

## **ANÁLISIS PRELIMINAR DE VALORES DE IRRADIANCIA GLOBAL HORIZONTAL, TEMPERATURA, HUMEDAD RELATIVA Y HUMEDAD ABSOLUTA TOMADOS EN UN SITIO DE ALTURA EN LA PROVINCIA DE SALTA (ARGENTINA).**

Germán Salazar<sup>1</sup>, Hugo Suligoy<sup>2</sup>, Carlos Fernández<sup>1</sup>, Luis Saravia<sup>2</sup>.

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

<sup>2</sup>INENCO

Avda. Bolivia 5150 – A4408FVY – Salta - Argentina

e-mail: salazarg@unsa.edu.ar

Aldo Palacios

El Rosal (Rosario de Lerma) – Salta - Argentina

**RESUMEN:** En este trabajo se realiza el análisis preliminar de datos de irradiancia global sobre superficie horizontal, temperatura y humedad relativa medidas en el paraje El Rosal (Salta), desde mayo de 2008 hasta abril de 2009, cada 1 minuto. El Rosal se encuentra a 3355 metros sobre el nivel del mar. Se comparan los datos medidos de radiación solar contra un modelo empírico de irradiancia solar horizontal para día claro (modelo ARG-P), encontrándose una muy buena correlación. Se realiza un breve análisis para determinar las características básicas del comportamiento de las variables medidas con la variable humedad absoluta, la que se calcula mediante ecuaciones psicrométricas.

**Palabras clave:** sitio de altura, radiación solar, meteorología, humedad absoluta.

### **INTRODUCCIÓN:**

En la República Argentina existe una amplia zona geográfica caracterizada por poseer alturas superiores a los 3000 metros. Dicha zona esta ubicada en las adyacencias de la cordillera de Los Andes. Particularmente en el noroeste de Argentina (N.O.A.) dicha zona abarca el oeste de las provincias de Jujuy, Salta y Catamarca. El clima y la altura de estas regiones generan las condiciones para que la radiación solar, medida como irradiancia global sobre superficie horizontal, presente valores altos: la baja atenuación atmosférica (debida a la altura) y la baja nubosidad (debida al clima) hacen que el recurso solar sea abundante y que este disponible casi todo el año. Dado que no existen estaciones meteorológicas permanentes que midan radiación solar y parámetros meteorológicos (temperatura, humedad relativa, heliofanía, velocidad y dirección de viento, etc.) en las regiones de altura del NOA, el recurso solar no está aún completamente caracterizado.

El acentuamiento del Efecto Invernadero planetario (que origina el aumento de la temperatura media global) está generado principalmente por las importantes cantidades de CO<sub>2</sub> antropogénico inyectados en la atmósfera (www.ipcc.ch), hace que el estudio de las fuentes de energías renovables adquiera importancia, pensando en una futura implementación de dichas fuentes para la producción masiva de electricidad. Cualquiera sea el sistema térmico solar que se piense implementar para la producción de vapor (motores Stirling, concentradores CPC, concentradores tipo Fresnel o torres de poder), previamente es necesario caracterizar el recurso solar y los parámetros que lo afectan. El clima es quien influye sobre los valores medidos de radiación solar. El estudio del recurso solar, pensado para su utilización en las aplicaciones térmicas antes mencionadas, requiere de una frecuencia de toma de datos alta según lo expuesto en recientes trabajos sobre el tema (Gueymard, 2009) además, obviamente, de una medición sistemática y continua.

Para estudiar esto se instaló una estación meteorológica básica en el paraje de El Rosal (lat. -24.4 long. -65.7) ubicado en el Dpto. de Rosario de Lerma- Provincia de Salta-, cuya altura sobre el nivel del mar es de 3355 metros. Se registraron valores de temperatura, humedad relativa e irradiancia global sobre superficie horizontal, desde mayo de 2008 hasta abril de 2009. Esta estación tenía una frecuencia de toma de datos de 0.016 Hz, es decir, cada 1 minuto. Los datos registrados, si bien no resultaron continuos, ofrecen la posibilidad de estudiar las características principales de las interrelaciones entre parámetros, así como la posibilidad de estudiar otras variables, deducidas a partir de ecuaciones psicrométricas, como lo es la cantidad de agua presente en el aire (humedad absoluta H<sub>a</sub>).

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

La estación meteorológica usada tenía 3 sensores:

- i) una sonda HMP-35D de Vaisala, para medir la Humedad Relativa.
- ii) Un sensor semiconductor de temperatura LM 35.
- iii) Un piranómetro CM3 de Kipp & Zonen, para medir la irradiancia solar global sobre superficie horizontal.

El dispositivo de registro y almacenamiento de datos era un ADAM 4017 con su conversor RS232 ADAM 4520. Estos módulos requieren de una PC para que corra el programa que los controla, es decir, no poseen memoria interna. El programa determina los canales a utilizar, la frecuencia de toma de datos y el archivo donde se guardan los valores medidos. El programa de comando de estos módulos fue escrito en QBasic por el Magister Marcelo Gea (U.N.Sa. - INENCO). La elección de los módulos ADAM 4017 se hizo porque ellos registran diferencias de voltaje, que son las señales que dan como salida los sensores mencionados.

Los sensores se colocaron en el techo de la escuela de El Rosal. La desventaja de utilizar una PC como medio de registro es la potencia de su fuente de alimentación (450 W). La PC fue conectada a la red de electricidad de la escuela (que posee

paneles solares, baterías y convertor), pero cuando el consumo de electricidad excedía lo que el sistema podía entregar, el suministro se cortaba, reiniciándose minutos después. Estos cortes de electricidad generaron vacíos de información, a pesar de haber preparado la PC para que reiniciara sola cuando la electricidad regresara, entrando directamente al programa QBasic. Otro problema fue que el polvo ingresaba en la PC, produciendo problemas en el cableado. No obstante todos estos inconvenientes, se obtuvieron datos de casi todos los meses, salvo junio y julio de 2008, y enero y febrero de 2009.

**MEDIDAS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL SOBRE SUPERFICIE HORIZONTAL.**

En las figuras 1 a 16, se muestran los resultados de comparar los valores de radiación solar global sobre superficie horizontal, medidas en El Rosal, con valores estimados por el modelo ARG-P (Salazar, 2009): este modelo estima irradiancia global sobre superficie horizontal para cielo claro. El modelo es una versión mejorada del modelo ARG (Salazar *et al*, 2008): en dicho modelo se calcula el índice de claridad instantáneo  $k_t = G_h/G_{h0}$  (donde  $G_h$  es la irradiancia global sobre superficie horizontal y  $G_{h0}$  es la irradiancia global extraterrestre sobre superficie horizontal) como  $k_t = k_{t-R} m_a^{0.678}$  donde la dependencia empírica con la altura A esta dada por  $k_{t-R} = 0.7691 + 5.0436 \times 10^{-6} A^{1.2259}$ . En ARG-P, la masa de aire  $m_a$  se calcula según la expresión de Kasten (1966) y está corregida por presión, desechando la aproximación de  $\sec \theta_z$ , siendo  $\theta_z$  el ángulo cenital. En rojo se muestran los datos medidos y en negro los estimados, para 16 días analizados:

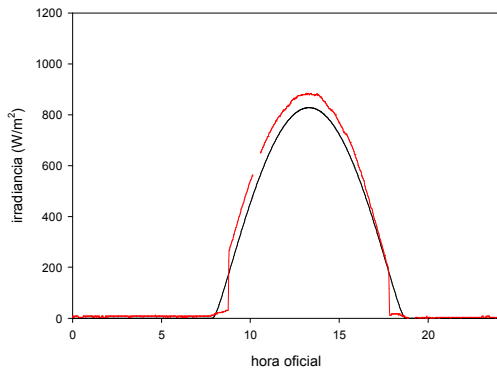


Figura 1. 15/5/2008

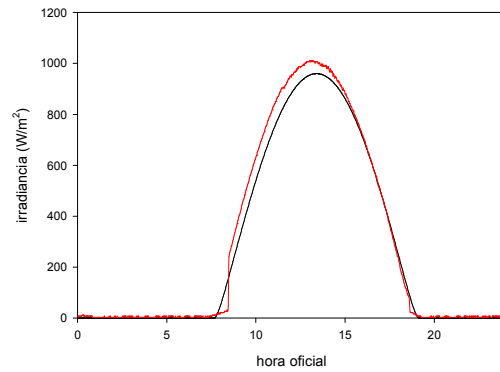


Figura 2. 29/08/2008

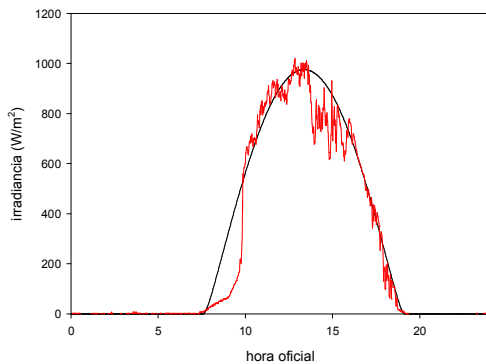


Figura 3. 2/09/2008

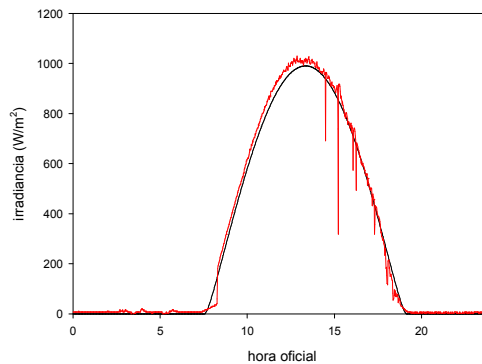


Figura 4. 5/09/2008

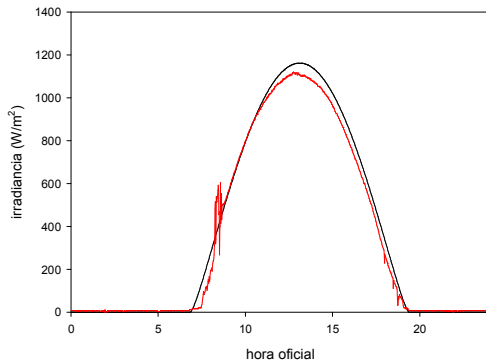


Figura 5. 17/10/2008

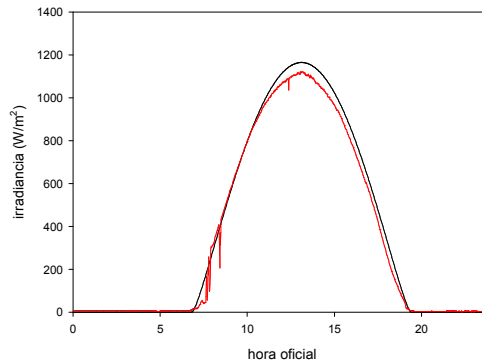


Figura 6. 18/10/2008

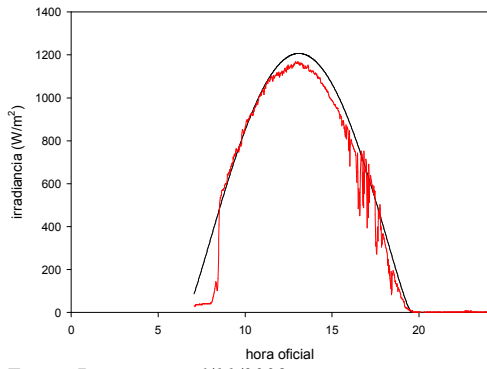


Figura 7. ... ..6/11/2008

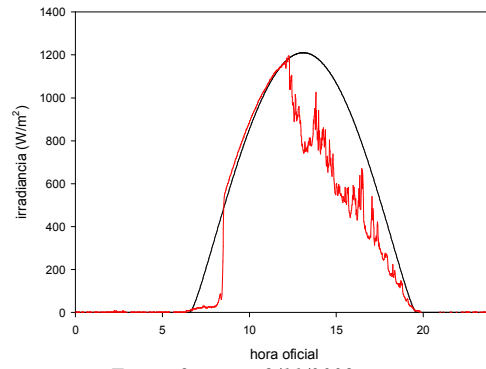


Figura 8. 8/11/2008

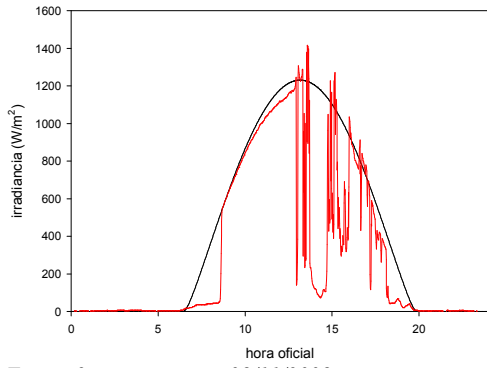


Figura 9 28/11/2008

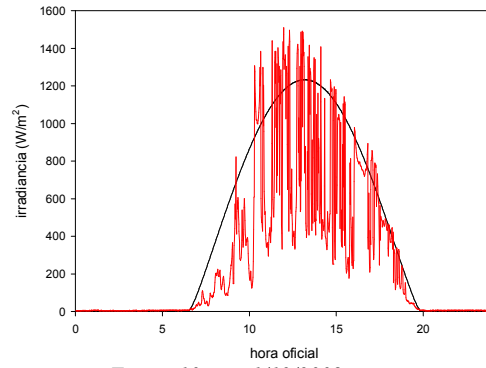


Figura 10 1/12/2008

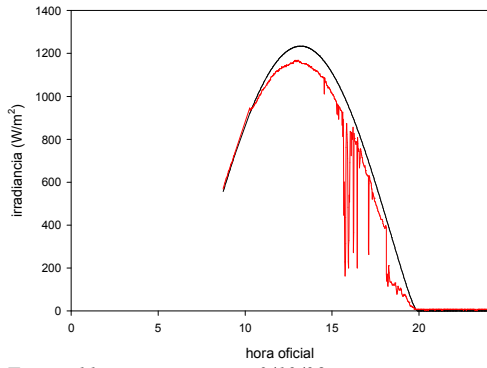


Figura 11 3/12/08

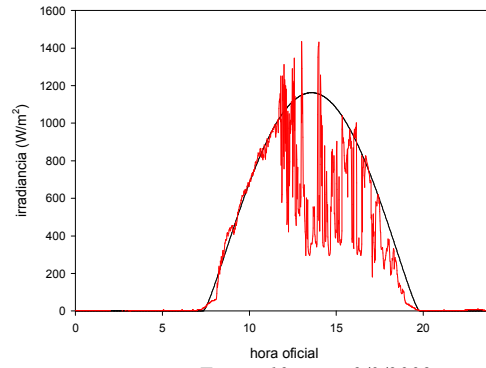


Figura 12. 2/3/2009

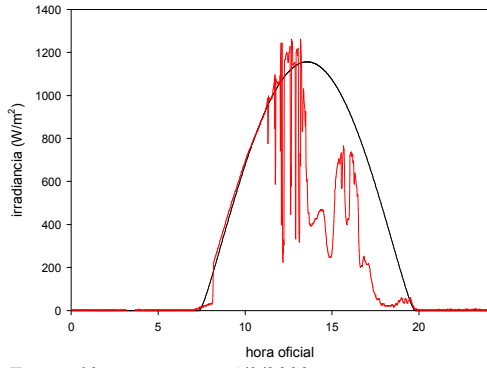


Figura 13. 4/3/2009

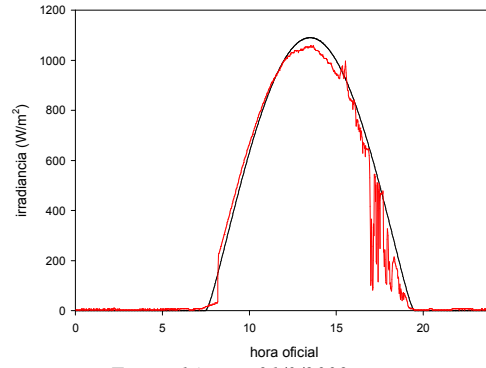


Figura 14 21/3/2009

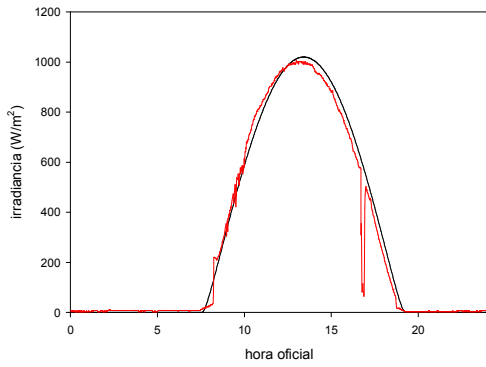


Figura 15

5/4/2009

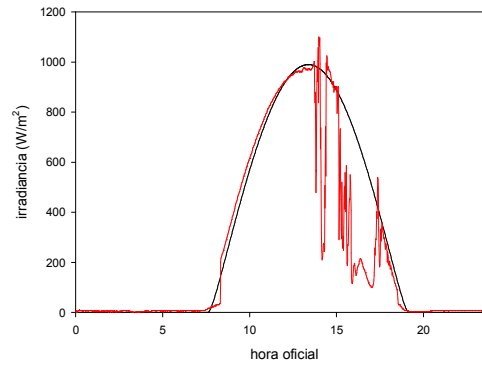


Figura 16

11/4/2009

Los valores de irradiancia global estimados con el modelo ARG-P correlacionan bastante bien con aquellos días que son claros: un día claro se definirá como aquel cuya grafica de  $G_h$  vs. tiempo, considerando el tiempo entre la puesta y salida del Sol, es una parábola. Particularmente, dentro de los días analizados, cumplen esta premisa el 15/05/2008, el 29/08/2008, el 5/09/2008, el 17/10/2008, el 18/10/2008 y el 5/04/2009. Nótese que cuando la humedad es muy baja, ARG-P subestima la irradiancia (Fig. 1 y 2) y cuando la humedad es muy alta, los sobrestima (Fig. 5, 6, 7 y 11).

### ESTIMACIÓN DEL VALOR DE LA HUMEDAD ABSOLUTA $H_a$

A partir de ecuaciones psicrométricas que relacionan la temperatura del aire  $T$  con la presión de vapor de agua  $P_v$ , se estimó el valor de la humedad absoluta para cada serie medidas, es decir, se calculó la humedad absoluta  $H_a$  cada 1 minuto. Las ecuaciones usadas fueron las siguientes (www.tutiempo.net, AHRAE):

a) Presión de vapor de saturación para temperaturas bajo cero °C (entre 255.38 K y 273.16 K)

$$P_{v,s} \approx e^{(31.9602 - \frac{6270.3605}{T} - 0.46057 \cdot \ln T)} \text{ (Hpa)} \quad (1)$$

donde  $P_{v,s}$  es la presión de vapor de saturación y  $T$  es la temperatura de bulbo seco.

b) Presión de vapor de saturación para temperaturas sobre cero °C (entre 273.16 K y 366.5 K)

$$P_{v,s} \approx e^{(60.433 - \frac{6834.271}{T} - 5.16923 \cdot \ln T)} \text{ (Hpa)} \quad (2)$$

donde  $P_{v,s}$  es la presión de vapor de saturación y  $T$  es la temperatura de bulbo seco.

c) Humedad relativa

$$HR = \frac{P_v}{P_{v,s}} \quad (3)$$

donde  $P_v$  es la presión de vapor. Se supone un gas ideal.

d) Humedad absoluta:

$$H_a \approx 216 \cdot \frac{P_v}{T} \text{ (gr./m}^3\text{)} \quad (4)$$

En la Tabla 1 se muestran los valores máximos y mínimos de humedad absoluta  $H_a$  calculados para 26 días desde el inicio hasta la finalización de las medidas en El Rosal. Se consideran los valores de la hora, la irradiancia  $G$ , la temperatura  $T$  y la humedad relativa  $HR$  asociados a los valores máximos y mínimos de humedad absoluta  $H_a$ .

Fecha	$H_a$ máx. (gr/m <sup>3</sup> )	Hora $H_a$ máx.	$H_a$ mín. (gr/m <sup>3</sup> )	Hora $H_a$ mín.	$G H_a$ máx. (W/m <sup>2</sup> )	$G H_a$ mín. (W/m <sup>2</sup> )	$T H_a$ máx. (°C)	$T H_a$ mín. (°C)	HR $H_a$ máx.	HR $H_a$ mín.
15/5/08	1.28	00:21	0.51	15:54	0	634	-1.34	16.78	29	4
29/8/08	2.01	13:15	0.32	05:51	1007	0	11.5	-0.61	20	7
2/9/08	1.26	16:21	0.28	03:30	658	0	24.25	4.68	6	4
5/9/08	2.89	02:39	0.6	13:44	0	1007	-3.28	10.83	77	6
17/10/08	5.61	07:51	3.65	14:08	144	1059	5.2	16.51	82	26
18/10/08	5.22	21:52	2	12:36	0	1101	2.43	18.87	92	12
19/10/08	5.29	22:00	1.25	10:42	0	922	3.94	20.28	84	7
25/10/08	7.23	21:04	0.64	18:46	0	106	7.22	19.46	90	4

Tabla 1. Valores máximos y mínimos calculados de humedad absoluta, y los valores de los otros parámetros medidos. En celeste están resaltados los datos relacionados al valor máximo de humedad absoluta.

7/11/08	6.68	18:31	0.64	12:44	210	1167	16.5	22.95	48	3
8/11/08	5.61	00:08	0.51	07:03	0	22	4.94	9.63	83	6
9/11/08	7.65	14:53	3.83	05:28	1049	0	17.76	2.98	51	65
12/11/08	7.16	05:46	3.33	13:57	0	1139	6.19	19.15	98	20
18/11/08	5.16	22:43	2.77	12:24	0	1181	2.29	16.89	92	19
28/11/08	8.44	16:00	2.46	12:33	1026	1167	21.23	24.9	46	11
1/12/08	9.56	10:19	5.38	14:49	1228	0	13.25	17.59	83	36
2/3/09	8.86	21:54	2.93	11:56	0	1204	10.39	22.83	92	14
3/3/09	9.79	21:21	3.54	15:39	0	1044	12.5	26.29	89	14
4/3/09	9.36	00:01	3.65	09:46	0	639	11.07	18.63	94	23
5/3/09	8.49	15:46	4.16	14:17	841	1082	21.17	23.4	46	20
6/3/09	9.16	14:13	5.64	11:44	610	993	21.7	23.32	48	27
7/3/09	8.51	11:15	4.15	15:07	926	988	16.5	25.76	61	17
8/3/09	8.9	17:39	5.94	13:12	488	1148	15.15	23.65	69	28
21/3/09	7.29	22:17	2.27	14:04	0	1025	6.68	21.3	96	12
5/4/09	6.65	08:42	2.35	13:36	271	997	7.86	19.6	82	14
11/4/09	7.07	00:07	2.37	13:46	0	879	7	22.18	92	12
17/4/09	6.8	21:05	1.6	14:00	0	917	6.54	25.89	91	7

Tabla 1 (continuación). Valores máximos y mínimos calculados de humedad absoluta, y los valores de los otros parámetros medidos. En celeste están resaltados los datos relacionados al valor máximo de humedad absoluta.

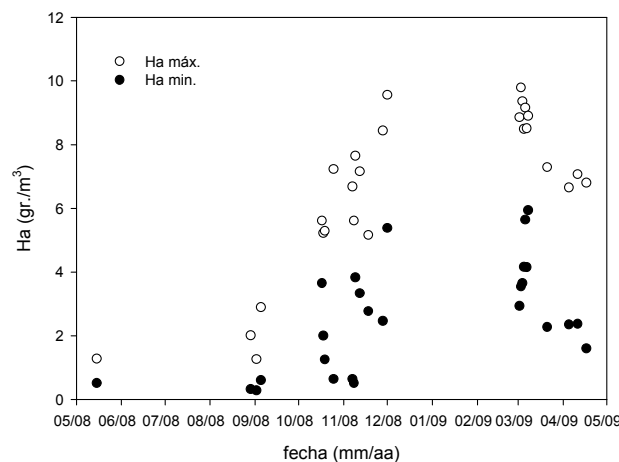


Figura 17. Distribución temporal de los valores máximos y mínimos de Humedad absoluta. Los números del eje "fecha" representan el mes (mm) y el año (aa)

La figura 17 muestra la distribución temporal de la ocurrencia de los valores máximo y mínimo de la humedad absoluta  $H_a$  de los 26 días analizados en la Tabla 1. Puede apreciarse una distribución tal que entre los meses de noviembre de 2008 a abril de 2009 ocurren los días con mayor valor de humedad absoluta. Establecer características tajantes en estos comportamientos requerirá de la instalación de estaciones que midan estos parámetros por una mucho mayor cantidad de tiempo.

#### COMPORTAMIENTO DE LOS PARÁMETROS MEDIDOS Y DE LA HUMEDAD ABSOLUTA:

Analizando el comportamiento de  $G$ ,  $T$ ,  $HR$  y  $H_a$  vs.  $t$  para los 26 días analizados en la Tabla 1, se observan comportamientos que se repiten para el caso de la temperatura y la humedad relativa: *cuando la temperatura baja, la humedad relativa sube y viceversa. Los máximos valores de humedad relativa se dan siempre de noche y los mínimos durante el día. Lo opuesto ocurre con los valores de temperatura.* Esto puede apreciarse en las figuras 18 a 22. En estas figuras se muestran las gráficas de los valores de los parámetros analizados para algunos días de los analizados en la Tabla 1.

Para que todos los parámetros medidos y calculados pudieran apreciarse correctamente en un mismo gráfico, se multiplicó algunos por una constante: la temperatura y la humedad relativa están multiplicadas por 0.1, mientras que la irradiancia lo esta por 0.005; de esta manera se aprecian las variaciones que ocurren a lo largo del día, en una misma gráfica.

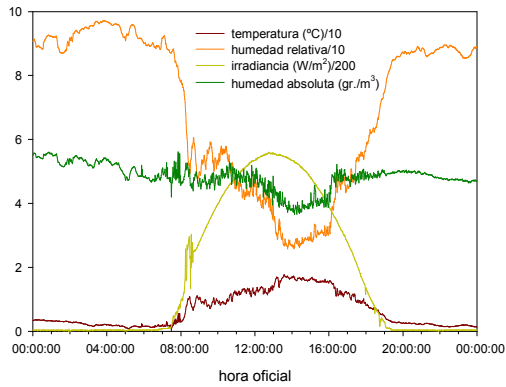


Figura 18. 17/10/2008

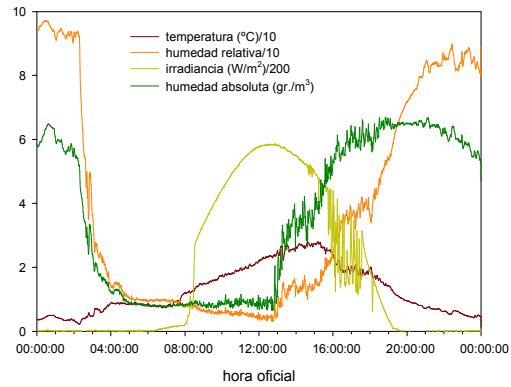


Figura 19. 7/11/2008

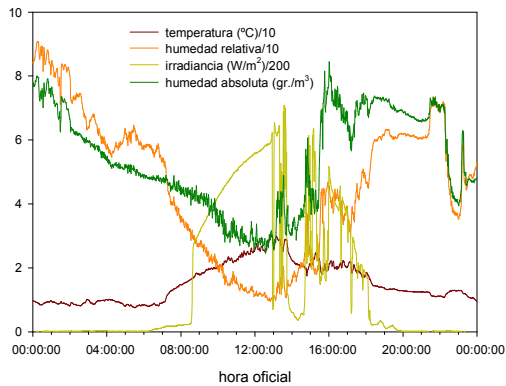


Figura 20. 28/11/2008

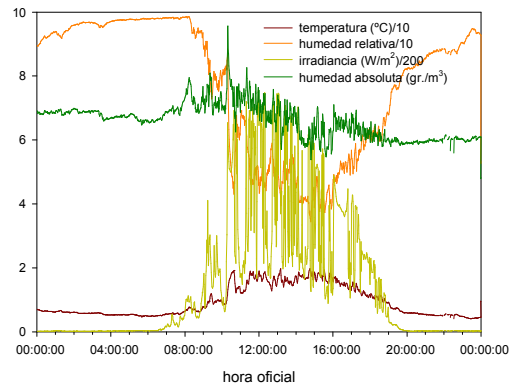


Figura 21. 1/12/08

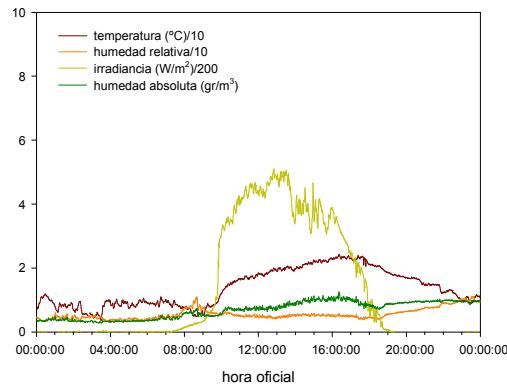


Figura 22. 2/9/2008

Resulta interesante notar que la cantidad de humedad contenida en el aire no es constante a lo largo de un día. En la figuras 19 y 20 se aprecia que pueden ocurrir variaciones apreciables en la cantidad de humedad. Puede notarse también que:

- i) para día claro, la temperatura aumenta a medida que lo hace la irradiancia, disminuyendo cuando la irradiancia hace lo propio (figuras 18).
- ii) El máximo de temperatura esta alejado aproximadamente 2 horas después que se alcanza el máximo de irradiancia (figura 18 y 19).
- iii) Descensos bruscos de valores de irradiancia producen descensos en la temperatura. Estos se notan si la variación en la irradiancia ocurre por más de aproximadamente 2 minutos (Figura 20 y 21).

Resta realizar un análisis pormenorizado de la interacción de los valores de radiación solar sobre la temperatura y sobre la humedad absoluta de todos los datos registrados en El Rosal y para ello es fundamental el manejo de conceptos de psicometría. Esta investigación se concretará en trabajos posteriores.

**CONCLUSIONES:**

Se ha realizado el análisis preliminar de datos de irradiancia solar global, temperatura, humedad relativa y humedad absoluta, registrados cada 1 minuto, de un sitio ubicado a 3355 metros s.n.m. en la provincia de Salta (Argentina).

Los valores de irradiancia global sobre superficie horizontal estimados por el modelo ARG-P correlacionan bastante bien con los medidos para día claro, encontrándose que las variaciones registradas entre medidas y estimaciones para este tipo de condición atmosférica (día claro) pueden explicarse teniendo en cuenta que el modelo ARG-P no realiza consideraciones de cantidad de humedad en el ambiente, ya que es un modelo empírico. Cuando la humedad es muy baja, ARG-P subestima la irradiancia y cuando la humedad es muy alta, los sobrestima.

Analizando los datos de un día, al plantear una premisa simple para el sistema termodinámico considerado (el vapor de agua del aire húmedo), se determinó que casi la mitad de las diferencias  $\Delta$  consecutivas de cantidad de humedad  $H_a$  y de variación de entalpía específica por tiempo (potencia), se comportan de acuerdo a lo esperado: la cantidad de vapor de agua disminuye cuando aumenta la cantidad de energía recibida y la cantidad de vapor de agua aumenta cuando disminuye la cantidad de energía recibida. El resto de las diferencias revisadas no responden a esta premisa. Esta situación se analizará en trabajos posteriores.

**REFERENCIAS:**

ASHRAE (1989) Fundamental Handbook (SI). Chapter 6. Psychrometrics. ISBN 0910110565

Gueymard C. (2009) "Direct and indirect uncertainties in the prediction of tilted irradiance for solar engineering applications". Solar Energy 83, 3, pp.432-444

[http://www.tutiempo.net/silvia\\_larocca/Temas/ecuaciones.htm](http://www.tutiempo.net/silvia_larocca/Temas/ecuaciones.htm)

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). [www.ipcc.ch](http://www.ipcc.ch)

Salazar G. A., Hernández A., Cadena C., Saravia L. R., Romero G. G. (2008) "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.". Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente 12.

Salazar, G. A. (2009) Tesis Doctoral "Estudio y caracterización de patrones de radiación solar a grandes altitudes mediante métodos globales y espectrométricos". Capítulo 3. Universidad Nacional de Salta.

Threlkeld J. (1973) Ingeniería del ámbito térmico. Editorial Prentice Hall Internacional.

**ABSTRACT**

This work the preliminary analysis of global irradiance on horizontal surface, temperature and relative humidity data measured in El Rosal (Salta), from May 2008 until April 2009, every 1 minute, was done. El Rosal is placed at 3355 meters above sea level. The measured data of solar radiation was compared to values predicted by an empirical model of clear day solar horizontal global irradiance (ARG-P model) with a very good correlation. A brief analysis was performed to determine the basic features of the behavior of the measured variables with the variable absolute humidity, which was calculated using psychrometric equations.

**Keywords:** High altitude site, solar radiation, meteorological, absolute humidity.