

## DESARROLLO DE UN ALGORITMO PARA LA MODELIZACIÓN DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL Y DEL CONTROL DE DATOS

G. M. Salum<sup>a,b</sup>, A. Ipiña<sup>b</sup> y R. D. Piacentini<sup>b,c</sup>

<sup>a</sup>Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional de Concepción del Uruguay, Ingeniero Pereyra 676, (3000) Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina, [gmsalum@hotmail.com](mailto:gmsalum@hotmail.com), [www.frcu.utn.edu.ar](http://www.frcu.utn.edu.ar)

<sup>b</sup>Instituto de Física Rosario (CONICET – Universidad Nacional de Rosario), Rosario, Argentina, [ruben@ifir.edu.ar](mailto:ruben@ifir.edu.ar), [www.ifir.edu.ar](http://www.ifir.edu.ar)

<sup>c</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura/Universidad Nacional de Rosario, Rosario, Argentina, [www.fceia.unr.edu.ar](http://www.fceia.unr.edu.ar)

**Palabras clave** Algoritmo, modelización, radiación solar, control de datos

### Resumen

El conocimiento detallado de la radiación solar global incidente sobre distintos planos es importante por sus aplicaciones posibles en aprovechamiento solar, diseño de edificios/viviendas y acciones biológicas, entre otras. En este trabajo presentamos un algoritmo de cálculo basado en el modelo C de Iqbal, que permite obtener la irradiancia solar global, en cualquier lugar geográfico y hora del día. Los resultados numéricos fueron comparados con mediciones efectuadas con un solarímetro, obteniéndose un buen acuerdo entre ambos. Otra aplicación de suma utilidad del algoritmo, es la determinación de cotas de control de los valores de la irradiancia solar medida en Rosario y Concepción del Uruguay, Argentina, a los que se puede acceder en tiempo real a través de Internet. Una señal de alerta es transmitida al responsable del equipo de medición y a los posibles usuarios en los siguientes casos: a) si la irradiancia supera un cierto valor considerado máximo para el momento del día, b) si los datos están desfasados temporalmente, produciéndose el máximo a un tiempo distinto del mediodía solar (dentro de un cierto margen), c) si los valores son negativos al comienzo o final del día (lo cual no puede ser desde un punto de vista físico, ya que por definición la irradiancia es una cantidad no negativa), d) si fuera del intervalo de tiempo comprendido entre el inicio del crepúsculo (45 minutos antes de salir el Sol por el horizonte) y el ocaso (ídem después de ponerse el Sol), se registra un valor positivo, cuando en realidad la irradiancia solar debe ser cero. Presentamos ejemplos del funcionamiento del sistema de control, el cual, al permitir modificar las mediciones erróneas en tiempo casi real, otorgan más confianza a los datos publicados.

## 1. INTRODUCCIÓN

La medición de la intensidad de radiación o *irradiancia* solar es una cantidad básica para comprender el frágil equilibrio térmico de la atmósfera terrestre, ya que el Sol es la fuente principal de energía que condiciona el valor de la temperatura del aire y por ende el calentamiento global del planeta (IPCC, 2007). Además, determina la cantidad de energía disponible en sistemas de aprovechamiento que emplean colectores térmicos, fotoquímicos y fotovoltaicos (Duffie y Beckman, 1980). Es fuente de vida para los organismos vivientes y condiciona en gran medida el clima interior de las construcciones habitables

El instrumento que registra la irradiancia solar, llamado *solarímetro* o *piranómetro*, debe estar calibrado y controlado periódicamente, de modo que los valores que se obtengan sean considerados confiables. Si estas mediciones están dentro de algunos porcentos, los resultados pueden ser empleados para determinar tendencias a largo plazo o bien analizar variaciones debidas a factores diversos, como la modificación en la cubierta nubosa por el evento El Niño (Piacentini, 1998). De todos modos, suelen ocurrir fallas por diversos factores, por lo cual se han tratado en los últimos años, de introducir controles que permitan reducir las indeterminaciones en mediciones meteorológicas (Hernandez el al., 2002; Geiger et al., 2002).

En este trabajo presentamos un programa de computación que hemos denominado DESYF.SOLG en su versión 1.0 y que tiene la propiedad, tal como lo indican sus siglas, de realizar la Detección de Eventos Significativos y Fallas en datos de radiación solar global. Dicha detección la realiza en forma automática, por comparación de los valores medidos con cotas fijadas según criterios pre-establecidos, los cuales serán desarrollados en los ítems correspondientes. De este modo, los datos pueden ser analizados en tiempo real o casi-real, sin esperar a su recolección luego de que haya pasado un largo tiempo (meses y aún años) hasta que los mismos sean procesados en detalle. En este último caso, si se detectan errores, suele ser tarde para introducir correcciones y recuperar los datos, salvo situaciones particulares.

## 2. MODELIZACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL

La transferencia de la radiación solar a través de la atmósfera puede ser descrita matemáticamente mediante la ecuación diferencial correspondiente (Wolf y Zissis, 1985) o bien empleando una formulación semi-paramétrica, en el sentido que utiliza un formalismo basado en algunas expresiones exactas y en otras ajustadas mediante funciones paramétricas (Iqbal, 1983; Bird y Riordan, 1986).

Esencialmente ambos formalismos tratan de describir la dependencia en longitud de onda de la irradiancia espectral *extraterrestre* (medida por satélites en el espacio exterior), en relación a su atenuación por los componentes atmosféricos al llegar a nivel superficial. Estos componentes son principalmente oxígeno (O<sub>2</sub>), anhídrido carbónico (CO<sub>2</sub>), vapor de agua (H<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>) y partículas micrométricas en suspensión denominadas *aerosoles*.

En el presente trabajo hemos seleccionado la formulación semi-paramétrica de Iqbal, modelo C (Iqbal, 1983). Este modelo, en la mayoría de las situaciones, da el mejor ajuste con datos medidos en plano horizontal a lo largo de las horas del día y de los días del año. Es de gran utilidad para describir la incidencia de radiación solar sobre sistemas de captación térmicos, fotoquímicos y fotovoltaicos, así como también sobre sistemas biológicos (células, tejidos y seres vivientes expuestos al Sol en general) y sobre materiales y construcciones. En el Apéndice I, presentamos la descripción detallada de las expresiones matemáticas que permiten calcular la irradiancia solar global según el modelo antes nombrado.

El programa DESYF.SOLG 1.0 posee las siguientes características relativas al cálculo de la irradiancia solar global (integrada sobre todas las longitudes de onda del espectro):

## 2.1 Datos de entrada

- \* Irradiancia solar extraterrestre (o constante solar =  $1366,1 \text{ W/m}^2$ ) (Gueymard, 2004)
- \* Fecha (en formato dd/mm/aaaa)
- \* Latitud y longitud del lugar, ver dato en cada Figura (en grados y con signo negativo para Sur y Oeste)
- \* Columna total de ozono variable, ver dato en cada Figura (en Unidad Dobson, UD)
- \* Visibilidad (en km) para obtener columna total de aerosoles, valor típico: 10 km (Iqbal, 1983)
- \* Cantidad de agua precipitable (en cm), valor típico: 2 cm
- \* Presión atmosférica en la superficie (en mbar), valor típico: 1015 mbar
- \* Albedo superficial (adimensional), valor típico: 0,2
- \* Albedo de dispersión simple (adimensional), valor típico: 0,9
- \* Diferencia horaria con el GMT (en horas), para Rosario y Concepción del Uruguay: 3 hs

## 2.2 Ecuaciones empleadas (Ver Apéndice I)

- \* Fórmulas que describen la transferencia radiativa de las componentes directa y difusa de la radiación solar
- \* Fórmula que da la posición angular (zenital y azimutal) del Sol en el cielo
- \* Fórmula para obtener horas de salida y puesta de Sol y mediodía solar para cada lugar geográfico

## 2.3 Datos de salida

- \* Irradiancia solar global máxima sobre plano horizontal teórica (en  $\text{W/m}^2$ )
- \* Irradiancia solar global máxima sobre planos horizontal real derivada de los datos del solarímetro (en  $\text{W/m}^2$ )
- \* Gráfica de irradiancia solar global medida con solarímetro original y corregida
- \* Hora de salida y puesta de Sol y mediodía solar
- \* Identificación de eventos fallas/errores (ver ítems 4 y 6)

Valores	Teóricos	Reales
Min. cenital:	53,3 °	
Horas Totales:	10,1 hs	
Salida del Sol:	07:17 hs	07:34 hs
Mediodía Solar:	12:55 hs	12:38 hs
Puesta del Sol:	17:59 hs	17:41 hs
Rad. Global Máx.:	593,6 $\text{W/m}^2$	572,5 $\text{W/m}^2$
Desfasaje temporal:	17'	

Figura 1. Reporte de resultados comparativos de la medición de irradiancia solar global efectuada sobre plano horizontal en Concepción del Uruguay, Argentina con solarímetro fotovoltaico de la Red UTN, del día 25 de mayo de 2007 y de la modelización correspondiente realizada con el programa DESYF.SOLG. Nota: en la sexta fila podemos comprobar que el acuerdo entre medición y modelización al mediodía solar es mejor que el 4 %. Observamos en la séptima fila que existe un desfasaje temporal, que corregiremos aplicando el método del ítem 5.2

En la figura 1, presentamos una salida típica del programa aplicado al cálculo de la irradiancia solar global máxima teórica según el método utilizado.

En el Apéndice II se muestran pantallas típicas de entrada y salida del programa desarrollado.

### 3. APROXIMACIÓN POR FÓRMULAS MATEMÁTICAS DE LA IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL

La irradiancia solar global a lo largo de las horas del día, puede ser descripta mediante una función cosinusoidal centrada al mediodía solar ( $t^*$ )

$$I_{\text{solar}} = A \cdot \cos [w(t - t^*)] \quad (1)$$

siendo  $A$  su amplitud máxima y  $w$  su frecuencia horaria. Dado que al comienzo del día y al final del mismo la variación de la irradiancia solar es continua y con tendencia suave hacia el valor cero de la noche, esta función (1) tiene validez en el intervalo entre una hora después de la salida del Sol y una antes de la puesta del Sol, dado que su variación cerca de los extremos no describe adecuadamente el comportamiento real. Sin embargo, la contribución de esta parte de la curva de irradiancia a la integral diaria (irradiación) es muy pequeña por lo que puede obviarse en primera aproximación y a los fines de realizar un análisis cualitativo del comportamiento de esta intensidad.

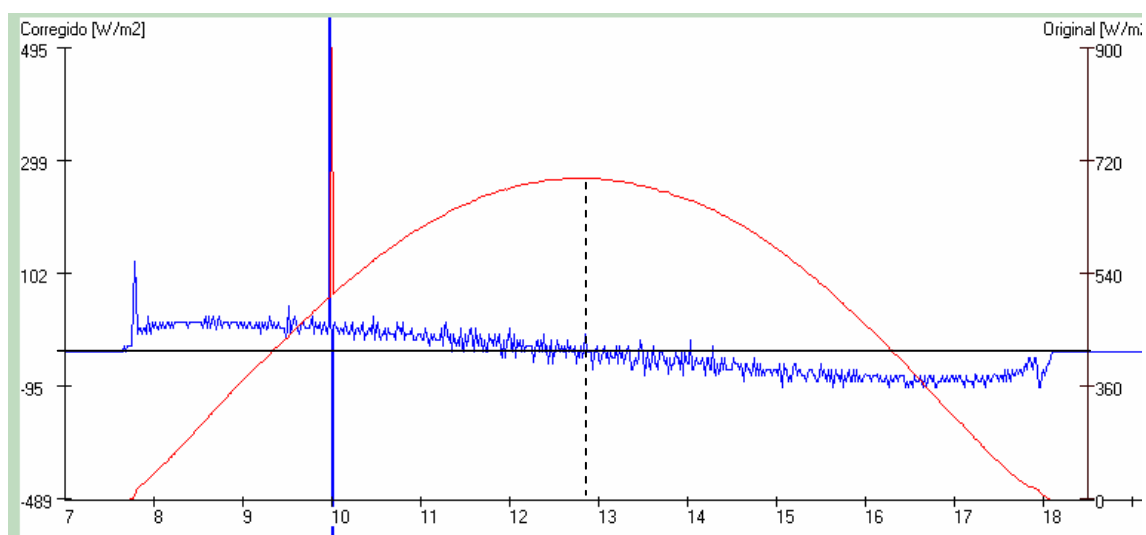


Figura 2. En esta figura mostramos la irradiancia solar global medida el día de cielo claro 8 de mayo de 2007 con el solarímetro fotovoltaico de UTN/Regional C. del Uruguay perteneciente a la Red UTN, con un pico agudo anómalo agregado artificialmente a fin de realizar prueba de la derivada a la hora 10h (línea roja y escala derecha). Presentamos también la derivada (pendiente) de dicha irradiancia en escala amplificada (línea azul y escala izquierda) que genera internamente el sistema. Es de destacar el comportamiento peculiar de la derivada en el pico anómalo y el pasaje por valor cero que permite identificar con mayor precisión el momento del máximo de irradiancia solar.

Como ejemplo, la fórmula (1) describe razonablemente bien la irradiancia solar global en diciembre en Rosario y la región de la Pampa Húmeda y litoral cercano, con valores:  $A = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $w = 90^\circ/7$  y  $t^* = 13$  horas.

Para definir con mayor precisión el máximo de irradiancia, calculamos la derivada primera de dicha irradiancia dada por la expresión (1).

$$DI_{\text{solar}} = I_{\text{solar}} = -wA \cdot \text{sen}[w(t - t^*)] \quad (2)$$

En la figura 2, observamos que alrededor de  $t = t'$  donde se produce la perturbación (10 horas), la variación temporal de la derivada dada por la expresión anterior (2) es muy pronunciada, mientras que en el resto del tiempo es suave. Si bien en días de cielo claro esto sería suficiente para la detección de la anomalía, en días de cielo nublado debemos imponer como criterio de acotación, que la derivada del pico agudo sea mucho mayor que la máxima derivada posible de un pico producido por una nube. Luego, la condición resulta:

$$DI_{\text{pico agudo}}(t=t') = k \cdot \max \{DI_{\text{solar con nubes}}\} \gg \max \{DI_{\text{solar con nubes}}\} \quad (3)$$

donde  $k$  es un valor tal para que se cumpla la condición “mucho mayor que”. Por ejemplo,  $k = 10$  de acuerdo a la experiencia acumulada al observar el comportamiento de fluctuaciones de la irradiancia solar global en días con cielo nublado.

Es de destacar que un criterio más simple sería imponer un límite o cota superior al valor de la función (ver ítem 5.3), pero puede darse el caso que aún siendo el valor de la señal espúrea menor, no sea tan aguda como lo es cuando ocurre uno de estos eventos, en general en fracciones de segundo. Por consiguiente, es necesario complementar la cota con la condición (3).

Otro uso a la función derivada es el de permitir la ubicación del máximo de irradiancia, cuando dicha derivada pasa por el valor cero (ver Figura 2, hacia las 13 hs).

#### **4. MEDICIONES DE LA IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL Y VERIFICACIÓN PRELIMINAR**

Tal como se mencionó anteriormente, un método de control razonable (Piacentini, Cede y Bárcena, 2003) a ser efectuado como primera verificación, es la contrastación de las mediciones de irradiancia solar global con el resultado de la modelización realizada con el modelo C de Iqbal. En la figura 1 mostramos la comparación de los datos obtenidos en la Facultad Regional Concepción del Uruguay de la Universidad Tecnológica Nacional (UTN) con un solarímetro fotovoltaico de la Red UTN, con los calculados empleando el programa DESYF.SOLG para las condiciones ambientales del día de cielo claro 25 de mayo de 2007. Comprobamos que la irradiancia solar global teórica del modelo C y la real difieren alrededor del mediodía solar en no más de 4%, lo cual está dentro del rango esperado.

Si conocemos las variables atmosféricas dentro de cotas adecuadas, es factible controlar las mediciones mediante la comparación antes mencionada, en distintos momentos del día y en distintos días del año. Otra forma es analizar durante el período cercano al solsticio de verano, el comportamiento de la irradiancia solar directa (global - difusa) en su variación con la masa atmosférica (inversamente proporcional al coseno del ángulo zenital) y verificar si su proyección hacia masa uno (ángulo cero) tiende al valor extraterrestre de la constante solar ( $1366,1 \text{ W/m}^2$ , Gueymard, 2004). Esto dará una confirmación complementaria, tanto a los datos del instrumento como a la salida del programa DESYF.SOLG.

Presentamos a continuación una serie de pruebas que hemos efectuado, con el fin de detectar posibles fallas en los registros.

#### **5. MEDICIONES DE IRRADIANCIA SOLAR GLOBAL QUE INCLUYEN POSIBLES FALLAS/ERRORES**

Las mediciones que realizan instrumentos expuestos a las condiciones climáticas exteriores están sujetas a un gran número de posibles fallas/errores, originadas por causas internas y externas. Entre las primeras caben destacarse: deriva de las mediciones hacia valores negativos, deterioro del sensor o de la cubierta protectora, pico de tensión (como

también se registran en datos satelitales (Barthia, 1996; Cede, 2005), desfasaje horario en la computadora o sistema de adquisición de datos respecto de la hora oficial, etc. Entre los segundos: deposición de materia que obstruye el ingreso de la radiación solar en el domo exterior semitransparente de protección, vientos extremos que modifican la inclinación de los instrumentos, etc.

La idea es detectar los datos sospechosos de ser producidos por una contribución distinta a la del Sol y en caso afirmativo, que el programa envíe una señal al personal de control para alertar sobre la falla, además de proceder a su corrección en forma automatizada. Entre otros, en el presente trabajo consideramos las fallas/errores que se detallan a continuación:

- √ Valor sistemático nocturno distinto de cero (“offset”)
- √ Pico agudo anormal (tipo “spark pulse”) y valor máximo posible superado (“overflow”)
- √ Desfasaje temporal (“time lag”)

### 5.1 Detección de valor sistemático nocturno distinto de cero (“offset”)

En el tipo de mediciones investigado con instrumento expuesto al exterior, puede ocurrir que por efecto térmico de pérdida radiativo o defecto de la electrónica del equipo se registren valores distintos de cero durante la noche, definiendo como tal al periodo que va desde el final del ocaso (unos 45 minutos después de la puesta del Sol) hasta el comienzo del crepúsculo (unos 45 minutos antes de la puesta del Sol). En la figura 3 mostramos esta situación para el caso de valores negativos, sin presencia de picos agudos. El programa calcula el promedio de los valores incorrectos de irradiancia ( $\Delta I_{oc}$ ) entre  $t_{ocaso}$  y  $t_{crepúsculo}$  y lo suma, -dado su signo negativo, a todas las mediciones restantes. Además, reemplaza por *cero* todos los valores nocturnos.

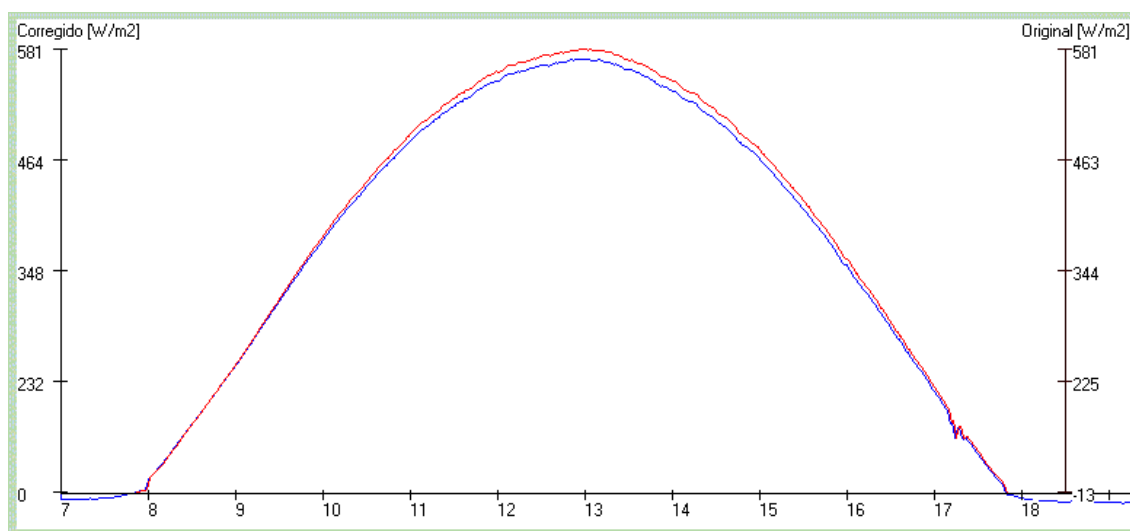


Figura 3. Detección de señal anómala por falla sistemática debida a valor negativo nocturno en datos de irradiancia solar global obtenidos mediante medición con solarímetro fotovoltaico de la UTN / Regional Concepción del Uruguay, el día de cielo claro 20/05/2007 (línea azul) y calculados con el programa DESYF.SOLG 1.0 (línea roja), luego de aplicar la corrección por “offset”. Dicha corrección tiene un valor promedio  $\Delta I_{oc} = - 8,3 \text{ W/m}^2$ . Nota: Ozono: 277 UD.

Es importante señalar que, en el caso de existir, primero deben eliminarse los picos agudos según el método descrito en el ítem 5.3, ya que si se calcula el promedio de los valores nocturnos para renormalizar la curva diaria incluyéndolos, el resultado puede diferir significativamente de la media normal por el exceso de peso de esta valor extremo frente a los demás valores.

Por otra parte, debemos tener en cuenta que físicamente es imposible que la irradiancia solar sea negativa, porque la intensidad en general y la solar en particular, por definición debe ser positiva o nula, ya que es la energía en un dado intervalo de tiempo por unidad de área. Por consiguiente, una vez renormalizada la función, el programa DESYF.SOLG incorpora una condición de imposición de valor nulo a dicha función durante la noche.

## 5.2 Detección de desfase temporal (“time lag”)

En este caso, la forma de detectar un desfase en el tiempo, de la curva que ajusta las mediciones respecto de lo esperado para una dada época del año, es buscar un día de cielo claro, ajustar una curva modelo (o de aproximación matemática) de modo que suavice el comportamiento alrededor del máximo y luego verificar a que tiempo ( $t_{dn}$ ) se produce la derivada nula (o casi nula, acotada por un cierto valor). Esta derivada en la práctica se calcula por diferencia finita entre valores próximos de irradiancia solar dividido por el intervalo de tiempo correspondiente. La corrección de los datos, modificando el tiempo en todos los valores, debe efectuarse si  $t_{dn}$  difiere respecto del tiempo de mediodía solar  $t_{ms}$  (calculado mediante el algoritmo DESYF.SOLG para el día en cuestión a partir del promedio entre salida y puesta de Sol), en más de un valor pre-establecido (ver Figura 4). Matemáticamente,

$$|t_{ms} - t_{dn}| = k_t \cdot \Delta t_{medición} \gg \Delta t_{medición} \quad (6)$$

donde  $\Delta t_{medición}$  es el intervalo mínimo de medición (del orden del minuto) y  $k_t$  un factor de corrección bastante mayor que uno. Dado que naturalmente pueden registrarse corrimientos en el máximo alrededor del mediodía solar aún en días de cielo claro, -por efecto de modificaciones en las componentes atmosféricas que atenúan estas radiaciones, es conveniente tomar el intervalo de tiempo no inferior a unos 10 minutos, lo que condiciona el valor de  $k_t$ .

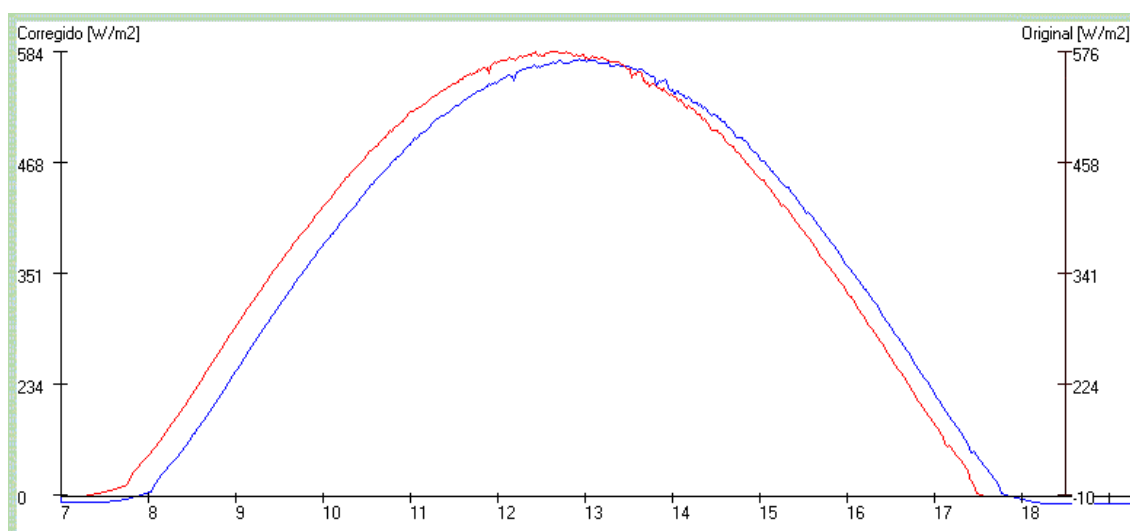


Figura 4. Detección de señal anómala tipo desfase temporal en datos de irradiancia solar global medida con solarímetro fotovoltaico de UTN/Regional C. del Uruguay, Argentina, el 25/05/07 (línea azul) y corregida por desfase temporal y “offset” (línea roja). Nota: en el presente caso el desfase es  $|t_{ms} - t_{dn}| = 17,6$  minutos y se consideró  $k_t = 10$ . Nota: ozono: 284 UD.

## 5.3 Detección de pico agudo anormal (“spark pulse”) y valor máximo superado (“overflow”)

Esta situación corresponde a la detección de un valor anómalo en una proporción fuera de todo lo esperado (figura 5). Por ejemplo, si el máximo valor posible a ser detectado en

un dado lugar y con cielo claro (sin nubes cerca del Sol y nubosidad inferior al 25%) es  $I_{mx}$  alrededor del mediodía solar, podemos establecer como cota a partir de la cual consideramos que el valor es *no-real* el valor  $I_{extrema} = 1528 \text{ W/m}^2$ , que es el máximo valor registrado y publicado internacionalmente hasta el presente, de la irradiancia solar global. Este valor fue medido con un solarímetro en el Cerro Tres Cruces, a 3900 m de altura, en el desierto intertropical de altura Puna de Atacama, en diciembre de 1997 (Piacentini et al., 2003). El valor tan alto se debió a una configuración de nubes cúmulos que produjeron aumento de la radiación solar por efecto de reflexión en borde de nubes y dispersión múltiple en plano nuboso. Dada las condiciones muy particulares de baja densidad atmosférica y limpidez del cielo en esta región, un valor extremo de estas características es muy poco probable que se de en la región de Argentina central de baja altura y fuera de la zona intertropical. De todos modos, tanto en este como en los demás casos, los datos medidos de nivel 0, se guardan para un eventual análisis más detallado. Además, con información complementaria de otros instrumentos solares y meteorológicos y datos para ese día del Servicio Meteorológico Nacional y satelitales de diferentes fuentes, es posible corroborar el estado de la atmósfera durante el momento en que se registró el valor excepcionalmente alto.

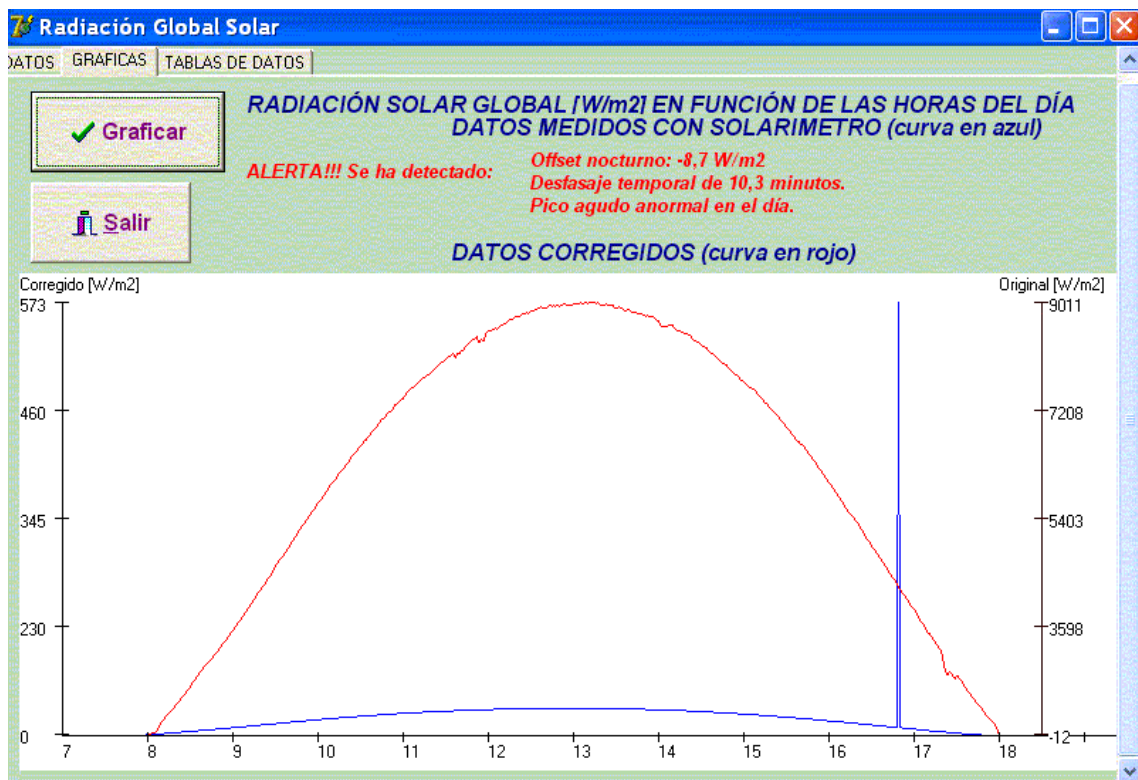


Figura 5. Medición de irradiancia solar global (ver escala derecha) con solarímetro fotovoltaico de la UTN/Regional Concepción del Uruguay, el día de cielo claro 19/05/2007 (línea azul) al cual le adicionamos artificialmente un pico anómalo agudo típico (como los registrados en el solarímetro del IFIR instalado en el Observatorio Astronómico de Rosario en ciertas oportunidades). Detección de señal anómala de tipo pico agudo con el programa DESYF.SOLG 1.0 y eliminación de esta anomalía (con cota superior de  $I_{extrema} = 1528 \text{ W/m}^2$ , según descripción realizada en el texto). También se eliminaron el offset nocturno (en  $\Delta I_{oc} = -8,7 \text{ W/m}^2$ ) y el desfase temporal (en  $|t_{ms} - t_{dn}| = 10,3$  minutos, siendo en el presente caso el valor de  $k_t = 10$ ) (línea roja y escala izquierda). Nota: ozono: 297 UD.

A título de ejemplo, se presenta la salida directa del programa en la figura 5. Sin embargo, si bien esta cota puede detectar situaciones como las encontradas cerca de las 16:49 hs (hora local) en los datos de irradiancia del día 23 de marzo del 2007, en el Instrumento K&Z del IFIR instalado en el OAMR, no registrará el caso de una señal aguda generada por una nube



con valor menor que la curva cosinusoidal límite superior cuyo valor máximo al mediodía solar es  $I_{extrema}$  (como el ejemplo que se presenta en la Figura 6). Para que ello pueda ocurrir, debemos recurrir al criterio (5) del ítem 3, a fin de comparar la derivada de la función que representa el pico con el máximo valor de la derivada correspondiente a una situación de pico menos agudo, pero el más intenso producido por nubes. De este modo fue posible eliminar la señal adicionada por la falla registrada de pico agudo. Con el fin de que el resultado final fuera una medición de irradiancia desprovista de las demás fallas, en la misma figura 4 representamos la curva definitiva para el día de cielo claro 19 de mayo de 2007.

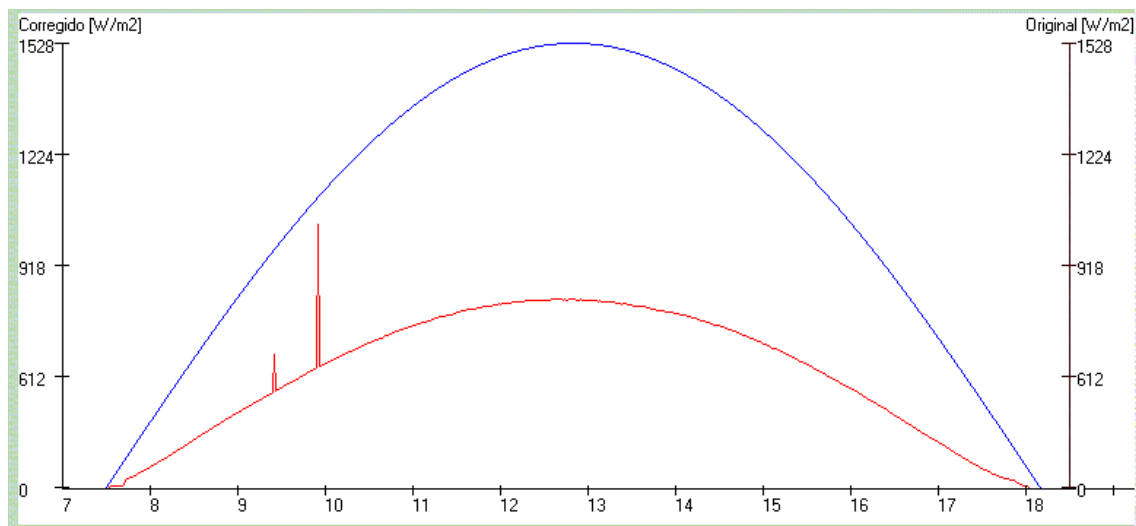


Figura 6. Simulación de irradiancia solar global (línea roja) al cual le adicionamos artificialmente dos picos simulando nubes con valores inferiores a la cota y cota cosinusoidal según la fórmula propuesta en el ítem 3, fórmula (1) (línea azul). El programa DESYF.SOLG 1.0 no alerta sobre la situación real por un pico producido por nubes (con cota superior de  $I_{extrema} = 1528 \text{ W/m}^2$ , según descripción realizada en el texto).

## 6. CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

La conclusión más significativa del presente trabajo es la posibilidad que brinda el programa DESYF.SOLG, de detectar señales originadas por diversas fallas (internas y externas) en instrumentos medidores de irradiancia solar global. En particular, hemos analizado las que se generan por: señal sistemática nocturna distinta de cero, pico agudo anormal, valor máximo posible superado y desfasaje temporal.

En el futuro proponemos:

- Extender el análisis a la detección de eventos significativos, tales como incremento en la intensidad por encima de lo esperado para cielo claro debido a reflexión en borde de nubes y dispersión múltiple en plano nuboso), atenuación por efecto de nube de aerosoles, supresión prácticamente total de la irradiancia solar durante tormentas eléctricas con nubes de alto desarrollo vertical, tipo cúmulus-nimbus. Emplearemos además otros instrumentos para detectar si el pico agudo está o no presente en dichos canales, para estimar si las cota es apropiada, etc.

- Adicionar al análisis, imágenes de nubes dadas por un detector de tipo y porcentaje de cubierta de nubes (“sky imager”), para discriminar la contribución a la irradiancia solar global, de los distintos tipos de picos y anti-picos (valles) producidos por el pasaje de nubes frente al Sol.

- Considerar cotas variables con los meses del año.

- Realizar una re-normalización en intervalos acotados de tiempo, en el caso en que los datos nocturnos contengan errores sistemáticos variables, de modo de perfeccionar el valor de

corrección “offset2 y con el fin de anticipar la corrección de las mediciones que se realicen después de la salida del Sol, sin tener que esperar al día siguiente.

Estas correcciones son particularmente importantes cuando los equipos están operando en tiempo real (o casi real) y los datos se incorporan automáticamente a red via internet. También cuando estos datos son empleados por personas no especialistas en el tema, que suelen tomarlos y volcarlos directamente en sus programas, sin un análisis detallado de los mismos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecemos la colaboración de José Pomar, personal técnico de CONICET en IFIR y las siguientes instituciones de Argentina por su apoyo parcial al presente proyecto: CONICET, Universidad Tecnológica Nacional, ANPCYT.

## **REFERENCIAS**

- Barthia P K. Goddard Space Flight Center, NASA, comunicación privada, 1996.
- Bird, R.E., and Riordan, C., Simple solar spectral model for direct and diffuse irradiance on horizontal and tilted planes at the Earth's surface for cloudless atmospheres, *J. Clim. Appl. Meteor.*, 25:87-97, 1986.
- Cede A. Goddard Space Flight Center, NASA, comunicación privada, 2005.
- Duffie, J. y Beckman, W., *Solar Energy Thermal Processes*, John Wiley and sons, 1980.
- Geiger, M., Diabté, L., Ménard, L., and Wald, L., A web service for controlling the quality of measurements of global solar irradiation, *Solar Energy*, 73:475-480, 2002.
- Gueymard, C.A., The Sun's total and spectral irradiance for solar energy applications and solar radiation models, *Solar Energy*, 76: 423-453, 2004.
- Hernandez, R., Gaztelumendi, S., y Otxoa de Alda, K., Expertise of errors in radiometric networks. The case of the Basque Service of Meteorology, Department of Meteorology of European Virtual Engineering, Basque Service of Meteorology, 2002.
- Hernandez, R., Gaztelumendi, S., y Otxoa de Alda, K., Some aspects on the operative use of the automatic stations network of the Basque country, Hidrometeorological Monitoring and Forecast Office, Department of Meteorology of European Virtual Engineering, Basque Service of Meteorology, 2002.
- IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change, *The Scientific Basis*, 2007.
- Iqbal, M., *An introduction to Solar Radiation*, Academic Press, 1983.
- Piacentini R D. “Influencia del evento el niño 1997-1998 sobre las intensidades solares globales incidentes sobre Rosario, Argentina”. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 2, 11.61, 1998.
- Piacentini, R.D., Cede, A., Bárcena, H., Extreme solar global and UV irradiances due to cloud effect measured near the summer solstice at the high altitude desertic plateau Puna of Atacama, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 65:727-731, 2003.
- Wolf, L.W., and Zissis, G.J., *The infrared handbook*, Chapter 4: Atmospheric Scattering, Environmental Research Institute of Michigan, 1985.

## APÉNDICE I. DESCRIPCIÓN DEL MODELO C (IQBAL, 1983)

La **irradiancia global** en una superficie horizontal está dada por la ecuación

$$I = I_n \cdot \cos \theta_z + I_d$$

en donde la **irradiancia normal directa** esta dada por

$$I_n = 0.9751 \cdot I_{sc} \cdot \tau_r \cdot \tau_o \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_a$$

donde al constante solar vale:  $I_{sc} = 1366.1 \text{ W/m}^2$  (Gueymard, 2004)

La **masa de aire a la presión actual** ( $m_a$ ), La **masa óptica de aire relativa a presión estándar** ( $m_r$ ), el producto espesor por masa óptica relativa  $U_3$  y el producto de contenido de agua precipitable por masa óptica relativa  $U_1$  son definidos de la siguiente forma

$$m_a = \frac{m_r \cdot p}{1013.25} \quad m_r = \frac{1}{\cos \theta_z + 0.15 \cdot (93.885 - \theta_z)^{-1.253}} \quad U_3 = 1 \cdot m_r \quad U_1 = w \cdot m_r$$

A partir de estas cantidades resultan las distintas transmitancias

**Transmitancia por dispersión Rayleigh**  $\tau_r = e^{-0.0903 \cdot m_a^{0.84} \cdot (1.0 + m_a + m_a^{1.01})}$

**Transmitancia por Ozono**  $\tau_o = 1 - (0.1611U_3 \cdot (1.0 + 139.48U_3)^{-0.3035} - 0.002715U_3 \cdot (1 + 0.044U_3 + 0.0003U_3^2)^{-1})$

**Transmitancia por gases uniformemente mezclados**  $\tau_g = e^{(-0.0127 \cdot m_a^{0.26})}$

**Transmitancia por vapor de agua**  $\tau_w = 1 - 2.4959 \cdot U_1 \cdot \left[ (1.0 + 79.034 \cdot U_1)^{0.6828} + 6.385 \cdot U_1 \right]^{-1}$

**Transmitancia por aerosoles**  $\tau_a = \left[ 0.97 - 1.265 \cdot (Vis)^{-0.66} \right] m_a^{0.9}$

En esta última formula, la visibilidad debe estar comprendida en el intervalo:  $5 \text{ km} < Vis < 180 \text{ km}$ .

Además la **irradiancia difusa** se define como:

$$I_d = I_{dr} + I_{da} + I_{dm}$$

donde la **irradiancia difusa por dispersión Rayleigh** es

$$I_{dr} = \frac{0.79 \cdot I_{sc} \cdot \cos \theta_z \cdot \tau_o \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot 0.5 \cdot (1 - \tau_r)}{(1 - m_a + m_a^{1.02})}$$

siendo la **transmitancia de la radiación directa debida a la absorbcancia**

$$\tau_{aa} = 1 - (1 - \omega_o) \cdot (1 - m_a + m_a^{1.06}) \cdot (1 - \tau_a)$$

El valor del **albedo de dispersión simple** recomendado es:  $\omega_o = 0.9$ .

La **irradiancia difusa por dispersión por aerosoles** es

$$I_{da} = \frac{0.79 \cdot I_{sc} \cdot \cos \theta_z \cdot \tau_o \cdot \tau_g \cdot \tau_w \cdot \tau_{aa} \cdot F_c \cdot (1 - \tau_{as})}{(1 - m_a + m_a^{1.02})}$$

donde  $\tau_{as} = \frac{\tau_a}{\tau_{aa}}$  y  $F_c$  es la relación entre la energía hacia adelante y la energía total dispersada, siendo su valor recomendado de 0.84.

Considerando al **albedo atmosférico** como  $\rho_a' = 0.0685 + (1 - F_c) \cdot (1 - \tau_{as})$

resulta la **irradiancia difusa luego de las múltiples reflexiones entre la Tierra y su atmósfera**

$$I_{dm} = \frac{(I_n \cdot \cos \theta_z + I_{dr} + I_{da}) \cdot \rho_g \cdot \rho_a'}{(1 - \rho_g \cdot \rho_a')}$$

## APÉNDICE II. PANTALLAS TÍPICAS DE ENTRADA Y SALIDA

**Radiación Global Solar**

DATOS | GRAFICAS | TABLAS DE DATOS

### Programa de cálculo de Radiación Solar Global

Fecha =	19 / 05 / 2007	Agua precipitable (cm) =	2.0
Latitud (grados) =	-32,491	Presión Atmosférica (mbar) =	1015
Longitud (grados) =	-58,35	Visibilidad (km) =	10
TL - GMT =	3	Albedo =	0,2
Ozono (Unidades Dobson) =	297	Single scat albedo =	0,9

**La radiación global máxima sobre plano HORIZONTAL es = 611,10 (W/m<sup>2</sup>).**

Figura 7. Pantalla para ingreso de datos para el modelo y visualización del resultado teórico de la irradiancia solar global al mediodía solar.

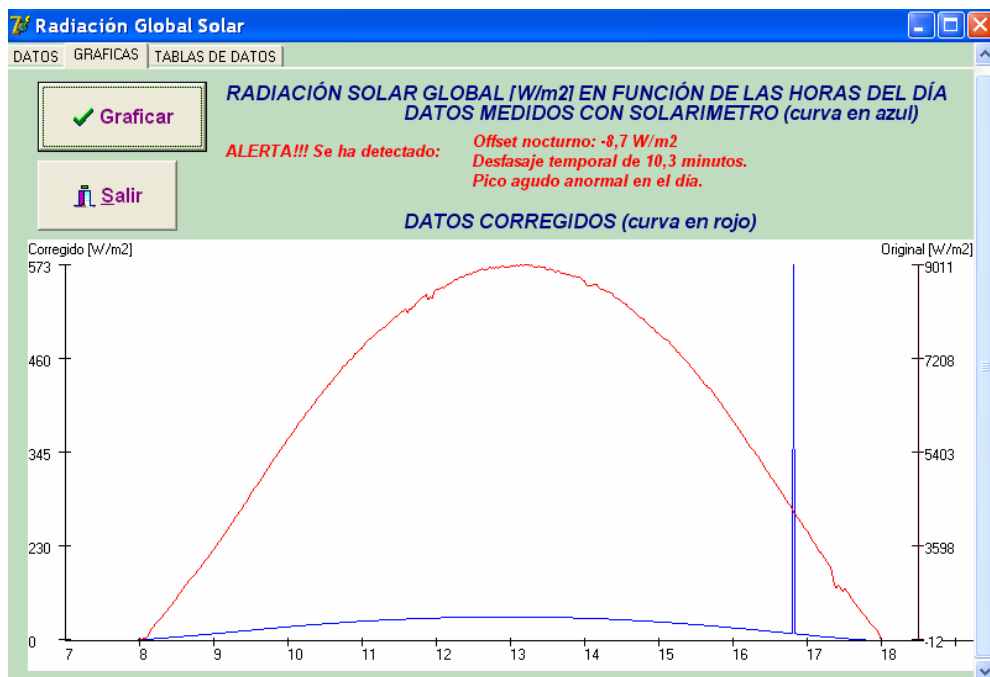


Figura 8. Pantalla de salida con gráficas de la irradiancia solar global al mediodía solar medida con solarímetro (línea azul, escala de la derecha) y corregida (línea roja, escala de la izquierda). Además se reportan las alertas de fallas detectadas.

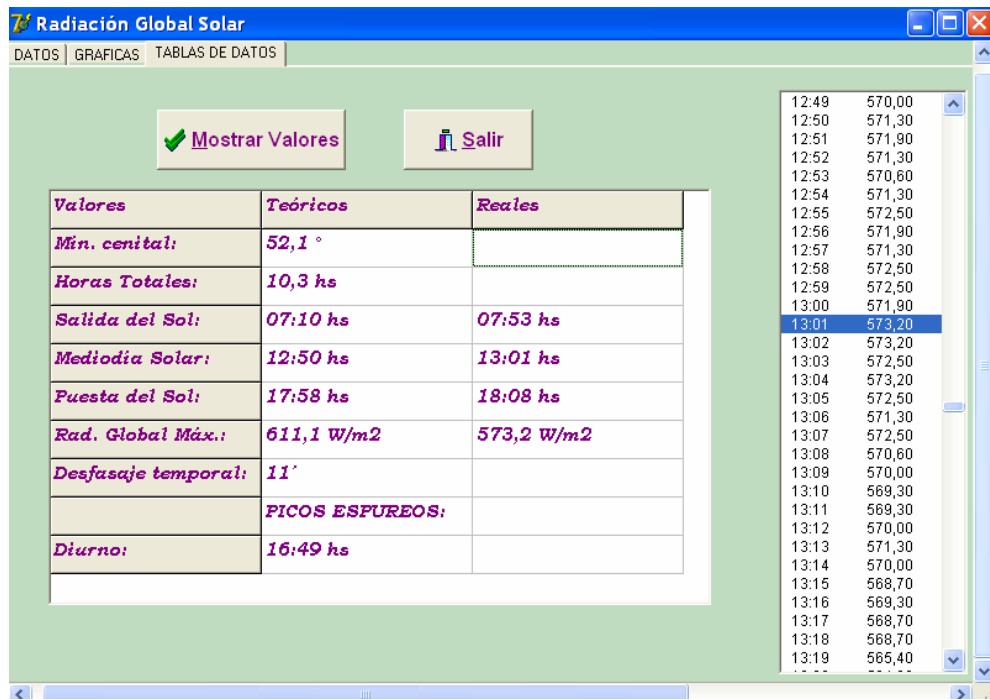


Figura 9. Pantalla de salida con reporte de los resultados de cálculos teóricos y mediciones. Además se presenta una tabla con los datos reales crudos de la irradiancia solar global medida.