

GEOSOL: UNA HERRAMIENTA COMPUTACIONAL PARA EL CÁLCULO DE COORDENADAS SOLARES Y LA ESTIMACIÓN DE IRRADIACIÓN SOLAR HORARIA

Alejandro L. Hernández¹

INENCO – Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional – U.N.Sa. - CONICET

Universidad Nacional de Salta

Buenos Aires 177, 4400, Salta, Argentina

FAX: 54-87-4255489, TE: 54-87-4255579

EMAIL: alejo@unsa.edu.ar

RESUMEN

El conocimiento de la posición del sol a lo largo del día es de suma importancia para todas las aplicaciones que aprovechan la energía solar. Por otra parte, si no se dispone de valores medidos de irradiación solar es necesario contar con métodos analíticos que permitan estimarla. En este trabajo se presenta el programa **GEOSOL V.2.0** para Windows que permite, a través de sus cálculos, cumplir con estos dos objetivos. Su salida gráfica es útil no sólo desde el punto de vista práctico sino también educativo ya que representa la trayectoria del sol en 2D (carta solar) y 3D, posibilitando comparar las diferencias entre invierno y verano y entre distintos lugares del planeta. Posee tres métodos de estimación de irradiación solar: de Page y de Hottel para días claros y de Liu-Jordan para días medios mensuales. Se presenta la validación de los tres métodos con mediciones realizadas en la Universidad Nacional de Salta, denotando un excelente acuerdo entre valores medidos y estimados.

Palabras clave: radiación solar, aplicaciones con energía solar.

EL PROGRAMA GEOSOL V.2.0

GEOSOL es un programa de cálculo y graficación creado por el autor del presente trabajo. Corre bajo Windows y permite obtener, para cualquier lugar y día del año, los siguientes valores numéricos (de J. Duffie & W. Beckman, 1991):

- Horas solares de salida y puesta del sol sobre el horizonte.
- Duración del día.
- Diferencia horaria entre Hora Solar y Hora Oficial.
- Declinación solar para la fecha consignada.
- Angulo horario, altitud y azimut solares, hora por hora, desde la salida hasta la puesta del sol.
- Irradiación solar directa, difusa y total en MJ/m², hora por hora, sobre cualquier superficie especificada por el usuario.

GEOSOL genera, además, un conjunto de gráficos con los cuales se representa:

- La evolución horaria de las irradiaciones solares directa, difusa y total mediante un gráfico de barras.
- La trayectoria del sol sobre la bóveda celeste en 2D (Carta Solar) y 3D (perspectiva isométrica).
- Gráfica de obstáculos a la trayectoria del sol en 2D.

La pantalla principal de **GEOSOL** está dividida en 5 campos según se observa en la figura 1. En el de la derecha, de color gris, y sobre su sector superior se encuentra la ventana para el ingreso de “**Datos del Lugar**”: latitud, longitud, uso horario en horas respecto del tiempo medio de Greenwich (GMT), altitud sobre el nivel del mar, albedo del entorno y día de cálculo. Si se desconoce el uso horario, presionando el botón “**Uso horario (GMT)**” se despliega un planisferio donde se observa que a la Argentina le corresponde el valor -3 (tres horas menos que la correspondiente a Greenwich).

Al presionar el botón “**Albedo**” se despliega una pantalla con los valores de albedo correspondientes a los tipos de coberturas de suelo más comunes. El *n-ésimo* día del año se calcula ingresando la fecha correspondiente en la pantalla que se despliega al presionar sobre el botón “**Día de cálculo**”.

En la ventana denominada “**Datos del plano**” se deben ingresar la pendiente y el ángulo azimutal (en grados) de la superficie sobre la cual se ha de estimar la irradiación solar. La convención de signos empleada en **GEOSOL** es la que figura en la tabla 1.

¹ Integrante del Proyecto Foncyt de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Técnica, FUNDALTES BID 802/OC – AR – PICT 2000 N° 13-09991

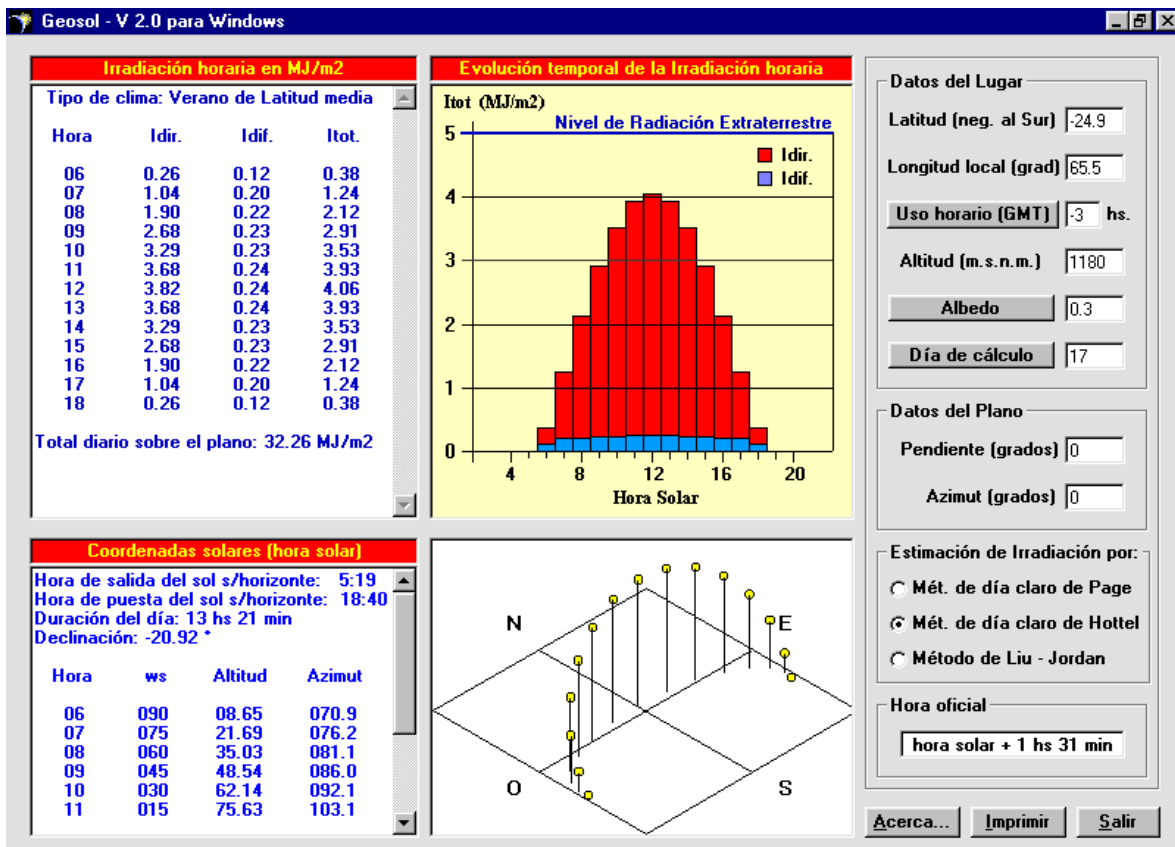


Figura 1: pantalla principal de GEOSOL.

Hemisferio	Angulo horario solar	Azimut solar	Azimut del plano
Sur	0 al Norte, positivo a la mañana	0 al Sur, positivo al Este	0 al Sur, positivo al Este
Norte	0 al Sur, positivo a la mañana	0 al Sur, positivo al Este	0 al Sur, positivo al Este

Tabla 1: convención de signos para los ángulos solares y el azimut del plano colector.

Debajo de la ventana correspondiente a los datos del plano se encuentra la que permite seleccionar el método de estimación de irradiación solar a emplear. GEOSOL incluye tres métodos de cálculo:

- 1) Método de día claro de Page.
- 2) Método de día claro de Hotel.
- 3) Método de Liu-Jordan para día medio mensual.

El primero, aplicable solamente a los días sin nubosidad, fue desarrollado por el grupo del Prof. J. K. Page de la Universidad de Sheffield en la década del '70. Para su uso es necesario dar el contenido de humedad del aire (como presión parcial de vapor) y un parámetro ajustable que depende del lugar, la turbidez atmosférica, la cual toma en cuenta la atenuación de la radiación solar debida al polvo y demás aerosoles presentes en la atmósfera. En cuanto al modelo de cielo considera una distribución anisotrópica de la radiación difusa dividiéndola en dos componentes: isotropa de fondo y circumsolar la que, desde el punto de vista geométrico, se trata como directa. El modelo anisotrópico conduce a valores más realistas de radiación difusa que el modelo isotrópico. Cuando se selecciona este método se despliega la ventana que se muestra en la figura 2.

Dado que la presión parcial de vapor puede calcularse a partir de la temperatura de bulbo seco y de la humedad relativa del aire, se escogieron estas variables como entradas al programa ya que, generalmente, es más fácil contar con valores medidos de humedad y temperatura que de presión parcial de vapor en la zona donde se pretende estimar la radiación solar o en zonas próximas a ella. Por otra parte, GEOSOL calcula la turbidez atmosférica mediante una correlación que depende solamente de la altitud del lugar. Este valor es el que aparece en la casilla titulada "Turbidez atmosférica" y sólo debe cambiarse si se conoce un valor apropiado cuando la atmósfera del lugar presenta altos contenidos de aerosoles debidos a fenómenos anómalos locales (incendios forestales, erupciones volcánicas, densas nieblas, etc.). O bien puede emplearse a la turbidez como parámetro de ajuste si se dispone de valores de radiación solar medidos in situ.

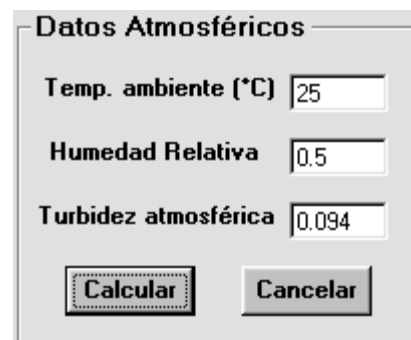


Figura 2: variables del método de Page.

El segundo método utiliza para la estimación de la irradiancia solar directa sobre una superficie normal al haz la ecuación empírica de Hottel (1976), válida hasta los 2.500 m.s.n.m con una visibilidad de 23 Km. Para la estimación de la radiación difusa, **GEOSOL** emplea también en este caso el modelo de cielo anisotrópico de Page. Cuando se selecciona este método se despliega la ventana “**Tipo de Clima**” que se muestra en la figura 3.

La ecuación de Hottel incluye en su formulación tres coeficientes cuyos valores dependen de la altitud del lugar y de cuatro posibles tipos de clima. En aquellas regiones del planeta en que no existe una marcada diferencia entre inviernos y veranos (latitudes entre el Ecuador y los Trópicos) puede seleccionarse el tipo de clima “**Tropical**”. Entre los trópicos y los polos la diferenciación entre invierno y verano aumenta sustancialmente y deben emplearse las opciones “**Verano de Latitud media**” e “**Invierno de Latitud media**” según la época del año. Para latitudes próximas a los círculos polares puede emplearse el tipo de clima **Verano Subártico**. Sin embargo, debe recordarse que sólo en el hemisferio Norte existen tierras habitadas a ambos lados del círculo polar. Evidentemente con este método no hay tanta flexibilidad como en el anterior a la hora de intentar el ajuste de valores de radiación medidos. Una vez seleccionado el tipo de clima se procede a efectuar los cálculos, como en el caso anterior, clickeando sobre el botón “**Calcular**”.

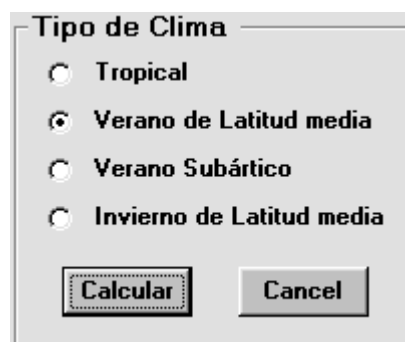


Figura 3: climas para el método de Hottel.

Por su parte, el método conocido como “de Liu – Jordan” (Liu B. y Jordan R., 1960) permite estimar las irradiaciones horarias directa y difusa sobre cualquier superficie a partir de la irradiancia solar global diaria media mensual sobre superficie horizontal. Este dato es el promedio de todos los valores diarios de irradiancia solar global registrados durante un mismo mes del año, promediados además a lo largo de varios años. Su valor, único para todo el mes, representa la cantidad de energía solar promedio que incide por cada m² de superficie horizontal a lo largo de un día, se mide en MJoule/m² y puede obtenerse consultado las tablas editadas por el Servicio Meteorológico Nacional o los registros existentes en los aeropuertos más cercanos a la localidad de interés. Dado que deriva de un promedio entre días que pueden ser claros, seminublados o nublados, su valor es más conservativo que el correspondiente a los dos métodos anteriores. Cuando se selecciona este método se despliega la ventana que se muestra en la figura 4.

Luego de ingresar el valor de la irradiancia solar diaria, **GEOSOL** permite seleccionar entre dos modelos de cielo para el tratamiento de la radiación difusa: *anisotrópico* e *isotrópico*. En el primer caso utiliza el modelo de Reindl et al. (1990) basado en la hipótesis de que toda la radiación difusa puede ser representada por tres componentes: isotrópica de fondo, circumsolar y difusa de horizonte. En el segundo caso toda la radiación difusa proviene en forma isotrópica desde la bóveda celeste. Sobre superficies inclinadas, el modelo *anisotrópico* conduce a valores de radiación estimada sensiblemente superiores (alrededor del 7 %) respecto de los obtenidos con el modelo *isotrópico*.

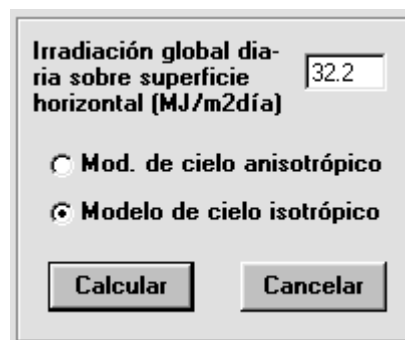


Figura 4: ventana desplegada al seleccionar el método de Liu – Jordan.

Una vez seleccionado el método de cálculo, clickeando sobre el botón “**Calcular**” correspondiente se actualizan los otros cuatro campos de la pantalla principal y se generan dos archivos en código ASCII: **resultados.dat** con los valores de las irradiaciones horarias y **angulos.dat** con las coordenadas solares. Según se observa en la figura 1, en el sector superior izquierdo de la pantalla figuran los valores de las irradiaciones horarias directa, difusa y total, hora por hora, desde la salida hasta la puesta del sol. Presenta, además, el valor de irradiancia total diaria sobre la superficie escogida. En el sector superior central se grafica la evolución temporal de los valores horarios donde, con color rojo, se representa a la componente directa y con turquesa a la difusa. El máximo valor de irradiancia solar disponible corresponde a su valor normal al haz fuera de la atmósfera (Radiación Extraterrestre) y ha sido representado en color azul para su comparación con los valores obtenidos a nivel del suelo. El sector inferior izquierdo presenta los valores de las horas solares de salida y puesta del sol, la duración del día, la declinación solar y los ángulos horario (ws), altitud y azimut solares, hora por hora. En el sector inferior derecho se encuentra una ventana con la diferencia entre la hora solar y la oficial para ese día. Finalmente, en el sector inferior central se representa, mediante un gráfico 3D en perspectiva isométrica, la trayectoria seguida por el sol a lo largo del día. Esta forma de visualizar el movimiento del sol es muy interesante desde el punto de vista educativo ya que permite comparar rápidamente las marcadas diferencias existentes entre el invierno y el verano y entre distintos puntos del planeta.

En la figura 5 se representa la trayectoria del sol el día 17 de enero en 4 latitudes distintas. El caso (a) corresponde al invierno en el hemisferio Norte por lo que el sol se mueve sobre un plano inclinado al Sur mientras que (c) y (d) corresponden al verano en el hemisferio Sur por lo que el sol se mueve sobre un plano inclinado al Norte.

Si se clickea con el mouse sobre el gráfico 3D, se despliega la pantalla con la Carta Solar mostrada en la figura 6. Esta carta es una representación 2D de la esfera celeste vista desde el cenit, en la cual se grafica la trayectoria del sol mediante sus coordenadas angulares de *altitud* (círculos de color azul) y *azimut* (radios de color rojo).

El puntero del mouse se mueve exclusivamente sobre la curva de la trayectoria (color verde) a fin de facilitar la determinación de la posición del sol en cualquier instante del día, la que aparece en la ventana titulada “**Valores instantáneos**” sobre el sector inferior izquierdo.

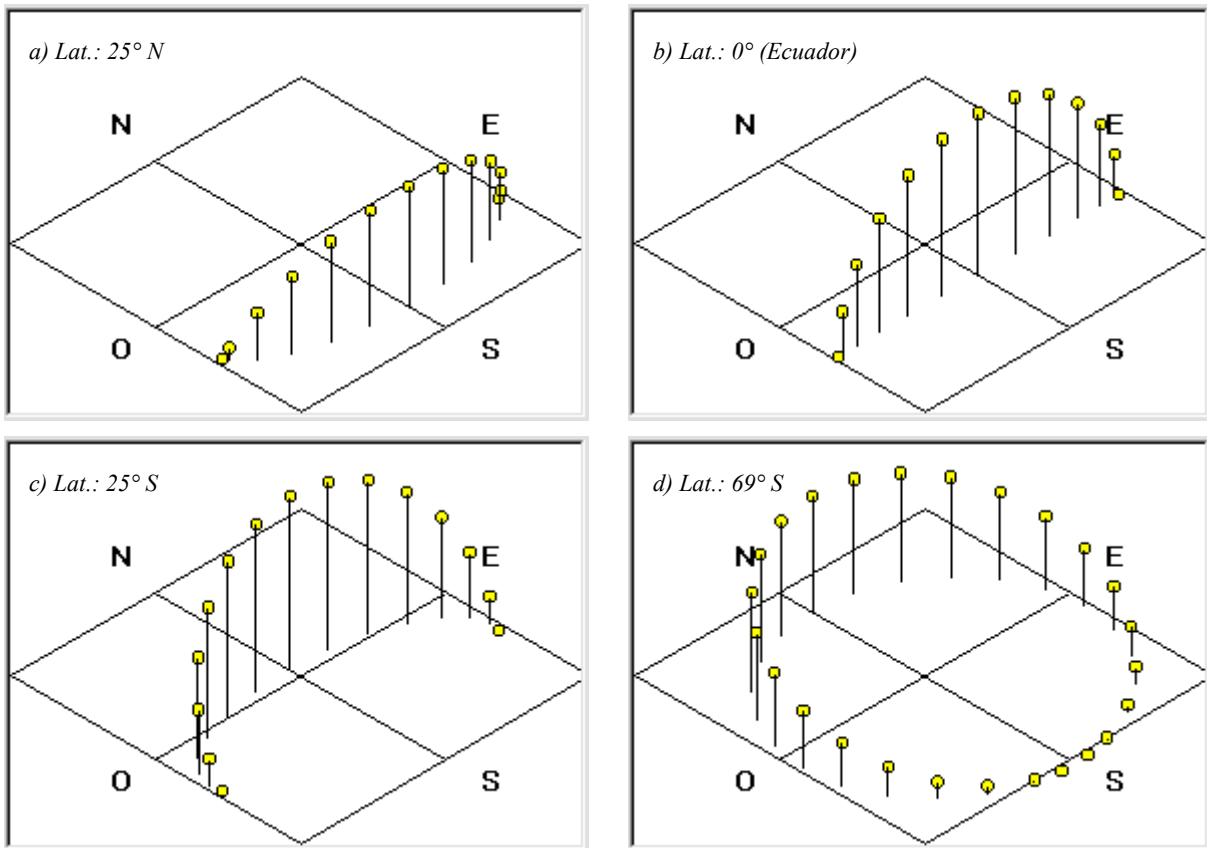


Figura 5: trayectoria del sol el día 17 de Enero en 4 latitudes distintas: 25° N, Ecuador, 25° S y 69° S.

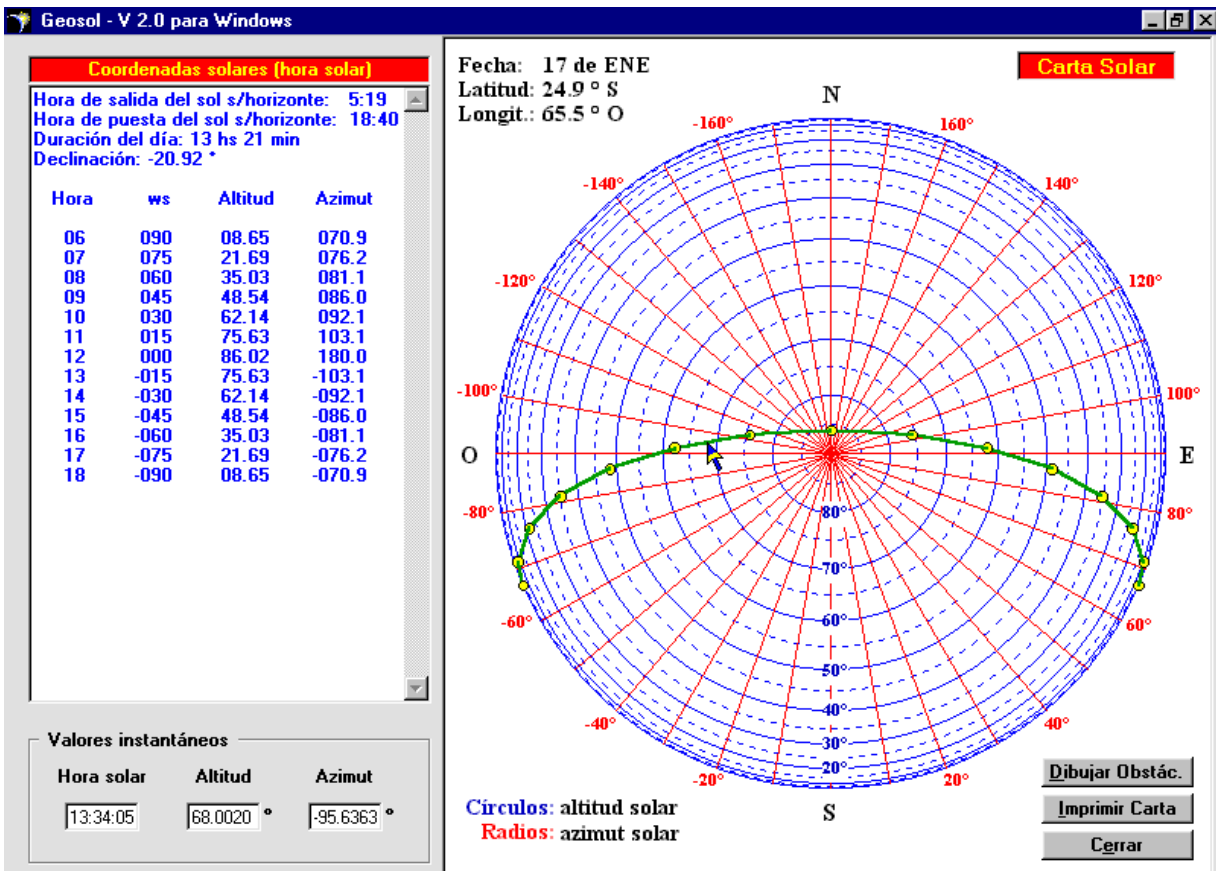


Figura 6: pantalla con la carta solar y los valores de las coordenadas solares instantáneos y hora por hora.

La carta solar puede imprimirse clickeando sobre el botón “**Imprimir Carta**” con lo cual se dispone de una útil herramienta de campo cuando se deben realizar instalaciones solares en lugares remotos donde resulta imposible utilizar una PC. Presionando sobre el botón “**Dibujar Obstác.**” se despliega la pantalla del graficador de obstáculos que se observa en la figura 7. Cuando se elige el lugar de emplazamiento de algún artefacto solar (colectores, cocinas, paneles fotovoltaicos, etc.) resulta conveniente saber si los objetos alrededor de él (casas, árboles, instalaciones, etc.) han de sombreado en alguna época del año. Si se miden los ángulos de azimut y altitud de cada vértice de los obstáculos presentes en el lugar y se los grafica juntamente con la trayectoria del sol, se puede analizar en qué momentos del día o del año el sol queda apantallado. El graficador de obstáculos de **GEOSOL** permite realizar esta tarea ya que, cuando se lo invoca, aparece el gráfico 2D de la figura 7 sólo con la trayectoria del sol para la fecha elegida y, con las herramientas de dibujo que contiene, se procede a dibujar los obstáculos de la misma forma que se dibuja con el Paint de Windows. A fin de facilitar la tarea, en las ventanas ubicadas arriba a la derecha figuran los valores del azimut y la altitud del punto señalado por el puntero el mouse.

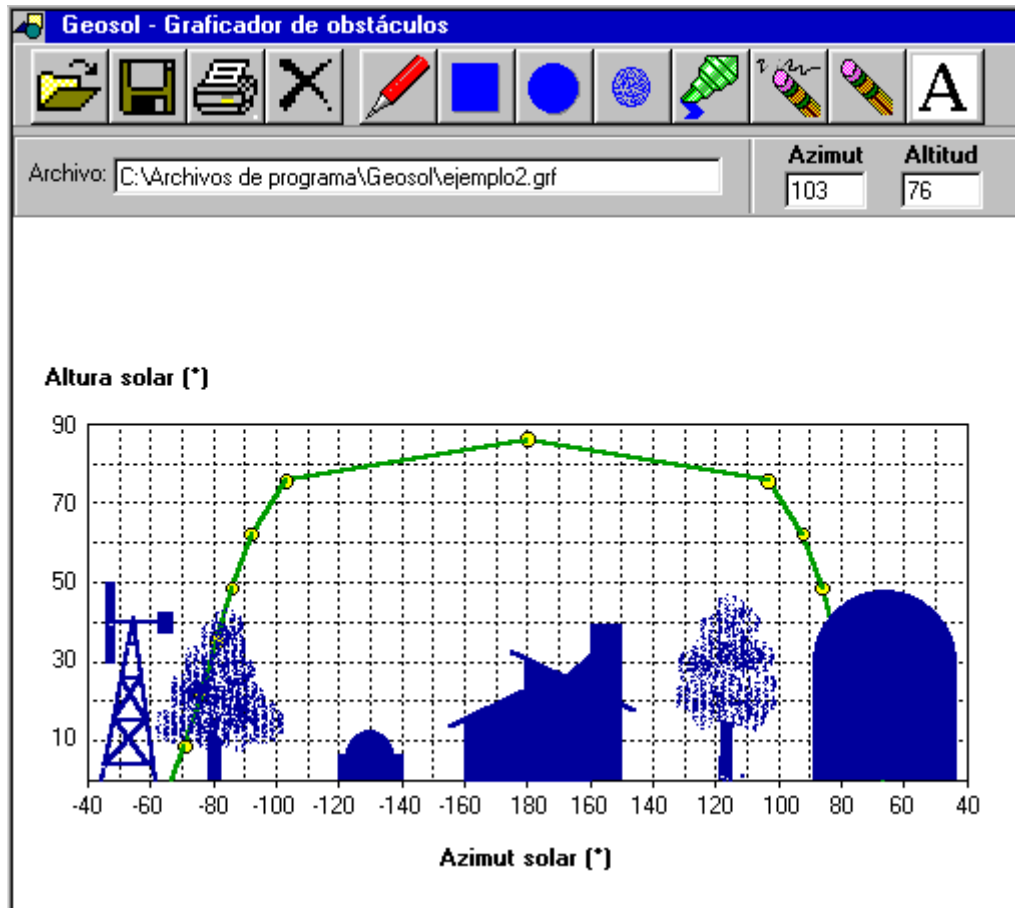


Figura 7: pantalla del graficador de obstáculos en 2D con un ejemplo correspondiente al día 17 de Enero en Salta.

Una vez finalizado el dibujo se lo puede guardar en un archivo con extensión “.grf” que sólo contiene las figuras de color azul. De esta forma, se puede cambiar la fecha de cálculo para ver qué ocurre en otra época del año pero el dibujo de los obstáculos (que aparecerá cuando se cargue el archivo “.grf”) seguirá siendo el mismo. En el ejemplo de la figura se observa que, para el día 17 de Enero en Salta, el edificio ubicado al Sudeste apantalla el sol durante las 3 primeras horas de la mañana, mientras que el árbol ubicado al Sudoeste lo hace entre las 15:30 y las 18:00, hora solar.

VALIDACIÓN DE LOS VALORES DE IRRADIACIÓN TOTAL HORARIA ESTIMADOS CON GEOSOL

En la figura 8 se comparan los resultados arrojados por los tres métodos de estimación de **GEOSOL** con valores medidos sobre superficie horizontal, un día 7 de Julio, en la Universidad Nacional de Salta. Debido a que no se efectuaron medidas diferenciadas de irradiancia directa y difusa, la comparación corresponde a los valores globales. De acuerdo a los datos medidos se empleó una temperatura media de 6 °C y una humedad relativa media del 68% para el método de Page, resultando una presión de vapor de 6,43 mb y una turbidez atmosférica de 0,092 (correspondiente a 1.230 m.s.n.m.). Para el método de Hottel se seleccionó el tipo de clima **Invierno de Latitud media** y para el de Liu-Jordan se ingresó una irradianción global diaria sobre superficie horizontal de 15,9 MJ/m², valor obtenido a partir de las mediciones.

Según se observa en la figura, el acuerdo entre los valores medidos y estimados por los tres métodos es significativo. Se aprecia cierta asimetría en las mediciones después del mediodía solar, lo que puede responder a condiciones atmosféricas particulares (cristales de hielo en la alta atmósfera, etc.). Los tres métodos arrojaron valores levemente inferiores a los medidos pero el ajuste es suficientemente bueno para realizar predicciones, por lo menos en días claros.

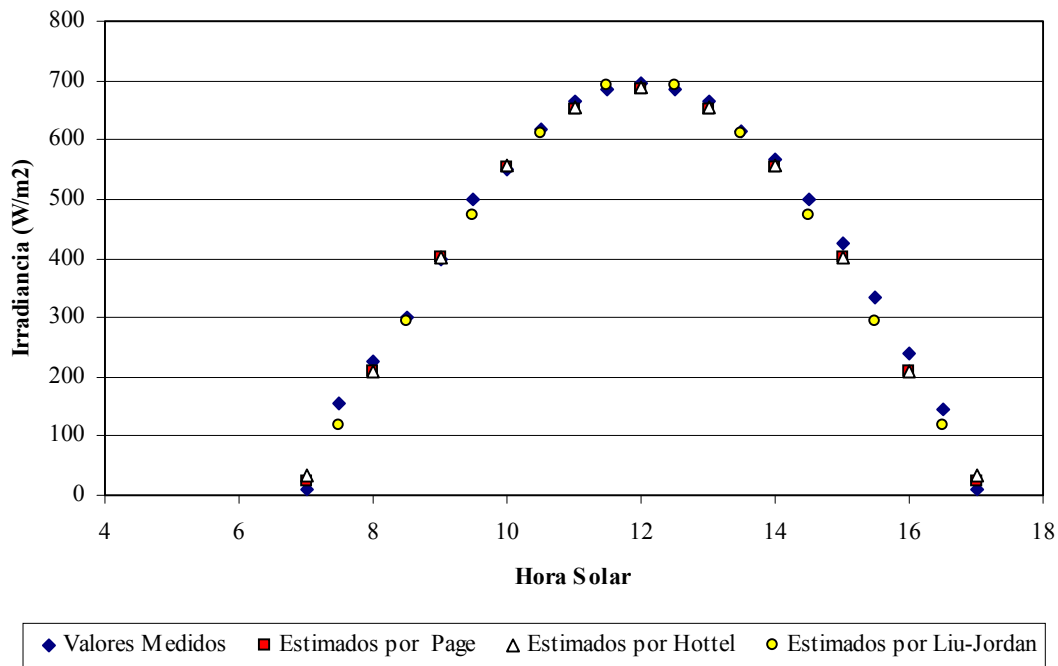


Figura 8: comparación de valores de irradiancia global medidos y estimados con GEOSOL.

CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la versión 2.0 para Windows del programa **GEOSOL** cuya primera versión, que data del año 1991, corría bajo DOS. Las mejoras introducidas comprenden principalmente a la parte gráfica y la inclusión del método de estimación de irradiancia solar de Page. Se subsanaron además algunos errores existentes en el cálculo del ángulo azimutal del sol y se incluyeron dos modelos de cielo anisotrópico para el cálculo de la radiación difusa.

Los excelentes resultados obtenidos al validar los valores calculados por el programa con los medidos en la Universidad Nacional de Salta evidencian su potencialidad como herramienta de estimación cuando no se dispone de valores de radiación solar medidos en el lugar donde se ha de realizar algún tipo de aprovechamiento solar. La utilización de uno u otro método dependerá de los datos de que se disponga. Así, si sólo se conoce la ubicación y altura del lugar deberá emplearse el método de Hottel. Si además se dispone de valores de temperatura y humedad relativa media se podrá utilizar el método de Page y si sólo se conoce el valor de la irradiancia diaria media mensual sobre superficie horizontal deberá emplearse el método de Liu-Jordan. Con cualquiera de los tres métodos se pueden realizar estudios para determinar la pendiente óptima de una superficie colectora de acuerdo al tipo de aprovechamiento (estacional o anual) que se desee realizar con ella. La carta solar y el graficador de obstáculos son dos valiosas herramientas a la hora de instalar colectores solares o paneles fotovoltaicos ya que proporcionan toda la información necesaria sobre el posicionamiento del sol a lo largo del día y su posible apantallamiento, en cualquier época del año, con los obstáculos circundantes al predio elegido para la instalación. El gráfico 3D de la trayectoria del sol es muy interesante desde el punto de vista educativo ya permite comparar cualitativamente las diferencias existentes entre el invierno y el verano y entre distintos puntos del planeta. Estos tres gráficos y todos los datos numéricos calculados con **GEOSOL** pueden imprimirse para su almacenamiento en papel.

REFERENCIAS

- Duffie, J. A. & Beckman, W. A., 1991, *Solar Engineering of Thermal Processes*, Wiley – Interscience Publications, USA.
- Hottel, H. C., (1976), A Simple Model for Estimating the Transmittance of Direct Solar Radiation Through Clear Atmospheres, *Solar Energy* **18**, 129.
- Liu, B. y Jordan, R., (1960), The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation, *Solar Energy*, **4**(3), 1.
- Reindl, D., Beckman, W. and Duffie, J., (1990), Evaluation of Hourly Tilted Surface Radiation Models, *Solar Energy*, **45**, 9.

ABSTRACT

The knowledge of the solar position along the day is of supreme importance for all the applications that take advantage of the solar energy. On the other hand, if we don't have measured values of solar irradiation it is necessary to have analytic methods that allow to estimate it. In this work the code **GEOSOL V.2.0** for Windows who allows, through its calculations, to fulfill these two objectives is presented. Its graphic output is useful not only from a practical point of view but also educational since it represents the trajectory of the sun in 2D (solar chart) and 3D, facilitating to compare the differences between winter and summer and between different places of the planet. It possesses three methods to estimate solar irradiation: Page and Hottel methods for clear days and Liu-Jordan method for means monthly days. The validation of three methods with mensurations carried out in the National University of Salta is presented, denoting an excellent agreement between measured and estimated values.