

## La radiación solar global en la región sur de Ecuador. Aproximación a partir de modelos teóricos

Orlando H. Álvarez Hernández<sup>a</sup>, Thuesman E. Montaña Peralta<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Área de la Energía, las Industrias y los Recursos naturales no renovables-  
Universidad de Loja  
[orlando21alvarez@gmail.com](mailto:orlando21alvarez@gmail.com)

<sup>b</sup> Prometeo Senescyt – Universidad de Loja  
[thuesmon@yahoo.es](mailto:thuesmon@yahoo.es)

**Resumen.** Se calculan los valores de la radiación solar teórica en la Región Sur de Ecuador (RSE; provincias de El Oro, Loja y Zamora Chinchipe), a partir de la corrida del modelo de Hottel, considerando las afectaciones por la presencia de nubosidad así como por las superficies de sombra orográfica. Se presentan los mapas de las sumas mensuales de enero y agosto y el de promedio anual de radiación solar global considerando los valores de altura sobre el nivel del mar obtenidos del Modelo Numérico de Altitud de la zona de estudio. Se analizan las posibles afectaciones producidas por la orografía y se discuten los métodos utilizados. Se dan conclusiones y se formulan recomendaciones.

**Palabras Clave:** Modelo Hottel, radiación solar, sombra orográfica.

### 1. Introducción

En el presente trabajo, se parte de la hipótesis de “que es posible obtener mapas de radiación a partir de modelos teóricos que sean consistentes con la realidad”, y el objetivo es “la confección de mapas de radiación global que permitan su utilización tanto, para conocer con mayor precisión los potenciales de energía solar en la Región Sur de Ecuador (RSE), como para la determinación de diferentes componentes medioambientales, tales como la evapotranspiración potencial”

El trabajo se enfocó en la obtención de los valores de radiación directa, difusa y global sobre una superficie horizontal, considerando un cielo claro, utilizando el "modelo de Hottel" [1]. A partir de datos de reanálisis de la cantidad de nubosidad diurna de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) [19], se corrigen los mapas mensuales, así como el mapa promedio anual de radiación global. Finalmente se mejora resultado utilizando el análisis de los mapas de brillantez que se obtienen a partir del modelo digital de altitud para la RSE y se obtuvieron coeficientes de error a partir de los datos de cinco estaciones de medición de radiación solar global.

Se conoce que la atmósfera ejerce un efecto de redistribución de la radiación que recibe del Sol, por ejemplo, en un día muy despejado, una parte relativamente pequeña

se convierte en radiación difusa, mientras que la mayor parte permanece como directa. En cambio, en un día nublado, la redistribución de la radiación es mucho más notable. Las nubes densas tienen un albedo (fracción de energía reflejada) muy alto, lo cual hace que, en un día densamente nublado, una gran parte de la radiación solar se refleje al espacio exterior. Además, la energía que logra pasar a través de las nubes, es únicamente radiación difusa.

De acuerdo con los recientes desarrollos en la calibración de la instrumentación radiométrica solar de banda ancha y las mejoras de la exactitud de las medidas de radiación solar de banda ancha, se perfila una mejora en lo referente a la radiación difusa y la calibración de los radiómetros y el software de caracterización y para las calibraciones del piranómetro al aire libre [2].

Varios modelos de estimación de la radiación solar de banda ancha, incluyendo algunos desarrollados en el Laboratorio Nacional de Energía Renovable de los Estados Unidos, para la estimación de la radiación directa, total, hemisférica y difusa incluyendo el modelo de cielo claro de Bird para la radiación solar global, directa y difusa, el Código de Simulación de la Insolación Directa (Direct Insolation Simulation Code, DISC) para la estimación de la radiación directa a partir de mediciones globales, y los modelos METSTAT (Meteorological and Statistical) y Climatological Solar Radiation (CSR) para estimar la radiación solar a partir de los datos meteorológicos, presentan, en la actualidad, incertidumbres que son representativas de la incertidumbre en los datos medidos [2].

Errores entre 25 y 100 W/m<sup>2</sup> son posibles en los datos pirheliométricos y los errores de 25 W/m<sup>2</sup> en los datos pirheliométricos pueden ocurrir bajo condiciones de cielo claro. Estos errores instrumentales son importantes si se modelan perfiles instantáneos, horarios, subhorarios o diarios. Los análisis de totales anuales de datos corregidos y no corregidos han mostrado diferencias de menos del 0.1% en el resultado [3].

Por otra parte, un mapa de reflectancia puede basarse en datos experimentales. Se puede montar la muestra de una superficie y medir su brillo aparente a partir de un punto de visualización fijo bajo condiciones de iluminación también fijas, mientras se varía su orientación. De igual forma se puede tomar un cuadro de un objeto de prueba de una forma conocida y calcular la orientación del elemento de superficie correspondiente para cada punto en la imagen. Entonces, el mapa de reflectancia se obtiene por lectura de las mediciones de brillantez en cada punto.

De manera alternativa, se puede utilizar incluso información más detallada acerca de la reflexión de la luz desde la superficie. La función de distribución de reflectancia bidireccional (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) describe cuan brillante podrá aparecer una superficie vista desde una dirección específica cuando es iluminada desde otra dirección fijada con antelación [4]; [5]. Mediante integración sobre una distribución dada de las fuentes de luz, se puede calcular el mapa de reflectancia a partir de esta información [6].

Entonces, un mapa de reflectancia es similar a una “convolución” de la BRDF y la distribución de la fuente de radiación. Más comúnmente, los mapas de reflectancia se basan en modelos fenomenológicos en lugar de la realidad física. Las llamadas “Superficies Lambertianas”, o el difusor perfecto, por ejemplo, tienen la propiedad de parecer igualmente brillantes desde todas las direcciones desde donde se observe.

De igual forma reflejan toda la luz sin absorber nada. De hecho, estas dos condiciones son suficientes para determinar de forma unívoca el BRDF de tal

superficie, y a partir de ésta el mapa de reflectancia, brindando las posiciones de las fuentes de luz dadas. Algunos mapas de reflectancia se basan en modelos matemáticos de la interacción de la luz con la superficie. Estos modelos tienden a ser muy complejos para obtener una solución analítica o muy simple para representar de forma efectiva las superficies reales. No obstante, algunos han llegado muy cerca de la predicción del comportamiento observado de superficies particulares [6]; [7]; [8].

Nuevos mapas de reflectancia fueron determinados [9] en base a métodos para producir mapas de Relieves Sombreados que no dependan de la comprensión del proceso de formación de las imágenes o de la física de la reflexión de la luz, sino, de la forma en que la luz en un punto dependa del gradiente de la superficie geográfica subyacente.

Como los mapas de reflectancia brindan una brillantez aparente como función solamente de un gradiente superficial local, no toma en cuenta efectos dependientes de la posición del elemento de superficie. Uno de tales efectos es la iluminación de un elemento de superficie por otro. Afortunadamente este efecto de iluminación mutua es pequeño a menos que la reflectancia superficial sea muy alta [10].

Otro efecto dependiente de la posición sobre el brillo aparente es el bloqueo de la luz por una porción de superficie antes de que la luz alcance otra.

Así mismo la dispersión de luz por las moléculas de aire y aerosoles cambia la brillantez aparente de un elemento de superficie visto a través de la atmósfera. Sin embargo, la diferencia entre la brillantez y el valor del entorno disminuye con el espesor de la capa gaseosa a través de la cual la superficie es visualizada ([11]).

## 2. Materiales y Métodos

Para la realización del presente trabajo se partió, inicialmente, de la confección de un Libro Excel utilizando para ello la metodología propuesta por Passamai [12], adicionando un grupo de Hojas de Cálculo, de forma que se pudiera obtener de forma automática el resumen mensual y anual de los valores diarios para los puntos geográficos seleccionados [12], para poder interpolar posteriormente estos resúmenes en la confección de los diferentes mapas para la zona de estudio. Posteriormente y debido a la necesidad de conocer el comportamiento de la radiación solar, y para determinar también, qué sectores de la Región Sur del Ecuador y en qué etapas del año, poseen el mayor potencial solar, y considerando la ausencia de suficientes series de observaciones de esta variable meteorológica, se utilizaron los métodos teóricos de Hottel y PVGIS para el cálculo de la variable, los cuales se presentan en forma de un software, basado en LABVIEW, para su utilización por cualquier interesado en conocer los valores horarios, diarios, mensuales y anual de la radiación global en la Región Sur del Ecuador.

El modelo de Hottel [12] es de la forma:

$$\tau_b = a_0 + a_1 \cdot e^{(-k/\cos(\theta_z))} \quad (1)$$

Aquí  $a_0$ ,  $a_1$  y  $k$  son parámetros ajustados empíricamente [12], utilizados por Álvarez y otros [14].

Para estimar la irradiación difusa  $\tau_d$  para una superficie horizontal se utiliza la expresión de Liu y Jordan [15] de la forma:

$$\tau_d = 0,2710 - 0,2939 \tau_b \quad (2)$$

Integrando estas ecuaciones, desde la salida hasta la puesta del Sol, se obtiene la irradiación a lo largo de un día. En el modelo de Hottel, la atmósfera estándar representa una condición típica de latitud media y sin contaminación por polución, independientemente del grosor del ozono [16].

Se utilizaron los datos de elevación obtenidos del mapa topográfico digitalizado de toda la Región Sur de Ecuador, con las correspondiente curvas de nivel a partir de la información perteneciente al Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) de la National Aeronautics and Space Administration (NASA) (celdas cada 90 metros) el cual fue cortado y la información de longitud, latitud y altura fueron introducidas en el CAD SURFER, obteniéndose un modelo numérico de altitud (MNA) mediante interpolación, utilizándose un Modelo Krigging lineal simple, cada  $0,001^\circ$  de longitud y latitud, que permite obtener el valor correspondiente a la altura máxima en cada punto (Figura 1).

Los puntos geográficos se seleccionaron a partir de los valores de longitud y latitud geográfica y la altura sobre el nivel del mar obtenidos a partir del modelo numérico de altitud para la zona de proyecto, calculándose los valores horarios de radiación directa, difusa y global para cada punto y, posteriormente, se confeccionaron los mapas correspondientes de radiación global, para cada mes y para el anual.

Una vez obtenidos los mapas correspondientes, se procedió a una rectificación de los mismos utilizando para ello datos de reanálisis de los valores de nubosidad diurna, recalculándose los mapas. A partir de los valores mensuales y anuales de radiación global, sobre una superficie horizontal, considerándose la condición de día claro, para los distintos meses, así como del promedio anual, obtenidos aplicando correcciones debido a la nubosidad, obtenidos de los reanálisis efectuados por la NASA, se obtienen los valores de la radiación global para los meses y para el promedio anual ([14]).

A partir de los datos de las tablas obtenidas para cada uno de los puntos de una rejilla con los extremos:  $-77.0^\circ$  W,  $-81.0^\circ$  W; y  $-3.0^\circ$  S,  $-6.0^\circ$  S, en longitud y latitud respectivamente, con un tamaño de celda de  $0.001^\circ$ , se calcularon los valores promedio mensuales y anuales para el período de 22 años incluidos en los reanálisis, mediante una interpolación utilizando un modelo Krigging lineal.

Se trabajó en el Software Envi 4.7, donde se utiliza la Modelación Topográfica sobre datos del Modelo Numérico de Altitud (MNA) obtenido a partir de los datos SRTM y del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés) y otros datos digitales de elevación para generar superficies Lambertianas (Relieve Sombreado), así como para extraer información paramétrica, incluyendo pendiente, aspecto y diferentes convectividades y curvaturas. Todos los parámetros se calculan fijando una superficie cuadrática a los datos digitales de elevación para el tamaño total del Kernel y obteniendo las derivadas apropiadas. Se puede cambiar el tamaño del Kernel de forma que se pueda extraer información topográfica multiescalar.

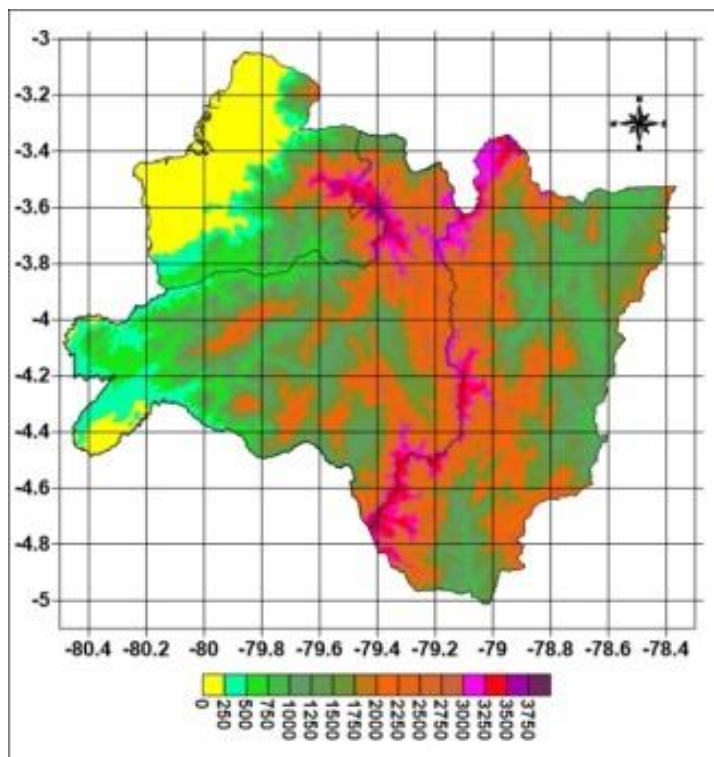


Fig. 1. Modelo Numérico de Altitud (MNA) de las Provincias El Oro, Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador.

Cuando se colorea un pixel (unidad digital de una imagen) basándose en sus vecinos, se habla acerca de una ventana o Kernel (usualmente una rejilla de 3 x 3 ó 5 x 5), que no es más que una matriz de convolución que indica cuáles pixeles deben influir sobre nuestro pixel original y en cuánto. Se realiza una ponderación para cada pixel cubierto por el Kernel determinado.

Por otra parte, las posibilidades que brinda el Sistema de Información Geográfica ENVI para la modelación topográfica son utilizadas para la obtención de mapas de brillantez o de relieve sombreado. En la figura 2 se muestran ejemplos de cómo trabaja el ENVI 4.7.

Con el objetivo de comparar los resultados se obtuvieron los datos de los reanálisis de la NASA para la insolación, los cuales se muestran en la Tabla 1 después de ser transformados a las mismas unidades, a partir de los cuales se confeccionaron los correspondientes mapas. Se realizó una operación entre imágenes para los datos de la suma mensual de la radiación teórica obtenida por el método de Hottel para cada mes particular y para el promedio anual, mediante multiplicación con el por ciento de horas sol obtenido para cada mes y promedio anual para determinar la cantidad de radiación que corresponde a cada uno de los períodos.

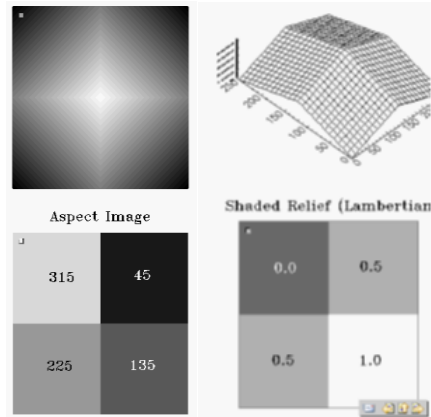


Fig. 2. Ejemplos de salidas de Modelación Topográfica en Envi 4.7.

Se utilizaron los mapas de sombreado obtenidos del Modelo Numérico de Altitud, considerando las siguientes combinaciones de ángulos de elevación y de azimut: (15,45); (15,135); (15,225); (15,315); (30,45); (30,135); (30,225); (30,315); (45,45); (45,135); (45,225); (45,315); (60,45); (60,135); (60,225); (60,315). A partir de estos mapas se confeccionaron los mapas promedio de acuerdo a los azimut Norte y Sur y finalmente se promediaron éstos para obtener el mapa de sombras para toda la zona de proyecto.

Una vez obtenido el mapa de sombras, se multiplicaron los mapas de radiación solar global por meses y anual considerando las horas de sol para cada período por el mapa de sombras para la zona. Se hizo una comparación de los mapas con respecto a los mapas obtenidos del reanálisis de la insolación de la NASA. De igual forma se hace un análisis de los resultados obtenidos con los mapas obtenidos por el Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador (CONELEC) [17] para todo Ecuador, a partir del modelo obtenido.

Se calcularon los errores a partir de los datos mensuales y promedio anual para las cinco estaciones de radiación global utilizadas durante el período marzo 2013 – junio 2014 y se promediaron los mismos obteniéndose los coeficientes por los cuales habría que multiplicar cada mes y promedio anual con respecto a las imágenes de radiación global para la zona de proyecto a fin de obtener un mejor resultado ajustado a las condiciones reales de nubosidad que existen en la RSE.

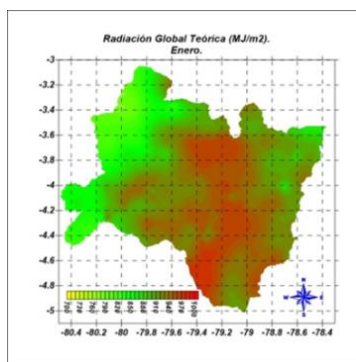
### 3. Resultados y Discusión

En las figuras 3, 4 y 5 se muestran los mapas de la suma de la radiación solar en día claro correspondientes a los meses de enero, agosto y al promedio anual en la zona de estudio.

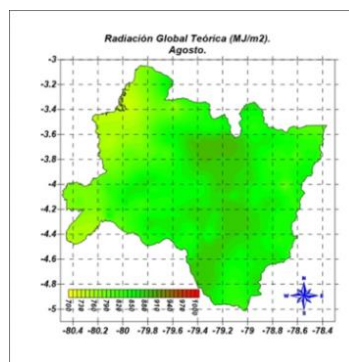
En las figuras 6, 7 y 8 se muestran los mapas de los meses de enero, agosto y promedio anual del por ciento de las horas sin nubosidad obtenidas a partir del reanálisis realizado por la NASA y procesado posteriormente para la zona del proyecto.

**Tabla 1.** Ejemplo de datos resultado de los reanálisis de insolación (MJ/m<sup>2</sup>\*mes)

G14      fx    =[INS(KWHM2).xls]INS(KWHM2)'!G14/0.27778*31								
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	LAT	LONG	I	II	III	IV	V	VI
2	-5	-81	834.76	752.97	843.69	768.95	732.09	683.63
3	-4	-81	816.91	743.90	830.30	773.27	741.02	690.11
4	-3	-81	796.82	734.83	828.07	778.67	748.83	699.83
5	-2	-81	786.77	728.78	831.41	782.99	756.64	701.99
6	-1	-81	780.08	722.73	829.18	778.67	763.34	711.71
7	0	-81	761.11	716.68	819.14	779.75	764.45	713.87
8	-5	-80	828.07	748.94	844.81	765.71	732.09	683.63
9	-4	-80	813.56	739.87	836.99	768.95	741.02	692.27
10	-3	-80	800.17	734.83	828.07	774.35	748.83	700.91
11	-2	-80	786.77	727.77	832.53	779.75	754.41	701.99
12	-1	-80	774.50	724.75	828.07	772.19	761.11	711.71
13	0	-80	758.87	715.67	821.37	775.43	756.64	709.55
14	-5	-79	823.60	760.03	843.69	763.55	732.09	680.39
15	-4	-79	799.05	748.94	835.88	766.79	741.02	692.27
16	-3	-79	797.93	736.84	831.41	771.11	746.60	700.91
17	-2	-79	774.50	727.77	831.41	775.43	752.18	704.15
18	-1	-79	770.03	714.67	822.49	775.43	758.87	709.55



**Fig. 3.** Suma de la Radiación Global, Mes de Enero.



**Fig. 4.** Suma de la Radiación Global, Mes Agosto

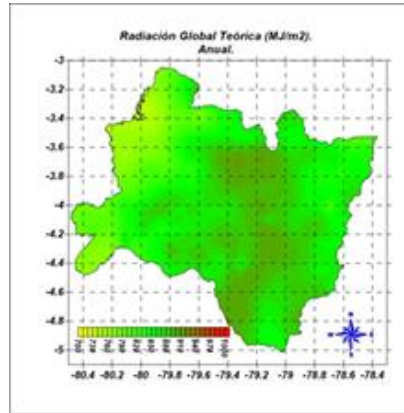


Fig. 5. Radiación Global. Promedio Anual.

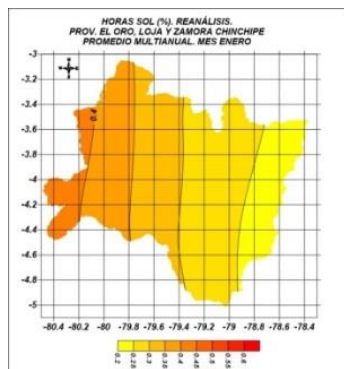


Fig. 6. Horas Sol (%). Promedio Enero.

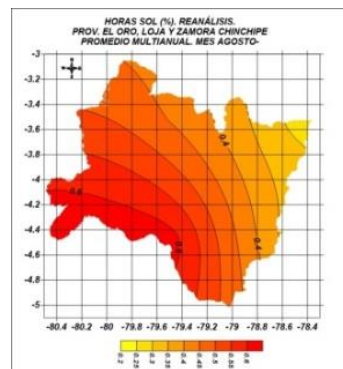


Fig. 7. Horas Sol (%). Promedio Agosto.

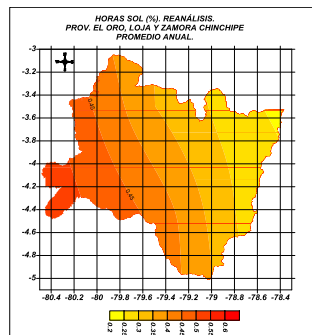
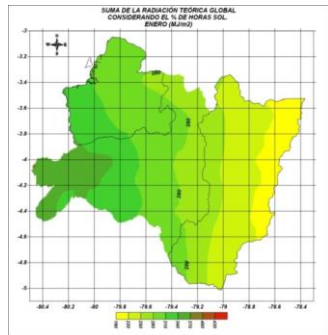


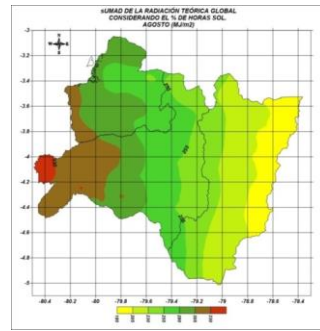
Fig. 8. Horas Sol (%). Promedio Anual.



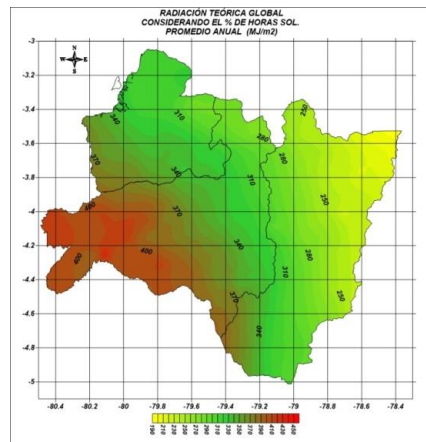
Los mapas de valores medios diarios por meses considerando el por ciento de días claros por meses para enero, agosto y el período anual se muestran en las figuras 9, 10 y 11.



**Fig. 9.** Suma de la Radiación Global, Mes Enero.



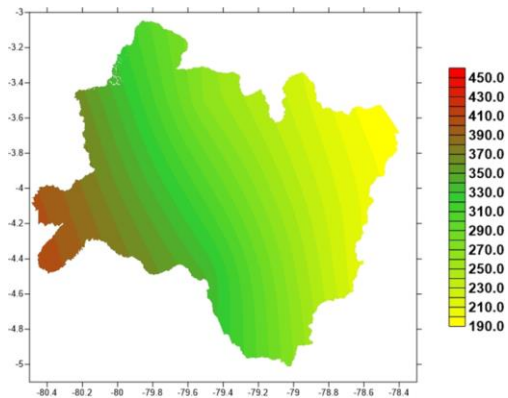
**Fig. 10.** Suma de la Radiación Global, Mes Agosto.



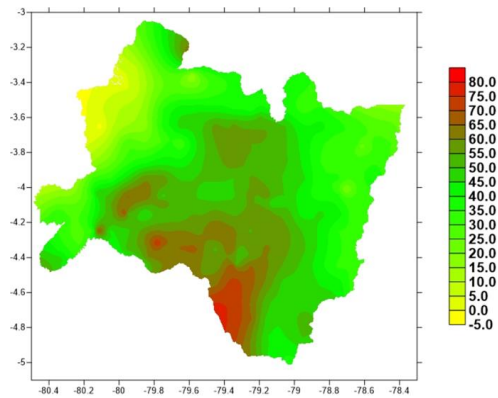
**Fig. 11.** Radiación Global, Promedio Anual.

Se observa, que debido a la presencia de la nubosidad, disminuyen considerablemente los valores de radiación solar posibles a obtener de acuerdo al modelo de día claro de Hottel, además se invierten las zonas con mayores y menores valores de este factor meteorológico y climático, debido a la nubosidad que se genera en las zonas más altas de la cordillera andina.

Al comparar el resultado de la irradiación anual con los valores de irradiación de la NASA considerando la frecuencia anual de días soleados se puede observar que no existen grandes diferencias. (Fig. 12). El mapa de las diferencias se muestra en la Figura 13.

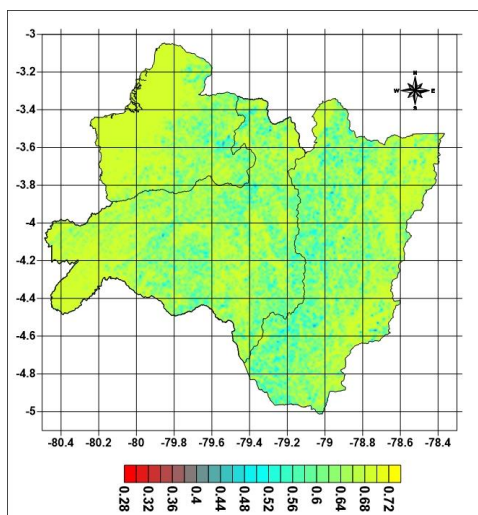


**Fig. 12.** Radiación Global, Promedio Anual.  
Según datos de la NASA



**Fig. 13.** Diferencias Radiación Global,  
Promedio Anual.

Se realizaron multiplicaciones de los mapas de cada mes y anual por el mapa de relieve sombreado (Fig. 14) a fin de obtener los mapas resultantes finales. Los mapas de los meses de enero (Fig. 15) y agosto (Fig. 16) y el anual (Fig. 17), se comparan con los mapas obtenidos por el Consejo Nacional de Electricidad del Ecuador (2008) [18]. Se muestran esquemas correspondientes a los mapas de enero (Fig. 18), agosto (Fig. 19) y anual (Fig. 20), las cuales son consistentes con los mapas obtenidos en el presente trabajo después de ser convertidos a las mismas unidades utilizadas por CONELEC.



**Fig. 14.** Mapa de relieve sombreado de la RSE.

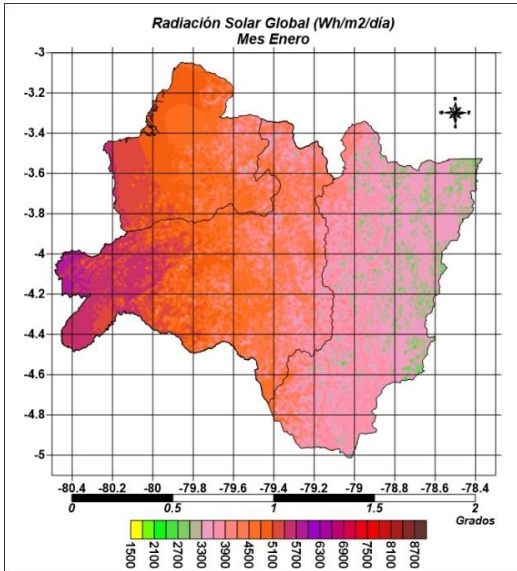


Fig. 15. Mapa de Radiación Solar Global. Mes Enero.

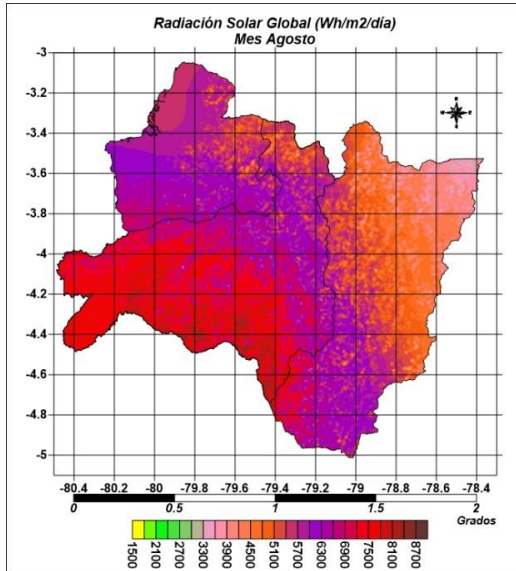


Fig. 16. Mapa de Radiación Solar Global. Mes Agosto.

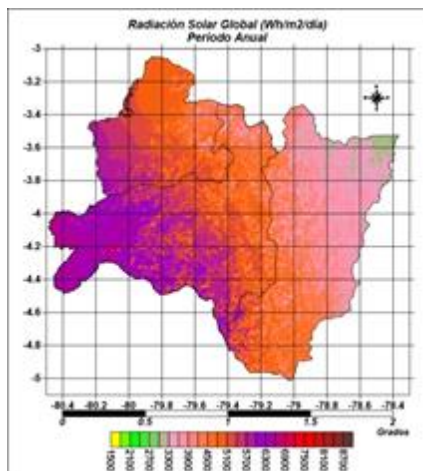
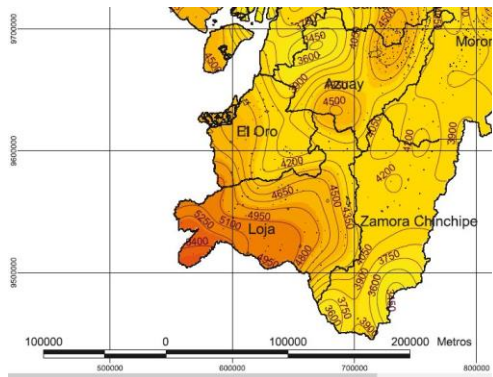
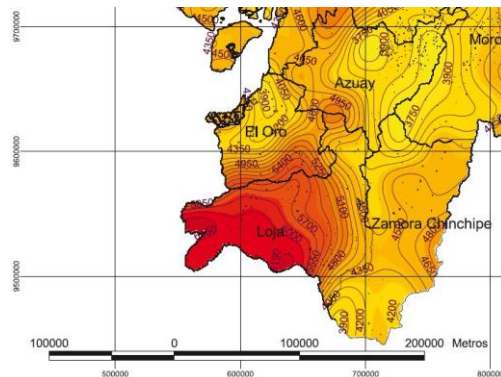


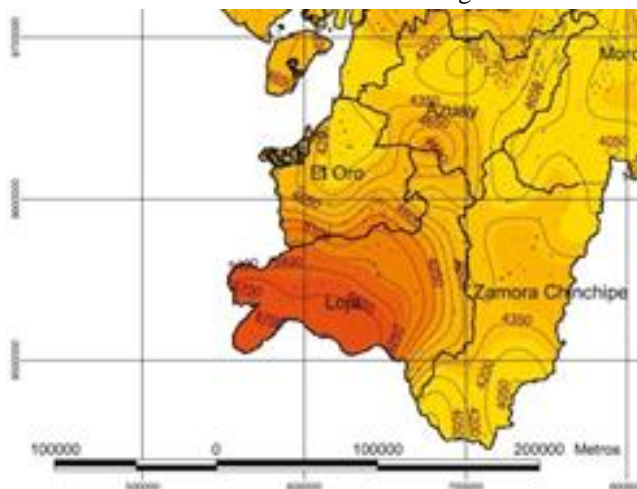
Fig. 17. Mapa de Radiación Solar Global. Período Anual.



**Fig. 18.** Esquema del mapa del mes de Enero. Fuente: CONELEC.



**Fig. 19.** Esquema del mapa del mes de Agosto. Fuente: CONELEC.

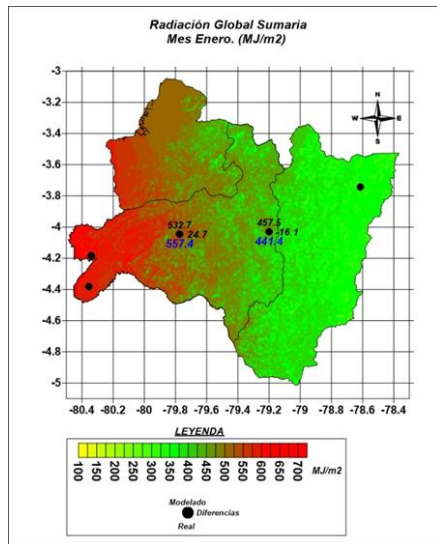


**Fig. 20.** Esquema del mapa Anual. Fuente: CONELEC.

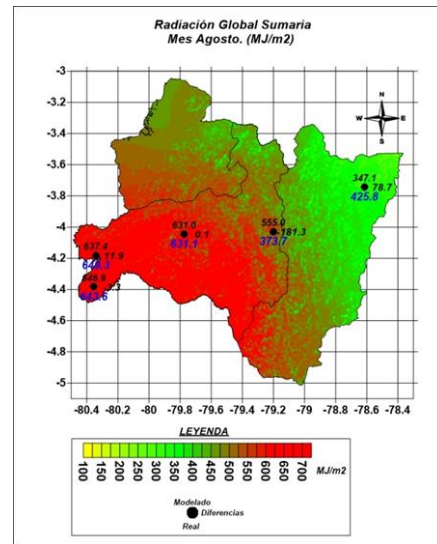
Los valores de los coeficientes por los cuales fue necesario multiplicar las imágenes de radiación solar global para ajustar las mismas a los datos reales de nubosidad en la RSE se muestran en la siguiente tabla 2, y las imágenes finales de la radiación global para los meses de enero, agosto y promedio anual se muestran en las figuras 21 – 23.

**Tabla 2.** Coeficientes de ajuste por meses y anual

Enero	Febr.	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Ago.	Sept.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
2.5	2.6	2.3	2.5	2.1	1.9	2.0	1.9	2.0	2.0	2.5	2.3	1.3



**Fig. 21.** Mapa de Radiación Solar Global. Mes Enero. Final



**Fig. 22.** Mapa de Radiación Solar Global. Mes Agosto. Final.

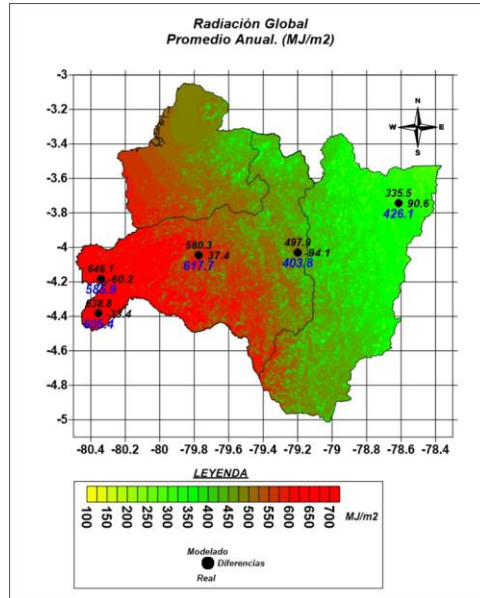


Fig. 23. Mapa de Radiación Solar Global. Promedio Anual. Final

#### 4. Conclusiones

Los valores máximos de radiación global, considerando los por cientos de días con cielo claro se encuentran al Oeste de la zona del proyecto mientras los mínimos aparecen, fundamentalmente hacia el Este de la misma, coincidiendo con las zonas de mayor por ciento mensual de días claros y días nublados respectivamente.

No existen diferencias significativas entre los valores anuales obtenidos y aquellos reportados en los reanálisis de la NASA, así como tampoco con los obtenidos por la CONELEC.

Al aplicarle al presente modelo correcciones por pendiente y orientación de las pendientes, mediante el mapa de relieve sombreado, se ha obtenido un modelo más representativo de la radiación global promedio a obtenerse en la Región Sur del Ecuador.

Finalmente, al aplicar las correcciones a la nubosidad utilizando los datos de las estaciones de medición de radiación global, se obtuvo un modelo final ajustado a la realidad que, no obstante pudiera ser mejorado si se contara con suficientes datos de radiación solar global para toda la RSE y no solamente utilizando los datos de las cinco estaciones utilizadas en el presente trabajo de investigación.

## Agradecimientos

Este trabajo científico ha sido financiado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (Ecuador) y la Universidad Nacional de Loja.

## Referencias

1. HOTTEL, H. C.: A simple model for estimating the transmittance of direct solar radiation through clear atmospheres. *Solar Energy*, 18, p. 129, (1976).
2. MYERS, D.R.: Solar Radiation Modeling and Measurements for Renewable Energy Applications: Data and Model Quality. En: International Expert Conference on Mathematical Modeling of Solar Radiation and Daylight—Challenges for the 21st Century Edinburgh, Scotland September 15–16, (2003).
3. WILCOX S., BIN MAHFOODH, M., AL-ABBADI N., ALAWAJI S., MYERS D.: Improving global solar radiation measurements using zenith angle dependent calibration factors. En: Fórum 2001 Solar Energy. The Power to Choose. 2001. Washington D.C: American Solar Energy Society. (2001).
4. NICODEMUS, F.E., RICHMON, J.C., HSIA, JJ, GINBERG, I.W., LIMPERIS, T.: Geometrical Considerations and Nomenclature for Reflectance. Institute for Basic Standards. National Bureau of Standards, Washington, D.C. 20234. (1977).
5. NICODEMUS, F.E. (Ed.): Self-study manual on optical radiation measurements: Part I – Concepts, Chap. 4 and 5 p97. Nar. Bur. Stand (US). Tech. Note 910-2 (1978).
6. HORN, B.K.P. AND SJOBERG, R.W.: Calculating the Reflectance Map, *Applied Optics*, Vol. 18, No. 11, June 1979, pp. 1770–1779. (1979).
7. TORRANCE, K.E., AND SPARROW, E.M.: Theory for Off-Specular Reflection from Roughened Surfaces. Reprinted from *Journal of The Optical Society Of America*. Vol. 7, No. 9, 1105-1114. 1967.
8. TROWBRIDGE, T. S. AND K. P. REITZ.: Average irregularity representation of a rough surface for ray reflection. *Journal of the Optical Society of America* Vol. 65, Issue 5, pp. 531-536 (1975).
9. Horn, B.K.P.: Hill-Shading and the Reflectance Map, *Proceedings of the IEEE*, Vol. 69, No. 1, January 1981, pp. 14–47. (Also in *Geo-Processing*, Vol. 2, 1982, pp. 65–146.). (1981).
10. HORN, B.K.P.: Understanding Image Intensities, *Artificial Intelligence*, Vol. 8, No. 2, April 1977, pp. 201–231. (1977).
11. MCCARTNEY, E.J.: *Optics of the Atmosphere*, Wiley, New York. (1976).
12. PASSAMAI, V. J.: Determinación de radiación solar horaria para días claros mediante planilla de cálculo. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*. (2000). <http://www.unsa.edu.ar/~passamai/passam2.pdf> (Mayo 2013)
13. ÁLVAREZ, O., MONTAÑO, T., QUENTIN, E., MALDONADO, J. y SOLANO, J.C.: La radiación solar global en las provincias El Oro, Loja y Zamora Chinchipe, Ecuador. Utilización

de datos de reanálisis de la nubosidad diurna”. Revista de Climatología, Vol. 14: p. 25-33 ISSN 1578-8768. (2014).

14. ÁLVAREZ, O., MONTAÑO, T. y MALDONADO, J. La radiación solar global en la provincia de Loja, evaluación preliminar utilizando el método de Hottel. Ingenius. N. 11, (Julio-Diciembre). pp. 25-31. ISSN: 1390-650X. (2014).
15. LIU B. Y. H. AND JORDAN, R. C.: The interrelationship and characteristics distribution of direct, diffuse, and total solar radiation. Solar Energy 4: 1-19. (1960).
16. MENDOZA, I. y PIEDRA, D.: Validación y ajuste de modelos de radiación solar directa para la ciudad de Bogotá a partir de datos experimentales. Revista Colombiana de Física, Vol. 38, No. 4, (2006).
17. CONSEJO NACIONAL DE ELECTRICIDAD (CONELEC) y CORPORACIÓN PARA LA INVESTIGACIÓN ENERGÉTICA (CIE): Atlas Solar del Ecuador con fines de Generación Eléctrica. Lugar de edición: REGISTRO INSTITUTO ECUATORIANO DE PROPIEDAD INTELECTUAL: N° 028462 del 12 de marzo de 2008, N° 028369 del 26 de febrero de 2008, N° 028370 del 26 de febrero de 2008, Quito, Agosto 2008. P. 51. (2008).
18. National Aeronautics and Space Administration. [Surface meteorology and Solar Energy:](https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?+s01#s01) (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/sse.cgi?+s01#s01>) (<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&num>) (Junio 2014)