

ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR TOTAL EXTRATERRESTRE EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE MANCHAS SOLARES

ESTIMATION OF THE EXTRATERRESTRIAL TOTAL SOLAR IRRADIANCE IN FUNCTION OF NUMBER OF SUNSPOTS

Edson Plasencia Sánchez¹, Adolfo Posadas², Carlos Cabrera³

RESUMEN

La Irradiancia Solar Total Extraterrestre (TSI) es la cantidad total de energía solar por unidad de área presente en cada momento fuera de la atmósfera terrestre; por lo tanto, varía a lo largo del año, sin embargo, para muchos fines prácticos se la considera constante y se le asigna el valor de la llamada Constante Solar (1367 W/m²). En este artículo se revisan los esfuerzos históricos hechos para cuantificar la Irradiancia Solar Total Extraterrestre, se presentan los últimos avances en esta materia y se propone un método que permite estimar su valor promedio mensual a partir del número de manchas solares, con una incertidumbre de 0.05 W/m² (RMS = 0.002).

Palabras Clave.- Irradiancia solar, Manchas solares, Energía solar.

ABSTRACT

The Total Solar Irradiance (TSI) is the total amount of solar energy present per square unit every moment beyond the atmosphere, so, it's changing every time along the year, although for many practical purposes its average is taken and has been called : The Solar Constant (1367 W/m²). In this paper, the historical efforts made to quantificate the TSI are reviewed, the latest advances in this matter are presented and a new method to calculate its monthly average based on the SunSpot Number is proposed to approach to its value as close as 0.05 W/m² (RMS = 0.002).

Key Words.- Solar irradiance, SunSpot number, Solar energy.

INTRODUCCION

Si bien antiguas civilizaciones como la China y la Coreana, conocían de la aparición de manchas oscuras en la superficie del sol y calificaban a este hecho como un presagio de eventos importantes; siempre se consideró que el brillo solar era constante [1].

Actualmente se sabe que el "brillo" del disco solar es más intenso cerca del centro que hacia los bordes [1]

y que las manchas solares (zonas sin "brillo") evolucionan a lo largo de semanas tanto en número como en extensión [12], por lo tanto, el brillo solar extraterrestre (entiéndase TSI) no es constante.

Este hecho no pudo verificarse fehacientemente sino hasta noviembre de 1978, con la puesta en órbita del satélite artificial NIMBUS-7, el cual, al llevar consigo un radiómetro pudo cuantificar la intensidad de la TSI y sus variaciones a lo largo de varios años.

¹MgSc. en Ambientales, Docente investigador de la Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica de la Universidad Nacional de Ingeniería, ²Investigador del Centro Internacional de la Papa, División de Manejo de Recursos Naturales, ³Docente investigador de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

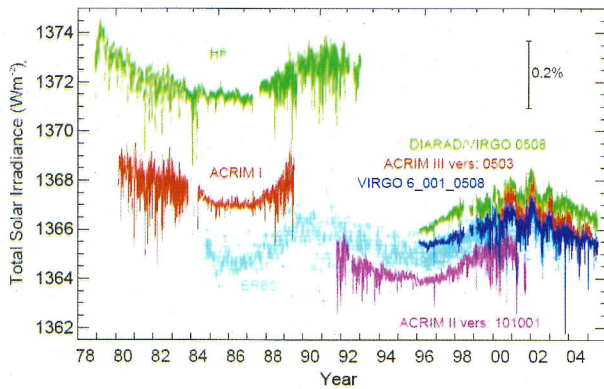


Fig. 1 Registro satelital de la irradiancia solar total extraterrestre.

Gracias a los radiómetros que llevaron posteriormente los satélites ERBS, UARS, SOHO y ACRIMSat; hoy en día se dispone de un conjunto de series de tiempo de TSI que cubren, por segmentos, los últimos tres ciclos solares tal como se observa en la Fig. 1.

LA CONSTANTE SOLAR

La Constante Solar es un concepto introducido en 1837 por Claude Pouillet [4] quien, bajo consideraciones teóricas [5] intentó establecer la cantidad de energía por unidad de área que llega cada segundo a la tierra procedente del sol.

Debido a las considerables discrepancias que guardan entre sí los valores de TSI obtenidos por los diferentes satélites, Fig. 1, el concepto de Constante Solar se ha mantenido vigente aún hasta nuestros días, pero con un sentido experimental: el valor promedio anual de la TSI, siendo 1367 W/m^2 su valor recomendado por la Organización Meteorológica Mundial (WMO, por sus siglas en inglés) [6].

MODELOS DE IRRADIANCIA SOLAR TOTAL EXTRATERRESTRE

Dado que los valores de la TSI registrados por los satélites fluctúan entre los 1395 W/m^2 (perihelio) y 1308 W/m^2 (afelio) [4], desde inicios de los '80 se modeló la TSI como una función sinusoidal que oscila anualmente alrededor de la "Constante Solar", con una amplitud que depende de la distancia Tierra-Sol.

De esta manera, surgieron una variedad de modelos que difieren entre sí en la forma en la que calculan la

distancia Tierra-Sol y en la serie de TSI que toman como referencia para ajustar su amplitud, así por ejemplo, se tienen los modelos de Yang y Vidal [6], Partridge [7] y Baigorria [8].

REGISTRO EXPERIMENTAL DE LA IRRADIANCIA SOLAR TOTAL EXTRATERRESTRE

Los registros experimentales de la TSI se inician en 1978 con el radiómetro HF, que llevó consigo el satélite NIMBUS, y aunque con cada nuevo radiómetro puesto en órbita se intentó suplir las deficiencias del anterior, hasta el 2002 no había sido posible superar todas las discrepancias en las lecturas de la TSI [2].

Sin embargo, principalmente, gracias a lo que fue aprendiendo el World Radiation Center (WRC), órgano consultor del Comité International des Poids et Mesures, acerca de la degradación en las lecturas de la TSI que el radiómetro en órbita experimenta en función del tiempo; éste pudo presentar en mayo del 2006 una composición de todas las series de TSI disponibles [3]. Puede accederse a esta composición vía la página web del WRC.

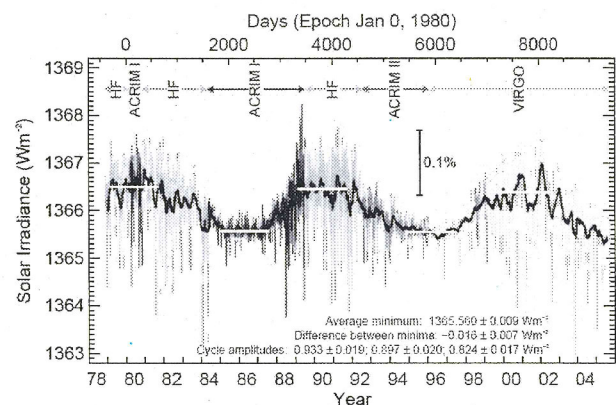


Fig. 2 Composición de las series de TSI.

ACTIVIDAD SOLAR, MANCHAS SOLARES Y LA TSI

La actividad solar comprende una serie de fenómenos como fulguraciones, prominencias eruptivas, viento solar, eyecciones de masa coronal (CME) y por supuesto, las manchas solares [12].

Las manchas solares aparecen oscuras en las fotografías porque tienen una luminosidad inferior a

un cuarto del de la superficie adyacente; su temperatura superficial es de solo 3900K cuando la del sol es de 5600K. Las mayores manchas solares tienen un campo de 4000 gauss y un diámetro de 50000 kilómetros [12].

Sin embargo, las manchas solares no se producen individualmente, se generan dentro de zonas de alta concentración de flujo magnético ("zonas activas") en grupos que tardan entre unas horas y días en desarrollarse, luego permanecen durante días o semanas y finalmente decaen con una velocidad que depende de su ubicación, extensión, polaridad, recurrencia y duración [9].

Obtener el número de manchas solares presentes a diario en el sol implica poder distinguirlas dentro de una *zona activa* y hacerles un seguimiento individual de su evolución, por lo tanto, involucra el trabajo de muchos centros de investigación y la existencia intrínseca de una incertidumbre.

Actualmente existen dos instituciones que llevan un registro internacionalmente aceptado del número de manchas solares: El Observatorio Real de Bélgica (ROB) y la Administración Aeroespacial de Estados Unidos (NASA).

Estas instituciones poseen registros del número de grupos de manchas solares, del tipo de grupo, del número de manchas solares diarias, del promedio mensual (SSN por sus siglas en inglés), del promedio mensual ponderado anualmente (SSSN por sus siglas en inglés), del tipo de manchas, de su ubicación, extensión y duración. Estos registros están a disposición de la comunidad científica en sus respectivas páginas web.

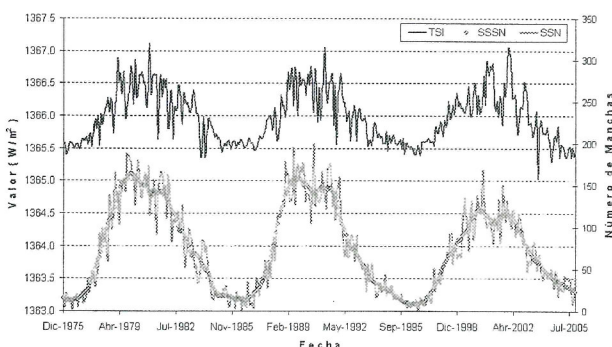


Fig. 3 Evolución temporal de la TSI y del promedio mensual de manchas solares durante los tres últimos ciclos solares.

Nótese en la Fig. 3 cuán similarmente han evolucionado la TSI y el número de manchas solares durante los tres últimos ciclos solares, y es que, al tener las manchas solares una temperatura diferente al resto de la superficie del sol afecta el valor de su irradiancia neta.

PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LA TSI PROMEDIO MENSUAL

Tratando de reducir las incertidumbres que se introducen en los registros por las discrepancias entre los valores que diariamente reportan los distintos colaboradores y considerando que la rotación del sol sobre su propio eje tarda unos 27 días se ha seleccionado del registro de internacional de parámetros solares, al número de manchas solares promedio mensual (SSN).

Estimación inicial

La Fig. 4 muestra la correlación estadística existente entre los valores promedio mensual de la TSI y el SSN, durante los 3 últimos ciclos solares.

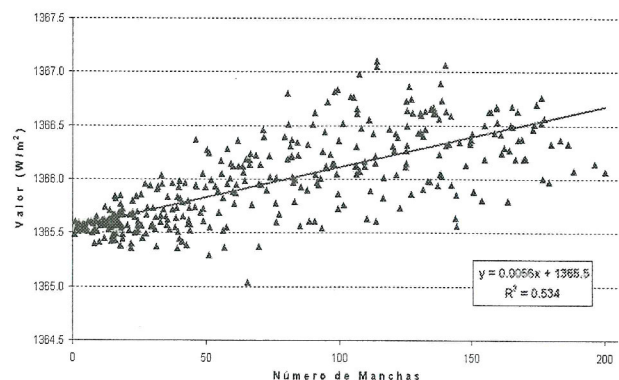


Fig. 4 Correlación entre la TSI y el SSN.

$$TSI = 1365.5 + 0.0056 SSN \quad (1)$$

La Fig. 5 muestra cómo con la sencilla relación lineal encontrada entre ambas series, expresada en la ecuación N° 1, se puede evidenciar también su correlación temporal.

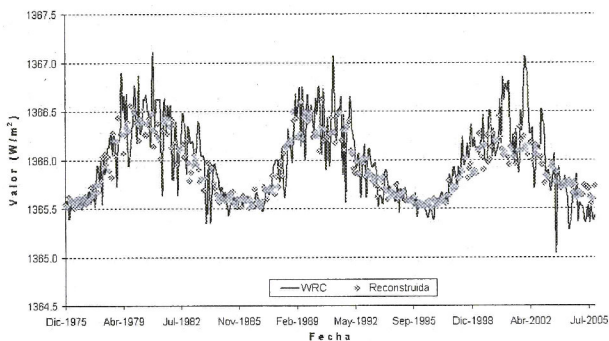


Fig. 5 Estimación inicial (lineal) de la TSI a partir del SSN.

Esta primera estimación de la TSI no rescata adecuadamente la magnitud de los cambios a nivel mensual; los valores estimados se asemejan, mas bien, a unos valores promedio mensual ponderados anualmente.

Sin embargo, el error de esta primera estimación es del orden de 0.4 W/m^2 , como se ve en la Fig. 7, unas diez veces menor que el obtenido por otros métodos.

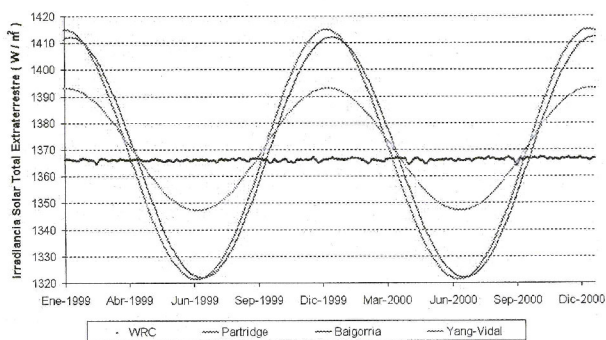


Fig. 6 Valores estimados de la TSI, por otros métodos para el periodo central del Ciclo Solar 23.

Efectivamente, como se observa en la Fig. 6, las diferencias entre los valores experimentales de la TSI consensuados por de la WRC y los valores estimados por los modelos de Yang y Vidal, Partridge y Baigorria, llegan hasta los 40 W/m^2 .

Segunda aproximación

En la Fig.7 se muestra cómo varía el error de la estimación inicial de la TSI a lo largo de los tres últimos ciclos solares. La asimetría [9] existente al interior de cada ciclo atenta contra la posibilidad de modelar este patrón como paquetes de ondas de periodo 131 meses (11 años).

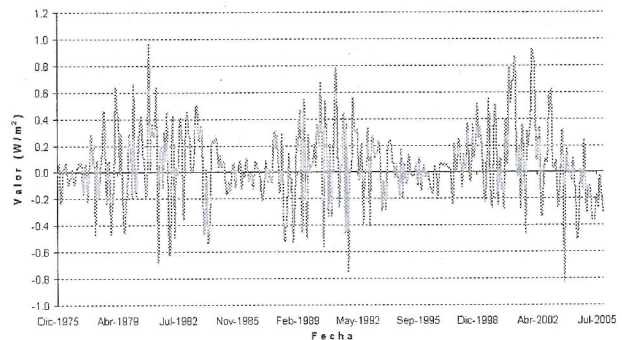


Fig. 7 Error en la estimación inicial de la TSI.

Un análisis de la distribución de los errores en la estimación inicial de la TSI para los tres últimos ciclos solares, muestra que si bien su distribución para todo este periodo es similar a una distribución normal Fig.8, esta distribución se va alcanzando de forma progresiva a medida que evolucionan los ciclos solares, tal como lo muestra la Fig. 9.

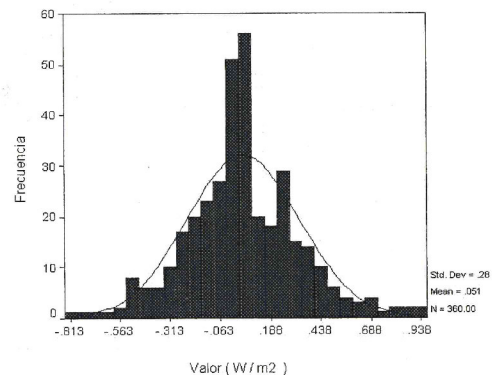


Fig. 8 Distribución del error, primeros 360 datos.

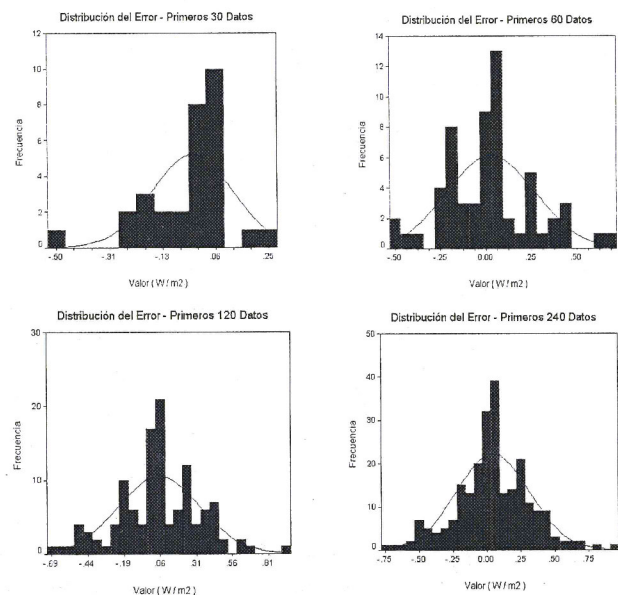


Fig. 9 Evolución de la distribución del error en la estimación inicial.

Debe analizarse entonces la evolución temporal del Error en función de los parámetros que caracterizan una distribución normal: media y varianza, Fig. 10

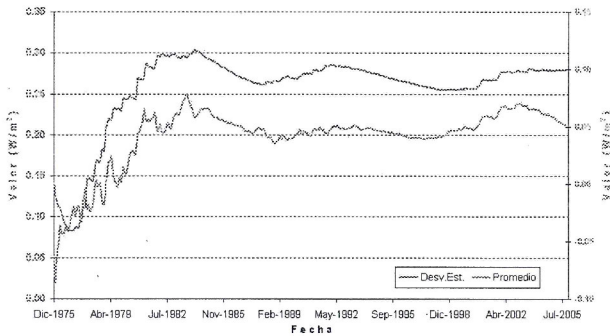


Fig. 10 Evolución de las características estadísticas del error inicial.

Los valores de los parámetros analizados muestran a nivel temporal, un primer periodo de oscilación que evoluciona hasta hacerse prácticamente estacionarios.

Este hecho se evidencia mucho más claramente en la Fig. 11.

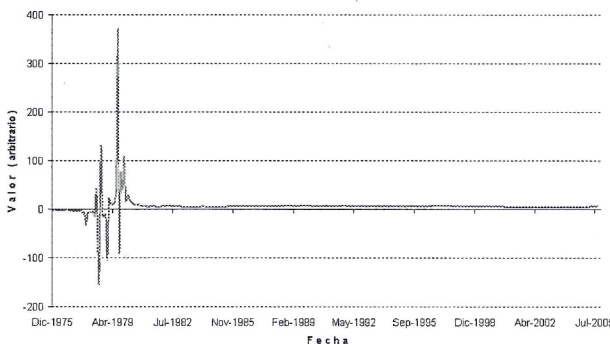


Fig. 11 Relación desviación estándar - promedio del error.

La relación Desviación Estándar-Promedio se hace prácticamente constante a partir de mediados de 1981, coincidentemente cerca del máximo del ciclo solar 21, entonces, habiendo comenzado el análisis poco después del inicio de dicho ciclo, se concluye que se necesita información de aproximadamente medio ciclo solar para poder parametrizar el error estadísticamente.

La Fig. 12 muestra el valor del Error en función de la probabilidad de obtener valores menores o iguales a él, según una distribución gaussiana de media y varianza como la que posee el Error hasta ese momento.

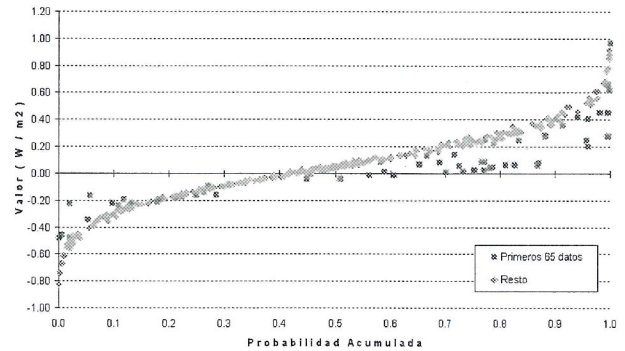


Fig. 12 Error en función de su distribución de frecuencia.

El gráfico confirma la imposibilidad de hacer una afirmación estadística respecto de los primeros 65 datos, sugiere que la actividad solar tiene una "memoria" de aproximadamente medio ciclo solar y muestra que, a medida que aumenta la base estadística, el Error, queda cada vez mejor descrito por la siguiente relación :

$$Error = 0.05 + \left(\frac{1.3051}{\pi} \right) ArcSen (2P - 1) \quad (2)$$

Donde, P es la probabilidad de obtener valores menores o iguales al Error según una distribución gaussiana de media y varianza como la que posee el Error hasta este momento

La Fig.13 muestra que los resultados de esta estimación son significativamente buenos.

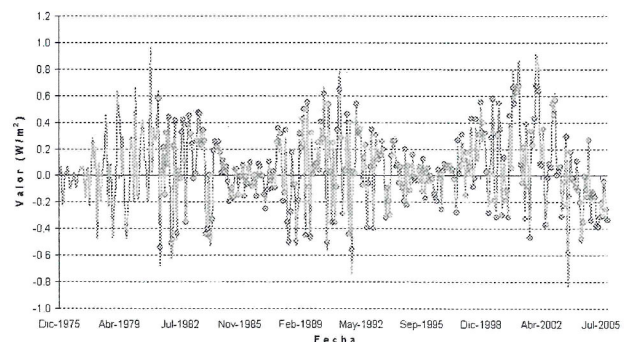


Fig. 13 Estimación del error mensual para los últimos tres ciclos solares.

En la mayoría de casos, los valores estimados reproducen el Error mensual en más del 90%, se justifica así la pérdida de los primeros 65 datos.

Si bien, el origen del Error podría ser la no consideración del tipo de manchas solares predominante en el promedio, del área promedio oscurecida, de la duración promedio de ellas o de la ubicación predominante; antes de introducir otra variable se ha preferido trabajar con un solo parámetro sobre el cual hay consenso internacional.

Consideraciones finales

En la Fig. 14 se presenta el Error Residual que todavía existe en la estimación de la TSI mensual.

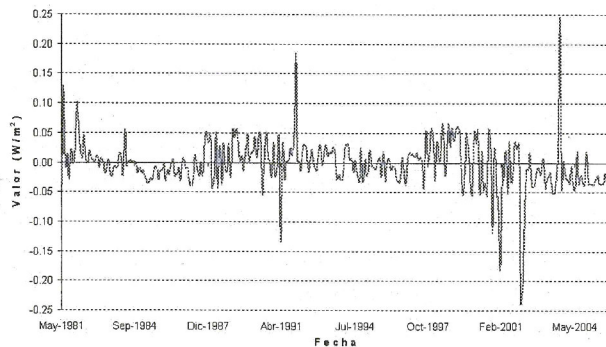


Fig. 14 Error residual - Segunda aproximación.

Los reportes de eventos extremos de la NASA [10] y de la WRC [11] sugieren posibles explicaciones para los Errores Residuales de mayor magnitud, la tabla 1 los condensa.

Tabla 1. Errores residuales de mayor amplitud y eventos extremos

Fecha	Mag. Relat.	Evento Extremo
Oct-2003	1.00	Importante CME - como Supertormenta Solar de 1859
Ene-2002	0.96	Inicio del inesperado "Doble Pico" del Ciclo Solar 23
Feb-2002	0.86	No documentado
Dic-1991	0.75	No documentado
Feb-2001	0.74	El campo magnético solar se invierte
Abr-1991	0.54	No documentado
Jul-1981	0.53	No documentado
Mar-2002	0.50	No documentado
Oct-2000	0.48	Importante CME en Setiembre
Feb-1982	0.40	No documentado
Mar-1982	0.31	No documentado
Oct-1998	0.27	Sensor PMO6V inactivo todo el mes
Jul-1998	0.27	Sensor PMO6V inactivo todo el mes
Mar-1999	0.25	No documentado

Entonces, como se aprecia en la Fig.15, el Error Residual en la estimación del promedio mensual de Irradiancia Solar Total Extraterrestre entre Setiembre 1981 y Diciembre 2005 resultaría ser del orden de 0.05 W/m^2 (0.004%).

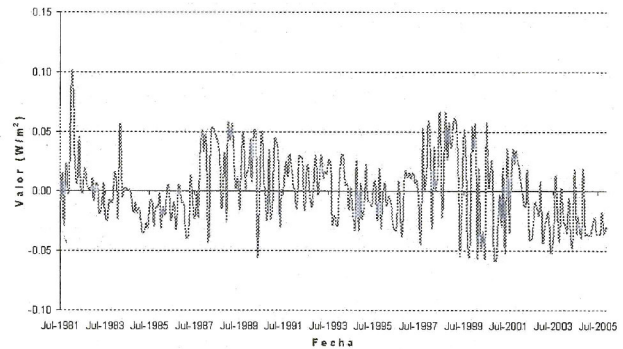


Fig. 15 Error residual - Sin eventos extremos.

En la Fig. 15 se han removido los Errores Residuales de magnitud relativa mayor a 0.5, considerando que muchos de ellos coinciden con eventos extremos solares que no pueden ser estimados con una base estadística de tres ciclos solares y que otros, han tenido lugar en momentos con deficiencias operacionales de registro y/o reconstrucción de la TSI.

CONCLUSIONES

La estimación de valores promedios mensuales la TSI mediante la propuesta aquí descrita, ofrece un nivel de precisión más de 10 veces mayor al de los métodos basados en la distancia Tierra-Sol.

Con el método propuesto, se podría optimizar las estimaciones de otros modelos, por ejemplo, los que estiman rendimientos agrícolas potenciales, los que identifican zonas potenciales de electrificación rural, etc. obteniéndose evaluaciones económicas de menor riesgo, debido a su mayor precisión y concordancia con las evidencias experimentales.

Además, en la medida en que pueda estimarse la actividad solar para los próximos ciclos solares, con este método y en combinación con modelos meteorológicos, podrían obtenerse pronósticos meteorológicos más robustos para actividades económicas que demandan alta planificación, como son: las olimpiadas, los viajes de negocios o las campañas turísticas, etc.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al PMOD/WRC, Davos, Switzerland, por el conjunto de datos de TSI recibido (versión d41_61_0610) y los datos no publicados del Experimento cooperativo ESA/NASA VIRGO - Misión SOHO.

REFERENCIAS

1. **Espasa – Calpe S.A.**, "Enciclopedia Universal Ilustrada Europeo-Americana", tomo LVI pp. 1468-1550, Madrid, España, 1927.
2. **Fröhlich, C.**, "Solar Irradiance Variability", Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) Meeting, Colorado, U.S.A., 2002.
3. **Fröhlich, C.**, "Solar Irradiance Variability Since 1978", Space Science Reviews, Vol. 125, N° 1-4, pp. 85, The Netherlands, diciembre 2006.
4. **Vera Mella, N.**, "Atlas Climático de Irradiación Solar a partir de imágenes de Satélite NOAA. Aplicación a la Península Ibérica" (Tesis Doctoral), Universidad Politécnica de Cataluña, España, mayo 2005.
5. **P. Courvoisier**, "Definiciones de Radiación Solar", Theoretical and Applied Climatology, Vol. 5, N° 2, Vienna, Austria, enero 1954.
6. **Yang C., Vidal, A.**, "Combination of Digital Elevation Models with SPOT-1 HRV Multispectral Imagery for Reflectance Factor Mapping", Remote Sensing of Environment, Vol. 32, N° 35, pp. 45, New York, U.S.A., 1990.
7. **Partridge, G. W., Platt, C. M.**, "Radiative Processes in Meteorology and Climatology", Elsevier Scientific Pub. Co., U.S.A., 1976.
8. **Baigorria Paz, G. A.**, "Climate Interpolation for land resource and land use studies in mountainous regions" (Tesis Doctoral), Wageningen University and Research Center, The Netherlands, abril 2005.
9. **Hathaway, D. H., Wilson, R. M.**, "What the sunspot record tells us about space climate", Solar Physics, Vol. 224, N°1, pp. 5, The Netherlands, octubre 2005
10. **Walls, B.**, (curador), **Dr. Phillips, T.**, (editor), NASA's Marshall Space Flight Center, "Science @ NASA's Marshall Space Flight Center, ASA – Headline News Archives", U.S.A., 2006. <http://science.nasa.gov/default.htm>
11. **Fröhlich, C.**, (curador), World Radiation Center, "VIRGO Radiometry and Determination of TSI", Suiza, 2006. http://www.pmodwrc.ch/pmod.php?topic=tsi/virgo/proj_space_virgo.
12. **Blume, H., Ediciones**, "El Sistema Solar – Selecciones de Scientific American", pp. 36-43, Madrid, España, 1977.

Correspondencia: eplasencia@uni.edu.pe

Recepción de originales: julio 2006

Aceptación de originales: noviembre 2006

