

# Necesidades industriales en la medición del contenido de humedad en gases

Jesus A. Davila  
Lab. Humedad / CENAM  
jdavila@cenam.mx



Encuentro Nacional de  
Metrología Eléctrica 2009  
18-20 de noviembre

→ Electromagnetismo  
→ Temperatura y  
Propiedades Termofísicas  
→ Tiempo y Frecuencia



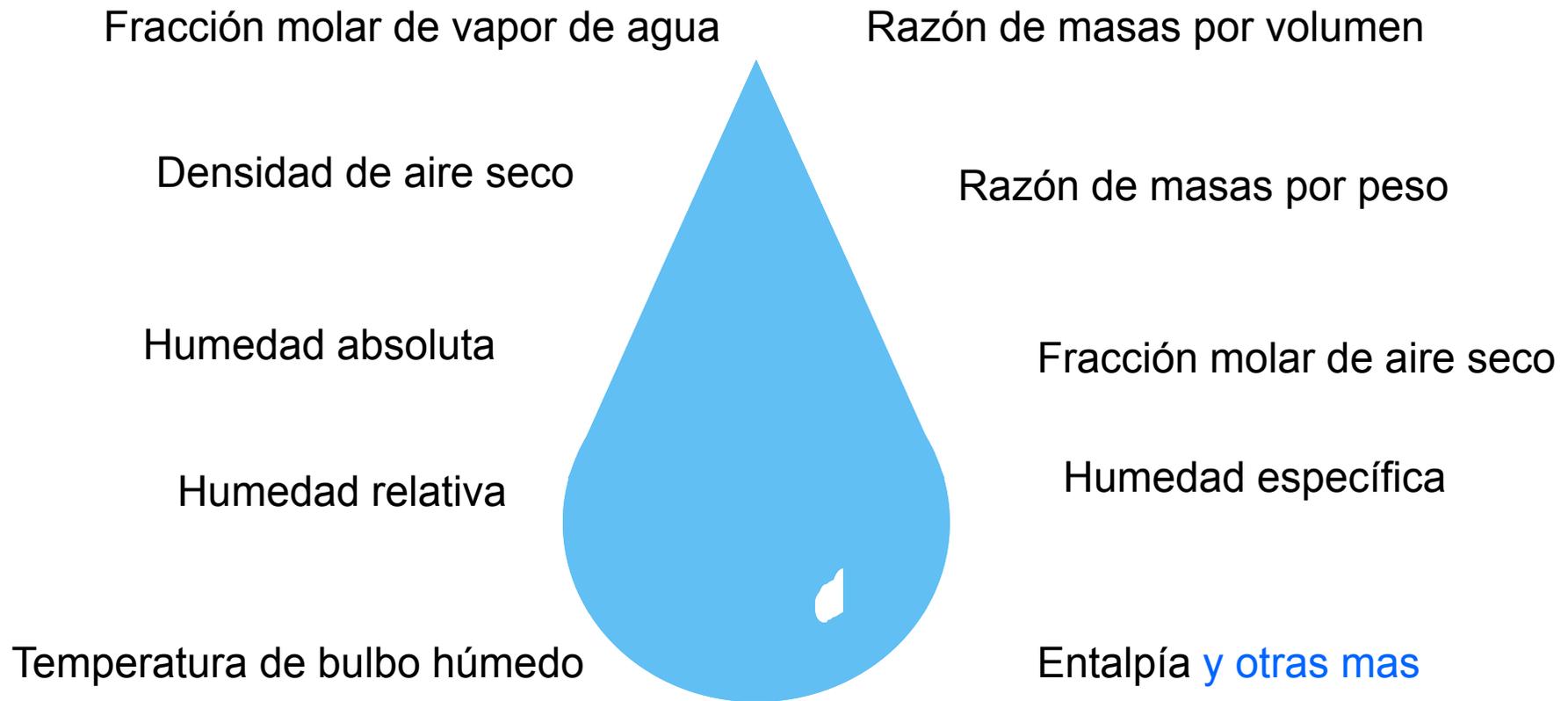
# Contenido

---

- Introducción
- Medición de temperatura de punto de rocío
  - Usos, cuidados y mantenimiento.
  - Corrección por presión.
  - Factores de influencia.
- Medición de temperatura de bulbo húmedo
  - Uso, cuidados y mantenimiento.
  - Corrección por presión.
- Conclusiones

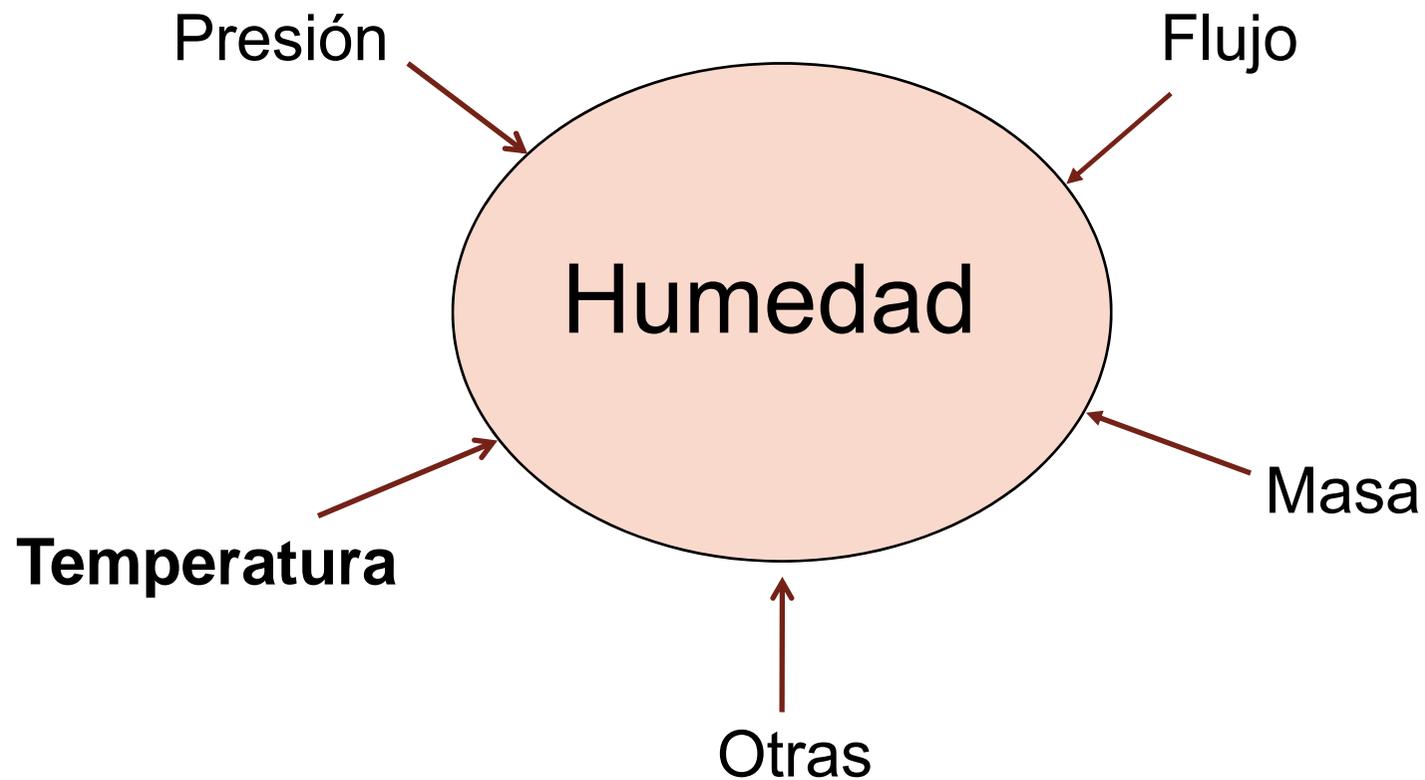
# Cantidades relacionadas con el contenido de agua en gases

---



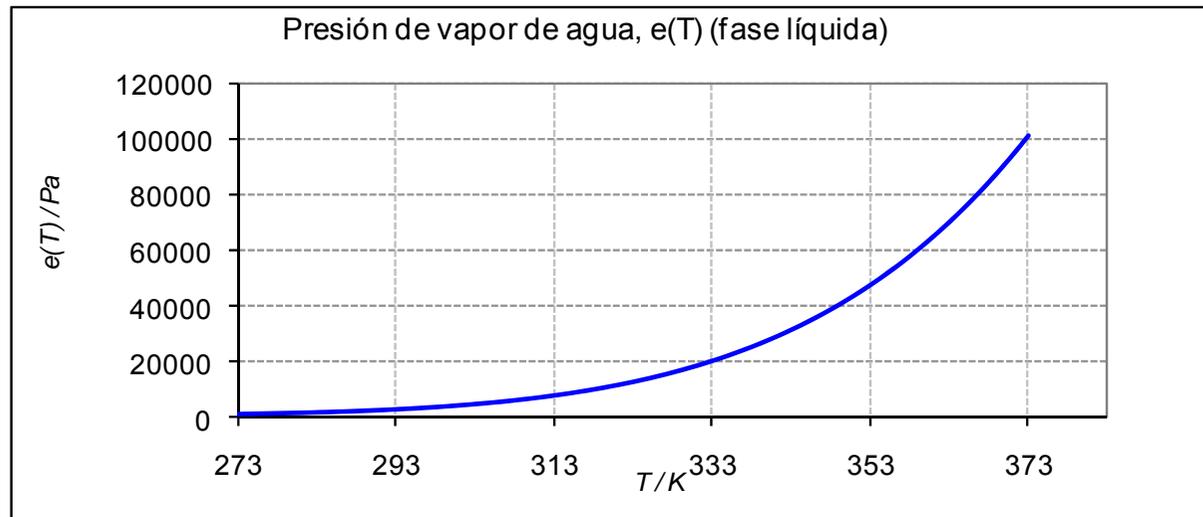
# Variables de influencia

---



# Presión de saturación de vapor de agua

Es la máxima presión que puede ser ejercida por el vapor de agua a una temperatura dada.



La presión de vapor de agua en el punto triple del agua es 611,657 Pa.

# Presión de saturación de vapor de agua / fase líquida

## Ecuaciones de aproximación para presión de vapor de agua

$$e(T_d) = \exp\left(\sum_{i=0}^6 a_i T_d^{i-2} + a_7 \ln T_d\right), \text{ en Pa}$$

|             | Wexler (1976, 1977)   | Sonntag (1990)  | Hardy (1998)  |
|-------------|---|---|---|
| $a_0$       | $-2,9912729 \cdot 10^3$   | 0   | $-2,8365744 \cdot 10^3$   |
| $a_1$       | $-6,0170128 \cdot 10^3$   | $-6,0969385 \cdot 10^3$   | $-6,028076559 \cdot 10^3$   |
| $a_2$       | $1,887643854 \cdot 10^1$  | $2,12409642 \cdot 10^1$   | $1,954263612 \cdot 10^1$  |
| $a_3$       | $-2,8354721 \cdot 10^{-2}$  | $-2,711193 \cdot 10^{-2}$   | $-2,737830188 \cdot 10^{-2}$                                      |
| $a_4$       | $1,7838301 \cdot 10^{-5}$   | $1,673952 \cdot 10^{-5}$  | $1,6261698 \cdot 10^{-5}$   |
| $a_5$       | $-8,4150417 \cdot 10^{-10}$                                       | 0   | $7,0229056 \cdot 10^{-10}$  |
| $a_6$       | $4,4412543 \cdot 10^{-13}$  | 0   | $-1,8680009 \cdot 10^{-13}$                                       |
| $a_7$       | 2,858487  | 2,433502  | 2,7150305   |
| $U_r(e(T))$ | $\leq 0,005\%$<br>$0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$ | $\leq 0,005\%$<br>$0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$ | $\leq 0,005\%$<br>$0^\circ\text{C} \leq t \leq 100^\circ\text{C}$ |

# Presión de saturación de vapor de agua / fase sólida

## Ecuaciones de aproximación para presión de vapor de agua

$$e(T_f) = \exp\left(\sum_{i=0}^6 a_i T_f^{i-2} + a_7 \ln T_f\right), \text{ en Pa}$$

|             | Wexler (1976, 1977)  | Sonntag (1990)  | Hardy (1998)   |
|-------------|--|---|--|
| $a_0$       | 0  | 0   | 0  |
| $a_1$       | $-5,6745359 \cdot 10^3$  | $-6,0245282 \cdot 10^3$                                       | $-5,8666426 \cdot 10^3$  |
| $a_2$       | 6,3925247  | $2,932707 \cdot 10^1$   | $2,232870244 \cdot 10^1$   |
| $a_3$       | $-9,677843 \cdot 10^{-3}$  | $1,0613868 \cdot 10^{-2}$                                     | $1,39387003 \cdot 10^{-2}$   |
| $a_4$       | $6,22157 \cdot 10^{-7}$  | $-1,3198825 \cdot 10^{-5}$                                    | $-3,4262402 \cdot 10^{-5}$   |
| $a_5$       | $2,0747825 \cdot 10^{-9}$  | 0   | $2,7040955 \cdot 10^{-8}$  |
| $a_6$       | $-9,484024 \cdot 10^{-13}$   | 0   | 0  |
| $a_7$       | 4,1635019  | $-4,9382577 \cdot 10^{-1}$                                    | $6,7063522 \cdot 10^{-1}$  |
| $U_r(e(T))$ | $\leq (0,01-0,005 \cdot t)\%$<br>$-100 \text{ °C} \leq t \leq 0,01 \text{ °C}$ | $\leq 0,5\%$<br>$-100 \text{ °C} \leq t \leq 0,01 \text{ °C}$ | $\leq (0,01-0,005 \cdot t)\%$<br>$-100 \text{ °C} \leq t \leq 0,01 \text{ °C}$ |

# Medición de temperatura de punto de rocío



**Encuentro Nacional de  
Metrología Eléctrica 2009**  
**18-20 de noviembre**

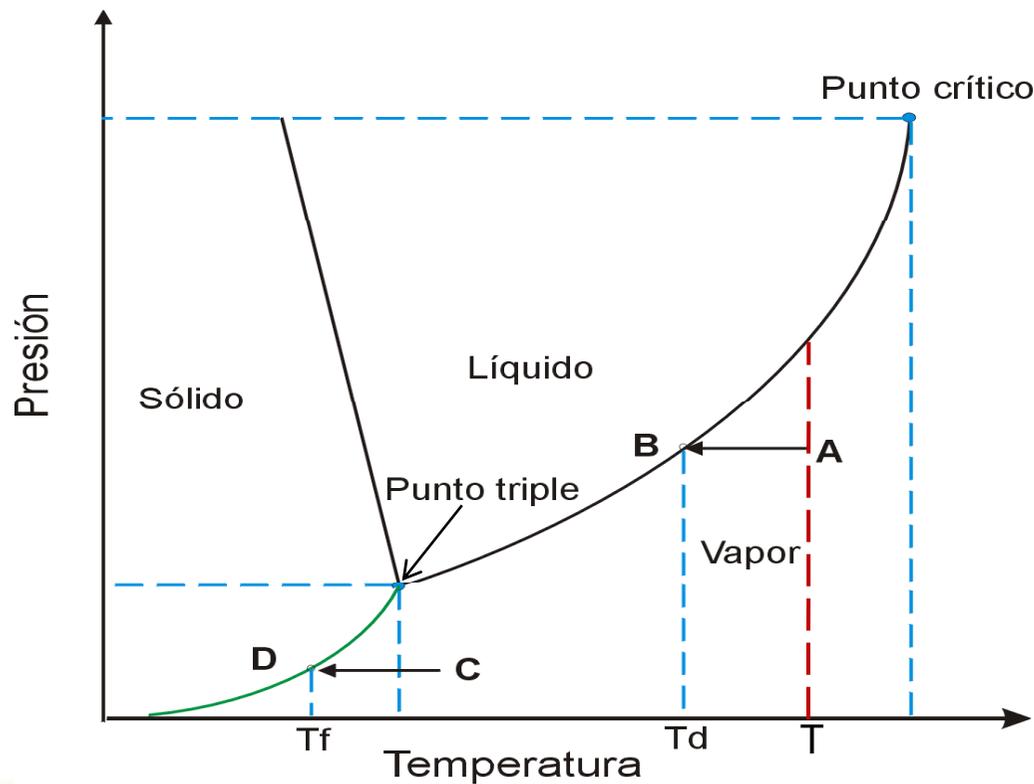
↪ Electromagnetismo  
↪ Temperatura y  
Propiedades Termofísicas  
↪ Tiempo y Frecuencia



# Temperatura de punto de rocío / escarcha

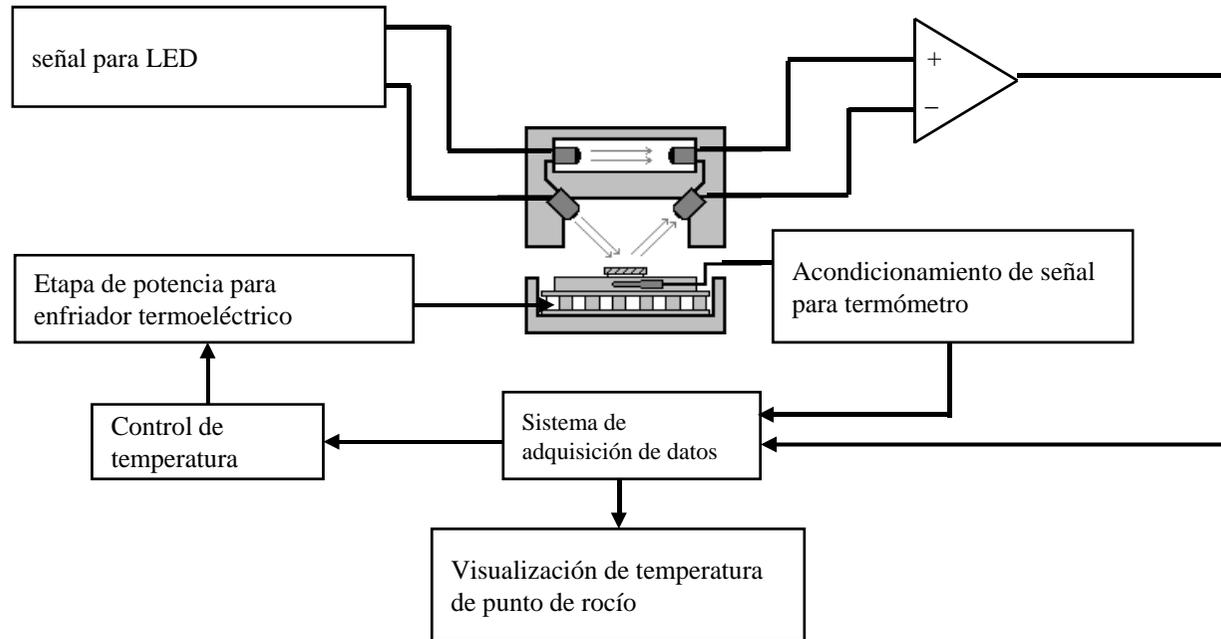
Temperatura a la cual la mezcla gas-vapor de agua debe ser enfriada isobáricamente para inducir condensación o solidificación.

En esta condición, la presión de vapor de agua alcanza su condición de saturación.



# Medidor de temperatura de punto de rocío / escarcha

## Medidores de temperatura de punto de rocío por espejo enfriado



# Características generales de un medidor de $t_d / t_f$

Alcance de medición: -90 °C a 100 °C

Exactitud: de 0.2 °C a 4 °C

Ventajas:

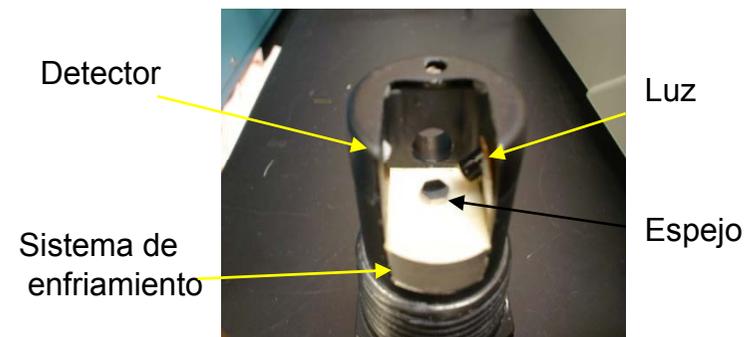
- Instrumento primario\*
- Instrumento de alta exactitud
- No presenta derivas
- No presenta histéresis
- No depende de la

temperatura del gas.

Desventajas:

- Costo elevado
- Mantenimiento especializado
- Uso e instalación

especializado

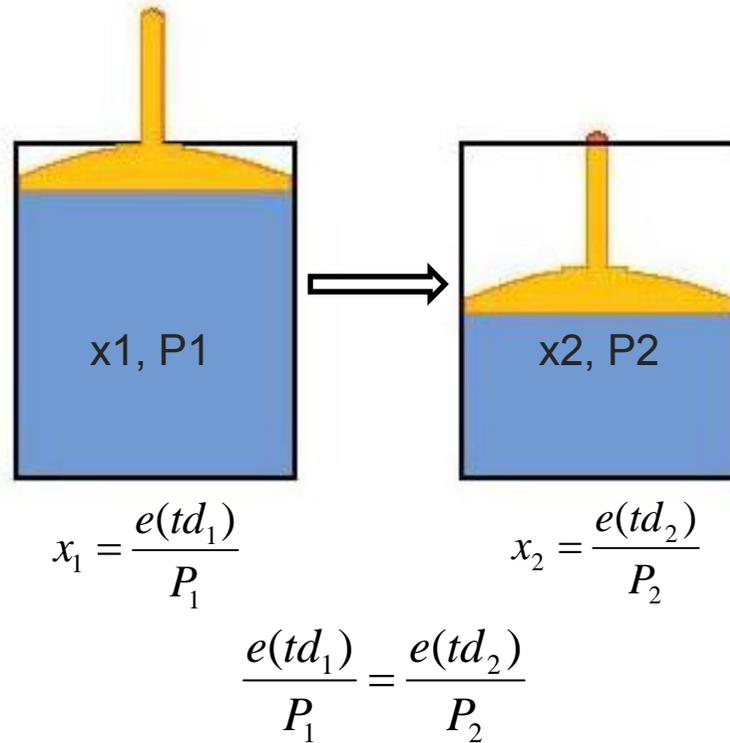


# Consideraciones para mediciones confiables

---

- Flujo, debe ser menor a 1 Lt/min
- Limpieza del espejo
- Materiales no higroscópicos para su instalación
- **Corregir efecto por presión**
- **A temperaturas menores de 0 °C identificar si es agua líquida (rocío) ó agua sólida (escarcha).**

# Temperatura de punto de rocío / efecto por presión



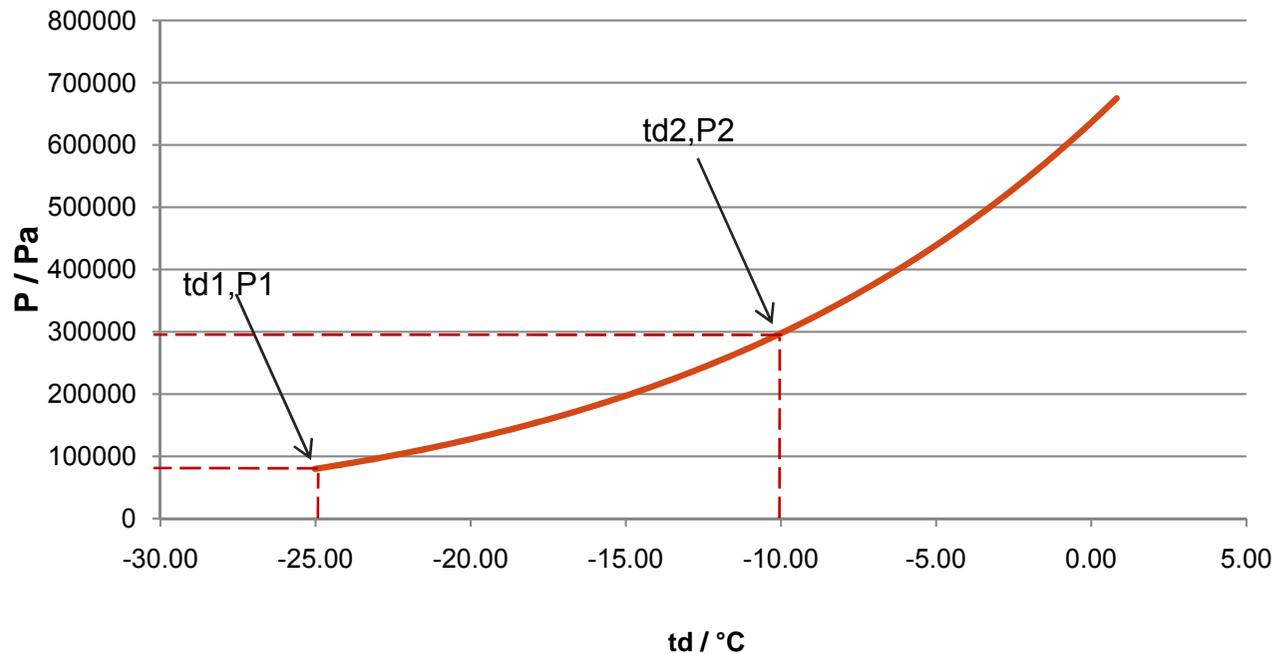
$$e(td_2) f(P_2, td_2) = e(td_1) \cdot f(P_1, td_1) \cdot \left( \frac{P_2}{P_1} \right)$$

Enrique Martines, Leonel Lira, 2008. "Cálculo de la temperatura de punto de rocío a diferentes valores de presión". Simposio de Metrología 2008.

CENTRO NACIONAL DE METROLOGÍA, CENAM, DERECHOS RESERVADOS 2009

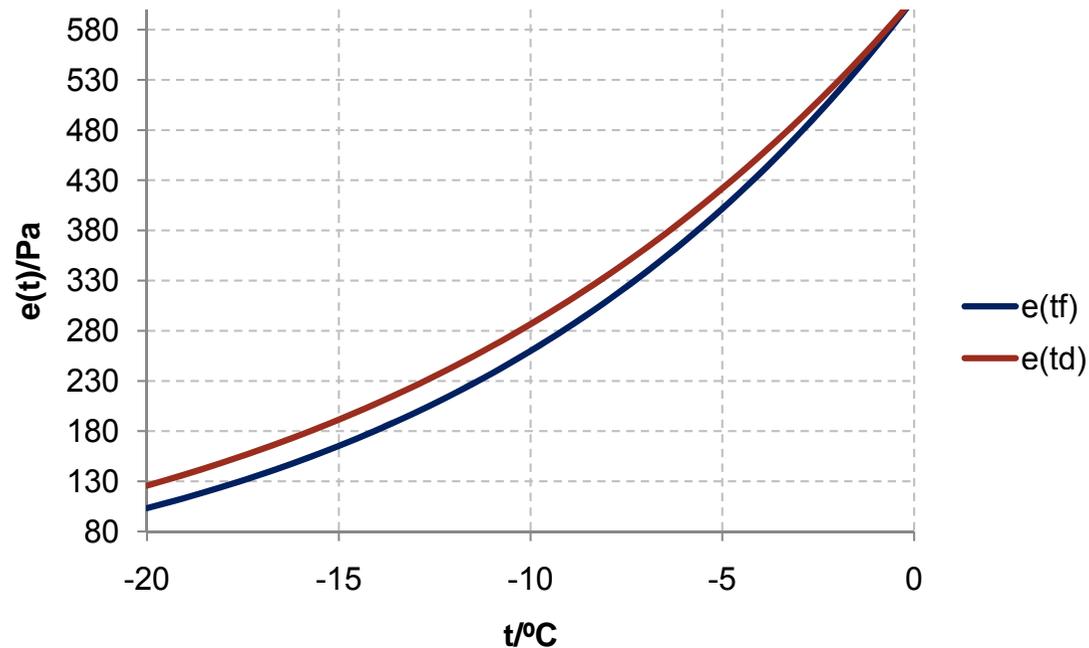
# Temperatura de punto de rocío / efecto por presión

## Efecto de presión a la temperatura de punto de rocío



# Agua superenfriada

- Las moléculas de vapor de agua tiene la propiedad de mantenerse líquida a temperaturas debajo de 0 °C y se conoce como agua superenfriada.



# Temperatura de punto de rocío / escarcha

- **Diferencias entre la temperatura de punto de rocío y la temperatura de punto de escarcha**

| Punto de escarcha /°C | Punto de rocío /°C | Diferencia /°C |
|-----------------------|--------------------|----------------|
| 0                     | 0                  | 0              |
| -5                    | -5,6               | -0,6           |
| -10                   | -11,2              | -1,2           |
| -15                   | -16,7              | -1,7           |
| -20                   | -22,2              | -2,2           |
| -25                   | -27,7              | -2,7           |
| -30                   | -33,1              | -3,1           |
| -35                   | -38,4              | -3,4           |
| -40                   | -43,7              | -3,7           |

# Medición de temperatura de bulbo húmedo



**Encuentro Nacional de  
Metrología Eléctrica 2009**  
**18-20 de noviembre**

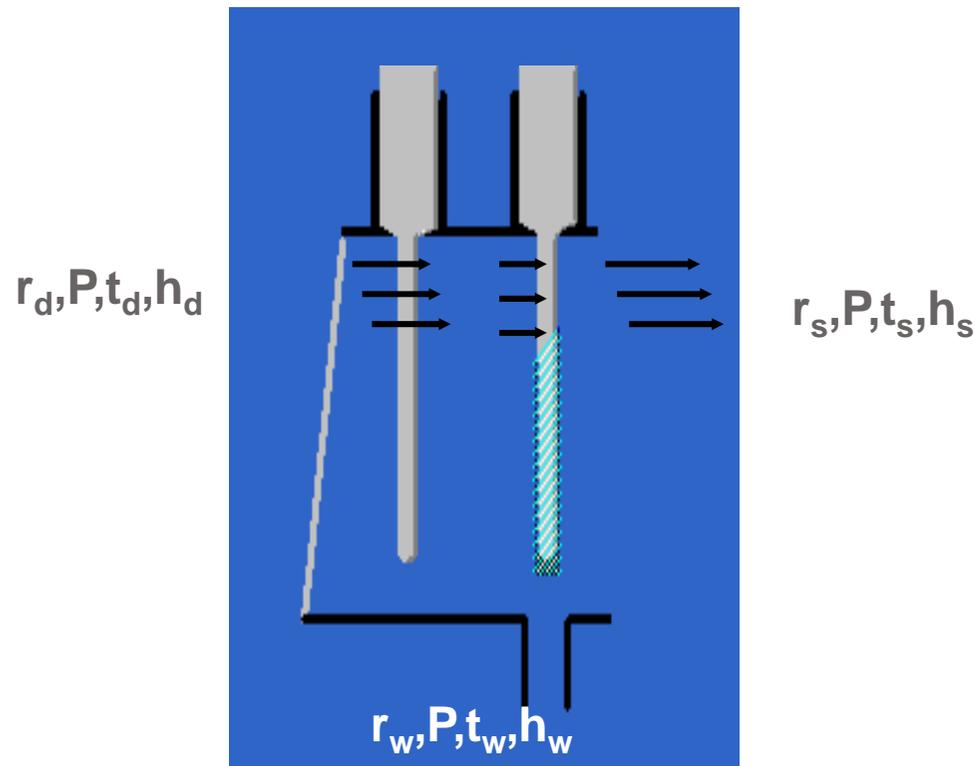
↪ Electromagnetismo  
↪ Temperatura y  
Propiedades Termofísicas  
↪ Tiempo y Frecuencia



# Temperatura de bulbo húmedo

## Temperatura del bulbo húmedo

Temperatura indicada por un termómetro cubierto con un paño de algodón humedecido y sobre el cual se hace pasar aire.



# Psicrómetro

Alcance de medición: 10 %HR a 98 %HR

Exactitud: de 1 %HR a 3 %HR

Ventajas:

- No presenta derivas
- No presenta histéresis
- Fácil operación y mantenimiento

Desventajas:

- Susceptible a contaminación
- Frágil
- No se adapta a todas las necesidades



# Humedad relativa a partir de $t$ y $t_w$

Ecuación de un psicrómetro que relaciona la humedad relativa y la temperatura de bulbo húmedo es:

$$\% HR = \frac{e(t_w) - A \cdot P \cdot (t - t_w)}{e(t)} \cdot 100$$

Donde  $A$  es el coeficiente psicrométrico. La aproximación mas conocida para  $A$  fue dada por Ferrel, está dada de la siguiente manera:

$$A = 6,6 \times 10^{-4} (1 + 0,00115 t_w)$$

$e(t_w)$  es la presión parcial de vapor de agua a la temperatura de bulbo húmedo,

$e(t)$  es la presión parcial de vapor de agua a la temperatura ambiente,

$P$  es la presión ambiente,

$t$  temperatura ambiente

$t_w$  temperatura de bulbo húmedo

# Temperatura de bulbo húmedo

---

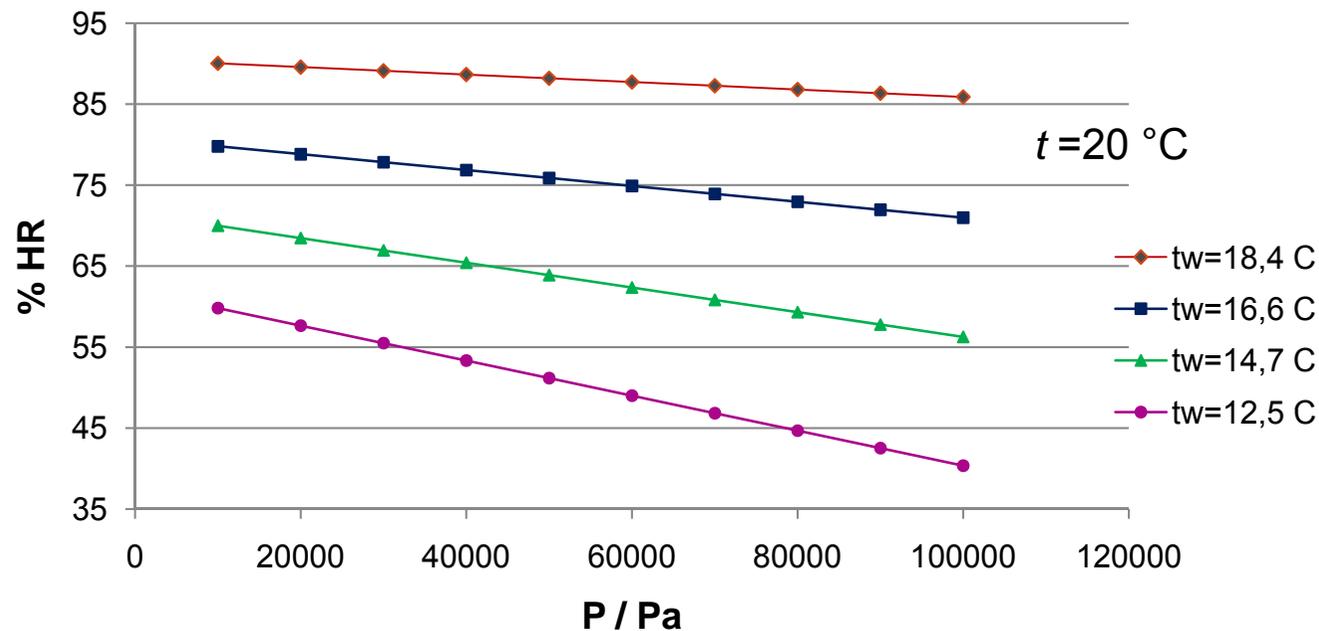
Para una “lectura” rápida de humedad relativa, generalmente se usan tablas psicrométricas.



Estas tablas generalmente están calculadas a un valor de presión,  
101 325 Pa

# Efecto de presión

- Efecto de presión en la determinación de humedad relativa a partir de medición de  $t_w$  y  $t$ .



# Corrección por presión

## Corrección por presión de acuerdo a AST E 337-84

$$\%HR = \%HR_0 + B \cdot (t - t_w) \cdot (101325 - P)$$

Donde %HR es el valor de humedad relativa corregido; %HR<sub>0</sub> es el valor de humedad relativa obtenido de la carta psicrometrica; B es un factor de correccion.

| t / °C | Factor de corrección<br>B* (x10 <sup>-5</sup> ) |
|--------|---|
| 1      | 10  |
| 3      | 8,72  |
| 5      | 7,58  |
| 7      | 6,61  |
| 9      | 5,78  |
| 11     | 5,06  |
| 13     | 4,44  |
| 15     | 3,91  |
| 17     | 3,45  |
| 19     | 3,05  |
| 21     | 2,7   |
| 23     | 2,39  |
| 25     | 2,12  |
| 27     | 1,89  |
| 29     | 1,68  |
| 31     | 1,5   |
| 33     | 1,34  |
| 35     | 1,21  |

# Comparación de resultados

Comparación de valores de humedad relativa obtenidos con carta psicrométrica, carta psicrométrica corregido y ecuación de Ferrell.  
P=80 000

| $t / ^\circ\text{C}$ | $tw / ^\circ\text{C}$ | % HR                           |                                |                       |
|----------------------|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
|                      |                       | Tabla ASTM<br>(sin corrección) | Tabla ASTM<br>(con corrección) | Con ec. de<br>Ferrell |
| 20                   | 18,4                  | 86                             | 86,9                           | 86,8                  |
| 20                   | 16,6                  | 71                             | 73,0                           | 72,9                  |
| 20                   | 14,7                  | 56                             | 59,1                           | 59,3                  |
| 20                   | 12,5                  | 40                             | 44,3                           | 44,7                  |

# Variables de influencia

---

- Variables de influencia en la determinación de humedad relativa con psicrómetros.
  - Velocidad del aire
  - Pureza de agua
  - Contaminación
  - Funda del bulbo húmedo
  - Efecto de radiación.
  - otros

# Conclusiones

---

- Se presentaron algunos conceptos de humedad.
- Se presentaron las consideraciones necesarias para obtener mediciones confiables en la medición de temperatura de punto de rocío con instrumentos de espejo enfriado.
- Es necesario considerar el efecto de presión cuando exista una diferencia de presión entre el proceso donde está la muestra de gas y el sistema de medición.

# Conclusiones

---

- Se presentaron algunas consideraciones prácticas para la determinación de humedad relativa con psicrómetros.
- Al usar tablas psicrométricas se debe corregir el valor de humedad relativa por efecto de presión.