

## MAPA SOLAR DEL URUGUAY

Gonzalo Abal – abal@fing.edu.uy

Mauro D'Angelo – mdan@fing.edu.uy

Instituto de Física (IF)

José Cataldo – jcataldo@fing.edu.uy

Alejandro Gutiérrez – aguti@fing.edu.uy

Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA)

Facultad de Ingeniería, Universidad de la República

Herrera y Reissig 565, CC 30, CP 11.300, Montevideo, Uruguay

**Resumen.** Se presentan los resultados de un primer estudio sobre la variabilidad espacial y temporal del recurso solar en todo el territorio de la República Oriental del Uruguay. La metodología utilizada, basada en la correlación de Angström, permite estimar irradiación global en base a datos de heliofanía diaria obtenidos por la Dirección Nacional de Meteorología del Uruguay. El mapa de coeficientes de Angström para el territorio se obtuvo a partir de series de irradiación nacionales, complementadas con datos de irradiación de Argentina y Brasil, para algunas localidades cercanas a la frontera uruguaya. Los estimativos de irradiación global media se comparan con medidas existentes en la región y con los estimativos de irradiación global obtenidos a partir de imágenes satelitales, datos atmosféricos y un modelo físico de transferencia radiativa.

**Palabras clave:** energía solar, irradiación global, mapa solar

### 1. INTRODUCCIÓN

El reciente impulso que reciben las fuentes de energía renovables en el Uruguay ha planteado con fuerza la necesidad de contar con un conocimiento adecuado del recurso solar promedio en las diferentes regiones del país. La información de calidad sobre la radiación solar incidente es un insumo clave para diseñar equipamientos para la conversión de energía solar en energía útil (ya sea eléctrica o térmica). Por otra parte, en un país básicamente agropecuario como el Uruguay, un conocimiento detallado del recurso solar es útil para estimar el rendimiento de las cosechas, diseñar dispositivos para el secado de productos vegetales o para optimizar las estrategias de irrigación, entre otras aplicaciones.

Es una práctica común en el mundo presentar la información sobre la distribución del recurso solar promedio en forma de mapas solares o mapas de irradiación media. Esta presentación visual hace la información más accesible al usuario, que puede aprovecharla en forma inmediata. El desarrollo de mapas de radiación solar ha sido llevado a cabo en Europa [Page et al., 2001], EEUU [George and Maxwell, 1999, Maxwell et al., 1999], México [Almanza and López, 1975], Argentina [Grossi Gallegos and Spreafichi, 2007, Grossi Gallegos, 1998b, Grossi Gallegos, 1998a] y Brasil [Tiba et al., 1997, Tiba, 2004, Colle and Pereira, 1998], entre otros países. El registro de datos de irradiación confiables es un aspecto central para estimar la distribución de la irradiación solar. Las series de irradiación de largo y calidad adecuadas son escasas. Sin embargo, la mayoría de las estaciones meteorológicas llevan registros diarios de heliofanía (horas de irradiación solar en suelo por encima de cierto umbral). La correlación lineal [Angstrom, 1924, Prescott, 1940, Page, 1964] existente entre los promedios de heliofanía relativa y del índice de claridad medio constituye la base de una metodología [Duffie and Beckman, 2006] que permite estimar la irradiación global promedio sobre grandes extensiones territoriales a partir de medidas de irradiación en pocos puntos adecuadamente distribuidos. En esencia, este método se basa en determinar los coeficientes de la correlación Angström para aquellas estaciones en las cuales existen simultáneamente medidas de heliofanía y de irradiación solar, para luego extrapolarla a estaciones donde existen medidas de heliofanía pero no de irradiación solar. Este procedimiento ha sido utilizado extensamente en el mundo y en la región para estimar la distribución espacial y estacional de la irradiación global media incidente [Tiba, 2004, Righini et al., 2004, Grossi Gallegos and Righini, 2005, Grossi Gallegos, 1998a, Grossi Gallegos, 1998b].

Para este trabajo hemos analizado los datos de irradiación y heliofanía disponibles en el Uruguay y la región, seleccionando un subconjunto de datos en base a criterios de coherencia, calidad y largo de las series. A este subconjunto le aplicamos una metodología basada en la ecuación de Angström para

estimar irradiación global media sobre plano horizontal para 12 puntos del territorio uruguayo. Luego, usando técnicas estándar de interpolación, presentamos la distribución geográfica de la irradiación para cada mes del año. Finalmente, realizamos comparaciones de estos estimativos con (i) series de irradiación de la región, no usadas para elaborar el mapa solar y (ii) estimativos obtenidos del modelo físico utilizado por la NASA, basado en datos satelitales de nubosidad para la región.

Este trabajo tiene la siguiente estructura. En la Sección 2 se describen la metodología a utilizar, los datos disponibles, su pre-tratamiento y los estimativos de irradiación global obtenidos. En la Sección 3 se presentan algunos de los mapas mensuales obtenidos y se comparan estos estimativos de irradiación global promedio con otros datos de irradiación y con estimativos de irradiación obtenidos de otros modelos. En la Sección 4 se incluye un resumen de los resultados y se discuten las perspectivas a futuro.

## 2. Metodología

Como se menciona en la introducción, la metodología seguida en este trabajo se basa en la correlación de Angström [Angstrom, 1924, Prescott, 1940, Page, 1964] entre la heliofanía relativa promedio y el índice de claridad. Estas cantidades se obtienen normalizando los datos usando para ello el número máximo de horas de sol y la irradiación diaria extraterrestre. Este procedimiento reduce a lo esencial la variabilidad estacional en las series de datos.

La notación utilizada en este trabajo es la siguiente. Los datos se agrupan en conjuntos mensuales  $\Omega_m$ , con  $m = 1 \dots 12$  para cada mes del año. Los valores medios para cada mes se calculan promediando sobre estos conjuntos. Por ejemplo, la heliofanía<sup>1</sup> en horas, se indica por  $N(j)$  y depende del día del año (día juliano)  $j$ . Su promedio mensual para el mes  $m$ ,  $|\Omega_m|^{-1} \sum_{\Omega_m} N(j)$ , se indica por  $\bar{N}(m)$ . En forma similar, la irradiación global diaria sobre plano horizontal se indica por  $H(j)$  y su promedio para el mes  $m$  por  $\bar{H}(m)$ .

### 2.1. Correlación de Angström

El número máximo de horas de sol,  $N_0$ , depende de la latitud  $\phi$  y la declinación solar  $\delta$ ,

$$N_0(\phi, j) = \frac{24}{\pi} \omega_s = \frac{24}{\pi} \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (1)$$

donde  $\omega_s$  es el ángulo horario a la puesta del sol en radianes. Este ángulo aumenta a una tasa constante de  $\pi/12$  radianes por hora siendo nulo al mediodía solar. La declinación solar depende a su vez del día juliano  $j$  y puede aproximarse [Duffie and Beckman, 2006] por la expresión (en radianes)  $\delta \simeq 0,409 \sin [2\pi(284 + j)/365,25]$  con suficiente precisión a efectos de este trabajo. La heliofanía relativa se define como  $n \equiv N/N_0$  y la heliofanía relativa media para cada mes  $m$  es  $\bar{N}/\bar{N}_0$ .

La irradiación diaria extraterrestre esta dada por [Duffie and Beckman, 2006]

$$H_0(j, \phi) = K_0 F_j (\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \omega_s \sin \phi \sin \delta) \quad (2)$$

donde  $F_j \equiv [1 + 0,033 \cos(\frac{2\pi j}{365})]$  es un factor que tiene en cuenta la variación estacional de la distancia Tierra-Sol y  $K_0 \simeq 37,6 \text{ MJ/m}^2 = 10,4 \text{ kWh/m}^2$ . El valor medio de esta cantidad para el mes  $m$  se usa para normalizar la irradiación media mensual y obtener un índice de claridad medio,

$$k_T \equiv \frac{\bar{H}(m, \phi)}{\bar{H}_0(m, \phi)} \quad (3)$$

que depende solo del mes  $m$  y de la latitud  $\phi$ .

Trabajando para cada mes y latitud,  $(m, \phi)$ , el índice de claridad medio y la heliofanía relativa media están linealmente correlacionados,

$$k_T = a + b \frac{\bar{N}}{\bar{N}_0} \quad (4)$$

donde los coeficientes  $(a, b)$  se determinan por regresión lineal para cada ubicación en la que se cuenta con datos de heliofanía e irradiación. Una vez determinada la variación espacial y temporal de estos coeficientes, es posible estimar irradiación global media a partir de datos de heliofanía.

<sup>1</sup>Definida por la Organización Meteorologica Mundial (WMO) como el número de horas de sol diarias sobre el umbral de 120 w/m<sup>2</sup>.

serie	localidad	LAT	LON	período	institución	país
MELILLA	Montevideo	-34.8	-56.3	10/2005 – 09/2009	UTE	Uruguay
ZUELA	Colonia	-34.6	-58.3	10/1969 – 11/1977	INIA	Uruguay
SGA	Salto Grande	-31.2	-57.9	N/C	RSA	Argentina
A804	Livramento	-30.8	-55.6	11/2001 – 09/2009	INMET	Brasil
A836	Jaguarão	-32.6	-53.4	01/2007 – 09/2009	INMET	Brasil
A827	Bagé	-31.3	-54.0	01/2007 – 09/2009	INMET	Brasil

Cuadro 1: Series de irradiación global diaria utilizadas en este trabajo. Las cuatro primeras series fueron usadas como base para el mapa. Las dos restantes se utilizan *a-posteriori* para una comparación. En las columnas LAT y LON se indican en grados la latitud (S) y longitud (O) de las localidades donde se registraron los datos. Las series del INMET (Brasil) fueron cedidas para este trabajo. La serie SGA corresponde a estimativos del Atlas Solar Argentino [Righini et al., 2004].

## 2.2. Datos utilizados

**Irradiación global.** En el Uruguay existen hoy pocas series con significación estadística y las mismas están concentradas en el Sur del país, donde la densidad de población es mayor, pero el potencial solar es significativamente menor. Para este trabajo fueron consideradas inicialmente cuatro series de irradiación uruguayas, pero luego de un pre-análisis de los datos, sólo dos de ellas fueron utilizadas, como se indica en el Cuadro 1. La primera de ellas es la serie ZUELA correspondiente a datos de irradiación global diaria para el período 1969-1977, registrados en la estación meteorológica de “La Estanzuela” (Colonia) del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA), dependiente del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP) del Uruguay. Para esta serie, de 8 años, se utilizó un piranómetro Kipp & Zonen con registrador de banda de papel y posterior planimetrado para obtener la irradiación global diaria<sup>2</sup>. La serie MELILLA (4 años) fué registrada en la localidad de Melilla, Montevideo en la Sección Despacho de Cargas de la empresa eléctrica estatal del Uruguay (UTE). Se utilizó un sensor fotovoltaico Davis con registro digital por data logger. Estos datos, propiedad de UTE, fueron cedidos a la Facultad de Ingeniería (UdelaR) para la realización de este estudio.

Evidentemente, con sólo dos series de radiación ubicadas en el Sur del país, no hubiera sido posible avanzar en la metodología propuesta, aún en un país pequeño y llano como el Uruguay. El Mapa Solar ha podido ser elaborado gracias a que a que hemos podido acceder a datos de irradiación global de países vecinos para localidades cercanas al Uruguay. Hemos solicitado para este trabajo al Instituto Nacional de Meteorología del Brasil (INMET) datos de irradiación para algunas localidades brasileñas cercanas a la frontera uruguaya (Cuadro 1). Los registros de Livramento, con una extensión de casi 8 años fueron utilizados para el mapa solar, en tanto los de menor extensión correspondientes a las localidades de Bagé y Jaguarão se utilizaron para una comparación *a-posteriori*. Para contar con valores de irradiación cercanos al litoral oeste del país, se recurrió a los valores estimados de irradiación global media del Atlas Solar Argentino, obtenidos por H. Grossi Gallegos y su equipo [Righini et al., 2004, Grossi Gallegos, 1998a, Grossi Gallegos, 1998b] y publicados en la versión electrónica del Atlas [Grossi Gallegos and Righini, 2005].

**Heliofanía.** En el Uruguay, las estaciones de medida de la Dirección Nacional de Meteorología (DNM) y las cinco estaciones del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIA) llevan largos registros de heliofanía diaria, con una adecuada cobertura geográfica del territorio uruguayo. Grossi Gallegos y colaboradores han llevado a cabo recientemente valiosos trabajos sobre parte de estos datos de heliofanía, analizando su variabilidad espacial y temporal [Raichijk et al., 2006, Raichijk and F, 2006, Grossi Gallegos and Spreafichi, 2007].

De modo que para la heliofanía, se puede afirmar que existe una buena cobertura geográfica y temporal. Sin embargo, en este caso, la dificultad reside en la calidad de los datos. Por ejemplo, para una localidad dada, hay muchas series de datos de diferentes procedencias y los valores medios mensuales muestran que no siempre son consistentes entre si. Luego de analizar datos de diversas procedencias, se utilizaron para este trabajo los promedios diarios para el período 2000-2008 de 12 estaciones de la DNM<sup>3</sup>, además de los registros de dos estaciones del INIA. Las ubicaciones de las

<sup>2</sup>Este trabajo se realizó bajo la supervisión del Dr. Walter Corsi, la serie es pública se encuentra en <http://www.mesasolar.org>

<sup>3</sup>Estos datos fueron comprados a la DNM especialmente para este trabajo.

Serie irradiación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ZUELA	0.57	0.55	0.56	0.55	0.50	0.48	0.48	0.53	0.54	0.56	0.60	0.57
Salto Grande	0.58	0.56	0.52	0.53	0.52	0.48	0.47	0.50	0.48	0.53	0.54	0.56
Livramento	0.58	0.56	0.53	0.52	0.52	0.47	0.51	0.49	0.48	0.50	0.56	0.57
Melilla- $\alpha$	0.51	0.50	0.47	0.49	0.45	0.44	0.43	0.45	0.44	0.51	0.55	0.53

Cuadro 2: Valores del índice de claridad medio,  $k_T$ , obtenidos de los datos de irradiación global media usando la Ec. (3). Las columnas numeradas indican el mes.

Estación	LAT	LON	ALT	institución
ARTIGAS	-30,40	-56,51	121	DNM
CARRASCO(*)	-34,83	-56,01	33	DNM
COLONIA(*)	-34,33	-57,68	81	INIA
DURAZNO	-33,35	-56,50	93	DNM
FLORIDA	-34,09	-56,19	67	DNM
MELO	-32,37	-54,19	100	DNM
PAYSANDU	-32,35	-58,04	61	DNM
RIVERA(*)	-30,90	-55,54	242	DNM
ROCHA	-34,49	-54,31	18	DNM
SALTO(*)	-31,27	-57,88	50	INIA
SALTO	-31,40	-57,97	34	DNM
SAN JOSÉ	-34,35	-56,76	72	DNM
TACUAREMBÓ	-31,71	-55,99	134	DNM
TREINTA Y TRES	-33,22	-54,39	47	DNM

Cuadro 3: Ubicación de las estaciones meteorológicas uruguayas con medidas de heliofanía utilizadas en este trabajo. Se indican las coordenadas geográficas en grados y la altura sobre el nivel del mar, en metros. El período usado para los promedios de los datos de la DNM es 2000-2008. Los datos de las cuatro estaciones indicadas por un asterisco (\*) fueron usados para determinar los coeficientes de Angström, los restantes se usaron como estimadores de irradiación global media.

estaciones se indican en el cuadro 3. En la Fig. 1 se muestra la distribución geográfica de los datos de irradiación y de heliofanía utilizados en este trabajo.

### 2.3. Variación espacial de los coeficientes de Angström

Utilizando las cuatro series de irradiación y heliofanía indicadas en el Cuadro 4, se estimaron cuatro pares de coeficientes  $a, b$  para el territorio nacional mediante regresión lineal. Los valores del índice de claridad utilizados se indican en el Cuadros 2. Los datos utilizados y otros detalles están disponibles en la Memoria Técnica, <http://www.fing.edu.uy/if/solar>. La ubicación de los datos y los ajustes obtenidos se muestran graficamente en la Fig. 1 y los resultados de los ajustes se resumen en el Cuadro 4. Estos valores de  $a$  y  $b$  se extrapolan a todo el territorio nacional, utilizando para ello software estadístico de uso libre. La Fig. 2 muestra la variación espacial de los coeficientes  $a$  y  $b$  para el territorio uruguayo. La pendiente  $b$  varía entre 0,40 y 0,56, con una tendencia creciente de Este a Oeste. El parámetro  $a$  varía entre 0,21 y 0,26 con tendencia creciente del Sudeste hacia el Noreste del territorio. Las isólinas en la Fig. 2 se han dibujado con una separación de 0,02 a efectos de apreciar con claridad las tendencias. Estos valores y tendencias son consistentes con estimaciones de base mensual realizadas para el territorio argentino [Righini et al., 2004, Righini et al., 2005].

A partir de esta información se determinaron los valores de  $(a, b)$  indicados en la Fig. 2 (Der.) para las localidades con datos de heliofanía. Finalmente, utilizando los datos de heliofanía media y los

irradiación	heliofanía	a	b	$R^2$
ZUELA	Colonia (INIA)	0.21	0.55	0.92
Melilla	Carrasco (DNM)	0.22	0.47	0.70
A804	Rivera (DNM)	0.28	0.45	0.72
SGA	Salto (INIA)	0.23	0.49	0.72

Cuadro 4: Valores de  $a$  y  $b$  obtenidos por regresión lineal. El coeficiente de regresión,  $R^2$ , es indicativo del grado de correlación. La correlación en Colonia es significativamente mayor que en el resto de las ubicaciones. Los detalles de las estaciones se encuentran en el Cuadro 1.

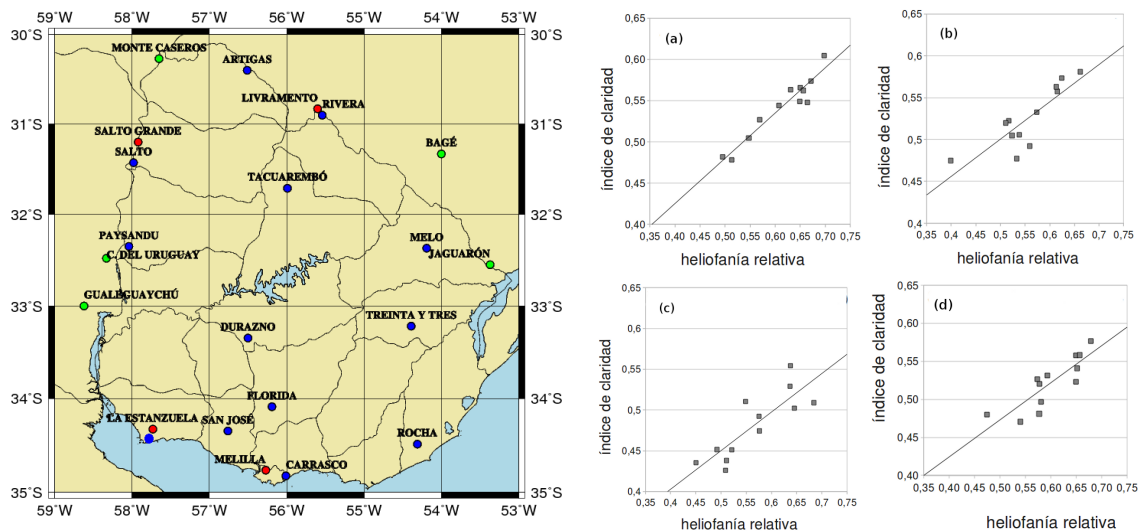
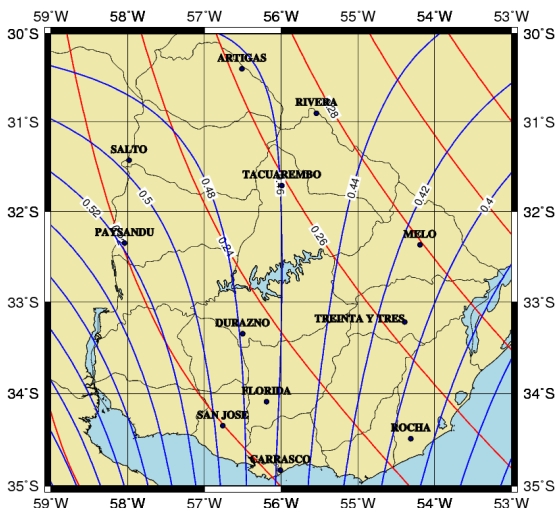


Figura 1: Izq.: Ubicación de las series de irradiación (rojo) y heliofanía (azul). En verde, ubicación de las series reservadas para validación. Der.: Regresiones lineales que determinan los parámetros  $a$  y  $b$  de la Ec. (4) para (a) La Estanzuela, Colonia; (b) Livramento-Rivera; (c) Salto Grande-Salto; (d) Melilla-Carrasco. Los valores obtenidos se indican en el Cuadro 4.



localidad	a	b
Salto	0.23	0.50
Paysandú	0.22	0.52
Carrasco	0.22	0.46
San José	0.22	0.50
Florida	0.23	0.47
Durazno	0.23	0.48
Rocha	0.25	0.39
Treinta y Tres	0.26	0.41
Melo	0.28	0.41
Rivera	0.28	0.45
Tacuarembó	0.26	0.46
Artigas	0.26	0.46

Figura 2: Izq.: isoclinas que representan la variación espacial de los parámetros  $a$  (rojo) y  $b$  (azul) de la Ec. (4). Der.: Valores de  $a$  y  $b$  para localidades con datos de heliofanía.

localidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	media
Salto	6.9	6.1	5.0	3.8	2.9	2.2	2.7	3.5	4.4	5.1	6.6	6.9	4.5
Paysandú	7.0	6.1	4.9	3.8	2.9	2.3	2.7	3.4	4.4	5.4	6.6	7.0	4.7
Carrasco	6.4	5.6	4.4	3.3	2.4	1.9	2.2	2.7	3.7	4.8	6.0	6.3	4.1
San José	6.8	5.7	4.5	3.3	2.5	2.0	2.2	2.8	3.9	5.0	6.4	6.8	4.3
Florida	6.6	5.7	4.5	3.4	2.5	2.0	2.2	2.9	3.9	5.1	6.3	6.6	4.3
Durazno	6.8	5.9	4.7	3.6	2.6	2.1	2.4	3.1	4.2	5.1	6.4	6.8	4.5
Rocha	5.9	5.2	4.2	3.3	2.3	1.9	2.1	2.7	3.6	4.6	5.7	5.8	3.9
Treinta y Tres	6.4	5.6	4.4	3.5	2.5	2.1	2.3	2.9	3.8	4.9	6.0	6.4	4.2
Melo	6.7	5.8	4.8	3.7	2.8	2.2	2.5	3.3	4.1	5.1	6.3	6.7	4.5
Rivera	6.9	6.1	5.0	3.8	3.0	2.3	2.8	3.6	4.5	5.4	6.5	6.8	4.7
Tacuarembó	6.9	6.1	4.8	3.8	2.8	2.2	2.7	3.3	4.3	5.2	6.5	6.8	4.6
Artigas	6.9	6.1	5.0	3.8	3.0	2.3	2.8	3.6	4.4	5.3	6.5	6.8	4.7
promedios	6.7	5.8	4.7	3.6	2.7	2.1	2.5	3.2	4.1	5.1	6.3	6.6	4.4

Cuadro 5: Estimadores de irradiación global media diaria (en kWh/m<sup>2</sup>) calculados utilizando la Ec. (5) con los coeficientes ( $a, b$ ) de la Fig. 2 (der.). Las columnas numeradas indican los meses del año.

valores de  $a$  y  $b$  locales, se estima la irradiación global media diaria para cada sitio de coordenadas ( $x, y$ ),

$$\bar{H}(x, y) = \bar{H}_0(x, y) \left[ a(x, y) + b(x, y) \frac{\bar{N}(x, y)}{\bar{N}_0(x, y)} \right]. \quad (5)$$

Los valores de irradiación global diaria promedio estimados de esta forma para cada mes del año se indican en el Cuadro 5. En base a las incertezas asociadas a los datos y a la metodología utilizada, estimamos<sup>4</sup> que las incertezas en los valores de irradiación son del orden de 15%. También se indican (a la derecha) las medias anuales para cada localidad y en la última fila, los valores promediados sobre todo el territorio, para cada mes del año. Estos valores medios son comparables a los de la península ibérica al Sur de Madrid y muestran que Uruguay posee un recurso solar interesante, aunque con una fuerte dependencia estacional (en media, hay 3 veces más irradiación en Enero que en Junio). Este recurso está claramente sub-explotado en la actualidad.

### 3. Mapas con promedios mensuales de irradiación global

A partir de los estimativos de irradiación obtenidos para 12 localidades distribuidas en el territorio nacional (Cuadro 5), se utilizan técnicas de interpolación para estimar la variación de la irradiación media en una grilla de  $20 \times 20$  km<sup>2</sup> sobre todo el territorio nacional. Se generan isóneas de irradiación media y se representa la información utilizando un código de colores adecuado. El resultado de este proceso es una serie de 12 mapas mensuales de irradiación media diaria para el Uruguay. Por razones de espacio, en este trabajo solo incluimos algunos meses representativos, vea la Fig. 3. También se incluye un mapa correspondiente a la distribución espacial de la irradiación media anual. El valor típico de la irradiación global diaria (el promedio anual sobre el territorio uruguayo) es de 4,4 kWh/m<sup>2</sup>. Como ya se mencionó, la variación estacional es grande, con valores mínimos en torno a 2 kWh/m<sup>2</sup> en el mes de Junio y valores máximos que se acercan a 7 kWh/m<sup>2</sup> en verano. En estos mapas, las isóneas aparecen separadas por 0.2 kWh/m<sup>2</sup>, lo cual en los meses de verano es menor a la incerteza asociada a los estimativos de irradiación ( $\sim 15\%$ ). La menor separación entre isóneas se hace necesaria, en un territorio pequeño como el del Uruguay, para poder apreciar para apreciar la tendencia global.

La variación territorial es mucho menor a la estacional, debido a la relativa uniformidad del territorio uruguayo, que es en su mayoría praderas suavemente onduladas, sin elevaciones por encima de los 500 m. Por ejemplo, las medias anuales muestran un mínimo en Rocha (3,9 kWh/m<sup>2</sup>) y un máximo (4,7 kWh/m<sup>2</sup>) en la zona Norte (Artigas, Rivera, Paysandú). La variación debida al factor territorial es de solo 0,8 kWh/m<sup>2</sup>. En términos relativos al promedio, la variabilidad territorial es algo mayor en invierno (llegando a 14%) que en verano (cuando es del orden de 8%). La región costera al Sur del país (Rocha, Maldonado, Montevideo) son los que presentan menor irradiación media, en tanto los mayores valores aparecen en el Norte (Artigas, Rivera, Salto, Paysandú). Una característica interesante emergente de este estudio es la rotación estacional de las isóneas de irradiación constante. En los meses de invierno, aparecen casi alineadas con los paralelos. A medida que se avanza hacia

<sup>4</sup>No obstante, la incertidumbre depende de la época del año y de la localidad. Un análisis detallado se encuentra en la Memoria Técnica <http://www.fing.edu.uy/if/solar>.

el verano, se observa una rotación de las isólinas en sentido antihorario, de modo que en los meses de verano presentan una orientación SW-NE, y son aproximadamente paralelas a la costa oceánica, como se muestra en la Fig. 3. Esta rotación de las isólinas se presenta, aún más marcada, en mapas obtenidos a partir de estimativos de irradiación global basados en datos satelitales.

### 3.1. Comparación con otros estimativos de irradiación global

Para el proceso de validación hemos seguido dos caminos diferentes. En primer lugar, comparamos nuestros resultados con los promedios de irradiación global diaria de las series del INMET de las localidades brasileñas de Bagé y Jaguarão, que fueron reservados para tal fin. En segundo lugar, comparamos nuestros resultados con los estimativos<sup>5</sup> del programa Surface meteorology and Solar Energy (SSE/NASA) basados en un modelo de atmósfera, datos de tierra y datos de imágenes satelitales. Lo más relevante es que éstos estimativos de irradiación global media mensual que hemos obtenido para el territorio uruguayo se basan en modelos y conjuntos de datos completamente diferentes a los usados para este trabajo.

**Comparación con datos regionales.** Los estimativos de irradiación global media para cada mes, obtenidos del MSU para las localidades de Bagé y Jaguarão fueron comparados con los datos del INMET para estas estaciones (Cuadro 6). Las desviaciones relativas,  $\epsilon_m = 100 \times (H_m/H_m^{ref} - 1)$ , calculadas para cada mes  $m = 1 \dots 12$  usando el estimativo del MSU como referencia, se muestran en la Fig. 4. Los desvíos positivos (negativos) indican valores medidos superiores (inferiores) a los estimados. El mayor desvío se observa en Bagé en el mes de abril y es del 20%. En general, las diferencias están debajo de 15% y hay meses donde coinciden el estimativo y los registros.

localidad	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Jaguarão	6.7	5.9	4.9	3.8	2.9	2.3	2.7	3.4	4.2	5.1	6.3	6.6
Bagé	6.4	5.6	4.6	3.6	2.7	2.1	2.4	3.1	3.9	4.9	6.0	6.4

Cuadro 6: Valores medios de irradiación global diaria promedio calculados a partir de datos diarios del INMET (Brasil).

El desvío estándar,  $\epsilon_{rms} = [\frac{1}{12} \sum_m \epsilon_m^2]^{\frac{1}{2}}$ , puede usarse como un indicador anualizado de la diferencia estimadores de irradiación global media. Los desvíos estándar  $\epsilon_{rms}$  obtenidos son de 12% para Bagé y 11% para Jaguarão.

**Comparación con estimativos basados en datos satelitales.** Otra forma de validar los resultados obtenidos es compararlos con estimativos basados en metodologías, datos y modelos completamente diferentes. Uno de estos modelos, basado en datos satélites geoestacionarios, es el desarrollado por Pinker y Lazlo [Pinker and Lazlo, 1992] y usado en el servicio SSE/NASA antes mencionado. A través de la implementación en línea de este modelo se pueden obtener estimativos de irradiación global media diaria, mes a mes, con una resolución espacial de  $1^\circ \times 1^\circ$ . Estos promedios están basados en un período de 23 años (Junio 1983 a Junio 2006).

Hemos utilizado este modelo para generar estimativos de irradiación global diaria promedio para cada mes, en una grilla de 20 ubicaciones sobre el territorio uruguayo. A partir de estos estimativos es posible interpolar, calcular isólinas de irradiación y obtener la variación espacial de la irradiación media sobre el territorio uruguayo que implica este modelo. Los mapas generados a partir de estos estimativos muestran un comportamiento similar de las isólinas de irradiación, aunque la rotación de las mismas es aún más acentuada en el modelo SSE como se ve en la Fig. 5. De acuerdo al modelo SSE, el valor medio anual de irradiación global promediado sobre todo el territorio es de  $4.6 \text{ kWh/m}^2$ . El correspondiente valor del Mapa Solar del Uruguay es de  $4.4 \text{ kWh/m}^2$ . Dado que las incertezas, discutidas en la sección anterior, son mayores a  $0.4 \text{ kWh/m}^2$  el acuerdo entre ambos valores parece muy bueno. Los estimativos de medias mensuales de irradiación basados en este modelo fueron contrastados con datos reales para cuatro localidades uruguayas, encontrándose errores rms entre 4 y 10%. Estos resultados son similares a los reportados en [Grossi Gallegos, 1999] donde estimativos basados en este modelo fueron contrastados con datos reales para varias localidades Argentinas, encontrándose errores rms entre 4 y 25%.

<sup>5</sup>Disponibles en <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>



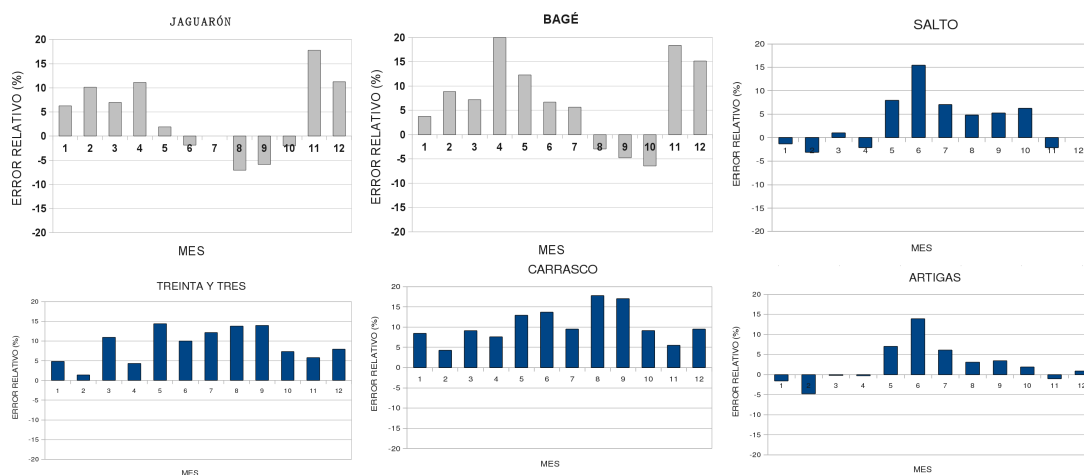


Figura 4: Desvíos porcentuales mensuales  $\epsilon_m$  entre los estimativos de irradiación media diaria (Cuadro 5) y los valores estimados. Las barras claras corresponden a medidas para las localidades Brasileñas de Jaguarão y Bagé (datos del INMET-Brasil). Las barras oscuras comparan con los estimativos basados en imágenes satelitales y el modelo SSE/NASA para cuatro localidades Uruguayas.

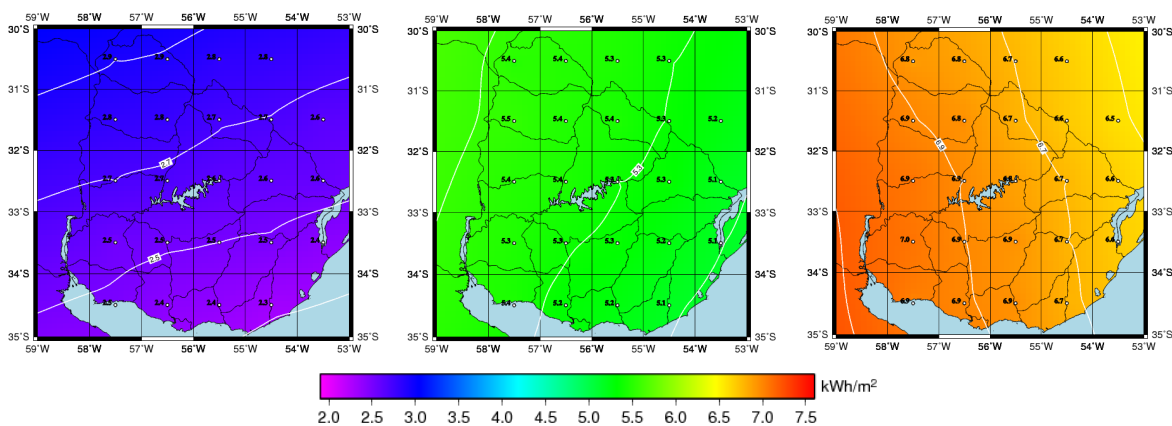


Figura 5: distribución espacial de la irradiación global diaria promedio basada registros históricos de datos satelitales y modelo SSE/NASA <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>. Se muestran los promedios para los meses de Julio (izq.), Octubre (centro) y Enero (der.). La separación entre las isoléneas es de 0,2 kWh/m<sup>2</sup> en todos los casos.

Localidad	RMS (%)	fuelle
Bagé	12,2	INMET
Jaguarón	10,6	INMET
Salto	4,2	SSE/NASA
Treinta y Tres	8,5	SSE/NASA
Carrasco	10,0	SSE/NASA
Artigas	3,5	SSE/NASA

Cuadro 7: Error RMS para cinco localidades entre los estimativos de irradiación global del MSU y los estimativos de las fuentes indicadas (ver Fig 4). En todos los casos las diferencias son consistentes con el nivel de incerteza de 15% de los estimativos del MSU.

Teniendo en cuenta que ambos modelos se basan en metodologías, períodos temporales y conjuntos de datos completamente diferentes, llegar a valores consistentes entre si y a las mismas conclusiones cualitativas es un elemento de validación importante.

## 4. Comentarios Finales

En este trabajo se describen los pasos seguidos para elaborar la primer versión del Mapa Solar del Uruguay (MSU). La metodología seguida consistió en el uso de la correlación de Angström entre el índice de claridad medio y la heliofanía relativa media. El procedimiento seguido implica estimar la variación espacial de los coeficientes de correlación para luego utilizarlos para estimar la irradiación a partir de la heliofanía. Se utilizaron dos series de irradiación global diaria nacionales y dos regionales como base para la correlación de Angström.

Se realizaron 12 mapas mensuales y uno anual, codificando en color la información sobre el estimativo de irradiación global diaria promedio sobre plano horizontal para cada punto del territorio, trabajando con resoluciones de entre 10 y 30 km. Se trazaron isolíneas de irradiación media en todos los casos. A partir de un análisis de incertidumbre, se estima que la incerteza en los estimativos de irradiación global del MSU varía entre el 14 y 19% según el mes del año, con los errores relativos mayores asociados a los meses de invierno (con menor irradiación media). El valor rms anualizado es 15%. Los valores medios de irradiación global estimados para el territorio nacional varían entre 2,1 kWh/m<sup>2</sup> en Junio y 6,7 kWh/m<sup>2</sup> para Enero. El promedio anualizado es de 4,4 kWh/m<sup>2</sup>.

Estos resultados fueron comparados con los promedios diarios correspondientes a dos estaciones brasileñas cercanas a la frontera uruguaya y Brasil y se encontró que los estimativos son consistentes con las mediciones, dentro de estos márgenes de error. Por otra parte, se realizó una comparación con estimativos de irradiación global media basados en información satelital (SSE/NASA) para varios puntos del Uruguay. Partiendo de los datos generados con este modelo para una red de puntos distantes unos 100 km entre si, se realizó un mapa solar basado en información satelital a los efectos de compararlo con el obtenido a partir de medidas en tierra. Se obtuvo una muy buena concordancia entre ambos estimativos, dentro del margen de error de ambos modelos. Las desviaciones estándar anualizadas varían entre 4 y 10% según la localidad considerada.

La metodología utilizada es la misma que se ha usado para elaborar mapas solares en países vecinos [Grossi Gallegos, 1998b, Grossi Gallegos, 1998a, Tiba, 2004] y los resultados obtenidos son consistentes con los de estos primeros trabajos. Sin embargo, los márgenes de error que resultan de esta metodología son relativamente grandes (superiores al 10%) y la resolución espacial y temporal es limitada. En los últimos años, se han generalizado los estimativos de irradiación solar basados en modelos físicos que describen la interacción entre la radiación solar incidente y el sistema tierra-atmósfera [Liou, 2002], en particular tomando como insumo la información obtenida a partir de imágenes satelitales del territorio. Esta metodología permite estimar con frecuencia horaria el grado de nubosidad sobre áreas de territorio con una resolución espacial de unos pocos kilómetros. El radiómetro del satélite mide la irradiancia reflejada por la capa de nubes y por la superficie en diferentes bandas espectrales o canales. En el canal visible, el agua, siendo un buen absorbente de la radiación, refleja poco y aparece oscura. En general, para las áreas de tierra, el albedo (en ausencia de nieve) es bastante menor que el de las nubes, lo cual lo hace un buen indicador del tipo la cobertura nubosa asociada a cada pixel de la imagen. Para cada pixel, puede complementarse esta información – dependiendo del modelo elegido – con la de los canales infrarrojo (IR) o ultravioleta (UV). Estas metodologías requieren de un modelo (físico o estadístico) que vincule la irradiancia detectada por el satélite con la irradiancia incidente en el suelo [M. Noia et al., 1993a, M. Noia et al., 1993b]. Los modelos estadísticos deben ser calibrados y controlados a partir de medidas en tierra. Los modelos físicos deben ser puestos a puntos y luego controlados en sus márgenes de error, también a partir de medidas de irradiación en tierra. La resolución espacial y temporal aportada por estos métodos es grande ya que se trabaja con grillas de pocos km de lado y se cuenta con datos diariamente a intervalos menores a una hora. En la región, Brasil muestra un importante grado de desarrollo en el tema a través del trabajo de J.C. Ceballos del Centro de Pesquisas Espaciales (CPTEC/INPE/MCT) [Ceballos and Moura, 1997, Ceballos et al., 2004, Ceballos and Bottino, 2004] y en Argentina este mismo investigador ha participado de varios trabajos sobre la aplicación de estas metodologías [Ceballos et al., 2005, Ceballos and Bottino, 2008, Ceballos, 2009]. En Uruguay, no se ha trabajado hasta el momento con modelos que permitan el uso de datos satelitales para estimar

la irradiación global a nivel de suelo. Este es claramente un camino a seguir para lograr una nueva versión del Mapa Solar del Uruguay con mayor resolución espacial y menores márgenes de error.

### ***Agradecimientos.***

Los autores agradecen a los Dres. L. Saravia y G. Lesino, directores del Instituto de Investigación en Energías No Convencionales (INENCO) de la Universidad Nacional de Salta, Argentina, por su apoyo incondicional a este proyecto. G.A. agradece especialmente al Dr. H. Grossi Gallegos, del Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) División Física, Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Argentina, por su apoyo y porque su trabajo previo en la temática fue de gran utilidad. G.A. agradece al Ing. J.L. Duomarco por valiosos intercambios. Se agradece al Dr. XXX del Instituto Nacional de Meteorología (INMET) de Brasil por habernos aportado datos de irradiación y de heliofanía del Sur de Brasil. Se agradece a la UTE, al INIA y a la DNM (Uruguay) por haber registrado y aportado parte de los datos utilizados en este trabajo. Este trabajo contó con apoyo financiero parcial por parte de la Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear del Ministerio de Industria y Energía (DNETN/MIEM) y del Programa de Desarrollo de las Ciencias Básicas (PEDECIBA), ambos del Uruguay.

## **Referencias**

- [Almanza and López, 1975] Almanza, R. and López, S. (1975). Radiación solar global en la república mexicana mediante datos de insolación. Technical report, Instituto de Ingeniería, UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.
- [Angstrom, 1924] Angstrom, A. (1924). Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. *Q. J. Royal Meteorological Society*, 50(210):121 – 126.
- [Ceballos, 2009] Ceballos, J. (2009). Algunas características del régimen de radiación solar en argentina, período 1996-2006. In *X Congreso Argentino de Meteorología, Congremet*, Buenos Aires, 5-9 Octubre.
- [Ceballos and Bottino, 2004] Ceballos, J. and Bottino, M. J. (2004). Estimativa de radiação solar por satélite: desempenho do modelo operacional gl1.2. In *XIII CBMET - Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza.
- [Ceballos and Bottino, 2008] Ceballos, J. and Bottino, M. J. (2008). Radiación solar en argentina estimada por satélite: algunas características espaciales y temporales. In *Anales del IX Congreso Argentino de Meteorología*, Buenos Aires.
- [Ceballos et al., 2005] Ceballos, J., Bottino, M. J., and Grossi Gallegos, H. (2005). Radiación solar en argentina estimada por satélite: algunas características espaciales y temporales. In *IX Congremet*, Buenos Aires.
- [Ceballos et al., 2004] Ceballos, J., Bottino, M. J., and Souza, J. M. D. (2004). A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using goes 8 visible imagery. *Journal of Geophysical research*, 109:1–14.
- [Ceballos and Moura, 1997] Ceballos, J. and Moura, G. (1997). Solar radiation assessment using meteosat 4-vis imagery. *Solar Energy*, 60:209–219.
- [Colle and Pereira, 1998] Colle, S. and Pereira, E. B. (1998). Atlas de irradiacao solar do brasil, (1a versão para irradiação global derivada de satélite e validada na superfície). Technical report, LABSOLAR - Laboratório de Energia Solar Departamento de Engenharia Mecânica – UFSC.
- [Duffie and Beckman, 2006] Duffie, J. and Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. Wiley and Sons, Hoboken, New Jersey.
- [George and Maxwell, 1999] George, R. and Maxwell, E. (1999). High-resolution maps of solar collector performance using a climatological solar radiation model. In *Proceedings of the 1999 Annual Conference, American Solar Energy Society, Portland, ME*.

- [Grossi Gallegos, 1998a] Grossi Gallegos, H. (1998a). Distribución de la radiación solar global en la Argentina. I. análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 4:13–17.
- [Grossi Gallegos, 1998b] Grossi Gallegos, H. (1998b). Distribución de la radiación solar global en la Argentina. II. cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 5:33–42.
- [Grossi Gallegos, 1999] Grossi Gallegos, H. (1999). Comparación de los valores satelitales del surface solar energy (sse) data set version 1.0 con datos de tierra de la red solarimétrica. *Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 6:1–6.
- [Grossi Gallegos and Righini, 2005] Grossi Gallegos, H. and Righini, R. (2005). Atlas Solar de la República Argentina. Technical report, Depto. de Ciencias Básicas de la Universidad de Luján.
- [Grossi Gallegos and Spreafichi, 2007] Grossi Gallegos, H. and Spreafichi, M. I. (2007). Análisis de las series de promedios anuales de heliofanía (duración de la insolación) en Uruguay. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 20:31–35.
- [Liou, 2002] Liou, K. (2002). *An introduction to Atmospheric Radiation*. Academic Press, San Diego, CA.
- [M. Noia et al., 1993a] M. Noia, M., Ratto, C., and Festa, R. (1993a). Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: 1. statistical models. *Solar Energy*, 51:449–456.
- [M. Noia et al., 1993b] M. Noia, M., Ratto, C., and Festa, R. (1993b). Solar irradiance estimation from geostationary satellite data: 2. physical models. *Solar Energy*, 51:457–465.
- [Maxwell et al., 1999] Maxwell, E., George, R., and Wilcox, S. (1999). A climatological solar radiation model. In *Proceedings of the 1998 Annual Conference, American Solar Energy Society, Albuquerque, NM*.
- [Page, 1964] Page, J. (1964). The estimation of monthly mean values of daily total short-wave radiation of vertical and inclined surfaces from sunshine records for latitudes 40n–40s. In *Proc. of the U.N. Conference on New Sources of energy*, volume 4, page 378.
- [Page et al., 2001] Page, J., Albuissou, M., and Wald, L. (2001). The european solar radiation atlas: a valuable digital tool. *Solar Energy*, 71:81–83.
- [Pinker and Laszlo, 1992] Pinker, R. and Laszlo, I. (1992). Modeling surface solar irradiance for satellite applications on global scale. *J. Appl. Meteorol.*, 31:194–211.
- [Prescott, 1940] Prescott, J. (1940). Evaporation from a water surface in relation to solar radiation. *Trans. R. Soc. Sci. S. Austr.*, 64:114–118.
- [Raichijk and F, 2006] Raichijk, C. and F, H. (2006). Variabilidad espacial de la heliofanía (duración de la insolación) en la pampa húmeda Argentina, Uruguay y sur del Brasil. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, 19:33–37.
- [Raichijk et al., 2006] Raichijk, C., Grossi Gallegos, H., and Righini, R. (2006). Análisis de los datos de heliofanía en la República Oriental del Uruguay. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 10:101–105.
- [Righini et al., 2004] Righini, R., Grossi Gallegos, H., and Raichijk, C. (2004). Trazado de nuevas cartas de irradiación solar global para Argentina a partir de horas de brillo solar (Heliofanía). *Energías Renovables y Medio Ambiente - ASADES*, 14:23–31.
- [Righini et al., 2005] Righini, R., Grossi Gallegos, H., and Raichijk, C. (2005). Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy*, 30:1241–1255.
- [Tiba, 2004] Tiba, C. (2004). Brazilian Solar Resource Atlas CD-ROM. *Renewable Energy*, 29(6):991–1001.
- [Tiba et al., 1997] Tiba, C., Fraidenraich, N., Lyra, F., Nogueira, A., Grossi Gallegos, H., M., M., and Cavalcanti, E. (1997). Atlas solarimétrico do Brasil. relatório técnico final, vol. i a iv. Technical report, Convenio No. 004 Universidade Federal de Pernambuco/Centro de Pesquisas de Energia Elétrica – ELETROBRÁS.