, es elevado y se hace aconsejable su sustitución.

Es así que, en las Bases Fundamentales para el Programa Nacional de Energía (3) que está elaborando el Ministerio de Energía e Hidrocarburos se contempla, en su capítulo 3 ítem 46, los "elementos básicos para una estrategia de sustitución y uso racional de energéticos"; entre los puntos sobresalientes sobre los que se sugiere actuar se cuentan el desarrollo de un Programa Nacional de Energías Nuevas y Renovables, el establecimiento de una metodología de análisis para el aprovechamiento de energías tales como biogás, eólica, solar, pequeñas centrales hidroeléctricas, etc. y la iniciación de proyectos piloto con energías y tecnologías apropiadas a cada caso.

Cabe tener en cuenta además la existencia de una demanda creciente de aprovechamiento de la energía solar, ya sea para el calentamiento de agua (vivienda particular, piscinas, hoteles), para la ambientación de invernaderos en la Puna o para la generación fotovoltaica de energía eléctrica (iluminación, bombeo de agua).

Para optimizar el aprovechamiento de esta fuente de energía a través de una planificación de carácter nacional es imprescindible conocer la disponibilidad de la misma en las diferentes regiones del país; de allí la decisión de implementar una Red Solarimétrica que ofrezca la información confiable que permita su uso racional.

3. ANTECEDENTES DE COOPERACION.

En 1982, uno de los miembros del Grupo de Energía Solar del Instituto de Investigaciones Físicas (IIF) de la Universidad Mayor

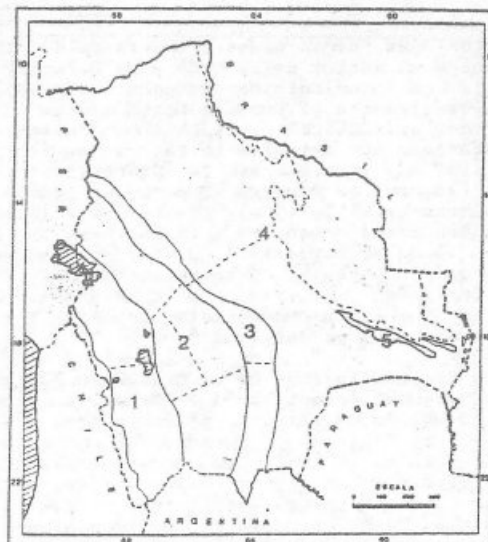


Figura 1. Mapa de las unidades morfoestructurales de Bolivia.

1. Altiplano; 2. Cordillera Oriental; 3. Subandina;
4. Llanura; 5. Sierras Chiquitanas.

de San Andrés (UMSA), que venía trabajando en el tema desde que fuera creado en 1960, participó de la Reunión Regional de Coordinación del Grupo de Trabajo sobre Radiación Solar de los Países del Grupo Andino que se llevó a cabo en Huancayo, Perú, del 10 al 15 de enero. La misma, fue auspiciada por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH), organismo especializado de la Organización de los Estados Americanos (OEA); allí se recomendó el establecimiento de redes solarimétricas en los países del citado Grupo, trabajando en estrecha cooperación.

En base a ello, y a las recomendaciones del Programa Trienal de Desarrollo Nacional del Gobierno de Bolivia, la Comisión de Geofísica (Comité de Física Solar-Terrestre) de la Sección nacional Boliviana de IPGH presentó en abril de 1982 un proyecto de Red Solarimétrica pidiendo su financiación (posteriormente se otorgaron fondos que cubrieron sólo parcialmente la propuesta), proyecto que sería ejecutado por el citado Instituto de la UMSA, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología y la Administración Autónoma de Servicios Auxiliares a la Navegación Aérea (AASANA).

Paralelamente, y como consecuencia de las conversaciones mantenidas en la mencionada reunión de Huancayo entre el representante del IIF y el de la Red Solarimétrica de Argentina (que había comenzado a montar sus estaciones a fines de 1979), surgió una invitación de las autoridades de la institución boliviana, para visitar sus instalaciones. Fue así que, a fines de septiembre de 1983, dos integrantes de la Red de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIE) permanecieron unos días en La Paz, discutiéndose en esa oportunidad las bases de un plan de trabajo en común.

Los pasos posteriores fueron dados a través de la correspondencia intercambiada entre el Rector de la UNSA y el Director del Instituto de Transferencia de Tecnología Aeroespacial (INTTAE), que fuera creado por convenio entre el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) y la CNIE en noviembre de 1979, el que estaba encargado por entonces de la tramitación por el lado argentino. el INTTAE inició ante la Cancillería argentina las gestiones para lograr un Acuerdo Específico complementario del "Convenio de Cooperación Cultural, Científica y Técnica entre el Gobierno de la República Argentina y el Gobierno de Bolivia", que fuera firmado el 12 de julio de 1971, gestiones que merecieron de la Subsecretaría de Cooperación Internacional del Ministerio de Relaciones Exteriores y Culto "la opinión favorable y la manifestación de que sería conveniente para los intereses de la República Argentina la firma del Acuerdo".

Finalmente, y en cumplimiento de lo dispuesto por el Decreto del Poder Ejecutivo Nacional Argentino N° 2427/84, viajaron a La Paz dos integrantes de la Red Solarimétrica, procediéndose a firmar el 18 de septiembre de 1984 el Programa de Cooperación entre la Universidad y el citado Instituto de la CNIE. Como consecuencia del mismo, se facilitaron en calidad de préstamo tres estaciones de medición de la radiación solar global diaria similares a las instaladas en Argentina, las que fueron ubicadas en los lugares determinados por los especialistas bolivianos: Santa Cruz de la Sierra, Tarija y Oruro. Allí quedaron en funcionamiento tres piranómetros marca Eppley modelo 8-48 "Black and White" acoplados a integradores electrónicos de fabricación argentina; por su parte, la universidad instaló una estación similar en Cota Cota (La Paz), equipada con un piranómetro marca Eppley PSP.

En agosto de 1987 se levantó la estación de Oruro, trasladándose a la ciudad de Trinidad, capital del Departamento de Beni, quedando habilitada a fines de noviembre en dependencias de la Facultad de Ciencias Agrícolas de la Universidad Técnica del Beni.

4. PROCESAMIENTO DE LOS DATOS EXISTENTES.

Para la elaboración de esta evaluación, que reviste carácter estimativo y preliminar, se dispuso de la información diaria de horas de insolación (heliofania absoluta) provenientes de 39 estaciones bolivianas, la que fue provista por Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología dependiente del Ministerio de Aeronáutica, las que se consignan en la tabla I y se muestra su distribución en la figura 2.

Como es bien sabido, es posible establecer una correlación entre los valores del cociente del promedio de la insolación diaria (N) y el valor medio de las horas teóricas de brillo de sol (N_0), por un lado, y el cociente entre el valor medio de la radiación global que incide diariamente sobre un plano horizontal ubicado en tierra (H) y el valor medio de la radiación que incidiría sobre el mismo plano ubicado fuera de la atmósfera terrestre (H_0), la que fuera propuesta por Angstrom (4) y ligeramente modificada por otros autores.

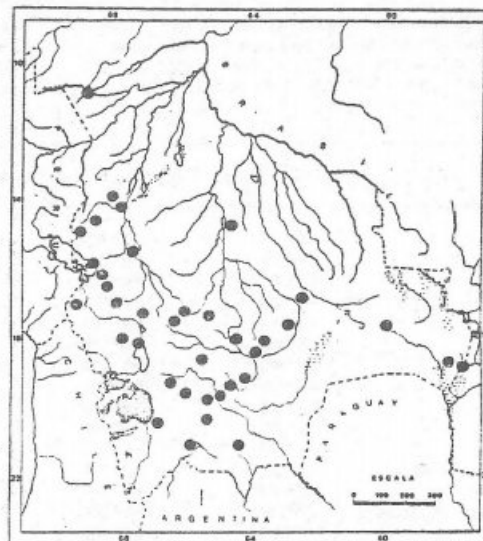


Figura 2. Ubicación de las estaciones utilizadas en el presente trabajo.

El procedimiento recomendable es deducir en cada región los coeficientes de ajuste de la relación lineal; pero como no existen registros piranométricos suficientemente extensos en Bolivia, se presentaron dos opciones: a) utilizar los coeficientes deducidos en zonas vecinas, en este caso, en Argentina con los datos de su Red Solarimétrica (5) ó b) utilizar los coeficientes recomendados por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para la región (6), basándose en un trabajo de Trewartha (7) y en la experiencia de mediciones realizadas en el curso de diferentes proyectos; en este último caso se diferencian dos zonas en el país: el Altiplano y el resto.

Para la primera opción los coeficientes toman los valores $b = 0,20$ y $a = 0,55$, mientras que en la segunda, para el Altiplano se recomiendan los valores $b = 0,29$ y $a = 0,42$ y para el resto del país $b = 0,25$ y $a = 0,45$.

Se procedió a procesar la información para las dos opciones, utilizándose como valor de la radiación a tope de atmósfera la constante solar recomendada por la Organización Meteorológica Mundial (8), esto es, $1367,7 \text{ W.m}^{-2}$. Para decidir sobre los coeficientes a utilizar finalmente se compararon los resultados obtenidos con los ofrecidos por el satélite geo-estacionario GOES para la zona comprendida entre los 57° y los 67° de longitud oeste y los 14° y los 23° de latitud sur, para el período comprendido entre julio de 1982 y diciembre de 1987 (9), cuyo ajuste para Argentina fuera verificado en un trabajo anterior (10). La suma de los cuadrados de los apartamientos fue menor en el caso de la propuesta de FAO, por lo que se decidió operar con ellos. Los valores así obtenidos difieren sin embargo de los presentados por FAO en un trabajo posterior al y citado (11) pues allí se utilizó para la constante solar el valor $2,00 \text{ cal. cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$.

TABLA I

Estación	Latitud (s)	Longitud (o)	Altura (m)
Pando	11°20'	68°43'	280
Apolo	14°11'	68°30'	1383
Maije	14°15'	68°00'	
Angosto del Bala	14°29'	67°57'	174
Trinidad	14°44'	64°50'	157
Ulla Ulla	15°00'	68°29'	4660
Sapecho	15°45'	67°20'	500
Belén	16°00'	68°40'	3820
Hichucota	16°11'	68°28'	3820
Huacullani	16°28'	68°44'	
El Alto	16°29'	68°10'	4056
La Paz (Central)	16°32'	68°14'	3650
San Julián	16°43'	62°38'	710
Santiago de Machaca	17°08'	69°17'	3970
Patacamaya	17°13'	67°94'	3788
San Pedro Buena Vista	17°14'	66°00'	2850
Cochabamba	17°30'	66°10'	2557
Santiaváñez	17°32'	65°14'	2690
Caracollo	17°34'	67°12'	3800
Pocona	17°38'	65°23'	2658
Santa Cruz Central	17°47'	63°10'	520
San Juan	17°52'	60°00'	297
Comarapa	17°53'	64°30'	1940
Mairana	18°08'	63°56'	1350
Corque	18°18'	67°43'	3725
Vallegrande	18°28'	64°07'	198
Puerto Suárez	18°57'	57°47'	145
Yacuces	19°00'	58°12'	145
Lagunilla	19°33'	63°43'	1925
Potosí	19°36'	65°32'	3945
Granja de Puna	19°45'	65°30'	
Monteagudo-El Bañado	19°48'	64°00'	1150
Padilla	19°57'	64°23'	2130
Azurduy	19°58'	64°29'	2500
Uyuni	20°27'	66°49'	3664
Culpina	20°50'	64°55'	2950
Julaca	20°55'	67°40'	
Tupiza	21°26'	65°43'	2952
Sucre	19°01'	66°16'	2759
Tarija	21°34'	64°48'	1858

Se han tenido en cuenta además las mediciones piranométricas efectuadas en zonas limítrofes de Argentina, Brasil y Perú, como así también los datos de heliofania de la República del Paraguay que fueran tratados con similar metodología (12). Además, y con la finalidad de obtener alguna información sobre la variación espacial de la distribución de la radiación global en lugares en donde no existe ningún tipo de medición se utilizaron los valores estimados a partir del satélite ya mencionado.

Finalmente, se tuvieron en cuenta las características de la vegetación natural en vista de la evidente existencia de correlación entre ésta y las horas de sol (13). Para proceder a la regionalización se manejaron los datos existentes, tanto en Bolivia (14) como en Paraguay (15), quedando determinadas las nueve zonas que se indican en la figura 3:

- Bosque pluvial (Bp) : bosque húmedo poco alterado, con formaciones en estratos de árboles subtropicales y sotobosque denso.
- Bosque montano (Bm) : bosque húmedo alterado.
- Bosque seco (Bs) : bosque seco, alterado, con formaciones xerofíticas y semixerofíticas.
- Bosque estacional (Be) : bosque de transición.
- Bosque del Chaco (M) : formación que se encuentra entre el Chaco Seco (12) y los faldeos de la montaña. Bosque xerofítico claro y sabanas arbustivas-arbóreas presente en la zona del Chaco como vegetación de inclusión.
- Sábana con sinucia leñosa (S) : formación de transición entre la sabana y el bosque.
- Sábana arbolada (D) : formación de sabanas y praderas con bajos periódicamente inundables. Existen macizos arbóreos dispersos de poca densidad. Forma parte del Chaco Deprimido como vegetación de inclusión.
- Estepa arbórea-arbustiva semi-seca (E) : bosque seco degradado, caracterizado por formaciones arbóreas-arbustivas semi-secas.
- Pantanal (P) : formación mixta herbácea-leñosa con zonas siempre pantanosas.

II. RESULTADOS

Se elaboraron así doce cartas con la distribución espacial del promedio mensual de la radiación solar global diaria incidente sobre un plano horizontal, presentando en las figuras 4 y 5 las correspondientes a los meses de junio y diciembre, con valores energéticos estimados en MJ/m². día. El espaciado adoptado entre niveles responde a la limitación de un error de estimación no inferior al 10%.

Debe destacarse la marcada perturbación introducida por el cordón cordillerano de los Andes, con su aumento de altura asociado a la disminución consecuente del espesor óptico atmosférico, lo que ya se señalara en trabajos anteriores más generales (16,17).

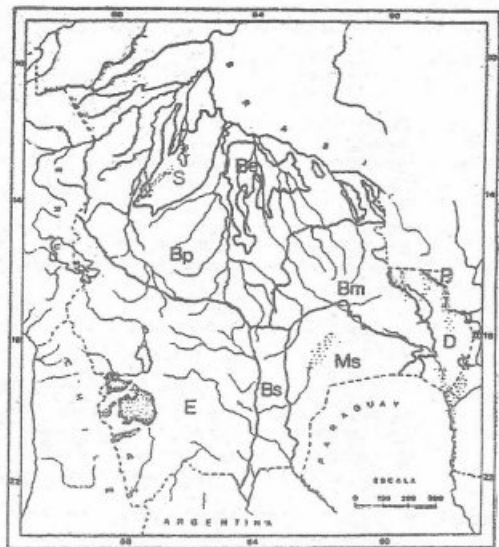


Figura 3. Regiones fitogeográficas en la República de Bolivia.

Es dable observar también la correspondencia de las curvas trazadas con las regiones morfológicas a las que se hiciera referencia en la introducción de este trabajo, especialmente marcada en la zona de altiplanicie; la misma puede contribuir a la reducción del número de estaciones piranométricas que será necesario agregar a las ya instaladas en el territorio.

Como ya se dijera, este trabajo es uno de los primeros pasos a dar para lograr la evaluación del recurso solar en Bolivia. Con el aumento del número de estaciones, adecuadamente instaladas, y de la extensión de la base de datos se podrá pensar en una nueva elaboración a realizar con mayor precisión.

Cabría aclarar que, desde el punto de vista del interés de los usuarios y de los planificadores energéticos, se hará necesario estudiar en cada ubicación la distribución estadística de los valores diarios para determinar así las medianas y los cuartiles, como así también la persistencia de los mismos y las condiciones de extrapolación.

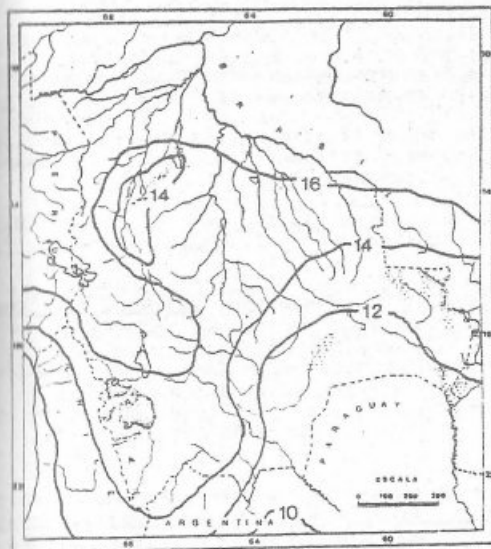


Figura 4. Distribución espacial del promedio mensual de la radiación solar global diaria para el mes de junio (MJ/m^2).

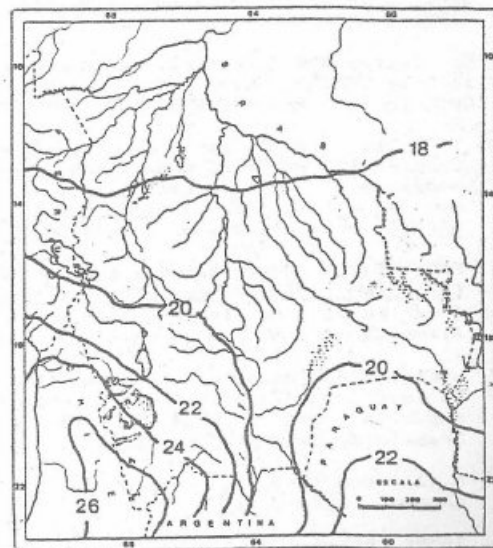


Figura 5. Distribución espacial del promedio mensual de la radiación solar global diaria para el mes de diciembre (MJ/m^2).

6. REFERENCIAS.

1. Yacimientos Petrolíferos Fiscales Bolivianos: Mapa Geológico de Bolivia. Servicio Geológico de Bolivia, 27 pp (1978).
2. L. Postigo: Geografía Universal Ilustrada, Los Continentes, las sociedades políticas. Volumen III: América, Asia y Oceanía. Editorial Sopena, Barcelona, España (1981).
3. Ministerio de Energía e Hidrocarburos de Bolivia: Bases fundamentales para el Programa Nacional de Energía. La Paz, Bolivia (1987).
4. A. Angstrom: Solar and Terrestrial Radiation. Q.J.Roy. Met. Soc., vol.50, pp 121-126 (1924).
5. H.Grossi Gallegos, R.Lopardo, G.Atienza, M.García y M.Peralta: Determinación de la correlación entre la duración relativa de la insolación y la radiación global medida por la Red Solarimétrica. Actas de la 9na. Reunión de Trabajo de la ASADES, San Juan, pp 261-266 (1984).
6. FAO: Pronóstico de cosechas basado en datos agrometeorológicos (M.Frere y G.Popov). Estudio FAO: Producción y Protección Vegetal, N° 17, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia, 99 p (1979).
7. G. Trewartha: Elements of Physical Geography. Mc Graw Hill, USA (1957).
8. DMM: Comisión de Instrumentos y Métodos de Observación. Informe final abreviado de la Octava Reunión. DMM-N° 590, Secretaría General de la Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza (1982).
9. C. Justus and J.Tarpley: Atlas of Satellite-measured Insolation in the United States, Mexico and South America. Tech.Report, Georgia Tech Project G-35-633, USA, 271 p (1985).
10. L.Frulla, D.Gagliardini, H.Grossi Gallegos y R.Lopardo: Comparación entre la determinación de la radiación solar global mediante el satélite geo-estacionario GOES y la mediciones de la Red Solarimétrica. Actas de la 10ma. Reunión de Trabajo de la ASADES, Neuquén, pp 157-164 (1985).
11. FAO: Datos agroclimatológicos para América Latina y el Caribe. Colección FAO: Producción y protección vegetal N° 24, Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, Roma, Italia (1985).
12. H.Grossi Gallegos, M.García, G.Atienza y M.E.Granada de Castell: Estimación de la distribución de la radiación solar global en la República del Paraguay. Presentado en la 11ma. Reunión de Trabajo de la ASADES San Luis, (1986).
13. K.Ya. Kondratyev: Radiation in the Atmosphere. Academic Press, London, England (1969).
14. IGMB: Atlas Geográfico de la República de Bolivia, Mapa generalizado de vegetación. Comando General del Ejército, EDICIONES GEOMUNDO, Primera Edición (1985).
15. Comisión Nacional de Desarrollo del Chaco-Departamento de Desarrollo Regional de la OEA: Desarrollo regional integrado del Chaco Paraguayo. Regiones Naturales y posibilidades de uso de la tierra en la región occidental. Gobierno del Paraguay-OEA, Asunción, Paraguay (1982).
16. H.Grossi Gallegos, R.Lopardo, G.Atienza, M.García y M.Peralta: Distribución espacio-temporal del promedio mensual de la radiación solar global diaria en la región meridional de América del Sur. Actas del I Congreso Iberoamericano de Energía Solar, Madrid, España, T.I, pp 110-117 (1987).
17. H.Grossi Gallegos, G.Atienza y M.García: Cartas de radiación solar global para la región meridional de América del Sur. A presentar en el II Congreso Interamericano de Meteorología, Buenos Aires, 30 de noviembre al 4 de diciembre de 1987.