

RADIACIÓN SOLAR EN ARGENTINA ESTIMADA POR SATÉLITE: ALGUNAS CARACTERÍSTICAS ESPACIALES Y TEMPORALES

Juan Carlos Ceballos¹, Marcus Jorge Bottino¹, Raúl Righini²

¹ Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais - DSA
Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticas - CPTEC
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE – Brasil
{ceballos, bottino}@cptec.inpe.br

² División Física, Departamento de Ciencias Básicas
Universidad Nacional de Luján – Argentina
righini@mail.unlu.edu.ar

Resumen. La distribución de irradiancia media diaria sobre América del Sur es estimada diariamente por el modelo GL1.2 del CPTEC/INPE, utilizando imágenes del satélite GOES (canal VIS). Fue analizada una secuencia de más de 7 años de resultados (octubre 1997 a marzo 2005) para Argentina, región entre las latitudes de 20°S y 45°S. La resolución espacial y temporal original original (12 km; 1 día) fue reducida a promedios sobre 0,4°×0,4° y grupos de péntadas (40km y 5 días). La comparación con datos de algunas estaciones solarimétricas de la región exhibe buen grado de ajuste (del orden de 7% para promedios de péntadas), con incremento de este error medio a partir de la introducción del GOES 12. La definición espacial permite buena definición en la distribución geográfica de radiación. La definición temporal permite el uso de análisis factorial en componentes principales para evidenciar comportamientos regionales típicos. Son encontrados por lo menos 10 regímenes de irradiación en el área analizada.

Abstract. The distribution of solar radiation over South America is daily assessed by the CPTEC's GL1.2 model using GOES satellite imagery (VIS channel). A time series of more than 7 years, October 1997 to march 2005, was used for analyzing Argentine region between latitudes 20°S and 45°S. The original resolution (1 day, 12 km) was reduced to averages over 0.4° and pentads (40km, 5 days). Comparison with values provided by several solarimetric stations exhibits fair fitting (about 7% for averages of pentads), with mean error increased since introduction of GOES 12 data. Spatial resolution allows for good definition of geographical distribution of solar radiation. Time definition allows for the use of factor analysis in principal components allows for making evident regional typical behaviors. At least 10 different regimes of irradiation were found within the area in analysis.

Introducción.

La radiación solar es la fuente primaria de energía para procesos dinámicos de la atmósfera global, para la definición de condiciones climáticas y para procesos biológicos naturales. En el contexto del consumo de energía por la sociedad, ella es una de las alternativas naturales de fuentes renovables y “limpias” (no contaminantes del medio ambiente). En el ámbito agrícola y en el de ecosistemas, ella es componente fundamental del balance de energía superficial, determina tasas de evaporación/evapotranspiración, incidiendo en la disponibilidad de agua en el suelo. Así, el planeamiento de irrigación y siembra en regiones del globo con precipitación escasa o irregular depende no sólo de valores medios climatológicos sino también del monitoreo continuo de sus fluctuaciones en escalas de tiempo de días o meses.

Numerosos estudios del régimen y distribución geográfica de la radiación solar fueron realizados en las últimas décadas, usando como fuentes de datos redes solarimétricas con heliógrafos y escasos piranómetros. En América del Sur, atlas recientes utilizaron datos de esos instrumentos para describir valores medios de radiación solar en Brasil (Tiba *et al.*, 2002) y Argentina (Righini *et al.*, 2005). Una serie mínima de ejemplos ilustrativos en otros países puede mencionar el Atlas de Canadá

(accesible en la URL <http://www.canren.gc.ca/solar/index.asp>), las actividades del National Renewable Energy Laboratory en los Estados Unidos – NREL (descripción en la URL <http://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33792.pdf>), y el programa SWERA (Solar and Wind Energy Resource Assessment, URL <http://swera.unep.net/swera/index.php>), que incluye 13 países del mundo.

Grossi y Righini (2002) observaron que la Red Iberoamericana de Energía Solar llegó a organizar una cantidad razonable de datos de heliofanía, pero los de irradiación (provenientes de piranómetros) son escasos o poco confiables. Puede esperarse que las estimativas de irradiación diaria resultantes de una relación del tipo Angstrom-PreScott tengan una cierta precisión en escala mensual, pero no sean precisas en escala diaria (Ceballos *et al.*, 1992). Por otro lado, los coeficientes de esa relación pueden ser interpolados espacialmente (Tiba *et al.*, 2002; Righini *et al.*, 2005) pero el grado de detalle alcanzado depende de la densidad de medidas piranométricas de referencia. En años recientes, el considerable esfuerzo requerido para procesar datos analógicos (gráficos) está siendo parcialmente compensado con la instalación de estaciones automáticas. En algunos casos, la información producida puede ser monitorizada en línea por internet (por ejemplo, datos de más de 100 estaciones meteorológicas brasileñas pueden ser consultados en la URL www.cptec.inpe.br → Observações). Sin embargo, extensas regiones del continente continúan sin cobertura adecuada.

Los satélites ambientales geoestacionarios permiten evaluar radiación solar sobre amplias regiones, basándose en modelos de estimativa derivados de la reflectancia observada en su canal VIS (detector de radiación visible). De hecho, los satélites GOES y Meteosat transmiten imágenes a cada media hora, con resolución espacial de aproximadamente 1 y 2,5 km, respectivamente. Desde fines de la década de 1970 han sido publicados diversos modelos de estimativa. Entre los más antiguos, tal vez los dos más conocidos sean el “estadístico” de Tarpley (1979) y el “físico” de Gautier *et al.* (1980). Los modelos físicos tienen la ventaja de depender de leyes físicas más o menos simplificadas, aplicadas a estructuras atmosféricas definidas por un conjunto básico de parámetros provenientes de la climatología de la región o (en versiones más avanzadas) de la provisión continua de información emergente de modelos de previsión de tiempo. Estos modelos utilizan los datos de redes solarimétricas sólo para validación (estimación de errores y detección de necesidades de ajuste de parámetros). Utilizando el modelo UM-SBR de la Universidad de Maryland (Pinker y Laszlo, 1992) y propiedades medias deducidas por satélite en celdas de 2,5°×2,5°, la NASA elabora archivos en escala mundial (Whitlock *et al.*, 2004). El modelo IGMK de la Universidad de Colonia ha sido utilizado para radiación solar en África (Stuhlmann *et al.*, 1990), procesando imágenes Meteosat. Diversos esfuerzos son realizados en Francia para procesar imágenes Meteosat con el modelo estadístico-físico Heliosat II (Rigollier *et al.*, 2004), aunque se ha hecho notar la dificultad en disponer operacionalmente de imágenes de ese satélite (<http://www.helioclim.net/publications/d5-1-4.pdf>).

En el caso de América del Sur, fue publicado un atlas de irradiación media mensual para Brasil utilizando el modelo Brasil-SR aplicado a imágenes GOES (INMET/LABSOLAR, 1998). El atlas puede ser descargado en la dirección electrónica <http://www.labsolar.ufsc.br/downloads.htm>. El Brasil-SR (Pereira *et al.*, 1996) es una adaptación del IGMK. En escala diaria, el CPTEC/INPE utiliza el modelo GL (Ceballos *et al.*, 2004) basado en imágenes GOES-E para producir campos de irradiación. Los campos incluyen América del Sur y áreas oceánicas próximas, con resolución de 0,04° y representativos de áreas del orden de 12×12 km (campos diarios y mensuales son

publicados en la URL <http://satelite.cptec.inpe.br> → radiação solar e terrestre). Esta resolución espacial y temporal está siendo aprovechada para evaluar saldos de radiación y permitir el monitoreo continuo de humedad en suelos (proyecto PROCLIMA). En Argentina, se registran aplicaciones diagnósticas recientes del método de Tarpley por Righini (2004) y de datos del NREL (modelo UM-SRB, resolución de 2,5°) por Grossi y Righini (2002). Estos últimos mostraron que estos promedios mensuales son una alternativa para caracterizar regiones homogéneas. En este contexto, las estimativas generadas en el CPTEC sugieren la posibilidad de crear bases de datos regionales con mejor resolución espacial y temporal, aplicables en la región sudamericana. El presente trabajo muestra la comparación con datos de superficie argentinos y los resultados de algunas aplicaciones.

Datos utilizados para el territorio argentino

Fueron utilizadas estimativas de radiación solar provenientes del modelo GL versión 1.2 en uso en el CPTEC. Las hipótesis básicas de este modelo son: 1) el espectro visible es básicamente conservativo para propagación de radiación solar, excepto por absorción parcial de radiación directa en la estratosfera; 2) la radiación solar en el infrarrojo que llega a la superficie proviene de rayos directos con absorción parcial por vapor de agua y dióxido de carbono; las nubes son básicamente opacas en esta parte del espectro solar. En estas condiciones, las variables básicas son la reflectancia observada en el visible por un satélite, y la nebulosidad (cobertura relativa) evaluada a partir de esta información. Parámetros atmosféricos básicos son agua precipitable, columna vertical de dióxido de carbono y ozono. El modelo no considera la presencia de aerosol. La descripción completa se encuentra en Ceballos *et al.* (2004); resultados diarios y mensuales, así como análisis de validación mensuales, son presentados en la página internet del CPTEC (Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais, URL <http://satelite.cptec.inpe.br> → radiação solar e terrestre).

El modelo es operacional en el CPTEC, procesando continuamente imágenes GOES captadas y almacenadas en la Divisão de Satélites e Sistemas Ambientais. La frecuencia de imágenes es de hasta dos por hora y los datos de los 5 canales del Imager son almacenados en archivos binarios, con resolución completa en los canales termal (aproximadamente 0,04° en el nadir del satélite.) El canal VIS es muestreado (un píxel por cada uno de canal termal). El modelo GL1.2 se basa en la reflectancia observada en el canal VIS, estimando radiación solar para cada píxel del archivo binario y atribuyendo en esa posición el promedio del conjunto de 3×3 pixels circundantes. Este criterio es equivalente a una hipótesis ergódica (el promedio espacial en 3×3 pixels sería equivalente a la irradiancia media observada en tierra durante aproximadamente media hora). Este criterio tiende a minimizar los efectos asociados a la localización de una estación terrestre (errores del orden de 1-2 km), al comparar sus medidas con las estimativas por satélite. Los campos de irradiancia obtenidos son integrados durante el día, creándose un archivo de irradiación diaria. La integración temporal se realiza por el método trapezoidal convencional, entre los límites correspondientes al nacer e ocaso local del Sol (para los cuales la irradiancia es nula).

La figura 1 ilustra la comparación del modelo GL1.2 con irradiaciones diarias de 80 solarímetros Li-Cor de una red brasileña de estaciones automáticas (descrita en URL www.cptec.inpe.br → observações → dados automáticos). Son representadas diferencias entre modelo y “verdad terrestre”. La secuencia de valores medios

mensuales muestra que: 1) existe un ciclo anual de desvíos medios (observable en otros modelos); 2) la sustitución del GOES 8 por el GOES 12 en abril de 2003 mantuvo el ciclo anual de desvíos pero también introdujo un incremento $\Delta \approx +1,3 \text{ MJ.m}^{-2}$, indicador de degradación inicial del detector VIS. El ciclo puede deberse a anisotropía de la reflexión por el sistema Tierra-atmósfera, variable con la declinación solar y con la actividad convectiva en el Brasil, sumándose a los efectos de hipótesis simplificadas sobre agua precipitable y contenido de aerosol en la versión GL1.2. El fenómeno de un desvío adicional se debe a la degradación inicial del detector VIS del GOES 12, fenómeno que ya había sido observado para el GOES 8 e implicó en una corrección continua de su calibración; este procedimiento aun no fue implementado para el GOES 12. La conclusión es que los errores medios típicos del GL1.2 (sin corrección de calibración) oscilan entre $+1$ y -1 MJ.m^{-2} durante el año. La comparación de estimaciones diarias con datos de piranómetro indica un desvío estándar típico de la orden de $1,7- 2,2 \text{ MJ.m}^{-2}$. Es importante notar que, estadísticamente, en la escala de promedios mensuales este desvío debería reducirse a $\approx 2/\sqrt{30} \approx 0,36 \text{ MJ.m}^{-2}$.

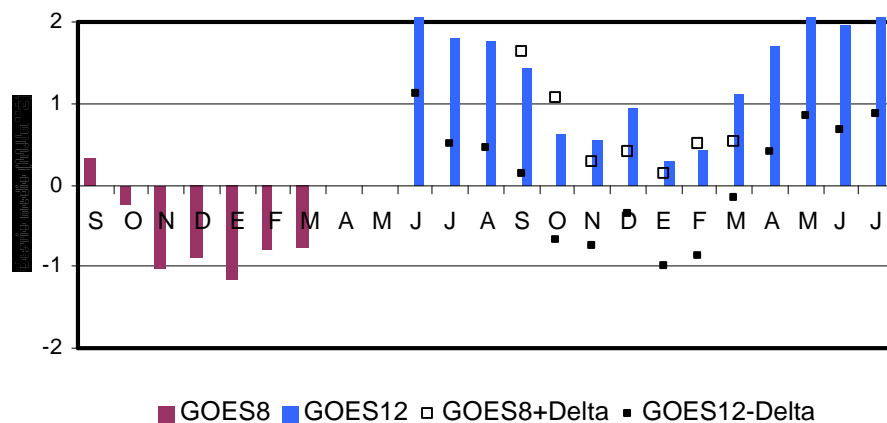


Figura 1. Desvío de las irradiaciones diarias del GL1.2 con respecto a una red de 80 estaciones automáticas en el Brasil (promedio mensual). Período: septiembre 2002 a julio 2004

Recientemente fue completado el procesamiento de más de siete años de imágenes (período comprendido entre 14 de octubre de 1997 y 30 de marzo de 2005). El resultado es un extenso conjunto de archivos de irradiación diaria con una dimensión total de cerca de 25 Gigabytes. Con la finalidad de simplificar cálculos en análisis climatológicos, fueron generados archivos derivados, cuyos valores corresponden promedios espaciales en celdas de $0,4^\circ \times 0,4^\circ$ e promedios temporales en 5 días (péntadas). Para el presente trabajo fueron consideradas secuencias de esos valores medios, limitados a una región entre las latitudes de $20,4^\circ\text{S}$ y 48°S , y longitudes de 76°W y 48°W (un total de 545 péntadas, cada una con 69×61 celdas).

Para comparación con datos de superficie, fueron utilizadas irradiaciones diarias medidas por piranómetro en las estaciones de Luján ($35,58\text{S } 59,00\text{W}$, año 2002), Paraná ($31,83\text{S } 60,52\text{W}$, años 2002 y 2003) y Córdoba ($31,43\text{S } 64,18\text{W}$, año 2003)

Resultados

1. Análisis de valores medios y errores

La Tabla 1 presenta comparaciones para series anuales de péntadas. Se observa que el ciclo anual de valores de péntadas tiene variancias semejantes (del orden de 6 MJ.m^{-2}) tanto para el modelo como para las medidas. El desvío medio entre modelo y medición es de sólo 0,2 en 2002 en Luján, sugiriendo tanto una buena calibración de la estación de superficie como un ajuste adecuado del modelo. En Paraná, el valor medio pasó de +1,1 en 2002 para +2,3 en 2003 (indicativo de la influencia de calibración defectuosa del GOES 12). En general, el error medio sobre un año representa entre 7% (en 2002) y 14% (en 2003) de la irradiación media anual. En todos los casos, las fluctuaciones de los desvíos entre modelo y medida son del mismo orden (desvío est andar de 2,6 a 3 MJ.m^{-2}).

El promedio y desvío est andar de errores tienen valor real si las fluctuaciones son estadísticamente homogéneas durante el período considerado. En ese sentido, las series de péntadas fueron separadas en los trimestres enero-febrero-marzo (estación lluviosa, con actividad convectiva mayor) y mayo-junio-julio (características secas; nebulosidad predominante de tipo estratiforme). La Tabla 2 muestra que no hay grandes diferencias con la estadística anual de desvíos: los valores medios no son superiores a 1,5 en valor absoluto para GOES 8 y con desvío est andar del orden de $2,5 \text{ MJ.m}^{-2}$. Para la época de GOES 12, claramente debe esperarse un aumento de $1,5\text{-}2,2 \text{ MJ.m}^{-2}$ del error medio característico, así como desvíos est andar un poco menores.

		Córdoba 31,43S 64,18W			Paraná 31,83S 60,52W			Luján 35,58S 59,00W		
		modelo	medida	Desvio	modelo	medida	desvio	Modelo	medida	desvio
2002	m	16,5			16,1	15,1	1,1	15,2	15,0	0,2
	s	5,8			6,2	5,6	2,4	5,9	7,0	2,5
2003	m	19,0	16,6	2,4	18,6	15,4	2,3	17,5		
	s	5,9	6,2	3,0	5,9	6,1	2,6	6,2		

Tabla 1. Estadística anual del modelo, de las medidas solar metricas y de los desvíos de los valores de péntadas para 2002 y 2003. En cada caso se indica valor medio anual (m) y desvío est andar (s).

Trimestre			Córdoba	Paraná	Luján
enero-marzo	GOES 8	m	-0,03	1,0	-1,4
	(2002 y/o 2003)	s	2,8	2,3	2,3
junio-agosto	GOES 8	m		1,2	0,2
	(2002)	s		2,1	3,1
	GOES 12	m	2,2	2,7	
	(2003)	s	1,6	1,9	

Tabla 2. Estadística de desvíos entre modelo y medida, considerando péntadas en trimestres específicos. m: valor medio; s: desvío est andar.

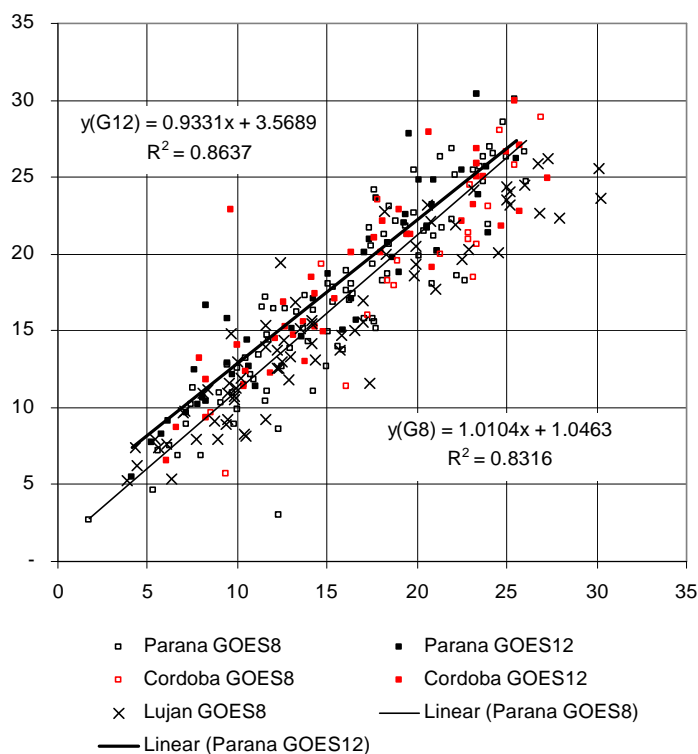


Figura 2. Diagrama de dispersión entre modelo (ordenadas) y mediciones (abcisas).

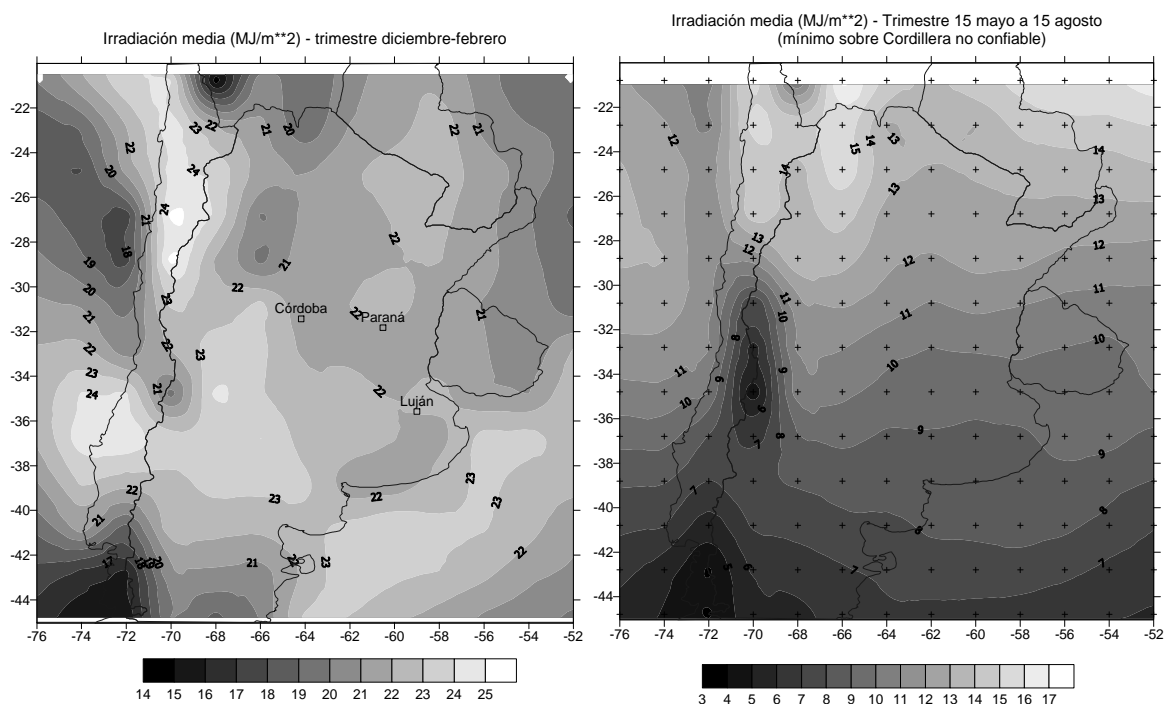
La Figura 2 permite ver el comportamiento del modelo GL1.2 con relación al conjunto de datos 2002-2003. Las rectas de regresión fueron aplicadas a la estación de Paraná. Claramente, durante el período GOES 8 el modelo se ajusta a la tendencia de datos a menos de un error sistemático de $+1 \text{ MJ.m}^{-2}$. La regresión para GOES 12 resalta el error adicional del modelo pero no aparece como una paralela a la anterior, porque la cobertura de nubes (a las cuales está asociada la calibración) es variable: las dos regresiones tienden a convergir para los mayores valores de radiación, para los cuales la nebulosidad es escasa. Por lo tanto, las correcciones para el período con GOES 12 no pueden limitarse a un término simplemente aditivo.

2. Distribuciones geográficas de radiación solar

Las figuras 3 representan la distribución geográfica de valores medios obtenidos para cada trimestre, utilizando la serie completa de péntadas (7 años). Para la interpolación fueron muestreadas celdas en el archivo original, definiendo una cuadrícula con puntos a cada 2° (ilustrados en la figura 3b). No se efectuó corrección para la época de GOES 12; en los siete años de datos, su influencia no incrementaría el error sistemático en más de 1 MJ.m^{-2} .

A menos de los errores casi sistemáticos comentados, los campos de radiación para invierno y verano resultan delineados en detalle tal que requeriría una red de numerosos solarímetros. Para el verano, la generación de convección con influencia de frentes en el este y de orografía en el oeste argentino, lleva a una distribución compleja de valores

medios de irradiación diaria. En el invierno, la distribución de radiación solar tiende a alinearse con la latitud, mostrando un gradiente norte-sur en regiones continentales planas. Dos regiones asociadas a interacción orografía-nubes son notables: 1) la región montañosa del noroeste (con inhibición en la formación de nubes); 2) la región andina central. Sin embargo, esta última puede ser sólo aparente: efectivamente, la versión GL1.2 no discrimina entre las reflectancias elevadas de nieve y de nubes; por lo tanto, en esta región y época las cumbres de los Andes pueden ser falsamente interpretadas como un cielo nublado. En particular, es evidente que las isolíneas de radiación sobre el Pacífico son virtualmente extrapolaciones de aquellas que se observan sobre el continente. Excepto por esta limitación, el modelo GL1.2 delinea detalladamente la distribución de promedios trimestrales.



Figuras 3. Distribución geográfica de irradiación media sobre Argentina, trimestres a) diciembre-febrero; b) 15 de mayo a 15 de agosto. Base de datos: octubre 1997 a marzo 2005. Es ilustrada la posición de las tres estaciones de tierra utilizadas para comparación con el modelo GL1.2.

3. Estructura espacio-temporal de fluctuaciones

La distribución de valores medios ilustrada en las figuras 3 no ofrece información sobre el grado de homogeneidad geográfica frente a fenómenos meteorológicos como pasaje de frentes, generación de convección, circulación sobre el Norte argentino, topografía. Observando que cada punto de cuadrícula en la figura 3 puede ser interpretado como una estación solarimétrica con un conjunto contemporáneo de datos (péntadas comprendidas en un trimestre dado, a lo largo de 7 años), el análisis de coeficientes de correlación entre puntos de cuadrícula podría informar acerca de la asociación intra-regional de la radiación solar. En este sentido, el análisis factorial en

componentes principales (Johnson y Wichern, 1982) ofrece una visión compacta de los principales modos de comportamiento del conjunto de datos. Puede aceptarse la hipótesis de que las fluctuaciones observadas durante un trimestre tengan un grado razonable de homogeneidad estadística. La aplicación a un ciclo anual tendría restricciones ya que un análisis de Fourier aplicado a los 7 años de datos (no mostrado en este trabajo) indica la existencia de una señal senoidal intensa, con período de un año.

El método fue aplicado al caso del trimestre diciembre-febrero. El análisis consideró 169 vectores “estación”, con 126 péntadas (“casos”). Las variables adoptadas en cada “estación” fueron normalizadas con relación a su valor medio y desvío estándar, de forma que la variancia total del sistema debía valer 169, y la matriz básica del problema de autovalores era la de coeficientes de correlación en la red. La Tabla 3 informa sobre los autovalores (pesos) encontrados para cada “modo principal”, hasta el orden 10. Estos modos acumulan 72% de la variancia del conjunto de datos.

Orden	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
autovalor	43,11	17,03	14,30	12,12	7,85	7,45	6,20	5,21	4,78	3,89
% variancia	25,5	10,1	8,5	7,2	4,6	4,4	3,7	3,1	2,8	2,3
% acumulad	25,5	35,6	44,0	51,2	55,9	60,3	63,9	67,0	69,8	72,2

Tabla 3. Autovalores obtenidos para los 10 primeros modos principales del trimestre diciembre-febrero. Análisis en componentes principales aplicado a 169 puntos de cuadrícula (“estaciones”) con 126 péntadas (“casos”) entre octubre 1997 y marzo 2005.

Las figuras 4 ilustran la distribución geográfica de cargas factoriales obtenidas para los 169 puntos escogidos (“grid points”). En la figura de la izquierda son presentados los primeros 6 modos principales (ortogonales en el tiempo). El primero se extiende principalmente sobre la Pampa Húmeda; el segundo sobre la Mesopotamia y sur del Brasil, asociado a regiones con influencia de frentes fríos. El tercero y quinto definen regiones del Pacífico con diferentes características de nebulosidad (el primero, generalmente cubierto por nubes bajas, y el segundo con predominancia de subsidencia). En el norte, una región estadísticamente homogénea se encuentra en el Noroeste argentino, y otra está sobre Paraguay y Mato Grosso (Brasil).

Es importante considerar tres aspectos: 1) las cargas factoriales f son coeficientes de correlación de las componentes principales (independientes del espacio) con las propias series temporales locales; 2) sus cuadrados f^2 evalúan la contribución de la componente principal para la variancia local (igual a la unidad); 3) el hecho de que un dado factor tenga autovalor relativamente pequeño no disminuye su importancia sino restringe su área de influencia (de hecho, el autovalor cuantifica principalmente el número de locales que tienen alta correlación con el modo principal respectivo). En este sentido, el modo 1 debe extenderse por aproximadamente 25% de los puntos considerados, mientras que el modo 6 tiene influencia sobre sólo 7 u 8 (pero su correlación regional es elevada).

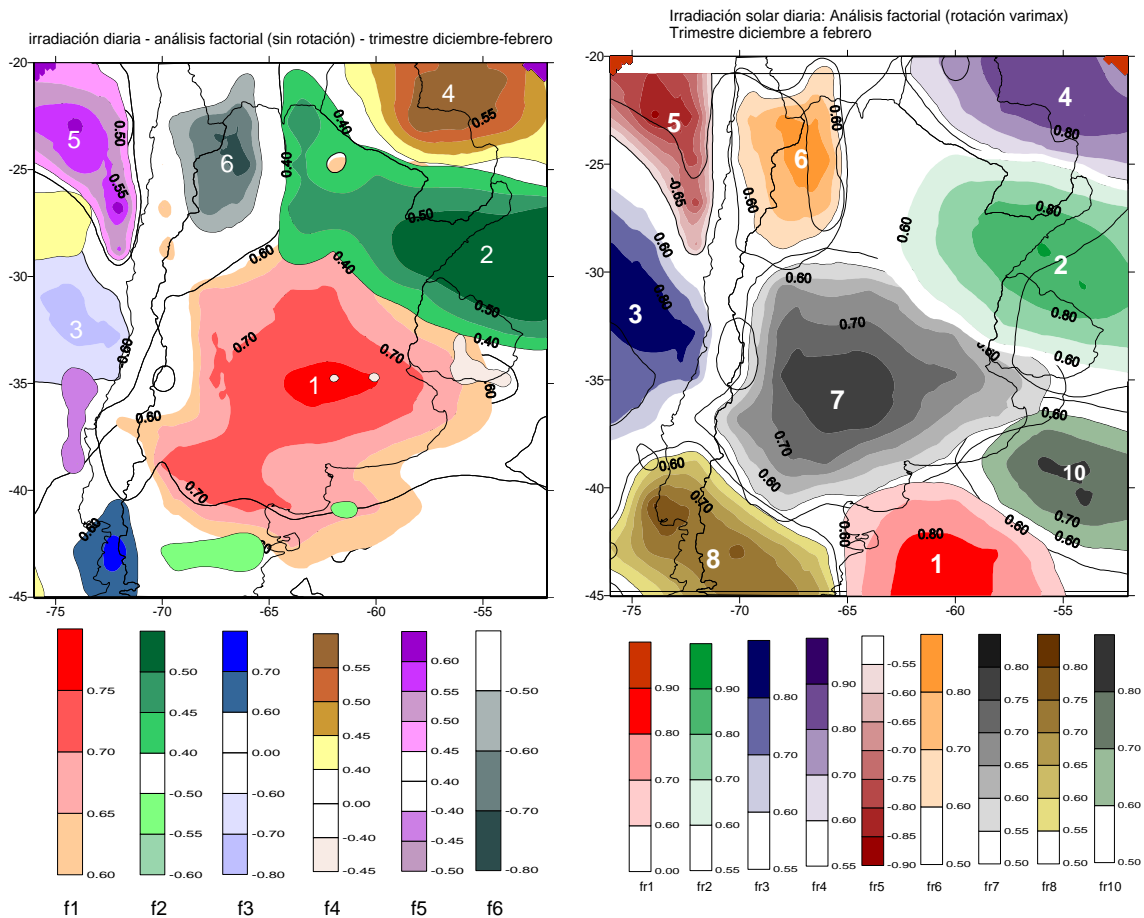


Figura 4. Análisis factorial en componentes principales para las péntadas del trimestre diciembre-febrero, período 1998-2004. Izquierda: cargas factoriales sin rotación. Derecha: aplicación de rotación Varimax.

Una rotación Varimax de los modos más representativos (Johnson y Wichern, 1982) permite una mejor delimitación de su influencia regional. La figura 4 (derecha) incluye el resultado para los 10 primeros modos. La numeración no necesariamente coincide con la de la figura izquierda. El modo 9 (no incluido en la figura) se concentra entre los modos 6 y 4. La comparación entre las dos figuras corrobora la existencia de modos típicos en la Pampa (modo 1), en la Mesopotamia + Rio Grande do Sul (modo 2), en el norte de Paraguay + Mato Grosso (modo 4) y en el norte de las Sierras Pampeanas, conectado con el sur de Bolivia (modo 6). El modo 9 parece asociado a la selva salteño-chaqueña. Otro modo continental se extiende sobre el norte de la Patagonia (modo 8). Los dos modos oceánicos del Pacífico son confirmados. Aún, aparecen dos modos en el Atlántico. Áreas en blanco y aquellas con cargas factoriales rotacionadas inferiores a 0,6 tienen contribuciones a la variancia inferiores a 0,36; por lo tanto, sus regímenes de radiación configuran combinaciones de los vecinos.

Un análisis preliminar de los cuatro primeros modos principales aplicado al trimestre 15 de mayo a 15 de agosto (no ilustrado en este trabajo) muestra que el modo de la Pampa Húmeda se extiende hasta el Noroeste de Argentina, Mesopotamia y sur del Brasil. El modo situado sobre Paraguay + Mato Grosso también permanece, así como el del Pacífico (norte) y el nor-patagónico.

La conexión de los modos principales predominantes con sistemas de tiempo se verifica a través de los tipos de nebulosidad generados y de su variación temporal característica. Este hecho permite sugerir regionalizaciones del comportamiento de la radiación solar, para fines de estudio detallado de series temporales y estudios de climatología dinámica. Por otro lado, demarcan locales donde es recomendable instalar estaciones solarimétricas: un número mínimo debería situarse en regiones con carga factorial máxima y en locales de transición entre modos principales vecinos.

Conclusiones

Fueron comparados datos radiación solar de tres estaciones argentinas (años 2002-2003) con valores degradados del modelo GL (versión 1.2) del CPTEC, basado en imágenes GOES (canal VIS). La degradación se refiere a promedios en pñtadas y sobre celdas de $0,4^\circ$ de dimensión. Esta definición temporal y espacial permite trabajar con archivos de datos relativamente pequeños, con la ventaja de una definición mejor que la ofrecida por otros medios de difusión de estimativas por satélite. El comportamiento del modelo utilizando datos de GOES 8 es coherente con el de las estaciones argentinas, reproduciendo su comportamiento dentro de entre 7 y 10% de error sistemático y desvío estándar del orden de 2 MJ.m^{-2} al reproducir series de valores medios en pñtadas de radiación. Este resultado es satisfactorio, considerando-se que los datos del modelo fueron sometidos a un promedio espacial. Las estimativas basadas en el GOES 12 presentan un incremento medio de 2 MJ.m^{-2} , debido a la calibración defectuosa del satélite. Una recalibración y reprocesamiento de las imágenes son recomendables, ya que no se trata sólo de un error sistemático adicional.

Dada la calidad del modelo y la disponibilidad de por lo menos 7 años de estimativas, pueden ser trazados campos que permiten identificar regiones con niveles adecuados de irradiación solar media diaria, resultado equivalente al de disponer de una red solarimétrica densa. En la escala de muestreo y degradación temporal utilizado, las series temporales usadas en este trabajo y la aplicación de análisis factorial en componentes principales permiten identificar claramente por lo menos 10 regiones con regímenes temporales propios sobre el territorio argentino. Estos resultados son de interés para el diseño de redes solarimétricas.

Los resultados sugieren la factibilidad y ventajas de usar un modelo operacional como el GL1.2, que produce datos espacialmente detallados sobre América del Sur, para fines de monitoreo así como de estudios climatológicos y aplicaciones en agricultura y tecnología.

Referencias

- Ceballos, J.C., G.B.A. Moura, V.F. Ferreira, J.d'A.A. Farias. Desempenho de heliógrafos e actinógrafos na estimativa de insolação e fluxo direcional. *Rev. Brasil. de Meteorologia*, v. 7, 563-581, 1992.
- Ceballos, J.C., M.J. Bottino, J.M. de Souza. A simplified physical model for assessing solar radiation over Brazil using GOES 8 visible imagery. *J. of Geophys. Research*, v. 109, D02211, doi:10.1029/2003JD003531, 2004.
- Gautier, C., G. Diak, S. Masse. et al., 1981. A simple physical model to estimate incident solar radiation in the surface from GOES satellite data. *J. Appl. Meteor.*, v. 19, 1005-1012, 1980.

- Grossi Gallegos, H., R. Righini. Alternativa para una evaluación preliminar del recurso solar en zonas aisladas de Latinoamérica. *Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 10, pp. 9 - 14, 2002
- INMET/LABSOLAR (Instituto Nacional de Meteorologia/Laboratório de Radiação Solar, UFSC). *Irradiação solar do Brasil*. Publicação conjunta Instituto Nacional de Meteorologia (Ministério da Agricultura e Abastecimento) e Laboratório de Energia Solar (Universidade Federal da Santa Catarina). Brasília, 58 pp., 1998.
- Johnson, R.A., D.N. Wichern. *Applied Multivariate Statistical Analysis*. Prentice Hall, 1982. 578 pp.
- Pereira, E.B., S.L. Abreu, E. Stuhlmann, M. Rieland, S. Colle. Survey of the incident solar radiation in Brazil by use of Meteosat satellite data. *Solar Energy*, v. 57, 125-132, 1996.
- Pinker, R.T., I. Laszlo. Modelling surface solar irradiance for satellite applications on global scale. *J. Appl. Meteor.*, v. 31, 194-211, 1992.
- Righini, R. Empleo de imágenes satelitales GOES 8 en el cálculo de la irradiación solar global en distintas zonas de Argentina. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, v. 8, num. 2, 2004.
- Righini, R., H. Grossi Gallegos y C. Raichijk. Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy*, vol. 30, 1241-1255 (2005).
- Rigollier, C., M. Lefèvre y L. Wald. The method Heliosat-2 for deriving shortwave solar radiation from satellite images. *Solar Energy*, vol. 77, 159-169 (2004).
- Stuhlmann, R., M. Rieland y E. Raschke An Improvement of the IGMK Model to Derive Total and Diffuse Solar Radiation at the Surface from Satellite Data. *Journal Appl. Meteor.*, v. 29, No. 7, pp. 586-603, 1990.
- Tarpley, J.D. Estimating incident solar radiation at the surface from geostationary satellite data. *J. Appl. Meteor.*, v. 18, 1172-1181, 1979.
- Tiba, C., N. Fraidenraich, H. Grossi Gallegos, F.J.M. Lyra. Brazilian Solar Resource Atlas CD-ROM. *Renewable Energy*, v. 29, pp. 991-1001, 2004.
- Whitlock, C.H., P.W. Stackhouse, W.S. Chandler, J.M. Hoell, T. Zhang. Renewable energy applications from NASA satellite analysis and modeling. *13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography*, American Meteorological Society, Norfolk, 2004. Acceso en URL <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/79223.pdf>.