

# Evaluación de los recursos solares utilizando entornos SIG: el problema de la resolución del Modelo Digital del Terreno

J.A. Ruiz-Arias<sup>(1)</sup>, J. Tovar-Pescador<sup>(1)</sup>, D. Pozo-Vázquez<sup>(1)</sup>, A. Molina<sup>(2)</sup>, F.J. Batlles<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Dpto. Física. Universidad de Jaén. E-23071 Jaén, Spain, [jararias@ujaen.es](mailto:jararias@ujaen.es)

<sup>(2)</sup> Dpto. Informática, Universidad de Jaén. E-23071 Jaén, Spain

<sup>(3)</sup> Dpto. Física Aplicada, Universidad de Almería, 04120, Almería, Spain

## 1. INTRODUCCIÓN

La radiación solar incidente es la principal fuente de energía, y por tanto el factor más determinante de los procesos físicos y biológicos de nuestro planeta (Geiger 1965, Gates 1980, Dubayah y Rich 1995). El conocimiento detallado de la radiación solar incidente sobre la superficie terrestre es crucial para la comprensión y predicción de la evolución de los procesos físico-biológicos y el normal desarrollo de la actividad humana (McKenney et al. 1999).

La radiación solar, entre otros procesos, regula la evaporación a la atmósfera del agua presente en la naturaleza, influyendo directamente en la humedad y temperatura del suelo y del aire. Son muchas las variables que influyen en la cantidad de radiación solar que llega a un punto de la superficie terrestre. A escala global, los principales factores son la latitud, el día del año y las condiciones de la atmósfera que modifica los flujos mediante los procesos de absorción y dispersión. Sin embargo, cuando pretendemos un conocimiento detallado de la radiación solar existen otros factores de carácter local que influyen de manera determinante, siendo la topografía el más importante de todos.

Las estimaciones realizadas, mediante técnicas de interpolación, a partir de medidas de radiación solar obtenidas en las estaciones meteorológicas distribuidas en las zonas más próximas no son suficientemente exactas. Una alternativa es la utilización de modelos digitales del terreno (MDT) que tienen en cuenta la topografía para la determinación de la irradiancia solar. Recientemente se han desarrollado modelos informáticos espacialmente distribuidos y basados en entornos GIS, (*Geographic Information System*), que estiman la cantidad de irradiancia solar. Dichos modelos (por ejemplo, *Solar Analyst* para *ArcView* o *r.sun* para *GRASS*), calculan la visión local del cielo, los mapas de pendientes y orientaciones a partir del MDT y son usados como entrada de la estimación. Estos parámetros, en conjunción con un modelo de transferencia radiativa, sirven finalmente para estimar el valor de la radiación incidente en cada uno de los puntos de la zona.

Los MDT disponibles pueden ser de muy distinta resolución (desde algunos kilómetros hasta pocos

metros). Debido a la gran influencia que el MDT tiene en la estimación de los valores de radiación se hace necesario analizar la resolución más adecuada para conjugar un adecuado ajuste de los valores de radiación obtenidos y el coste computacional que supone. En principio parece obvio suponer que a mayor resolución del modelo digital del terreno mejor estimación de la radiación solar. El problema que se plantea es que el incremento de la resolución incrementa geoméricamente el costo computacional de la estimación. En el presente trabajo se ha realizado un análisis de la dependencia y sensibilidad de las estimaciones de radiación global diaria obtenidas con *Solar Analyst* respecto a la resolución de los modelos de elevación. Se han comparado las estimaciones obtenidas a partir de modelos con resoluciones de 20 y 100 metros. El análisis se ha llevado a cabo en la zona de Huéneja (Granada) dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada.

## 2. METODOLOGÍA Y DATOS

El estudio se ha basado en los resultados obtenidos con *Solar Analyst* para una zona de 300 km<sup>2</sup> en Huéneja (Granada) dentro del Parque Nacional de Sierra Nevada, donde se ha situado una red radiométrica de 14 estaciones que miden radiación global y PAR tanto en superficie horizontal como en superficie inclinada. La zona está localizada a unos 37.2°N y 2.9°W y es adecuada para este estudio por la gran diversidad topográfica que posee. El detalle de la zona se puede ver en la figura 1.

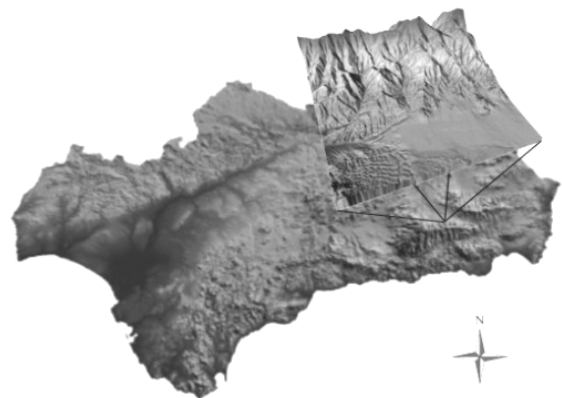


Figura 1 - Mapa de la zona de estudio cerca de Huéneja (Granada) de aproximadamente 300 km<sup>2</sup>.

	<b>Población total (n=782824)</b>			<b>Muestra aleatoria (n=1000)</b>			<b>Error de estimación (%)</b>		
	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Media</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Media</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Media</b>
<b>DEM de 20 m:</b>									
Elevación (m)	2601.00	940.00	1489.96	2562.00	964.00	1490.56	1.51	2.52	0.04
Pendiente (°)	61.48	0.00	12.07	60.72	0.00	12.28	1.24	0.00	1.72
Orientación (°)	359.64	0.00	141.81	359.40	0.00	148.04	0.07	0.00	4.29
<b>DEM 100 m:</b>									
Elevación (m)	2594.00	945.00	1482.71	2554.00	965.00	1483.79	1.55	2.09	0.07
Pendiente (°)	40.37	0.00	9.37	37.22	0.00	9.08	8.12	0.00	3.14
Orientación (°)	359.85	0.00	175.08	359.81	0.00	169.11	0.01	0.00	3.45

Tabla 1 – Comparación de las variables topográficas según la resolución del DEM para el total de la población y una muestra aleatoria por estratos de 1000 puntos. También se muestra el error cometido en la estimación.

### 2.1. La resolución del modelo digital del terreno.

Para nuestro estudio se han utilizado dos modelos digitales del terreno de 20 y 100 metros de resolución respectivamente.

El objetivo fundamental del trabajo es analizar la sensibilidad del modelo de radiación *Solar Analyst* con respecto a la resolución del MDT puesto que éste es una pieza clave en la estimación de la radiación en entornos con una muy compleja topografía y, por tanto, con grandes ocultaciones solares. Se han comparado las salidas de elevación, orientación y pendiente que cada uno proporciona, con el fin de establecer las diferencias entre ellas.

### 2.2. Estimación de la radiación solar con *Solar Analyst*.

*Solar Analyst* es un software de estimación de la radiación solar espacialmente distribuida. Puede calcular la insolación integrada para cualquier período de tiempo teniendo en cuenta la latitud, el día del año, la elevación, la pendiente, la orientación, las ocultaciones debidas a la topografía circundante y la atenuación atmosférica (Fu P. y Rich P.M. 2000). Se encuentra implementado como una extensión de *ArcView GIS v.3.2*.

A partir del MDT, de la fracción de radiación difusa y de la transmitividad atmosférica *Solar Analyst* estima las componentes directa, difusa y global así como los mapas de duración de la radiación directa. La transmitividad atmosférica es el valor promediado a todas las longitudes de onda, expresado como la proporción de radiación extra-terrestre que se transmite como radiación directa a lo largo del camino óptico más corto (Fu P. y Rich P.M. 2000).

Para nuestro análisis hemos trabajado sobre días de cielo despejado, correspondientes a distintos

periodos estacionales: 22 de marzo, 22 de junio, 25 de septiembre y 6 de noviembre.

En la simulación se ha usado una fracción de radiación difusa de 0.3 y una transmitividad de 0.5 que son los valores que el modelo propone para una atmósfera de cielo despejado. Éstas se han mantenido siempre fijas e iguales tanto para las simulaciones del modelo de 20 metros como para el de 100 metros. Se han investigado los valores de radiación diarios, integrando los valores instantáneos de irradiancia. *Solar Analyst* proporciona una imagen raster del mapa de radiación diaria global para cada simulación. También se ha utilizado en el análisis de las mismas el GIS *IDRISI Kilimanjaro*.

Debido a que la resolución de las imágenes obtenidas con el modelo de 20 metros es mayor que las del modelo de 100 metros, para comparar ambos hemos expandido el MDT de 100 m hasta alcanzar la resolución de las de 20 m. Posteriormente, se ha calculado la diferencia entre la estimación del modelo de 20 metros y la del modelo de 100 en cada imagen.

## 3. RESULTADOS

El análisis numérico y la representación gráfica de los resultados se han efectuado sobre un muestreo aleatorio por estratos de 1000 puntos sobre las imágenes. Se ha hecho a través de *IDRISI Kilimanjaro*. En la tabla 1 se muestran el máximo, el mínimo y la media, tanto para el modelo de 20 metros de resolución como para el de 100 metros, para el total de la población de puntos (n = 782824), para la muestra extraída (n = 1000) y el error de estimación cometido en estos estadísticos al usar la muestra en lugar del total de la población.

El algoritmo usado para el cálculo de las pendientes es un método cuadrático sobre la ventana 3x3 que rodea la celda. La orientación, definida como la dirección de mayor pendiente descendente en torno a la celda actual, se elige con orientación de 0° en la

dirección Norte y aumentando en sentido horario (Burrough 1986). El valor mínimo de orientación en ambos modelos (numéricamente hablando) es -1, que es el valor usado para indicar que el píxel corresponde a una zona llana, es decir, con pendiente nula, en cuyo caso no tiene sentido aplicar el concepto de orientación.

Mientras que las elevaciones obtenidas a partir de los dos MDT concuerdan muy bien, los valores calculados de pendiente y orientación presentan diferencias relativamente amplias. Estas diferencias son inherentes al proceso de cálculo, el cuál es muy sensible a la resolución del modelo, especialmente en la obtención de los gradientes .

Los errores de estimación cometidos son aceptables (Tabla 1). En ningún momento se sobrepasa el 5%. Los valores menos coincidentes son para la obtención de máxima pendiente del modelo de 100 metros. Sin embargo los valores medios obtenidos sobre todos los puntos de los MDT son bastantes similares. Los mejores ajustes corresponden a las alturas.

La tabla 2 recoge las máximas diferencias en altura, pendiente y orientación estimadas por los dos MDT. Para las diferencias de orientación hemos considerado el ángulo subtendido entre las superficies por el camino más corto. Por esto ha sido necesaria una traslación de los datos tal que a las diferencias menores de  $-180^\circ$  se les ha añadido un

ángulo de  $360^\circ$  y a las diferencias mayores de  $180^\circ$  se les ha sustraído.

	<b>Máximo</b>	<b>RMSE</b>
Diferencia de altura (m)	115.00	25.84
Diferencia de pendiente (°)	31.78	7.17
Diferencia de orientación (°)	180.00	45.70

Tabla 2 – Máxima diferencia y error cuadrático medio de las estimaciones de las variables topográficas proporcionadas por los modelos digitales del terreno de 20 y 100 metros de resolución.

Una vez que se han comparado las variables topográficas proporcionadas por los dos DEM se ha pasado al análisis de las estimaciones de radiación obtenidas con *Solar Analyst* para investigar cómo influyen en ellas las distintas resoluciones del mapa digital de elevaciones.

Los valores máximo, mínimo y medio de radiación directa, difusa y global para cada día simulado son los detallados en la Tabla 3. En ella se observa que las mayores discrepancias entre la estimación con el modelo de 20 metros y la estimación con el modelo de 100 metros ocurren en los mínimos de radiación. De hecho, en los máximos y las medias apenas existe diferencia de estimación en ningún caso.

La visualización directa de las imágenes raster obtenidas en la simulación aporta una información extra acerca de la distribución geográfica de cualquier característica en general, y de la radiación en particular (Figura 2).

	<b>22 de Marzo</b>		<b>22 de Junio</b>		<b>25 de Septiembre</b>		<b>6 de Noviembre</b>	
	<b>DEM20</b>	<b>DEM100</b>	<b>DEM20</b>	<b>DEM100</b>	<b>DEM20</b>	<b>DEM100</b>	<b>DEM20</b>	<b>DEM100</b>
<b>Directa:</b>								
Máximo	15.29	15.47	20.87	20.97	14.64	14.70	9.96	9.33
Mínimo	0.37	4.38	7.78	15.04	0.02	3.38	0.04	0.22
Media	10.71	10.85	18.34	18.63	9.77	9.89	4.68	4.71
<b>Difusa:</b>								
Máximo	4.26	5.00	6.82	5.90	4.70	4.75	3.11	3.14
Mínimo	2.05	3.24	3.63	3.55	2.46	3.07	1.59	2.02
Media	3.57	4.31	5.87	5.15	3.98	4.08	2.55	2.61
<b>Global:</b>								
Máximo	19.21	19.99	27.66	26.85	18.72	18.98	12.36	12.16
Mínimo	3.13	8.59	11.85	19.98	2.80	7.38	1.82	2.53
Media	14.29	15.16	24.22	23.78	13.75	13.97	7.22	7.33

Tabla 3 – Valores máximo, mínimo y medio en  $MJ/m^2$  de las componentes directa, difusa y global obtenidas con *Solar Analyst* para la radiación diaria en la zona de estudio para los cuatro días indicados en la tabla.

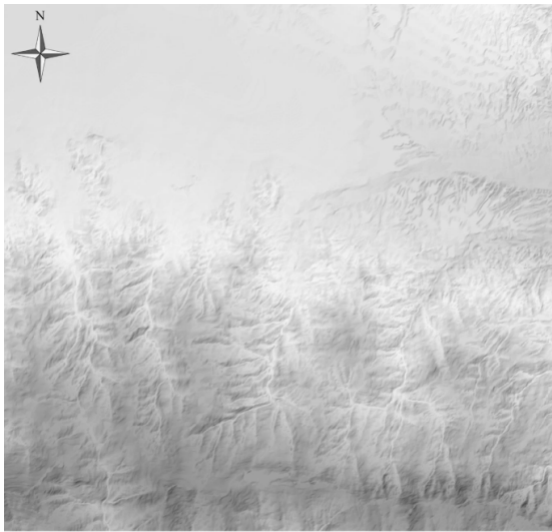


Figura 2 – La figura de la izquierda es el DEM de 20 metros de Huéneja. En la imagen de la derecha se ha superpuesto sobre el DEM una máscara con las zonas donde existe una mayor diferencia de estimación de radiación global.

#### 4. CONCLUSIÓN

La característica fundamental de un MDT es la resolución y ésta afecta a cualquier proceso de cálculo realizado con él. MDT con distinta resolución generan distintas alturas, pendientes y orientaciones y, consecuentemente, diferentes estimaciones de radiación solar.

Mientras que los valores de elevación (Tablas 1 y 2) proporcionados por los DEM son muy similares, los de pendientes y orientaciones varían apreciablemente entre ambos DEM, debido a que el proceso de cálculo del gradiente de la elevación, es muy sensible a la resolución (Tabla 1). Este hecho influye en las diferentes estimaciones de radiación solar que se obtienen con ambos modelos digitales.

Los valores medios de radiación diaria estimados (Tabla 3) con los dos MDT, al igual que los valores máximos, son bastante análogos. Los máximos corresponden a los puntos donde las ocultaciones solares debido a la topografía son mínimas. Esto es, en aquellas zonas donde la dependencia de la radiación con respecto a la topografía es pequeña. Como consecuencia, la distinta resolución que tienen ambos DEM no afecta en gran medida a estos valores. En cambio, en los valores mínimos de radiación la diferencia es bastante más grande. Esto se debe a que éstos corresponden a puntos con mayores ocultaciones solares, las cuáles se deben a la topografía circundante. Como consecuencia, estos puntos son más sensibles al modelo digital del terreno empleado y, por tanto, a la resolución del mismo.

Los resultados obtenidos nos llevan a concluir que la resolución del MDT empleado en el cálculo de la radiación solar es especialmente crítica en aquellas zonas con grandes ocultaciones solares, esto es, gargantas, barrancos y valles.

El siguiente paso ahora es resolver el compromiso entre peso computacional y el error en la estimación de la radiación a la hora de escoger una resolución u otra del MDT para una región dada.

#### 5. REFERENCIAS

- Burrough, P.A., (1986): "Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment." Oxford University Press, New York
- Dubayah, R. y P.M. Rich (1995): "Topographic solar radiation models for GIS". *International Journal of Geographical Information Systems* 9:405-413.
- Fu, P. y P.M. Rich (2000): "The Solar Analyst 1.0. User Manual". *Helios Environmental Modeling Institute, LLC*. [www.hemisoft.com](http://www.hemisoft.com)
- Gates, D.M. (1980): *Biophysical Ecology*. Springer-Verlag, New York.
- Geiger, R.J. (1965): *The climate near the ground*. Harvard University Press, Cambridge.
- IDRISI (2003): *IDRISI 14.01 (Kilimanjaro) help system*.
- McKenney, D.W, B.G. Mackey y B.L. Zavitz (1999): "Calibration and sensitivity analysis of a spatially-distributed solar radiation model". *International Journal of Geographical Information Science*, Vol. 13, NO. 1, pp 49-65.
- Stocks, A.M. y Heywood, D.I. (1994): "Mountain regions and geographical information systems, an overview" en M. F. Price y D.I. Heywood (eds), "Mountain environments and geographic information systems". Taylor & Francis, London.
- Zevenbergen, L.W. y C.R. Thorne (1987): "Quantitative analysis of land surface topography". *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 12, pp. 12-56.