



## MODELO PARA ESTIMAR IRRADIANCIA E IRRADIACIÓN SOLAR PARA DÍA CLARO UTILIZANDO COMO PARÁMETRO VARIABLE LA ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR. PLANTEO Y PRIMEROS RESULTADOS

Germán A. Salazar<sup>1,2</sup>, Carlos A. Cadena<sup>1,2</sup>, Alejandro L. Hernandez<sup>1,2</sup>, Luis Saravia<sup>1,2</sup>, Graciela Romero<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Física – Facultad de Ciencias Exactas – Universidad Nacional de Salta

<sup>2</sup>INENCO (Instituto de Investigación en Energías No Convencionales) - CONICET

Avda. Bolivia 5150 – CP 4408FVY – Salta Capital - Salta - Argentina

e-mail: salazarg@unsa.edu.ar

**RESUMEN:** En el presente trabajo se plantea un modelo que calcula índices de claridad representativos  $K_{t-R}$ , los que permiten estimar irradiancia  $G$ , o irradiación  $H$ , *para día claro* para un sitio del que solo se necesita conocer la altura  $A$  sobre el nivel del mar, a través de la ecuación  $G = G_0 \cdot K_{t-R}^{m_a^{0.678}}$ , donde  $m_a$  es la masa de aire calculada como  $(\cos \theta_z)^{-1}$ . Se han estudiado 4 sitios a distintas altitudes (ciudad de Buenos Aires, Salta Capital, Huacalera y Salar El Rincón) para obtener la expresión del modelo. Se corroboró con datos de El Maitén (Prov. de Chubut) ubicado a 720 metros de altura y de El Rosal (Prov. de Salta) ubicado a 3355 metros, encontrándose muy buenas correlaciones (error porcentual del orden de 5 % para irradiancias medidas y estimadas).

**Palabras clave:** irradiancia, modelo, índice de claridad, altura sobre el nivel del mar.

### INTRODUCCIÓN

En el trabajo de Salazar, Hernández, Cadena, Saravia y Romero (2008\*) se realizó un análisis de valores de irradiancia instantánea medidos en distintos sitios de altura en la región de las provincias de Salta y Jujuy utilizando una ecuación propuesta por Forero, Caicedo y Gordillo (2007). En el trabajo de Salazar *et al* (2008\*) se plantearon tres modelos, surgidos de una ecuación propuesta por Laue (1970), mostrada por Meinel y Meinel (1976) y modificada por Forero *et al*. Estos modelos calculan un valor de *índice de claridad representativo*  $K_{t-R}$  para la altura sobre el nivel del mar del sitio bajo estudio, obtenido a partir del análisis de valores de irradiancia tomados durante varios meses en distintos sitios a diferentes alturas.

Los modelos propuestos fueron

$$\text{Modelo 1: } K_{t-R} = 0.7002 + 1.6851 \times 10^{-3} \cdot A^{0.5723} \quad (1)$$

$$\text{Modelo 2: } K_{t-R} = 0.7 + 1.7756 \times 10^{-3} \cdot A^{0.5672} \quad (2)$$

$$\text{Modelo 3: } K_{t-R} = 1 - e^{-(0.0002636 \cdot A + 1.2039)} \quad (3)$$

donde  $A$  es la altura sobre el nivel del mar, en metros.

Para estimar la irradiancia  $G$ , según el método de Meinel-Forero, se debe utilizar

$$G = G_0 \cdot K_{t-R}^{m_a^{0.678}} \quad (4)$$

donde la información referida a la posición geográfica, el día del año y la posición del sol está implícita en la masa de aire  $m_a$  calculada como  $(\cos \theta_z)^{-1}$ .

Estos modelos obtuvieron buenos resultados estimado irradiancia para El Rosal, sitio ubicado a 3350 metros sobre el nivel del mar, encontrándose un RMSE% promedio menor a 3 % respecto de valores de irradiancia medidos allí para masas de aire menores a 2. Sin embargo, según lo planteado por Forero *et al*, este método supone que el  $K_{t-R}$  para altura  $A = 0$  metros es 0.7. Dicha aproximación, al momento de realizar cálculos, puede introducir desviaciones para sitios debajo de los 2000 metros sobre el nivel del mar, en los valores estimados y los medidos de  $K_{t-R}$  que podrían atribuirse a fenómenos relacionados con condiciones atmosféricas diferentes a las consideradas como “estándares” (cielos claros, sin presencia excesiva de aerosoles).

Para subsanar este problema y caracterizar también el  $K_{t-R}$  para sitios a baja altitud, se calculó el índice representativo para la ciudad de Buenos Aires con los datos tomados en el Observatorio Central de dicha ciudad (lat. -34.58°, long. -58.48, altura 25 metros) durante los 12 meses del año 2003. Resultó ser  $K_{t-R} = 0.7694$ , utilizando el mismo método que en el trabajo de Salazar *et al* (2008\*). Este valor de  $K_{t-R}$  es mucho mayor que el 0.7019 estimado por el Modelo 3, que a partir de ahora se denominará **modelo N** (por Norte).

Se calculó la curva que mejor correlaciona los valores de índices de claridad representativos calculados por Salazar *et al* (2008\*), resultando ser

$$\text{Modelo A. } K_{t-R} = 0.7688 + 6.7115 \times 10^{-6} \cdot A^{1.191} \quad (5)$$

Este será el **modelo A** (por Argentina). En la Tabla 1 se muestran los valores estimados de  $K_{t-R}$  y su correspondiente diferencia porcentual con los valores calculados para cada sitio. Observamos que en ningún caso la diferencia porcentual absoluto excede los 0.15 %.

Altura (m)	$K_{t-R}$ medido	$K_{t-R}$ Modelo A	EP %
3730	0.8885	0.8892	-0.08
2680	0.8513	0.8500	0.15
1190	0.7986	0.7997	-0.14
25	0.7694	0.7691	0.04

Tabla 1. Cálculo de índices representativos usando el modelo A.

### COMPARACIÓN DE LOS MODELOS CONTRA ESTIMACIONES DEL PROGRAMA GEOSOL®

Para determinar el error producido en la estimación de los modelos anteriormente propuestos (modelo N, modelo 1 y modelo 2) y del modelo actual (modelo A) se utilizó el software GEOSOL (Hernández, 2003) que utiliza el modelo de Hottel y el modelo de Page para estimar irradiancia horaria e irradiación diaria. El modelo de Hottel estima irradiancia solo para sitios hasta 2500 metros sobre el nivel del mar, usando cuatro tipos de climas, y el modelo de Page hace lo mismo solo que sin restricciones en altura por lo que requiere de datos meteorológicos como temperatura, humedad relativa y turbidez atmosférica (Duffie y Beckman, 2006). Se calculó la irradiación solar diaria  $H$  ( $MJ/m^2$ ) para el día 1 de enero y para el 1 de julio, en la posición de Salta Capital (lat.  $-24.7^\circ$ , long.  $-65.4^\circ$ ) variando la altura sobre el nivel del mar. Los resultados se aprecian en la Tabla 2, y en la Tabla 3 se muestran las diferencias porcentuales de cada medición respecto de la realizada con GEOSOL.

día 1					
Altura (m)	Geosol	Modelo N	Modelo 1	Modelo 2	Modelo A
0	30.15	27.47	27.48	27.47	30.84
25	30.22	27.57	27.99	28	30.85
100	30.41	27.85	28.62	28.64	30.92
500	31.35	29.27	30.36	30.41	31.39
1000	32.34	30.87	31.8	31.86	32.09
2000	33.71	33.56	33.97	34.05	33.73
3000	35.51	35.68	35.73	35.82	35.57
4000	36.51	37.34	37.28	37.38	37.57
día 182					
Altura (m)	Geosol	Modelo N	Modelo 1	Modelo 2	Modelo A
0	13.57	12.11	12.12	12.11	14.05
25	13.61	12.17	12.41	12.41	14.06
100	13.74	12.33	12.77	12.78	14.1
500	14.36	13.14	13.77	13.8	14.37
1000	15.01	14.07	14.62	14.65	14.79
2000	15.93	15.67	15.91	15.96	15.77
3000	17.19	16.95	16.98	17.04	16.88
4000	17.86	17.97	17.94	17.99	18.11

Tabla 2. Cálculo de irradiación  $H$  para los distintos modelos para el día 1 y 182, en la posición de Salta Capital. (En amarillo se marcan los valores estimados por Hottel y en celeste por Page)

día 1				
Altura (m)	Modelo N	Modelo 1	Modelo 2	Modelo A
0	8.89	8.86	8.89	-2.29
25	8.77	7.38	7.35	-2.08
100	8.42	5.89	5.82	-1.68
500	6.63	3.16	3.00	-0.13
1000	4.55	1.67	1.48	0.77
2000	0.44	-0.77	-1.01	-0.06
3000	-0.48	-0.62	-0.87	-0.17
4000	-2.27	-2.11	-2.38	-2.90

Tabla 3. Errores porcentuales de cada medida de la tabla 2 respecto de la medida estimada con GEOSOL

día 182				
Altura (m)	Modelo N	Modelo 1	Modelo 2	Modelo A
0	10.76	10.69	10.76	-3.54
25	10.58	8.82	8.82	-3.31
100	10.26	7.06	6.99	-2.62
500	8.50	4.11	3.90	-0.07
1000	6.26	2.60	2.40	1.47
2000	1.63	0.13	-0.19	1.00
3000	1.40	1.22	0.87	1.80
4000	-0.62	-0.45	-0.73	-1.40

Continuación de la Tabla 3.

Se observa que el modelo A es el que mejor se aproximó a lo estimado por los modelos de Hottel y Page para las distintas alturas consideradas. La menor diferencia porcentual promedio para los dos días también correspondió al modelo A (EP % promedio **modelo A** día 1 = -1.07%, y EP % promedio **modelo A** día 182 = -0.83 %). En el caso del Modelo de Page, la turbidez considerada es la que el programa GEOSOL brinda por defecto, según su base de datos.

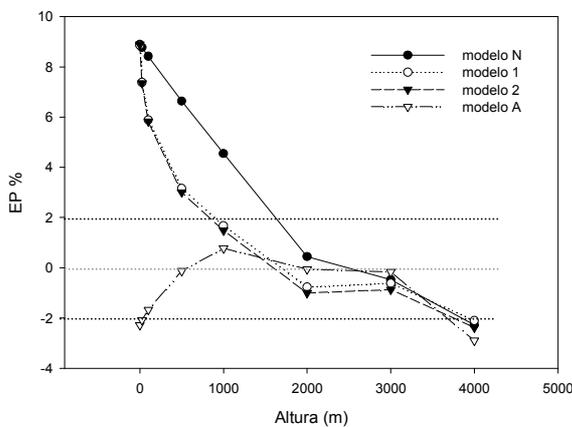


Figura 1(a): Diferencias porcentuales de la Tabla 3 día 1

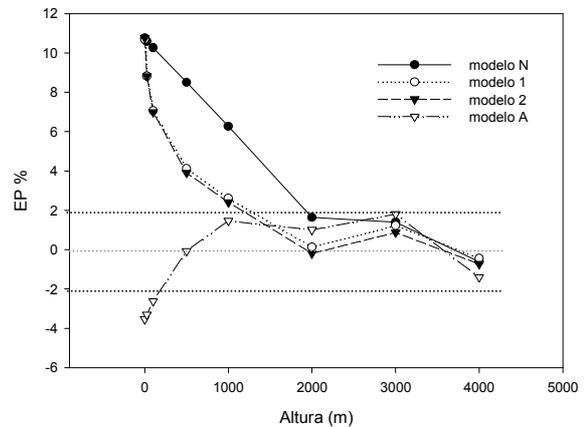


Figura 1(b). Diferencias porcentuales de la Tabla 3 día 182

Se observó que los cuatro modelos presentan diferencias similares solo para alturas superiores a 2000 metros (Fig. 1a y 1b). El modelo N, propuesto como estimador para irradiancia en altura en el trabajo mencionado al principio (Salazar *et al*, 2008\*), solo estimó la irradiancia H dentro de la franja de diferencia porcentual [-2%, 2%] para alturas superiores a 1500 metros (día 1) y para alturas cercanas a 2000 metros (día 182). Esto indica que efectivamente es un modelo para sitios de altura. El modelo A, en cambio, estimó la irradiancia H dentro de la misma franja de error porcentual, para prácticamente todas las alturas consideradas, solo presentando diferencias mayores a bajas altitudes (día 1 y 182) y grandes altitudes (día 1).

Se realizó luego el mismo cálculo, pero ahora se consideraron las posiciones geográficas reales (latitud y longitud) de cada sitio estudiado, para el día 1 de enero. Las irradiancias estimadas con GEOSOL y los errores porcentuales que de cada valor estimado con cada modelo, respecto de los estimados con GEOSOL, se muestran en la Tabla 4

Sitio	Altura (m)	H (MJ/m <sup>2</sup> )	Error porcentual (%)			
		Geosol	Modelo N	Modelo 1	Modelo 2	Modelo A
Bs. As.	25	30.84	8.85	7.43	7.39	-2.20
Salta	1190	32.67	3.80	1.25	1.04	0.89
Huacalera	2680	34.58	-0.87	-1.27	-1.50	-0.58
El Rosal	3350	36.09	-1.44	-1.30	-1.55	-1.44
Salar El Rincón	3730	36.13	-1.94	-1.77	-2.05	-2.16

Tabla 4. Estimación de H y errores porcentuales respecto de GEOSOL, para día d=1 para cada sitio estudiado.

Se observa que lo predicho en la Tabla 2, efectivamente se cumple para cada sitio en particular, para cada altura.

Para tener idea del comportamiento del modelo A para un sitio con altura entre 25 metros y 1190 metros, se probó el modelo con datos de irradiancia global sobre superficie horizontal tomados en El Maitén, provincia de Chubut (lat. -42.05° long. -71.16°, altura 720 metros), durante enero y abril de 2008 con una estación automática DAVIS (estación dependiente de la U.E.P.I.A.G. del gobierno de Chubut). El error del instrumento de esta estación (tipo fotovoltaico) es desconocidos por los autores.

El  $K_{t-R}$  calculado para los días claros registrados en El Maitén resultó ser 0.7846, siendo 0.15 % menor al valor 0.7858 estimado, para esa altura, por el modelo A. Esto permitió, además, determinar que el modelo también tiene buen comportamiento para latitudes bajas.

Se corroboró que el **Modelo A** representa muy bien el comportamiento de la irradiancia solar respecto de la altura a la que se mide, por lo menos para la Republica Argentina. En la Figura 2 se muestran los valores estimados de  $K_{t-R}$  por el modelo N y por el modelo A para distintas altura sobre el nivel del mar, así como los valores medidos para los distintos sitios que se estudiaron.

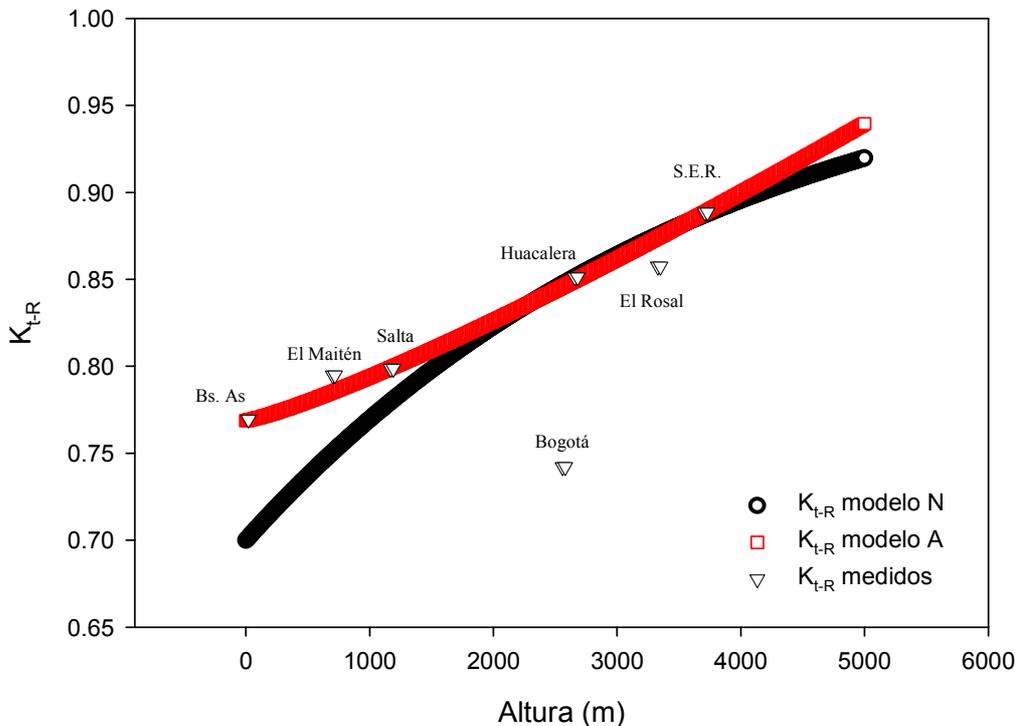


Figura 2. Posición de los índices representativos calculados para cada sitio estudiado, respecto de los modelos A y N.

Vemos que los valores calculados de  $K_{t-R}$  para los distintos sitios estudiados en este trabajo coinciden muy bien con los valores estimados por el modelo A. Se comprueba también que la diferencia de correlación entre el modelo N y el valor medido de  $K_{t-R}$  para la ciudad de Salta no es atribuible, en principio, a condiciones extraordinarias en su atmósfera. El caso particular de la ciudad de Bogotá se estudiará con profundidad en trabajos posteriores, donde se analizara el efecto de la atenuación de la radiación solar por aerosoles y/o condiciones climáticas particulares.

### RESULTADOS OBTENIDOS

En las Figuras 3-11 se muestran los resultados obtenidos al estimar los valores de irradiancia instantánea  $G$  para los distintos sitios estudiados usando el Modelo A para calcular el índice de claridad representativo  $K_{t-R}$  que luego se usa en la ecuación (4).

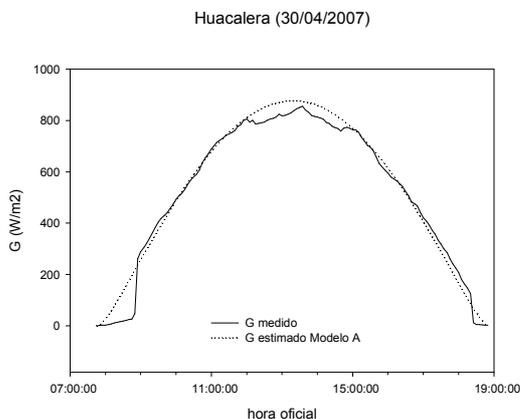


Fig. 3. Irradiancias medias y estimadas para Huacalera

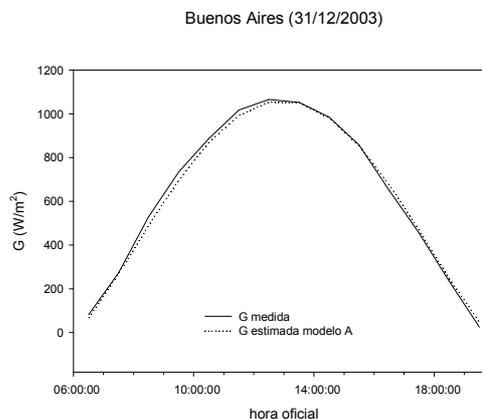


Fig. 4. Irradiancias medias y estimadas para Bs. As.

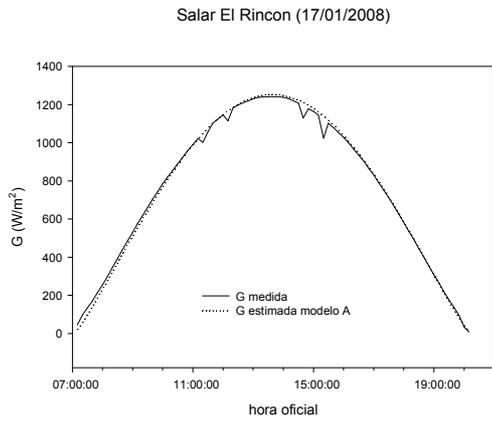


Fig. 5 Irradiancias medias y estimadas para Salar El Rincón (día de verano)

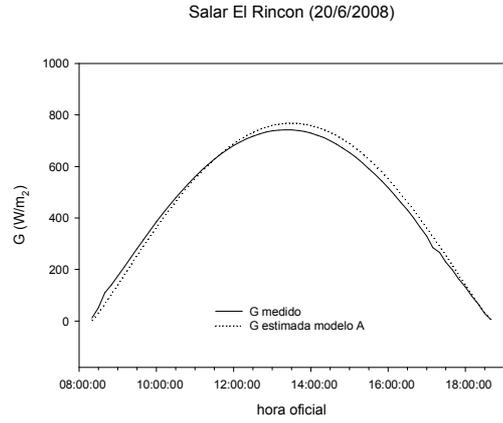


Fig. 6. Irradiancias medias y estimadas para Salar El Rincón (día de invierno).

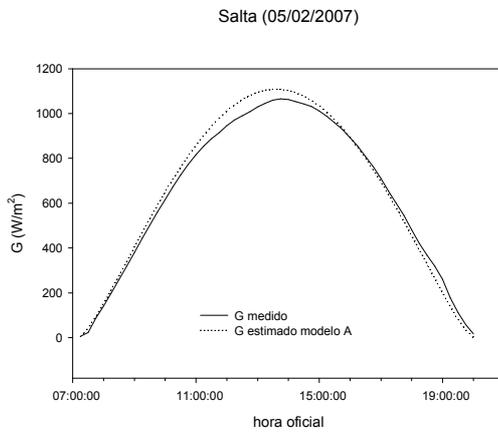


Fig. 7 Irradiancias medias y estimadas para Salta (día de verano)

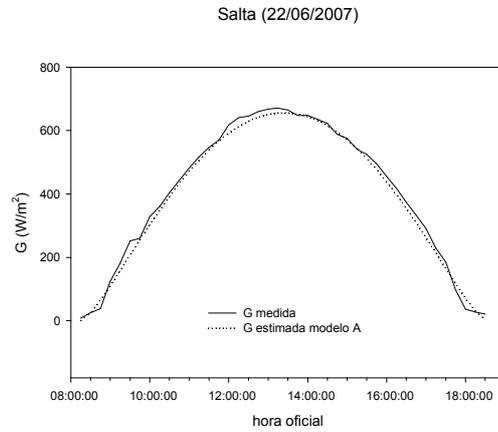


Fig. 8. Irradiancias medias y estimadas para Salta (día de invierno)

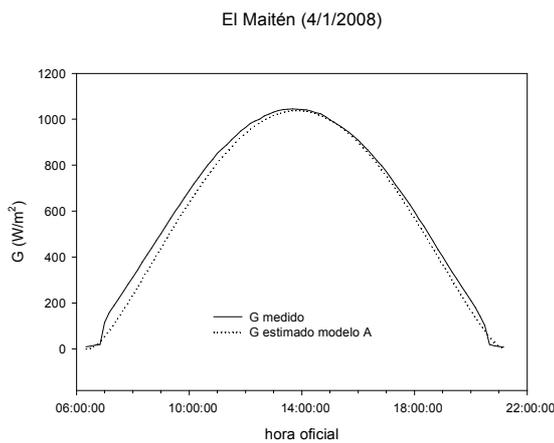


Fig. 9. Irradiancias medias y estimadas para El Maitén (día de verano)

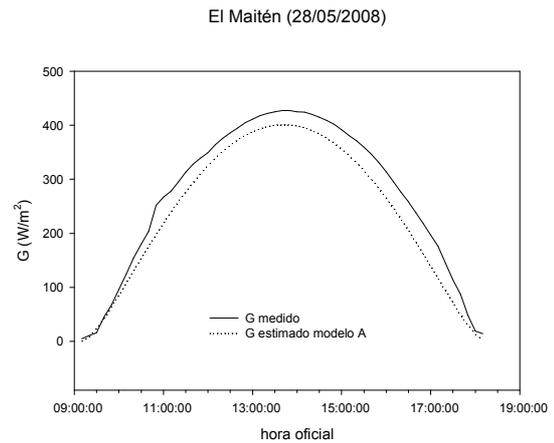
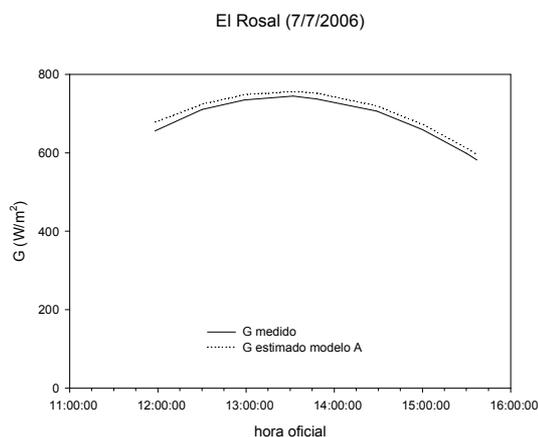


Fig. 10. Irradiancias medias y estimadas para El Maitén (día de otoño).



*Fig. 11. Irradiancias medias y estimadas para El Rosal (día de invierno)*

Podemos apreciar un alto grado de correlación entre los valores medidos y los valores estimados de irradiancia, considerando que las irradiancias se estimaron solo con valores de  $K_{t-R}$  calculados con un modelo que se obtuvo a partir de pocos datos (la serie mas grande presenta 16 meses de datos) de días claros ( $K_t > 0.7$ ). En la Tabla 5 se muestran los diferencias de RMSE % promedios para los días claros registrados en cada sitio estudiado, para masa de aire  $m_a < 2$ .

Sitio	Altura	RMSE % $m_a < 2$
Salar El Rincón	3730	3.37
Huacalera	2680	8.42
Salta	1190	4.74
El Maitén	720	6.99
Bs. As.	25	2.26

*Tabla 5. Valor del RMSE % promedio entre las irradiancias medidas y estimadas por el modelo A, para el caso de  $m_a < 2$*

El caso de El Maitén del 28 de mayo corresponde al único día que se puede considerar claro, desde el 28 de abril hasta el 31 de mayo. Para la irradiancia, el RMSE % promedio de ese día es 11.65 %, considerando  $m_a < 3$ . Para ese día el H medido es  $8.91 \text{ MJ/m}^2$ , mientras que los predichos por Hottel y Page son  $7.96 \text{ MJ/m}^2$  (E.P.% = 10.69 %) y  $8.12 \text{ MJ/m}^2$  (E.P.% = 8.90) respectivamente. La irradiación H predicha por el Modelo A resulta  $7.71 \text{ MJ/m}^2$  (E.P. % = 13.50 %). Podríamos considerar que dicho día claro no es representativo para clima de la zona, pero antes de afirmar esto debemos asegurarnos de conocer el **error** del instrumento de medición utilizado en dicha estación, además de contar con una mayor cantidad de datos de dicha estación.

#### **DIFERENCIAS ENTRE EL MODELO A CON LOS DE HOTTEL Y PAGE.**

Los modelos de Hottel y Page (Duffie y Beckman, 2006) vienen siendo utilizados desde hace mas de 2 décadas y resultan sencillos de entender y aplicar. Ambos calculan radiación solar directa, difusa y global sobre superficie horizontal y/o inclinada. El modelo de Hottel considera 4 tipo de climas (tropical, invierno y verano de latitud media y verano subártico). Así, realiza correcciones a variables que operan con la altitud, para generar un valor de transmitancia de radiación solar  $\tau_b$  definida como  $\tau_b = \frac{G_{bn}}{G_{on}}$ , donde  $G_{bn}$  es la irradiancia directa normal y  $G_{on}$  es la irradiancia extraterrestre normal. Es valido

solo hasta los 2500 metros de altura. Para el modelo de Page es necesario dar el contenido de humedad del aire (como presión parcial de vapor) y un parámetro que depende del lugar, la turbidez atmosférica, la cual toma en cuenta la atenuación de la radiación solar debida al polvo y demás aerosoles presentes en la atmósfera. En resumen, ambos modelos son para día claro y hacen consideraciones climáticas y atmosféricas: en el caso de Hottel las consideraciones son sobre climas específicos, y Page realiza consideraciones del tipo atenuación por componentes atmosféricos.

El modelo A, en esta primera versión, no realiza consideraciones explicitas, de tipo climático, para realizar estimaciones pero dado que la determinación de los  $K_{t-R}$  de los sitios estudiados es empírica, dichos factores están implícitos en los valores medidos de irradiancia y, consecuentemente, en el modelo en si. El modelo A se basa en una sencilla ecuación para estimar irradiancias donde el término más importante es el índice de claridad representativo  $K_{t-R}$ . El modelo A se puede considerar valido, en principio, solo para las regiones de la Republica Argentina donde fue probado. Sin embargo, el modelo A fue probado contra datos de irradiancia diaria de la red de estaciones del NREL, particularmente con datos de día claro tomados en Golden (Colorado), a 1800 metros s.n.m. y en Bluefield (West Virginia), a 800 metros s.n.m., ofreciendo errores similares a los encontrados en los días claros de los sitios de Argentina (entre 3% y 5% para masas de aire menores a 2).

## CONCLUSIONES.

Se propone un modelo para estimar irradiancia solar para día claro, a través de un índice de claridad representativo caracterizado por la altura al nivel del mar. Se comprueba que dicho modelo tiene muy buenos resultados respecto de valores de irradiancia instantánea medidos para día claro en distintos sitios en la Republica Argentina.

Para irradiación diaria H, el modelo presentado arroja resultados muy similares a los calculados usando el modelo de Hottel y el modelo de Page, siendo las diferencias de las irradiaciones estimadas por el modelo A en todos los casos estudiados menores al 3 %. En el caso de las irradiancias, para masa de aire menores a 2, la diferencia del RMSE % promedio es de 5.16%.

El modelo planteado presenta una gran utilidad y aparece como una herramienta de mucho potencial para estimar las características del recurso solar en día claro en sitios en altura o de los que no se disponga datos. Sin embargo, dada la poca cantidad de datos utilizada para generarlo, este modelo deberá ajustarse a partir de una base de datos mucho más amplia, sobre todo, de sitios de altura en la Republica Argentina.

## REFERENCIAS

Salazar G., Cadena C., Hernández A., Saravia L. y Romero G. (2008\*). Caracterización de valores de radiación global en sitios de altura en el noroeste de la Republica Argentina. Avances en Energía Renovable y Medio Ambiente 12 (en revisión).

Forero N., Caicedo L. y Gordillo G. (2007). Correlation of global solar radiation values estimated and measured on an inclined surface for clear days in Bogotá. Renewable Energy 32, 15, 2590-2602.

Meinel A. y Meinel M. (1976). Applied solar energy, an introduction. Reading, MA. Addison-Wesley.

Laue, E.G (1970). The measurement of solar spectral irradiance at different terrestrial elevations. Solar Energy, 13 (1), 43-57

Duffie J. A. y Beckman W. A. (2006). Solar Engineering of Thermal Processes, 3ª edición. Wiley Interscience, New York.

Hernández A. (2003). GEOSOL: una herramienta computacional para el calculo de coordenadas solares y la estimación de irradiación solar horaria. Avances en Energía Renovable y Medio Ambiente 7, 2, 11.19-11.24

[www.unsa.edu.ar/~alejo/geosol/index.htm](http://www.unsa.edu.ar/~alejo/geosol/index.htm)

[http://www.nrel.gov/midc/srrl\\_aocs/](http://www.nrel.gov/midc/srrl_aocs/)

## ABSTRACT:

In the present paper a model that calculates representative clearness indexes  $K_{t-R}$ , that allow to estimate irradiance G, or irradiation H, for clear day for a site that only know the altitude over the sea level, through the equation  $G = G_0 \cdot K_{t-R}^{m_a^{0.678}}$  where  $m_a$  is the air mass calculated like  $(\cos \theta_z)^{-1}$ , is shown. The irradiance values of four sites, at different altitudes, has been studied (Buenos Aires city, Salta city, Huacalera town and El Rincon desert) to obtain the expression of the model. It was corroborated with measured irradiance data from El Maitén (province of Chubut) located at 720 m.a.s.l. and El Rosal (province of Salta) located at 3355 m.a.s.l., having very good results in the correlations (percentage difference in the order of 2 % between measured and estimated daily irradiances).

**Keywords:** irradiance, model, clearness index, high altitude.