

*ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE INCERTIDUMBRE EN LA CONVERSIÓN ENTRE LA TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO Y LA TEMPERATURA DE BULBO HÚMEDO.

E Martines-Lopez, L Lira-Cortes, J A Davila-Pacheco

Centro Nacional de Metrología, Querétaro, México
E-mail: emartine@cenam.mx

Resumen: Existen diversas formas de expresar el contenido de humedad, por lo que en muchos de los casos es necesario calcular una magnitud a partir de mediciones de otra, por ejemplo, la humedad relativa se puede calcular del valor medido de la temperatura de punto de rocío. En cualquier caso, el resultado de la conversión debe incluir su incertidumbre propagada.

Entre las magnitudes más usadas en humedad se encuentran la temperatura de punto de rocío (t_d) y la temperatura de bulbo húmedo (t_w), las cuales se relacionan empíricamente.

La conversión de t_d a partir de t_w o viceversa, debe realizarse por métodos iterativos debido a que la ecuación que los relaciona no es lineal.

Por otra parte, para evaluar la propagación de la incertidumbre debida a la conversión entre estas dos magnitudes, se requieren los valores de presión, temperatura ambiente y el coeficiente psicrométrico.

El análisis de incertidumbre en la conversión de algunas magnitudes de humedad ha sido reportado por algunos autores [1, 2, 3]. En este trabajo se describe la conversión entre la t_d y t_w .

1. INTRODUCCIÓN

El contenido de agua en una muestra de aire o gas se puede expresar con diferentes magnitudes como son: la razón de masas (r_w), la fracción molar de vapor de agua (x_v), la humedad relativa (HR), la temperatura de punto de rocío o escarcha (t_{dr}), la temperatura de bulbo húmedo (t_w), etcétera.

Dos de las magnitudes más usadas para expresar el contenido de vapor de agua en el aire son la temperatura de punto de rocío (t_d) y la temperatura de bulbo húmedo (t_w), la primera se mide con un higrómetro de punto de rocío con espejo enfriado y la segunda se mide con un psicrómetro aspirado.

Actualmente un instrumento que mide en términos de una magnitud (t_w por ejemplo) puede indicar los valores de humedad en términos de otras magnitudes (t_d por ejemplo). Los valores calculados se obtienen por medio de algoritmos programados en el instrumento.

Si el usuario requiere conocer la incertidumbre asociada al valor calculado, se debe usar la relación

entre ambas magnitudes y obtener la propagación de incertidumbre.

En este documento se describe el proceso de conversión y propagación de incertidumbre para dos casos específicos: a) de t_w a t_d y b) de t_d a t_w . En ambos casos, la propagación de la incertidumbre se realizó para magnitudes no correlacionadas.

En este documento, t es usada para expresar la temperatura en °C, y T para expresar la temperatura en K.

2. RELACIÓN ENTRE t_d Y t_w

La ecuación del psicrómetro está dada por

$$(x_w - x) = A(t - t_w), \quad (1)$$

Donde x es la fracción molar de una muestra de aire, x_w es la fracción molar de una muestra de aire en su condición de saturación, A es el coeficiente psicrométrico, t es la temperatura ambiente y t_w es la temperatura de bulbo húmedo [4].

* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

La ecuación (1) puede reducirse como sigue:

$$e(t_w)f(P,t_w)-A \cdot P(t-t_w)=f(P,t_d)e(t_d), \quad (2)$$

donde, P es la presión del gas o aire, t es la temperatura ambiente o del gas, $e(t_w)$ es la presión de vapor de agua a t_w , $e(t_d)$ es la presión de vapor de agua a la temperatura t_d , $f(P,t_w)$ es el factor de corrección a P y t_w , y $f(P,t_d)$ es el factor de corrección a P y t_d .

La presión de vapor de agua $e(t)$ a la temperatura t se calcula con una aproximación empírica, que pueden seleccionarse de acuerdo a la exactitud deseada. En este trabajo se usó la formulación de Hardy [5].

El factor de corrección $f(P,t)$ es la corrección debida a las desviaciones del comportamiento del vapor de agua con respecto a un gas ideal. Bajo condiciones ideales $f(P,t)=1$, pero en condición real $f(P,t) \geq 1$. La aproximación más usada para $f(P,t)$ está dada por Hardy en [5].

El coeficiente psicrométrico depende de varios factores como la construcción del psicrómetro, la transferencia de calor y masa, radiación, etc. [6,7 8, 9, 10]. La ecuación de A mas conocida fue propuesta por Ferrel.

$$A=A_0(1+0,00115 t_w), \quad (3)$$

donde $A_0=6,6 \times 10^{-4}$.

La ecuación (2) puede resolverse para $t_d(t_w)$, cuando $t_w(t_d)$ es conocido con métodos numéricos. El método de Newton-Raphson es adecuado para este propósito por su simplicidad. Con este método no se requieren más de cinco iteraciones para obtener diferencias menores a 1 mK entre iteraciones sucesivas.

La figura 1 muestra la relación entre t_d y t_w . Los valores de t_d se calcularon a diferentes valores de t_w , con $t=25$ °C, $P=101\ 325$ Pa y $A_0=6,6 \times 10^{-4}$ °C⁻¹.

En esta figura se puede observar que la relación entre t_d y t_w se puede aproximar por medio de una ecuación cuadrática, sin embargo esta curva fue generada a un valor de presión y a un valor del coeficiente psicrométrico, por lo que su forma puede cambiar en otras condiciones.

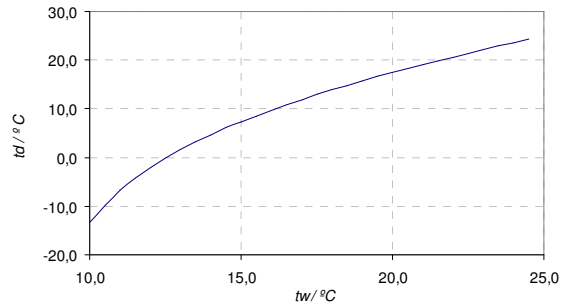


Figura 1. Relación entre t_d y t_w .

3. CONVERSIÓN ENTRE t_d Y t_w

La conversión entre $t_d(t_w)$ y $t_w(t_d)$ es un proceso complejo debido a la factores involucrados en la ec. (2). Estos factores incluyen: la temperatura ambiente, la presión, el coeficiente psicrométrico, la presión de vapor de agua y el factor de corrección.

En la figura 2 se muestra las curvas de conversión a tres valores de t (5 °C, 25 °C, 50 °C), a cuatro valores de presión.

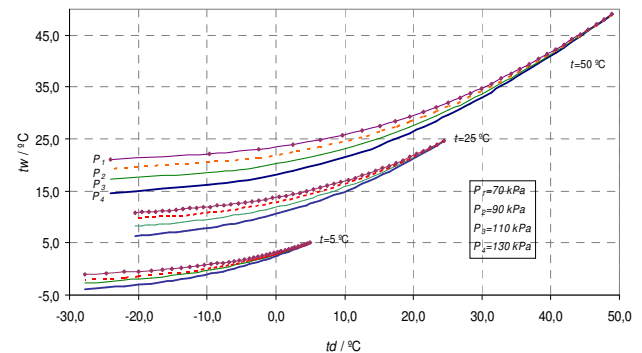


Figura 2. Efecto de la presión en la conversión entre t_d y t_w .

Como se muestra en la figura 2, este efecto se evaluó a valores de presión entre 70 kPa y 130 kPa. En este intervalo de presión y a temperatura entre 0 °C y 80 °C, las diferencias entre los valores calculados de t_w pueden ser mayores a 5 °C.

Como se mencionó, el valor de A puede ser elegido acorde al tipo de psicrómetro. Sin considerar el debate actual sobre el valor de A , los valores aceptados se encuentran entre $6,2 \times 10^{-4}$ °C⁻¹ y $6,7 \times 10^{-4}$ °C⁻¹ [4, 6, 8, 10, 11, 12]. En la tabla I se muestra el efecto de A en la conversión.

* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

Valores de t_w calculados a partir de t_d , t y P							
A_0							
		$6,2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$t_d/^\circ\text{C}$	$t/^\circ\text{C}$	$t_w/^\circ\text{C}$	$*t_w/^\circ\text{C}$	$t_w/^\circ\text{C}$	$*t_w/^\circ\text{C}$	$t_w/^\circ\text{C}$	$*t_w/^\circ\text{C}$
2,0	5,0	3,626	3,628	3,649	3,651	3,682	3,685
1,5	10,0	5,983	5,991	6,046	6,054	6,137	6,145
10,0	50,0	23,641	23,671	23,867	23,897	24,196	24,226
30,0	80,0	38,826	38,858	39,023	39,056	39,313	39,346
Valores de t_d calculados a partir de t_w , t y P							
A_0							
		$6,2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,2 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,4 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	$6,7 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
$t_w/^\circ\text{C}$	$t/^\circ\text{C}$	$t_d/^\circ\text{C}$	$*t_d/^\circ\text{C}$	$t_d/^\circ\text{C}$	$*t_d/^\circ\text{C}$	$t_d/^\circ\text{C}$	$*t_d/^\circ\text{C}$
3,626	5,0	2,000	1,995	1,946	1,939	1,862	1,855
16,000	20,0	13,659	13,649	13,578	13,568	13,456	13,445
24,196	50,0	11,554	11,475	10,949	10,866	10,000	9,908
39,023	80,0	30,351	30,295	30,000	29,941	29,461	29,398

Tabla I. Conversión a $P=$ constante =101, 325 kPa

t_w corresponde al valor de la temperatura de bulbo húmedo calculado considerando el factor de corrección $f(P,t)$, $*t_w$ corresponde al valor de la temperatura de bulbo húmedo calculado despreciando el factor de corrección $f(P,t)$ t_d y $*t_d$ fueron calculados en las mismas condiciones de t_w antes descritas. Los cálculos se realizaron considerando $A=A_0(1+0,00115t_w)$

Las diferencias en la conversión (tabla I), depende de A y del factor de corrección. Es común usar solo un valor para A para realizar la conversión pero esta consideración puede generar errores si este valor es incorrecto.

Cuando no se considera el factor de corrección, la diferencia en la conversión puede alcanzar valores de hasta 0,07 $^\circ\text{C}$.

4. PROPAGACIÓN DE INCERTIDUMBRE

La propagación de incertidumbre en la conversión de algunas magnitudes de humedad se describe por Lowell-Smith [3], quien presenta cinco casos. En este documento se reportan dos casos adicionales relacionados con la propagación de incertidumbre entre t_w y t_d .

De acuerdo a “Guía para la expresión de la incertidumbre de las mediciones” (ISO GUM, [14]), la incertidumbre expandida se puede calcular de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$U = k \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i)}, \quad (4)$$

donde,

* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

f es una función que relaciona las variables de entrada con el mensurando, $u(x_i)$ es la incertidumbre de cada variable de entrada (x_i), k es el factor de cobertura, $\partial f/\partial x_i$ es el coeficiente de sensibilidad y, $r(x_i, x_j)$ es el factor de correlación entre x_i y x_j .

La ecuación (4) se aplica para magnitudes no correlacionadas.

4.1 Propagación de incertidumbre en la conversión de t_w a t_d

La propagación de incertidumbre en la conversión de t_w a t_d se obtiene al aplicar la ecuación (4) en la ecuación (2) de lo cual se obtiene,

$$u_{t_d} = \sqrt{\left(\frac{\partial t_d}{\partial t_w} u_{t_w} \right)^2 + \left(\frac{\partial t_d}{\partial P} u_P \right)^2 + \left(\frac{\partial t_d}{\partial t} u_t \right)^2 + \left(\frac{\partial t_d}{\partial A} u_A \right)^2} \quad (5).$$

En la ecuación (5) se obtuvo considerando que las magnitudes no están correlacionadas. Los coeficientes de sensibilidad fueron calculados de la ec.(2) y se describen en la tabla II.

Coefficientes de sensibilidad	de	Con el factor de corrección $f(P,t)$	Sin el factor de corrección $f(P,t)$
$\partial t_d / \partial t_w$		$\frac{f(P,t_w) \frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + e(t_w) \frac{\partial f(P,t_w)}{\partial t_w} + AP}{f(P,t_d) \frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d} + e(t_d) \frac{\partial f(P,t_d)}{\partial t_d}}$	$\frac{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}}$
$\partial t_d / \partial P$		$\frac{-A(t-t_w) + e(t_w) \frac{\partial f(P,t_w)}{\partial P}}{f(P,t_d) \frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d} + e(t_d) \frac{\partial f(P,t_d)}{\partial t_d}}$	$\frac{-A(t-t_w)}{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}}$
$\partial t_d / \partial t$		$\frac{-AP}{f(P,t_d) \frac{de(t_d)}{dt_d} + e(t_d) \frac{df(P,t_d)}{dt_d}}$	$\frac{-AP}{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}}$
$\partial t_d / \partial A$		$\frac{-P(t-t_w)}{f(P,t_d) \frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d} + e(t_d) \frac{\partial f(P,t_d)}{\partial t_d}}$	$\frac{-P(t-t_w)}{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}}$

Tabla II. Coeficientes de sensibilidad para la propagación de incertidumbre en la conversión de t_w a t_d .

Valores de entrada						Valores calculados		
$t_w / ^\circ C$	$t / ^\circ C$	$u_{t_w} / ^\circ C$	$u_t / ^\circ C$	$u_P (Pa)$	$u_A / ^\circ C^{-1}$	$t_d / ^\circ C$	$u_{t_d} / ^\circ C$	$u_{t_d} / ^\circ C$
0	5	0,01	0,01	100	1%	-10,377	0,163	0,163
		0,02	0,02	100	1%		0,192	0,193
		0,01	0,01	200	1%		0,165	0,165
		0,01	0,01	100	2%		0,308	0,309
		0,01	0,01	100	1%		0,032	0,035
20	25	0,02	0,02	100	1%	17,485	0,045	0,047
		0,01	0,01	200	1%		0,033	0,042
		0,01	0,01	100	2%		0,057	0,059
		0,01	0,01	100	1%		0,043	0,044
50	80	0,02	0,02	100	1%	46,278	0,048	0,050
		0,01	0,01	200	1%		0,043	0,048
		0,01	0,01	100	2%		0,082	0,083

Tabla III. Resultados de la propagación de incertidumbre en la conversión de t_w a t_d . u_{t_d} fue calculado despreciando el factor de corrección $f(P,t)$.

* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

En la tabla III se muestran los resultados de la propagación de incertidumbre en la conversión de t_w a t_d . Los valores de incertidumbre se calcularon para tres valores de t y t_w con $P=101\,325$ Pa, y $A_0=6,6 \times 10^{-4}$. En la misma tabla III se muestran los valores calculados para t_d .

Las fuentes de incertidumbre consideradas para calcular ut_d fueron: ut_w , u , uP y uA .

En la última columna de la tabla III se muestran los valores de $*ut_d$, los cuales se calcularon sin considerar el factor de corrección. De estos resultados se puede observar que la incertidumbre de A es la de mayor contribución en la incertidumbre total. Lo anterior fue confirmado en otros puntos evaluados.

En las figuras 3a y 3b se muestran los coeficientes de sensibilidad típicos debidos a la propagación de incertidumbre para t_d .

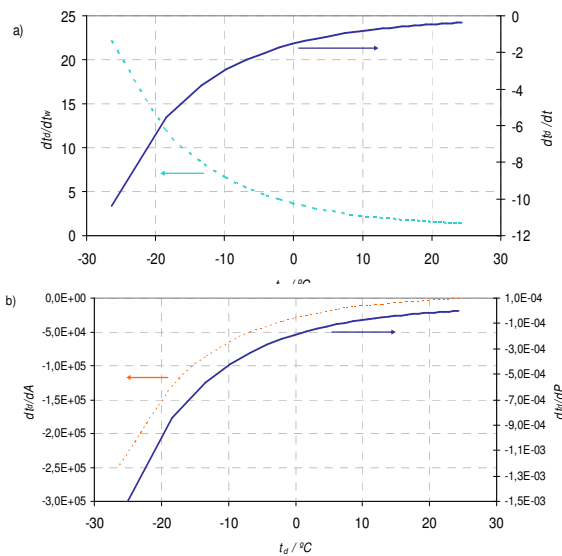


Figura 3. Coeficientes de sensibilidad en la propagación de incertidumbre en la conversión de t_w a t_d .

Los coeficientes de sensibilidad de la figura 3 a) y 3 b) fueron generados en las condiciones de $t=25$ °C, $P=101,325$ kPa y $A_0=6,6 \times 10^{-4}$ °C⁻¹.

4.2 Propagación de incertidumbre en la conversión de t_d a t_w

La propagación de incertidumbre en la conversión de t_d a t_w se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$ut_w = \sqrt{\left(\frac{\partial t_w}{\partial t_d} ut_d\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial P} u_P\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial t} u_t\right)^2 + \left(\frac{\partial t_w}{\partial A} u_A\right)^2} \quad (6)$$

La propagación de incertidumbre obtenida en la conversión de t_d a t_w se realizó para dos casos, uno de los cuales considera el factor de corrección $f(P,t)$ y en el otro se consideró el caso ideal en el que $f(P,t)=1$

Los coeficientes de sensibilidad de la ec. (6) se muestran en la tabla IV.

En la tabla V se muestran los resultados de la propagación de incertidumbre en la conversión de t_d a t_w . Los valores mostrados en esta tabla fueron obtenidos a $P=101,325$ kPa y $A_0=6,6 \times 10^{-4}$ en tres valores de t y t_d .

En las figuras 4a y 4b se muestran los coeficientes de sensibilidad involucrados en la propagación de incertidumbre de t_w . En este caso los coeficientes de sensibilidad fueron calculados a $t=80$ °C, $P=101,325$ kPa y $A_0=6,6 \times 10^{-4}$.

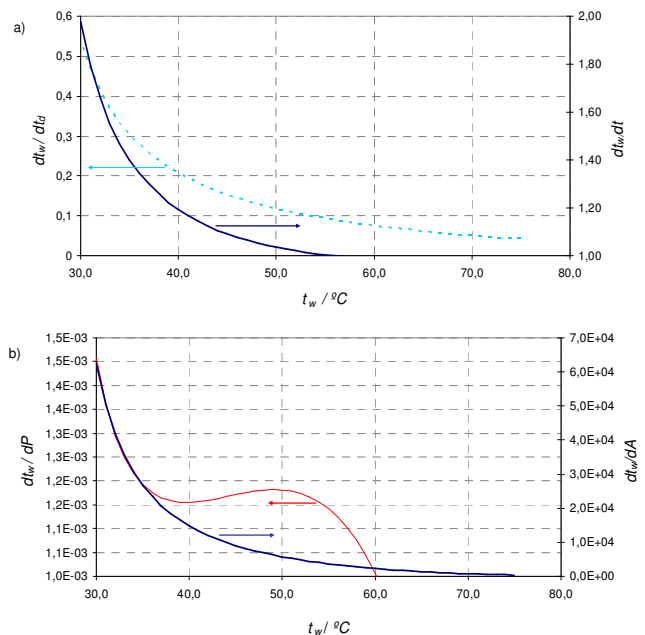


Figura 4. Coeficientes de sensibilidad en la propagación de la incertidumbre de la conversión de t_d a t_w .

* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

Coeficientes de sensibilidad	Con el factor de corrección $f(P,t)$	Sin el factor de corrección $f(P,t)$
$\partial t_w / \partial t_d$	$\frac{f(P,t_d) \frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d} + e(t_d) \frac{\partial f(P,t_d)}{\partial t_d}}{f(P,t_w) \frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + e(t_w) \frac{\partial f(P,t_w)}{\partial t_w} + AP}$	$\frac{\frac{\partial e(t_d)}{\partial t_d}}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}$
$\partial t_w / \partial P$	$\frac{e(t_d) \frac{\partial f(P,t_d)}{\partial P} + A(t-t_w)}{f(P,t_w) \frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + e(t_w) \frac{\partial f(P,t_w)}{\partial t_w} + AP}$	$\frac{A(t-t_w)}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}$
$\partial t_w / \partial t$	$\frac{AP}{f(P,t_w) \frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + e(t_w) \frac{\partial f(P,t_w)}{\partial t_w} + AP}$	$\frac{AP}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}$
$\partial t_w / \partial A$	$\frac{P(t-t_w)}{f(P,t_w) \frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + e(t_w) \frac{\partial f(P,t_w)}{\partial t_w} + AP}$	$\frac{P(t-t_w)}{\frac{\partial e(t_w)}{\partial t_w} + AP}$

Tabla IV. Coeficientes de sensibilidad para la propagación de incertidumbre en la conversión de t_d a t_w .

Valores de entrada						Valores calculados		
t_d (°C)	t (°C)	U_{t_d} (°C)	u_t (°C)	u_P (Pa)	u_A (°C ⁻¹)	t_w (°C)	u_{t_w} (°C)	u_{t_w} (°C)
0	5	0,01	0,01	100	1%	2,891	0,031	0,031
		0,02	0,02	100	1%		0,034	0,034
		0,01	0,01	200	1%		0,031	0,031
		0,01	0,01	100	2%		0,060	0,061
		0,01	0,01	100	1%		0,033	0,018
20	25	0,02	0,02	100	1%	21,555	0,036	0,023
		0,01	0,01	200	1%		0,058	0,018
		0,01	0,01	100	2%		0,043	0,033
		0,01	0,01	100	1%		0,121	0,033
50	80	0,02	0,02	100	1%	52,925	0,122	0,037
		0,01	0,01	200	1%		0,236	0,033
		0,01	0,01	100	2%		0,132	0,063

Tabla V. Resultados de la propagación de incertidumbre en la conversión de t_d a t_w . u_{t_w} fue calculado despreciando el factor de corrección $f(P,t)$.

* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores

6. CONCLUSIONES

En este artículo se presentó el proceso de conversión entre t_w y t_d así como la propagación de incertidumbre de la misma.

También se mostraron los efectos de P y A , en la conversión.

Se encontró que las fuentes de incertidumbres más importantes en la conversión son debidas a la presión y a la constante psicrométrica.

Las contribuciones por la aproximación de la presión de saturación de vapor de agua y por el factor de corrección resultaron despreciables con respecto a las otras.

Tomando en cuenta la fuerte dependencia de la constante psicrométrica en la incertidumbre de la conversión, resulta conveniente realizar mayor trabajo de investigación para establecer un valor confiable de A en todo el intervalo de operación de los psicrómetros.

REFERENCIAS

1. G D Chapman, *Metrologia*, **29**, pp.379-387, 1992.
2. J A Davila-Pacheco, E Martines-Lopez, Propagación de incertidumbre en la conversión de algunas magnitudes de humedad, *Simposio de Metrología*, 2006.
3. J Lowell-Smith, Propagation of uncertainty in humidity measurement, *Tempmeko*, Vol 2 pp.911-916, 2001.
4. J Fan, Determination of the Psychrometer Coefficient A of the WMO Reference Psychrometer by Comparison with a Standard Gravimetric Hygrometer, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 4. *American Meteorological Society*, pp. 239-244, (1989).
5. R Hardy, "ITS-90 formulations for vapour pressure, frost point temperature, dewpoint temperature and enhancement factors in the ranged -100 to +100 C". *Third International Symposium of Humidity and Moisture*; 1, pp. 214-222 (1998).
6. G J W Visscher, Standard psychrometers, a matter of p(references), *Meas. Sci. Technol.* 6 pp. 1451-1461 (1995).
7. J Szumowsky, *Metrologia* **18**, pp13-16 (1982).
8. G J W Visscher and K. Shurer, The psychrometer coefficient: calculation versus calibration, *Third International Symposium of Humidity and Moisture*; 1, pp.231-245 (1998).
9. J R Simões- Moreira, A thermodynamic formulation of the psychrometer constant, *Meas. Sci. Technol.* 10, pp.302-311 (1999).
10. ASTM E 337-84 (reapproved 1996), Standard test method for Measuring Humidity with a Psychrometer (the Measurement of wet-and Dry-bulb Temperatures), 1996.
11. S A Thulin, Air humidity and air density determinations in metrology laboratories, *Bulletin OIML-No 123*, pp. 32-39, 1991.
12. D Sonntag, The history of formulations and measurements of saturation water vapour pressure, *Third International Symposium of Humidity and Moisture*; 1, pp.93-201 (1998).
13. J Mathews, "Numerical methods for mathematics, science, and engineering". *Prentice Hall*; 1992, 2nd edition.
14. ISO GUM, "Guide to the expression of the uncertainty in Measurement". *BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAP, IUPAC, OIML* (1995).

* Esta es una traducción libre del artículo original (sin revisión) en inglés que fue enviado para su publicación en el 10th International Symposium on Temperature and Thermal Measurements in Industry and Science, Tempmeko 2007. En consecuencia no puede ser citado como tal, sino como comunicación personal o privada con uno de sus autores