

Ascenso de agua por el interior de un recipiente que cubre una vela sobre un plato con agua: un experimento poco comprendido, análisis de un error persistente y propuesta para superarlo

Antonio Tomás-Serrano 

IES Vega del Táder. Molina de Segura (Murcia). España. atserrano@gmail.com

Rafael García-Molina 

Departamento de Física. Universidad de Murcia. Murcia. España. rgm@um.es

[Recibido: 28 noviembre 2023, Revisado: 10 marzo 2024, Aprobado: 15 abril 2024]

Resumen: El experimento del ascenso del agua por el interior de un vaso que cubre una vela encendida, sobre un plato con agua, es un recurso didáctico muy utilizado para mostrar a los estudiantes lo que sucede cuando la presión dentro de un recipiente disminuye respecto a la presión atmosférica. Aunque el experimento es sencillo, rápido y fácilmente reproducible, lo más probable es que no llegue a ser comprendido por gran parte de la audiencia, tal y como se discute en la primera parte de este trabajo, a partir del análisis de las respuestas que dan los estudiantes y graduados universitarios cuando se les pide que justifiquen por qué entra agua al vaso en cuanto comienza a debilitarse la llama de la vela. Con la finalidad de facilitar la comprensión de este experimento y analizar algunos aspectos de la combustión de la vela, en la segunda parte de este trabajo se propone una colección de experimentos complementarios que ayudan a entender lo que sucede dentro del vaso.

Palabras clave: Experimento del vaso y la vela; Caída de presión dentro del vaso; Combustión de una vela.

Water rising through the interior of a vessel that covers a candle over a plate with water: an experiment poorly understood, analysis of a persistent error and proposals to overcome it

Abstract: The experiment of covering a lit candle in a water basin is an educational resource widely used to show students what happens when the pressure inside a container becomes lower than atmospheric pressure. Although the experiment is simple, quick, and easily reproducible, it is likely not to be understood by most of the audience, as inferred from the analysis of the responses given by students and university graduates when asked to explain why water enters the glass as soon as the candle flame weakens. In the second part of this article, and to facilitate the understanding of this experiment and analyze certain aspects of the combustion of a candle, a collection of complementary experiments is proposed that helps comprehend what takes place within the glass.

Keywords: Glass and candle experiment; Pressure drop inside the glass; Combustion of a candle.

Para citar este artículo: Tomás-Serrano, A. y García-Molina, R. (2024). Ascenso de agua por el interior de un recipiente que cubre una vela sobre un plato con agua: un experimento poco comprendido, análisis de un error persistente y propuesta para superarlo. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias* 21(2), 2203. doi:10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i2.2203

Introducción

Uno de los experimentos que realizamos los profesores para poner de manifiesto la presión que ejerce la atmósfera, consiste en cubrir con un vaso, o una probeta, una vela encendida situada en el centro de un plato con agua, o un recipiente similar (figura 1). En cuanto la llama se debilita, el agua comienza a entrar al vaso y, dependiendo de las condiciones experimentales, ocupa entre un 15 % y un 30 % de su volumen.



Figura 1. En el experimento del vaso y la vela, la altura que alcanza la columna de agua (coloreada de azul en esta fotografía, para aumentar el contraste) depende de las condiciones experimentales. En general, la altura del agua aumenta al hacerlo el número de velas y disminuye al aumentar el volumen del vaso.

La principal conclusión que queremos que extraigan nuestros alumnos de esta demostración es que, en el transcurso de la misma, la presión en el interior del vaso desciende por debajo de la presión externa (la presión atmosférica) y, por lo tanto, el agua asciende impulsada por la diferencia de presiones. El problema es que la mayoría de los estudiantes y, en general, de las personas que observan esta demostración, no logran explicar adecuadamente por qué disminuye la presión dentro del vaso (Cooper, 1963; Fang, 1998; Vera et al., 2011; Riveros, 2012; ACS, 2023).

A pesar de su aparente simplicidad (al menos, en lo que se refiere a los materiales y procedimiento experimental), la comprensión de lo que sucede dentro del vaso durante el medio minuto que, aproximadamente, dura el experimento requiere un análisis detallado que, generalmente, no suelen hacer ni los profesores ni los estudiantes.

En el trabajo que se presenta a continuación se analiza este experimento, tomando como punto de partida las respuestas de diferentes grupos de observadores, desde estudiantes de secundaria hasta posgraduados universitarios, a los que se les pidió que explicasen las razones por las que entra agua al vaso. En la segunda parte de este trabajo, y con la finalidad de facilitar la comprensión del experimento del vaso y la vela, se propone una serie de sencillos experimentos que, además de complementarlo y desarrollarlo, ayudan a entender el origen de la disminución de presión en el interior del vaso.

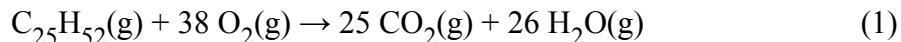
¿Qué sucede cuando se coloca el vaso sobre la vela?

Aunque la temperatura del interior del vaso cambia durante el transcurso del experimento (aumenta mientras está la vela encendida y disminuye cuando se apaga), su variación global es nula, ya que el aire del interior del vaso se encuentra a temperatura ambiente al inicio y al final del experimento (una vez que se ha alcanzado el equilibrio). Si, además, se tiene en cuenta que el agua que entra al vaso reduce el volumen ocupado por el aire, se concluye que el descenso de la presión se debe únicamente a la disminución del número de moles de gas en el interior del vaso, de acuerdo con la ecuación de estado del gas ideal.

La razón principal por la que ocurre esta disminución es que, al colocar el vaso invertido sobre la llama de la vela, aumenta la temperatura del aire que contiene y se expande, escapando hacia la atmósfera (rápida e invisiblemente) una fracción del aire del vaso (Peckham, 1993; Vera et al., 2011). Una vez cubierta la vela, si la presión dentro del vaso

supera a la presión exterior (algo que, generalmente, ocurre en estos experimentos), continuará escapando aire desde el vaso y producirá burbujeo en el agua del plato.

Otra razón por la que disminuye el número de moles de gas dentro del recipiente es el consumo de oxígeno debido a la combustión de los componentes de la vela, principalmente, parafina, que, de modo simplificado, se puede representar mediante $C_{25}H_{52}$. Aunque en este proceso de combustión se pueden formar carbono elemental, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles, tales como benceno o tolueno, los productos mayoritarios son dióxido de carbono y vapor de agua (Roth, 2003), tal y como se indica en la ecuación:



Como se mostrará en el siguiente apartado, la influencia de la combustión sobre la caída de presión es mucho menor que la debida al escape de aire, dado que el consumo de oxígeno se ve parcialmente compensado por la formación de dióxido de carbono y vapor de agua, una parte del cual condensa sobre las paredes del recipiente.

A los pocos segundos de cubrir la vela, la llama comienza a debilitarse debido a la disminución de oxígeno y al progresivo aumento de dióxido de carbono y de vapor de agua. Cuando la concentración de oxígeno, en el entorno de la llama, se encuentra por debajo del límite necesario para mantener la combustión, la vela se apaga, a pesar de que en el vaso queda todavía más de la mitad del oxígeno inicial (Shakhshiri, 1985; Que et al., 2020) y la temperatura del interior del vaso comienza a descender, aproximándose a la temperatura ambiente. Este descenso de temperatura, unido a la reducción del número de moles de gas ocasionada por el escape de aire y, en menor medida, por el consumo de oxígeno durante la combustión, provoca la rápida disminución de la presión y la consiguiente entrada del agua desde el plato, la cual se encuentra sometida a la presión atmosférica.

Transcurridos unos minutos, se alcanza el equilibrio cuando la temperatura en el interior del recipiente iguala a la temperatura ambiente, y la suma de la presión de los gases dentro del recipiente y la que ejerce la columna de agua, cuya altura está por encima del nivel del agua en el plato, es igual a la presión atmosférica.

¿Qué papel desempeña la combustión en este experimento?

La combustión de la parafina, ecuación 1, apenas modifica el número de moles de gas dentro del vaso, ya que por cada molécula de $C_{25}H_{52}$ que reacciona, se consumen 38 moléculas de O_2 , pero aparecen 25 moléculas de CO_2 y 26 moléculas de vapor de H_2O .

En el hipotético caso de que la vela consumiese la totalidad del oxígeno atrapado en el vaso, y que todo el vapor de agua formado en la combustión condensara rápidamente sobre las paredes del vaso, el número de moles n de gas al apagarse la vela sería igual a

$$n = n_{CO_2} + n_{N_2} \quad (2)$$

donde n_{CO_2} y n_{N_2} son, respectivamente, el número de moles de dióxido de carbono que se forman en la combustión de la parafina y el número de moles de aire que no participan en dicho proceso, fundamentalmente, nitrógeno y una cantidad insignificante de argón.

De acuerdo con la estequiometría de la ecuación 1, el número de moles de dióxido de carbono formados está relacionado con el número de moles de oxígeno consumidos n_{O_2} , mediante

$$n_{CO_2} = \frac{25}{38} n_{O_2} = 0,21 \frac{25}{38} n_0 \quad (3)$$

donde n_0 es el número de moles de aire que contiene el vaso tras cubrir la vela y 0,21 es la fracción molar del oxígeno en el aire.

Considerando que n_{N_2} está relacionado con n_0 mediante

$$n_{N_2} = (1 - 0,21)n_0 \quad (4)$$

se deduce que, al acabar el experimento, el número final de moles de gas dentro del vaso valdrá

$$n = \frac{25}{38}0,21n_0 + (1 - 0,21)n_0 = 0,928n_0 \quad (5)$$

y la variación en el número de moles de gas, Δn , debida a la combustión de la parafina, será

$$\Delta n = n - n_0 = -0,072n_0 \quad (6)$$

Así pues, en el caso extremo de que la combustión consumiera todo el oxígeno disponible (algo que no sucede normalmente) y de que condensase todo el vapor de agua formado en la combustión, el número de moles de gas dentro del vaso se reduciría, como máximo, en un 7,2 %. Bajo este supuesto, el volumen de agua que absorbería el vaso, debido únicamente a la combustión de la parafina, sería notablemente inferior (aproximadamente, el 7 % de su capacidad) al que se absorbe habitualmente en este experimento (que, como se muestra en la figura 1, suele estar comprendido entre el 15 % y el 30 % de la capacidad del vaso).

No obstante lo anterior, la combustión desempeña un papel decisivo en el experimento. Pero no porque suponga una variación importante del número de moles de gas, sino por los cambios de temperatura que origina dentro del vaso en el transcurso del experimento y que son los que dan lugar al escape de aire caliente al colocar el vaso sobre la vela encendida y, posteriormente, cuando se apaga la vela, a una brusca caída de presión.

¿Cómo justifican los estudiantes la entrada de agua al recipiente?

Con el objetivo de conocer cómo interpretan los estudiantes lo que sucede en este experimento, se le pidió a diferentes grupos de observadores que expresasen por escrito cuáles son, a su juicio, las causas por las que entra agua al vaso cuando comienza a apagarse la vela (tabla 1). Para no condicionar sus respuestas, el profesorado que realizó el experimento se limitó a presentarlo y ejecutarlo, pero sin dar ningún tipo de justificación de lo que ocurre.

Tabla 1. Cuestionario para los observadores del experimento.

Cumplimenta el siguiente cuestionario, relacionado con el experimento de la vela y el vaso que acabas de presenciar.

Nivel académico (ESO, bachillerato, grado, posgrado):	Fecha:
---	--------

Describe brevemente lo que has observado en este experimento.

...

Da una explicación de lo que ha sucedido. ¿Cuál es la razón por la que asciende el agua dentro del vaso?

...

De este modo, se obtuvieron respuestas de un total de 140 observadores, correspondientes a 44 alumnos de secundaria obligatoria, 41 alumnos de bachillerato, 14 estudiantes de tercer curso del Grado de Física y 41 graduados y posgraduados inscritos en un curso de máster de formación del profesorado de secundaria de Física y Química. A continuación, se analizan los rasgos más significativos de las respuestas dadas por los diferentes grupos de observadores.

Las respuestas de los estudiantes de secundaria (con edades comprendidas entre 13 y 15 años) son similares a las recogidas en otros trabajos (Watson et al., 1997; Sesto y García, 2017) y ponen de manifiesto las dificultades que entraña el concepto de combustión para los estudiantes de estas edades (Matute et al., 2016). En general, las respuestas de este grupo aportan muy poca información, ya que son escuetas, confusas y con escasa o nula fundamentación científica (tabla 2). La respuesta más frecuente en este grupo es que, al consumir la vela la totalidad del oxígeno encerrado en el vaso, se origina un vacío que es ocupado por el agua del plato.

La mayoría de los estudiantes de bachillerato (con edades entre 16 y 17 años) da una respuesta similar, en la que se asume que la vela se apaga tras consumir la totalidad del oxígeno disponible (tabla 2). A pesar de que en este nivel ya se han estudiado las reacciones de combustión de hidrocarburos, ninguno de estos estudiantes analiza la posible influencia de los productos de combustión sobre la presión dentro del vaso.

Como era de esperar, las respuestas de los estudiantes universitarios (3.º curso del Grado en Física) son más detalladas y están formuladas con mayor rigor (tabla 2). A pesar de ello, la explicación mayoritaria es esencialmente la misma que dan los estudiantes de niveles inferiores: la presión dentro del vaso disminuye porque la combustión agota el oxígeno atrapado en el vaso y el agua del exterior entra al recipiente hasta que se igualan las presiones. Solamente en una de las respuestas se señala el escape de aire como la única causa por la que disminuye la presión dentro del vaso.

Tabla 2. Ejemplos de las respuestas dadas por el alumnado de Secundaria, Bachillerato y Grado en Física a la pregunta «En el experimento del vaso que cubre una vela, ¿cuál es la razón por la que asciende el agua dentro del vaso?»

2.º ESO	«Al quedarse la vela sin oxígeno, el agua tiende a filtrarse porque lleva oxígeno.»
	«Al poner el vaso, no hay oxígeno y la llama se va apagando. El agua va subiendo porque al no haber oxígeno, es como si el vaso la absorbiera.»
4.º ESO	«Esto se debe a que la vela encendida consume oxígeno. Al haber menos partículas de oxígeno, el agua se expande en volumen para llenar el espacio del vaso.»
	«La razón sería que al tapar la vela con el vaso, la temperatura aumenta y el agua sube porque aumenta la presión.»
2.º Bachillerato	«El agua asciende dentro del vaso porque al estar este caliente, se reduce el espacio del aire y el agua procede a ocupar ese vacío.»
	«El fuego consume el oxígeno que hay en el vaso. Al acabarse, la vela se apaga y ahora que hay un vacío por la falta de oxígeno, el agua asciende para ocuparlo.»
3.º Grado en Física	«Al consumirse el oxígeno por la combustión, disminuye la presión dentro del recipiente y para compensarlo entra agua.»
	«La vela consume todo el oxígeno del sistema cerrado, de manera que para igualar presiones con el exterior, asciende una parte del agua.»
	«La llama calienta el aire de alrededor. Una vez se tapa la vela, el aire queda aislado. Cuando se ha consumido, la llama se apaga por la falta de oxígeno y el aire se va enfriando. Cuanto más se enfrie, menos presión ejerce y por eso el agua sube.»

Desde nuestro punto de vista, la información más significativa es la que se desprende de las respuestas del grupo de graduados (y posgraduados) participantes en el máster de formación del profesorado de secundaria (tabla 3), dado que serán los futuros transmisores de conocimientos científicos en Secundaria y Bachillerato. Se da la circunstancia de que todos sus integrantes tienen una alta cualificación académica (graduado, licenciado, ingeniero o doctor) y de que más de la mitad de ellos había estudiado previamente el experimento del vaso y la vela en otra asignatura del citado máster, según indicaron tras cumplimentar el cuestionario mostrado en la tabla 1.

Tabla 3. Síntesis de las respuestas de los alumnos del máster de formación del profesorado de Física y Química en relación con el experimento del vaso que cubre una vela.

(a) Sobre la descripción del experimento		%
Se forman burbujas en el agua inmediatamente después de cubrir la vela		2
Tras apagarse la llama, el vapor de agua condensa en la parte superior del vaso		0
El agua que entra al vaso ocupa entre un 15 % y un 30 % de su capacidad		0
No se aporta información relevante al respecto		98
(b) Razón por la que asciende el agua dentro del vaso		%
Disminuye la presión dentro del vaso y se hace inferior a la presión exterior		85
Aumenta la presión dentro del vaso		10
No lo justifican		5
(c) Justificación de la diferencia de presión entre el interior y el exterior del vaso		%
Al arder la vela se modifica la composición de la mezcla gaseosa dentro del vaso		80
La disminución de temperatura, que ocurre al apagarse la vela, origina una caída de presión		20
(d) Ideas acerca del proceso de combustión que ocurre dentro del vaso		%
La vela se apaga tras consumir la totalidad del O ₂ contenido en el vaso		76
En la combustión de la parafina se forman CO ₂ y H ₂ O		15
El CO ₂ se disuelve parcialmente en el agua que entra al vaso		2
No se aporta información relevante al respecto		7

En el apartado (a) de la tabla 3 se puede apreciar que determinados detalles, fundamentales para comprender lo que sucede en el experimento, tales como el burbujeo del aire que escapa del vaso, la condensación del vapor de agua formado en la combustión o la proporción de agua que entra al vaso, pasan desapercibidos para la práctica totalidad de los observadores.

Con respecto a la razón por la que asciende el agua dentro del vaso (tabla 3-apdo. b), la gran mayoría (85 %) de los participantes en el máster de formación del profesorado asocia la entrada de agua al vaso con la disminución de presión que ocurre en su interior. Sorprendentemente, el 10 % afirma que, debido a la combustión de la parafina, aumenta la presión dentro del vaso. Esta afirmación, que sería acertada si el vapor de agua formado en la combustión no condensase, no tiene en cuenta que si la presión dentro del vaso fuera mayor que la atmosférica, sería imposible la entrada del agua contenida en el plato.

Para el 80 % de la muestra, la variación de presión que ocurre en el interior del vaso (apdo. c) se debe al consumo de oxígeno ocasionado por la combustión de los componentes de la vela, aunque en ninguna de estas respuestas se tiene en cuenta que la formación de dióxido de carbono y de vapor de agua compensa parcialmente la reducción del número de moles de oxígeno. El 20 % restante atribuye la caída de presión a la disminución de temperatura que ocurre dentro del vaso tras apagarse la vela, aunque solamente en una de estas respuestas se afirma que la reducción del número de moles de gas dentro del vaso se debe al aire que escapa del vaso cuando se coloca invertido sobre la llama de la vela.

En relación con el proceso de combustión que ocurre en este experimento (apdo. d), el 76 % afirma que la vela se apaga porque se agota el oxígeno que contiene el vaso. Se trata de una idea muy arraigada, que comparte el 69 % de los 140 encuestados, independientemente de su nivel académico. Solamente el 15 % menciona que, en la combustión de la parafina, además de consumirse oxígeno, se forman otros gases (aunque

no todos especifican que, mayoritariamente, se trata de dióxido de carbono y de vapor de agua).

A pesar de que la base teórica, necesaria para justificar la caída de presión que ocurre dentro del vaso (composición de la atmósfera, reacciones de combustión, ecuación de los gases, ecuación fundamental de la hidrostática, etc.), es sobradamente conocida por el alumnado universitario, la gran mayoría de estos estudiantes, así como los graduados y posgraduados en Física o Química, no da una explicación satisfactoria de por qué disminuye la presión dentro del vaso cuando se apaga la vela.

Aunque las razones por las que a los estudiantes les resulta tan difícil justificar la caída de presión dentro del vaso son muy variadas, la mayor parte de ellas se pueden agrupar en las siguientes categorías:

- En primer lugar, influye la forma en que se presenta el experimento (Vázquez et al., 1994), esto es, la información previa que el profesor suministra a la audiencia: qué productos se forman en la combustión de la parafina, cuál es la estequiometría de dicha reacción, cómo influye la condensación del vapor de agua formado, cómo varía la temperatura dentro del vaso durante el curso del experimento, etc.
- En segundo lugar, debe tenerse en cuenta que no se suelen plantear actividades en las que los estudiantes tengan que contrastar las hipótesis, que previamente han formulado, con los resultados experimentales (García y Sesto, 2016). Por otra parte, los estudiantes no están familiarizados con este tipo de problemas no convencionales (Campanario y Otero, 2000), cuya resolución exige llevar a cabo un detallado estudio de la evolución de las condiciones dentro del vaso y, paralelamente, ser capaces de integrar adecuadamente diferentes áreas del conocimiento científico (Girault et al., 2012; Crujeiras y Jiménez, 2015).
- Finalmente, hay que resaltar que este experimento no es tan simple como aparenta, ya que la mayor parte del aire que escapa desde el vaso lo hace, de forma prácticamente indetectable, mientras se coloca sobre la vela encendida. Por otra parte, como el agua empieza a entrar al vaso al debilitarse la llama, las personas que observan el experimento concluyen que la única razón por la que disminuye la presión dentro del vaso es la combustión.

Algunos experimentos simples para comprender lo que sucede dentro del vaso

Con la finalidad de facilitar la comprensión de las causas por las que disminuye la presión dentro del vaso, se presenta a continuación una serie de experimentos complementarios que pueden ser llevados a cabo por el profesorado o, dada su sencillez, formar parte de una pequeña investigación a realizar por los estudiantes (Bueno, 2004; Tomás y García Molina, 2015).

Para ejecutar estos experimentos se requieren algunos vasos (preferiblemente cilíndricos, de 15 cm, o más, de altura y de una capacidad comprendida entre 250 cm³ y 350 cm³), un plato (o recipiente similar, para contener el agua), papel de cocina, una cinta métrica, velas de cumpleaños ordinarias, velas de cumpleaños *mágicas* (que se reencienden tras apagarse cuando se sopla sobre ellas), plastilina (para fijar la base de la vela al plato), incienso, u otro material adecuado para producir humo blanco, disolución de hidróxido sódico al 5 % y una balanza que aprecie, al menos, décimas de gramo.

El tiempo de ejecución de cada uno de estos experimentos es de unos pocos minutos, salvo el que se propone para absorber el dióxido de carbono formado en la combustión de la parafina, en el que hay que esperar unos 30 minutos para que se complete la reacción.

Detección de la caída de presión que ocurre dentro del vaso

Objetivo. Poner de manifiesto la caída de presión que ocurre dentro del vaso cuando se apaga la vela.

Fundamento. Debido a la disminución del número de moles de gas que ocurre dentro del vaso, la presión en su interior cae por debajo de la presión exterior (la presión atmosférica). Como consecuencia de esta diferencia de presiones, aparece una fuerza neta perpendicular, en cada punto, a la superficie encerrada por el vaso y el plato, y dirigida hacia adentro (figura 2).

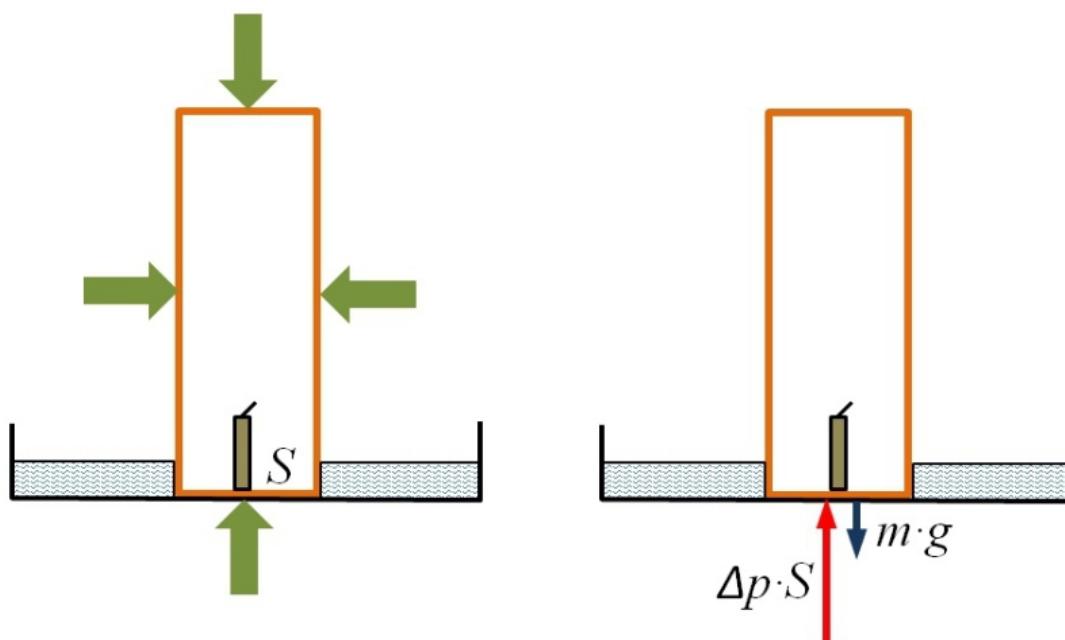


Figura 2. Izquierda: la fuerza debida a la diferencia de presión entre el exterior y el interior del vaso es perpendicular a las paredes del vaso y a la superficie del plato en contacto con el vaso, y está dirigida hacia dentro del vaso. Derecha: la fuerza sobre la superficie del plato delimitada por la sección S del vaso ($\Delta p \cdot S$), es mayor que el peso del plato y de la parte que contiene ($m \cdot g$).

Teniendo en cuenta que la diferencia de presión Δp entre el interior y el exterior del vaso es del orden de 20 kPa (Tomás y García Molina, 2023), que la sección transversal S del vaso que se utiliza en este experimento es de unos 25 cm^2 y que la masa m conjunta del plato y del agua que contiene, generalmente, no supera los 500 g, la fuerza que empuja al plato contra el vaso ($\Delta p \cdot S \approx 50 \text{ N}$) es bastante mayor que el peso de un plato y del agua que contiene ($mg \approx 5 \text{ N}$).

Procedimiento. (1) Para llevar a cabo este experimento es necesario que el vaso ajuste lo mejor posible sobre la superficie del plato; una forma simple de mejorar este ajuste consiste en colocar una lámina de papel de cocina dentro del plato, bajo la base de la vela, de tal modo que la boca del vaso se apoye sobre ella al colocarlo sobre la vela. (2) Tras cubrir la vela encendida, hay que presionar fuertemente el vaso contra el plato para evitar la entrada de agua cuando se apague la llama.

Resultado. Al tirar suavemente del vaso hacia arriba se levantará el conjunto plato-agua-vaso, tal como se aprecia en la figura 3 (este comportamiento se observa mejor cuanto más ligero es el plato y mayor es la diferencia entre la presión dentro y fuera del vaso).



Figura 3. Debido a que la presión en el interior del vaso es inferior a la presión atmosférica, al levantar el vaso, asciende también el plato con la vela y el agua. En esta ocasión se ha empleado una placa Petri como plato, pues su poca masa permite que se pueda levantar con más facilidad.

Información adicional. Para evitar posibles derrames de agua, es conveniente colocar una cubeta bajo el plato. Si el experimento se lleva a cabo con un vaso desechable de plástico de 15 cm (o más) de altura, se apreciará como la fuerza debida a la diferencia de presiones deforma las paredes laterales del vaso en cuanto comienza a debilitarse la llama de la vela. Para evitar que se queme la base del vaso es conveniente protegerla con una pequeña lámina de papel de aluminio.

Comprobación de que escapa aire desde el vaso al cubrir la vela

Objetivo. Poner de manifiesto que escapa aire del vaso cuando se coloca sobre una vela encendida.

Fundamento. Si el vaso se coloca lentamente sobre la vela, la mayor parte del aire que escapa del vaso lo hace durante esta fase de aproximación, por lo que apenas se observará burbujeo en el agua del plato una vez cubierta la vela. En cambio, si el vaso se coloca rápidamente, la mayor parte del aire que escapa lo hará una vez cubierta la vela y dará lugar a la formación de burbujas en el agua.

En ambos casos escapará, aproximadamente, la misma cantidad de aire. La única diferencia es que en el primer caso el aire escapa antes de cubrir la vela y es mucho más difícil de detectar.

Procedimiento. (1) Se coloca muy lentamente el vaso sobre la vela encendida; transcurridos unos minutos, se mide la altura de la columna de agua que ha entrado al vaso. (2) Se repite el experimento, pero colocando rápidamente otro vaso (idéntico al primero) sobre una segunda vela.

Resultado. En el primer caso no se observa burbujeo en el agua del plato, mientras que en el segundo se aprecian claramente las burbujas que forma el aire que escapa del vaso, una vez cubierta la vela. No obstante, el agua alcanza una altura similar en ambas situaciones.

Información adicional. Si se lleva a cabo el experimento con un vaso lleno de humo (procedente, p. ej., de una barra de incienso), se podrá observar que sale humo del vaso cuando se aproxima a la llama de la vela. Este fenómeno se aprecia mucho mejor utilizando una pequeña máquina de niebla, un dispositivo que vaporiza en su interior una mezcla de agua y glicerina que, al entrar en contacto con el aire atmosférico (más frío), genera una niebla blanca y densa (figura 4).



Figura 4. Secuencia de imágenes de la colocación de un vaso lleno de vapor condensado de glicerina y agua sobre una vela. Como este vapor es más denso que el aire, escapa del vaso cuando se invierte; no obstante, si la vela está apagada (arriba) escapa mucho menos vapor del vaso que cuando la vela está encendida (abajo).

Combustión de la parafina sin que escape aire del vaso

Objetivo. Comprobar que la combustión, por sí sola, produce una caída de presión dentro del vaso mucho menor que la debida al escape de aire. Para realizar este experimento se utilizarán velas *mágicas*.

Fundamento. La reducción del número de moles de gas dentro del vaso, debida a la combustión de la parafina, es mucho menor que la ocasionada por el escape de aire, ya que el consumo de oxígeno está parcialmente compensado por la formación de dióxido de carbono y vapor de agua (ecuación 1).

Procedimiento. (1) Para mejorar el ajuste de la boca del vaso sobre el plato, se pone una lámina de papel absorbente dentro del plato. (2) Se enciende la vela y, a continuación, se sopla sobre la llama para apagarla momentáneamente. (3) Antes de que se reencienda la vela, se cubre rápidamente con el vaso presionándolo fuertemente hacia abajo para evitar, en la medida de lo posible, que salga aire del vaso al reencenderse la vela (figura 5). (4) Una vez que la vela se apague definitivamente, se libera el vaso y se mueve ligeramente para permitir la entrada de agua a su interior. Finalmente, se mide la altura que alcanza la columna de agua.

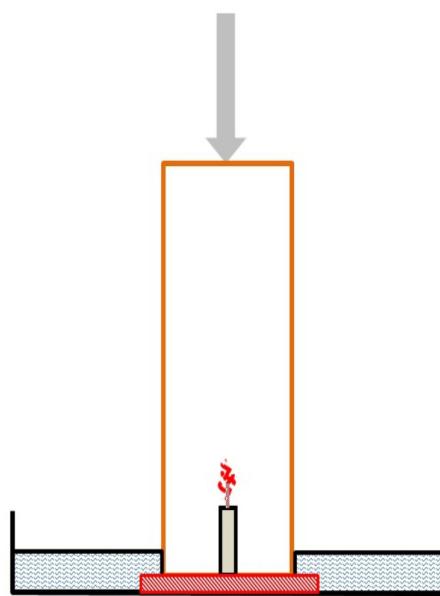


Figura 5. Para minimizar el escape de aire, se pone una lámina de papel absorbente dentro del plato y se presiona fuertemente el vaso hacia abajo.

Resultado. El volumen de agua que entra al vaso es, aproximadamente, la tercera parte del que entra en el experimento con velas ordinarias.

Información adicional. En realidad, en este experimento también escapa una pequeña cantidad de aire mientras se coloca el vaso sobre la vela recién apagada.

Escape de aire minimizando la influencia de la combustión de la parafina

Objetivo. Comprobar que la caída de presión que ocurre en el vaso se debe, sobre todo, al aire caliente que escapa del vaso cuando se aproxima a la llama de la vela.

Fundamento. Como la combustión de la parafina (ecuación 1), apenas reduce la presión dentro del vaso, si se consigue calentar el aire del vaso a una temperatura similar a la que lo hace la llama de la vela, la altura de la columna de agua absorbida será similar a la del experimento ordinario (Krnal y Glazar, 2001).

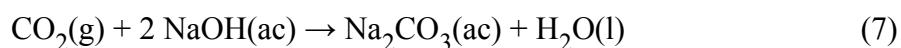
Procedimiento. Se aproxima lentamente el vaso invertido hacia la vela y, cuando esté muy cerca de la llama, en lugar de cubrir la vela, se desvía el vaso y se coloca sobre el agua.

Resultado. El volumen de agua que entra al vaso, cuando la temperatura de su interior vuelva a ser igual a la temperatura ambiente, es prácticamente igual (en realidad, ligeramente inferior) al que entra cuando se cubre la vela con el vaso.

En la combustión de la parafina se forman dióxido de carbono y agua

Objetivo. Poner de manifiesto que los productos principales de la combustión de la parafina son dióxido de carbono y vapor de agua.

Fundamento. Si el dióxido de carbono, que se forma en la combustión de la parafina, se hace reaccionar con una disolución de hidróxido sódico (ecuación 7), ocurrirá una disminución adicional del número de moles de gas dentro del vaso (IUB, 2017):



En consecuencia, la presión dentro del vaso será todavía menor que en el experimento ordinario, donde la masa de dióxido de carbono que se disuelve en el agua es despreciable (Birk y Lawson, 1999), y la columna de agua que entra al vaso tendrá mayor altura.

Por otra parte, la cantidad de vapor de agua que condensa sobre las paredes del vaso depende de la temperatura y de la humedad relativa en su interior. Como dicha humedad es muy alta, debido al agua que se evapora dentro del vaso tras cubrir la vela, la mayor parte del vapor de agua formado en la combustión de la parafina condensará sobre las paredes del vaso al disminuir la temperatura dentro del vaso cuando se apague la llama de la vela.

Procedimiento. (1) Se preparan 150 cm³ de una disolución de hidróxido sódico al 5 %. (2) Se sustituye el agua del plato por la disolución de hidróxido sódico y se cubre la vela encendida con un vaso o una probeta. (3) Pasados 30 minutos desde que se apague la vela, se mide la altura de la columna de disolución de hidróxido sódico que ha entrado a la probeta.

Resultado. Inmediatamente después de apagarse la llama, en la parte superior del vaso se apreciará la condensación del vapor de agua formado en la combustión. Por otra parte, la altura que alcanza la disolución dentro del recipiente es, entre un 15 % y un 20 %, superior a la que alcanza el agua en el experimento ordinario.

Información adicional. Para apreciar mejor el incremento de altura de la columna de líquido, es conveniente utilizar una probeta de 100 cm³ en lugar de un vaso. El hidróxido sódico se puede sustituir por sosa cáustica (hidróxido sódico de menor pureza que el usado habitualmente en el laboratorio), obteniéndose el mismo resultado.

Este experimento es algo más complejo que los anteriores y exige la utilización de guantes y gafas de seguridad, ya que la disolución de hidróxido sódico es corrosiva. Una vez finalizado el experimento, la disolución resultante se puede eliminar por el desagüe ordinario, diluyéndola con dos partes de agua.

Porcentaje de oxígeno que consume la vela antes de apagarse

Objetivo. Hacer una estimación de la fracción de oxígeno que consume una vela cuando se cubre con un recipiente. Para minimizar errores se utilizará un recipiente transparente que tenga una capacidad comprendida entre 1 L y 2 L.

Fundamento. A medida que se quema la vela, disminuye la concentración de oxígeno dentro del recipiente y aumentan las concentraciones de dióxido de carbono y vapor de agua, por lo que se reduce progresivamente la presencia de oxígeno en el entorno de la llama. Llega un momento en el que, a pesar de que dentro del recipiente queda más de la mitad del oxígeno que contenía inicialmente (Birk y Lawson, 1999; Rudel, 2010), la combustión no puede sostenerse y la vela se apaga.

Si se supone que la vela se quema a una velocidad constante y está constituida fundamentalmente por parafina (C₂₅H₅₂), se puede hacer una estimación de la masa *m* de parafina que reacciona midiendo el tiempo *t* que tarda en apagarse la vela, tras ser cubierta con un recipiente:

$$m \simeq r \cdot t \quad (8)$$

donde *r* es la rapidez media (expresada en gramos/segundo) a la que se consume la vela. La velocidad a la que se quema una vela, al aire libre y en ausencia de corrientes de aire, varía ligeramente en función de su diámetro, de su composición y de las condiciones ambientales. En el caso de una vela de cumpleaños, la rapidez media a la que se consume es, aproximadamente, 1,0·10⁻³ g/s (para una temperatura ambiente comprendida entre 20 °C y 30 °C).

El número de moles de oxígeno n_{O_2} que consume la vela durante el tiempo t que está encendida se puede calcular, de forma aproximada, a partir de la estequiometría de la reacción de combustión de la parafina (ecuación 1):

$$n_{O_2} = 38 n_{C_{25}H_{52}} = 38 \frac{m}{M} = 38 \frac{r \cdot t}{M} \quad (9)$$

donde $n_{C_{25}H_{52}}$ y m representan, respectivamente, el número de moles y la masa de parafina que reaccionan mientras está encendida la vela, y M es la masa molar de la parafina.

El número de moles de oxígeno $n_{O_2,0}$ que contiene inicialmente el recipiente con el que se cubre la vela, se puede obtener mediante la ecuación de los gases

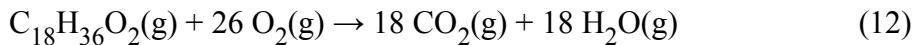
$$n_{O_2,0} = 0,21 n_{\text{aire}} = 0,21 \frac{p_0 V}{RT} \quad (10)$$

donde 0,21 es la fracción molar del oxígeno en el aire y p_0 , V , R y T son, respectivamente, la presión atmosférica, el volumen del recipiente, la constante de los gases y la temperatura ambiente.

Conocido el número de moles de oxígeno que consume la parafina y el número de moles de oxígeno disponibles en el interior del recipiente, se puede estimar la fracción f de oxígeno consumido por la vela:

$$f = \frac{\text{nº mol de O}_2 \text{ consumidos}}{\text{nº mol de O}_2 \text{ disponibles}} = \frac{n_{O_2}}{n_{O_2,0}} = \frac{38 m/M}{0,21 p_0 V/RT} = \frac{38 r t R T}{0,21 p_0 V M} \quad (11)$$

Generalmente, las velas ordinarias están constituidas por una mezcla de parafina ($C_{25}H_{52}$, $M = 352,5$ g/mol) y de ácido esteárico ($C_{18}H_{36}O_2$, $M = 284,4$ g/mol) (Wisniak, 2001), siendo la reacción de combustión de este último



Si se conoce la proporción de ácido esteárico en la vela, se puede refinar algo más el cálculo de la fracción de oxígeno consumido por la vela. Así, por ejemplo, si la vela que se usa tiene un 20 % de ácido esteárico, el valor de f vendrá dado por:

$$f = \frac{n_{O_2, C_{18}H_{36}O_2} + n_{O_2, C_{25}H_{52}}}{n_{O_2,0}} = \frac{(0,2 \cdot 26 r t) / 284,4 + (0,8 \cdot 38 r t) / 352,5}{0,21 p_0 V / RT} \quad (13)$$

Procedimiento. (1) Se enciende una vela y se aguardan unos segundos hasta que arda en un régimen estable. Utilizando una balanza que aprecie, al menos, décimas de gramo y un cronómetro, se mide la masa Δm de la vela que se quema durante un período de tiempo Δt de cinco minutos y se calcula la rapidez media, $r = \frac{\Delta m}{\Delta t}$, a la que disminuye la masa de la vela. (2) Se mide el volumen V del recipiente con el que se va a cubrir la vela y se calcula el número de moles de oxígeno $n_{O_2,0}$ que contiene a presión y temperatura ambiente (p_0 y T), $n_{O_2,0} = 0,21 \frac{p_0 V}{RT}$. (3) Se coloca la vela encendida en una bandeja con agua, se cubre con el recipiente y se mide el tiempo t que tarda en apagarse la llama. (4) A partir de los datos experimentales obtenidos para p_0 , r , t , T y V , se calcula la fracción de oxígeno consumido por la vela.

Resultado. Dependiendo de las condiciones experimentales (características de la vela, temperatura ambiente, humedad relativa del aire, volumen y forma del recipiente, etc.), la fracción f de oxígeno que consume la vela estará comprendida entre 0,20 y 0,35.

Información adicional. En la combustión de los componentes de la vela se forman, además de dióxido de carbono y agua, otras sustancias tales como carbono elemental, monóxido de carbono, benceno y otros compuestos orgánicos volátiles. No obstante, como estos productos son minoritarios, apenas influyen sobre el consumo de oxígeno de la vela.

Dado que siempre escapa una cierta cantidad de aire del recipiente al colocarlo sobre la vela (entre un 10 % y un 15 % del total, para recipientes con una capacidad comprendida entre 1 L y 2 L), el número de moles de oxígeno disponibles es inferior al calculado mediante la ecuación de los gases ($n_{O_2,0} < 0,21 p_0 V/RT$). Debido a esta razón, el valor real de la fracción de oxígeno consumido por la vela puede ser hasta un 20 % mayor que la estimada con este método.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que, a medida que disminuye la concentración de oxígeno dentro del recipiente, disminuye la velocidad de la reacción de combustión, por lo que la masa de parafina que reacciona es menor que la estimada a partir de la velocidad con que arde la vela al aire libre (con una concentración de oxígeno constante). En consecuencia, el número de moles de oxígeno consumidos será inferior al calculado ($m < r \cdot t \rightarrow n_{O_2} < 38 rt/M$) y la estimación del valor de f estará afectada de un error por exceso.

En la práctica, la desviación por exceso en el valor de la fracción de oxígeno consumido por la vela, causada por la disminución de la velocidad de la reacción de combustión, se compensa parcialmente con la desviación por defecto, debida a no considerar el escape de aire, de tal modo que los valores de f que proporciona este método ($f < 0,35$) están razonablemente de acuerdo con los obtenidos empleando otros métodos (Beyler, 2016). De hecho, si se introduce en el recipiente un detector electrónico de oxígeno, se puede comprobar que la llama de la vela se apaga cuando el porcentaje en volumen de oxígeno está comprendido entre el 15 % ($f = \frac{0,21 - 0,15}{0,21} = 0,29$) y el 17 % ($f = 0,20$).

Alternativamente, este experimento se puede llevar a cabo midiendo directamente la variación de la masa de la vela utilizando una balanza que aprecie, al menos, centésimas de gramo y un recipiente con una capacidad comprendida entre 15 L y 25 L (para que la variación de la masa sea lo más grande posible). Obviamente, deberán adoptarse las precauciones oportunas para evitar que la balanza entre en contacto con el agua.

Conclusiones

El hecho de que el procedimiento y los materiales utilizados en este experimento sean muy sencillos, puede transmitir la impresión de que es fácil de interpretar, pero, como se ha mostrado en los apartados anteriores, la realidad es muy diferente.

Aunque la mayoría de los estudiantes y graduados universitarios concluyen correctamente que el agua entra al vaso porque la presión en su interior ha disminuido por debajo de la presión atmosférica, la causa principal de esta caída de presión –el escape de aire caliente desde el vaso– pasa desapercibida para la práctica totalidad de los observadores. En su lugar, intentan explicar la caída de presión como consecuencia del consumo de oxígeno en la combustión de la parafina, pero sin tener en cuenta que la formación de dióxido de carbono y vapor de agua compensa, en gran medida la reducción en el número de moles de oxígeno.

Por otra parte, la idea de que la vela se apaga cuando se agota el oxígeno está ampliamente extendida, independientemente de la formación académica de los observadores (desde estudiantes de secundaria hasta posgraduados universitarios e, incluso, algunos profesores).

Teniendo en cuenta estas premisas, pensamos que, cuando se lleve a cabo este experimento, debe llamarse la atención de los estudiantes sobre aquellos aspectos esenciales que suelen pasar inadvertidos, tales como el burbujeo que ocasiona el aire que escapa del vaso inmediatamente después de cubrir la vela, la extinción de la llama debido a la acumulación de dióxido de carbono en las proximidades de la misma, la variación en el número de moles de gas que ocasiona la combustión de la parafina, la condensación del vapor de agua formado en la combustión, los factores de los que depende dicha condensación, los cambios de temperatura que ocurren dentro del vaso, etc.

Adicionalmente, se propone la ampliación del experimento del vaso y la vela, incorporando ligeras variantes que permitan a los estudiantes confrontar sus explicaciones acerca del ascenso del agua cuando se apaga la vela, sobre todo, las relativas a la influencia de la combustión sobre la caída de presión y las razones por las que se apaga la llama de la vela.

Las características que reúne este experimento (sencillez, rapidez, reproducibilidad, seguridad, fácil adaptación al alumnado de diferentes niveles, etc.) lo convierten en un recurso didáctico muy útil, no solo para ilustrar los efectos de la presión atmosférica, sino también para profundizar en el estudio de las reacciones de combustión, de la composición de la atmósfera o del comportamiento de los gases.

Referencias bibliográficas

- ACS (2023). *Flame out carbon dioxide experiment*. American Chemical Society. <https://www.acs.org/education/whatischemistry/adventures-in-chemistry/experiments/flame-out.html>
- Beyler, C. (2016). Flammability limits of premixed and diffusion flames, Cap. 17, pp. 529-553 en *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*. 5^a ed., M. J. Hurley, D. Gottuk, J. R. Jr. Hall, K. Harada, E. Kuligowski, M. Puchovsky, J. Torero, J. M. Jr. Watts, C. Wieczorek (Eds.). Gaithersburg: SFPE. <http://doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- Birk, J. P. y Lawson, A. E. (1999). The Persistence of the Candle-and-Cylinder Misconception. *Journal of Chemical Education*, 76(7), 914-916. <https://doi.org/10.1021/ed076p914>
- Bueno Garesse, E. (2004). Aprendiendo química en casa. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 1(3), 45-51.
- Campanario, J. M. y Otero, J. C. (2000). Más allá de las ideas previas como dificultades de aprendizaje: las pautas de pensamiento, las concepciones epistemológicas y las estrategias metacognitivas de los alumnos de ciencias. *Enseñanza de las Ciencias*, 18(2), 155-169. <https://ensciencias.uab.cat/article/view/v18-n2-campanario-otero/1943>
- Cooper, E. K. (1963). *Discovering Chemistry*. London: Butterworth.

- Crujeiras Pérez, B. y Jiménez Aleixandre, M. P. (2015). Desafíos planteados por las actividades abiertas de indagación en el laboratorio: articulación de conocimientos teóricos y prácticos en las prácticas científicas. *Enseñanza de las Ciencias*, 33(1), 63 - 84. <https://ensciencias.uab.cat/article/view/v33-n1-crujeiras-jimenez/1469-pdf-es>
- Fang, C. H. (1998). A Simplified Determination of Percent Oxygen in Air. *Journal of Chemical Education*, 75, 58-59. <https://doi.org/10.1021/ed075p58>
- García-Rodeja Gayoso, I. y Sesto Varela, V. (2016). ¿Por qué sube el agua? Un estudio comparativo del desempeño en el uso de pruebas. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 13(2), 215-229. http://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2016.v13.i2.01
- Girault, I., D'Ham, C., Ney, M., Sánchez, E. y Wajeman, C. (2012). Characterizing the experimental procedure in science laboratories: a preliminary step towards students experimental design. *International Journal of Science Education*, 34(6), 825-854. <http://doi.org/10.1080/09500693.2011.569901>
- IUB (2017). *Sodium Hydroxide and Carbon Dioxide*. Indiana University Bloomington. <https://www.chem.indiana.edu/wp-content/uploads/2017/11/17-3-Sodium-Hydroxide-and-Carbon-Dioxide.doc>
- Krnel, D. y Glazar, S. A. (2001). Experiment with a Candle without a Candle. *Journal of Chemical Education*, 7, 914. <https://doi.org/10.1021/ed078p914>
- Matute, S., Iglesias, P., Gutiérrez, O., Capote, T., Rojas, J. y Durán, R. (2013). Representaciones mentales en el aprendizaje del concepto combustión. *Educere*, 17(57), 309-318. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=35630152015>
- Peckham, G. D. (1993). A new use for the candle and tumbler myth. *Journal of Chemical Education*, 70(12), 1008-1009.
- Roth K. (2003). Alle Jahre wieder - die Chemie der Weihnachtskerze. *Chemie in unserer Zeit*, 37, 424-429. <http://doi.org/10.1002/ciuz.200390086>
- Que, R., Sha, S., Shen, L. y Xiong, Y. (2020). Changes of CO₂, concentration and heat illustrate why the flame is extinguished in the candle-and-cylinder experiment. *Journal of Chemical Education*, 97(4), 1195-1197. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00833>
- Riveros, H. G. (2012). Popular Explanations of Physical Phenomena: Broken Ruler, Oxygen in the Air and Water Attracted by Electric Charges. *European Journal of Physical Education*, 3, 52-57. <http://eujournal.org/index.php/EJPE/article/view/111>
- Rudel, D. I. (2010). *Science Myths Unmasked: Exposing misconceptions and counterfeits forged by bad science books (Vol. 1: Earth and Life Science)*. Gadflower Press. ISBN: 9781935776024.
- Sesto Varela, V. y García-Rodeja Gayoso, I. (2017). Estudio sobre la evolución de los modelos mentales de estudiantes de 4º de ESO cuando observan, reflexionan y discuten sobre la combustión. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 14(3), 521-534. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2017.v14.i3.02
- Shakhshiri, B. Z. (1985). Ch. 6.13 Combustion of a candle in air, en *Chemical Demonstrations: A Handbook for Teachers of Chemistry*, Vol. 2. Madison: University of Wisconsin Press.

- Tomás Serrano, A. y García Molina, R. (2015). *Experimentos de Física y Química en tiempos de crisis*. Murcia: Editum. ISBN: 978-84-84-16038-96-1.
- Tomás-Serrano, A., y García-Molina, R. (2023). Una contribución para dilucidar las principales causas del ascenso de gua en un vaso invertido sobre la llama de una vela. *Anales de Química*, 119 (2), 180-188.
- Vázquez Dorrío, J. B., García Parada, E. y González Fernández, P. (1994). Introducción de demostraciones prácticas para la enseñanza de la Física en las aulas universitarias. *Enseñanza de las Ciencias*, 12 (1), 63-65. <https://ensciencias.uab.cat/article/view/v12-n1-vazquez-garcia-gonzalez/2393>
- Vera, F., Rivera, R. y Núñez, C. (2011). Burning a Candle in a Vessel, a Simple Experiment with a Long History. *Science & Education*, 20, 881-893.
- Watson J. R., Prieto T. y Dillon J. S. (1997) Consistency of students' explanations about combustion. *Science Education*, 81(4), 425-443.
- Wisniak, J. (2001). Candle – A light into the past. *Indian Journal of Chemical Technology*, 7, 319-326.