

ANÁLISIS DE LAS SERIES TEMPORALES DE IRRADIACIÓN SOLAR GLOBAL EN VISTA DE LA UTILIZACIÓN DEL SOL COMO UNA FUENTE DE ENERGÍA

Hugo Grossi Gallegos¹, Eduardo Coquet² y María Isabel Spreafichi³

1. Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Nacional de Luján, Int. Rutas 5 y 7
(6700) Luján, Buenos Aires, ARGENTINA, hugogrossi.1@gmail.com

2. PSL, Castelar, 1712 Buenos Aires, ARGENTINA

3. Servicio Meteorológico Nacional, Buenos Aires ARGENTINA

Recibido: 10-02-2014; Aceptado: 07-04-2014.

RESUMEN.- Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para el tiempo de convergencia necesario para que los promedios anuales de la irradiación solar global no difieran en más del error instrumental del valor a largo plazo en una estación de la ex-Red Solarimétrica, se encaró una tarea similar pero referida a los promedios mensuales. Se analizaron para ello las anomalías calculadas en las series temporales de los valores promedio propias de cada mes y se buscó su convergencia. Para poder hacerlo, se estudió previamente la posible presencia de tendencias en las series. Se tomaron luego otras 4 estaciones con suficientes datos y se repitió el procedimiento con el propósito de generalizar los resultados.

Palabras claves: irradiación global, series temporales, promedios anuales, promedios mensuales, variabilidad, convergencia.

ANALYSIS OF TIMES SERIES OF SOLAR GLOBAL IRRADIATION IN VIEW OF THE UTILIZATION OF SUN AS AN ENERGY SOURCE

ABSTRACT.- Considering the results obtained for the convergence time required for the annual averages of global solar irradiation does not differ by more than instrumental error of the long-term value in a station of the former Red Solarimetrica, a similar task was faced but referring to the monthly averages. Were analyzed for this purpose anomalies calculated in the time series of monthly averages and its convergence is sought. To do this, was study previously the possible presence of trends in the series. Other 4 stations with sufficient data were then taken and the procedure was repeated in order to generalize the results.

Key words: global irradiation, time series, annual means, monthly means, variability, convergence.

1. INTRODUCCIÓN

El estudio de la posible variación de los valores de radiación solar sobre la superficie de la tierra se ha intensificado en los últimos años con el fin de poder atribuirle modificaciones en el balance radiativo y de ahí, efectos de cambios en el clima. Al margen de su influencia climática, los efectos directos de posibles variaciones en la cantidad de radiación global recibida en la superficie terrestre serían de considerable importancia debido a que es ella la que provee de energía para la fotosíntesis y la evapotranspiración, por lo que cualquier cambio significativo podría influir sobre las fuentes de agua y alimentos del hombre.

En los últimos años adquirió marcada importancia a nivel mundial la generación de energía eléctrica por medios no convencionales. En Argentina, además de la decisión del Estado Nacional de participar activamente en estas tareas, la desregulación del mercado ha determinado que tanto empresas privadas como gobiernos provinciales hayan

decidido incorporarse a la generación fotovoltaica de potencia; esto ha dado lugar a una creciente demanda de información detallada que permita conocer los mejores sitios de instalación de las centrales fotovoltaicas y su potencial rendimiento, con vistas a mejorar su oferta energética y negociar por anticipado el costo de la energía generada.

En lo que respecta la utilización de la energía solar, la provincia de San Juan lleva alguna ventaja considerando las centrales fotovoltaicas en operación: la planta piloto de 1,2 MWp instalada por Energía Provincial Sociedad del Estado (EPSE) en Ullúm, y los algo más de 7 MWp (con potencia final proyectada de 20 MWp) del Parque Solar Cañada Honda, Departamento de Sarmiento, propiedad de 360 Energy (inicialmente, EMGASUD). Una planta similar a esta última se instalaría también en Ullúm por cuenta de una sociedad conformada por Energía Argentina SA (ENARSA), la EPSE y la firma china Sky Solar.

Recientemente, Servicios Energéticos del Chaco - Empresa del Estado Provincial (SECHEEP), en conjunto con la Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico

(*)Personal CONICET

(CAMESA) y la firma UCSA anunciaron el desarrollo de un proyecto para la construcción de una central fotovoltaica para instalar en la ciudad de Quilipi y que proveería en una primera etapa 10 MW al sistema eléctrico provincial.

Si bien se tiene un conocimiento razonablemente aproximado de la distribución del recurso solar en Argentina (Grossi Gallegos, 1998), el dimensionamiento apropiado de estas centrales se ve afectado por la ausencia de series temporales lo suficientemente extensas y de incerteza conocida. Durante el tiempo que operó la Red Solarimétrica, cuyos datos permitieron el trazado de las cartas de radiación elaboradas en el trabajo citado, generó información con la que se calcularon los promedios en una veintena de localidades sobre bases de diferente extensión y, por lo tanto, representatividad.

El Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar-UNLu), por contrato con la empresa EMGASUD en junio de 2009, procesó los datos diarios que la ex-Red Solarimétrica registró en San Juan entre 1981 y 1985. En base a ellos, estimó que anualmente se recolectarían en promedio sobre un plano horizontal $2,1 \text{ MWh/m}^2$ con una incerteza de 6% ($2,06 \pm 0,12$). Lo medido por la empresa explotadora actual, desde julio de 2012 a junio de 2013 (1 año), fueron $1,95 \text{ MWh/m}^2$ (inferior en 5,4% a lo estimado).

Por otra parte, utilizando un modelo isotrópico para la distribución de la radiación difusa, el GERSolar estimó que sobre un plano inclinado $26,86^\circ$ se recibirían $2,24 \text{ MWh/m}^2$ con una incerteza no inferior al 10%, mientras que lo medido por la empresa durante ese mismo período sobre un ángulo de 28° fueron $2,22 \text{ MWh/m}^2$ (inferior a 0,72% de lo estimado).

En vista de estos resultados, el propósito de este trabajo es sistematizar el análisis de las bases de datos existentes a fin de sacar conclusiones, tanto a nivel anual como mensual, que permitan tomar decisiones acerca de sus valores medios en relación a los resultados esperables como consecuencia de la instalación de una planta de generación solar diseñada en base a ellos.

2. ANTECEDENTES

Motivados por el hecho de que la mayoría de los trabajos publicados se reducían al estudio de la variabilidad temporal en la radiación global sobre plano horizontal, Gueymard y Wilcox (2009) se decidieron a encarar con una adecuada resolución espacial la problemática de la componente directa ya que en los Estados Unidos de Norteamérica sólo en 4 estaciones bien mantenidas y con calidad controlada se registran datos de radiación global y directa con una extensión mayor de 25 años.

Un importante descubrimiento en la fase preliminar del estudio mostró que los promedios anuales a largo plazo de la radiación global sobre plano horizontal podían ser estimados dentro de una incerteza de $\pm 5\%$ con sólo 1 o 2 años de mediciones locales (lo cual tiene su riesgo ya que, si el recurso se desconoce, se puede llegar a medir en un año atípico y tomar su valor como valedero dentro de este valor de incerteza).

Interesados en estos resultados, Grossi Gallegos y Righini (2011) estudiaron la serie de promedios anuales de la irradiación global diaria en una estación como Paraná,

ubicada en una región homogénea en la que descartaron previamente la variabilidad secular; la irradiación solar global diaria comenzó a medirse en la estación de la Red Solarimétrica ubicada en el INTA de Paraná ($31,83^\circ\text{S}$; $60,52^\circ\text{W}$, 78 msnm) en diciembre de 1978 mediante un solarímetro fotovoltaico Rho Sigma modelo 1008 y un integrador SIDCON modelo 5011; el error de medición de este tipo de estaciones es del 6%.

Para esta estación observaron que un promedio diario anual calculado sobre cinco años estaba por debajo del error instrumental. Por lo tanto, se afirmaba en dicho trabajo que para tener información sobre el promedio anual del valor de la irradiación global diaria con una incerteza inferior al error instrumental podría bastar con medir un par de años. Teniendo en cuenta el elevado costo de instalar y mantener en operación una estación de medición, el conocer la variabilidad del recurso se hace importante cuando hay que decidir cuánto tiempo debe medirse en una localidad determinada. Por supuesto, destacaron que la conclusión de su análisis se refería al promedio anual y, como ya mostró Grossi Gallegos (1998), no era válida para una escala mensual.

En consecuencia, se estudian aquí en primer lugar las series de promedios mensuales de la irradiación solar global diaria registrados en Paraná sobre plano horizontal para analizar su variabilidad temporal y, en base a ella, proponer los plazos necesarios (tiempo de convergencia, T_{conv}) para determinar el potencial solar con fines energéticos dentro de niveles de confiabilidad prefijados. A continuación, se consideran otras 4 estaciones que presentan series de longitud adecuada para aplicar esta metodología.

3. MATERIALES Y MÉTODO

a) Caso Paraná ($31^\circ 50' \text{S}$; $60^\circ 31' \text{W}$; 110 msnm)

Se consideraron las series de promedios mensuales de irradiación solar global diaria colectados en la estación INTA Paraná entre enero de 1983 y diciembre de 2012, reteniendo aquellos meses en los cuales no faltaban más de 3 datos diarios (completitud de 10%). Si bien el instrumental no fue calibrado a lo largo de este tiempo, en trabajos anteriores (Grossi Gallegos y Righini, 2011; Grossi Gallegos y Spreafichi, 2011) se incluyó una comparación entre los valores adquiridos por esta estación y una más precisa instalada el 18 de mayo del año 2010 por el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján (UNLu), la que habilitó a suponer que no había tenido variación, dentro de los límites de incerteza de los equipos utilizados. Por otra parte, los valores diarios habían sido previamente consistidos en base a su correlación lineal con la heliofanía relativa dentro de determinado nivel de confianza (Roberti et al., 2000).

Una forma interesante de visualizar los años de medición (i) necesarios para asegurar que el promedio determinado en base a ellos (H_i) no difiere de la media a largo plazo (H_M) en más del nivel de incerteza del instrumental con que fueron adquiridos los datos (en este caso, 6%) es el análisis temporal de la anomalía relativa. Este parámetro puede definirse porcentualmente como sigue:

$$AR(\%) = 100 * (H_i - H_M) / H_M \quad (1)$$

Como un ensayo previo, y dado que la serie temporal de los promedios anuales no mostró tendencia (Grossi Gallegos y

Spreafichi, 2011), se decidió aplicar esta metodología a esta muestra. Se pueden agrupar así dichos valores en número variable a partir de 2 hasta el máximo disponible a partir de cualquier año, siguiendo la secuencia en que fueron obtenidos. En este caso, se comenzó a calcularlos a partir del año 1983 y se continuó el procedimiento hasta el año 2012 inclusive.

A partir de las 30 medias anuales consideradas se obtuvieron 29 promedios bianuales (tomados en años consecutivos), 28 trianuales y así siguiendo, hasta llegar al valor promedio de los 30 años disponibles (H_M); se calcularon luego las correspondientes anomalías relativas y sus valores medios. Se utilizó Access para la administración y manejo de las bases de datos, Excel para tablas, gráficos y estadística y Visual Basic para el procesamiento y manejo matricial, generando una matriz triangular de 30x30 en donde se ubicaron los promedios mencionados (465 promedios, con valores nulos en la mitad inferior), y posteriormente otra matriz similar con los valores de las anomalías relativas. Finalmente, se ubicaron para cada agrupamiento los valores máximo y mínimo hallados y su valor medio.

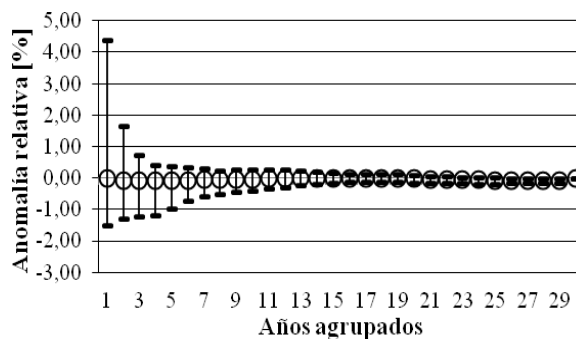


Fig. 1: Variación de la anomalía relativa porcentual de los promedios anuales de la irradiación global diaria en función del número de años consecutivos agrupados, acompañados por barras acotadas por los valores máximos y mínimos.

En la figura 1 se presentan los valores promedio de las anomalías relativas en función del número de años agrupados, acompañados por barras acotadas por los valores máximos y mínimos que encierran todos los valores posibles hallados. En este primer análisis se puede observar que en Paraná ninguno de los valores de la irradiación global diaria media anual calculados en base a un solo año de datos (abscisa 1), difiere en más del error instrumental del promedio general calculado en base a los 30 años considerados.

El coeficiente de variabilidad C_v , definido como el cociente entre el desvío estándar y el promedio general, para el caso de los valores anuales toma el valor 0,96%; ampliando el nivel de confianza al 95% (esto es, multiplicando por un $Z=1,96$) $C_v=1,88\%$, ambos muy por debajo del error instrumental.

Para poder aplicar el mismo procedimiento a las series de valores de irradiación global diaria media mensual es necesario analizar el comportamiento de estas series temporales ya que, de no existir tendencia, permitiría aplicar la promediación agrupada en cualquier tramo de la serie, sin perder representatividad. Para ello, se utilizó el test de Mann-Kendall reformulado por Kendall (1961) que ya fuera

usado anteriormente en trabajos similares (Grossi Gallegos y Spreafichi, 2010). Se aplicó como condición adicional la de eliminar de las series temporales todos aquellos valores que quedaban afuera de un intervalo de confianza de $\pm 1,96\sigma$ (compatible con el nivel de significancia del test a aplicar); este intervalo fue ampliado teniendo en cuenta la incerteza de medición ($\pm 6\%$). Por lo tanto, quedaron afuera aquellos valores posibles, pero poco probables, como diciembre de 1984, agosto de 1986 y febrero de 1990.

En la Tabla 1 se presenta un resumen del análisis de tendencia de los diferentes meses, incluyendo el nivel de probabilidad y nivel de significancia.

Tabla 1: Resumen de los resultados de la aplicación del test de Mann-Kendall a las series de valores de irradiación global diaria media mensual.

Mes	Valid N	p-level	Significancia
ENE	29	0.970	NS
FEB	28	0.179	NS
MAR	29	0.398	NS
ABR	30	0.872	NS
MAY	30	0.464	NS
JUN	30	0.817	NS
JUL	30	0.422	NS
AGO	29	0.866	NS
SET	30	0.532	NS
OCT	29	0.216	NS
NOV	30	0.844	NS
DIC	28	0.968	NS
PROM	25	0.607	NS

Todas las pendientes resultaron no significativas (NS) a un nivel de significancia del 5% (es decir, la probabilidad de que las pendientes no sean nulas es menor que 0,05). En las figuras 2a, 2b, 2c y 2d se presentan las series correspondientes a los promedios mensuales de cada mes en el período que va de 1983 a 2012, en las que se trazaron las rectas de tendencia calculadas por cuadrados mínimos.

Descartada entonces la presencia de tendencias en las series históricas de promedios mensuales en la estación Paraná se procedió a aplicar nuevamente el programa preparado para generar las matrices con los promedios agrupados y con las anomalías relativas, obteniéndose así 12 cuadros con 465 promedios agrupados y otros 12 con sus anomalías.

En la figura 3 se muestran los resultados obtenidos para algunos meses característicos. Se puede notar en ellas la marcada convergencia de las barras acotadas que dan cuenta de los posibles valores que pueden tomar los promedios agrupados al cabo de pocos años para ser inferiores al 6% (incerteza instrumental); sin embargo, se observaron valores muy elevados en las anomalías de los primeros años (hasta un 40% en diciembre). Si se fija como condición que ambas cotas (correspondientes a los valores máximos y mínimos) sean inferiores en módulo al 6%, se determina así de los gráficos el número de años agrupados (tiempo de convergencia T_{conv}) a partir de los cuales se cumple tal exigencia (valor de la abscisa).

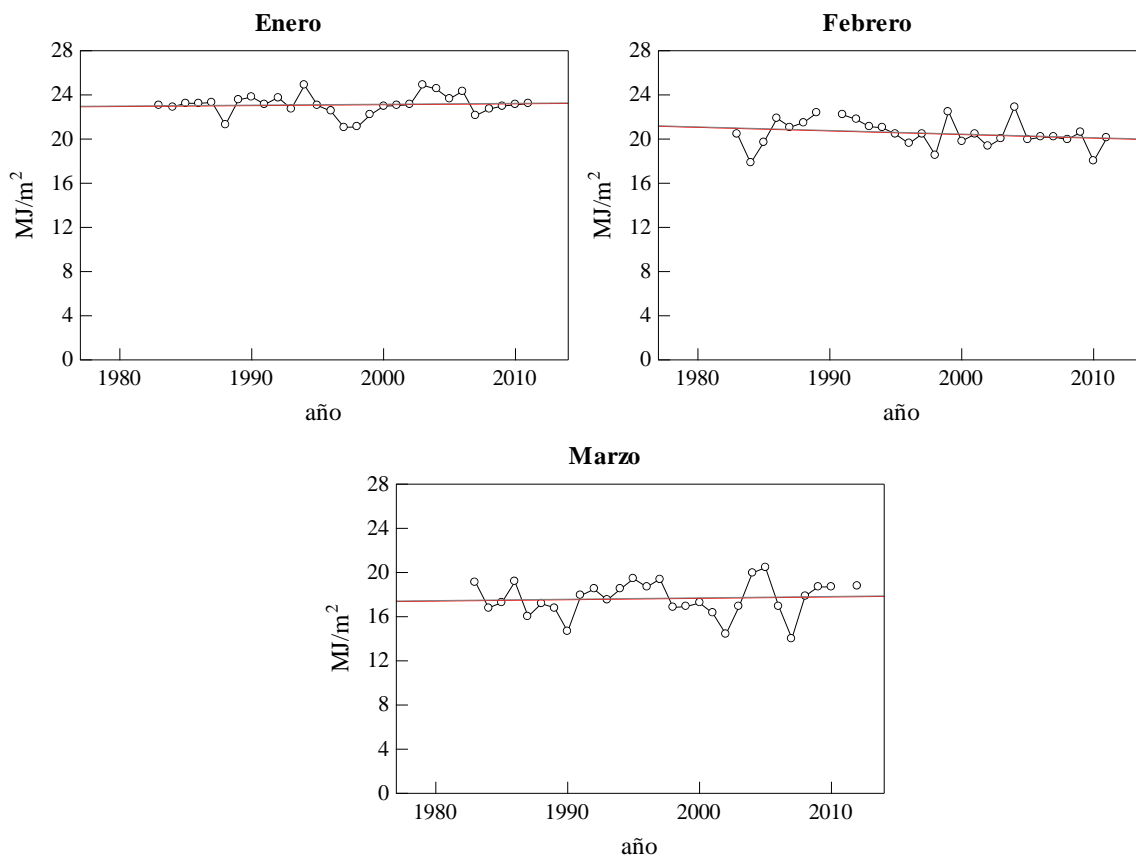


Fig. 2a: Evolución de la irradiación global mensual en Paraná INTA a lo largo del período 1983-2012 (enero, febrero y marzo).

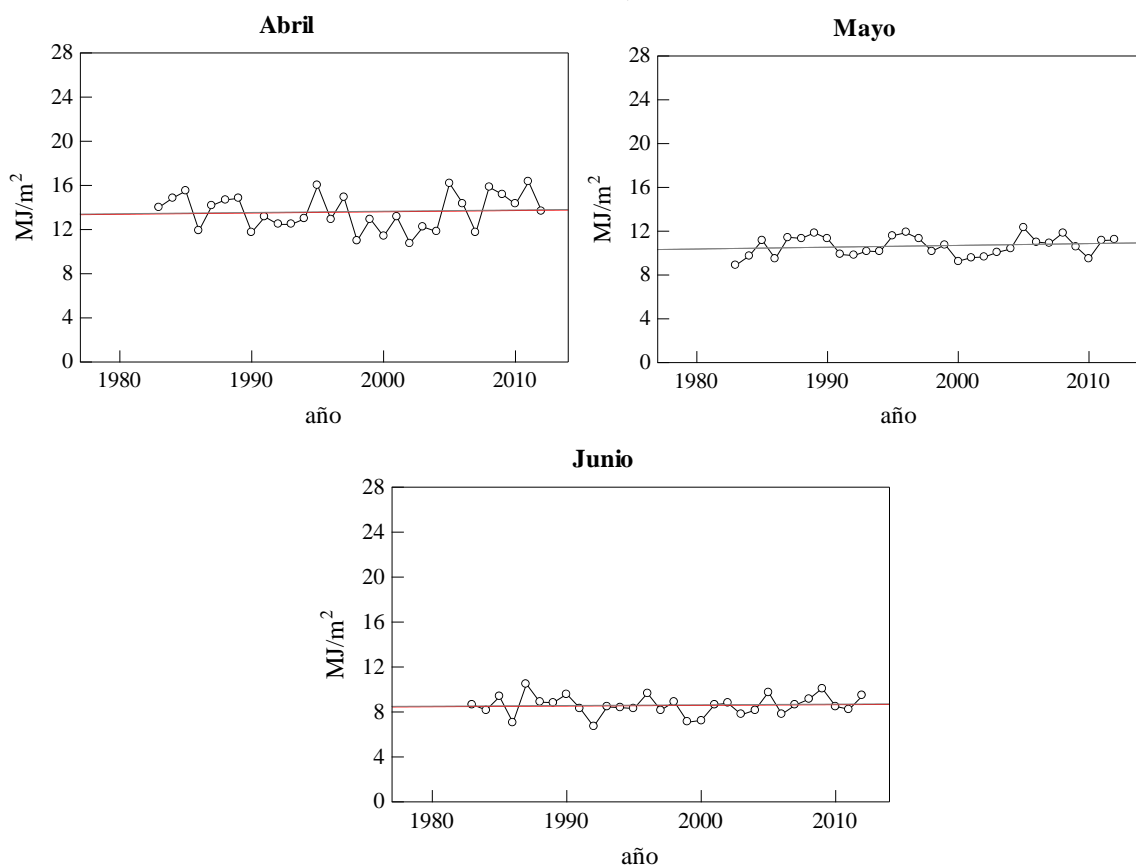


Fig. 2b: Evolución de la irradiación global mensual en Paraná INTA a lo largo del período 1983-2012 (abril, mayo y junio).

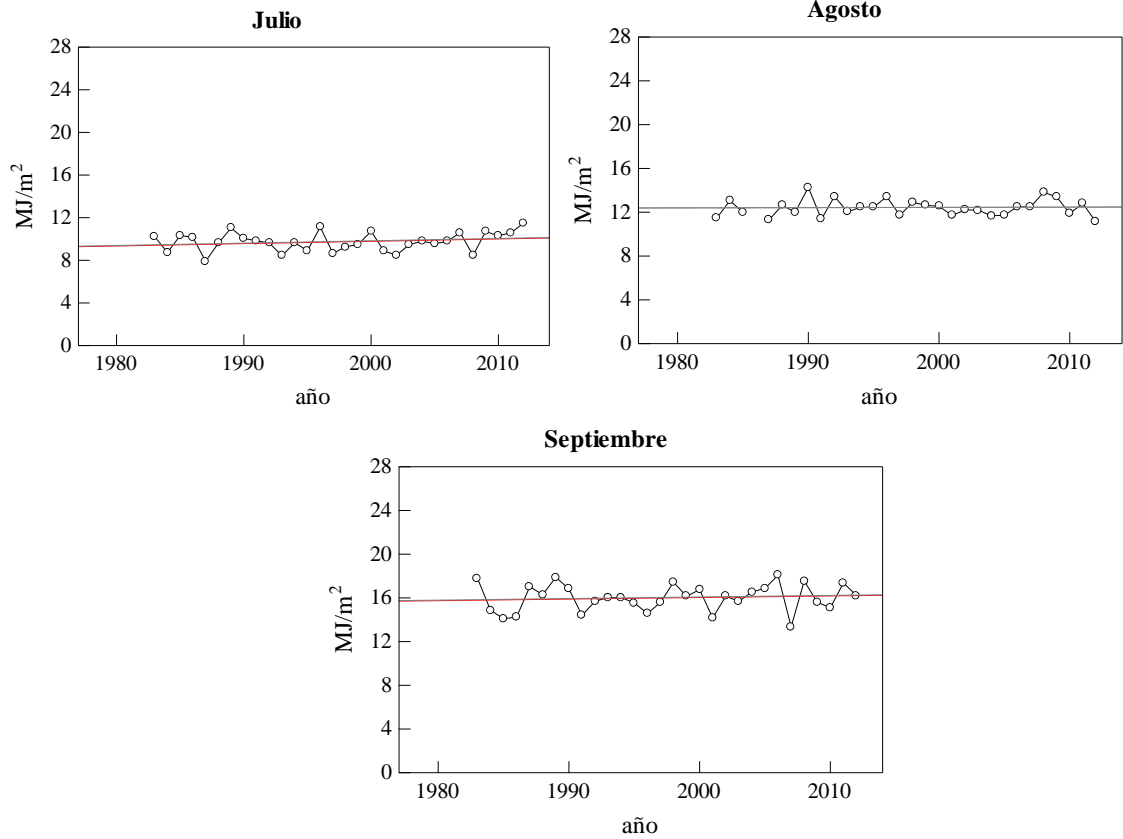


Figura 2c: Evolución de la irradiación global mensual en Paraná INTA a lo largo del período 1983-2012 (julio, agosto y septiembre).

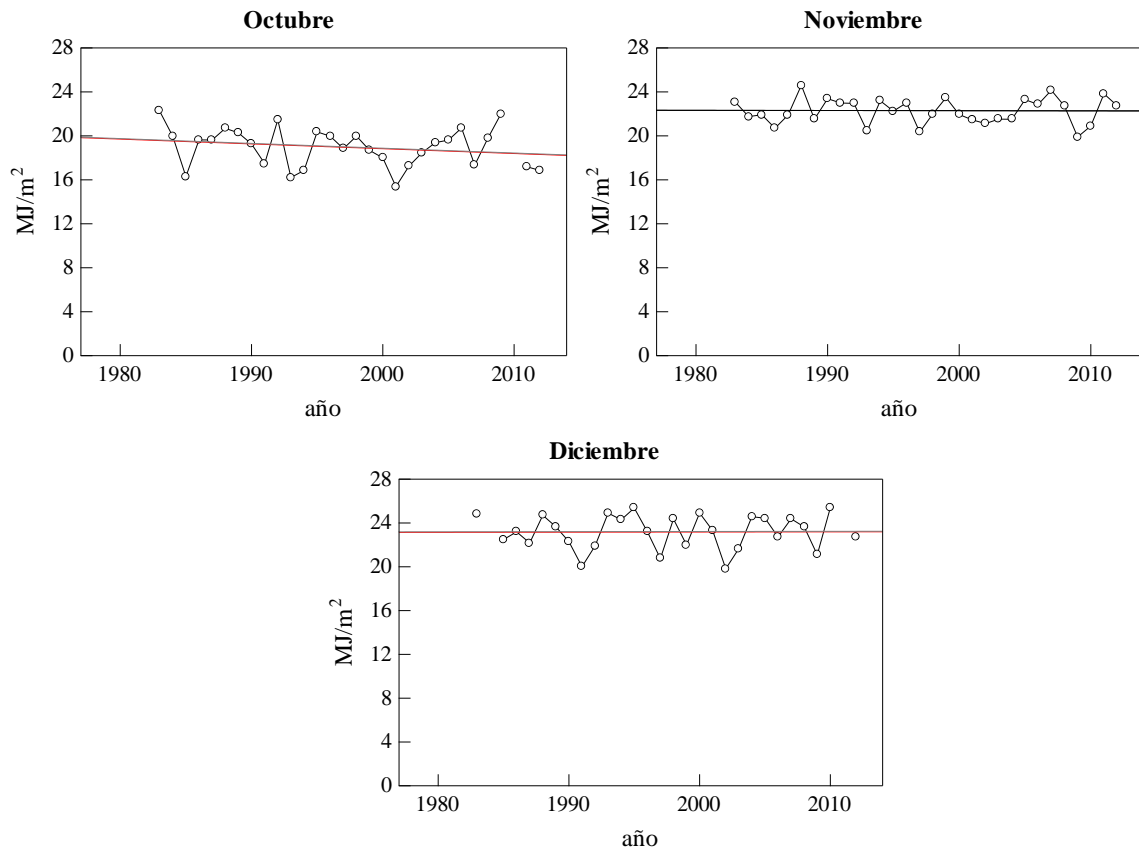


Fig. 2d: Evolución de la irradiación global mensual en Paraná INTA a lo largo del período 1983-2012 (octubre, noviembre y diciembre).

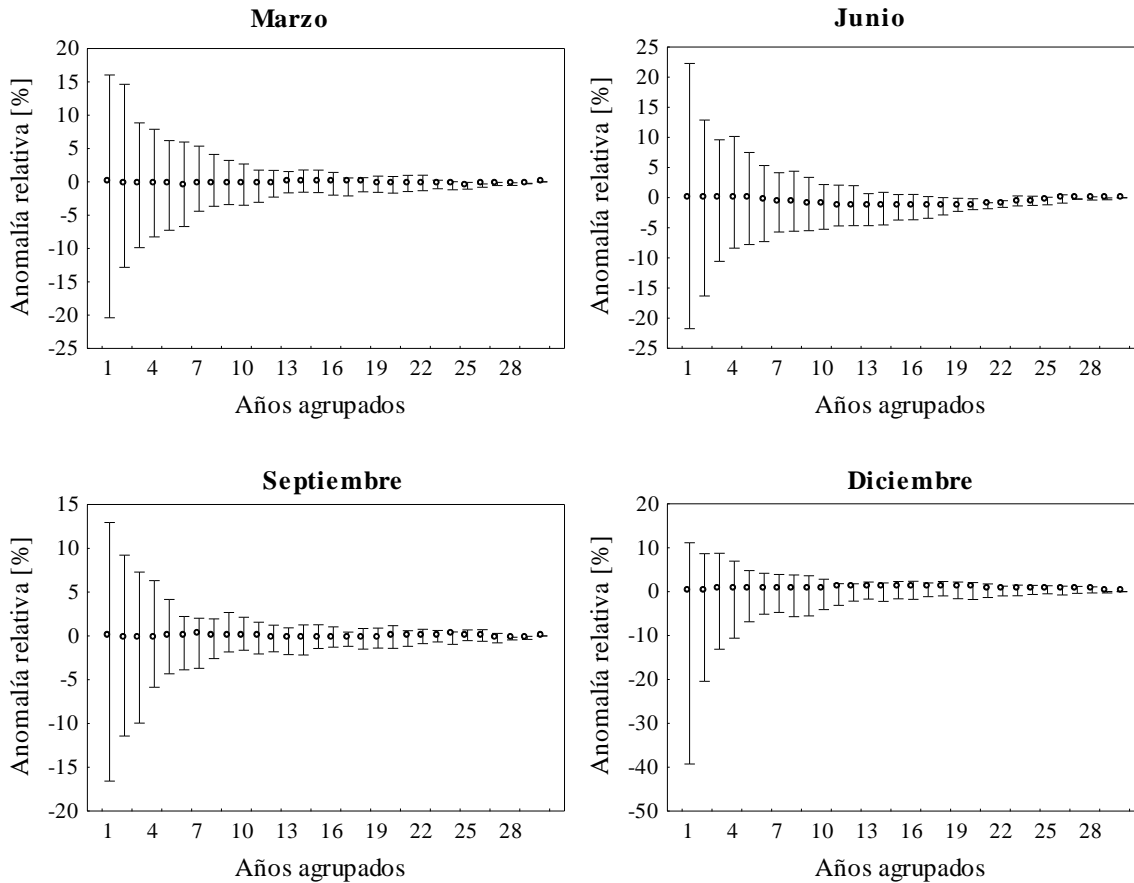


Fig. 3: Variación temporal de las anomalías relativas en función del número de años agrupados para la estación Paraná para los meses de marzo, junio, septiembre y diciembre

b) *Caso Rafaela (Santa Fe): (31°17'S; 61°33'W; 100 msnm)*
 Se consideraron las series de promedios mensuales de irradiación solar global diaria colectados en la estación INTA Rafaela entre enero de 1979 y diciembre de 1996, reteniendo aquellos meses en los cuales no faltaban más de 3 datos diarios (completitud de 10%).

Si bien el instrumental no fue calibrado a lo largo de estos años los valores diarios habían sido consistidos en base una depuración previa y a su correlación lineal con la heliofanía relativa dentro de un determinado nivel de confianza fijado por la Red Solarimétrica, como ya se dijera antes.

La tendencia de la serie de 17 valores anuales resultó levemente creciente a un nivel de significancia del 5% ($p\text{-level}= 0,013$), pero resulta enmascarada por el error de medición de 6%. El coeficiente de variabilidad Cv para los valores anuales es de 4,0% (inferior a la incerteza instrumental); pero ampliando el nivel de confianza al 95% (esto es, multiplicando por un $Z=1,96$) $Cv= 7,8\%$.

Se repitió entonces el procedimiento seguido en la estación Paraná y se calcularon las correspondientes anomalías relativas y sus promedios.

c) *Caso Córdoba (Córdoba): (31°26'S; 64°W; 438 msnm)*
 Se procedió de manera similar en la selección de las series de datos, analizando los valores mensuales desde enero de 1985 hasta diciembre de 2000. En esta estación no se dispuso de información simultánea de heliofanía, por lo que

se la “autoconsistió” eliminando de las series temporales todos aquellos valores que quedaban afuera de un intervalo de confianza de $\pm 1,96\sigma$ del valor medio (compatible con el nivel de significancia del test a aplicar); este intervalo fue ampliado teniendo en cuenta la incerteza de medición ($\pm 5\%$). Solamente se encontraron 2 valores del año 2000 en esas condiciones por lo que se optó por no tenerlo en cuenta por completo y retener 14 años.

El coeficiente de variabilidad Cv para los valores anuales es de 3,0% (inferior a la incerteza instrumental, en este caso del 5% porque el piranómetro utilizado era un Eppley 8-48 Black and White); pero ampliando el nivel de confianza al 95% resulta $Cv= 6,0\%$.

d) *Caso Cerro Azul (Misiones): (27°39'S; 55°26'W; 283 msnm)*
 Si bien se disponía de 10 años de datos diarios de irradiación global (1980-2000), la pérdida de algunos valores obligó a la eliminación de algunos meses incompletos y, de ahí, a analizar una serie discontinua de sólo 6 años que cumplían las condiciones de completitud impuestas (1980, 1982, 1984, 1998, 1999, 2000).

Para poder aplicar el mismo procedimiento a esta serie de valores de irradiación global diaria media mensual es necesario analizar su comportamiento temporal ya que, de no existir tendencia, permitiría aplicar la promediación agrupada en cualquier tramo de la misma, sin perder representatividad.

Como el reducido número de valores no permitía la aplicación del test de Mann-Kendall se tuvo en cuenta el comportamiento de la serie de promedios de heliofanía de Posadas (27.37°S; 55.97°W) analizada por Grossi Gallegos y Spreafichi (2010). Si bien existen diferencias entre ambas estaciones, se supone que la no significancia del apartamiento de la nulidad de la pendiente de los 29 años de esta localidad podría hacerse extensiva a Cerro Azul.

Suponiendo entonces que no existe tendencia en la serie temporal, se aplicó la misma metodología y se encontró que el coeficiente de variabilidad Cv para los valores anuales es de 4,0% (inferior a la incerteza instrumental); pero ampliando el nivel de confianza al 95% resulta Cv= 8,0%.

e) Caso San Miguel (Buenos Aires): (34°33' S; 58°44' W; 26 msnm)

El caso de esta estación es el más lamentable porque, de los 30 años en los que se midió, al aplicárseles los criterios de consistencia y completitud sólo pudieron ser rescatados 5. Los cambios de dependencia de la estación (el personal técnico que la operaba dejó de pertenecer a la Comisión Nacional de Investigaciones-CNIE, disuelta, pasó a depender del Servicio Meteorológico Nacional-SMN) y del grupo de trabajo (antes de la disolución de la CNIE pasó a revistar "en comisión" en el INTA Castelar y luego regresó a San Miguel, dependiendo entonces del SMN) generó interrupciones en los registros y cambios en la modalidad de trabajo, alternándose mediciones de rutina, calibraciones y ensayo de instrumentos.

La metodología seguida fue similar a Cerro Azul, con la diferencia que la serie de heliofanía analizada correspondía a la misma estación. En el trabajo ya citado se encontró que, aplicando el test de Mann-Kendall a esta serie de promedios anuales de heliofanía de 1957 a 2005, la pendiente hallada fue levemente negativa, pero la tendencia resultó no significativa al 5%. Por lo tanto, esto permite tomar cualquier intervalo de la serie y aplicar la metodología planteada.

4. RESULTADOS

a) Paraná

Analizando el comportamiento de la anomalía en los diferentes meses del año para determinar el tiempo de convergencia apareció una marcada discontinuidad en el mes de abril que obligó a su análisis detallado.

Dada esta circunstancia, en primer lugar se analizó el comportamiento simultáneo de la heliofanía efectiva para todos los meses de abril para ver si se encontraba algún indicio de falla instrumental. Pero la correlación de Ångström-Prescott resultó lineal, con un coeficiente de determinación de 0,818, pendiente de 0,536 y ordenada en el origen de 0,214. Por lo tanto, ambas variables guardaron un

comportamiento similar y deberían ser afectadas de la misma forma por otros factores.

Al analizar otros parámetros meteorológicos asociados se encontró que la precipitación registró en el mes de abril, entre los años 1999 y 2004, valores muy elevados, alcanzando en el 2000 a cuadruplicar la media histórica (fenómeno que ya fuera mencionado por Grossi Gallegos y Spreafichi (2007), con centros registrados en Paraná (estaciones Aero e INTA) y en Gualeguaychú).

Se tomó entonces una muestra parcial de 15 años (desde 1983 hasta 1997) evitando de esta manera el período de marcadas precipitaciones que genera alta variabilidad temporal y descenso de las medias, lo que se evidencia como el comportamiento anómalo en la serie temporal de la anomalía relativa para el mes de abril. Se aplicó el mismo procedimiento anterior y el producto obtenido fue similar al de los otros meses, con un tiempo de convergencia de 7 años.

b) Rafaela

Se comprobó que, para los valores anuales, eran necesarios 3 años para obtener promedios que no difirieran de la media a largo plazo en más del error instrumental, esto es, 6% ya que el sensor utilizado fue fotovoltaico.

c) Córdoba

Se repitió el procedimiento seguido anteriormente y se calcularon las correspondientes anomalías relativas y sus promedios. Se comprobó que, para los valores anuales, eran necesarios 3 años para obtener promedios que no difirieran de la media a largo plazo en más del 6%.

d) Cerro Azul

Se calcularon las correspondientes anomalías relativas y sus promedios y se comprobó que, para los valores anuales, eran necesarios 2 años para obtener promedios que no difirieran de la media a largo plazo en más del 6%.

e) San Miguel

Para los valores anuales resultaron necesarios promediar 2 años para obtener promedios que no difirieran de la media largo plazo en más del 6%.

En la Tabla 2 se resumen los valores del tiempo de convergencia hallados para los diferentes meses del año para cada estación cuya serie temporal tuvo adecuada extensión temporal. Ya se explicó más arriba que el valor determinado para el mes de abril en Paraná debe ser reemplazado por 7 años una vez que se analizó en detalle entre los años 1999 y 2004, evitando considerar el período de marcadas precipitaciones que generó alta variabilidad temporal y el descenso de las medias (la precipitación registró en el mes de abril, entre los años 1999 y 2004).

Tabla 2: Tiempos de convergencia (años necesarios para que la media mensual calculada difiera del promedio a largo plazo en menos de 6%) para las estaciones analizadas. En la estación Paraná el tiempo de convergencia correspondiente al mes de abril (16 años) debe reemplazarse por 7 años, de acuerdo con lo explicado en el texto.

ESTACION	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
PARANA	4	5	7	16	7	7	7	6	5	6	3	6
RAFAELA	4	7	9	4	7	6	9	8	6	4	6	5
CORDOBA	4	5	8	5	5	5	3	4	2	7	5	6

A excepción de las estaciones que presentan una razonable extensión temporal, las características de la anomalía relativa definida lo convierten en un operador de obligada convergencia a cero a medida que se agota la serie. Por lo tanto, si bien para promedios anuales fue aplicado a todas las estaciones estudiadas, no se lo pudo utilizar en todas en base mensual. Los valores del tiempo de convergencia para los promedios anuales varían entre 1 y 3 años.

5. CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los resultados hallados, se recomienda utilizar (en el caso de que existan valores ya medidos) o medir (en el caso de comenzar a hacerlo) no menos de 3 años completos para obtener promedios anuales de radiación global que no difieran en más del 6% del valor a largo plazo, reduciendo así la posibilidad de que uno de los años no sea típico (por ejemplo, grandes precipitaciones, Niño-Niña, erupción de algún volcán o incendio importante).

Esta conclusión permite considerar los valores anuales obtenidos por la ex-Red Solarimétrica de la CNIE, utilizados para la preparación del Atlas (2007) como indicadores de los totales anuales de irradiación solar global diaria recibida sobre un plano horizontal o para estimar a partir de ellos la energía colectada anualmente sobre un plano inclinado y dimensionar adecuadamente la superficie colectora, como fue el ejemplo citado en la introducción para la empresa EMGASUD.

Para el caso de los valores medios mensuales las cosas no son tan sencillas. Dependiendo de la época del año y de la ubicación geográfica de la estación, los tiempos de convergencia para la irradiación global pueden variar de 2 a 9 años (si bien el número de estaciones que se pudo analizar fue reducido).

Finalmente cabe decir que, si bien el coeficiente de correlación lineal es bajo ($R=0,59$), el tiempo de convergencia mensual aumenta proporcionalmente con el valor del coeficiente de variabilidad, como era de esperar.

REFERENCIAS

- 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).
- 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.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2011) Análisis del clima solar de Paraná, Entre Ríos (Argentina). *Energías Renovables y Medio Ambiente* **27**, 23-30.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2007) Análisis de las series de datos anuales en la estación Paraná-INTA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **11**, 11.31-11.36.
- Grossi Gallegos H. y Spreafichi M. I. (2010) Análisis de la serie de los promedios anuales de heliofanía efectiva en Argentina. *Meteorológica* **32** (2007) y **33**, 1 y 2 (2008), 5-17, publicado en abril de 2010.
- 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
- Gueymard, C. A. and Wilcox, S. M. (2009) Spatial and Temporal Variability in the Solar Resource: Assessing the Value of Short-Term Measurement at Potential Solar Power Plant Sites, in Solar 2009 ASES Conf., Buffalo, NY.
- Kendall M.G. and Stuart A. (1961) The advanced theory of statistics, vol. 2, fourth edition. C. Griffin and Co. Ltd, London, England.
- Roberti A., Renzini G. y Grossi Gallegos H. (2000) Desarrollo de un software capaz de correlacionar y consistir datos de irradiación solar y heliofanía. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* **4**, 2, 11.37-11.38.