

ESTIMACION DE LA DISTRIBUCION DE LA RADIACION SOLAR GLOBAL  
EN LA REPUBLICA DEL PARAGUAY

H. Grossi Gallegos, M. García y G. Alierza  
Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales  
Avda. Mitre 3100 - (1663) San Miguel - BUENOS AIRES - ARGENTINA

M.F. Granada de Castell  
Instituto Nacional de Tecnología y Normalización  
Avda. Artigas y Gral. Poa, Asunción - PARAGUAY

RESUMEN

En base a datos de insolación provistos por la Sección Estadística del Departamento de Climatología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Paraguay, y utilizando diferentes correlaciones, se procedió a estimar la componente global de la radiación solar recibida a lo largo del año. Los resultados así obtenidos fueron comparados con los valores medidos en las redes de Argentina y Brasil, como así también con los estimados a partir de registros del satélite geo-estacionario GOFS, ya verificado su ajuste con los datos medidos por la Red Solarimétrica, determinándose su distribución espacio-temporal.

Se estudiaron además las diferentes regiones fitogeográficas en base a la información disponible, para tratar de determinar así la ubicación más recomendable para la instalación de estaciones de medición que permitan una correcta cobertura.

1. INTRODUCCION

Alrededor de 710 mil kilómetros cuadrados de territorio paraguayo, argentino, boliviano y brasileño configuran un punto de integración regional de excepcionales posibilidades y al que se conoce como Gran Chaco. Todo parece indicar la conveniencia de un desarrollo planificado, un mejor aprovechamiento de los recursos hídricos y naturales y la voluntad política necesaria para concretar obras en común.

La mediterraneidad de las provincias norteañas de Argentina se conjuga con la Polivia y Paraguay a raíz de las dificultades de toda índole que tradicionalmente han encontrado sus productos para acceder al mercado industrial del Gran Buenos Aires, como para exportar al mercado mundial.

El sector argentino comprende las provincias de Chaco y Formosa y parte de Santa Fé y Santiago del Estero. Posee casi la mitad de la superficie boscosa maderable del país y es utilizada como zona complementaria de los campos de invernada para la ganadería de la región pampeana. La industria está vinculada a la transformación simple de productos forestales y agrícolas, mientras que la elaboración final de los productos del algodón, uno de sus mayores cultivos, está fuera de la región.

El sector paraguayo se encuentra al oeste del río Paraguay y comprende los departamentos de Chaco, Nueva Asunción, Alta Paraguay, Poqueron y Presidente Hayes. Presenta un grado de desarrollo relativo notoriamente inferior que el de la región oriental del país, no obstante su gran extensión territorial (60,7% de la superficie nacional)

Toda la región chaqueña está sufriendo un proceso de despoblamiento que, si no es contrarrestado mediante el estímulo de nuevas actividades, se mantendrá acentuado aún más el desequilibrio regional. Pero las posibilidades serán nulas si previamente no se resuelve la limitación principal para la ocupación de la tierra: el manejo del ciclo del agua en una región en la que se complementan desordenadamente las inundaciones con las sequías y una carencia permanente casi generalizada, y la disponibilidad de energía.

2. ANTECEDENTES DE COOPERACION MULTINACIONAL

En este sentido, la marcha mancomunada se inició en 1971; el estudio para la planificación y desarrollo de la Cuenca del Plata (1), encarado con el auspicio de la Organización de los Estados Americanos (OEA),

resaltó las posibilidades de la producción pecuaria y alimentaria, así como las de generación de empleos y utilización de fuentes alternativas de energía en las áreas del Chaco semiárido.

Posteriormente, en 1974, los gobiernos de Argentina, Paraguay y Bolivia, con la cooperación de la OFA, del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y del Banco Interamericano de Desarrollo (BID), encararon el proyecto de aprovechamiento múltiple de la cuenca del Río Pilcomayo, el que concluyó en 1980 con la formulación de proyectos de inversión en un área trinacional de 70 mil kilómetros cuadrados. En este trabajo se incluían datos de insolación media de 5 estaciones paraguayas y 6 argentinas, en base a los cuales se estimó la radiación global en ellas, a la par que se recomendaba, "en vista de la importancia práctica y teórica de la medición de la energía solar, (...) aumentar el número de estaciones al oeste del meridiano 65°W"(2).

Paralelamente, las autoridades paraguayas crearon en 1977 la Comisión Nacional de Desarrollo Regional del Chaco, la que difundió en 1983 un documento, elaborado conjuntamente con el Departamento de Desarrollo Regional de la Secretaría General de la OFA, en el que se proponía una subregionalización del Chaco en "áreas-programa" (3). Para el corto y mediano plazo se recomendaba, entre otras cosas, concentrar esfuerzos para mejorar la infraestructura y los servicios, ampliar la difusión de tecnologías apropiadas (adaptadas al medio chaqueño) e instrumentar políticas de incentivos fiscales y sociales que permitie-

ran retener y atraer núcleos poblacionales, estimulando su productividad y asegurando satisfactorios niveles de vida.

Fue dentro de este espíritu que, en la IX Reunión de Trabajo de la Comisión Mixta Paraguayo-Argentina de Cooperación y Coordinación, llevada a cabo en Asunción entre los días 12 y 14 de noviembre de 1984, se incluyó en la cooperación científico-tecnológica el estudio de las Fuentes Renovables de Energía. Las conversaciones mantenidas posteriormente entre directivos del Instituto Nacional de Tecnología y Normalización (INTN), del Paraguay, y de la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales (CNIF), de Argentina, llevaron a la formulación de un programa de cooperación entre ambos organismos en este campo, entre cuyas actividades se contaba "el procesamiento de los datos de heliofanía existentes en la República del Paraguay con vistas a una primera evaluación del recurso solar y su distribución espacio-temporal".

### 3. TRATAMIENTO DE LOS DATOS DE INSOLACION

Se analizaron los datos de insolación provistos por la Sección Estadística del Departamento de Climatología del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Paraguay para 14 estaciones, cuyos registros presentaban diferente antigüedad, como puede verse en la Tabla I, en la que se muestra la ubicación geográfica de cada una de ellas y se indica la longitud de los registros considerados (ver además Figura 1).

TABLA I

ESTACION	LATITUD S	LONGITUD O	PERIODO	EXTENSION (meses)
1 Pahía Negra	20°14'	58°10'	1974-1978	50
2 Nueva Asunción	20°43'	61°55'	1973-1978	51
3 M. Estigarribia	22°01'	60°36'	1975-1981	75
4 Prats Gill	22°34'	61°36'	1972-1978	79
5 Paso Parreto	23°04'	57°07'	1971-1979	86
6 Concepción	23°25'	57°18'	1974-1979	71
7 S. del Cuairá	24°04'	54°19'	1975-1979	52
8 San Lorenzo	25°22'	57°33'	1959-1980	261
9 Asunción	25°15'	57°31'	1939-1979	454
10 Pte Stroessner	25°32'	54°36'	1966-1980	167
11 Villarrica	25°45'	56°26'	1946-1980	313
12 Carapeguá	25°48'	57°14'	1972-1976	62
13 S.J. Bautista	26°40'	57°09'	1973-1978	64
14 Encarnación	27°20'	55°50'	1974-1980	78

$$H/H_o = 0,20 + 0,55 (n/N) \quad (2)$$

Los resultados hallados se muestran en la Tabla II, expresados en MJ/m<sup>2</sup>.

Además de las estaciones cercanas de las redes de medición de Argentina (El Colorado, El Sombrerito y Cerro Azul) y de Brasil (Foz de Iguazú y C. Grande) se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos para la región meridional de América del Sur en base a un total de 111 estaciones ubicadas en países de la zona citada (9).

Finalmente, y a fin de obtener alguna indicación sobre estructura fina de la variabilidad espacial, se consideraron los datos estimados para la región a partir de registros del satélite geo-estacionario COFS (10), ya verificado su ajuste con los datos medidos por la Red Solarimétrica (11).

En las Figuras 2 y 3 se muestran la distribución espacial del promedio de la radiación global diaria en la República del Paraguay para los meses de Enero y Julio respectivamente.

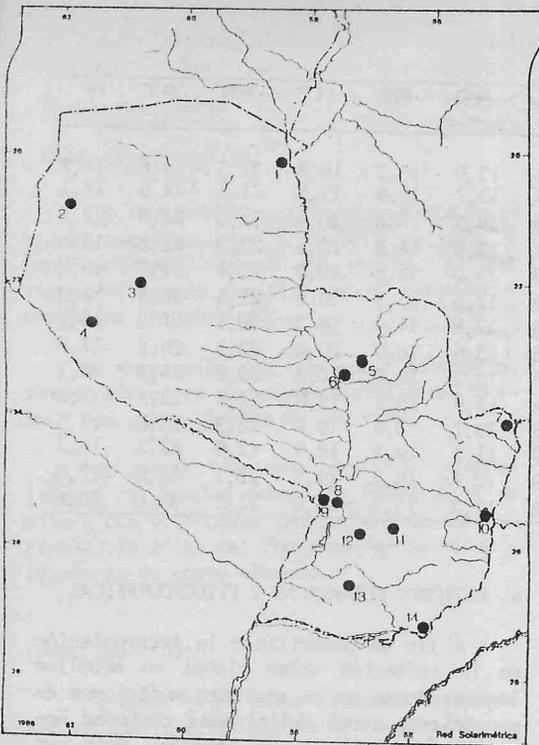


Figura 1. Ubicación de las estaciones utilizadas en el presente trabajo.

Para proceder a estimar el valor medio mensual de la radiación solar global recibida sobre un plano horizontal a lo largo del año se ensayó la relación propuesta por Rietveld (4):

$$H/H_o = 0,18 + 0,62 (n/N) \quad (1)$$

en donde H es el promedio mensual de la radiación global en tierra, H<sub>o</sub> es el promedio mensual de la radiación solar a tope de atmósfera, n es el promedio mensual de la insolación diaria (heliofanía) y N es el promedio mensual de la duración del día.

Si bien fuera recomendada por Ma e Iqbal (5) por brindar el mejor ajuste entre otras relaciones utilizadas en América del Norte y Europa, los valores hallados para Paraguay no presentaban buen acuerdo con las mediciones efectuadas por las redes de Argentina (6) y de Brasil (7). Se optó en consecuencia por utilizar la relación obtenida en base a valores de la Red Solarimétrica (8):

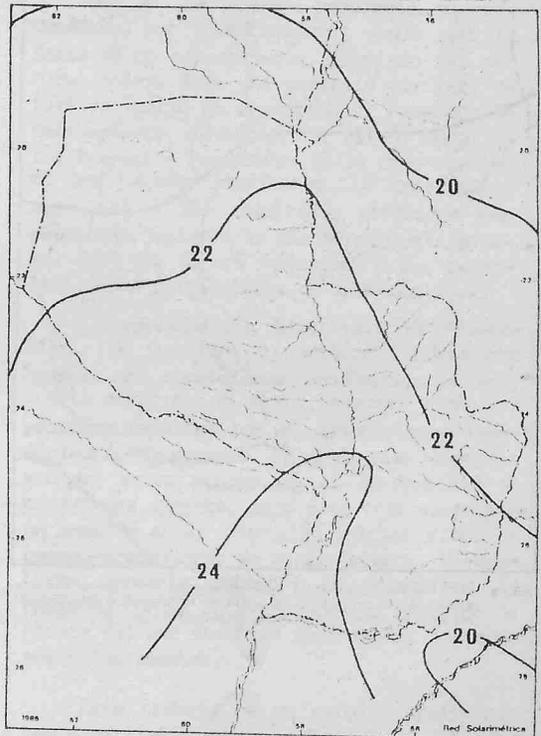


Figura 2. Distribución espacial del promedio mensual de la radiación solar global diaria para el mes de enero en la República del Paraguay, estimada en base a datos de heliofanía (MJ/m<sup>2</sup>).

TABLA II

MES EST.	FNF	FFB	MAR	APR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC	FR
1	21,8	20,5	18,1	15,0	12,3	10,7	13,1	13,9	15,2	18,8	21,3	19,6	16,7
2	21,6	22,8	20,1	14,4	11,8	10,0	12,4	13,7	16,6	19,8	21,3	21,0	17,1
3	21,8	21,8	19,1	16,2	12,0	10,2	12,3	14,3	16,6	20,9	22,0	22,6	17,5
4	22,3	22,0	18,4	16,1	12,6	10,1	11,7	13,9	16,8	10,5	22,0	22,3	17,4
5	22,7	23,2	19,1	17,2	13,5	12,3	13,3	14,0	16,6	20,8	23,4	22,7	18,2
6	20,6	20,9	18,3	15,4	12,3	10,2	11,9	12,5	15,3	18,6	21,5	20,5	16,5
7	20,5	21,2	18,2	14,9	11,7	10,5	11,3	12,6	14,1	18,3	20,5	20,3	16,2
8	24,2	22,7	18,9	15,9	12,7	10,7	11,6	13,6	16,0	20,4	23,3	24,6	17,9
9	23,9	23,2	19,4	16,2	12,9	11,0	11,6	14,2	16,6	20,3	23,2	24,5	18,1
10	22,4	22,4	18,8	16,4	12,3	10,3	11,4	12,9	15,5	19,0	22,8	22,8	17,2
11	22,7	21,9	18,6	16,4	12,6	10,4	11,5	13,7	15,9	19,4	23,3	23,0	17,5
12	21,9	21,9	18,0	16,5	11,7	9,9	9,9	11,5	14,7	18,9	22,9	22,2	16,7
13	22,9	21,6	18,2	15,7	11,8	10,1	9,9	12,3	16,3	19,5	23,1	22,8	17,0
14	22,3	22,2	17,2	15,5	11,5	10,0	10,4	12,2	15,3	18,6	21,2	23,0	16,6

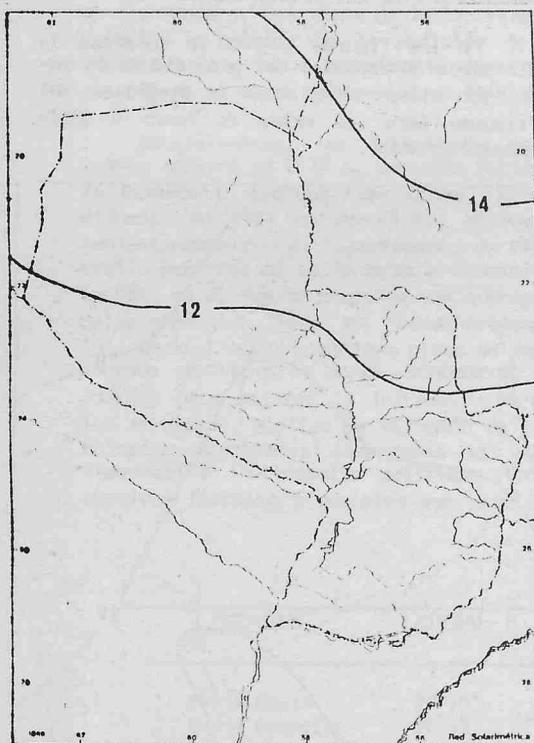


Figura 3 Distribución espacial del promedio mensual de la radiación solar global diaria para el mes de julio en la República del Paraguay, estimada en base a datos de heliografía ( $HU/m^2$ ).

#### 4. REGIONES CLIMATICAS Y FITOGEOGRAFICAS

A fin de posibilitar la interpolación de la radiación solar global en aquellos lugares donde no se realizan mediciones es conveniente tener delimitadas regiones homogéneas en clima y vegetación, dado que existe una evidente correlación entre las características climáticas y de vegetación natural y el número de horas de sol (12).

El Paraguay está comprendido en lo que se conoce como el Parque Chaqueño, que abarca una región cubierta por bosques naturales de distintas especies, predominando el quebracho (*Schinopsis* sp). Es una región peculiar con clima cálido y húmedo en el sector oriental (1200 a 1700 mm anuales y 22 a 25°C) y semi-seco en la occidental (700 a 1100 mm anuales y un promedio de 25°C). La vegetación es muy heterogénea, formada por bosques selvas en galería que alternan con sabanas gramíneas.

Para la regionalización fitogeográfica se tomaron en cuenta los trabajos existentes (13, 14, 1), los que comprenden distintos niveles de estudio. Las unidades ambientales resultantes fueron identificadas a través de imágenes LANDSAT 1:500.000 de las bandas 5 y 7 y a escala 1:250.000 de falso color.

## Región Occidental

### Chaco Deprimido (D):

Se caracteriza por la aternancia estacional entre excesos y déficit de agua y lenta permeabilidad de los suelos, lo que tiene influencia decisiva en el establecimiento de la vegetación.

La vegetación son bosques y sabanas en transición entre el bosque xerófilo del Chaco y las áreas húmedas de los ríos.

Las zonas boscosas presentan grandes isletas de árboles densos de hasta 20 m de altura con sotobosque frecuentemente impenetrable. En zonas mal drenadas hay palmeras y gramíneas de porte elevado.

### Chaco Seco (S):

El suelo y la flora alcanzan estabilidad en sus interrelaciones; la vegetación es una formación mixta que se encuentra en la transición entre el Chaco y los faldeos de la montaña. Los árboles están aislados o diseminados y tienen formas forestales mediacres.

### Planicie Inundable (P):

El paisaje dominante es el de la asociación compleja de matorral y matorral-pe-ladar, lo que implica suelos casi desnudos.

## Región Oriental

### Bosque Continuo Denso (B):

Húmedo, semicaduco. Formación de dos estratos de árboles sub-tropicales con sotobosque denso y cobertura graminoide.

### Sabana Arbolada con Selva en Galería (SS):

Extensas formaciones de gramíneas con árboles y arbustos diseminados, con áreas periódicamente inundadas. Existen bosques de madera blanda en los terrenos aluviales de los ríos.

### Sabana con Bosque Matorral Cerrado (SP):

Formación semi-xerofítica y variable con árboles de 5 a 10 m de altura y vegetación arbustiva. Presenta zonas muy intervenidas por áreas de uso agropecuario.

### Sabana con Posquetes (Sb):

Formación mixta forestal-gramíneas, con zonas pantanosas. Las áreas herbáceas ocupan los bajos inundados y los bosquetes las áreas elevadas que forman islas durante el período de crecimiento de las aguas. Los árboles son bajos.

## 5. COMENTARIOS

Teniendo en cuenta el problema creado por el despoblamiento de la región chaqueña y la necesidad, en consecuencia, de fomentar el asentamiento de núcleos poblacionales productivos y con satisfactorios niveles de vida, se estima que el aporte de las fuentes alternativas de energía (entre las que se cuenta la solar) puede ser significativo a corto y mediano plazo para algunos de los requerimientos que se plantean en la región.

Uno de los mayores problemas que encuentran los investigadores suele ser la falta de un conocimiento apropiado del recurso solar. Ante una carencia similar, en 1976 se inició en Argentina el Proyecto de Relevamiento Solarimétrico en el marco de los Proyectos Especiales de la Organización de los Estados Americanos. La experiencia acumulada y los resultados obtenidos han permitido implementar una metodología general (15) que deberá adecuarse a las características particulares de cada región.

La aproximación ideal para el planeamiento de una red de medición tendría que basarse en condiciones económicas ya que, cuanto mayor sea el error, mayores serán las pérdidas causadas por el conocimiento insuficiente del recurso. Es obvio que la magnitud del error disminuirá si la densidad de estaciones aumenta, pero esto trae aparejado un aumento en la inversión inicial y en los costos posteriores de mantenimiento. El problema consiste entonces en determinar la densidad óptima de estaciones de medición de manera tal que resulten minimizados los costos y las pérdidas.

Este trabajo es un estudio preliminar que permitirá determinar los lugares más recomendables para un emplazamiento de las estaciones que permita una correcta cobertura, a la vez que cumplir el requisito de minimizar costos y pérdidas.

## 6. AGRADFCIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la voluntad de cooperación puesto de manifiesto por la Comisión Nacional de Investigaciones Espaciales y el Instituto Nacional de Tecnología y Normalización, y al apoyo económico prestado por la OFA.

## 7. REFERENCIAS

1. Organización de los Estados Americanos (Unidad de Recursos Naturales de la Oficina de Desarrollo Regional), Cuencia del Río de la Plata: Estudio para su planificación y desarrollo. OFA, Washington (1970).
2. OFA/PID/PNUD, Aprovechamiento múltiple de la Cuencia del Río Pilcomayo, Tomo II, p. 41, Argentina, Polivia y Paraguay (1977).
3. Comisión Nacional de Desarrollo Regional del Chaco-Departamento de Desarrollo Regional de la OFA, Proyecto Chaco: Diagnóstico y Estrategia para el Desarrollo del Chaco Paraguayo (Informe de la I Fta-pa). Gobierno del Paraguay-OFA, pp. 185 y Anexos, Asunción, Paraguay (1983).
4. M.R. Rietveld, A new method for estimating the regression coefficients in the formula relating solar radiation to sunshine. (Apri. Meteorol., vol. 19, pp. 243-252 (1978)).
5. C.C.Y. me and M. Iqbal, Statistical comparison of solar radiation correlations: Montly average global and diffuse radiation on horizontal surfaces. Solar Energy, vol. 33, N° 2, pp. 143-148 (1984).
6. Red Solarimétrica, Poletines N° 1-12, CNIF, Buenos Aires, Argentina.
7. Poletim de Radiacao Solar Trimestral, vol. 1-8, Instituto Nacional de Meteorología, Brasilia, Brasil.
8. 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 ASADFS, pp. 255-260 (1984).
9. H. Grossi Gallegos, R. Lopardo, G. Atienza, M. García y M. Peralta, Distribución de la energía solar en la región meridional de América del Sur. Aceptado para su presentación en el V Congreso Latinoamericano de Energía Solar a llevarse a cabo en Viña del Mar, Chile, del 27 al 30 de Octubre de 1986.
10. C.G. Justus and J.D. Tarpley, Atlas of satellite-measured insolation in the United States, Mexico and South America. Technical Report, 271 p, Georgia Tech Project G-35-633, Georgia, USA (1985).
11. D.A. Gagliardini, L.A. Frulla, H. Grossi Gallegos y R. Lopardo, Comparación entre la determinación de la radiación solar global mediante el satélite geostacionario GOF5 y las mediciones de la Red Solarimétrica. Presentado en la 10ma. Reunión de Trabajo de ASADFS, Neuquén, Octubre de 1985.
12. K. Ya. Kondratyev, Radiation in the atmosphere. Academic Press, London, England (1969).
13. Comisión Nacional de Desarrollo Regional del Chaco-Departamento de Desarrollo Regional de la OFA, Desarrollo Regional Integrado del Chaco Paraguayo: Regiones naturales y posibilidades de uso de la tierra en la región occidental. Gobierno del Paraguay-OFA, Asunción, Paraguay (1982).
14. FIA/UNA, MAG y GTZ, República del Paraguay, Región Oriental: Cobertura vegetal y uso actual de la tierra. CIF, 18 p, Asunción, Paraguay (1986).
15. M.García y R. Fernández, Red de mediciones solarimétricas en la Argentina. Atas do 2º Congresso Latino-Americano de Energia Solar, vol. I, pp. 43-59, Joao Pessoa, Brasil (1978).