

## **INFLUENCIA DE LA FRONTERA MARÍTIMA EN TRAZADO DE ISOLÍNEAS REPRESENTATIVAS DE LA DISTRIBUCIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR EN EL SUR DE SUDAMÉRICA.**

**Rosana Aristegui, Raúl Righini, Federico Taddei.**

GERSolar, INEDES, Universidad Nacional de Luján, Av. Constitución y Ruta 5, (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-02323)-440241– e-mail: gersolar@yahoo.com.ar

**RESUMEN:** Se analiza la influencia de los datos marítimos en el trazado de las cartas de radiación solar de la región sur de Sudamérica, confeccionadas empleando un método estadístico de interpolación (“kriging”). Se estudian los casos de enero y julio, empleando una base de datos de radiación solar estimados a través de imágenes satelitales por medio del algoritmo de Langley. Las diferencias porcentuales en los valores de las cartas obtenidas considerando datos marítimos y sin ellas son muy pequeñas en todo el territorio, aún en zonas costeras.

**PALABRAS CLAVE:** kriging, frontera marítima, cartas de radiación solar, Sudamérica.

### **INTRODUCCIÓN**

El trazado de cartas solarimétricas constituye una actividad importante para construir mapas que muestren la distribución espacial de la energía solar sobre un territorio. Conocer la distribución espacio-temporal del mismo constituye una herramienta de información imprescindible para aprovechar el recurso solar con vistas a su aprovechamiento energético. Del estudio de su variabilidad espacial puede evaluarse el desempeño de los sistemas de aprovechamiento a lo largo del año, y de su distribución geográfica la elección de los mejores sitios para instalarlos, o evaluar su potencial desempeño.

Una manera de representar las cartas solares es mediante el trazado de isolíneas. Ese mecanismo permite representar de manera satisfactoria la variabilidad de la radiación solar.

Cuando se tiene una red de estaciones de medición dispersas, o un mecanismo de evaluación de la radiación solar que emplee datos satelitales, el “kriging” constituye una herramienta satisfactoria de representación que permite trazar las isolíneas de radiación por un mecanismo no arbitrario, que minimiza los errores cometidos.

Dentro de los métodos geoestadísticos, el “kriging” es un método de interpolación lineal optimal, ya que minimiza los errores cometidos en la estimación del campo de radiación, incorporando información de la estructura de ese campo por medio de una función denominada variograma (Aguiar, 2000).

El empleo del “kriging” para el trazado de isolíneas que representen (y delimiten) zonas de iguales valores de irradiación solar, se encuentra ampliamente difundido. Las cartas de heliofanía de Argentina (Grossi Gallegos y Righini, 2007; Righini y Grossi Gallegos., 2005), estudios de la distribución solar en zonas limitadas del continente sudamericano (Righini y Grossi Gallegos, 2000; 2001; Tiba, 2001) han sido trazadas usando este tipo de interpolación. Las cartas así confeccionadas han usado información proveniente de estaciones de medición de la radiación solar o brindadas por algoritmos que emplean imágenes satelitales para estimar la radiación solar a nivel de la superficie terrestre.

Una dificultad común en este tipo de representaciones la constituye la determinación de los límites geográficos dentro los cuales se tomarán datos para poder luego emplear el kriging en el trazado de isolíneas. La consideración de datos solarimétricos cerca de los límites de la zona en la que se quiere representar la información debe ser evaluada con especial cuidado, ya que de una mala decisión en ese sentido puede traer aparejados errores en la forma de las isolíneas en la zona de frontera, los que pueden llegar a tener influencia incluso en zonas más alejadas.

Existe una variada oferta de programas comerciales que usan el kriging como un mecanismo de interpolación. El software, en primer lugar, representa la correlación entre los datos en función de la distancia que separa los puntos de ubicación de los mismos. Esa representación da lugar a la llamada función de estructura o variograma. El variograma será aproximado mediante una determinada función que permitirá evaluar la variable a representar (la energía solar en este caso) en los sitios en los que debe ser interpolada. Para determinar esos sitios se cuadrícula el territorio subdividiéndolo con líneas latitudinales y longitudinales. Los puntos de intersección de esas líneas (nodos) son los elegidos para calcular los valores interpolados. Luego las isolíneas son trazadas uniendo nodos en los que la variable tenga el mismo valor.

Si no se incluye información más allá de la frontera que delimita la zona de representación, las isóneas, en ocasiones, tienden a curvarse, uniendo puntos que tienen igual valor en los nodos de la grilla de trazado. Como ejemplo se muestran en la Figura 1 los mapas de isóneas de radiación solar global para el mes de enero, trazadas empleando kriging con datos estimados a partir del algoritmo de tratamiento de imágenes satelitales de Pinker y Lazlo (1992). En la figura 2 se muestran los puntos donde se estimaron los datos usados para ambas representaciones. En el ejemplo puede visualizarse cómo la inclusión (o la falta) de datos más allá de la zona de frontera puede provocar variaciones en las interpolaciones del método de kriging, incluso en zonas bastante alejadas del límite.

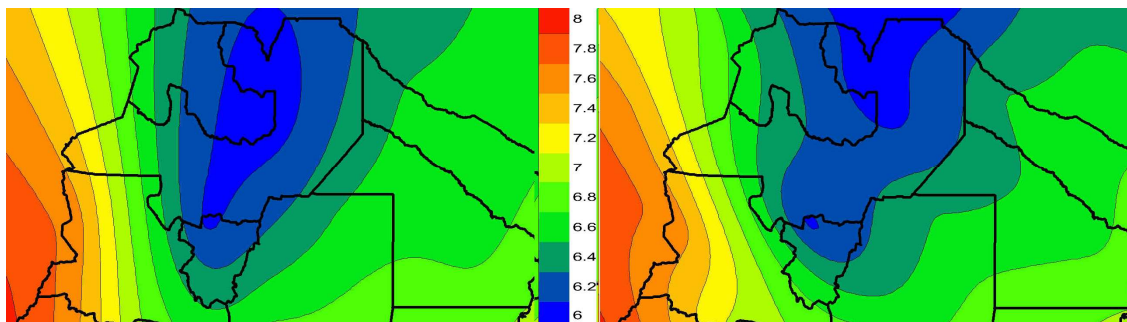


Figura 1: Se observan aquí isóneas de radiación trazadas con datos satelitales de la zona norte del país, considerando datos evaluados más allá de la frontera Argentina (derecha), y solamente datos en la zona interior del país (izquierda). La escala de colores representa la irradiación media mensual en  $\text{kW.h/m}^2$ .

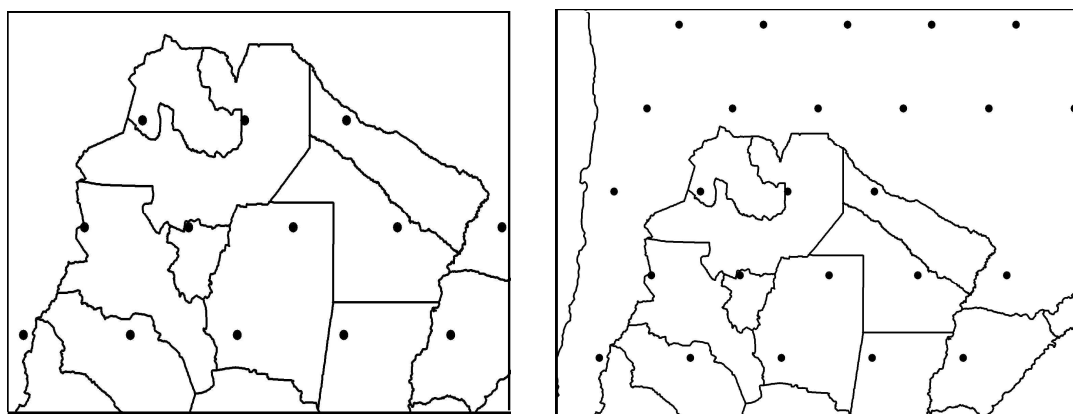


Figura 2: Ubicación de los datos considerados para el trazado de los mapas mostrados en la Figura 1 (con datos solamente pertenecientes al país, a la izquierda, y con datos más allá de la frontera, a la derecha).

Esta situación puede falsear arbitrariamente las representaciones, por lo que se hace necesario considerar datos que se encuentren más allá de la frontera o evaluar la representatividad de aquellos con los que se cuenta, estudiando la influencia que puedan tener en la representación. Esta situación se da de manera característica cuando se hacen mapas respetando los límites políticos en los que se ha dividido el territorio. Para dar continuidad a las isóneas es habitual recurrir a datos medidos o estimados que se sitúen más allá de los límites territoriales (Righini et al., 2005).

Una frontera inevitable cuando se trazan cartas de radiación la constituye el mar. El mar, cuando se representan las isóneas de radiación, constituye, además de un límite natural, una porción del espacio que presenta dos características que lo distinguen del resto: en primer lugar es una zona donde existen muy pocas estaciones que registren datos relacionados con la radiación solar; en segundo lugar, los modelos de estimación de la radiación solar basados en imágenes satelitales aplicados sobre el mar han sido parcialmente validados, principalmente debido a la carencia de datos piranométricos que permitan evaluar el desempeño de los algoritmos aplicados.

Uno de los modelos que ha tenido un éxito parcial, aplicado a los océanos, ha sido el desarrollado por (Gupta et al., 2001). Ese modelo, ha y puesto al alcance del público genera, brindando información sobre los niveles de radiación en todo el Globo Terrestre por NASA. Una discusión sobre el modelo puede encontrarse en: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?s01#s01>.

El algoritmo usado por NASA es un modelo físico de estimación de la radiación solar global a nivel de superficie, que emplea imágenes del satélite GOES en su canal visible, y se basa en cálculos de transferencia radiativa en la atmósfera. El método usa las mediciones realizadas por sensores embarcados en satélites de observación meteorológica mientras que el

algoritmo toma como valor de entrada la irradiancia medida por el satélite a tope de atmósfera. Empleando los albedos espectrales en superficie y las funciones ópticas de la atmósfera, se estima la radiación solar incidente a nivel de la superficie terrestre y luego se integra a lo largo de un día. Esos valores permiten obtener los valores diarios medios mensuales. Las grillas usadas son de  $1^\circ \times 1^\circ$ .

La existencia, por lo tanto, de un modelo de estimación de la radiación solar sobre todo el globo, con una importante cantidad de datos generados que permiten cubrir todo el planeta, constituye una herramienta que puede aprovecharse con el objetivo de evaluar la influencia de datos marítimos en el trazado de cartas de isolinéas de radiación solar trazadas empleando kriging.

El presente trabajo apunta a la evaluación que los efectos de la frontera marítima puede tener en el trazado del mapa de isolinéas de radiación sobre el territorio argentino. Sus pretensiones no son absolutas (es decir no se trata de evaluar la representatividad de los mapas obtenidos) sino relativas. El objetivo es cuantificar el efecto que tiene considerar información sobre la radiación en el mar en la carta terrestre de radiación solar.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se ha limitado el análisis a Argentina, Chile y Uruguay. La base de datos usada corresponde a valores medios estimados durante el período 1988-2005. En dicha base se calcula, empleando el algoritmo de Langley (Gupta et al., 2001), valores medios de radiación solar en el centro de cada celda de  $1^\circ \times 1^\circ$ . Se trabajó con todas las celdas que cubrían el territorio para el trazado de las isolinéas de enero y julio.

Paralelamente se generaron mapas de isolinéas que, a las celdas anteriormente consideradas, añaden datos de radiación calculados sobre celdas situadas sobre el mar, en las adyacencias de la costa. La grilla de valores determinada por el kriging para enero y julio sin considerar datos marítimos, fue comparada con la correspondiente obtenida considerando datos mar adentro. Se calcularon las diferencias relativas porcentuales entre ambos casos sobre cada uno de los nodos de la grilla. Estas diferencias fueron representadas por isolinéas obtenidas empleando "kriging", obteniéndose una carta representativa del error.

La Figura 3 muestra el centro de cada una de las celdas usadas para efectuar kriging en la zona analizada sin considerar datos de radiación mar adentro y considerándolos.

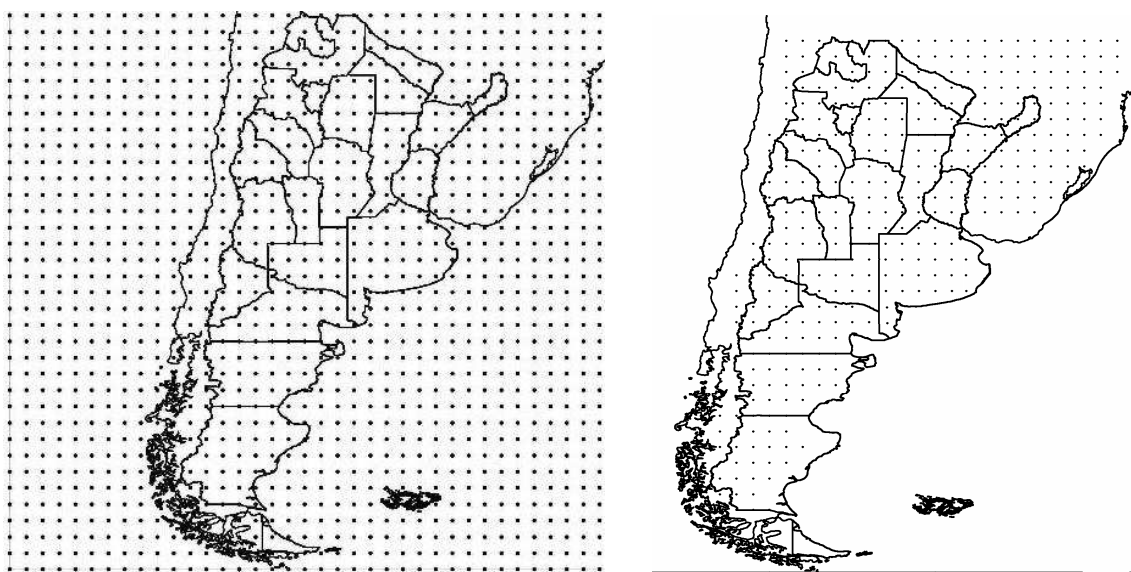


Figura 3: Puntos utilizados para el trazado de las isolinéas de radiación. A la izquierda incluyendo datos marítimos. A la derecha, sólo considerando datos en el continente.

## RESULTADOS

En la Figuras 4 y 5 se muestran los mapas de radiación global obtenidos para los meses de enero y julio, y los mapas de las diferencias son mostrados en la figura 6. En todos los casos la aproximación seleccionada para el variograma fue lineal.

Las diferencias entre los datos calculados por interpolación cuando se consideran datos mar adentro para el trazado de las isolinéas con aquellos calculados sin tomarlos en cuenta, son muy pequeñas. Se encuentran debajo del límite de error instrumental asumido para el trazado de las cartas ( $0,5 \text{ kWh/m}^2$ ) en todos los puntos donde fueron calculados. Son, obviamente, un poco más altos cerca de la costa, pero en todos los casos, los errores cometidos son despreciables.

Los mapas permiten ver que, usando el modelo aplicado por NASA dentro del territorio continental, no existen diferencias entre las cartas trazadas en ambos casos. Es importante resaltar que dentro del territorio continental deben considerarse datos más allá de las fronteras políticas para trazar isolinéas dentro de una determinada región.

## CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos permiten afirmar que no es necesario preocuparse por las posibles discontinuidades de las cartas de radiación en el sur de Sudamérica, trazadas empleando el kriging como método de interpolación, si no se incluyen datos estimados en la superficie marítima. Esta conclusión es aplicable al modelo de estimación de la radiación solar empleado por NASA. Extenderla a otros algoritmos o bases de datos requiere de un estudio particular en cada uno de los casos, requiriéndose una especial evaluación del desempeño de dichos algoritmos en la estimación de la radiación solar sobre el mar, donde las mediciones de la energía solar son particularmente escasas.

La extensión de la zona analizada hace presuponer que los resultados pueden extenderse a otras zonas con fronteras marítimas extensas. Habrá, no obstante, casos particulares correspondientes a costas marítimas de geometría particular, o islas cercanas al continente, que requerirán un análisis más específico antes de poder arribar a conclusiones definitivas.

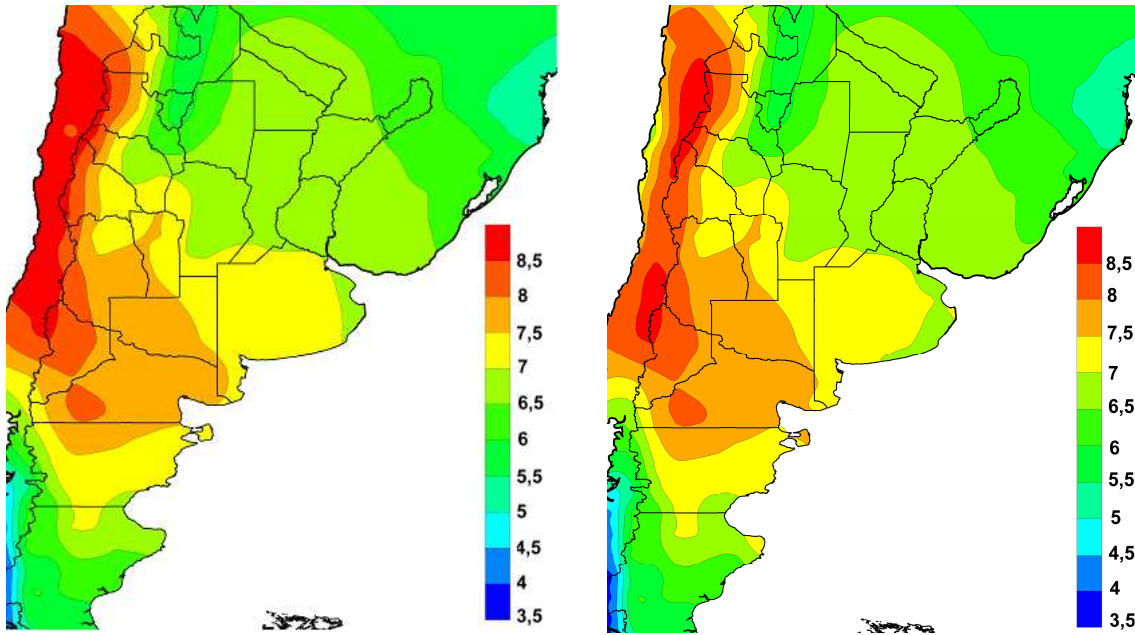


Figura 4: Distribución de la radiación calculada con datos continentales (izquierda) y con datos continentales y marítimos (derecha). Mes de enero. Los valores de radiación están dados en  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ .

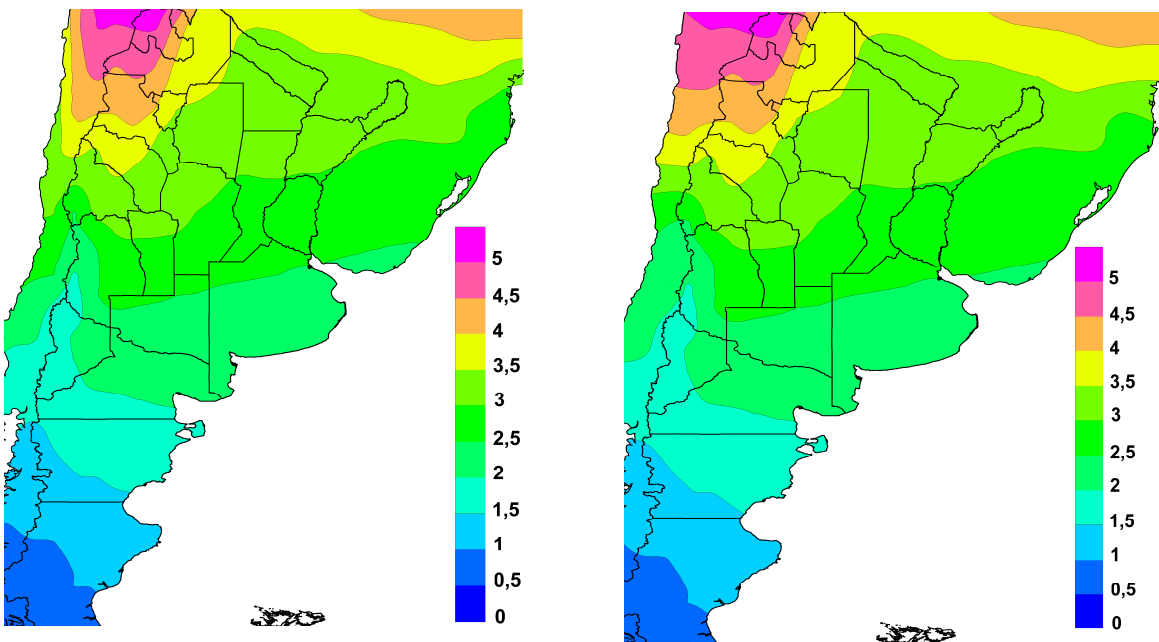


Figura 5: Distribución de la radiación calculada con datos continentales (izquierda) y con datos continentales y marítimos (derecha). Mes de julio. Los valores de radiación están dados en  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^2$ .

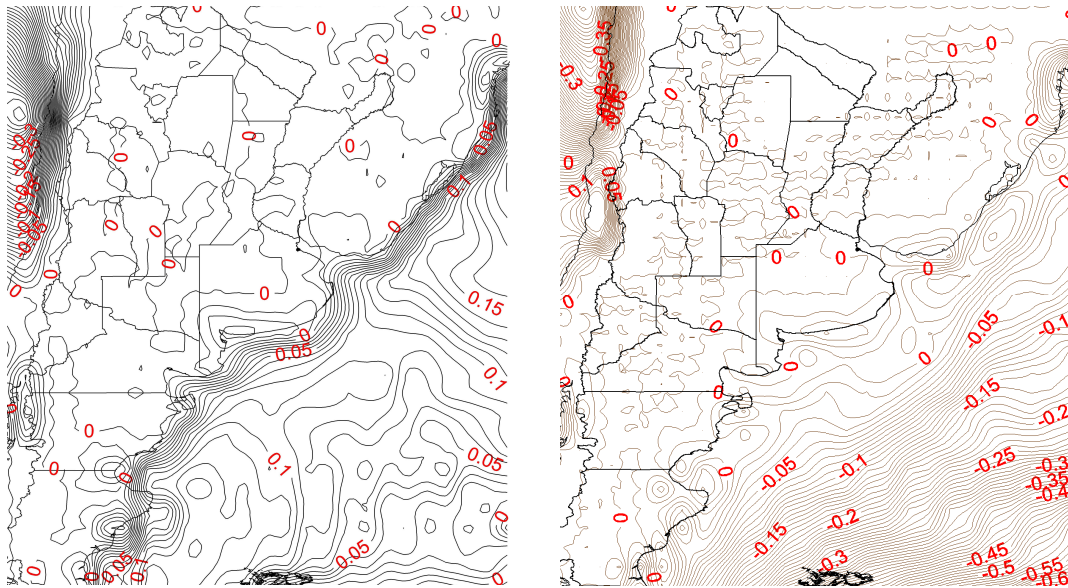


Figura 6. Diferencias relativas porcentuales entre datos calculados empleando “kriging” con y sin frontera marítima. Mes de julio (izquierda) y mes de enero (derecha).

## REFERENCIAS

- Aguiar, R. (2000) Cartografía de la Radiación Solar por Métodos Geoestadísticos II Curso Regional de Solarimetría. Red Temática IV, CYTED. Tarapacá, Chile.
- Gupta S. K., Kratz D., Stackhouse P. W. and Wilber A (2001) The Langley parametrized shortwave algorithm (LPSA) for surface radiation budget studies. NASA.
- Grossi Gallegos, H. y Righini, R. (2007) Atlas de energía solar de la República Argentina. Universidad Nacional de Luján y Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, 74 páginas + 1 CD-ROM.
- Pinker, R. y Laszlo, I. (1992) Modeling surface solar irradiance for satellite applications on a global scale. *J. Appl. Meteor.* Vol 31, pp 194 – 211.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2000) Trazado de las cartas solarimétricas de la Pampa Húmeda empleando métodos geoestadísticos. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, Vol. 4 N° 2, pp. 11.25-11.29.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2001) Evaluación preliminar de la distribución de la irradiación solar global en el Gran Chaco Americano. En *Anales del IX Congreso Latinoamericano e Ibérico de Meteorología - VIII Congreso Argentino de Meteorología*, versión CD-ROM, Buenos Aires, Argentina.
- Righini, R. y Grossi Gallegos, H. (2005) Distribución de la heliofanía en Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Agrometeorología (AADA)*. Vol 3-4, pp 1-7.
- Righini, R., Grossi Gallegos, H. y Raichijk, C. (2005) Approach to drawing new global solar irradiation contour maps for Argentina. *Renewable Energy*, Volume 30 (8), pp. 1143-1308.
- Tiba, C. (2001) Solar radiation in the Brazilian Northeast. *Renewable Energy* Vol. 22, pp. 565-578.

**ABSTRACT:** We analyze the influence of sea data in the layout of the solar radiation maps in the region of South America, made up using kriging as the interpolation method. We study the cases in January and July, using a database of solar radiation estimated from satellite images by the algorithm of Langley. The percentage differences in the values of the contours maps obtained considering sea data and without them are very small throughout, even in coastal areas.

**KEYWORDS:** kriging, sea boundary, irradiation solar maps, South America.