

DETERMINACIÓN DE LA CANTIDAD DE AÑOS DE MEDICIÓN NECESARIOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL A NIVEL DE SUPERFICIE EN ARGENTINA

R. Righini, R. Aristegui y A. Roldán

GERSolar, INEDES, Universidad Nacional de Luján, Av. Constitución y Ruta 5, (6700) Luján, Buenos Aires, Argentina – Tel. (54-02323) 423171– e-mail: gersolar@yahoo.com.ar

Recibido 15/08/14, Aceptado 19/09/14

RESUMEN.- Se evalúa la cantidad de años necesarios de medición de la radiación solar global en Argentina para determinar los valores diarios medios mensuales y medios anuales de forma que los mismos no difieran de la media a largo plazo en un porcentaje prefijado dentro de un intervalo de confianza preestablecido. El cálculo se hace para diferentes errores aceptables de los valores medios, y los resultados son representados espacialmente mediante mapas de isolíneas de años requeridos, empleando kriging como método de interpolación óptima. La base de datos usada es la que corresponde a las estimaciones del modelo SRB empleado por NASA, perteneciente al período 1983-2005.

Palabras claves: Radiación solar global, promedios, longitud temporal de los registros, Argentina.

DETERMINING THE REQUIRED NUMBER OF MEASUREMENT YEARS FOR THE ASSESSMENT OF GLOBAL SOLAR RADIATION AT SURFACE LEVEL IN ARGENTINA

ABSTRACT.- The number of years needed for measuring global solar radiation in Argentina is evaluated to determine mean monthly and annual daily values so that they do not deviate from the long-term average at a range preset within established confidence intervals. The calculation is made for different measurement errors and the results are represented spatially on isoline maps by using kriging contours of years as a method of optimal interpolation. The database used corresponds to the SRB estimates model used by NASA in the period 1983-2005.

Keywords: Global solar radiation, temporal data length, confidence interval, Argentina.

1. INTRODUCCIÓN

La energía solar como fuente primaria ha ido cobrando relevancia, especialmente durante los últimos años. En efecto, a nivel mundial, la potencia fotovoltaica instalada ha superado anualmente las previsiones más optimistas (Rooster, 2012). Paralelamente el aprovechamiento energético de la radiación solar para el calentamiento de agua ha mostrado un incremento notable. Ambas aplicaciones se han visto impulsadas por el abaratamiento de los precios, tanto de las celdas fotovoltaicas, como de los colectores térmicos de tubos evacuados y, además, por el sostenido aumento en los precios de los combustibles fósiles. La construcción de centrales eléctricas solares térmicas es, en algunos países, una realidad en avance.

En Argentina, en particular, han surgido una serie de iniciativas gubernamentales tendientes a estimular la producción energética primaria empleando fuentes alternativas. En tal sentido puede citarse la ley 26090/06

cuyo objetivo es llegar al 8% en la participación de energías renovables en la matriz energética nacional. Más cerca en el tiempo, la resolución 108/11 de la Secretaría de Energía de la Nación posibilitó la realización de contratos de abastecimiento al mercado mayorista por parte de centrales generadoras, lo que ha impulsado a algunos actores privados a interesarse en la generación solar eléctrica, ya sea fotovoltaica o térmica.

Ese contexto de interés creciente necesita del conocimiento adecuado del recurso solar para dimensionar los sistemas de aprovechamiento energético y evaluar su desempeño esperado y factibilidad económica. Institucionalmente el país ha comenzado a dar una serie de respuestas tendientes a actualizar el conocimiento existente en lo que hace a la distribución espacio-temporal del recurso solar, por ejemplo a través de la planificación y pronta puesta a punto de la red ENARSOL que medirá la radiación solar en sus componentes directa, difusa y global en 35 sitios del territorio nacional (Aristegui y Righini, 2012). Las propias

centrales fotovoltaicas ya instaladas o en proceso de instalación sumarán mediciones que habrán de incrementar la estadística de datos de radiación existentes en el país.

No obstante en todos los casos surge un interrogante que es preciso responder: ¿cuánto tiempo se debe medir para evaluar correctamente el recurso solar? La importancia de conocer los años de medición necesarios para determinar los valores medios no puede obviarse: de considerarse un número de años menor que los requeridos, los mismos pueden diferir significativamente de los valores medios reales (asumidos como los valores medios tomados a largo plazo) y, por lo tanto, las predicciones de factibilidad y el dimensionamiento de los sistemas de aprovechamiento energético pueden verse afectadas.

La respuesta al interrogante no es única: depende de la ubicación del sitio en que se desee evaluar, de la incerteza máxima que se admita en los valores diarios medios, ya sea mensuales o anuales, y del intervalo de confianza que se estipule. El presente artículo pretende responder, en una primera instancia, a esa pregunta, presentando mapas que reflejen la distribución espacial de la cantidad de años requeridos para evaluar la radiación solar en Argentina.

2. ANTECEDENTES

La red Solarimétrica, funcionó en Argentina desde el año 1978 hasta promediar la década de los ochenta. Llegó a tener 42 estaciones de medición, algunas en países limítrofes. Sus datos fueron procesados, dando lugar a una serie de boletines mensuales y, fundamentalmente, a las cartas de radiación solar de la República Argentina (H. Grossi Gallegos, 1998 I y II; H. Grossi Gallegos y R. Righini, 2007).

Grossi Gallegos y Atienza (1988) evaluaron la cantidad necesaria de años de medición en los sitios de ubicación de las estaciones de la red para que los valores medios mensuales se encontraran en un intervalo de confianza establecido, compatibles con la incerteza del instrumental de la red, la que evaluaron en un 6%. Ese error fue establecido en función del instrumental existente en la época y admisible en ese entonces para la determinación de los niveles de radiación solar que la red Solarimétrica pretendía.

En función de la variabilidad temporal de los valores medios de radiación obtenidos, se determinó, en esa ocasión, la cantidad de años de medición necesarios para que los mismos, evaluados con un error experimental dado (un 6% del máximo nivel de radiación registrada por los sensores de la red Solarimétrica) fueran los verdaderos con una probabilidad determinada por diferentes intervalos de confianza.

Más recientemente un trabajo de Grossi Gallegos (Grossi Gallegos et al., 2013), analizó la longitud de las series temporales de medición de la radiación solar necesaria para establecer los valores medios mensuales y medio anual en la estación de medición de Paraná, tomada como referencia debido a la calidad y longitud de sus registros de datos

solarimétricos. En ese trabajo se establecieron los años de medición necesarios en Paraná para que las medias mensuales de la irradiación solar global diaria no difieran en más de un 6% de la media a largo plazo.

El presente trabajo extiende esa evaluación original a todo el país, empleando datos estimados en base a imágenes satelitales con un modelo físico de cálculo de la radiación solar global a nivel de la superficie terrestre. Los mapas obtenidos se realizaron empleando kriging como método geoestadístico de interpolación. Se analizaron distintas situaciones relacionadas con el error admitido en la estimación de los valores medios y los intervalos de confianza dentro de los cuales se sitúan los mismos.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El sitio web de Nasa: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/interann.cgi?email=skip@larc.nasa.gov> provee datos horarios, diarios y valores medios mensuales de estimaciones de la radiación solar evaluados sobre todo el planeta. El globo terráqueo fue dividido en celdas de aproximadamente 1° de lado y en el centro de cada celda la radiación solar global (entre otra serie de estimaciones y mediciones) fue evaluada mediante el modelo SRB (Surface Radiation Budget). Dicho modelo de estimación es una modificación del modelo de Pinker, un modelo físico de transferencia radiativa, variación del originalmente desarrollado por Pinker y Laszlo (Pinker y Laszlo, 1992). Los datos provistos por NASA provienen del satélite GOES, abarcando el período 1983-2005.

El algoritmo, contrastado contra mediciones provistas por estaciones BSRN (Baseline Surface Radiation Network), evalúa la radiación solar global a nivel de la superficie terrestre con un error global que ronda el 10% (y que puede llegar a un 34 % en zonas cercanas a los polos). Si bien la estimación que el modelo efectúa no constituye una medición absoluta de ese parámetro, la variabilidad temporal del recurso solar se ve reflejada en la variación de los valores que el algoritmo calcula. Como el objetivo es determinar el número de años de medición necesarios, el parámetro clave del análisis estadístico es la dispersión de los valores. Por lo tanto se justifica el empleo con ese objetivo de los datos disponibles de NASA, ya que la variabilidad de la estimación usada refleja la variabilidad de los valores de radiación en la superficie.

El análisis previamente desarrollado por Grossi Gallegos en función de los datos de la red Solarimétrica, y en particular en el caso de la estación Paraná, fue usado para comparar los resultados derivados del modelo SRB, ya que en los citados artículos se establecieron números de años mínimos requeridos para estimar las medias dentro de diversos intervalos de confianza con un error máximo establecido usando para ello datos medidos por piranómetros de la red Solarimétrica.

En este trabajo se seleccionaron de los datos brindados por NASA, una serie de 383 celdas que cubren por completo el territorio nacional y zonas fronterizas con él, con el objetivo de que las isolíneas determinadas no se viesan influidas por los límites políticos del territorio. Las celdas empleadas se muestran en la figura 1.

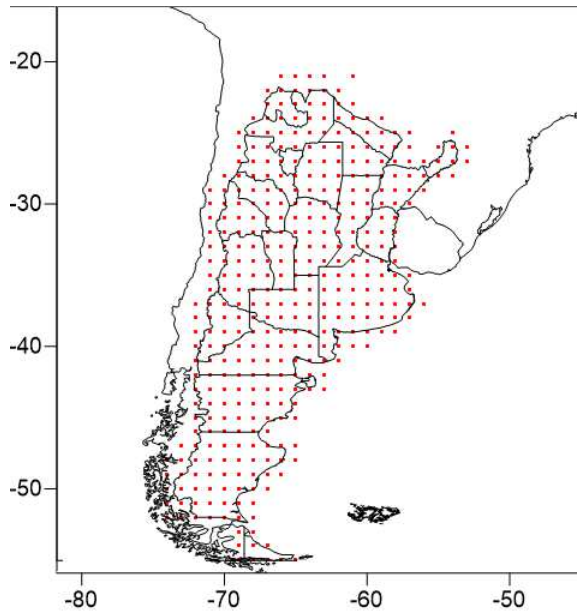


Fig. 1: Celdas empleadas para el cálculo de la cantidad de años necesarios para determinar los valores medios mensuales con un determinado nivel de incerteza.

Para estimar el número de años necesarios en un determinado sitio se procedió de acuerdo a la siguiente metodología.

- Se evaluó el valor medio de los datos del centro de cada celda y el desvío estándar alrededor de ese valor medio. Esto se hizo para cada uno de los meses y para el valor medio anual, procesándose para cada celda 23 valores correspondientes a cada mes y 23 valores medios anuales (período 1983-2005).
- Con los valores medios mensuales y el valor promedio, se calculó la desviación estándar σ de cada celda, para cada uno de los meses del año y para la media anual.
- Se seleccionó un nivel de incerteza determinado, denominado δ , al que a su vez se le asignaron distintos valores: 1,5%, 3%, 5% y 10%.
- El error absoluto admitido para cada mes se determinó como la media mensual del período de la serie multiplicado por δ . Se le llamó ϵ a este producto. Este procedimiento se aparta del empleado por Grossi Gallegos, juzgándose más apropiado evaluar los errores mensuales en función de los valores medios mensuales correspondientes a cada mes. Emplear, tal como lo hiciera Grossi Gallegos, el valor máximo medido puede dar lugar a subestimar el número de años de medición necesarios durante los meses de invierno, que presentan los menores valores de radiación y sobreestimarlos en los meses de mayor radiación.
- En base a la desigualdad de Tschebichev, se determinó el número n de años de medición necesarios como
$$n \geq \left(\frac{z(p) \cdot \sigma}{\epsilon} \right)^2$$
, donde $Z(p)$ es el valor de la distribución de probabilidad t de Student con $n-1$ grados de libertad que establece en $1-p$ la probabilidad porcentual de que el valor de la media real se encuentre dentro del intervalo de confianza $(\bar{x} - Z(p) \cdot \sigma; \bar{x} + Z(p) \cdot \sigma)$ con

una media muestra \bar{x} calculada en n años.

- Con los n así obtenidos para cada valor de δ y p seleccionados, se interpolaron los valores de cada celda usando kriging, representándose espacialmente en un mapa de Argentina los valores de las isóneas correspondientes.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En las figuras 2 y 3 se muestran los años de medición que se necesitan para determinar los valores medios diarios de irradiación global a nivel de la superficie terrestre para enero y julio y la media diaria anual, admitiendo un error del 5% y un intervalo de confianza de 90%.

Con el objetivo de ejemplificar el crecimiento de los años necesarios de medición a medida que el error disminuye y el intervalo de confianza se incrementa, se muestran en las figuras 4 y 5, resultados anuales para errores del 10%, 5% y 3% y un intervalo de confianza del 95%.

En la figura 3 puede notarse que en algunos sitios (fundamentalmente la llanura pampeana) bastaría solamente un año de medición para caracterizar la media anual. En el resto del país sería necesario dos, con la salvedad de algunas zonas particularizadas claramente en el mapa. Este resultado es compatible con un trabajo anterior (Grossi Gallegos y Righini, 2011) basado en datos medidos de radiación solar.

La mayor extensión de esas zonas particulares se da en la región cordillerana patagónica y, eventualmente, en la región cordillerana de Cuyo. No está aún clara la causa del incremento en la cantidad de años necesarios, pero un motivo posible es que, quizá, el modelo SRB, usado en las estimaciones satelitales, presenta una dispersión de resultados sobre datos calculados en las zonas en cuestión debida a la presencia de albedos de suelo elevados, producto de la existencia de nieve o hielo en la superficie. Albedos altos en el suelo pueden dar lugar a errores en la mayoría de los modelos de estimaciones satelitales (Noia et al., 2009, I y II), por lo que no puede descartarse este efecto en el cálculo de la radiación solar que dicho modelo ejecuta, y que, por ende, la alta dispersión de los valores calculados por él explique el incremento de los años necesarios. También es de destacar que el modelo da lugar a errores de estimación más elevados a medida que la latitud crece (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?skip@larc.nasa.gov+s01+s06+s07#s06>).

Las figuras 2 y 3 muestran un incremento en la cantidad de años necesarios respecto a la media anual, tal como era esperable, ya que los valores medios mensuales en general presentan una dispersión mayor que los valores medios anuales. Entre ambos meses, julio es el que requiere de mayor número de años de medición, lo cual es razonable dado que la dispersión de los datos durante los meses de menor radiación es, porcentualmente, más importante que durante un mes de alta radiación como enero. Esto ocurre con todos los meses correspondientes al invierno.

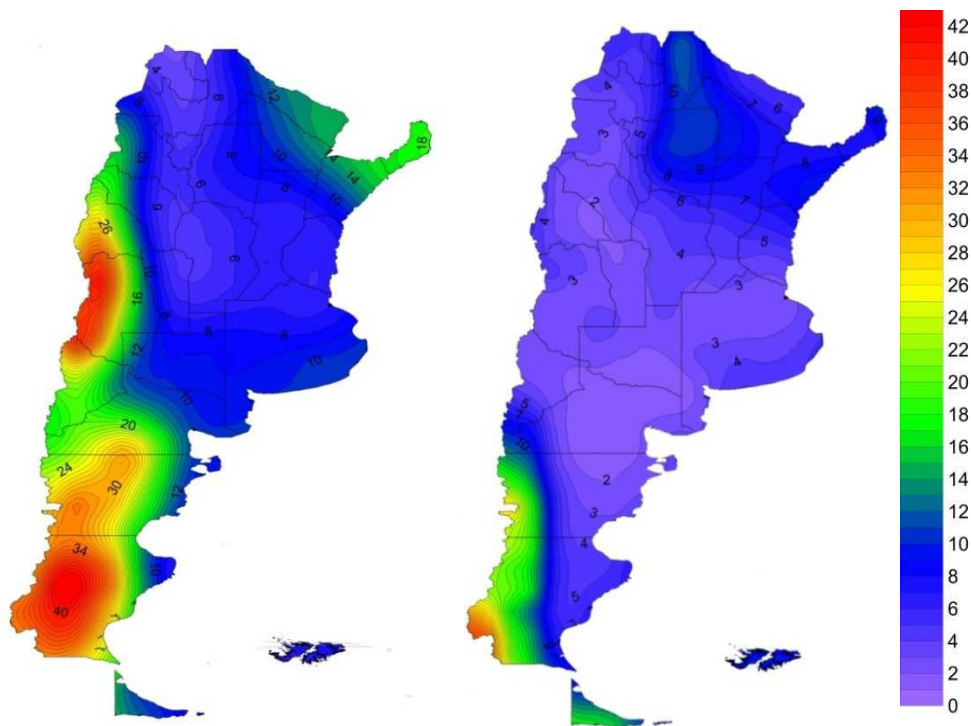


Fig.2: Mapas con error del 5% e intervalo de confianza 90%. Izquierda: Julio; derecha: Enero.

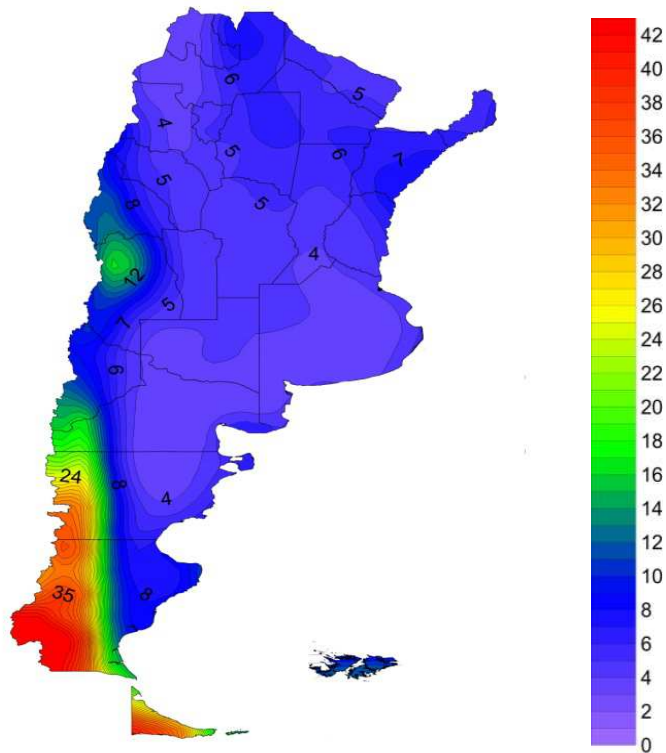


Fig. 3: Mapa anual, con error del 5% y nivel de confianza 90%.

Tabla 1: Número de años necesarios para que los valores medios no difieran de la media a largo plazo en más de un 6% con un intervalo de confianza del 90 %, calculados por Grossi Gallegos et al. en base a mediciones de la Red Solarimétrica.

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Cerrillos	4	7	12	6	8	8	9	9	8	5	7	7
San Miguel	4	8	12	7	29	23	6	10	11	13	8	3
Rafaela	3	7	7	10	8	14	9	7	11	13	8	3
Paraná	2	7	10	6	7	15	11	9	8	9	3	5
Córdoba	3	6	11	8	8	4	5	6	2	11	5	6

Tabla 2: Número de años necesarios para que los valores medios no difieran de la media a largo plazo en más de un 5% con un intervalo de confianza del 90 %, calculados en el presente artículo para los mismos sitios que evaluarán Grossi Gallegos et al., en base a estimaciones del algoritmo SRB. Los años han sido redondeados al número entero inmediatamente superior

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Cerrillos	6	6	5	4	3	3	2	4	3	6	10	8
San Miguel	2	10	11	10	9	16	7	9	7	10	8	6
Rafaela	5	8	11	12	8	18	7	10	9	9	6	7
Paraná	6	9	11	11	7	15	7	9	9	8	6	9
Córdoba	4	9	10	10	7	12	6	7	7	9	7	9

Nuevamente, tal como ocurrió en el caso anual, se diferencia en ambos meses, claramente, la zona patagónica como un área que requiere mayor cantidad de años de mediciones para que los valores medios difieran de los medios mensuales a largo plazo en menos del 5%. En esa zona se requieren valores superiores a los 20 años, en ambos meses, lo cual pone nuevamente de manifiesto la sospecha sobre la fiabilidad del modelo SRB en la Patagonia cordillerana. En ese sentido, además, puede verse el comportamiento de la zona de Cuyo, claramente diferente en verano e invierno. Durante el verano el comportamiento de la misma es similar al del resto del país mientras que en invierno, nuevamente se ve reflejada la tendencia a demandar mayor cantidad de años de medición, comportamiento que exhibía anualmente.

Los resultados para ambos meses fueron comparados con los hallados por Grossi Gallegos (Grossi Gallegos et al., 2013). En ese trabajo se analizaron las longitudes temporales de las series de datos de determinados sitios de Argentina con los mismos objetivos que en este artículo. Las tablas 1 y 2 siguientes muestran los resultados calculados por Grossi et al con datos medidos por la Red Solarimétrica, habiendo fijado el error en un 6% y el intervalo de confianza en un 90%, y los calculados en el presente artículo para esos sitios con datos estimados por NASA para un error del 5% y un intervalo de confianza del 90%.

Si bien en algunos casos hay coincidencias existen divergencias importantes en muchos otros. Esto puede deberse a causas diversas. En primer lugar Grossi et al. usaron el valor máximo medido en la serie de mediciones de cada sitio para determinar el máximo error admitido. En el presente trabajo se usó el valor medio para cada mes. Por otra parte, las series de datos empleadas corresponden a

períodos y extensiones diferentes, lo que puede explicar diferencias en las desviaciones de los datos.

En los mapas de las figuras 4 y 5 aparece claramente expuesto el hecho de que la cantidad de años se incrementa cuando el porcentaje de error máximo admitido disminuye y cuando el intervalo de confianza se hace más amplio. No obstante ese incremento, considerar un error del 3% en los desvíos de los valores medios anuales respecto a la media histórica a largo plazo, con un nivel de confianza del 95% implicaría medir alrededor de 8 años en la mayor parte del territorio nacional. La cantidad de años, obviamente es mayor para valores medios mensuales.

Con el fin de validar el método empleado se utilizó la base de datos de mediciones realizadas en la estación Luján. Con la cantidad de años necesarios determinados a partir de la dispersión obtenida de la serie estimada por el modelo SRB, asumiendo un error del 5% y un intervalo de confianza del 90%, se calcularon los promedios móviles de los datos medidos en los casos en que los años necesarios fuesen menores que la cantidad de años de mediciones en Luján. Se calculó la diferencia relativa porcentual entre los promedios móviles y el promedio del total de años medidos en la estación Luján. Los resultados alcanzados para los meses de Julio, Noviembre y Diciembre, muestran que la diferencia relativa entre la medias móviles y la media total es, en casi todos los casos, menor que el error del 5% establecido como límite para calcular la cantidad de años de medición. Esto corrobora, para Luján, la confiabilidad del método usado y el aserto de que la variabilidad del recurso solar se ve reflejada por las estimaciones del modelo SRB. En las tablas 3-5 se muestran resultados para los meses de Julio, Noviembre y Diciembre.

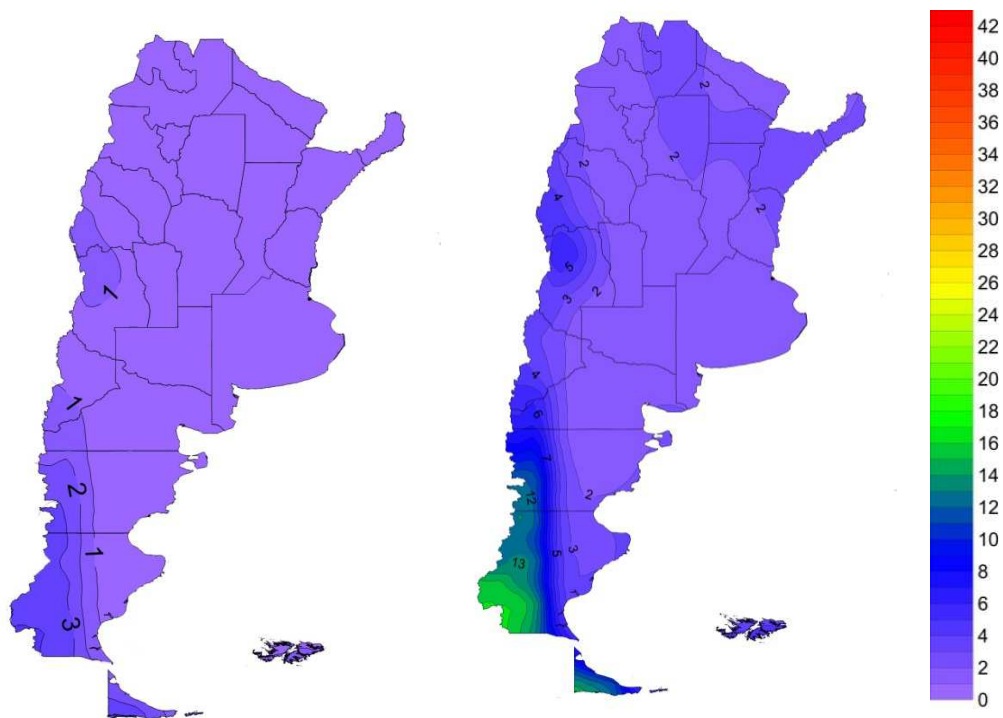


Fig. 4: Mapas anuales con nivel de confianza 95% y error del 10% (izquierda) y del 5% (derecha).

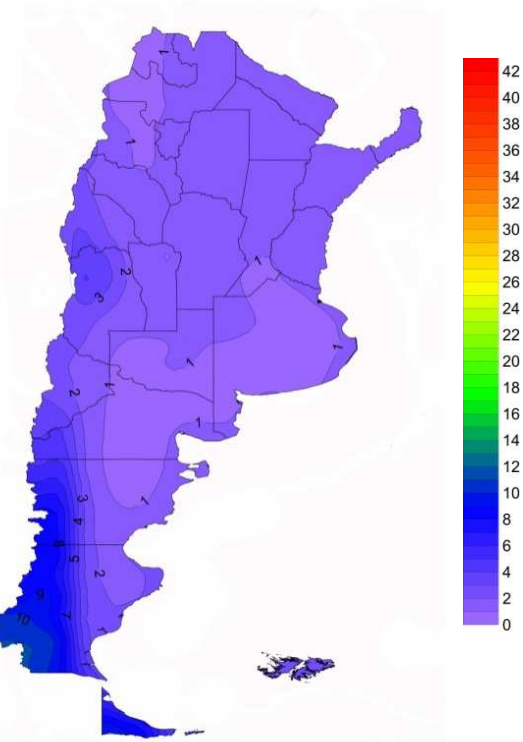


Fig:5: Mapa anual con un nivel de confianza 95% y error del 3%

Tabla 3: Promedios móviles de radiación en la estación Luján, y desvíos porcentuales relativos al promedio de toda la serie, calculados con valores medidos en tierra y la cantidad de años determinados en base al análisis de dispersión de datos provenientes del modelo SRB. Mes de Julio.

Promedios (MJ/m ²)	8,99	9,00	8,37	8,17	8,14	8,59	8,93	9,44
Desvío (%)	3,30	3,46	-3,87	-6,17	-6,50	-1,33	2,63	8,48

Tabla 4: Promedios móviles de radiación en la estación Luján, y desvíos porcentuales relativos al promedio de toda la serie, calculados con valores medidos en tierra y la cantidad de años determinados en base al análisis de dispersión de datos provenientes del modelo SRB. Mes de Noviembre.

Promedios (MJ/m ²)	23,92	23,89	24,52	23,86	23,83	23,97	24,14	24,05
Desvío (%)	-0,41	-0,55	2,07	-0,69	-0,82	-0,20	0,48	0,13

Tablas 5: Promedios móviles de radiación en la estación Luján, y desvíos porcentuales relativos al promedio de toda la serie, calculados con valores medidos en tierra y la cantidad de años determinados en base al análisis de dispersión de datos provenientes del modelo SRB. Mes de Diciembre.

Promedios (MJ/m ²)	26,92	26,43	26,48	25,78	25,41	26,10	26,42	26,56
Desvío (%)	1,90	0,06	0,24	-2,41	-3,80	-1,21	0,00	0,54

5. CONCLUSIONES

El análisis de valores diarios de radiación media mensual y anual, calculados por el algoritmo SRB que estima la radiación solar en base a imágenes satelitales, permite calcular la cantidad de años necesarios de medición para determinar los niveles medios de radiación solar en la superficie terrestre solar con un valor que difiera de la media histórica a largo plazo en un valor menor que un porcentaje dado dentro de un intervalo de confianza preestablecido. Las características de homogeneidad espacial del campo de radiación posibilitan emplear un método geoestadístico, como el kriging para interpolar los datos, dando lugar a mapas que grafican las isolíneas de años necesarios.

Esta información resulta especialmente valiosa para el dimensionamiento, el análisis de la factibilidad económica y la estimación del potencial rendimiento de sistemas de aprovechamiento energético que empleen la radiación solar como fuente de energía y sus valores diarios medios mensuales y anuales como estimadores del recurso disponible.

Conocer, por lo tanto, la cantidad de años requeridos para contar con datos que reflejen adecuadamente los valores medios de radiación solar es un paso preliminar fundamental en vista a la instalación de dichos sistemas y a la planificación de las redes de medición que habrán de evaluar la radiación solar. Analizando en particular la base de datos medidos en la estación Luján, el procedimiento empleado utilizando las dispersiones calculadas a partir del modelo SRB, se muestra como adecuado para estimar la cantidad

mínima de años de medición requeridos para determinar un valor medio de radiación que caracterice una determinada zona y no difiera de la media histórica en más de un nivel de incertidumbre preestablecido. La cantidad de años de medición necesarios que aparecen en la zona cordillerana patagónica y cuyana exige un análisis más cuidadoso y tal vez refleje los errores del modelo SRB asociados a suelos con albedos altos debido a presencia de nieve o hielo. Esta presunción debe ser corroborada con un análisis más profundo del modelo en cuestión y mediciones con equipos instalados en tierra durante una cantidad suficiente de años que permitan dar cuenta de los desvíos de los valores medios, tanto mensuales como anuales. En particular puede verse la relativamente rápida convergencia de los valores medios anuales. En efecto, bastan pocos años para evaluar la media anual en la mayoría del territorio nacional, aún con errores máximos admitidos que pueden hallarse alrededor del 3%, característico de equipos de medición de primera clase.

REFERENCIAS

- Aristegui, R. y Righini R. (2012). Discusión sobre el proceso de selección de sitios apropiados para la ubicación de estaciones de una futura red solarimétrica nacional. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, **16**, 11.39-11.46. ISSN 0329-5184.
- Grossi Gallegos, H., Nollmann, I., Lopardo, R. y Atienza, G. (1983). Evaluación preliminar del recurso solar en Argentina. *Actas de la 8a. Reunión de Trabajo de la ASADES*, pp. 179-194, Santa Rosa, La Pampa, Argentina.
- Grossi Gallegos, H. y Atienza, G. (1988). Acerca de la representatividad temporal de los valores de radiación

- solar global medidos por la Red Solarimétrica. *Actas de la 12a. Reunión de Trabajo de la ASADES*, **1**, 101-106, Salta, Argentina.
- Grossi Gallegos, H, *Tesis Doctoral*. Universidad Nacional de Luján, (1997). 119 pp.
- Grossi Gallegos H. (1998). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. I. Análisis de la información. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **4**, 119-123.
- Grossi Gallegos H. (1998). Distribución de la radiación solar global en la República Argentina. II. Cartas de radiación. *Energías Renovables y Medio Ambiente*, **5**, 33-42.
- Grossi Gallegos H. y Righini R. (2007). *Atlas de energía solar de la República Argentina*. Publicado por la Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología, Buenos Aires, Argentina, 74 páginas + 1 CD-ROM, mayo de 2007 (ISBN 978-987-9285-36-7), Registro de la Propiedad Intelectual No. 554247 del 15 de marzo de 2007.
- Grossi Gallegos H.y Righini R. (2011) Acerca de la representatividad de los valores de radiación solar global medidos por la red solarimétrica en la Pampa Húmeda. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **15**, 11.33-11.40. ISSN 0329-5184.