

## CALORIMETRÍA

### El calor

Teoría del calórico (*Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*, CARNOT) fluido invisible e imponderable que existe en los cuerpos, tal que cuando se cede, disminuye la temperatura, cuando se absorbe, aumenta.

Aplicaciones de la teoría del calórico: Transmisión del calor, leyes de la calorimetría, fórmula de BLACK  $Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T$  (FERNÁNDEZ PUJAL, P.286) y definición de caloría. Símbolo: cal; Caloría energética o caloría grande, 1 C = 1 kcal

La teoría del calórico, no explicaba, sin embargo, la generación de calor por movimiento. Observación de Benjamín Thompson, Conde Rumford, durante la fabricación de la cureña de los cañones: el agua seguía hirviendo aunque la herramienta de corte estuviera roma. *Hay un calor asociado a los rozamientos, esto es, al movimiento.*

Recordar la definición de calor. El calor es otra forma de energía, intercambiable con la energía mecánica. JOULE demostró que la aparición o desaparición de calor va acompañada de la desaparición o aparición de energía mecánica, conservándose constante la suma de energía mecánica y térmica. (TIPLER, 589)

Describir el experimento de JOULE: Equivalente mecánico del calor, 1 cal = 4.186 J.

### Capacidad calorífica y calores específicos

Capacidad calorífica: Los cuerpos se distinguen entre sí también porque absorben energía térmica a diferentes ritmos.

Este hecho está recogido en la definición de la unidad histórica de calor (caloría), que se define como la energía térmica necesaria para elevar la temperatura de un gramo de agua en un grado celsius, concretamente, en el intervalo comprendido entre 14,5 °C y 15,5 °C (Lleó, p.317).

Capacidad calorífica de un cuerpo es la cantidad de energía térmica necesaria para aumentar en un grado su temperatura. Variación de energía térmica de un cuerpo por variación de

Cap. VII: Termodinámica. Lección 3: Calorimetría

temperatura.

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

Calor específico másico ( $C_e^m$ ) o capacidad calorífica específica, fórmula de Black:

$$C_e^m = \frac{C}{m} = \frac{\Delta Q}{\Delta T \cdot m}$$

A veces el calor específico másico se representa por la letra minúscula "c".

Calor específico molar ( $C_e^n$ ):

$$C_e^n = \frac{C}{n} = \frac{C}{\frac{m}{M}} = C_e^m M$$

Ecuación de dimensiones:

$$[C_e^m] = \frac{W}{MT} = \frac{FL}{MT} = \frac{MLt^{-2}L}{MT} = L^2t^{-2}T^{-1}$$

Unidades: julio·(kg-masa·K)<sup>-1</sup> (S.I.) ó cal/g °C

TRANSPARENCIA: TABLA DE CALORES ESPECÍFICOS

Calor específico molar de metales (Na, K, Ca, Al, Cu, Ag): Ley de Dulong y Petit.

Comentar al valor del " $C_e^m$ " del agua: 1 cal/g °C, el mayor valor de los cuerpos sólidos, el hidrógeno tiene mayor calor específico relativo: 3.389 (p. 23, F.H. FORRESTER). Almacén de calor: una cantidad relativamente pequeña de agua absorbe una gran cantidad de calor, para una elevación de temperatura relativamente pequeña. Por este motivo el agua se emplea en la

## Cap. VII: Termodinámica. Lección 3: Calorimetría

refrigeración de los motores (p. 248, HEWITT, 1997).

El agua también requiere mucho tiempo para enfriarse. Utilidad de la bolsa de agua caliente. Canadá y Europa están a latitudes similares, sin embargo tienen climas muy diferentes. Ello es debido a que la corriente del Golfo llega a las costas europeas habiendo perdido muy poco calor del que había ganado en el Caribe. La energía que libera al enfriarse frente a las costas europeas es transportada al continente por los vientos del Oeste. Origen de la expresión: "El tiempo -y el clima-, vienen del Oeste".

Regulador térmico. Efecto termorregulador de los embalses.

Generación de brisas (Radiación en la estratosfera:  $1.94 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ ,  $1,94 \text{ langlios/minuto}$ ,  $1353 \text{ W/m}^2$ ). en Observatorio astronómico de Izaña, (Tenerife) se han registrado  $0.35 \text{ cal/cm}^2\text{min}$ ) (10 temas...energía... MAPA p.44).

Calor específico del hielo. Calor específico del cuerpo humano. Calor específico de los gases (más adelante).

Determinación de calores específicos

Método del calorímetro

Equivalente en agua del calorímetro (Cuando se da suele incluir el calor ganado por el termómetro, agitador, etc.)

### Superficie de estado del compuesto químico $\text{H}_2\text{O}$

#### TRANSPARENCIA: SUP. ESTADO DEL $\text{H}_2\text{O}$ Y DIAGRAMA CLAPEYRON

Comentar sentido positivo de los ejes

Definición

Describir la forma de la superficie (Porciones regladas)

Identificar la zona en la que se encuentra el gas

Proyecciones: Diagrama de Clapeyron (condiciones de aplicación ec. estado gases ideales)

Proyecciones: Diagrama de fases del  $\text{H}_2\text{O}$ : explicar su relación con la superficie de estado del agua.

### Cambios de fase, calor latente.

Según la fórmula de Black, cuando se suministra calor a un

Cap. VII: Termodinámica. Lección 3: Calorimetría

cuerpo, éste aumenta su temperatura. Puede ocurrir que se suministre calor a un cuerpo SIN incremento de temperatura, en tal caso se produce un cambio de estado o de fase. Al suministrar energía (calor) SÓLO puede ocurrir una de las dos cosas.

1. Definir el sistema: Hielo a  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$  en un recipiente sometido a una aportación CONSTANTE de calor.

$$\Delta Q = m \cdot C_e \cdot \Delta T \quad ; \quad \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{m \cdot C_e \cdot \Delta T}{\Delta t} \quad ; \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{\Delta Q}{m \cdot C_e}$$

2. Definir los ejes: Ordenadas:  $T\text{ (}^{\circ}\text{C)}$ - abscisas:  $t\text{ (s)}$
3. Calentamiento del hielo: regido por la fórmula de BLACK,  $C_e = 0.5\text{ cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$
4. Si  $P = 1\text{ atm}$ , cuando  $T_{\text{hielo}} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , empieza a aparecer agua.
5. A partir del instante anterior, si continúa el ensayo,  $\Delta T = 0$ , Cambio de estado: FUSIÓN, Hay aporte de energía sin incremento de temperatura.
6. Cuando se ha fundido todo el hielo, el sistema está constituido por agua a  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ha finalizado el cambio de fase.
7. El calor (energía) absorbido por el cambio de fase viene dado por:  $\Delta Q = m \cdot C_{\text{fusión}}$  ( $80\text{ cal/g}$ ,  $335\text{ kJ/kg}$ ). Esta energía se ha invertido en modificar la estructura molecular.
8. Si en el estado definido en pto. 6, se procede al enfriamiento del sistema, el agua cede energía (calor) al pasar al estado sólido ( $80\text{ cal/g}$ ). SOLIDIFICACION. Aplicación: Riego por aspersion como defensa contra las heladas (Cítricos Valencia). La energía desprendida en la solidificación del agua ( $80\text{ cal/g}$ ) y fabricar hielo para la pista del palacio de Hielo de Viella (Lérida), se emplea para calentar el agua de una piscina climatizada construida en el mismo palacio (revista Baqueira-Beret 93-94).
9. Calentamiento del agua: BLACK,  $C_e = 1\text{ cal/g }^{\circ}\text{C}$ . La pendiente de la recta correspondiente al agua es la mitad de la pendiente de la recta correspondiente al hielo.

10. El proceso de calentamiento es reversible: si hubo que aportar energía para calentar el agua, esta energía se recupera al enfriarla. Aplicación: calefacción por agua caliente entre 60 °C y 30 °C.

Comentar variación de densidad en el calentamiento-enfriamiento del agua.

11. Al ser  $P=1$  atm, cuando  $T=100$  °C empieza a aparecer vapor.

12. A partir del instante anterior, si continúa el ensayo,  $\Delta T=0$ , Cambio de estado: EBULLICIÓN, que es una de las modalidades que adopta la vaporización<sup>5</sup> (p. 32, F.H. FORRESTER). Hay aporte de energía sin incremento de temperatura. Esta energía se ha invertido en modificar la estructura molecular.

13. Cuando se ha vaporizado todo el agua, el sistema -si es que se ha previsto el recipiente adecuado para recoger el vapor- se ha convertido en vapor de agua a 100 °C. Ha finalizado el cambio de fase.

14. El calor (energía) absorbido por el cambio de fase viene dado por  $\Delta Q=m \cdot C_{\text{vap}}$ . (540 cal/g, 2256 J/g).

15. Si en el estado definido en el punto 13, se retira la energía aportada se libera la misma cantidad de energía (540 cal/g) dando lugar a la CONDENSACION. Aplicación: calefacción por vapor. Calefacción por vapor: 540 kcal/kg de vapor frente a 30 kcal/(kg agua calefactada entre 30 °C y 60 °C). Calefacción vapor aporta 18 veces más calor que la calefacción por agua.

16. Calores latentes. Comparación de valores

En el curso 1994-1995 los cambios de fase fueron explicados con ayuda de un gráfico T-Q: en ordenadas se colocaban los calores suministrados en kcal.

### Cambios de fase en la superficie de estado del agua

La representación anterior no puede relacionarse directamente con la superficie de estado del agua, ya que en esta representación las variables implicadas son P, V y T y entre ellas no está el tiempo. Sin embargo, sí se podrían

representar los cambios de volumen experimentados por la masa del sistema.

MOSTRAR TRANSPARENCIA 349 (ESQUEMA INFERIOR IZQUIERDO)

1. Presión: 1 atmósfera; *situar en superficie de estado.*
2. Incremento de volumen del hielo entre  $-10^{\circ}\text{C}$  y  $0^{\circ}\text{C}$
3. Disminución de volumen del hielo en la fusión: aumento en la solidificación. *equilibrio de fases.*  
 $\rho_{\text{hielo}}=0,92\text{kg/m}^3$  (SEARS Univ., 9ªed. P. 428).

$$m = V_{\text{hielo},0^{\circ}\text{C}} \cdot \rho_{\text{hielo},0^{\circ}\text{C}} = V_{\text{agua},0^{\circ}\text{C}} \cdot \rho_{\text{agua},0^{\circ}\text{C}} \quad ; \quad \frac{V_{\text{hielo},0^{\circ}\text{C}}}{V_{\text{agua},0^{\circ}\text{C}}} = \frac{\rho_{\text{agua},0^{\circ}\text{C}}}{\rho_{\text{hielo},0^{\circ}\text{C}}} = \frac{1}{0,92} = 1,087$$

El incremento de volumen es del  $(1,087-1,000) \cdot 100=8,7\%$

4. Incremento de volumen del agua entre  $0^{\circ}\text{C}$  y  $100^{\circ}\text{C}$ .
5. Incremento de volumen al pasar de agua a  $100^{\circ}\text{C}$  a vapor a  $100^{\circ}\text{C}$ .  $\rho_{\text{agua},100^{\circ}\text{C}}= 958,4 \text{ kg/m}^3$  (MATAIX, p. 17)  
*Equilibrio de fases.*

$$m = V_{\text{agua},100^{\circ}\text{C}} \cdot \rho_{\text{agua},100^{\circ}\text{C}} = V_{\text{vapor},100^{\circ}\text{C}} \cdot \rho_{\text{vapor},100^{\circ}\text{C}} \quad ; \quad \frac{V_{\text{vapor},100^{\circ}\text{C}}}{V_{\text{agua},100^{\circ}\text{C}}} = \frac{\rho_{\text{agua},100^{\circ}\text{C}}}{\rho_{\text{vapor},100^{\circ}\text{C}}} = \frac{958,4}{0,588} = 1630$$

El incremento de volumen es de  $(1.630-1) \cdot 100=162.900\%$

6. Para presión distinta de 1 atm habría que cortar por planos paralelos al V-T. Se puede ver así que al aumentar P:  
 \* disminuye la T de fusión-solidificación.  
 \* aumenta la T de ebullición-condensación.

7. Aplicaciones de la variación de  $T_{\text{fus-sol}}$  con P:  
 El rehielo: el avance de los glaciares alpinos, fusión de un bloque de hielo bajo presión: rehielo. Patinaje: importancia de la superficie de fusión, MICHAEL FARADAY, 1842 (TPT, Nov. 1992, p.495, *The role of surface melting in ice skating*).

8. Aplicaciones de la variación de  $T_{\text{ebu}}$  con P:  
 Al aumentar la presión aumenta la temperatura de ebullición del agua: olla a presión. Al disminuir la presión disminuye la temperatura de ebullición: cocer un huevo en el Teide (3.718 m), 3.482 m (Mulhacén, Parque Nacional de Sierra Nevada), 3.478 m (Mulhacén, Mapa de carreteras), 3.404 m (Aneto, Parque Natural de

Posets-Maladeta, AMBIENTA, febrero 2002), 3.392 m (Veleta, Parque Nacional de Sierra Nevada), 3.366 (Alcazaba, Parque Nacional de Sierra Nevada, Separata de AMBIENTA, febrero 2.002).

$$P = P_0 - \frac{1 \text{ mmHg}}{11 \text{ m}} z(m) = 760 - \frac{1}{11}(3392) = 452 \text{ mmHg}$$

(En la ecuación anterior no se ha podido separar la unidad del valor de la magnitud).

Para 452 mmHg, la ecuación de la curva de vaporización proporciona que la temperatura de ebullición del agua es 86,1°C.

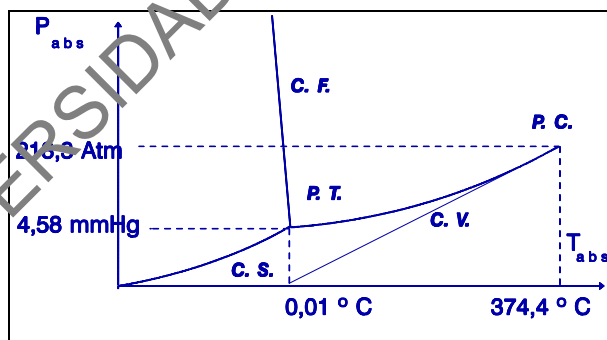
Para la altitud del Teide: 3.718m, la presión ambiental media es de 422 mmHg, la temperatura es 84,3°C. Esta temperatura también ha sido obtenida por interpolación lineal en la transparencia.

TRANSPARENCIA DE LA TABLA DE PRESIONES DE VAPOR.

- La variación de la T de cambio de fase con la P se ve fácilmente en el diagrama de Fases del H<sub>2</sub>O: identificar la transformación P=1 atm, mostrar variación de la T con P para los cambios de fase.

Diagrama de fases del H<sub>2</sub>O

- Puntos y líneas básicas: Punto triple, Punto crítico, curva de fusión, curva de vaporización y curva de sublimación.



- Curva de fusión:
  - \* Condiciones de P y T a las que se produce la fusión o la solidificación.
  - \* Condiciones de P y T a las que el agua está en equilibrio con la fase sólida.
  - \* La temperatura de fusión disminuye con la P. (Rehielo)

(En la figura anterior, el símbolo de la atmósfera es

"atm").

<http://www.nytimes.com>, Why is ice slippery?

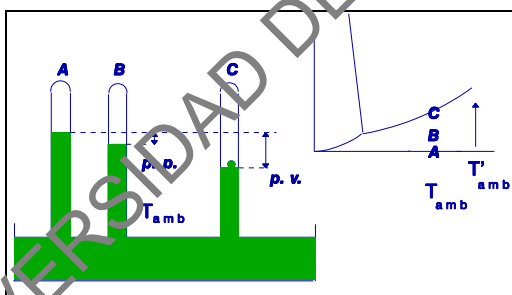
White, 1992, pp. 495-497). (Wettlaufer, 2001).

### 3. Curva de vaporización:

Condiciones de P y T a las que se produce la vaporización o la condensación. id. id. a las que el agua está en equilibrio con su vapor, vapor saturado. La presión a la que, a cada temperatura, sucede ésto, se denomina PRESION O TENSION DE VAPOR, PRESION DEL VAPOR SATURADO (Giancoli, 432).

En la isla de la Toja (Pontevedra) se aplica, desde finales del siglo XIX, la vaporización del agua de los manantiales que en ella brotan para extraer las sales minerales. Así, el agua mineral a 80°C se hace pasar a través del denominado primer evaporador, en el que se causa un vacío de 300 mmHg, con lo que tiene lugar la vaporización del agua y una primera concentración de ésta. A continuación, el agua se pasa a un segundo evaporador en el que se hace un vacío de 720 mmHg, con lo que se logra que el agua se vaporice a 50°C. "El arte y la ciencia trabajando en concierto han realizado en la Toja la obra de la naturaleza, Santiago Ramón y Cajal". 25 de mayo de 2002, celebración del XXV aniversario de la creación de la Demarcación de Castilla y León del Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

La vaporización consiste en el cambio de fase de líquido a vapor. Puede hablarse de tres formas de vaporización del agua: Vaporización en el vacío, (Barómetros) y vaporización en atmósfera real, que reviste dos modalidades: ebullición y evaporación.



Experiencia de los barómetros de mercurio para mostrar el equilibrio de las fases y el efecto de la temperatura sobre la presión de vapor (Pople, 1993, p. 156).

(TRANSPARENCIA) Tabla de presiones de vapor del agua. Interpolación lineal.

Ecuación de la curva de vaporización



con T en grados Celsius y  
P en mmHg. (TPT, Oct. 92).

$$\log P_{H_2O} = 8.07270 - \frac{1732,332}{T + 233,684}$$

$$\log p = 8,40 - \frac{2050}{T} \quad \text{Frmula de Rankine (Palacios,349)}$$

En la que T es temperatura absoluta.

Ebullición:

burbujas de aire disuelto en el agua (imperceptibles a simple vista), aire aprisionado en los recipientes. Estas burbujas están saturadas del vapor del líquido en el que están retenidas, por tanto, la presión del vapor en su interior ha de ser la presión de vapor.

Al aumentar la temperatura del agua del recipiente, teniendo en cuenta la forma de la curva de vaporización del H<sub>2</sub>O, aumenta la presión de vapor de la burbuja. Cuando la presión de vapor se iguala a la presión ambiental más la presión que ejerza el agua situada encima<sup>6</sup> (p. 275 HEWITT,1997) la burbuja escapa del líquido.

Ebullición es un fenómeno generalizado en toda la masa del líquido.

Energía: 540 cal/g.

*Dado que, a cada temperatura, la ebullición requiere que la presión sea igual a la presión de vapor, puede decirse que la ebullición se produce cuando la presión de vapor del líquido se iguala a la presión atmosférica. (VELETA).*

El fundamento de la olla a presión reside en que la presurización de la olla (aprox. 2 atm) eleva la temperatura de ebullición del agua a unos 120 °C (Pople, p. 156).

Evaporación

Evaporación es el paso de un líquido a vapor en el seno del aire y a cualquier temperatura (PALACIOS, p. 338).

La masa de agua que se evapora por unidad de tiempo (M) o velocidad de evaporación, depende de la diferencia entre la presión de vapor a la T ambiente y la presión parcial del vapor, de la superficie S de líquido expuesta, de la presión ambiental y de una constante C.

$$M = \frac{C \cdot S}{P_{amb}} [p_{vap}(T_{amb}) - p_p]$$

La temperatura influye en el incremento que experimenta la presión de vapor. Por otro lado la Energía cinética molecular aumenta con T (POPLE).

Otra forma de dependencia de S: M depende de la superficie específica. Eso explica la vaporización que tiene lugar en el carburador por efecto Venturi, la evaporación del sudor de la piel, la evaporación del agua que rezuma por un botijo (*earthenware pitcher with spout and handle*, "La ecuación del botijo", EL PAÍS, DIARIO DE LEÓN)

En C se recoge, por ejemplo, la influencia del viento (POPLE)

#### 4. Curva de sublimación:

Condiciones P-T para la sublimación: hielo-vapor y viceversa. El CO<sub>2</sub> se sublima en condiciones ambientales ya que su punto triple corresponde a una presión de 5.1 atm y a una temperatura de -56.1°C.

\*Condiciones P-T para equilibrio vapor-hielo

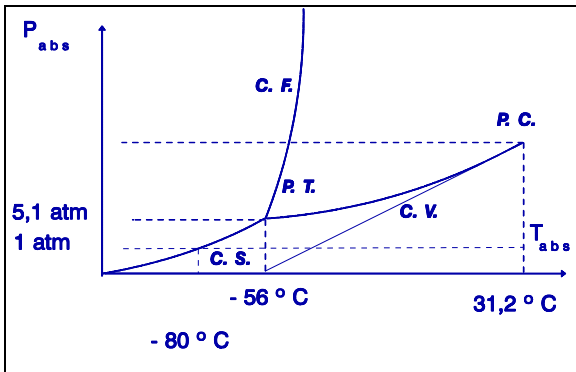
\*Comentar posición relativa curva vaporización-sublimación

\*Calor o energía de sublimación: aprox.  $C_F + C_V$ .  
a 0°C y 1000 mbar 677 cal/g (JANSA GUARDIOLA, 266).

Las botellas de CO<sub>2</sub> se preparan a la presión de vapor del gas a la temperatura ambiente (aprox. 56 atm)

#### 5. Punto crítico.

\*Definido por  $P_{crit.}$  y  $T_{crit.}$ , para el agua estos valores son: 218.3 atm y 374.4 °C.



\*Por debajo de  $T_{crit.}$  es posible licuar un gas por presurización, mientras que por encima de esta temperatura es imposible.

\*El valor de la  $T_{crit.}$  decide el procedimiento de licuación de los gases a la  $T$  del ambiente, así:  
 Butano,  $T_{crit.} = 152\text{ }^{\circ}\text{C}$ , presurizar o enfriar

Metano (gas natural -GN-),  $T_{crit.} = -83\text{ }^{\circ}\text{C}$ , enfriar hasta alcanzar

temperaturas inferiores a ésta y después presurizar. El gas natural se enfría a  $-163\text{ }^{\circ}\text{C}$  para licuarlo y luego transportarlo en los buques metaneros. El volumen de GNL que proporciona la misma potencia calorífica que el GN es 600 veces menor (Expositor de Gas Natural, S.A., en el Museo de la Ciudad, Madrid, domingo, 12 de agosto de 2001).

El tener que enfriar primero para poder presurizar después y licuar finalmente, explica por qué fracasaron los intentos de licuar por presurización gases como el oxígeno ( $T_{crit.} = -119\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) nitrógeno ( $T_{crit.} = -147\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), hidrógeno ( $T_{crit.} = -240\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) y helio ( $T_{crit.} = -269\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $4,2\text{ K}$ , Mundo Científico, n°139, p. 818).

\*Se denomina, según ANDREWS (PALACIOS, 334), (TIPLER, 628) vapor cuando su temperatura es inferior a la  $T_{crit.}$  y gas en caso contrario. PALACIOS, 334 dice que se denomina vapor a los cuerpos en estado gaseoso, procedentes de la ebullición o evaporación de los líquidos que a la presión atmosférica hierven a temperaturas superiores a la ordinaria.

### CALOR ESPECÍFICO

Sustancia	$C_e$ másico (cal/g $^{\circ}\text{C}$ )	$C_e$ molar (cal/mol $^{\circ}\text{C}$ )	Referencia
-----------	---	--	------------

Arena	0,2	-	Jiménez Salas
-------	-----	---	---------------

Arcilla	0,22	-	Jiménez Salas
---------	------	---	---------------

Aluminio	0,22	5,94	Sears, Zemansky y Young
----------	------	------	-------------------------

Cap. VII: Termodinámica. Lección 3: Calorimetría

<b>Cobre</b>	<b>0,093</b>	<b>5,90</b>	<b>Sears, Zemansky y Young</b>
<b>Plata</b>	<b>0,056</b>	<b>6,04</b>	<b>Sears, Zemansky y Young</b>
<b>Agua</b>	<b>1</b>	<b>-</b>	<b>Giancoli (15°C)</b>
<b>Madera</b>	<b>0,4</b>	<b>-</b>	<b>Giancoli</b>
<b>Hielo</b>	<b>0,50</b>	<b>-</b>	<b>Giancoli (-5 °C)</b>
<b>Cuerpo humano</b>	<b>0,83</b>	<b>-</b>	<b>Giancoli</b>
<b>Hormigón</b>	<b>0,19</b>	<b>-</b>	<b>Pople</b>

$$M_{Al} = 27 \text{ g/mol}, \quad M_{Ag} = 108 \text{ g/mol}, \quad M_{Cu} = 63,5 \text{ g/mol}$$

BIBLIOGRAFÍA

1. Carnot, Sadi, "Reflexiones sobre la potencia motriz del fuego", Alianza Editorial, S.A., Madrid, 1987.
2. Fernández Pujal
3. Tipler, Paul A., "Física, Tomo I", 2ª edición, Editorial Reverté, S.A., Barcelona, 1985.
4. Lleó Morilla, Atanasio, "Física para ingenieros", Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 2001.
5. Forrester, Frank H., "1001 questions answered about the wheather", Dover Publications, Inc, New York, 1981.
6. Hewitt, Paul, G., "Conceptual Physics, 7 th edition, HarperCollins College Publishers, New York, 1993.
7. Arnaiz Atares, Pedro V. et al., "Diez temas sobre ahorro de energía en agricultura", Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, MAPA, Madrid, 1983.
8. Baqueira Beret, S.A., "Revista temporada 93/94", Fórmula Prensa, Barcelona, 1993.
9. Sears, F.W., Zemansky, M.W., Young, H.D. y Freedman, Roger A., "Física universitaria", 9ª ed., Addison Wesley Longman de

Cap. VII: Termodinámica. Lección 3: Calorimetría

México, S.A. de C.V., México, 1998.

10. Mataix, C., "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas", 2ª ed., Ediciones del Castillo, S.A., Madrid, 1986.

11. White, James M., "The role of Surface melting in ice skating", *The Physics Teacher*, Vol. 30, 1992.

12. Ministerio de Medio Ambiente, "Sierra Nevada, el parque blanco", Separata de la revista *Ambienta*, Febrero 2002, Madrid.

13. Wettlaufer, J.S., "Surface Melting and Ice Skating", *The Physics Teacher*, Vol. 39, 2001.

14. Giancoli, Douglas, C., "Physics for Scientists and Engineers", Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall cop. 1988.

15. Pople, S., "Expaining Physics", 2<sup>nd</sup> Edition, 4<sup>th</sup> reprinted, 7<sup>th</sup> republication, Oxford University Press, 1993.

16. Brizuela, Graziela y Alfredo, Juan, "An easy method for measuring CO<sub>2</sub> molecular weight", *The Physics Teacher*, Vol. 30, 1992.

17. Palacios, Julio, Física General, Espasa Calpe, S.A., Madrid, 1965.

18. Pinto, Gabriel y Zubizarreta, José Ignacio, "La ecuación del botijo", miércoles, 24 de agosto de 1994, EL PAÍS.

19. Pinto, Gabriel y Zubizarreta, José Ignacio, "Hallan la formula del enfriamiento del agua dentro de los botijos", sección Coyanza Bajo Esla dedicada al museo de "Torral de los Guzmanes", jueves, 6 de enero de 2000, DIARIO DE LEÓN.

20. Jansa Guardiola, José María, "Tratado de Meteorología Teórica", Sección de Publicaciones del Instituto Nacional de Meteorología, Madrid, 1985.

21. *Mundo Científico*, nº139, p. 818