

Velocidad de evaporación del agua

A. Manzur y J. Cardoso

Departamento de Física, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa

Apartado Postal 55-534, 09340; México, D. F., México

e-mail: amg@xanum.uam.mx; jcam@xanum.uam.mx

Received 9 de diciembre de 2014; accepted 16 de febrero de 2015

De entre los fenómenos o transformaciones que el agua sufre en su ciclo natural, sin duda alguna, uno muy importante es el de evaporación. Para estar consciente de su importancia y poder contribuir en las actividades que se deben hacer para asegurar la disponibilidad de tan vital líquido, es necesario cuantificar el fenómeno cuando se produce a temperatura ambiente. En este trabajo se describe un experimento sencillo en el cual se determina la rapidez con que este fenómeno ocurre. El experimento es apropiado para ser realizado, en el laboratorio de física general, por alumnos de primer año de carreras de ciencias básicas o de ingenierías.

Descriptor: Agua; rapidez de evaporación.

Among the phenomena or transformations that happen in the natural water cycle, undoubtedly one of them is evaporation. In order to get conscience of its importance, and to be able to contribute in the human activities to ensure the availability of freshwater, it is necessary to quantify the phenomenon when it happens at room temperature. In this paper a simple experiment is presented in which the speed of evaporation is determined. The experiment is proper to perform, in the general physics laboratory, by students of the first year in careers of basic sciences or engineering.

Keywords: Freshwater; evaporation rate.

PACS: 01.50.Pa; 02.60.Ed; 06.30.Dr

1. Introducción

El agua es la sustancia de la naturaleza más importante porque sin ella no sería posible la vida. Esta sustancia puede estar en forma sólida, líquida o de vapor, y presenta varias transformaciones o fenómenos que se suceden ordenadamente y se repiten indefinidamente en su ciclo natural (1). Dos de las diferentes partes de que consta el ciclo del agua son la evaporación y la precipitación; la primera puede considerarse como pérdida y la segunda como ganancia; debido a su importancia en la disponibilidad del vital líquido, estas partes deben ser cuantificadas.

En los boletines climatológicos diarios se informa de los valores de la precipitación o de la evaporación del agua que ocurrieron en el día anterior; también se informa de otros parámetros como la humedad relativa del medio ambiente y de las temperaturas máxima y mínima. De entre estas cantidades, las más fáciles de medir son la precipitación y la evaporación, pues para ello es suficiente contar con un recipiente con agua y una regla graduada para medir el nuevo nivel de agua. Es usual que los valores de estas cantidades se reporten para las 24 horas anteriores, pero es claro que dependen del tiempo y pueden estar cambiando de minuto a minuto, dependiendo de las condiciones ambientales.

2. Problema

Determinar la velocidad de evaporación del agua a temperatura ambiente, midiéndola en unidades de masa por unidad de tiempo y por unidad de área.

3. Objetivo

Percatarse que el agua, estando a temperatura ambiente, se evapora y que puede determinarse la rapidez con que lo hace. La hipótesis principal es que si las condiciones experimentales son las adecuadas y se mantienen controladas, la cantidad de agua evaporada es proporcional al tiempo transcurrido. Para que esto se cumpla, se requiere un apropiado diseño experimental.

4. Antecedentes

En física el término velocidad se emplea para indicar el cambio de la posición en el tiempo de un objeto que se mueve; en cambio, el término rapidez se emplea para indicar la magnitud del vector de la velocidad. En otras disciplinas, estos términos se emplean indistintamente; por ejemplo, se habla de la rapidez del crecimiento de una planta, de la velocidad con que se lleva a cabo una reacción química, de la rapidez con que se consume el combustible de un vehículo; es decir, el término velocidad o rapidez es una medida del cambio temporal de cualquier cantidad, como el cambio del precio del oro.

La evaporación es el paso continuo de una sustancia del estado líquido al de vapor, se efectúa en la superficie del líquido y ocurre a cualquier temperatura hasta que se satura de vapor el espacio inmediato al líquido. El proceso de evaporación en un sistema abierto depende del tamaño de la superficie expuesta, del tipo de sustancia y del porcentaje de vapor en los alrededores. La velocidad de evaporación es tanto mayor cuanto más seca está la capa de aire en contacto con el

líquido, o sea, cuanto más alejada está de la saturación; y si el aire está saturado, cesa la evaporación.

Cuando las moléculas del líquido abandonan la superficie y se suman al vapor, lo hacen porque vencen las fuerzas atractivas que existen en el estado líquido. Estas fuerzas son intensas pues las moléculas están muy cercanas unas de otras en el líquido. Para vencer estas fuerzas atractivas se requiere energía, a la que se le llama *calor de vaporización* del líquido. Desde un punto de vista de energía, las fuerzas intermoleculares producen, en efecto, una barrera de potencial la cual retiene en su lugar a las moléculas.

Al evaporarse, el líquido pierde sus moléculas más energéticas y la temperatura del líquido decrece. Si el vapor que se encuentra arriba del líquido se quita de manera continua, por ejemplo mediante una corriente de aire, o si el volumen afuera del líquido es muy grande de modo que la presión de vapor del equilibrio nunca se alcance, el líquido se evaporará continuamente. Para mantener constante la temperatura del líquido durante la evaporación, debe agregarse al líquido energía en forma de calor. El calor requerido para la evaporación de un gramo del líquido se llama calor latente de vaporización. Entonces, el calor molar de vaporización puede interpretarse como la energía requerida para separar las N moléculas (M gramos) entre sí, contra la influencia de las fuerzas de interacción intermolecular. El calor de vaporización para agua es de 539 cal/g a 100°C (2), mientras que para la mayoría de los líquidos es del orden de 100 cal/g y es dependiente de la temperatura.

El proceso que involucra el enfriado de un líquido que se esté evaporando es bien conocido a partir de nuestra experiencia. Un cuerpo mojado se enfría al evaporarse el agua y la diferencia en la incomodidad que se siente en un día húmedo a una temperatura y un día seco a la misma temperatura es causada parcialmente por la diferencia en las velocidades de evaporación y el resultante efecto refrescante. Análogamente, la eliminación (por soplado) del vapor arriba de una taza de café caliente aumenta la velocidad de evaporación y apresura el enfriado.

La evaporación de cualquier líquido depende de muchos factores. De entre ellos pueden citarse a la temperatura del líquido y la temperatura de los alrededores, el tamaño de la superficie del líquido expuesta al aire dentro del recipiente, la distancia de esa superficie respecto a la boca del recipiente, la forma del recipiente, la humedad relativa del aire de los alrededores de la superficie del líquido, la presión de vapor y la presión externa, las corrientes de aire, las impurezas contenidas en el líquido y, desde luego, de la naturaleza del líquido.

5. Experimento

Con el propósito de ayudar en el diseño del experimento, es conveniente determinar de antemano el orden de magnitud de la rapidez de la evaporación del agua, a temperatura ambiente, haciendo un experimento de prueba en casa durante uno o dos días; por ejemplo, utilizando un recipiente graduado (taza medidora) con agua, o un vaso con agua y una regla



FIGURA 1. Una caja de Petri con agua está colocada en el platillo de la balanza.

graduada. Se hicieron dos experimentos de prueba en el mes de enero en dos ciudades; en Temixco ($T=24^\circ\text{C}$) en un vaso de 6.3 cm de diámetro interno se evaporó 0.4 cm en 42 horas; en la ciudad de México ($T=19^\circ\text{C}$) se evaporó 0.5 cm en 65 horas en un vaso del mismo tamaño. Lo cual permite estimar que el agua se evaporó a razón de 0.005 g/min y 0.004 g/min , respectivamente. Con este orden de magnitud se podrá estimar la sensibilidad de los equipos necesarios para hacer las mediciones y así determinar la evaporación en una sesión de 60 a 90 minutos en el laboratorio. Como el fenómeno se produce en la superficie libre del agua, se ve afectado por el área de ésta; por tanto, se debe determinar la cantidad de agua evaporada por metro cuadrado de superficie y por unidad de tiempo.

Cuando un fenómeno depende de varios factores, para estudiarlo en forma controlada conviene mantener fijo algunos de ellos y permitir que cambien solamente las cantidades de interés. En este caso de la determinación de la velocidad de evaporación, se usará agua destilada (para asegurar que no contenga impurezas) y se determinará la masa del agua evaporada en función del tiempo. Para medir la masa es suficiente emplear una balanza con resolución de un centésimo de gramo, y para medir el tiempo se puede usar un cronómetro o un reloj de pulso, pues los tiempos necesarios para registrar un cambio de un centésimo de gramo en la masa son del orden de minutos.

Materiales y equipo. Para la realización de esta actividad se requiere una balanza con resolución de un centésimo de gramo, un vaso de precipitado o caja de Petri de tamaño adecuado para usarlo en la balanza, un cronómetro o reloj de pulso con segundero y agua destilada.

La Fig. 1 muestra parte del dispositivo experimental.

6. Análisis

Para determinar la velocidad de evaporación conviene graficar la cantidad de masa evaporada en función del tiempo. La

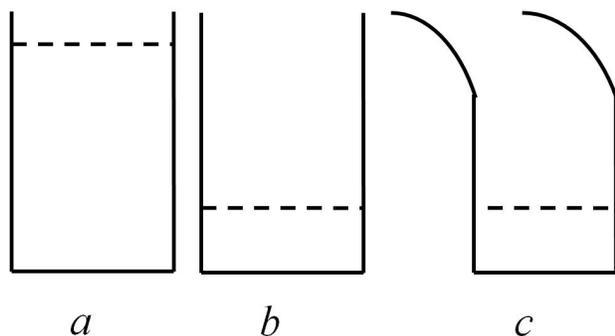


FIGURA 2. El nivel del líquido en el recipiente y la forma del recipiente afectan a la velocidad de la evaporación.

masa evaporada es la diferencia entre la masa inicial m_o , en el tiempo $t = 0$, y la masa m en el tiempo t . Si resulta que la tendencia de los puntos experimentales describe a una recta, entonces la pendiente proporciona la velocidad de la evaporación. Para que el valor obtenido de la velocidad no dependa del tamaño de la superficie del líquido expuesta al aire, se debe dividir entre ese tamaño y así expresar la velocidad en unidades de masa por unidad de área por unidad de tiempo. Valores típicos obtenidos en el laboratorio a una temperatura de 24°C son del orden de 15 mg/min en una superficie de alrededor de 60 cm^2 .

Si la gráfica de la masa evaporada en función del tiempo no resulta ser una recta, sino una curva, puede deberse a uno o varios factores no controlados en el experimento. La forma de la curva podría sugerir el efecto de ese factor. Por ejemplo, si los primeros puntos siguen una tendencia recta y de pronto se presenta un salto (en la dirección de las ordenadas) para después continuar siendo recta con la misma pendiente, entonces el salto podría deberse al efecto de una corriente de aire de corta duración, que renovó el aire próximo a la superficie libre del líquido. Esta situación podría darse como se ilustra en el diagrama *a* de la Fig. 2, donde el nivel del líquido está muy cercano al borde del recipiente.

En cambio, si los primeros puntos muestran una tendencia recta, pero después los puntos siguientes describen una curva en la que las rectas tangentes a la curva tienen pendientes

que van decreciendo con el tiempo, podría deberse a que la superficie del líquido no está cerca del borde del recipiente de manera que el vapor se acumula en el recipiente obstaculizando que la evaporación continúe libremente. Esta situación podría darse como en los diagramas *b* o *c* de la Fig. 2, donde es claro que la acumulación de vapor sería mayor en el último diagrama.

Debido a que se requiere medir masa y tiempo, una forma cómoda de hacerlo es usar una balanza electrónica con resolución de un centésimo de gramo y registrar el tiempo en que la lectura de la balanza disminuye cada centésimo de gramo. De esta manera se realizó el experimento a la temperatura de 21.7°C usando una caja de Petri de diámetro interior de 9.720 cm y con el nivel del agua cerca del borde, a una humedad relativa de 71% , en época de lluvias (septiembre). Los resultados se muestran en la Fig. 3.

Es claro que los puntos experimentales están alineados en una línea recta; el valor de la pendiente proporciona directamente la rapidez de evaporación expresada en gramos por minuto. Para que esta cantidad no dependa del tamaño del recipiente en el que se produjo la evaporación, se divide entre el área superficial del agua (donde se produce el fenómeno), el resultado es $0.000115 \text{ g/min}\cdot\text{cm}^2$. Esto quiere decir que este valor será el mismo si las condiciones experimentales son las mismas, sin importar si el recipiente es una caja de Petri, una tina o una alberca.

En algunas ocasiones el valor de una cantidad nos impacta más si es grande o pequeño, lo cual depende mucho de las unidades que se empleen. Por ejemplo, el valor que hemos obtenido se puede expresar como $1.15 \text{ g/min}\cdot\text{m}^2$, $0.0069 \text{ g/h}\cdot\text{cm}^2$, $0.0192 \text{ g/s}\cdot\text{m}^2$, o como $0.0000192 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$. Es claro que si se usa el Sistema Internacional de unidades, el valor en este caso resulta pequeño y tal vez se piense que es despreciable ante el valor expresado en $\text{g/min}\cdot\text{m}^2$.

Con el propósito de observar el efecto de la profundidad y del tamaño de la superficie, tres experimentos fueron realizados simultáneamente; la temperatura era de 22°C y la humedad relativa de 42% pues no era época de lluvias (enero). Se emplearon tres cajas de Petri: dos con diámetro interno de $8.770 \pm 0.005 \text{ cm}$ y $8.810 \pm 0.005 \text{ cm}$, y una con diámetro interno de $14.640 \pm 0.005 \text{ cm}$. A la primera caja pequeña se

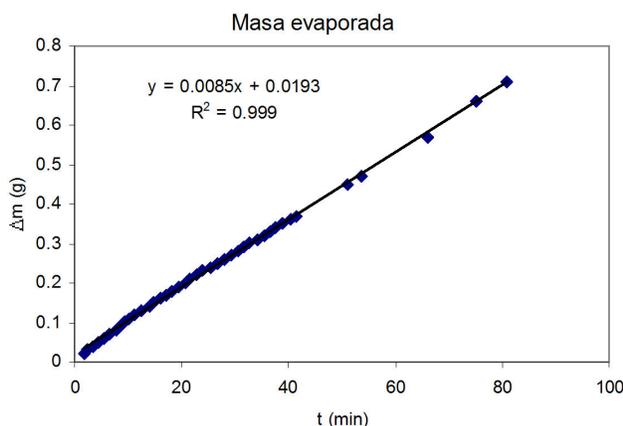


FIGURA 3. Masa de agua evaporada en función del tiempo.

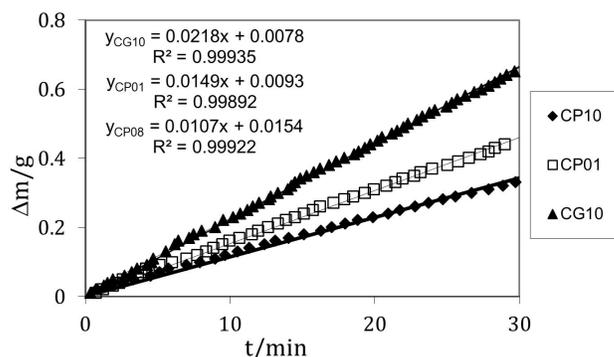


FIGURA 4. Efectos del tamaño de la superficie del agua y de su profundidad.

vertió agua hasta un nivel de 1 mm abajo del borde (CP01), la otra caja pequeña hasta 8 mm del borde (CP08) y la caja grande hasta 10 mm del borde (CG10). La Fig. 4 presenta los resultados; la pendiente de las rectas crece en el orden CP08, CP01 y CG10.

Estos tres resultados ilustran dos aspectos importantes: la diferente posición vertical de la superficie libre del agua dentro del recipiente (CP01 y CP10), en dos recipientes casi iguales, y el efecto del diferente tamaño de la superficie libre del agua (CP10 y CG10), en dos recipientes de tamaños diferentes. El líquido se evapora con mayor rapidez cuando su superficie se encuentra más cerca del borde del recipiente, y se evapora mayor cantidad cuando la superficie es más grande. Al dividir el valor de cada pendiente entre el área de la superficie correspondiente, se obtuvieron los resultados siguientes para la rapidez de evaporación: $0.0000293 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ para CP08, $0.0000411 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ para CP01 y $0.0000213 \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ para CG10; estas cantidades expresadas en términos de potencias de 10 son, respectivamente, $2.93 \times 10^{-5} \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$, $4.11 \times 10^{-5} \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$ y $2.13 \times 10^{-5} \text{ kg/s}\cdot\text{m}^2$. Al comparar las cantidades primera y tercera, se observa que la rapidez de evaporación es altamente sensible a la posición de la superficie respecto al borde del recipiente.

7. Aplicación

Una aplicación de la velocidad de evaporación se encuentra en la elaboración de perfumes (3). Un perfume está constituido principalmente por una mezcla de sustancias odoríferas que genéricamente denominamos esencias y disolventes. Las esencias pueden ser de origen natural (vegetal o animal) o sintético. Los disolventes más empleados son el alcohol etílico

co y el agua. Al aplicarse el perfume sobre la piel, el calor del cuerpo evapora el alcohol rápidamente dejando las sustancias aromáticas, que se disipan gradualmente, en función de las volatilidades relativas de cada una de ellas, durante varias horas.

Los fijadores de esencias son sustancias que añadidas al perfume permiten que éste tarde mucho más tiempo en volatilizarse y por tanto resulte más duradero. Las sustancias fijadoras pueden ser naturales o sintéticas. Los fijadores son sustancias que controlan la velocidad de evaporación de varios componentes odoríferos.

8. Comentario final

Esta actividad experimental podría ser aprovechada para repasar los conceptos de masa molecular y número de Avogadro. Para ello se pide a los alumnos que también expresen la velocidad de evaporación en términos de moléculas evaporadas por unidad de tiempo por unidad de área.

9. Conclusiones

Se presentó un experimento en el cual se mide la masa evaporada de agua en función del tiempo y a temperatura ambiente. Se discuten algunas posibles formas de curvas en función del nivel del agua en el recipiente y de la forma de éste. Los datos experimentales presentados corresponden al caso en que la forma de la gráfica de la masa evaporada en función del tiempo es una línea recta. A partir de la geometría del recipiente y de la pendiente de esta recta se determinó la rapidez de evaporación en unidades de masa por unidad de tiempo y por unidad de área.

1. ¿Qué es el ciclo del agua? AGUA.org.mx Centro Virtual de Información del Agua, México. <https://agua.org.mx/index.php/el-agua/que-es/queeselciclodelagua>. Consultado el 18 de noviembre de 2014.
2. U. Ingard y W. L. Kraushaar. Introducción al estudio de la mecánica, materia y ondas. Reverté, Barcelona, 1972. Capítulo 18.

3. A. Saucedo Morales, M.A. Gómez Barquín y R. Rolo Mendoza, coordinadores. Esencias y Fragancias. I.E.S. Santo Domingo, el Puerto de Santa María (Cádiz). Consultado el 18 de noviembre de 2014. <http://www.parqueciencias.com/export/sites/default/comun/galerias/galeriaDescargas/educacion-formacion/CienciaAula/esenciasFragancias.pdf>