

MAPAS DE VALORES MEDIOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN SOLAR ESTIMADOS PARA EXTREMADURA A PARTIR DE OTROS DATOS METEOROLÓGICOS

Núñez, M., Reyes, J. J.* , Marroquín, A., Ramiro, A.*

Centro Meteorológico Territorial de Extremadura. Instituto Nacional de Meteorología
Avda. de Elvas s/n, 06071 Badajoz, SPAIN.
E-mail: marcelino.nunez@inm.es

(*) Escuela de Ingenierías Industriales, Universidad de Extremadura
Avda. de Elvas s/n, 06071 Badajoz, SPAIN.
E-mail: aramiro@unex.es

Resumen

En este trabajo se ha pretendido obtener mapas de valores medios mensuales irradiación global, difusa y directa para Extremadura, a partir de la temperatura máxima, del número de horas de sol y de la orografía. Con los valores medios mensuales de dichas variables meteorológicas y mediante un modelo de regresión múltiple se han obtenido valores medios mensuales de transmisividad y difusividad atmosféricas para cada mes y cada una de las treinta comarcas definidas, y a partir de ellos y trabajando con Solar Analyst, un módulo de Arc View, se han estimado para cada mes y para cada punto de rejilla los valores medios mensuales de la irradiación global, así como de sus componentes directa y difusa. Con estos valores se han elaborado mapas medios mensuales de la irradiación solar.

Abstract

In this work it is tried to obtain maps of global irradiation, diffuse and direct monthly means for Extremadura, from the maxima temperature, of the sunshine hours, and of orography. From the monthly average values of the variables meteorological and by means of a model of multiple regression values monthly of atmospheric average transmisividad and difusividad for every month and each one of the thirty defined regions have been obtained. And working with Solar Analyst, a module of Arc View, the monthly average values of the global irradiation, as well as of its components direct and diffuse, have been considered for every month and each point of grid. With these values monthly average maps of the component mentioned ones of the solar irradiation have been elaborated.

Palabras clave: Irradiación solar, SIG, variables meteorológicas

Keywords: Solar irradiation, GIS, meteorological variables

1. INTRODUCCIÓN

El diseño de cualquier instalación solar requiere la utilización de series largas de datos climáticos relativos a la irradiación solar en el lugar en cuestión. En Extremadura, y por parte del INM, los datos de irradiación solar se registran desde hace tiempo en los Observatorios Meteorológicos situados en las dos capitales de provincia. Sin embargo, datos de temperatura, viento, precipitación, humedad, horas de sol y otras variables meteorológicas están disponibles en las estaciones meteorológicas que forman las redes de Observación de este Centro Meteorológico Territorial y que están distribuidas por todo el territorio. La idea

originaria de este trabajo es tratar de estimar la irradiación solar, que solo se registra en dos puntos, a partir otras variables meteorológicas cuya red de medida es mucho más densa.

Varios investigadores (Lumb, 1964) (Brinsfield et al., 1984) han considerado la posibilidad encontrar las expresiones que relacionan la irradiación solar con la cubierta nubosa. Una de las investigaciones más extensas en este sentido fue realizada por (Haurwitz, 1945) y (Haurwitz, 1948), quien trabajó con once años de datos de Blue Hill, Massachussets. (Kasten y Czeplak, 1979) han completado el trabajo de Haurwitz y sus resultados se están aplicando actualmente en el Reino Unido. Esta clase de modelos se llama CRM (cloud cover radiation model) ó (modelos de irradiación de cubierta nubosa) y solo necesitan datos de la cubierta nubosa para la estimación de la irradiación solar.

Otro tipo de modelo es el llamado MRM (meteorological radiation model ó modelo meteorológico de la radiación) que requiere para la valoración de la irradiación solar una serie de datos meteorológicos, tales como la temperatura del aire, el cociente entre las horas de sol reales (tiempo en horas en el que la irradiación solar directa excede un cierto umbral, 120 W/m² en el INM) y las horas de sol teóricas del día. (Muneer et al., 1996) y (Muneer et al., 1997) han desarrollado este tipo de modelos. Una comparación entre los dos tipos de modelos citados ha sido realizada por (Mehreen et al. 1998).

En este trabajo se está trabajando con modelos del tipo MRM. El punto de partida fueron los trabajos (Fernández, 2003) y (Ramiro et al., 2003), en el que se han encontrado expresiones que permitieron estimar valores diarios de irradiación solar global, directa, y difusa sobre superficie horizontal en función de algunos parámetros meteorológicos.

2. SOLAR ANALYST

La aplicación Solar Analyst 1.0 es un módulo de Arc View, codificado en el lenguaje de programación Avenue. Esta aplicación calcula para cada localización de un modelo digital del terreno la cúpula del hemisferio celeste que se visualiza sobre ese punto. Esta cúpula celeste visualizada se utiliza para calcular la irradiación en cualquier punto y para crear mapas de irradiación. Asimismo, la aplicación permite calcular la irradiación integrada en cualquier periodo de tiempo concreto.

Las variables que utiliza esta extensión de Arc View son: la latitud, la elevación, la orientación de la superficie y las sombras del punto en cuestión; así como la variación, estacional y diaria, del ángulo solar y la atenuación atmosférica.

Esta aplicación se alimenta con las siguientes entradas de datos: Un modelo digital del terreno (MDT), a partir del cual calcula las pendientes y las orientaciones de cada punto, la transmisividad atmosférica (τ) y la proporción que representa la radiación difusa respecto a la global. Con estas entradas, y para cada punto que se esté analizando, produce las siguientes salidas: radiación difusa, radiación directa, radiación global, duración de la radiación directa, mapas de cielo libre de obstáculos. Permitiendo además especificar distintas orientaciones de la superficie receptora.

La cúpula celeste visualizada, figura 1, es la distribución angular de cielo libre de obstáculos. Esta se calcula para cada grid del MDT, y sería similar a la vista proporcionada por una fotografía hecha hacia arriba con un objetivo tipo ojo de pez. El algoritmo de cálculo de dicha cúpula celeste visualizada es debido a (Rich, 1989) y (Rich et al. 1994).

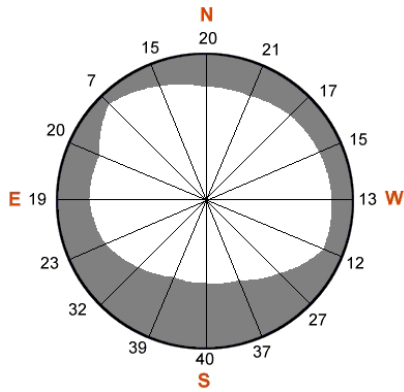


Figura 1. Ejemplo de la cúpula celeste visualizada calculada para un punto

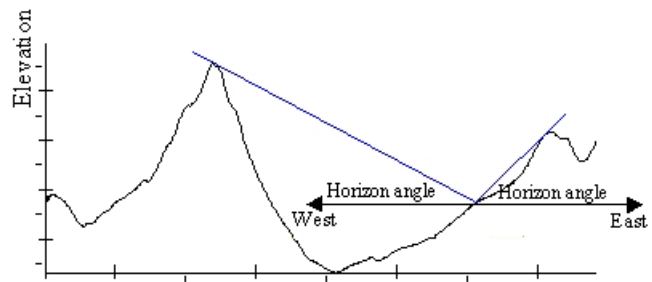


Figura 2. Cálculo de ángulos de horizonte

El algoritmo de cálculo podría sintetizarse en los siguientes pasos:

- Se trazan las líneas de los ángulos de horizonte para todas las direcciones, figura 2.
- Se calculan estos ángulos de horizonte
- Se integran los ángulos de horizonte para cada una de las direcciones
- Se convierten estos ángulos a coordenadas esféricas
- Se obtiene el resultado final, ver figura 1, representando para cada localización concreta y para cada dirección, con zonas oscuras la porción de cielo no visible y con un número el ángulo de horizonte.

La aplicación “Solar Analyst” proporciona es una herramienta eficaz para entender la variación espacial y temporal de la insolación en el paisaje y las escalas locales

La aplicación “Solar Analyst” (Fu y Rich, 2000) trabaja con la potencia de los modelos punto-específicos y los modelos de área.

La aplicación “Solar Analyst” calcula la irradiación directa, difusa y global a partir de parámetros atmosféricos y topográficos. Dos de estos parámetros atmosféricos son la transmisividad de la atmósfera (t), definida como el cociente entre la irradiación directa que llega a la superficie de La Tierra y a la radiación solar extraterrestre, y, el segundo parámetro, es la proporción difusa (d), que es la proporción del flujo normal global de la radiación que es debido a la radiación difusa.

La interfaz utilizada que permite la entrada de los parámetros y que llama el motor del cálculo, fue desarrollada usando el lenguaje Avenue y el ArcView Dialog Designer.

En la figura 3, se muestra un ejemplo de la ventana de dialogo en la que se especifican los “sky parameters”.

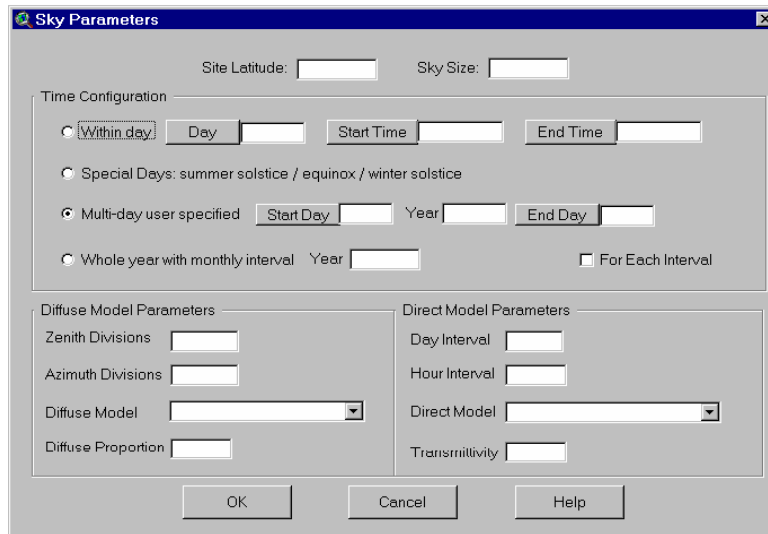


Figura 3: ejemplo de la ventana de dialogo “sky parameters”

En la figura 4, se muestra un ejemplo de la ventana de dialogo en la que se especifican los parámetros topográficos.

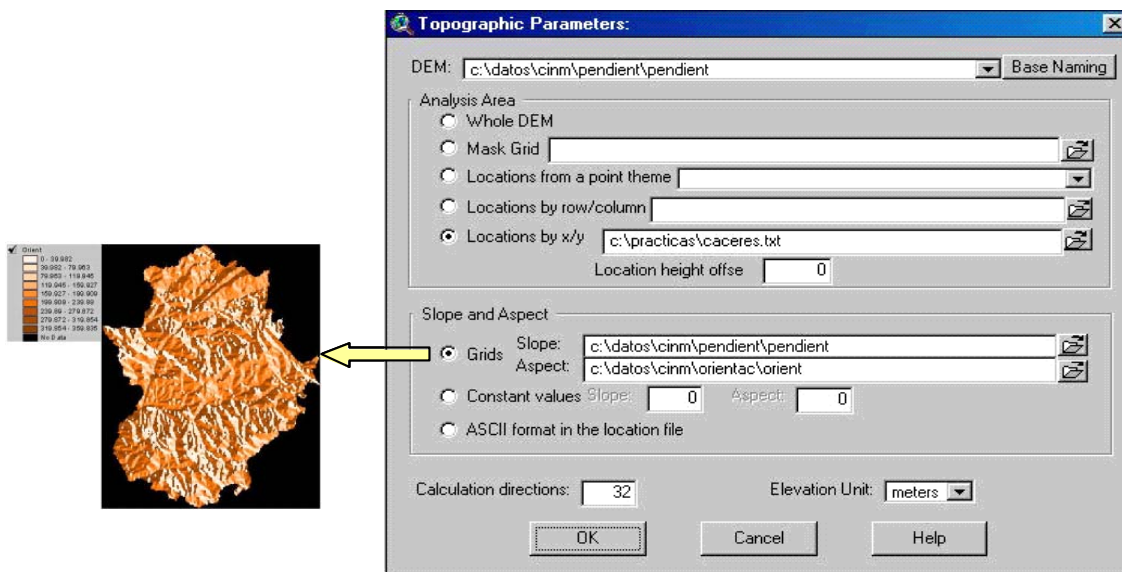


Figura 4: ventana de dialogo parámetros topográficos

3. METODOLOGÍA

Un resumen de la metodología que se ha seguido en este trabajo puede ser el que sigue:

- a) Para un punto concreto, mediante iteración y utilizando Solar Analyst se han obtenido los valores de T y de D que proporcionaban los datos medios mensuales de la irradiación solar global, difusa y directa para el punto en cuestión. Para este paso se han utilizado valores medios mensuales de la irradiación, del Observatorio meteorológico 3469A Cáceres ‘Carretera de Trujillo’, registrados durante el período 1985-2002.

- b) Para obtener las funciones que relacionan los parámetros, T y D, con los valores de las variables meteorológicas más adecuadas se han utilizado análisis de regresiones múltiples, y mediante el paquete estadístico Statgraphics, se han ido seleccionando las variables que presentaban mayor correlación con T y D.

Las variables meteorológicas que mejor explicaban la variación de T y D resultaron ser: temperatura máxima media mensual, fracción de horas de Sol media mensual, y el día del año que coincide con el último día de cada mes. Para estas variables se han construido las función de correlación entre los valores de T y de D y dichas variables meteorológicas.

- c) Obtenida la relación entre las variables predictoras y la transmisividad y difusividad, se calcularon los valores medios mensuales de T y D para 30 zonas en las que se dividió la región extremeña.
- d) Para cada una de las 30 zonas se calculó, mediante el módulo Solar Analyst, la irradiación global, directa y difusa para cada punto de una rejilla de resolución de 1 km, y construyendo un mosaico con cada una de las 30 zonas se han estimado los mapas medios mensuales de la irradiación solar, global, directa y difusa para Extremadura.

3.1. ANÁLISIS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE.

En las tablas siguientes se muestran las ecuaciones que describen la relación entre la proporción difusa (d) y la transmisividad (t), y las variables meteorológicas: temperatura máxima media mensual, fracción de horas de Sol media mensual, y el día del año que coincide con el último día de cada mes. Estas ecuaciones se han obtenido mediante el Statgraphics, analizando varios modelos de regresión múltiple. De cada uno de los modelos elegidos se muestra el coeficiente de correlación (R^2), el error estándar y los “P-value” que nos indican si el modelo elegido es aceptable o no.

Periodo	Ecuación	
Todo el año	$D = 3,65679 - 3,62679 * h^{0,1} + 0,00145574 * \text{day}^{1,1} - 0,00000726726 * \text{day}^2 + 0,0371491 * \cos(T_m) * \sin(T_m * \text{day})^3 - 0,00145326 * \cos(T_m)^3 * \text{day}^{-1,2} * T_m^{1,6}$	(1)
de noviembre a abril	$T = 0,195747 + 0,00000462478 * \text{day}^2 - 0,0305196 * \sin(T_m)^2 - 0,0423018 * \text{day}^{0,5} + 0,873115 * h^{0,5}$	(2)
de mayo a octubre	$T = 0,408136 + 6,67292E-8 * \text{day}^{2,5} + 0,000641831 * T_m * h^3$	(3)

Ecuación	R^2	Error estándar	P-value
(1)	98.08 %	0.0055	< 0,01
(2)	93.65 %	0.1668	< 0,05
(3)	97.93 %	0.0082	< 0,01

3.2. AJUSTE Y COMPROBACIÓN DEL MODELO.

Para comprobar el ajuste total del modelo, tanto la estimación estadística de t y d como la estimación de la irradiación global, directa y difusa realizada por el modulo Solar Analyst, se comparan en la figura 5 los valores medidos en el Observatorio Meteorológico 3469A Cáceres ‘Carretera de Trujillo’ y los valores estimados. En el cálculo del ajuste se obtiene, y así se intuye en la figura 5, que el error medio del ajuste de ambos conjuntos de valores es menor del 5%.

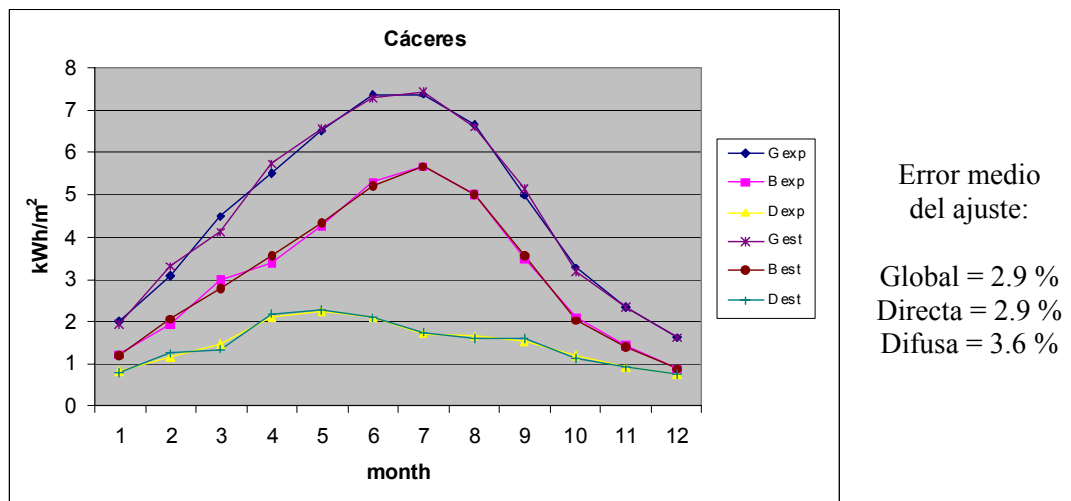


Figura 5: Valores medidos y estimados de la irradiación, global, directa y difusa, media mensual para el Observatorio Meteorológico 3469A Cáceres ‘Carretera de Trujillo’

Para comprobar el funcionamiento del modelo, se han comparado los datos de irradiación global medidos en los Observatorios Meteorológicos 4642E Huelva y 5973 Cádiz con los datos estimados para esos puntos. En las figuras 6 y 7, se muestra gráficamente que el ajuste entre las series estimadas y las registradas es aceptable. Sobre todo teniendo en cuenta que los datos de los observatorios andaluces se corresponden al período 1991-2001, y que se trata de dos observatorios situados en la costa. No obstante el error medio del ajuste siempre es menor del 10 % (5.6 % para el Observatorio 4642E Huelva y 9.4 % para el 5973 Cádiz).

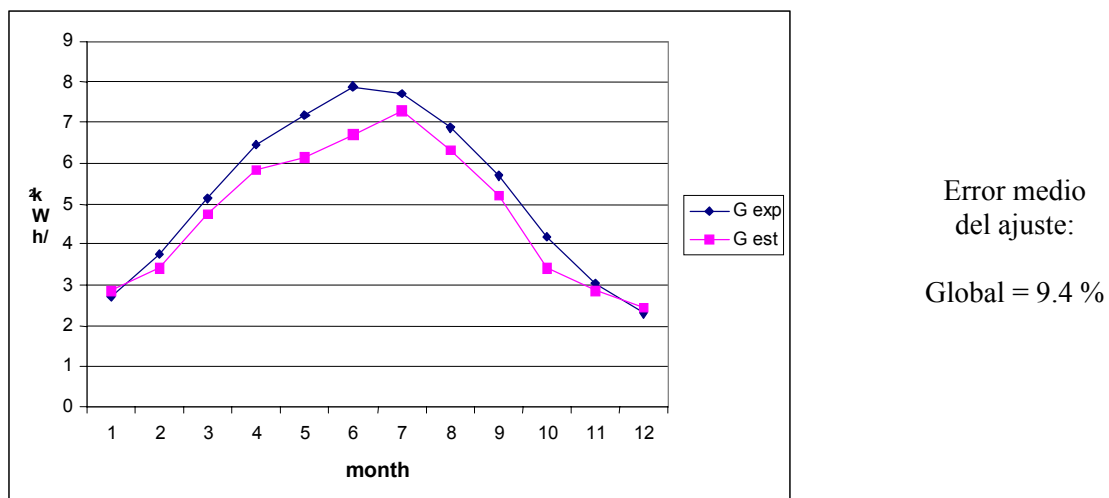
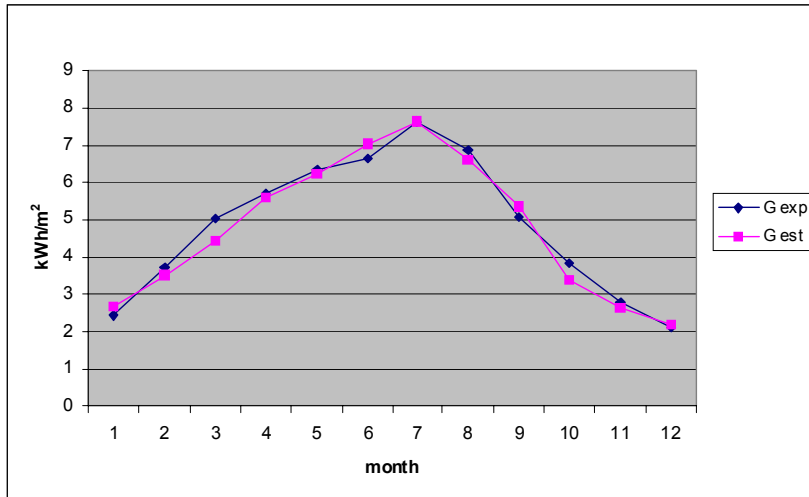


Figura 6. Valores medidos y estimados de la irradiación, global media mensual para el Observatorio Meteorológico 5973 Cádiz.



Error medio del ajuste:
Global = 5.6 %

Figura 7. Valores medidos y estimados de la irradiación, global media mensual para el Observatorio Meteorológico 4642E Huelva

3.3. DATOS METEOROLÓGICOS

Para la aplicación del modelo expuesto y obtener los mapas de irradiación solar para, ha sido necesario un minucioso análisis de: los datos topográficos de la región, y de los datos meteorológicos que son la entrada del modelo, horas del sol y temperaturas máximas. Se han analizado las series de estos datos del CMT en Extremadura medidos a lo largo de un período del tiempo suficientemente grande de modo que los resultados obtuvieran sean significativos, pero a la vez teniendo muy en cuenta el número de lagunas y datos erróneos, seleccionando finalmente el periodo 1985-2002 para realizar el trabajo.

Al mismo tiempo se han analizado la distribución geográfica de las series de datos disponibles para determinar el número de zonas homogéneas, y para las cuales se podría considerar que los datos registrados en ellas son suficientemente representativos, en las que se dividirá el territorio de esta Comunidad Autónoma. Se obtuvieron 10 zonas en función de la distribución espacial de las estaciones que registran las horas de sol (ver figura 8) y 30 en función de las de temperatura máxima (ver figura 9).

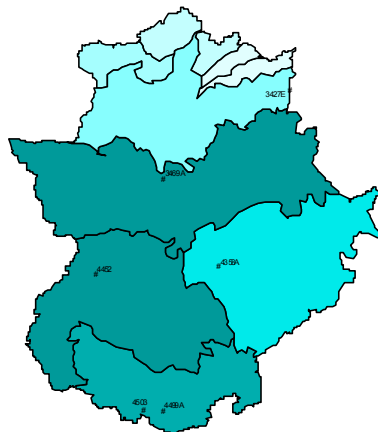


Figura 8: Áreas en función de las horas de sol

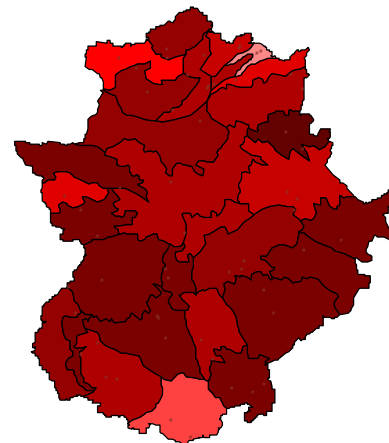


Figura 9: Áreas en función de la temperatura máxima

La aplicación del modelo propuesto en cada una de las 30 zonas así obtenidas nos proporciona los valores medios mensuales de irradiación global, directa y difusa global para cada punto de la rejilla utilizada.

4. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos se presentan como mapas interactivos asociados a una base de datos convencional.

Los Figuras 8, 9 y 10 muestran tres ejemplos de los mapas estimados de irradiación solar media mensual para Extremadura, para el mes de enero, concretamente de irradiación difusa, en la figura 8, de irradiación directa, en la figura 8 y de irradiación global en la figura 10.

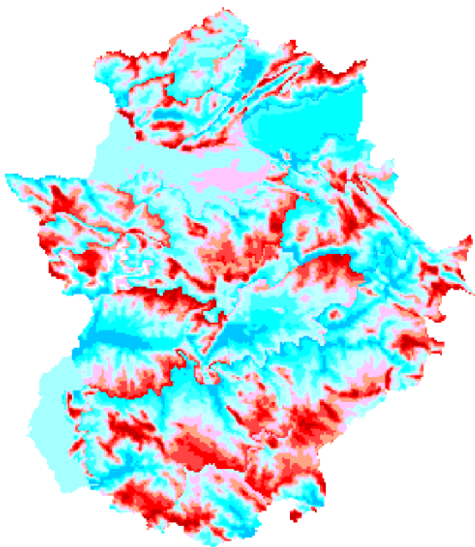


Figura 8. Valores estimados de irradiación difusa mensual para el mes de enero.



Figura 9. Valores estimados de irradiación directa mensual para el mes de enero



Figura 10. Valores estimados de irradiación global mensual para el mes de enero

Como una muestra de la interactividad de estos mapas, la figura 11, una ventana de ArcView en la que se analiza para la zona de las Vegas Bajas del Guadiana, un mapa de irradiación global mensual para el mes de enero, en la que para una posición de la rejilla seleccionada, podemos obtener en una tabla: las coordenadas de la celda, el valor de la irradiación global mensual estimada para esa posición y el mes en cuestión, y el número de las células del MDE con el mismo valor de irradiación global mensual.

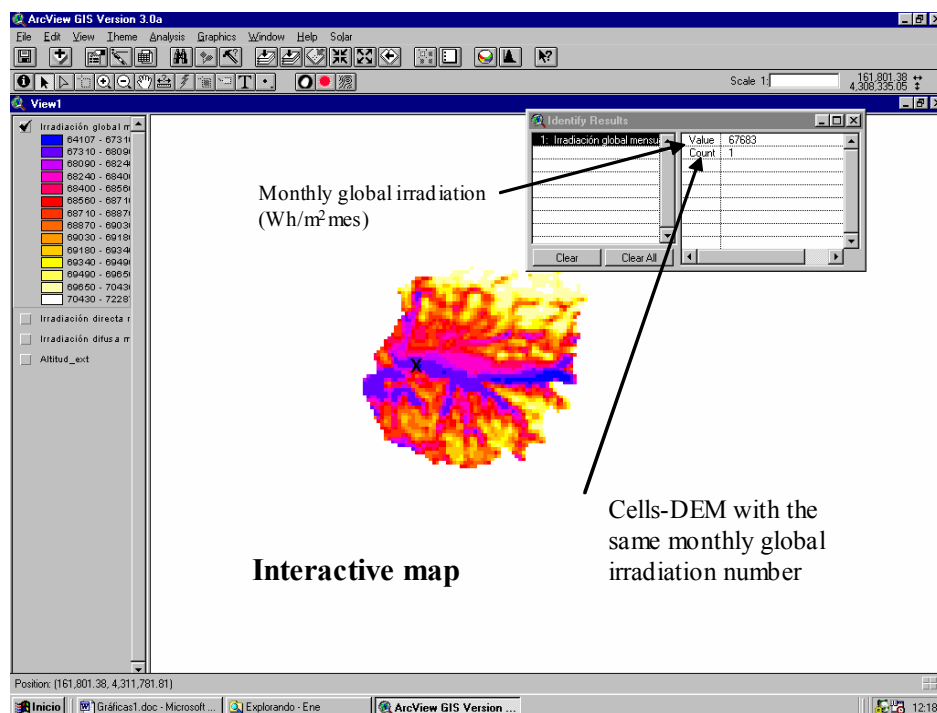


Figura 11. Ejemplo de mapa interactivo.

5. CONCLUSIONES

Entre las conclusiones más relevantes logradas en este trabajo podemos citar las siguientes:

Se ha obtenido un modelo estadístico basado en la regresión múltiple para estimar valores medios mensuales de proporción difusa (d) y de transmisividad (t), en función de las variables meteorológicas: temperatura máxima media mensual, el número medio de horas de sol mensuales y el último día del mes (que representa el ciclo anual de las variables meteorológicas citadas).

Se han estimado mediante la aplicación “Solar Analyst” los valores medios mensuales de irradiación directa, difusa y global a partir de parámetros los atmosféricos, proporción difusa (d) y de transmisividad (t), y de parámetros topográficos, orientación, pendiente, longitud, latitud y altitud, para una rejilla de resolución 1 km y para la región extremeña.

El error medio obtenido de la comparación entre los distintos valores de irradiación medidos y los estimados en varios Observatorios meteorológicos del INM es siempre menor del 10 %.

REFERENCIAS

- Fernández Gallego, F. J. (2002) Estimación de las componentes de la radiación solar en función de algunos parámetros meteorológicos. Memoria para optar al título de Ingeniero Técnico Industrial. E.E.I.I. Universidad de Extremadura. Badajoz. (Spain).
- Fu, P. and Rich, P. M. (1999). Design and implementation of the Solar Analyst: an ArcView extension for modeling solar radiation and landscape scales. Proceedings of the 19th Annual ESRI User Conference, San Diego, Usa.
- Fu, P. and Rich, P. M. (2000). Manual Solar Analyst 1.0. Helios Environmental Institute (HEMI)
- Haurwitz B. (1945). Insolation in relation to cloudiness and cloud density. *Journal of Meteorology*, **2**, 154-156.
- Haurwitz B. (1948). Insolation in relation to cloud type. *Journal of Meteorology*, **5**, 110-113.
- Kasten F. and Czeplak G. (1979). Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud. *Solar Energy*, **24**, 177-189.
- Lumb F. E. (1964). The influence of cloud on hourly amounts of total solar radiation at the sea surface. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, **90**, 383.
- Manugistics, Inc. (1995) Statgraphics plus. Time-Series Analysis. Rockville (U.S.A.).
- Manugistics, Inc. (1996) Statgraphics plus. Advanced regression. Rockville (U.S.A.).
- Mehreen S. Gul, Tariq Muneer and Harry D. Kambezidis (1998). Models for obtaining solar radiation from other meteorological data. *Solar Energy*, **64**, 99-108.
- Muneer T., Gul M. S., Kambezidis H. D. and Allwinkle S. (1996). An all-sky solar meteorological radiation model for the U.K. Proceedings of the Joint CIBSE/ASHRAE Conference, Vol. II, 29 September–1 October, Harrogate, U.K. Chameleon Press, London, pp. 271–279.
- Muneer T. Gul M.S. and Kambezidis H.D. (1997). Longterm evaluation of a meteorological solar radiation model against U.K. data. *Energy Conversion and Management*, **39**, 1.
- Núñez, M., Sosa, J. A. y Marroquín, A., (2001) Análisis de la Aplicación Arc View Solar Analyst 1.0: Una Extensión Aplicada a Datos Radiativos. I^ª Jornadas Gis/Climatología. Badajoz.
- Ramiro, A., Núñez, M., González, J. F., González-Martín, M. L., Sabio, E., González-García, C. M., Gañán, J. y Fernández, F. J. (2003). Estimación de las componentes de la radiación solar a partir de algunos parámetros meteorológicos. III Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica. Valencia.
- Rich, P.M. (1989) A manual for analysis of hemispherical canopy photography. Los Alamos National Laboratory Report, LA-11733-M.
- Rich P.M., Dubayah, R., Hetrick, W. A. and Saving, S. C. (1994). Using Viewshed models to calculate intercept solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*. pp. 524-529.