

Una medida de la presión atmosférica sin barómetro

Santiago Velasco, Antonio González, Francisco L. Román

A very simple method for measuring the atmospheric pressure is described. The method is based on the isothermal compression of a given amount of air. The only theoretical expressions involved are Boyle's Law and the pressure exerted by a liquid column. A modification of the method devised to improve its sensitivity is also proposed.

1. Introducción

La presión atmosférica en un punto de la corteza terrestre es la fuerza por unidad de superficie que, debido a su peso, ejerce la atmósfera sobre dicho punto. A nivel del mar esta presión es aproximadamente de 1013 hPa (hectopascal; 1 hPa = 100 N/m²), disminuyendo con la altura. La presión atmosférica se mide con el *barómetro*. El primer barómetro fue inventado por Evangelista Torricelli a finales de la primera mitad del siglo XVII, y con él se medía la presión atmosférica a partir de la altura de una columna de mercurio en un tubo de vidrio cerrado por un extremo e invertido sobre una cubeta de mercurio (barómetro de mercurio). En los laboratorios actuales se utilizan mejoras del barómetro de Torricelli, tales como el barómetro de Fortin, en el que se puede controlar el nivel de mercurio en la cubeta y efectuar una lectura más precisa del nivel de mercurio en el tubo. Mucho más económicos y manejables que los de mercurio, aunque menos precisos, son los barómetros aneroides o metálicos, muy utilizados para la previsión del tiempo atmosférico. Algunos de estos barómetros están basados en la deformación que los cambios de presión producen en un tubo metálico curvo y cerrado (tubo de Bourdon), mientras que otros están basados en la flexión que los cambios de presión producen en las paredes de una caja metálica (cápsula de Vidie). En los últimos años han aparecido barómetros electrónicos basados en el uso de sensores cuyas propiedades eléctricas cambian con la presión, como pueden ser elementos piezorresistivos (usualmente un diafragma de silicio) o piezoeléctricos (cuarzo, materiales cerámicos), incluidos en un circuito integrado y cuya lectura se efectúa de forma digital presentando, además, la ventaja de poder ser conectados a un ordenador.

Teniendo en cuenta el funcionamiento de algunos de estos barómetros estándar, se pueden construir dispositivos sencillos que permiten apreciar los cambios

de presión atmosférica. Por ejemplo, se puede observar el nivel de agua en una botella de plástico invertida sobre un plato con agua o la deformación de una membrana elástica colocada en la boca de una botella [1]. Pero existen también otros métodos sencillos para medir la presión atmosférica que no están basados en el funcionamiento de los barómetros estándar. Algunos de estos métodos [2], [3] hacen uso de la ley de Boyle para los cambios isotermos de volumen de los gases ideales. En este trabajo proponemos un método basado en esta ley que se puede utilizar para medir de forma aproximada la presión atmosférica y que por su gran sencillez puede resultar adecuado para los cursos de Física de bachillerato. Además de mostrar y discutir brevemente su fundamento físico (que se puede encontrar fácilmente en la literatura), se pretende también discutir hasta qué punto este método ofrece una medida aceptable de la presión atmosférica, de forma que no sólo proporcione un valor próximo al valor correcto sino que también permita apreciar los cambios de la presión atmosférica en un lugar. En esta línea, se propone una modificación del dispositivo utilizado con objeto de aumentar apreciablemente su *sensibilidad*, pero con el inconveniente de aumentar la complejidad de la medida. Los métodos propuestos pueden también ser interesantes para discutir conceptos de cálculo de errores.

2. Descripción del método

Considérese un tubo, de longitud L y diámetro interior d , cerrado por uno de sus extremos y construido de un material rígido y transparente (por ejemplo, metacrilato o vidrio). Se introduce verticalmente el tubo por su extremo abierto en un recipiente de paredes transparentes con agua hasta que ésta cubra totalmente el tubo. A medida que el tubo va introduciéndose en el agua, el aire en su interior se va comprimiendo de forma que al final del proceso el agua ha ascendido por el tubo hasta una altura x . En la fig. 1 se pre-

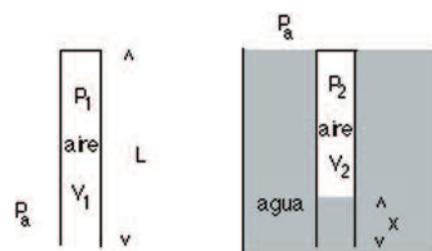


Figura 1. Esquema experimental del primer dispositivo (tubos A y B). El tubo está cerrado por el extremo superior y abierto por el extremo inferior.

senta un esquema del proceso. Inicialmente el aire ocupa un volumen $V_1 = AL$, siendo A la sección recta del tubo, a una presión igual a la atmosférica $P_1 = P_a$. En el estado final el aire ocupa un volumen $V_2 = A(L-x)$ a una presión $P_2 = P_a + \rho g(L-x)$, siendo ρ la densidad del agua y g la aceleración de la gravedad, es decir una presión igual a la atmosférica más la presión debida a una columna de agua de altura $L-x$. Suponiendo que el aire se comporta como un gas ideal y que el proceso tiene lugar a temperatura constante, la ley de Boyle (en un proceso isotermo el producto de la presión por el volumen de un gas ideal permanece constante) permite escribir $P_1 V_1 = P_2 V_2$, es decir,

$$P_a A L = [P_a + \rho g(L-x)] A (L-x) \quad (1)$$

de donde se obtiene fácilmente la expresión

$$P_a = \rho g \frac{(L-x)^2}{x}, \quad (2)$$

que, conocida L , permite calcular P_a a partir de la medida de x y de los valores $\rho = 998,21 \text{ kg/m}^3$ y $g = 9,80 \text{ m/s}^2$ [4]. Es de destacar que en el análisis anterior no se han tenido en cuenta los efectos de capilaridad en el tubo, para lo cual conviene utilizar tubos con un diámetro d lo suficientemente grande como para que el ascenso capilar sea despreciable frente al valor medido de x . El ascenso capilar puede determinarse haciendo uso de la teoría de tensión superficial [5], lo que queda fuera del objetivo de este trabajo.

Sin embargo, es posible valorar dicho ascenso de forma sencilla. Para ello, antes de tapar el tubo por uno de sus extremos se le introduce verticalmente en agua y se mide el ascenso capilar. Por ejemplo, con un tubo de vidrio de 0,6 cm de diámetro interno el ascenso capilar es de aproximadamente 2,5 mm, mientras que con un tubo de 1 cm de diámetro dicho ascenso es ligeramente inferior a 1 mm. Con tubos de metacrilato de diámetro superior a 1 cm el ascenso capilar es también inferior a 1 mm, es decir, inferior a la unidad más pequeña de la cinta métrica utilizada para medir x . Por otra parte, de acuerdo con la ec. (2), para una presión atmosférica P_a dada, x depende exclusivamente de la longitud L del tubo, lo que permite elegir L si se quiere obtener valores de x superiores a uno dado. Por ejemplo, para $P_a = 925$ mbar, una presión atmosférica típica en Salamanca, hay que utilizar tubos con $L \geq 32$ cm para obtener valores de x mayores que 1 cm, de modo que x sería entonces más de 10 veces mayor que el ascenso capilar para tubos con $d > 1$ cm. En todo caso, si no se dispone de tubos con diámetro o longitud suficientes como para desprestigiar el ascenso capilar, hay que medir previamente (antes de tapar el tubo por uno de sus extremos) dicho ascenso para restárselo a la medida de x .

Se ha efectuado una primera medida con un tubo de metacrilato (tubo A de diámetro interior $d = 1,6$ cm y longitud $L_A = 39,5$ cm medida con una regla milimetrada. La distancia x se ha medido con un trozo de cinta métrica milimetrada, de aproximadamente 5 cm de longitud, situada en el extremo abierto del tubo, obteniéndose el valor $x_A = 1,5$ cm. Haciendo uso de la ec. (2), el tubo A proporciona un valor para la presión atmosférica de $P_{a,A} = 941,8$ hPa.

Se trata ahora de evaluar la *calidad* de la medida efectuada. Esta evaluación se basa en los siguientes puntos: comparación con la medida obtenida con un barómetro estándar, determinación de los errores absoluto y relativo asociados a la medida y valoración de la sensibilidad del dispositivo.

a) Comparación

El valor de la presión atmosférica medido en el laboratorio con un barómetro de mercurio fue $P_a = 691$ mmHg = 921 hPa (la presión atmosférica en el observatorio de Matacán [6] era 923,9 hPa). Si se toma como valor *verdadero* de P_a el

valor proporcionado por el barómetro de mercurio, el resultado obtenido supone una desviación de un 2,3% respecto de este valor.

b) Cálculo de errores [7]

El resultado obtenido es una medida indirecta a partir de las medidas de L y de x . Por tanto, el error absoluto ΔP_a se debe calcular por propagación de errores en la ec. (2) considerando P_a como función de L y de x (se desprecian los errores en los valores de ρ y g dados anteriormente), obteniéndose [8]

$$\Delta P_a = (\Delta_L^2 P_a + \Delta_x^2 P_a)^{1/2}, \quad (3)$$

donde

$$\Delta_L P_a = \left| \left(\frac{\partial P_a}{\partial L} \right)_x \right| \Delta L = \frac{2P_a}{L-x} \Delta L, \quad (4)$$

$$\Delta_x P_a = \left| \left(\frac{\partial P_a}{\partial x} \right)_L \right| \Delta x = P_a \left(\frac{2}{L-x} + \frac{1}{x} \right) \Delta x, \quad (5)$$

son las contribuciones al error en la medida de P_a debidas a las incertidumbres ΔL y Δx asociadas a las medidas de L y de x , respectivamente. Si se considera para ΔL y Δx el denominado *error de escala* (la mitad de la unidad más pequeña en el instrumento de medida), se tiene que $\Delta L = \Delta x = 0,05$ cm, y las ecs. (4) y (5) conducen, respectivamente, a $\Delta_L P_{a,A} = 2,5$ hPa y $\Delta_x P_{a,A} = 34,0$ hPa, cuya comparación permite apreciar que la principal fuente de error radica en la medida de x . Con estos valores para $\Delta_L P_a$ y $\Delta_x P_a$, haciendo uso de la ec. (3) se obtiene $\Delta P_{a,A} = 34,0$ hPa. Por tanto, el valor medido con el tubo A es $P_{a,A} = 940 \pm 30$ hPa [9].

Cuanto menor es la incertidumbre en una medida mayor es su precisión. Una manera de valorar esta precisión es mediante el error relativo $\Delta_r P_a(\%) = 100 \times \Delta P_a / P_a$. Se tiene entonces que $\Delta_r P_{a,A} = 3,2\%$. Naturalmente, cuanto menor sea el error relativo más aceptable es la medición efectuada. En general, valores inferiores a un 5% (o incluso a un 10%) para errores relativos son comunes en laboratorios docentes. Por tanto, en este caso, la medida efectuada aunque de poca precisión se podría considerar como aceptable.

c) Sensibilidad

De forma general, un aparato de medida es tanto más sensible cuanto menor es el cambio que puede detectar de la magnitud que mide. En el caso de

medidas indirectas, es usual cuantificar esta sensibilidad por un coeficiente que exprese el cociente entre los cambios de las magnitudes directa e indirecta. De esta manera, teniendo en cuenta la ec. (2), en el caso que nos ocupa, una medida de dicha sensibilidad viene dada por el coeficiente

$$\alpha \equiv \left(\frac{\partial x}{\partial P_a} \right)_L = - \frac{(L-x)x}{(L+x)P_a}, \quad (6)$$

donde el signo negativo indica que un aumento (disminución) de la presión atmosférica implica una disminución (aumento) en la longitud x de la columna de agua en el tubo. En particular, de acuerdo con los resultados obtenidos para el tubo A, la ec. (6) permite obtener el valor $\alpha_A = -1,5 \times 10^{-2}$ mm/hPa. Puesto que el menor cambio que se puede apreciar en la longitud x es de 1 mm, este resultado indica que el tubo A no detecta cambios en la presión atmosférica menores de 67 hPa (umbral de sensibilidad). Estos cambios se producirían si nos trasladásemos desde Salamanca (a una altitud aproximada de 800 m) al nivel del mar o si subiésemos a una montaña con más de 1500 m de altura. Sin embargo, no permitiría apreciar cambios en la presión atmosférica de un mismo lugar (como mucho del orden de un 4%; por ejemplo, en el año 2002, la máxima presión en Salamanca fue de 942,6 hPa y la mínima de 899,9 hPa, con un valor medio de 927,2 hPa [10]). En otras palabras, si se utilizase este tubo para medir la presión atmosférica en un mismo lugar pero en diferentes días se obtendría prácticamente el mismo resultado y, en consecuencia, no permitiría apreciar los cambios meteorológicos.

Parece claro que la poca eficacia del tubo A para medir los cambios de la presión atmosférica proviene de que el valor medido para x es muy pequeño. De la ec. (2) se deduce fácilmente que un aumento en el valor medido de x requiere un aumento de la longitud L del tubo utilizado. Con objeto de apreciar como mejora con este aumento la *calidad* del dispositivo, se ha efectuado otra medida con un segundo tubo (tubo B) del mismo diámetro que el tubo A pero con una longitud de $L_B = 69,9$ cm. Nuevamente, la distancia x se mide con un trozo de cinta métrica milimetrada, de aproximadamente 10 cm de longitud, situada en el extremo abierto del tubo. El resultado obtenido ha sido $x_B = 4,5$ cm. Haciendo uso de la ec. (2), el tubo B proporciona un valor para la presión atmosférica de $P_{a,B} = 929,8$ hPa, lo

que supone una desviación de aproximadamente un 1,0% respecto del valor proporcionado por el barómetro de mercurio.

Pero, como en el caso del tubo A, lo que importa ahora es determinar el error asociado a esta medida y la sensibilidad del nuevo tubo. Para el tubo B, las incertidumbres asociadas a las medidas de L y de x son las mismas que para el tubo A, por lo que una aplicación directa de las ecs. (4) y (5) conduce a $\Delta_L P_{a,B} = 1,4$ hPa y $\Delta_x P_{a,B} = 11,8$ hPa. Ambos errores disminuyen sensiblemente respecto de los del tubo A, sobre todo el asociado a la medida de x . Con estos valores para $\Delta_L P_a$ y $\Delta_x P_a$, haciendo uso de la ec. (3) se obtiene $\Delta P_{a,A} = 11,9$ hPa. Por tanto, el valor medido para la presión atmosférica con el tubo B es $P_{a,B} = 930 \pm 12$ hPa, lo que supone un error relativo de $\Delta_r P_{a,B} = 1,3\%$, que es notablemente inferior al del tubo A. En cuanto al coeficiente de sensibilidad, a partir de la ec. (6) se obtiene ahora el valor $\alpha_B = -4,3 \times 10^{-2}$ mm/hPa, es decir, en valor absoluto, prácticamente 3 veces mayor que el valor del tubo A. Este resultado indica que el umbral de sensibilidad del tubo B es de aproximadamente 23 hPa. Estos cambios son todavía grandes para notar cambios no demasiado importantes en la presión atmosférica pero indica un posible camino para mejorar la eficacia del tubo como medidor de la misma. Los diferentes resultados para los tubos A y B se presentan en el Cuadro 1 con objeto de facilitar su comparación.

Nótese que el experimento debe realizarse en condiciones isotermas, de modo que hay que garantizar que el agua y los tubos que se utilicen se encuentran a la misma temperatura que el lugar donde se realiza el experimento. Por ejemplo, no debe utilizarse agua recién cogida del grifo, que suele estar más fría que el aire del laboratorio, ya que se daría una contracción adicional del aire en el tubo cuando éste se introduce en el agua. Tal contracción conduciría a una medida de x mayor que la que se hubiera obtenido en condiciones estrictamente isotermas y, por tanto, a una sobreestimación de la presión atmosférica.

3. Rediseño del dispositivo

Acabamos de ver cómo un aumento de la longitud L del tubo implica un aumento de la longitud x de la columna de agua en el interior del mismo. Pero tubos cada vez más largos requieren recipientes de agua con mayor profundidad y además se manejan peor. Por tanto, la

pregunta que surge es: ¿cómo habría que modificar el dispositivo para aumentar x pero sin aumentar L ? La clave la proporciona la ley de Boyle ($P_1 V_1 = P_2 V_2$) que permite calcular el cambio de volumen en la compresión isoterma mediante la expresión

$$\Delta V = V_1 - V_2 = \left(1 - \frac{P_1}{P_2}\right) V_1. \quad (7)$$

Puesto que $\Delta V = \Delta x$, se llega entonces a la conclusión de que para aumentar x conviene aumentar el volumen inicial V_1 del aire que se comprime. Por tanto, hay que aumentar V_1 pero sin aumentar la longitud L del tubo. Con este objeto se propone ahora un dispositivo que consiste en un tubo abierto por ambos extremos, uno de los cuales se conecta, mediante un tapón de goma perforado, a un matraz de vidrio de volumen mucho mayor que el volumen propio del tubo (en caso de no disponer de un matraz de vidrio se puede utilizar una botella de vidrio o incluso una botella de plástico rígido). Un esquema del dispositivo se muestra en la fig. 2.

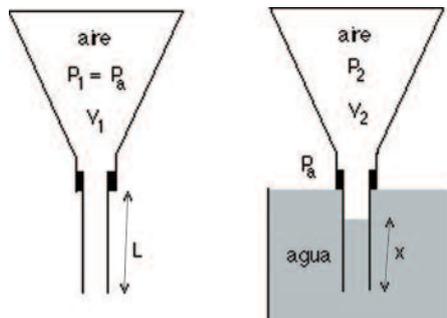


Figura 2. Esquema experimental del segundo dispositivo (tubo C).

Como en el caso anterior, se introduce verticalmente el extremo libre del tubo en un recipiente con agua hasta una profundidad L (justo hasta el tapón). Al igual que ocurría con el primer dispositivo, a medida que el tubo se va introduciendo en el agua, el aire en su interior se va comprimiendo de forma que al final del proceso el agua ha ascendido por el tubo hasta una altura x , siendo ahora esta altura notablemente mayor que en los casos anteriores. En el estado inicial, el aire ocupa un volumen V_1 a una presión igual a la atmosférica $P_1 = P_a$. En el estado final el aire ocupa un volumen $V_2 = (V_1 - \Delta x)$, siendo Δ la sección recta del tubo, a una presión $P_2 = P_a + \rho g(L - x)$. Suponiendo nuevamente que el aire se comporta como un gas ideal y su compresión

tiene lugar a temperatura constante, la ley de Boyle permite escribir

$$P_a V_1 = [P_a + \rho g(L - x)](V_1 - \Delta x), \quad (8)$$

de donde, teniendo en cuenta que $\Delta = \pi d^2/4$, siendo d el diámetro del tubo, se obtiene

$$P_a = \rho g(L - x) \left(\frac{4V_1}{\pi d^2 x} - 1 \right), \quad (9)$$

que, conocidos los valores de L , V_1 y d , permite calcular P_a a partir de la medida de x . Como en los casos anteriores, también se han despreciado efectos de capilaridad en el tubo. El valor de V_1 se puede determinar mediante la diferencia entre el peso del dispositivo lleno de agua y vacío, mientras que el diámetro d del tubo se mide con un calibre.

Se ha efectuado una medida con un dispositivo construido con un matraz de vidrio y un tubo de metacrilato (tubo C) del mismo diámetro que los anteriores y longitud $L_C = 39,2$ cm, siendo el volumen inicial de aire $V_{1,C} = 1265,2$ cm³. En el exterior del tubo se ha sujetado un trozo de cinta métrica de su misma longitud. Se ha introducido el dispositivo verticalmente en agua obteniéndose para la longitud de la columna de agua el valor $x_C = 15,5$ cm. Haciendo uso de la ec. (9) se llega a un valor para la presión atmosférica de $P_{a,C} = 918,1$ hPa, que supone una desviación de un 0,3% respecto del valor medido con el barómetro de mercurio.

Con objeto de determinar la precisión del resultado obtenido se calcula su error absoluto por propagación de errores en la ec. (9). Considerando P_a como función de L , x , V_1 y d (se desprecian los errores en los valores de ρ y g), se obtiene:

$$\Delta P_a = (\Delta_L^2 P_a + \Delta_x^2 P_a + \Delta_{V_1}^2 P_a + \Delta_d^2 P_a)^{1/2}, \quad (10)$$

donde

$$\Delta_L P_a = \left| \left(\frac{\partial P_a}{\partial L} \right)_{x,V_1,d} \right| \Delta L = \rho g \left(\frac{4V_1}{\pi d^2 x} - 1 \right) \Delta L, \quad (11)$$

$$\Delta_x P_a = \left| \left(\frac{\partial P_a}{\partial x} \right)_{L,V_1,d} \right| \Delta x = \rho g \left(\frac{4V_1 L}{\pi d^2 x^2} - 1 \right), \quad (12)$$

$$\Delta_{V_1} P_a = \left| \left(\frac{\partial P_a}{\partial V_1} \right)_{x,L,d} \right| \Delta V_1 = \rho g \frac{4(L-x)}{\pi d^2 x} \Delta V_1, \quad (13)$$

$$\Delta_d P_a = \left| \left(\frac{\partial P_a}{\partial d} \right)_{x,L,V_1} \right| \Delta d = \rho g \frac{8(L-x)V_1}{\pi d^3 x} \Delta d \quad (14)$$

son las contribuciones al error en la medida de P_a debidas a las incertidumbres ΔL , Δx , ΔV_1 y Δd asociadas a las medidas de L , x , V_1 y d , respectivamente. Como en el caso anterior $\Delta L = \Delta x = 0,05$ cm. Se toma, además, $\Delta V_1 = 0,2$ cm³ y $\Delta d = 0,005$ cm (precisión del calibre). Las ecs. (11)-(14) conducen, entonces, a $\Delta_L P_{a,C} = 1,9$ hPa, $\Delta_x P_{a,C} = 5,0$ hPa, $\Delta_{V_1} P_{a,C} = 0,1$ hPa, y $\Delta_d P_{a,C} = 5,9$ hPa, respectivamente. Nótese que el error asociado a la medida de L es del mismo orden que el obtenido para el tubo B, mientras que el error asociado a la medida de x disminuye a menos de la mitad del obtenido para dicho tubo. Sin embargo, aparecen ahora dos nuevos errores asociados, respectivamente, a las medidas del volumen V_1 y del diámetro d del tubo. El error asociado a la medida de V_1 es prácticamente despreciable, pero la incertidumbre asociada a la medida de d es ahora comparable a la de x . Con estos valores para $\Delta_L P_a$, $\Delta_x P_a$, $\Delta_{V_1} P_a$ y $\Delta_d P_a$, haciendo uso de la ec. (10) se obtiene $\Delta P_{a,C} = 8,0$ hPa. Por tanto, la medida obtenida es $P_{a,C} = 918 \pm 8$ hPa, lo que supone un error relativo de $\Delta_r P_{a,C} = 0,9\%$, que es inferior al de los tubos A y B.

Teniendo en cuenta la ec. (9), la sensibilidad del dispositivo viene dada por el coeficiente

$$\alpha \equiv \left(\frac{\partial x}{\partial P_a} \right)_{L, V_1, d} = -\frac{1}{\rho g} \left(\frac{4V_1 L}{\pi d^2 x^2} - 1 \right)^{-1} \quad (15)$$

De acuerdo con los resultados obtenidos para el tubo C, la ec. (15) permite obtener el valor $\alpha_C = -10,0 \times 10^{-2}$ mm/hPa, lo que supone, en valor absoluto, prácticamente casi 7 veces mayor que la sensibilidad del tubo A y más del doble que la del tubo B. Este resultado indica que el umbral de sensibilidad del tubo C es de aproximadamente 10 hPa, que pueden ser suficientes para detectar cambios importantes en la presión atmosférica. Los resultados para el tubo C se muestran también en la tabla 1.

Es de destacar que la ganancia de sensibilidad del dispositivo C respecto de los tubos A y B ha tenido como precio la complicación del dispositivo: para los tubos A y B sólo se necesita la medida de x y L , mientras que para el tubo C son necesarias las medidas de x , L , V_1 y d . Esto supone la aparición de nuevas fuentes de error, que, como sucede en el caso de la medida de d , pueden ser importantes. Además, puesto que el dispositivo formado por el matraz y el tubo resulta un poco voluminoso, es aconsejable, para un mejor manejo del mismo, su sujeción a un soporte vertical. Con esto se evitará

también el efecto de las manos en la temperatura del aire en el interior del dispositivo, lo que podría influir notablemente en las medidas tomadas. En la fig. 3 se muestra una fotografía de los tubos A, B, y C utilizados en el experimento.



Figura 3. Fotografía de los tres tubos utilizados en el experimento.

4. Conclusiones

La presión atmosférica es un concepto básico en los cursos de iniciación a la Física, en los que también se suelen explicar los fundamentos de los aparatos con los que se mide (los barómetros). Pero esta medida se reduce a la lectura de un cierto valor numérico en una escala graduada o en un indicador digital. Por otra parte, es posible que algunos laboratorios no dispongan de barómetros. Por todo ello resulta conveniente la proposición de métodos alternativos simples y baratos que, aunque de forma aproximada, permitan medir la presión atmosférica. Con este objetivo, en este trabajo se ha presentado un método que hace uso de la ley de Boyle para la compresión isoterma de los gases ideales. Los conceptos que se usan y el nivel matemático que se

requiere nos parecen apropiados no solo para los cursos de Física de primer ciclo de universidad sino también para la enseñanza del bachillerato (salvo, quizás, la parte correspondiente al estudio de propagación de errores, debido al empleo de derivadas parciales) [11]. Básicamente, el material necesario es un tubo de metacrilato o de vidrio y trozos de una cinta métrica. Aunque el método parece proporcionar un valor de la presión atmosférica próximo al obtenido con un barómetro estándar, se pone de manifiesto su poca sensibilidad. Con objeto de aumentar esta sensibilidad se propone una modificación del dispositivo, consistente en aumentar considerablemente, con ayuda de un matraz de vidrio, el volumen inicial del aire que se va a comprimir. Sin embargo, esta variante, además de ser algo más delicada de manejar, introduce nuevas fuentes de error que pueden ser importantes. Todo ello proporciona un buen ejemplo de discusión de métodos y conceptos relativos al cálculo de errores.

Tabla 1. Datos para los diferentes dispositivos utilizados en el experimento de medida de la presión atmosférica P_a . Los símbolos se explican en el texto.

	A	B	C
L (cm)	39,5	69,9	39,2
d (cm)	1,6	1,6	1,6
V_1 (cm ³)	79,4	140,5	1265,2
x (cm)	1,5	4,5	15,5
P_a (hPa)	940	930	918
$\Delta_L P_a$ (hPa)	2,5	1,4	1,9
$\Delta_x P_a$ (hPa)	33,9	11,8	5,0
$\Delta_d P_a$ (hPa)	-	-	5,9
$\Delta_{V_1} P_a$ (hPa)	-	-	0,1
ΔP_a (hPa)	30	12	8
α (mm/hPa)	-0,015	-0,043	-0,100

Bibliografía

- [1] En Internet se puede encontrar información sobre diversos aspectos relacionados con el concepto de presión atmosférica y su medida. A modo de ejemplo, véase la dirección http://www.ideam.gov.co/ninos/at_ac01.htm.
- [2] VELASCO S., GONZÁLEZ A., ROMÁN F. L., Y WHITE J. A., "A simple method for measuring atmospheric pressure", *American Journal of Physics* 70 (2002) 1236.
- [3] En <http://www.ceciba.escuelaing.edu.co/lladino/presion/presion.htm> se describe un método para medir la presión atmosférica haciendo uso de un tubo abierto por los dos extremos.
- [4] El valor de la densidad del agua corresponde a una temperatura de 20°C (temperatura a la que se ha realizado el experimento) y se ha tomado de Zemansky M. W. y Dittman R. H., *Calor y Termodinámica* (McGraw-Hill, Madrid, 1984) 6ª edición, p. 255, tabla 9.3. El valor oficial de g en Salamanca es

$g = 980046,62 \text{ mGal}$ ($1 \text{ mGal} = 1 \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$). Es de notar que existen en los laboratorios docentes experimentos muy sencillos para medir ρ y g . A modo de ejemplo, véase Fuertes J. F. y Alonso M., "Medida de densidades: una sencilla práctica para la iniciación en la metodología experimental", *Revista de Enseñanza de la Física* **8** (1995) 51.

- [5] PELLICER J., MANZANARES J. A., Y MAFÉ S., "The physical description of elementary surface phenomena: Thermodynamics versus mechanics", *American Journal of Physics* **63** (1995) 542.
- [6] La medida ha sido efectuada a las 17:00 del día 2 de Junio de 2003, y la presión medida en el observatorio de Matacán se ha tomado de la página web del Instituto Nacional de Meteorología (www.inm.es). Entre el observatorio de Matacán y la Facultad de Ciencias de la Universidad de Salamanca existe un desnivel de aproximadamente 25 m, lo que explica la discrepancia entre la medida de nuestro barómetro de mercurio y el valor proporcionado por Matacán.
- [7] Es también interesante señalar las posibles fuentes de errores sistemáticos y accidenta-

les en este experimento. Si se utiliza un tubo estrecho, el principal error sistemático puede provenir del efecto de capilaridad. Este efecto tiende a aumentar el valor de la longitud x de la columna de agua. Los principales errores accidentales pueden surgir de una lectura incorrecta de x debida al menisco (cóncavo hacia arriba) de agua. Esta lectura se debe efectuar evitando el denominado *error de paralaje* (por no efectuar la medida observando perpendicularmente al tubo a la altura adecuada). Otros posibles errores accidentales pueden tener lugar si no se introduce correctamente el tubo en el agua y se escapa alguna burbuja de aire o si el agua se encuentra a diferente temperatura que la del ambiente. Los errores accidentales se pueden minimizar con un tratamiento estadístico a partir de la realización de varias medidas. Puesto que, como se verá más adelante, el dispositivo es poco sensible, aquí sólo presentamos los resultados de una medida única que, desde luego, se debe comprobar varias veces.

- [8] Véase, por ejemplo, Sánchez del Río C., *Análisis de errores* (Eudema, Madrid, 1989) págs. 36-37.
- [9] Es usual expresar el error con una cifra significativa, salvo que dicha cifra sea un 1 y la siguiente menor que 5 en cuyo caso se utilizan dos cifras significativas.
- [10] Datos proporcionados por el observatorio de Matacán (Salamanca).
- [11] La mayor parte de los conceptos aquí utilizados se estudian en el bachillerato. Véase, por ejemplo, Galindo A., Savirón J. M., Moreno A., Pastor J. M. y Benedí A., *Física y Química. 1º Bachillerato* (McGraw-Hill, Madrid, 1995) págs. 30-41, para conceptos relacionados con el cálculo de errores, y págs. 170-174, para el concepto de presión y la ley de Boyle.

Santiago Velasco y Antonio González

están en el Dpto. de Física Aplicada.

Facultad de Ciencias. Salamanca

Francisco L. Román

está en la Escuela Politécnica

Superior de Zamora

In Memoriam

José Doria Rico

El pasado mes de septiembre nos dejó un gran maestro, el Profesor José Doria Rico. Químico de carrera, abandonó la industria para dedicarse a la universidad. Solía comentar con bastante gracia lo poco que le costó al Prof. Aguilar Peris convencerle para que aceptara un contrato de Prof. Ayudante en la Universidad. Excelente profesor, sus numerosos alumnos le recuerdan y hablan de él con respeto.

Inicia su andadura investigadora en la aplicación de modelos analógicos a problemas térmicos, línea en la que desarrollará su Tesis Doctoral y que le permitirá la resolución de numerosos problemas prácticos.

Cuando en el año 1975 gana por oposición la Agregaduría de Mecánica y Termodinámica decide trabajar en una nueva línea de investigación. Eran los años en que, tras la primera crisis del petróleo, la energía solar empezaba a vislumbrarse, no como una alternativa a otras fuentes de energía, sino como apoyo a las mismas. Llevado por su entusiasmo y por su amplia formación en Termodinámica logró crear y formar un grupo de investigación en la conversión fototérmica de la radiación solar, siendo pionero en nuestro país. No escatimó esfuerzos para



potenciar la comunicación de profesionales en el área, fomentando la celebración de Congresos Ibéricos que posteriormente se convertirían en Iberoamericano, ni para la divulgación de los avances en las energías renovables.

Su gran visión de futuro le hizo ver desde el principio el gran impacto que podría tener en Iberoamérica el Programa de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED). Desde el primer momento se integró con su grupo de investigación en el Subprograma VI, de Nuevas Fuentes y Conservación de la Energía. Los comienzos fueron difíciles, por el desconocimiento que existía entre los investigadores de los distintos países de la comunidad iberoamericana, por la desconfianza acerca de la duración del subprograma, y por la escasez de fondos para llevar a cabo la investigación. Pero él no vaciló: abrió las puertas de su laboratorio y de su casa a Profesores y estu-

diantes de toda Iberoamérica a fin de reforzar la colaboración entre grupos. Viajó incansable buscando nuevos grupos de investigación, impartiendo conferencias, dirigiendo proyectos, o ayudando en la construcción de invernaderos, comedores, escuelas, secaderos de productos agrícolas, destiladores de agua...

Fruto de su iniciativa y esfuerzo personal son los numerosos invernaderos que a más de 2500 m de altura se encuentran repartidos por la geografía andina peruana, proyecto que se llevó a cabo con fondos de Intermon y de la fundación Casa Cusco, y que mereció el Premio Liguria, por su gran impacto económico y social. Colaboró con educadores, misioneros, políticos, estudiantes, o periodistas para conseguir fondos que permitieran desarrollar proyectos que mejoraran la calidad de vida de los más necesitados.

Nunca dijo no cuando se le pidió que impartiera cursos de perfeccionamiento para profesores de Iberoamérica, o Seminarios dirigidos a estudiantes o personal de empresa. Varias de las universidades iberoamericanas, supieron reconocer su labor y le nombraron Profesor Honorífico.

Los que tuvimos la suerte de aprender de él y trabajar con él y ser sus amigos, estamos tristes. Pero nos queda la huella de sus enseñanzas y el impacto de su inagotable generosidad, tanto a nivel profesional como personal. Descansa en paz.

M^a Cruz de Andrés