

MODELO NÚMÉRICO PARA LA GENERACIÓN DE MAPAS DE RADIACIÓN SOLAR.

Fátima Cerezo*, José M^a Escobar, Gustavo Montero, Rafael Montenegro y Eduardo Rodríguez

Instituto Universitario de Sistemas Inteligentes y Aplicaciones Numéricas en Ingeniería
Universidad de Las Palmas de Gran Canaria
35007 Las Palmas de Gran Canaria
e-mail: fatima.cerezo@gmail.com, jescobar@dsc.ulpgc.es, {gustavo,rafa,barrera}@dma.ulpgc.es
web: <http://www.dca.iusiani.ulpgc.es/proyecto0607>

Palabras clave: Radiación Solar, reflejada, difusa, directa, sombras y mapas.

Resumen. *En este trabajo se construye un modelo numérico para la elaboración de mapas de radiación solar mediante mallas 2D adaptadas. Estas mallas se obtienen haciendo uso de un proceso de refinamiento y desrefinamiento de triángulos en función de las variaciones en la orografía y el albedo de la superficie del terreno. El modelo tiene en cuenta el efecto de las sombras, que son simuladas analizando la interposición de triángulos de la malla en la trayectoria del haz de luz. En el modelo de radiación solar se realiza un cálculo de radiación en clear-sky (cielo limpio) donde se consideran los diferentes tipos de radiación: la directa, la difusa y la reflejada. A partir de los resultados de clear-sky y de medidas experimentales disponibles en distintos puntos de la zona de estudio se calcula la radiación en real-sky (cielo en condiciones normales: nubes). Los mapas de radiaciones, tanto mensuales como anuales, se obtienen por la integración de los resultados puntuales. Para ilustrar el funcionamiento del modelo se presentan algunos experimentos numéricos relativos a zonas de las Islas Canarias.*

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia del Gobierno de España y FEDER, proyecto: CGL2004-06171-C03-02/CLI.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente la energía solar es una de las fuentes de energía que se encuentran en pleno auge a nivel mundial, por ese motivo se plantea un modelo que intente optimizar la captación de la radiación solar.

La energía solar incidente en una parte de la superficie terrestre se divide en tres tipos diferentes: radiación directa, difusa y reflejada. La radiación directa, es aquella que llega directamente del Sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Este tipo de radiación se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan. La radiación difusa, es la parte de la radiación que atraviesa la atmósfera y es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación va en todas direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones tanto por parte de las nubes como las partículas de polvo atmosférico, montañas, árboles, edificios, el propio suelo, etc. Se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos. Esta energía puede suponer aproximadamente un 15 % de la radiación global en los días soleados, mientras que en los días nublados, en los que la radiación directa es muy baja, la radiación difusa supone un porcentaje más elevado. Por otro lado, las superficies horizontales son las que más radiación difusa reciben, puesto que ven toda la semiesfera celeste, mientras que las superficies verticales reciben menos porque solo ven la mitad de la semiesfera celeste. El último tipo es la radiación reflejada por la superficie terrestre. Esta cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie, también llamado albedo. Las superficies horizontales no reciben ninguna radiación reflejada, ya que sólo ven superficie terrestre, mientras que las superficies verticales son las que reciben más cantidad de este tipo de radiación.

Para el aprovechamiento de esta energía se usan paneles solares cuyo objetivo principal es la captación de la radiación solar, energía que se forma partiendo del calor.

En el desarrollo del modelo de generación de mapas de radiación solar que permita tener en cuenta todos los tipos de radiación y distintas circunstancias, se parte en primer lugar de los datos de la superficie del terreno, los cuales se presentan mediante mallas en 2D adaptadas que nos permitirán conocer las características, altimetría y topografía del terreno. Este punto se verá de una manera más detallada en la segunda sección. En la tercera sección, se procede a la determinación de sombras en función de la hora solar y las características del terreno. A partir de las condiciones de sombra se puede llevar a cabo una estimación de la radiación en condiciones de clear sky, teniendo en cuenta la radiación directa, difusa y reflejada.

Mediante el uso de datos experimentales proporcionados por distintas fuentes (medidas experimentales, resultados de modelos predictivos) y los resultados obtenidos en clear-sky se estudia el cálculo de la radiación real sky. A continuación en la quinta sección, se presenta una aplicación para validar el modelo presentado. Finalmente se establecen conclusiones y líneas futuras.

2. MALLAS

La idea básica para la construcción de las mallas es la utilización de un algoritmo de refinamiento y desrefinamiento para dominios bidimensionales, con un posterior proceso de optimización.

La dificultad del proceso radica en la irregularidad de la superficie del terreno. Para resolver el problema solamente se dispone de la información digitalizada del terreno. El objetivo es conseguir una malla adaptada, es decir, que exista una densidad de nodos mayor donde sea necesario para definir las características geométricas de nuestro dominio a partir de una interpolación lineal a trozos.

En primer lugar se determinan los nodos situados sobre la superficie del terreno. Su distribución debe estar adaptada a las características orográficas con la finalidad de minimizar el número total de nodos necesario. Estos nodos serán los vértices de los triángulos que conforman la malla. Inicialmente, se construye una triangulación con una distribución uniforme de puntos.

Esta malla bidimensional puede ser obtenida a partir de la realización de un cierto número de refinamientos globales sobre una malla simple o puede también construirse realizando una triangulación de Delaunay sobre la distribución uniforme de puntos establecida. Consideraremos la malla obtenida como el nivel más bajo de la secuencia que define la distribución de los puntos en el resto de los niveles. Sobre esta malla regular aplicamos a continuación el algoritmo de refinamiento y desrefinamiento para definir la distribución de los nodos de la malla de la superficie del terreno. Para ello, primero se construye una función que interpola las cotas obtenidas a partir de una digitalización de la topografía de la zona rectangular estudiada. En segundo lugar, realizamos una serie de refinamientos globales sobre la malla uniforme hasta conseguir una malla regular capaz de captar la variación de la topografía del terreno. El máximo grado de discretización viene definido por el nivel de detalle de la digitalización. Posteriormente, se realizará un desrefinamiento sobre estos últimos niveles de malla utilizando como parámetro de desrefinamiento el máximo error de cotas permitido entre la superficie real del terreno y la superficie definida mediante la interpolación a trozos obtenida con la malla resultante.

3. DETECCIÓN DE SOMBRAS

Para poder llevar a cabo las consideraciones acerca de las sombras hemos de tener claro determinadas características. Debido a la necesidad de determinar si una cierta zona de la superficie se encuentra en sombra o no, se desarrolla un procedimiento en el cual se parte del conocimiento del instante (la hora, día y mes) para el cual se desea obtener la distribución de las sombras así como una malla de triángulos adaptada. En este proceso previamente debemos realizar varios cálculos. Los pasos a seguir para el cálculo son los siguientes.

- Determinar la dirección de la radiación solar a partir de la hora local.

- Calcular los ángulos de inclinación y orientación de una superficie, mediante los cuales se estima la matriz de rotación.
- Calcular la máxima de las distancias desde el centro de cada triángulo a sus nodos, para posteriormente poder estimar la dimensión de una cuadrícula que contenga al dominio. A cada rectángulo de la cuadrícula se le asocia un conjunto de triángulos cuyo centro esté contenido en él.
- Cuarto, se determinan los triángulos que dentro del dominio pueden hacer sombra al punto que esté siendo objeto de estudio.

Una vez terminado estos pasos previos se realiza el cálculo de la distribución de las sombras. Consideraremos que un triángulo está en sombra o no dependiendo del estado en que se encuentra cada uno de los vértices. Cada vértice tendrá un coeficiente de sombra de 0 ó 1/3 según si está en sombra o no, respectivamente.

Un vértice estará en sombra o no si se cumplen simultáneamente dos condiciones. La primera es una comparación entre el vértice y cada uno de los triángulos que están dentro de los rectángulos que le pueden hacer sombra. Esta comparación está basada en la comprobación de si el vértice se encuentra dentro del espacio comprendido entre los vectores que definen dos aristas del triángulo y el vector suma de los mismos. La segunda condición es que la coordenada z del nodo sea menor que la coordenada z del centro del triángulo considerado. Si se cumplen las dos condiciones se considera que el vértice está en una posición de sombra. En caso contrario, el vértice no está en sombra.

Una vez tenemos determinada la distribución de las sombras en los vértices, definiremos el estado de cada triángulo como la suma del coeficiente de sombra de cada uno de sus vértices, pudiendo variar los valores entre 0 si se encuentra en sombra, 1/3 si se encuentran dos vértices en sombra, 2/3 si posee un solo vértice en sombra y 1 si se encuentra completamente iluminado.

4. RADIACIÓN SOLAR

La interacción de la radiación solar con la superficie y la atmósfera viene determinada por tres tipos de factores que hemos tenido en cuenta para el desarrollo del modelo. El primero de ellos es la geometría de la tierra, revolución y rotación (declinación, latitud, hora solar, ángulo) que determina la radiación extraterrestre disponible basada en la posición del sol sobre el horizonte. El segundo factor es el terreno: la elevación sobre el nivel del mar que determina la atenuación de la radiación por grosor de la atmósfera, la inclinación, orientación y las sombras. Por último la atenuación atmosférica, cuyo valor viene estimado según el índice de turbidez. Este modelo de radiación solar se basa en el propuesto por M.Suri, J. Hofierka [2], donde hemos añadido el concepto de sombra y la utilización de mallas adaptadas, con el objetivo de proporcionar una mayor precisión.

4.1. Cielo limpio (Clear Sky)

Fuera de la atmósfera, La radiación directa, también conocido como constante solar I_o es $1,367 (W/m^2)$. La órbita terrestre es ligeramente excéntrica y la distancia entre el sol y la tierra varía ligeramente a lo largo del año. Por lo tanto hemos tenido en cuenta un factor de corrección, que permite cambiar la distancia solar. Así, la irradiancia extraterrestre normal resulta,

$$G_o = I_o \epsilon \quad (1)$$

donde $\epsilon = 1 + 0,03344 \cos(j' - 0,048869)$, siendo j' el ángulo diario representado en radianes, cuyo valor es,

$$j' = \frac{2\pi j}{365,25} \quad (2)$$

donde j es el número del día que varía desde 1 hasta 365. El rayo de irradiancia normal del rayo solar $B_{oc}(W/m^2)$ es atenuado por la nubosidad de la atmósfera.

$$B_{oc} = G_o \exp\{-0,8662T_{LK}m\delta_R(m)\} \quad (3)$$

El término $-0,8662T_{LK}$ es la masa de aire del factor de turbidez. EL factor de Turbidez se ha obtenido del The European Solar Radiation Atlas. El parámetro m es el relativo a la masa óptica de aire calculado usando la fórmula (Kasten and Young 1989),

$$m = (p/p_o) / \sin h_o^{ref} + 0,050572(h_o^{ref} + 6,07995)^{-1,636} \quad (4)$$

donde h_o^{ref} es la altitud solar en grados corregidos por la componente de refracción atmosférica Δh_o^{ref} ,

$$\Delta h_o^{ref} = 0,061359(0,1594 + 1,123h_o + 0,065656h_o^2) / (1 + 28,9344h_o + 277,397h_o^2) \quad (5)$$

$$h_o^{ref} = \Delta h_o^{ref} + h_o \quad (6)$$

y p/p_o es una corrección según una elevación z dada, es decir,

$$p/p_o = \exp(-z/8434,35) \quad (7)$$

El parámetro $\delta_R(m)$ es la anchura óptica de Rayleigh de la masa de aire m y la hemos calculado de acuerdo con la fórmula de Kasten(1996), para valores de $m \leq 20$ como,

$$\delta_R(m) = 1 / (6,6296 + 1,7513m - 0,1202m^2 + 0,0065m^3 - 0,00013m^4) \quad (8)$$

mientras que para $m > 20$

$$\delta_R(m) = 1/(10,4 + 0,718) \quad (9)$$

La radiación directa en una superficie horizontal B_{hc} resulta,

$$B_{hc} = B_{oc} \sin h_o \quad (10)$$

donde h_o es el ángulo de altitud solar cuyo valor se define más adelante, mientras que la radiación directa para una superficie inclinada B_{ic} se obtiene de,

$$B_{ic} = B_{oc} \sin \delta_{exp} \quad (11)$$

siendo δ_{exp} es el ángulo de incidencia solar medido entre el sol y la superficie inclinada. Hemos tenido en cuenta que la posición del sol con respecto a la superficie horizontal viene dado por dos coordenadas, la altitud solar h_o y el Azimuth solar A_o , que es el ángulo horizontal entre la dirección de la radiación y el meridiano medido desde el Este. Ambos son calculados de la forma siguiente (Krcho 1990, Jenco 1992),

$$\sin h_o = C_{31} \cos T + C_{33} \quad (12)$$

$$\cos A_o = (C_{11} \cos T + C_{13}) / ((C_{22} \sin T)^2 + (C_{11} \cos T + C_{13})^2)^{1/2} \quad (13)$$

donde $C_{11} = \sin \varphi \cos \delta$, $C_{13} = -\cos \varphi \sin \delta$, $C_{22} = \cos \delta$, $C_{31} = \cos \varphi \cos \delta$, $C_{33} = \sin \varphi \sin \delta$. El ángulo horario T (radianes) es calculado a partir de la hora local t expresada en horas decimales en las 24 horas del reloj como:

$$T = 0,261799(t - 12) \quad (14)$$

Una vez conocemos el grado de inclinación de un triángulo, calculamos los dos ángulos necesarios para definir la superficie inclinada. El primero de ellos es el azimuth A_N de cada triángulo (ángulo entre la proyección de la normal en la horizontal con el Este), para ello hacemos uso del producto vectorial entre la proyección horizontal de la normal de cada triángulo y el Este (eje x positivo). El segundo ángulo es γ_N , el cual calculamos a partir del producto escalar de la normal de cada triángulo por su proyección sobre el plano horizontal.

El ángulo solar de incidencia δ_{exp} entonces se define partiendo del producto escalar entre el vector de la dirección del sol y el vector normal de cada triángulo. Con este ángulo determinamos la radiación directa para una superficie inclinada. A continuación calculamos la radiación difusa. La estimación de la componente difusa en el horizonte de la superficie $D_{hc}(W/m^2)$ se expresa de la siguiente forma,

$$D_{hc} = G_o T_n(T_{LK}) F_d(h_o) \quad (15)$$

Siendo D_{hc} una función de transmisión difusa T_n que depende solamente de el factor de turbidez T_{LK} , y una función de altitud solar difusa F_d que depende únicamente de la

altitud solar h_o .

La estimación de la función de transmisión $T_n(T_{LK})$ da una irradiancia difusa teórica en una superficie horizontal con la vertical del solo por encima de la masa de aire. El polinomio de segundo orden usado es,

$$T_n(T_{LK}) = -0,015843 + 0,030543T_{LK} + 0,0003797T_{LK}^2 \quad (16)$$

La función de altitud solar la hemos evaluado usando,

$$F_d(h_o) = A_1 + A_2 \sin h_o + A_3 \sin^2 h_o \quad (17)$$

Donde los valores de los coeficientes A_1 , A_2 y A_3 sólo dependen de la turbidez T_{LK} quedando definidos con las siguientes expresiones.

$$\begin{aligned} A'_1 &= 0,26463 - 0,061581T_{LK} + 0,0031408T_{LK} \\ A_1 &= 0,0022/T_n(T_{LK}) \quad \text{si } A'_1T_n(T_{LK}) < 0,0022 \\ A_1 &= A'_1 \quad \text{si } A'_1T_n(T_{LK}) \geq 0,0022 \\ A_2 &= 2,04020 + 0,018945T_{LK} - 0,011161T_{LK}^2 \\ A_3 &= -1,3025 + 0,039231T_{LK} + 0,0085079T_{LK}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

El modelo para determinar la irradiancia difusa en un cielo limpio, en una superficie inclinada $D_{ic}(W/m_2)$ distingue entre sin sombra, potencialmente sin sombra y superficies en sombra. Las ecuaciones son, para el caso de superficies sin sombra, es decir, iluminadas y sin el cielo nublado (Muneer 1990). Si $h_o \geq 0,1$

$$D_{ic} = D_{hc} \left(F(\gamma_N)(1 - K_b) + K_b \frac{\sin \delta_{exp}}{\sin h_o} \right) \quad (19)$$

Si $h_o < 0,1$

$$D_{ic} = D_{hc} (F(\gamma_N)(1 - K_b) + K_b \sin \gamma_N \cos A_L / (0,1 - 0,008h_o)) \quad (20)$$

donde $A_{LN}^* = A_o - A_N$

si $-pi \leq A_{LN}^* \leq pi$ entonces $A_{LN} = A_{LN}^*$

si $A_{LN}^* > pi$ entonces $A_{LN} = A_{LN}^* - 2pi$

si $A_{LN}^* < -pi$ entonces $A_{LN} = A_{LN}^* + 2pi$

Para el caso de las superficies en sombra donde $\delta_{exp} < 0$ y $h_o \geq 0$.

$$D_{ic} = D_{hc}F(\gamma_N) \quad (21)$$

donde $F(\gamma_N)$ es una función que para la irradiancia difusa es calculada con la función,

$$F(\gamma_N) = r_i(\gamma_N) + (\sin \gamma_N - \gamma_N \cos \gamma_N - \pi \sin^2(\gamma_N/2))N \quad (22)$$

donde $r_i(\gamma_N)$ es una fracción de una parte del cielo vista por una superficie inclinada, es decir su valor es:

$$r_i(\gamma_N) = (1 + \cos \gamma_N)/2 \quad (23)$$

El valor de N para superficies en sombra es 0.25227, mientras que para superficies bajo cielo limpio el término N se calcula de la manera siguiente,

$$N = 0,00263 - 0,712K_b - 0,6883K_b^2 \quad (24)$$

K_b es una medida de la cantidad de rayo de irradiancia disponible (proporción entre el rayo de irradiancia y la irradiación solar extraterrestre en una superficie horizontal).

$$K_b = B_{hc}/G_{oh} \quad (25)$$

Donde G_{oh}

$$G_{oh} = G_o \sin h_o \quad (26)$$

Por último, para la estimación para un cielo limpio de la irradiancia reflejada en el terreno para superficies inclinadas (R_i) se parte de un supuesto isotrópico. En este caso, la irradiancia del cielo limpio reflejada en el terreno es proporcional a la irradiancia global horizontal G_{hc} , para el promedio del albedo del terreno ρ_g y una fracción del terreno visto por una superficie inclinada $r_g(\gamma_N)$ (Muneer 1997).

$$R_i = \rho_g G_{hc} r_g(\gamma_N) \quad (27)$$

donde $r_g(\gamma_N) = (1 - \cos \gamma_N)/2$ y la irradiancia global en una superficie horizontal $G_{hc}(W/m^2)$, es dado como la suma de su componente directa y difusa.

$$G_{hc} = B_{hc} + D_{hc} \quad (28)$$

4.2. Cielo real (Real Sky)

La irradiación/irradiancia para cielos nublados son calculadas para un cielo limpio mediante la aplicación de un factor de parametrización de atenuación de cielo cubierto con nubes.

Para la valoración de la irradiación/irradiancia global en una superficie horizontal bajo condiciones nubladas G_h , los valores de cielo limpio son multiplicados por el índice de cielo limpio k_c .

$$G_h = G_{hc} k_c \quad (29)$$

El índice k_c representa la transmisión atmosférica expresada como el ratio entre la radiación global bajo condiciones nubladas y condiciones de cielo limpio. Puede ser calculado

desde una medida de la radiación global G_{hs} y valores calculados de radiación global de cielo limpio G_{hc} .

$$k_c = G_{hs}/G_{hc} \quad (30)$$

Como una alternativa k_c puede también ser derivado desde otros datos climatológicos. Los mapas de muestreo de k_c deben ser luego interpolados en toda la zona de estudio. Para el cálculo de B_h y D_h con el índice de cielo limpio tiene que ser tratado separadamente como se expresa a continuación.

$$D_h = D_{hc}k_c^d \quad (31)$$

$$B_h = B_{hc}k_c^b \quad (32)$$

El ratio de la difusión de la radiación global D_h/G_h para cielos limpios y cubiertos cambia acorde a la nubosidad. En Europa los valores típicos van de 0.3 a 1.

Los mapas de muestreo de D_{hs}/G_{hs} pueden ser derivados desde varios valores puntuales por interpolación horizontal, mediante la siguiente expresión,

$$k = \epsilon \frac{\sum_{n=1}^N \frac{k_n}{d_n^2}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{d_n^2}} + (1 - \epsilon) \frac{\sum_{n=1}^N \frac{k_n}{|\Delta h_n|}}{\sum_{n=1}^N \frac{1}{|\Delta h_n|}} \quad (33)$$

El valor de k_n corresponde a la radiación medida en cada punto de grid, donde N es el número de estaciones utilizadas en la interpolación, d_n es la distancia horizontal desde la estación n hasta el punto donde estamos calculando la radiación solar, $|\Delta h_n|$ es la diferencia de altura entre la estación n y el punto de estudio, y ϵ es un parámetro que toma valores entre 0 y 1. Cuando $\epsilon \rightarrow 1$, aumenta la importancia de la distancia horizontal de cada punto a las estaciones de medida. Esta aproximación se emplea en problemas con una orografía regular o en análisis bidimensionales. De manera análoga, si $\epsilon \rightarrow 0$, entonces la diferencia de altura entre cada punto y las estaciones de medida resulta determinante en detrimento de la distancia horizontal. Esta segunda aproximación se usa cuando la orografía del terreno es irregular. En la práctica, la regiones geográficas estudiadas suelen combinar zonas de orografía irregular con otras orografías más regulares, por lo que tomar un valor intermedio de ϵ suele ser lo más apropiado.

Consecuentemente los mapas de muestreo de componentes del índice de radiación difusa y directa en cielo limpio es calculado de la forma siguiente,

$$D_h = G_h D_{hs}/G_{hs} \quad (34)$$

$$B_h = G_h - D_h \quad (35)$$

$$k_c^d = D_h/D_{hc} \quad (36)$$

$$k_c^b = B_h/B_{hc} \quad (37)$$

donde el subíndice s se usa para distinguir los datos medidos en estaciones meteorológicas B_{hs} y D_{hs} de los valores estimados de B_h y D_h . La radiación total en toda la superficie de estudio será la suma de las tres componente: directa, difusa y reflejada.

5. EXPERIMENTOS NÚMERICOS

El caso estudiado corresponde a una zona del noroeste de la isla de Gran Canaria cuya topografía se muestra en la figura 1. Se ha considerado un valor medio constante del albedo $\rho_g = 0,17$.

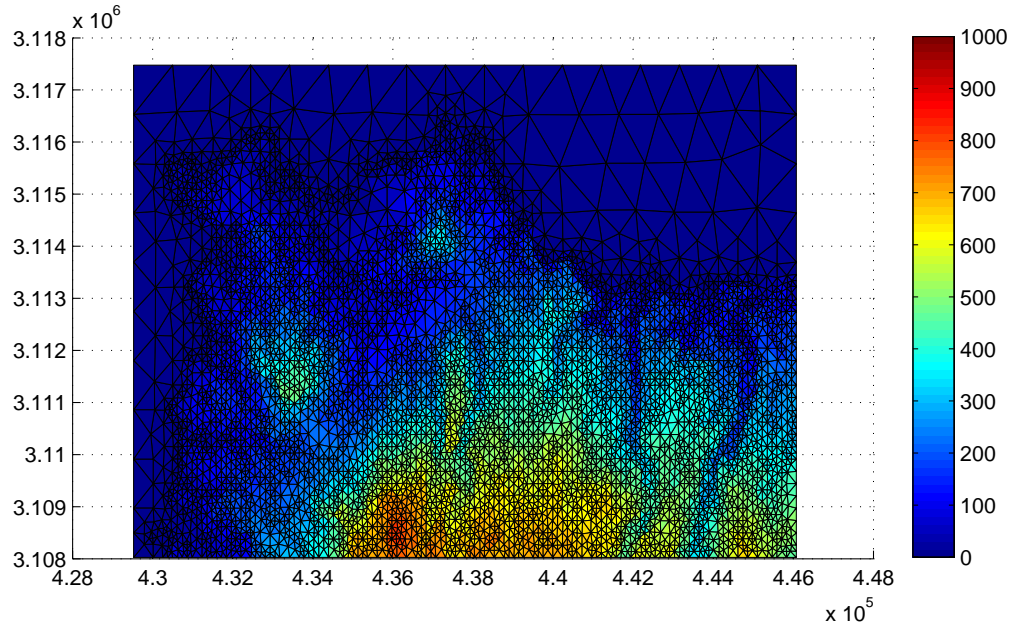


Figura 1: Mapa topográfico del noroeste de Gran Canaria.

Para el 21 de mayo de 2007 a las 18 horas, se ha estudiado la radiación en la zona. En primer lugar, se ha obtenido la distribución de las sombras en la superficie. La figura 2 representa el estado de las sombras que se obtuvo con nuestro modelo.

A continuación se ha obtenido la radiación directa (figura 3), difusa (figura 4) y reflejada (figura 5) para toda la superficie,

Finalmente, la radiación total sobre la superficie, que es la suma de las tres anteriores, se representa en la figura 6.

Para ajustar los resultados obtenidos el cielo limpio a cielo real, es necesario utilizar medidas reales de la radiación distribuidas en la zona. Dichas medidas aún están disponibles, por lo que esta parte del trabajo se propone para realizar en el futuro.

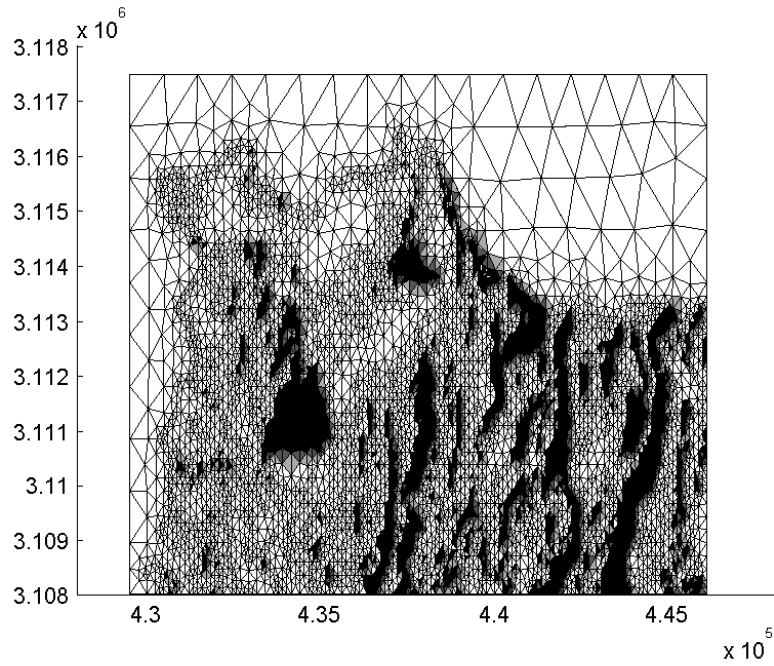


Figura 2: Distribución de las sombras.

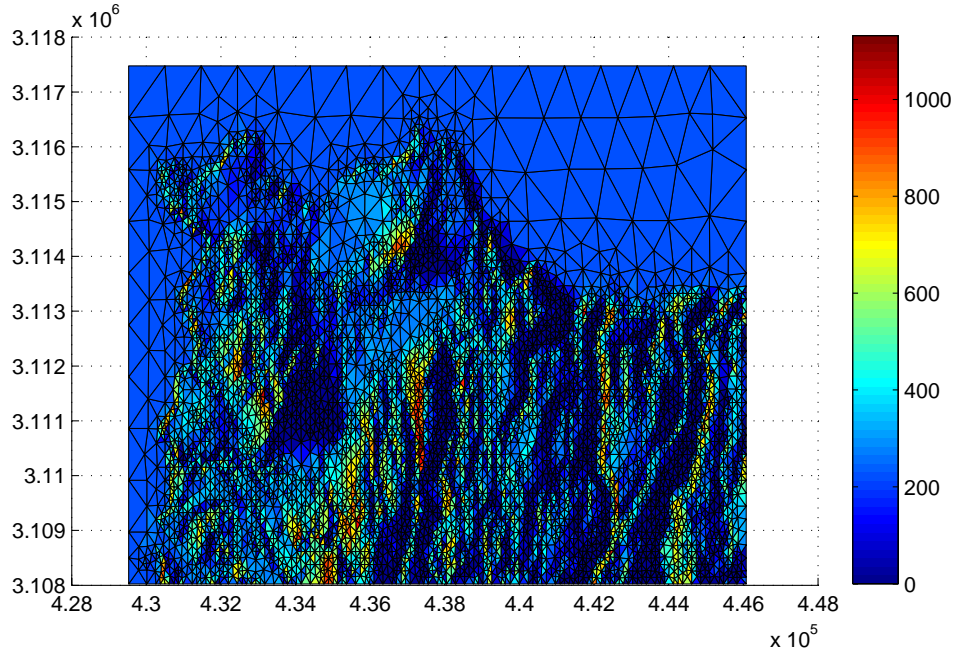


Figura 3: Distribución de la Radiación Solar Directa.

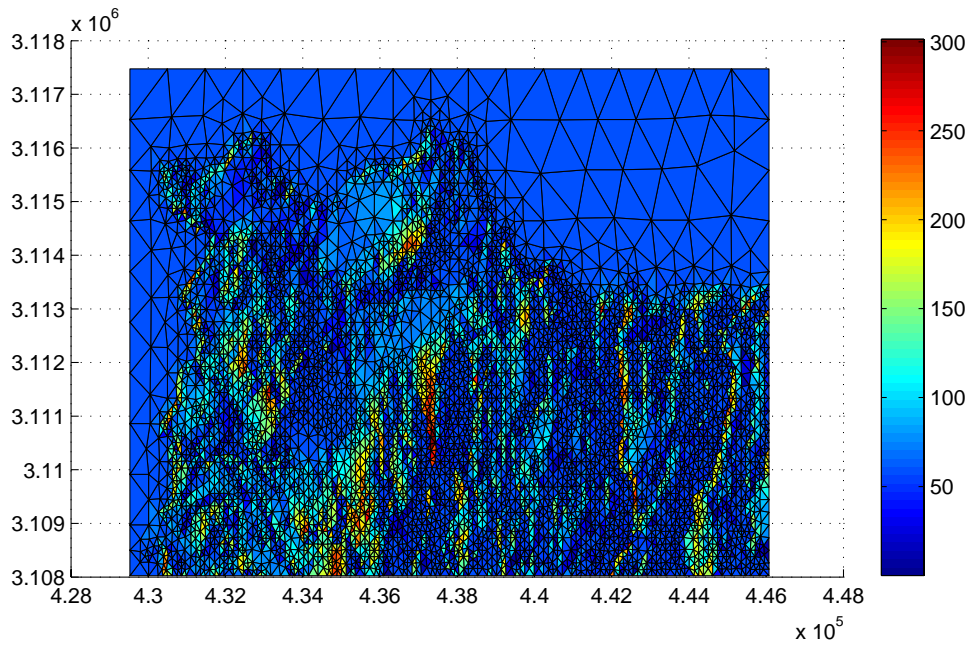


Figura 4: Distribución de la Radiación Solar Difusa.

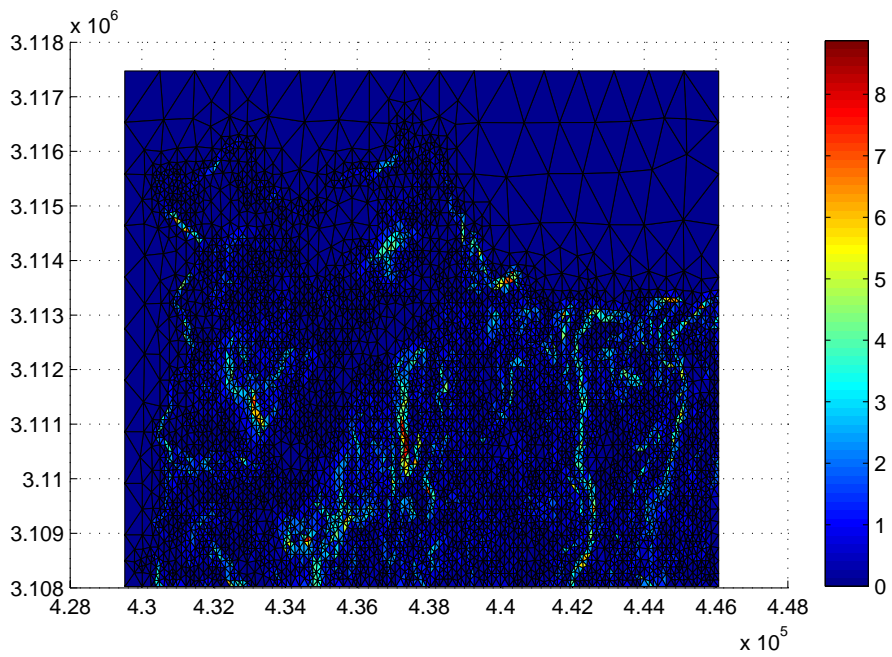


Figura 5: Distribución de la Radiación Solar Reflejada.

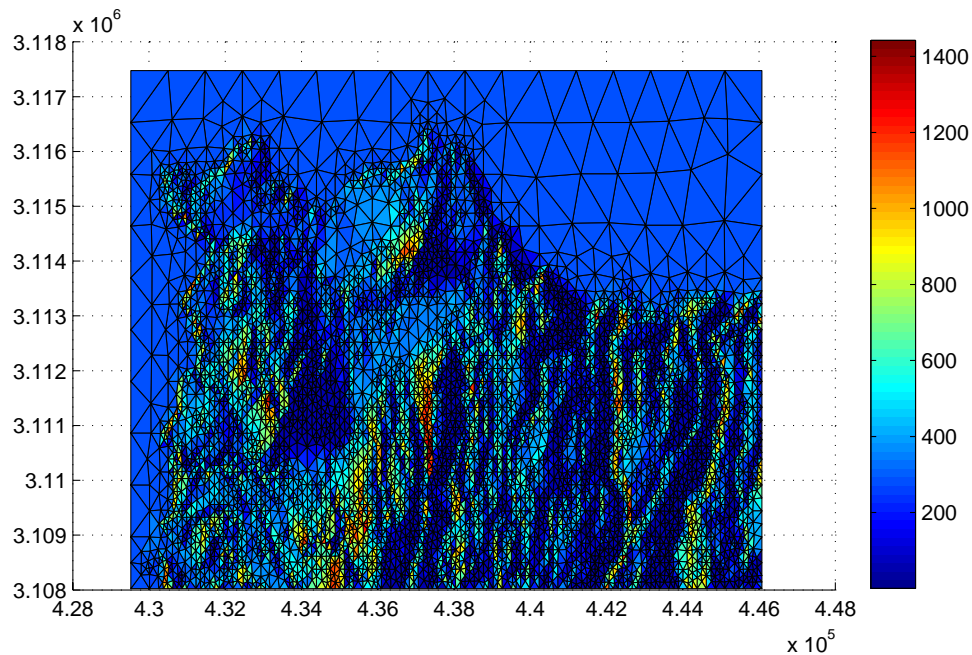


Figura 6: Distribución de la Radiación Solar Total.

6. CONCLUSIONES

Se ha presentado un modelo que permite la estimación de la radiación solar sobre una superficie, partiendo del conocimiento de la localización, topografía y albedo de la zona, para una fecha y hora determinadas. La estimación de la radiación solar para una superficie se calcula teniendo en cuenta la distribución de las sombras en el terreno según el momento del día, objeto de estudio, permitiendo de este modo estimar de forma óptima el aprovechamiento de la energía solar. La utilización de mallas adaptadas a la orografía ha permitido obtener mapas de radiación con la precisión deseada.

REFERENCIAS

- [1] G. Montero, R. Montenegro, J.M. Escobar y E. Rodríguez, "Generación automática de mallas de tetraedros adaptadas a orografías irregulares", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. 19, no. 2, pp. 127–144, (2003).
- [2] M.Suri, J. Hofierka, "A New GIS-based Solar Radiation Model and its application to photovoltaic assessments", *Transactions in GIS*, 8, no. 2, pp 175–190(2004).
- [3] R. Montenegro, G. Montero, J.M. Escobar y E. Rodríguez, "Efficient strategies for adaptive 3-D mesh generation over complex orography", *Neural, Parallel and Scientific Comp*, Vol. 10, no. 1, pp. 57–76, (2002).

- [4] R. Montenegro, G. Montero, J.M. Escobar, E. Rodríguez, J.M. González-Yuste, "Tetrahedral mesh generation for environmental problems over complex terrains", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 2329, pp. 335–344 (2002).
- [5] M.Suri, J. Hofierka, "The solar radiation model for Open source GIS: implementation and applications", *Conference Trento, Italy, 11–13 September 2002*
- [6] M.Jenco, "Distribucia priameho slnecneho ziarenia na reoreliefe a jeje modelovanie pomocou komplexneho digitalného modelu reliéfu", *Geografický časopis*, no. 44, pp. 342–352, (1992)
- [7] F.Kasten, "The Linke turbidity factor based on improved values of the integral Rayleigh optical thickness", *Solar energy*, no. 24, pp. 178–189, (1996)
- [8] F. Kasten and A.T. Young, Revised optical air mass tables and approximation formula", *Applied Optics*, no. 28, pp. 4735–4738, (1989)
- [9] J.Krcho, "Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu", *Bratislava, Veda*, (1990)
- [10] T.Muneer, "Solar Radiation model for Europe", *Building Services Engineering Research and Technology*, no. 11, pp. 153–163, (1990)
- [11] T. Muneer, "Solar Radiation and Daylight Models for Energy Efficient Desing of Buildings", *Oxford, Architectual press*, (1997)
- [12] G. Montero, R. Montenegro, J.M. Escobar, *A 3-D Diagnostic Model for Wind Field Adjustment*, *J Wind Engrg Ind Aer*, Vol. 74-76, pp. 249—61, (1998).
- [13] K. Scharmer, J. Greif, "The European Solar Radiation Atlas. Vol. 2 : Database and exploitation software." (2000).