



CÁLCULO DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE Y EVALUACIÓN DE SU INCERTIDUMBRE

M.J.L. Tamasi^{1,2}, M.G. Martínez Bogado^{1,2}, C.J. Bruno¹

¹Gerencia Investigación y Aplicaciones - Centro Atómico Constituyentes - CNEA

²Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)

Av. General Paz 1499 - (1650) San Martín - Argentina

Tel. (011) 6772-7132 – Fax (011) 6772-7121 – e-mail: tamasi@tandar.cnea.gov.ar

RESUMEN: El vapor de agua precipitable es una de las variables meteorológicas a tener en cuenta en la medición de curvas tensión-corriente de paneles solares fotovoltaicos bajo condiciones normalizadas. Por este motivo se presenta el cálculo del vapor de agua precipitable a partir de la medición de humedad relativa y temperatura. Se analiza la incertidumbre del cálculo tomando incertidumbres típicas en la medición de las variables meteorológicas. Se completa el trabajo con el cálculo de vapor de agua precipitable para la región de la Ciudad de Buenos Aires en las horas del día donde se puede realizar la medición bajo norma.

Palabras clave: vapor de agua precipitable, medición módulos fotovoltaicos, humedad, temperatura.

INTRODUCCIÓN

El vapor de agua precipitable (W) es la cantidad de vapor de agua en la dirección zenital entre la superficie terrestre y la parte superior de la atmósfera. Es un parámetro importante en estudios de hidrología, energética y modelos de radiación. La unidad correspondiente es masa por unidad de área, pero en la práctica la unidad considerada es el espesor de la capa de agua líquida que se debería formar si el vapor de agua de la columna al zenit se condensara con una superficie de área unidad, así 1 mm de la capa corresponde a 1 kg/m^2 o 1 cm a 1 g/cm^2 .

La absorción de la radiación por vapor de agua, oxígeno, dióxido de carbono, etc. en la atmósfera es irregular, produciéndose selectivamente a distintas bandas de longitudes de onda. Desde el punto de vista fotovoltaico el interés se centra casi exclusivamente en las bandas de absorción del vapor de agua, ya que la incidencia de los demás componentes atmosféricos en el espectro es menor, debido a que absorben en longitudes de onda largas para las cuales los materiales fotovoltaicos de uso terrestre no son sensibles, o bien en las longitudes de onda donde estos materiales tienen respuesta mínima.

La masa de aire, el vapor de agua precipitable, la turbidez atmosférica y el ozono son los parámetros meteorológicos a tener en cuenta al medir paneles solares en condiciones normalizadas según indica la norma IRAM 210013-2. Esta norma indica que el vapor de agua precipitable deberá encontrarse entre 0,40 y 2,60 cm. y que el producto de la masa de aire por el vapor de agua no deberá exceder 3,9 y no será menor a 0,6. Esta medición debe hacerse además con una masa de aire entre 1,25 y 1,75.

A nivel local existen trabajos donde se presentan estimaciones del índice de turbidez y vapor de agua precipitable, por ejemplo en Raichijk, 2009 se estima el índice de turbidez para algunas regiones del país, Fernández et. al, (2009) proponen el uso de GPS (Global Positioning System) para determinar el contenido de vapor de agua precipitable sobre Argentina, Albizzati et al. (1997) realiza mediciones y predicciones de la radiación solar incidente en Santa Fe donde utiliza estas variables atmosféricas en los modelos utilizados. Bareilles et al.(2007) estudian la influencia del vapor de agua precipitable en la transmisión atmosférica para radiación IR y microondas.

Estos estudios también se llevaron a cabo en otros países, por ejemplo Okulov et al. (2002) analizan cambios en valores estacionales del vapor de agua precipitable durante un período de 10 años en Estonia. Gueymard (1994) presenta modelos para el cálculo del vapor de agua precipitable y analiza los datos para estaciones en Canadá y el norte de Estados Unidos.

CÁLCULO DE VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE

En este trabajo se elige referir las ecuaciones utilizadas a parámetros meteorológicos medibles fácilmente con una estación meteorológica o con pocos instrumentos, en este caso la temperatura y la humedad relativa.

La medida de vapor de agua precipitable tiene correlación con distintos parámetros meteorológicos medidos en superficie como la presión parcial de vapor de agua, la temperatura de punto de rocío, la humedad relativa, la temperatura ambiente, etc. Se realizaron distintas parametrizaciones basadas en estas relaciones utilizadas en estudios relativos a la atenuación de la radiación solar.

Una de las primeras parametrizaciones realizadas de W (en mm) por Hann (1906), fue considerada proporcional a la presión de vapor en superficie (e_s en mmHg) obtenida mediante una fórmula empírica:

$$W = 1,7 e_s \quad (1)$$

siendo e_s función de la temperatura ambiente.

Fowle (1913), Leckner (1978), Reitan (1963) propusieron distintas mejoras y variantes al cálculo de W . En este trabajo se presenta el cálculo del vapor de agua precipitable a partir de datos de humedad relativa (R_H) y temperatura ambiente (T) a partir de las ecuaciones propuestas en el trabajo de Gueymar et al. (1998). Se completa el cálculo con el análisis de la incertidumbre en W debido a la introducción de los errores en la medición.

Retain (1963) muestra que W es en primera aproximación proporcional a la densidad de vapor en superficie ρ_v . Para este análisis se puede ver que ρ_v (en $\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$) y W (en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) quedan relacionadas por:

$$W = 0,1 H_v \rho_v \quad (2)$$

donde H_v es la altura de la columna del vapor de agua aparente (en km) y el coeficiente 0,1 es necesario para igualar las unidades. Gueymar (1994) propone una ecuación experimental para H_v como función de T :

$$H_v = 0,4976 + 1,5265 (T/273) + \exp[13,6897 (T/273) - 14,9188 (T/273)^3] \quad (3)$$

W es función de la humedad relativa R_H , la temperatura T (expresada en K) y la presión de vapor de saturación e_s (en mb). Expresando ρ_v en función de estos parámetros se obtiene la ecuación:

$$\rho_v = 216,7 R_H e_s / T \quad (4)$$

Para el cálculo de e_s (en mb) en función de T se utilizó la ecuación (5) (Langlois 1967) para las temperaturas sobre 0°C (entre 0 y 90°C), también utilizada en Salazar et al. 2009:

$$e_s = \exp(60,433 - 6834,271/T - 5,16923 \ln T) \quad (5)$$

La incertidumbre se calcula a partir de la propagación de errores y los resultados se muestran en la sección siguiente.

RESULTADOS

Primeramente, se compararon los resultados según la ecuación 1 propuesta por Hann y la ecuación 2 propuesta por Gueymar, utilizando las expresiones de H_v y e_s de las ecuaciones 3 y 5. Esta comparación se muestra en la Figura 1. Se puede observar que las curvas según Hann y Gueymar son similares para temperaturas inferiores a 20°C y humedad relativa inferior a 50%; al ir aumentando la temperatura y la humedad estas curvas se van apartando.

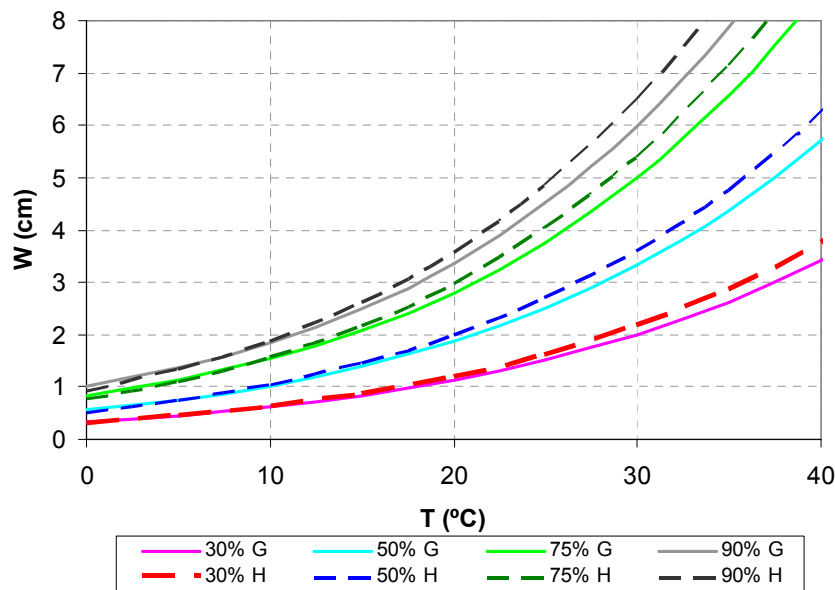


Figura 1: Comparación del vapor de agua precipitable según Hann (línea de puntos) (ecuación 1) y según Gueymar (ecuación 2) (línea llena).

Se consideró la expresión de Gueymar (ecuaciones 2, 3 y 5) para analizar la incertidumbre debido a la introducción de la incertidumbre en las mediciones de T y R_H . Se consideraron variaciones de la humedad relativa entre 30 y 90% con errores típicos de 5% y 10% y de 0,1 y 0,5°C en la temperatura. Estos gráficos se muestran en la Figura 2.

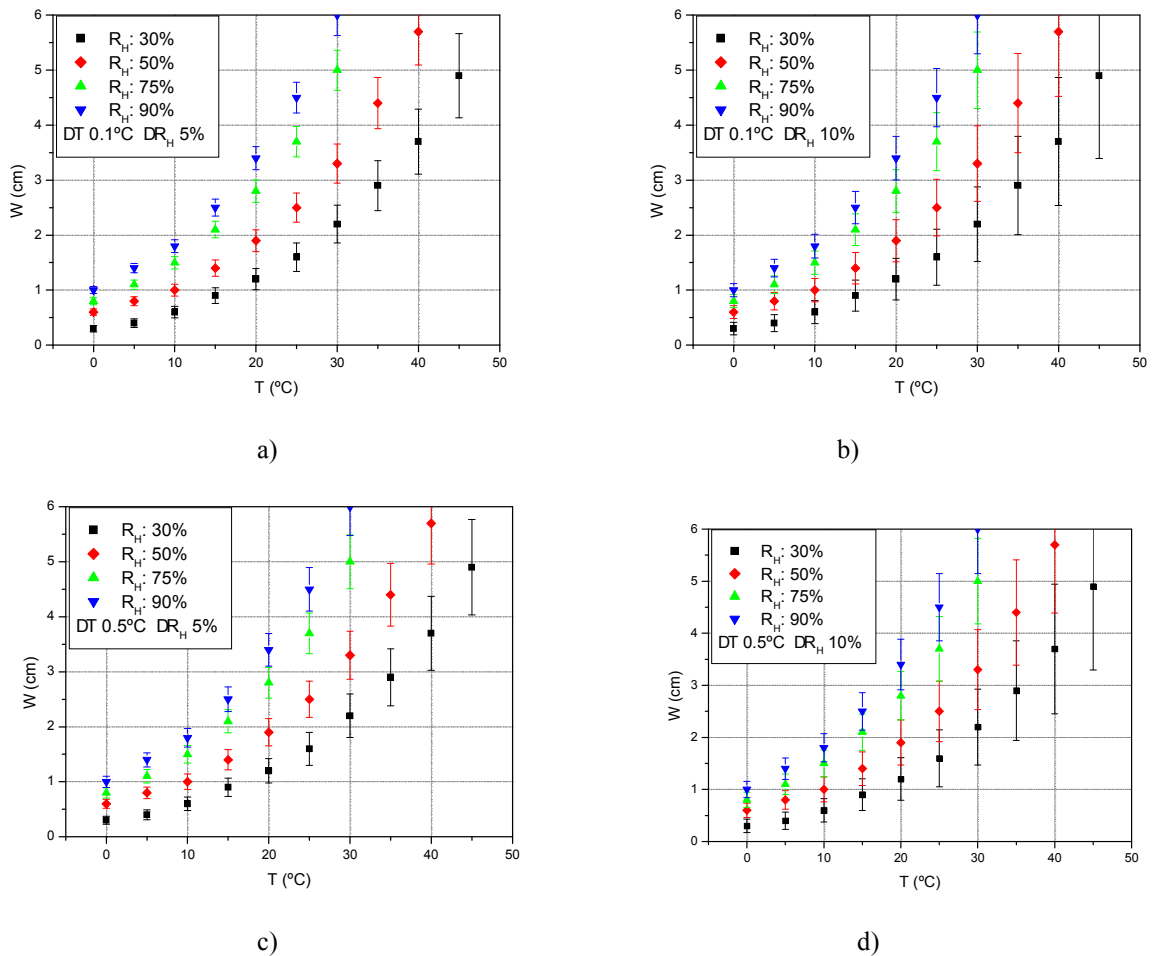


Figura 2: Influencia de la incertidumbre en la medición de humedad relativa y la temperatura en el cálculo de W .

En la Tabla 1 se muestra la variación relativa de W , en el intervalo de temperatura entre 0 y 50°C, considerando 5% y 10% de error en humedad relativa y 0,1 y 0,5°C en la temperatura.

R_H	ΔT °C	$\Delta W/W$	
		$\Delta R_H = \pm 5\%$	$\Delta R_H = \pm 10\%$
30%	0,1	0,18	0,34
50%	0,1	0,11	0,21
75%	0,1	0,08	0,14
90%	0,1	0,06	0,12
30%	0,5	0,21	0,38
50%	0,5	0,14	0,24
75%	0,5	0,11	0,18
90%	0,5	0,10	0,16

Tabla 1: Variación relativa de W con dos incertidumbres distintas en la humedad relativa (5 y 10%) y en la temperatura (0,1 y 0,5°C).

Los errores en la T y la R_H , si bien son altos, se utilizaron a los efectos de evaluar el tipo de instrumento a tener en cuenta para el cálculo de este parámetro. Los errores típicos de instrumentos con los que se puede contar para la realización de estas mediciones son de 5% para la humedad y 0,5°C para la temperatura.

CÁLCULO DEL VAPOR DE AGUA PRECIPITABLE A PARTIR DE DATOS DEL OBSERVATORIO BUENOS AIRES DEL SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL

Se solicitaron al Servicio Meteorológico Nacional los datos de humedad y temperatura del último año (1/7/2010 al 26/6/2011) del Observatorio Buenos Aires. De acuerdo a las ecuaciones 2, 4 y 5 se calculó W con los datos proporcionados y se muestran en la Figura 3. En esta figura se puede ver que W va aumentando en los meses de verano y disminuyendo en los meses de invierno.

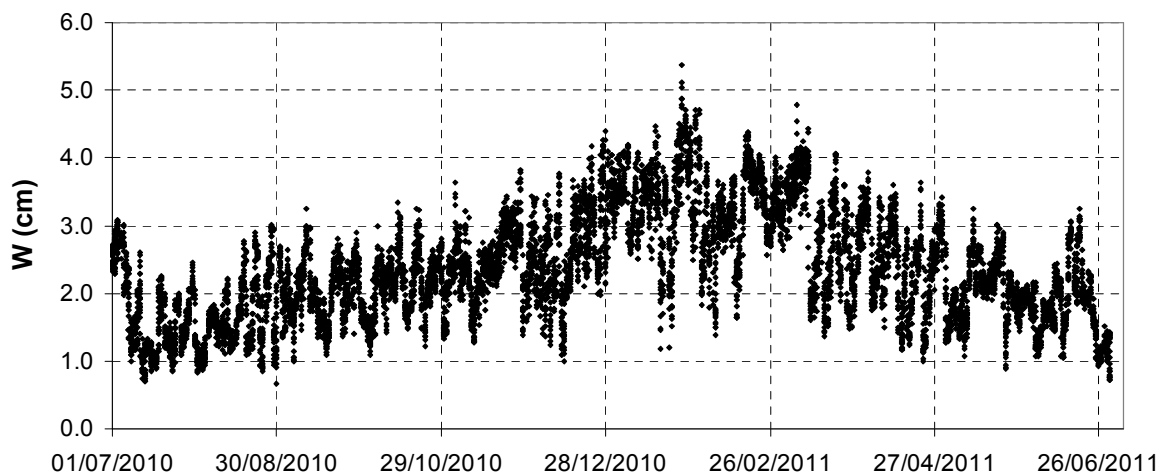


Figura 3: Variación de W del 1/7/2010 hasta el 26/6/2011. Cálculo realizado a partir de los datos del Observatorio Buenos Aires suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional.

Dado que los paneles solares deben medirse en horas cercanas al mediodía se extrajeron los datos diarios entre las 11 y las 15hs y se grafican junto con el promedio en Figura 4.

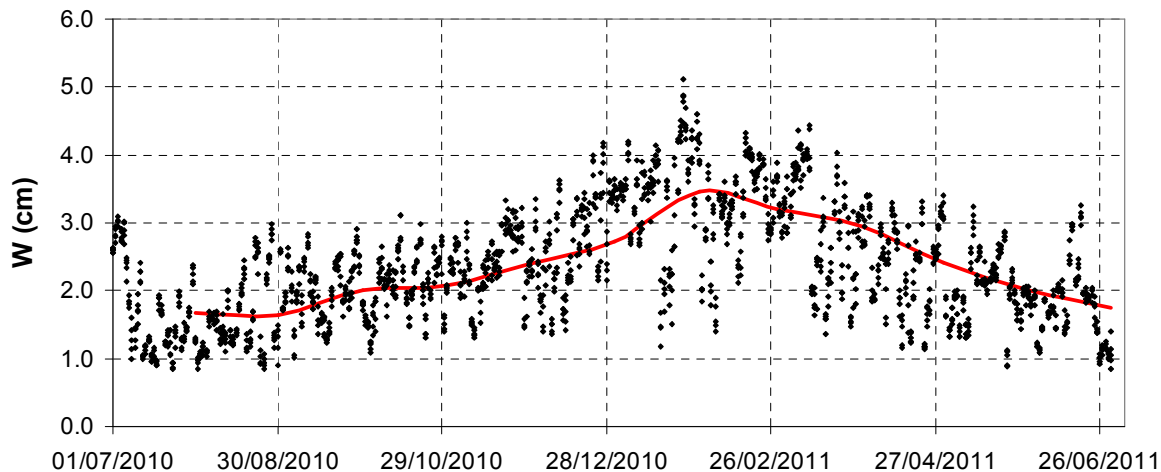


Figura 4: Variación de W entre las 11 y las 15 hs del 1/7/2010 hasta el 26/6/2011. La línea completa corresponde a los promedios mensuales. Cálculo realizado a partir de los datos del Observatorio Buenos Aires suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional.

En la tabla 2 se presentan los promedios mensuales del período de estudio como así también los valores máximos y mínimos de W .

Mes	W promedio (cm)	W mínimo (cm)	W máximo (cm)
Julio 2010	1,7	0,9	3,1
Agosto 2010	1,6	0,8	0,8
Septiembre 2010	2,0	1,0	2,9
Octubre 2010	2,1	1,1	3,1
Noviembre 2010	2,4	1,3	3,3
Diciembre 2010	2,7	1,4	4,2
Enero 2011	3,5	1,2	5,1
Febrero 2011	3,2	1,4	4,3
Marzo 2011	2,9	1,4	4,4
Abril 2011	2,4	1,1	3,4
Mayo 2011	2,0	0,9	3,2
Junio 2011	1,8	0,8	3,3

Tabla 2: Valores medios, mínimos y máximos mensuales de W calculado entre las 11 y las 15hs.

En las figuras 5 y 6 se muestran, para el mismo período, la variación de la temperatura y la humedad relativa respectivamente.

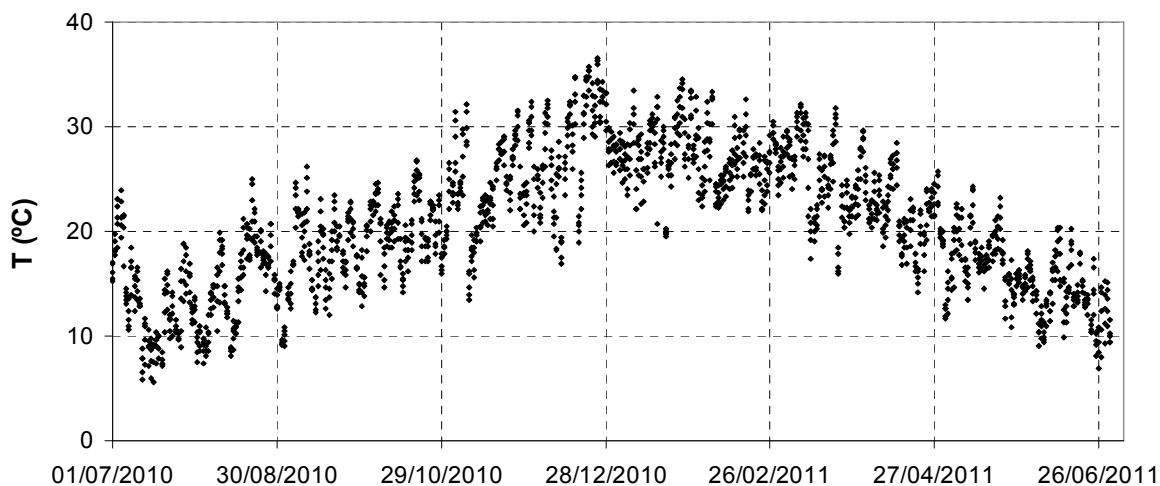


Figura 5: Variación de la temperatura entre las 11 y las 15 hs del 1/7/2010 hasta el 26/6/2011. Datos del Observatorio Buenos Aires suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional.

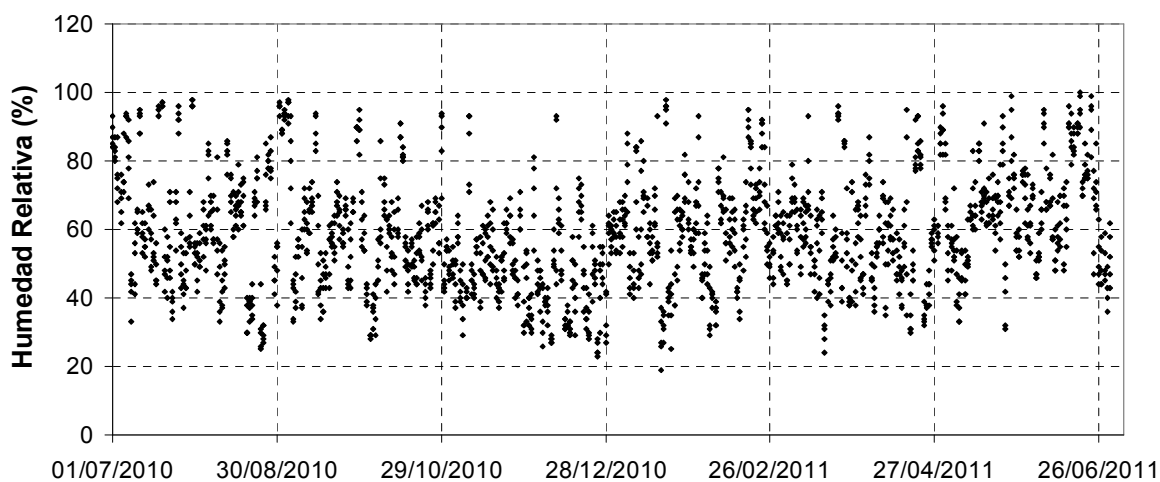


Figura 6: Variación de la humedad relativa entre las 11 y las 15 hs del 1/7/2010 hasta el 26/6/2011. Datos del Observatorio Buenos Aires suministrados por el Servicio Meteorológico Nacional.

CONCLUSIONES

Existen en la literatura diversas ecuaciones para el cálculo de W y de los parámetros meteorológicos que involucra tal como R_H y e_s , siendo la presentada una de las más utilizadas. También existen variantes de estas expresiones que tienen relación con la altura de la estación meteorológica o con condiciones extremas (por ejemplo en zonas cercanas a los polos).

La mayor influencia en la estimación de la incertidumbre de W la aporta la humedad relativa ya que la incertidumbre en su medición suele ser alta.

El cálculo se restringe a las horas en las cuales una medición al Sol bajo norma de paneles fotovoltaicos es realizable, para la región de la Ciudad de Buenos Aires, pudiéndose observar que en los meses de verano existen más días con un valor de W que excede el valor prescrito por la norma. En cambio, los meses de invierno en Buenos Aires la dificultad se encuentra en la irradiancia que no llega al mínimo solicitado por la norma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al personal del Servicio Meteorológico Nacional por el aporte de los datos requeridos para la confección de este trabajo.

REFERENCIAS

- Albizzati E. D., G. H. Rossetti y O. M. Alfano (1997b). Measurements and Predictions of Solar Radiation Incident on Horizontal Surfaces at Santa Fe, Argentina (31° 39' S, 60° 43' W). *Renewable Energy*, 11, 469-478.
- Bareilles F. A., Morras R., Olalde J. C., Hauscarriaga F. P. y Arnal E. M. (2007). La opacidad atmosférica en 210 GHz: resultados finales en la Puna Salteña. Reunión Anual de la Asociación Argentina de Astronomía, Malargüe, Mendoza, Argentina, 15-19 Septiembre 2007.
- Fernández L.I., Meza A.M., Natali M.P, 2009. Determinación del contenido de vapor de agua precipitable (PWV) a partir de mediciones GPS: primeros resultados en argentina. *GEOACTA* 34, 35-57
- Fowle F.E. (1913) The determination of aqueous vapor above Mount Wilson. *Astrophys. J.* 37 (5) 359-372.
- Gueymar C. (1994). Analysis of monthly average atmospheric precipitable water and turbidity in Canada and the northern United States. *Solar Energy* 53, 57-71.
- Gueymard C. y Garrison J. (1998). Critical evaluation of precipitable water and atmospheric turbidity in Canada using measured hourly solar irradiance. *Solar Energy* 64-4, 291-307
- Hann, J. 1906. *Lehrbuch der Meteorologie*. Leipzig, C. H. Tauchnitz.
- Langlois W. (1967) A rational approximation for saturation vapor pressure over the temperature range of sea water. *J. Appl. Meteor.* 6, 451-460.
- Leckner B. (1978). The Spectral Distribution of Solar Radiation at the Earth's Surface - Elements of a Model. *Solar Energy*, 20, 143-150.
- Okulov O. Ohvriil H. y Kivi R. (2002). Atmospheric precipitable water in Estonia, 1990-2001. *Boreal Environment Research* 7, 291-300.
- Raichijk C. (2009). Estimación del índice de turbidez de Linke para distintas localidades de Argentina. *AVERMA* 13, 11.11-11.16.
- Reitan C.H. (1963). Surface dew point and water vapor aloft. *J. Appl. Meteorological* 2, 776-779.
- Norma IRAM 210013-2, Módulos fotovoltaicos. Características eléctricas en condiciones normalizadas
- Salazar G., Suligoy H, Fernández C, Saravia L. (2009). 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). *AVERMA* 13, 11.25-11.31.

ABSTRACT

Precipitable water vapor is one of the important meteorological parameters necessary as input to photovoltaic solar panels measurement under standard conditions. For this reason the calculation of precipitable water vapor from the measurement of relative humidity and temperature is presented. It also discusses the uncertainty of the calculation taking the measurement errors of the meteorological variables. The calculation of precipitable water vapor in the region of the City of Buenos Aires in the daytime where measurement can be performed under standard is also shown.

Keywords: Precipitable water vapor, photovoltaic modules test, humidity, temperature.