

# ESTIMACIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR EMPLEANDO UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA. PRESENTACIÓN DE SolarGIS

J.L. Torres<sup>1</sup>, M. de Blas<sup>1</sup>, A. Gracia<sup>1</sup>, A. García<sup>1</sup>, A. Huarte<sup>2</sup>, I. Díaz de Cerio<sup>2</sup>, A. Garrués<sup>3</sup>, G. Vargas<sup>4</sup> y L. Baigorrotegui<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Torres, José Luis; de Blas, Marian; Gracia, Ana; García, Almudena. Universidad Pública de Navarra. España

<sup>2</sup> Huarte, Alvaro; Díaz de Cerio, Iñaki. Tracasa S.A. España

<sup>3</sup> Garrués, Ana. AC Solar XXI. España

<sup>4</sup> Vargas, Gustavo. ah Asociados. España

<sup>5</sup> Baigorrotegui, Luis. CyC. España

## RESUMEN

Conocer la energía solar incidente sobre cualquier superficie es de gran importancia a la hora de seleccionar el emplazamiento óptimo de los sistemas de aprovechamiento de energía solar, calcular la energía producida por éstos y diseñar edificios energéticamente eficientes. En entornos urbanos, además del amplio abanico de posibles orientaciones e inclinaciones a analizar, los obstáculos adyacentes han de quedar referenciados con respecto al plano de captación de interés, a fin de poder evaluar su influencia sobre el recurso solar disponible. La herramienta informática SolarGIS desarrollada por los autores permite estimar la radiación solar disponible en un determinado plano sin necesidad de tener que desplazarse hasta el emplazamiento definitivo para posicionar los diferentes obstáculos, gracias a la integración de información cartográfica y geométrica mediante un Sistema de Información Geográfica (GIS). Dicha información, junto con datos de irradiancia global sobre plano horizontal, permiten la estimación de la radiación solar incidente sobre cualquier plano, empleando un modelo de cielo. De este modo, la información cartográfica proporcionada por el GIS permite tanto una rápida estimación del recurso solar disponible en un emplazamiento concreto, como un estudio detallado de amplias zonas urbanas donde instalar nuevos sistemas de aprovechamiento solar.

## PALABRAS CLAVE

Energía, solar, GIS

## ABSTRACT

It is very important to know the incident solar radiation on different surfaces in order to select suitable locations, to calculate the energy production in solar collection systems and to design energy efficient buildings. In urban locations, in addition to the wide range of orientations and inclinations to analyze, obstacles must be positioned with respect to the collection plane so as to evaluate their incidence on the available solar resource. A computer tool developed by the authors is presented for evaluating the solar radiation in urban environments that makes unnecessary to stay in the solar collection emplacement for positioning the obstacles. The developed computer program couples the necessary cartographic and geometrical information, supplied by a Geographical Information System (GIS), to the information corresponding to global solar radiation on a horizontal plane. A sky model is used to calculate the solar radiation on a tilted plane. In this way, the cartographic support supplied by the GIS facilitates both a rapid determination of the available solar resource in an exact location or the study of wide urban areas.

## KEYWORDS

Solar, energy, GIS

## 1. INTRODUCCIÓN

El conocimiento de la iluminación y radiación solar incidente sobre planos de diferentes orientaciones e inclinaciones es muy importante, tanto para facilitar la elección de emplazamientos adecuados y la estimación realista de la producción de energía de sistemas de captación solar, como para el diseño de edificios energéticamente eficientes.

En la mayoría de las ocasiones, la citada información no está disponible, aun siendo altamente demandada, por ejemplo, en el desarrollo de planes urbanísticos orientados a la construcción de viviendas y edificios donde se quiere llevar a cabo un buen uso de la energía, o por los departamentos de ingeniería de las empresas de energía solar. Como muestra, la Agencia Internacional de la Energía (IEA) promueve la obtención de datos de radiación solar estandarizados, con mejor fiabilidad y disponibilidad y con mayor cobertura espacial y temporal, así como productos para la evaluación de recursos solares adaptados a la demanda de proyectistas y empresas del sector de la energía solar. El fin que se persigue con ello es conseguir información más completa y fiable sobre el recurso solar. En este sentido, en los últimos años se han venido llevando a cabo investigaciones y trabajos que tratan de mejorar la calidad de las bases de datos existentes, establecer modelos cada vez más precisos y estandarizar los archivos informáticos que sirven de soporte de la información.

Con el fin de mejorar las estimaciones de radiación solar y superar las simplificaciones que los modelos normalmente empleados asumen, y que implican pérdida de precisión y alejamiento de la realidad física, un número notable de trabajos de investigación se ha orientado al desarrollo de modelos matemáticos sobre distribución angular de luminancia y radiancia en la bóveda celeste. Con ellos es posible determinar, de forma más precisa, la iluminación y radiación solar existentes en terrenos complejos y en entornos urbanos, donde se dan simultáneamente las condiciones de gran variabilidad de orientaciones e inclinaciones y la presencia de obstáculos. De forma paralela, se están elaborando programas informáticos cada vez más complejos para el análisis energético de edificios, que necesitan la información aportada por los citados modelos matemáticos como datos de entrada.

La incorporación de Sistemas de Información Geográfica convierte a la herramienta informática SolarGIS que se presenta en este trabajo en un instrumento eficaz para los diversos usuarios, ya que por un lado, elimina la necesidad de efectuar las correspondientes visitas para fijar la posición de los posibles obstáculos y, por otro, facilita el análisis conjunto de zonas relativamente grandes.

Mediante SolarGIS se podrán obtener resultados de radiación solar disponible para cortos intervalos de tiempo, bien de forma gráfica o numérica, según el interés del usuario, lo que aumentará indudablemente la fiabilidad de las estimaciones de producción energética mediante energías renovables de instalaciones situadas en emplazamientos determinados o de otras aplicaciones donde sea necesario conocer de forma precisa la disponibilidad del recurso solar.

Así, los objetivos del trabajo desarrollado por los autores son:

- Determinar de forma precisa y en cortos periodos de tiempo, la radiación global, difusa y directa incidente en cualquier plano situado en un terreno complejo o entorno urbano.
- Desarrollar un modelo geográfico que facilite la consideración de los obstáculos en la radiación incidente sobre el plano de captación.
- Desarrollar una nueva tecnología que permita determinar la radiación global incidente en las ciudades considerando las zonas edificadas, infraestructuras existentes, espacios públicos, etc.
- Evaluar y seleccionar emplazamientos para el aprovechamiento activo de la energía solar y el diseño de edificios bioclimáticos.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. INSTRUMENTOS PARA LA MEDIDA DE LA RADIACIÓN SOLAR

El valor de la irradiancia global sobre plano horizontal es la medición de energía solar más comúnmente registrada en las estaciones de medida y es, por tanto, el dato de entrada seleccionado para comenzar el proceso de cálculo. Sin embargo, el algoritmo de cálculo para estimar radiación global sobre planos inclinados distingue entre irradiancia difusa y directa, siendo por ello necesario descomponer el valor de irradiancia global en sus dos componentes mediante un modelo matemático adecuado, como se describirá en el siguiente apartado.

Para realizar los análisis previos y seleccionar el modelo más conveniente, se han necesitado medidas experimentales de irradiancia global y difusa sobre plano horizontal, así como de irradiancia directa. La base de datos experimentales se ha obtenido gracias a dos piranómetros y un pirheliómetro situados en un seguidor solar que garantiza el seguimiento solar tanto del pirheliómetro como de la bola que sombrea a uno de los piranómetros para el registro de la irradiancia difusa. (Figura 1)

Para describir el origen direccional de la componente difusa de la energía solar se emplea un modelo de distribución angular que permite cuantificar la radiación difusa procedente de diferentes zonas de la bóveda celeste. Inicialmente, los valores resultantes de la aplicación de varios modelos que se describen en el siguiente apartado se com-

pararon con medidas experimentales, para seleccionar el más adecuado. A diferencia de instrumentos de medida como los piranómetros, los equipos necesarios para registrar lecturas de radiancia y luminancia no son tan comunes ni están tan experimentados. La figura 2 muestra uno de estos equipos, el Sky Scanner desarrollado por EKO, el cual mediante dos sensores registra tanto medidas de radiancia como de luminancia. Ambos sensores están dispuestos sobre un cabezal móvil a dos ejes que permite realizar lecturas en 145 posiciones distintas, cubriendo toda la bóveda celeste.



Fig.1: Seguidor solar con dos piranómetros, con sistema de ventilación, para la medición de irradiancia global y difusa (situados sobre plano horizontal) y un pirheliómetro para el registro de irradiancia directa. La bola negra permite sombrear el piranómetro que registra irradiancia difusa.



Fig.2: Sky scanner EKO dispuesto de dos sensores para medir radiancia y luminancia (izquierda) y diagramas de la distribución en los diferentes sectores de medidas de luminancia (centro) y radiancia (derecha).

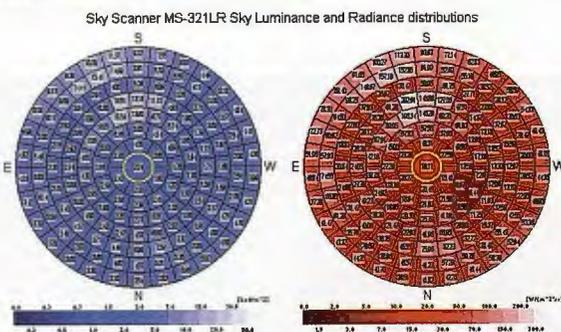


Fig.3 a: Cámara de cielo para tomar fotografías del cielo.

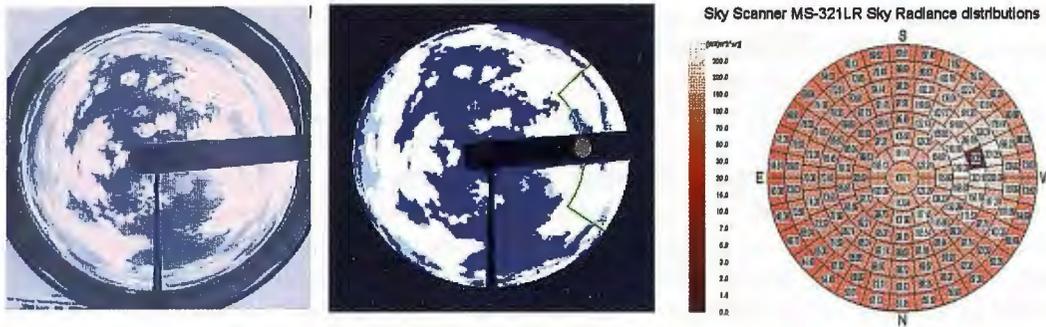


Fig.3 b: Ejemplo de una de las fotografías tomadas por la cámara (izquierda), imagen procesada por el equipo (centro) y la correspondiente distribución angular de lecturas de radiancia registradas por el equipo SkyScanner EKO (derecha).

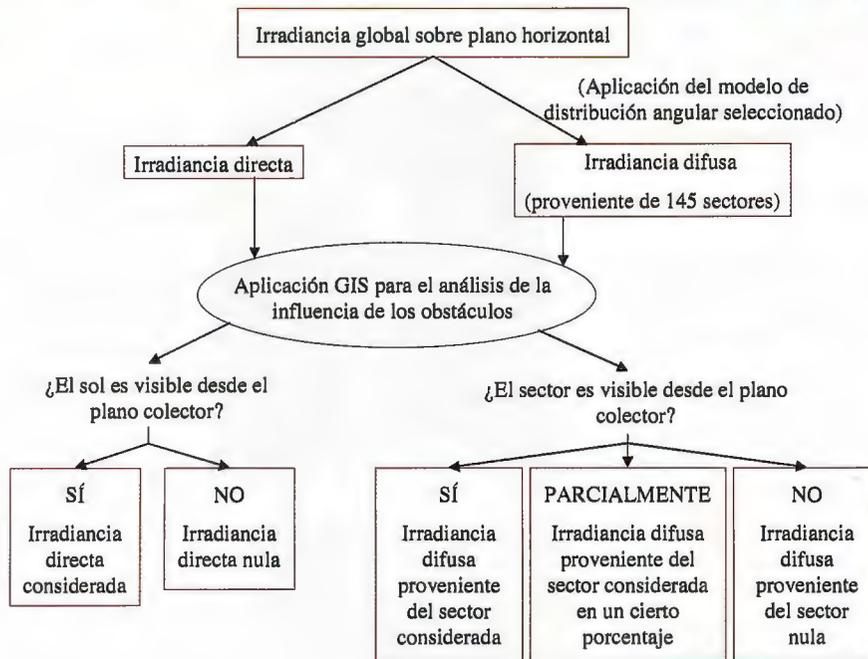


Fig 4: Integración del soporte GIS en el cálculo de la radiación solar incidente sobre el plano de captación, lo que hace innecesario el posicionarse en su emplazamiento para describir la distribución y posición relativa de los obstáculos.

Una cámara de cielo (Figura 3), sincronizada con el resto de instrumentos de medida, se emplea para disponer de información sobre las condiciones de cielo, ya que es necesario conocer el estado del cielo, que pueden variar entre cubierto, despejado o intermedio, para seleccionar los coeficientes incluidos en el modelo de distribución angular a aplicar.



Fig. 5. Entorno urbano generado por la herramienta Map Editor™. El plano de captación solar puede ser colocado en el punto de interés y la energía solar incidente sobre el mismo puede ser estimada teniendo en cuenta la incidencia de los obstáculos.

## 2.2. MODELOS PARA ESTIMAR LA RADIACIÓN SOLAR INCIDENTE SOBRE PLANOS INCLINADOS

En cuanto a datos de radiación solar, el único dato de entrada es la lectura de irradiancia global sobre plano horizontal. No obstante, debido al origen direccional de la radiación solar, es necesario tener en cuenta tanto la com-

ponente difusa como la directa. Dado que estas componentes rara vez se encuentran disponibles en las estaciones de medida, deben ser estimadas. A tal propósito, fueron analizados varios modelos como los que emplean correlaciones polinómicas de diferentes órdenes (Jacovides et al. 2006), modelos basados en funciones logísticas (Boland et al., 2001), el modelo propuesto por Skarveit et al

(1998) o el modelo DirInt (Perez et al, 1992). Este último planteamiento es el que finalmente se implementó dentro de la herramienta informática para la estimación de las componentes difusa y directa, al proporcionar los resultados más satisfactorios.

Mientras la irradiancia directa se puede describir como procedente de un único punto, la componente difusa no puede considerarse homogéneamente distribuida a lo largo de la bóveda celeste, al estar fuertemente influenciada por la posición aleatoria de las nubes, su movimiento, etc. Modelos sencillos (Perez, 1987, 1988; Reindl et al, 1990) separan la bóveda celeste entre tres zonas: una paralela al horizonte, denominada banda de horizonte;

una segunda zona alrededor del sol o zona circumsolar, y por último, el resto de la bóveda que es considerada homogénea. No obstante, existen otros planteamientos más complejos y próximos a la realidad física, como los modelos desarrollados por Perez (Perez et al., 1993), Brunger (Brunger et al., 1993) o Igawa (Igawa et al., 2004), que per-

miten estimar de manera continua a lo largo de la bóveda celeste, los valores absolutos de radiancia y/o luminancia en cualquier punto en función de la posición relativa de éste con respecto al sol. Una versión calibrada del modelo descrito por Perez et al. (1993) se ha integrado en el software desarrollado. En este modelo, la radiancia se considera procedente de 145 posiciones distintas distribuidas en la bóveda celeste, tal y como fueron descritas por Tregenza (Tregenza y Sharples, 1993).

### 2.3. APLICACIÓN DE UN SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICO (GIS)

La mayor ventaja del programa informático desarrollado para la estimación de irradiancia solar es la integración de un sistema de información geográfica (GIS) que aporta información sobre las características geográficas del emplazamiento del sistema de aprovechamiento de energía solar y de sus alrededores. Dicha información geográfica se incorpora al proceso de cálculo de la radiación solar incidente sobre cualquier superficie, al permitir la consideración, no sólo del posible bloqueo del disco solar por parte de los obstáculos y que afecta a la irradiancia directa, sino también de la irradiancia difusa procedente de los diferentes sectores en que queda dividida la bóveda celeste y que son visibles para el plano de captación solar. La figura 4 muestra un diagrama que ilustra la contribución del GIS al proceso de cálculo. Habiendo dividido la bóveda celeste en 145 sectores, el GIS permite conocer con exactitud los sectores visibles desde un determinado emplazamiento, así como las superficies y obstáculos que bloquean los otros sectores, haciendo innecesario tener que analizar *in situ* la influencia de los obstáculos. En una siguiente etapa, se podrá estimar la aportación de energía solar reflejada procedente de sectores total o parcialmente bloqueados por obstáculos, siguiendo el procedimiento desarrollado por Robinson y Stone (2004, 2005).

Así, la irradiancia global incidente sobre un plano de captación cualquiera se obtiene considerando, por un lado, la irradiancia directa, en caso de que el sol sea visible, y por otro lado, la irradiancia difusa. Esta última puede descomponerse en tres sumandos:

a) Irradiancia difusa procedente de la parte visible de la bóveda celeste,  $I_{d,bov,\beta}$  (Ec. 1)

$$I_{d,bov,\beta} = \sum_{i=1}^p R_i \cdot \phi_i \cdot \sigma_i \cdot \cos \zeta_i \quad (1)$$

$R_i$ : radiancia del sector de la bóveda celeste (proporcionada por el modelo de distribución angular de radiancia)

$\phi_i$ : ángulo sólido subtendido desde el plano de captación por el sector  $i$

$\sigma_i$ : proporción en que el sector  $i$  es visto ( $0 \leq \sigma_i \leq 1$ )

$\zeta_i$ : ángulo entre el sector y el plano de captación

$p$ : número de sectores en que se divide la bóveda celeste (habitualmente 145)

b) Irradiancia difusa procedente de la reflexión sobre los obstáculos situados a mayor cota que el plano de captación,  $I_{d,\rho,u,\beta}$  (Ec 2)

$$I_{d,\rho,u,\beta} = \sum_{i=1}^p \left( \frac{I_{g\beta} \cdot \rho}{\pi} \right) \phi_i \cdot (1 - \sigma_i) \cos \zeta_i \quad (2)$$

$\rho$ : Reflectancia de la superficie del obstáculo

$I_{g\beta}$ : Irradiancia global sobre la superficie del obstáculo

c) Irradiancia difusa procedente de la reflexión sobre los obstáculos situados a menor cota que el plano de captación,  $I_{d,\rho,i,\beta}$  (Ec 3)

$$I_{d,\rho,i,\beta} = \sum_{i=1}^p \left( \frac{I_{g\beta} \cdot \rho}{\pi} \right) \phi_i \cdot \cos \zeta_i \quad (3)$$

## 3. RESULTADOS

El programa informático SolarGIS, desarrollado de acuerdo a las características descritas en los apartados anteriores, será comercializado en los próximos meses. La estructura y las características básicas de SolarGIS se describen en el presente apartado.

### 3.1. INTRODUCCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA

#### 3.1.1. Radiación solar

El programa necesita valores medios horarios de irradiancia global sobre plano horizontal para un período de un año, aunque en caso de no disponer de ellos, se pueden tratar series temporales más cortas. El usuario puede proporcionar estos datos procedentes de múltiples fuentes, si bien con un formato adaptado a las necesidades del programa. Además, SolarGIS dispone de una base de datos interna que incluye datos de irradiancia de varias ciudades de España y de otros países. En caso de que el usuario disponga de datos medios diezminutales, como, por ejemplo, los registrados en las estaciones meteorológicas, pueden ser introducidos con este intervalo temporal en el programa, al contar éste con un módulo que genera los correspondientes valores medios horarios necesarios para el cálculo posterior.

#### 3.1.2. Modelo digital del terreno

El programa SolarGIS incluye el sistema de información geográfica, basado en la herramienta Map Editor™. Esta aplicación informática de diseño permite definir y representar de forma sencilla entornos complejos y urbanos, así como incorporar nuevas edificaciones dentro de un entorno previamente definido, al admitir diferentes formatos de otros programas de diseño, tanto en dos como en tres dimensiones. La figura 5 es un ejemplo del tipo de representación que se puede obtener de la herramienta Map Editor™.

#### 3.1.3. Características de los módulos o colectores solares

Las características geométricas y el emplazamiento de los módulos o colectores solares pueden definirse fácilmente mediante una de las barras de herramientas con las que cuenta el programa SolarGIS. El usuario debe definir, bien de forma individual o bien de forma conjunta para series de módulos o colectores, la altura, anchura, distancia al suelo y entre los diferentes planos de captación, ángulo con respecto al plano horizontal o inclinación y ángulo con respecto a la dirección sur o ángulo de acimut (Figura 6). Los módulos o colectores pueden colocarse tanto sobre plano horizontal como inclinado, así como sobre fachadas.

El software dispone de una opción que facilita al usuario una vista del horizonte del plano de captación, es decir, lo que vería si estuviera en la misma localización y posición que el módulo o colector solar, lo cual resulta de gran uti-

lidad para decidir rápidamente si el emplazamiento y posición seleccionados son adecuados o no antes de comenzar el proceso de cálculo, ya que permite evaluar rápidamente la incidencia de los posibles obstáculos sobre la energía incidente sobre el plano de captación.

### 3.2. RESULTADOS PROPORCIONADOS POR EL PROGRAMA

Una vez suministrados al programa los datos de entrada necesarios, éste calcula los valores de irradiancia global, difusa y directa incidente sobre cada uno de los módulos o colectores solares introducidos, así como sobre cualquier otra superficie de interés. Los resultados se presentan tanto en formato numérico como gráfico para satisfacer las necesidades de los distintos usuarios.

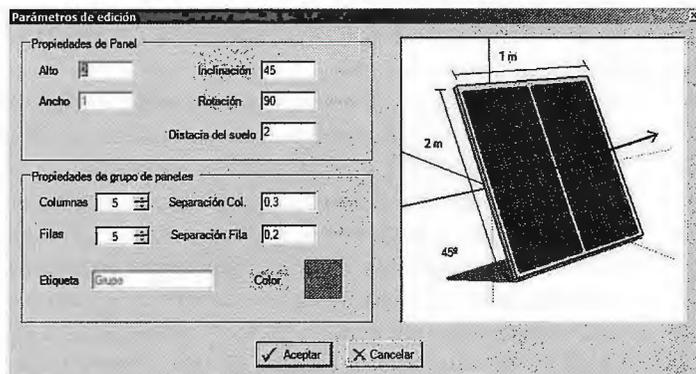


Fig 6. Herramienta del software SolarGIS para introducir las características geométricas y la localización de los colectores o módulos solares.

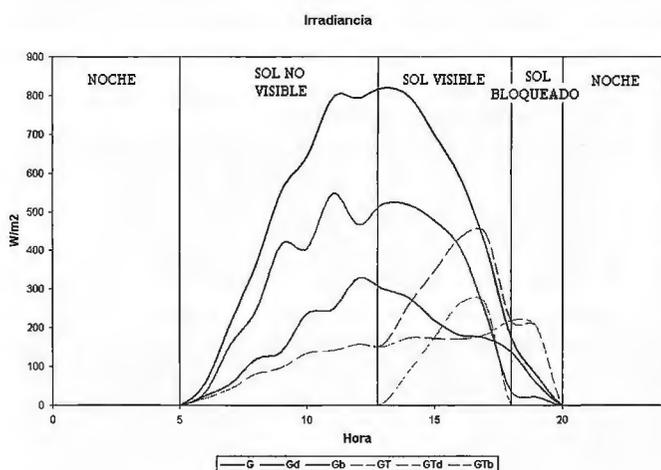


Fig. 7: Representación de la irradiancia global-G (azul), difusa-Gd (naranja) y directa Gb (verde) tanto sobre plano horizontal (líneas continuas) como sobre plano inclinado (líneas discontinuas) para un día. Las horas entre el amanecer y anoecer se describen según sea la visibilidad del sol desde el plano de captación. De modo que el sol puede no ser visible por la propia orientación e inclinación del plano o porque quede bloqueado por la presencia de obstáculos.

Por un lado, los resultados numéricos pueden ser exportados a formato Excel®, a fin de facilitar el desarrollo de cálculos y análisis posteriores. Estos ficheros de datos incluyen los datos de entrada correspondientes a valores medios horarios de irradiancia global sobre plano horizontal, los valores estimados de irradiancia difusa y directa sobre plano horizontal, así como los de irradiancia global, difusa y directa sobre la superficie de captación de interés, derivados del proceso de cálculo. La figura 7 muestra un ejemplo de los valores de irradiancia global, difusa y directa, tanto en plano horizontal como inclinado, obtenidos del análisis de un único día. Debido a la orientación e incli-

nación de la superficie de captación analizada, se observa cómo el sol no es visible por la mañana, mientras que a última hora de la tarde queda bloqueado por obstáculos. Por otro lado, el programa proporciona al usuario una representación gráfica de la escena analizada, con el o los planos de captación y los alrededores, en la que las distintas superficies de interés quedan coloreadas de forma gradual de acuerdo con el valor estimado de irradiancia incidente sobre ellas.

### 4. CONCLUSIONES

El programa informático SolarGIS permite el análisis en detalle de la radiación solar incidente sobre cualquier plano de captación, al tener en cuenta modelos de distribución

angular e integrar un GIS que facilita la consideración de la influencia de los obstáculos en la energía solar recibida. Los resultados de radiación solar incidente sobre los planos de interés pueden ser presentados tanto en formato numérico como gráfico. La información derivada del proceso de cálculo, referida a periodos horarios, mejorará considerablemente las estimaciones de producción energética de los sistemas de aprovechamiento de energía solar, así como de otras aplicaciones que requieren de un conocimiento detallado del recurso solar disponible en un determinado emplazamiento.

### 5. REFERENCIAS

- Boland, J., Scout, L., Luther, M. (2001) Modeling the diffuse fraction of global solar radiation on horizontal surface. *Environmetrics*, 12 (2), 103-116.
- Brunger, A.P., Hooper, F.C. (1993) Anisotropic sky radiance model based on narrow field of view measurements of shortwave radiance. *Solar Energy*, 51 (1), 53-64.
- Igawa, N., Koga, Y., Matsuzawa, T., Nakamura, H. (2004) Models of sky radiance distribution and sky luminance distribution. *Solar Energy*, 77, 137-157.
- Jacovides, C.P., Tymvios, F.F., Assimakopoulos, V.D., Kaltsounides, N.A. (2006) Comparative study of various correlations in estimating hourly diffuse fraction of global solar radiation. *Renewable Energy*, 31 (5), 2492-2504.
- Perez, R., Seals, R., Ineichen, P., Steward, R., Menicucci, D. (1987) A new simplified of the Perez diffuse irradiance model for tilted surfaces. *Solar Energy*, 39 (3), 221-231.
- Perez, R., Steward, R., Seals, R., Guertin, T. (1988) The development and verification of the Perez diffuse radiation model. Sandia National Laboratories Report SAND88-7030.
- Perez, R., Ineichen, P., Seals, R., Zelenka, A. (1992) Dynamic global to direct irradiance conversion models. In ASHRAE Transactions - Research Series, 354-369.
- Perez, R., Seals, R., Michalsky, J. (1993) All-weather model for sky luminance distribution - Preliminary configuration and validation. *Solar Energy*, 50 (3), 235-245.
- Reindl, D.T., Beckman, W.A., Duffie, J.A. (1990) Evaluation of hourly tilted surface radiation models. *Solar Energy*, 45 (1), 9-17.
- Robinson, D., Stone, A. (2004) Solar radiation modeling in the urban context. *Solar Energy*, 77 (3), 295-309.
- Robinson, D., Stone, A. (2005) A simplified radiosity algorithm for general urban radiation exchange. *Building Services Engineering Research Technology*, 26 (4), 271-284.
- Skartveit, A., Olseth, J.A., Tuft, M.E. (1998) An hourly diffuse fraction model with correction for variability and surface albedo. *Solar Energy*, 63 (3), 173-183.
- Tregenza, P., and Sharples, S. (1993) Daylighting algorithms. ETSU Report S1350.

### 6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo de desarrollo de la herramienta informática SolarGIS forma parte del proyecto de investigación IIM11807.R11 INNOVATIC (EI-3), financiado por el Gobierno de Navarra. El modelado de la distribución de radiancia en el cielo para la evaluación de la irradiancia forma parte del proyecto de investigación ENE2007-64413/ALT, financiado por la Dirección General de Investigación del Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno de España.