

Descripción de experiencias innovadoras para el trabajo experimental, gráfico, teórico o tecnológico y para la resolución de problemas.

Mientras el agua hierve, el nitrógeno^{1/4} ¿qué?

Ana Martínez Vázquez y Mayo Villagrán Muñoz¹

Abstract

The experiment that we present and discuss in this work is not new, but it is very interesting. It can be used as a demonstration of phase changes, with any group of students. The results of the experiment are spectacular and the explanation is not easy. For this reason, it can be used to stimulate analysis abilities in students. In order to find an explanation, students must think about models or representations using thermodynamics' concepts.

In the experiment, boiling water coexists in the same box with freeze nitrogen. The only materials that are necessary are liquid nitrogen, water, a hermetic box and a pump. If materials are not available, it is possible to get a video that we've set up with the demonstration. If you are interested, send an e-mail to anal7mig@yahoo.com.mx and we will forward it to you.

Resumen

Vayámonos haciendo a la idea de que una sorpresa siempre inspira, pero que es mayor la motivación cuando además se busca una explicación. En este trabajo presentamos una demostración para ilustrar algunos cambios de fase que se logran al modificar la presión. Se presenta un experimento que, aunque no es novedoso, sí es interesante y aporta elementos valiosos que podrán utilizarse para trabajar el tema de los cambios de fase con cualquier grupo de estudiantes. A través de un hecho tan sorprendente como difícil de interpretar, se espera que los alumnos y las alumnas generen ideas y representaciones que les permitan entender lo que sucede en el experimento, con base en sus conocimientos de la termodinámica y los cambios de fase.

Con esta demostración hicimos una película que no podemos incluir en el artículo. Se trata de hervir agua al mismo tiempo que se congela nitrógeno, modificando la presión. El experimento se puede realizar en todos los laboratorios de docencia que tengan una bomba para hacer vacío. Para los que no cuenten con este equipo ponemos a su disposición la

película, pero aun sin ella, lo que se sugiere es plantear la idea sin la demostración, para que los estudiantes la analicen y busquen una explicación. El ejemplo que se describe es en sí mismo interesante y útil como material de apoyo para el desarrollo de las habilidades necesarias en el entendimiento de los cambios de fase utilizando los diagramas correspondientes, lo que permite aplicar la termodinámica en la predicción de los fenómenos.

Esta experiencia se puede vivir con estudiantes de bachillerato y universitarios, ya sea como parte del tema o como una forma de trabajarlo y recordarlo (a nivel posgrado). A quien le resulte atractiva la idea y desee tener la película, sólo tiene que escribirnos a la siguiente dirección electrónica: anal7mig@yahoo.com.mx. A vuelta de correo le enviaremos el material.

Introducción

Esto de hacer experimentos sorprendivos en el salón se ha convertido en un espectáculo para grandes y chicos. Entre los profesores es como los actos de magia entre los magos, porque todos queremos tener el único truco, el más sorprendente, el nuevo, el que no sea conocido por otros. Igual que a los magos, a los profesores también nos gusta tener la primicia y sorprender. Eso de llegar con un experimento para asombrar y escuchar que alguien comenta "immm!, ése ya lo conozco", es igual que cuando uno está contando un chiste y alguien dice: "¡Ah sí!, ya me lo sé". ¿A poco no? Como que uno se desanima a seguir y se corta la inspiración. Pero a uno le queda el recurso de que, si bien el experimento es el mismo, lo que se puede sacar de él es diferente. Ahí tenemos una forma de mostrar nuestro ingenio y con eso sorprender a los demás.

Las experiencias de cátedra, o experimentos demostrativos en el salón de clases, tienen la particularidad de ser llamativos, sorprendentes y divertidos (Shakashiri, 1983). Por eso son un buen recurso para motivar a nuestros estudiantes, e incluso para incitarlos entre nosotros los profesores. También son buenos para divulgar el conocimiento; sin embargo, en cada caso la experiencia debe tener un objetivo claro por alcanzar al terminar la actividad. Si lo que queremos es divulgar que con la química se producen cambios bonitos, basta con hacer algo como un volcán o el diablito de alcohol para cumplir con la

¹Instituto de Investigaciones en Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México.

Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México.

Recibido: 7 de diciembre de 2006; **aceptado:** 4 de julio de 2007.

tarea. No obstante, cuando lo que se desea es que el estudiante aprenda, lo que se tiene que hacer es elaborar una serie de actividades alrededor del experimento que lo lleven a obtener una conclusión, a desarrollar un razonamiento que lo conduzca a obtener algún tipo de conocimiento.

En este caso presentamos un experimento muy sorprendente publicado previamente en la literatura (Sutton, 1938), que sugerimos para asombrar, y con base en la sorpresa, trabajar el tema de cambios de fase con los estudiantes. Para lograr el sobresalto entre los alumnos y las alumnas, primero es necesario que ellos tengan cierta información, que la entiendan y la asimilen como propia. Sólo así, cuando sepan lo que ocurre, se podrán quedar estupefactos. Es por esta razón que en este artículo presentamos al inicio lo que llamamos “la preparación”, que incluye información que deberá tener presente el estudiante, en algún momento previo a la demostración, y algunas actividades que sugerimos se realicen para tener el marco de referencia del experimento antes de realizarlo. Los estudiantes deberán estar familiarizados con los efectos de la presión en los cambios de fase y con alguna de las formas de obtener el nitrógeno líquido, y posteriormente se realizará la demostración.

Primero se sugiere plantear la pregunta ¿qué esperas que pase? Después se presentan los resultados que generalmente no coinciden con sus predicciones, con lo cual se espera que se sorprendan y se motiven para entender. Esperamos que la sorpresa los motive lo suficiente y los lleve a buscar el esclarecimiento de lo que observan. Para entender tendrán que utilizar su ingenio, sus conocimientos y su imaginación. Ése es el objetivo principal de este trabajo, que los estudiantes observen un experimento inesperado, como es el hecho de ver al mismo tiempo y en el mismo recipiente al agua hirviendo y al nitrógeno congelándose, y se pregunten de manera espontánea el porqué. Se trata de que ellos sientan la necesidad de encontrar la explicación por querer entender qué es lo que sucede, no porque el profesor o la profesora se los solicite. Así creemos que se puede lograr un aprendizaje más significativo, aunque esto último todavía está por demostrarse y no forma parte de los objetivos de este trabajo. Aquí sólo presentamos material de apoyo para estudiar los cambios de fase, que puede utilizarse con estudiantes del bachillerato y universitarios, incluyendo a los de posgrado, con el fin de recordar y trabajar este importante tema.

La preparación

Antes de hacer el experimento es necesario que el estudiante recuerde las propiedades del agua y del nitrógeno molecular. El agua es líquida a temperaturas por encima de 0°C y presión ambiental (alrededor de una atmósfera), y está formada por dos átomos de hidrógeno unidos a uno de oxígeno. El nitrógeno molecular en las mismas condiciones es un gas, que está formado por dos átomos de nitrógeno unidos con un triple enlace. Es una molécula muy poco reactiva que forma parte de la atmósfera y, de hecho, es su principal componente. Respiramos nitrógeno todo el tiempo, y tomamos agua todos los días, y es indispensable para mantener la vida en el planeta como la conocemos hoy día. Esto es muy importante y por eso lo vamos a repetir. CUANDO LA TEMPERATURA ES MAYOR QUE CERO Y MENOR QUE 100°C LA PRESIÓN ES LA ATMOSFÉRICA EN LA TIERRA,¹ sin importar si estamos a nivel del mar o en regiones a gran altura, EL NITRÓGENO ES GASEOSO Y LO RESPIRAMOS MIENTRAS QUE EL AGUA ES LÍQUIDA Y NOS LA TRAGAMOS. Eso es lo que se tiene que tener en mente todo el tiempo durante la actividad.

Como introducción al trabajo se puede decir que para obtener el agua basta con abrir la llave. La podemos tener sólida, líquida o gaseosa con tan sólo cambiar la temperatura y sin necesidad de modificar la presión. También se logra el cambio de fase modificando la presión, pero la forma más simple de lograrlo es variando la temperatura y manteniendo la presión atmosférica constante. Esto lo hacemos todos los días cuando preparamos un café o hielos. Por otro lado, trabajar con el nitrógeno no es tan sencillo porque en condiciones ambientales es un gas, y para tenerlo en forma líquida o sólida no basta con hacer modificaciones pequeñas de la temperatura manteniendo la presión constante. No podemos hacer nitrógeno líquido o sólido en la casa, mientras

¹ La presión atmosférica en la Tierra no es la misma en cualquier lugar, ya que depende de la altitud; sin embargo, para efectos de este experimento esas pequeñas variaciones no intervienen. Con los estudiantes se puede hacer la aclaración, indicando que, sin importar si estamos a nivel del mar o en la cima del Everest, el agua es líquida y el nitrógeno es gaseoso cuando la temperatura es mayor que 0°C. Consideramos que la presión ambiental está alrededor de 1 atm, y no puntualizamos sobre los cambios de la presión atmosférica con la altitud porque no son relevantes para el experimento ni para su explicación.

que sí podemos tener al agua en sus diferentes estados de agregación con solamente una estufa y un refrigerador.

La forma de obtener nitrógeno líquido es lo primero que investigarán los estudiantes. En resumen, el proceso consiste en aumentar la presión para comprimir el gas hasta que cambia a la fase líquida. La obtención de nitrógeno líquido es a través de un proceso de expansión-compresión complicado e interesante, que tendrán que investigar los estudiantes y entenderlo, como un ejercicio previo que les permitirá familiarizarse con los cambios de fase producidos por la expansión y la compresión de la materia. La idea principal a la que deberán llegar es que cuando se aumenta la presión de los gases, éstos se licuan. El modelo molecular que lo explica dice que, al aumentar la presión, disminuye la distancia promedio entre las partículas que conforman el sistema, con lo cual aumentan las interacciones hasta que se da el cambio de estado. Las fuerzas de atracción se vuelven importantes y responsables de la existencia de los estados sólido o líquido.

Es importante que los estudiantes investiguen cómo se obtiene el nitrógeno líquido. En el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM hay un equipo que licua el nitrógeno. Esencialmente lo que se hace es tomar aire de la atmósfera y primero quitarle las partículas suspendidas. Para separar el nitrógeno de los demás componentes del aire, se hace una compresión aumentando la presión hasta alcanzar 9.6 atmósferas y bajando la temperatura hasta 105 K. En estas condiciones se obtiene aire líquido. Después se disminuye la presión a 3.5 atmósferas y la temperatura a 93 K, con lo cual el nitrógeno se gasifica y los otros componentes permanecen en fase líquida.

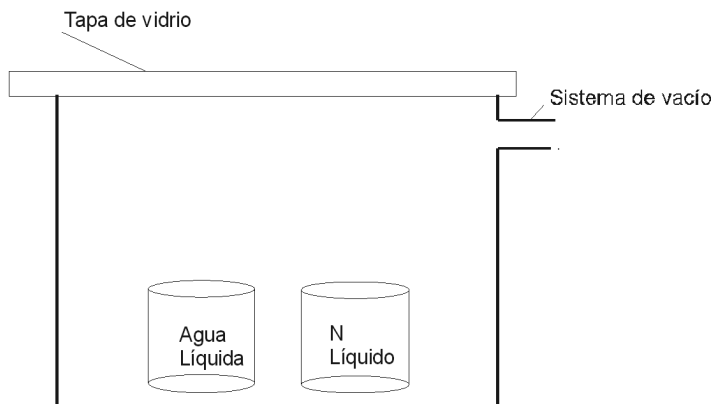


Figura 1. Esquema de arreglo experimental.

Esto es el equivalente a una “destilación”. Los líquidos se separan cuando se someten a distintas presiones. En la destilación, los líquidos se separan porque tienen distintas temperaturas de ebullición. El nitrógeno gaseoso sube por una columna y el aire líquido se queda en el fondo del recipiente. El nitrógeno que sube alcanza una salida en la parte superior de la columna de separación. Al salir se aumenta la presión y se disminuye la temperatura hasta licuarlo, con lo que se obtiene nitrógeno líquido relativamente puro. Se reporta que contiene 0.5% de oxígeno mezclado, pero para fines de este experimento consideraremos que es nitrógeno prácticamente puro. Esto que acabamos de exponer es solamente un breve resumen de la forma en que se obtiene, que puede servir como guía, pero no es el objetivo de este artículo exponer este tema con detalle. Lo principal es que el estudiante reconozca que una forma de licuar gases es aumentando la presión. Esto es, al aumentar la presión el nitrógeno gaseoso se licua.

Ahora explicaremos el experimento, incluyendo las preguntas que sugerimos presentar con sus respectivas respuestas y observaciones.

El experimento, las preguntas y algunos comentarios^{1/4}

En una cámara de vacío cerrada herméticamente con una tapa superior de vidrio —para que se pueda observar lo que ocurre dentro— y que contiene una salida para extraer el aire, se colocan dos frascos limpios de alimento para bebé. Uno contiene agua líquida y el otro nitrógeno líquido. Con una bomba mecánica se extrae el aire de la cámara hasta que la presión baja abruptamente como se muestra esquemáticamente en la figura 1.

Después de esta descripción, se pregunta:

- ¿A qué temperatura están el agua y el nitrógeno líquido al inicio del experimento?
- ¿A qué presión crees que se encuentra el agua al inicio y durante el experimento?
- ¿A qué presión crees que se encuentra el nitrógeno líquido al inicio y durante el experimento?
- ¿Qué crees que le va a pasar al agua y qué le ocurrirá al nitrógeno conforme la presión del aire que está adentro de la cámara disminuya?

Como respuesta a la primera pregunta es común pensar que ambos líquidos están a la misma temperatura porque comparten el mismo espacio, pero eso es falso. El agua está a una temperatura que le permite estar como líquida, y el nitrógeno también,

pero no es igual. Si estuvieran a la misma temperatura, el nitrógeno no podría estar líquido (como ocurre en condiciones ambientales, cuando respiramos nitrógeno y tragamos agua). El asunto importante es que el nitrógeno está líquido pero dejándolo en esas condiciones de temperatura y presión pronto se convertirá en gas porque ese estado de agregación es su estado de equilibrio a 0°C y a presión ambiental.² El nitrógeno está muy frío porque está líquido y el agua está a temperatura ambiente, pero esa respuesta no es la de los estudiantes. De hecho se observa que el nitrógeno está en ebullición, con lo cual sabemos que se encuentra a la temperatura de ebullición del nitrógeno a una atmósfera (a nivel del mar), es decir, 77.4 K. El agua está a 298 K y en equilibrio térmico con el exterior. Como parte de las actividades es recomendable hacer esta reflexión con ellos.

Contrario a lo que pasa con la temperatura, la presión al interior de la cámara es la misma en ambos casos. Las dos sustancias, antes de sacar el aire y después, estarán sujetas a la misma presión, primero de 1 atmósfera (si se está al nivel del mar) y después de menos. El valor de la presión a la que están sujetos los dos líquidos es el mismo para los dos, y para todo lo que se encuentre adentro de la cámara experimental.

Para la tercera pregunta, lo más común es que los estudiantes universitarios³ digan que el nitrógeno se va a convertir en un gas y que el agua estará en ebullición. Esto porque recuerdan que el nitrógeno es uno de los gases que estamos respirando y suponen que al bajar presión el nitrógeno se va a “evaporar” más, sobre todo porque acaban de investigar que para obtener nitrógeno líquido a partir del gas, lo que se hace es aumentar la presión. Si disminuyo la presión la respuesta obvia es que volveré a obtener un gas.

² Nótese que llamamos presión ambiental al conjunto de valores que se presentan en cualquier punto del planeta de manera natural, sin intervención del hombre. El nitrógeno es gaseoso en cualquier parte de la Tierra, bajo cualquier condición de temperatura y presión ambiental. Así evitamos en el texto definir todo el tiempo la idea de los cambios de presión debidos a la altitud.

³ Esta experiencia se ha trabajado con estudiantes de licenciatura y posgrado de la Facultad de Química de la UNAM, pero no con la idea de hacer una investigación educativa. La posibilidad de hacer investigación educativa sobre la forma en que aprenden los estudiantes este tema y las ventajas de estudiarlo a través de esta actividad está presente para el futuro.

El experimento del agua que entra en ebullición cuando disminuye la presión del aire es más conocido⁴ y de hecho se hace con matraces que se calientan y enfrían. Es probable que los estudiantes a los que va dirigida esta actividad recuerden el concepto de temperatura de ebullición y lo expliquen como la temperatura a la cual la presión de vapor es igual a la presión atmosférica. Con esto pueden deducir que al bajar la presión, el agua entrará en ebullición porque la presión externa es igual a la presión de vapor. Al calentar el agua aumentamos la presión de vapor hasta que es igual a la externa y se llega a la temperatura de ebullición. En este caso no calentamos y por lo tanto no aumentamos la presión de vapor. Lo que hacemos es disminuir la presión externa hasta que se iguala con la presión de vapor del agua y así comienza la ebullición. La respuesta de los estudiantes se puede guiar si se comenta lo de la presión de vapor. Para el caso del nitrógeno por ahora no es necesario dar más explicaciones.

Con estas ideas claras, se describe lo siguiente, que en realidad es lo que sucede.

Conforme se va reduciendo la presión por ir sacando el aire con la bomba, se observa que el nitrógeno se “congela” y al poco tiempo el agua “hierve”. Así se obtiene, al mismo tiempo, el agua en ebullición y el nitrógeno congelado. Cuando se apaga la bomba y lentamente se deja entrar aire, la presión aumenta, el agua deja de estar en ebullición y el nitrógeno se descongela y vuelve a estar líquido. Si repites el experimento sucede siempre lo mismo. Esto es lo que está en la película.

Este experimento es sorprendente porque el agua con una temperatura por encima de los 0°C y en condiciones de presión ambiental se encuentra líquida y el nitrógeno está en estado gaseoso. Lo sorprendente es que no hagan lo mismo, hervir. Ambos son líquidos al principio, a ambos se les baja la presión externa a la que están sujetos y por tanto ambos deberían hacer lo mismo. Para que los estudiantes entiendan lo extraordinario en su justa proporción, hay que enfatizar que el nitrógeno es el que respiramos porque forma parte del aire y de hecho es su componente principal. El nitrógeno que respiramos se congela mientras que el agua que nos bebemos hierve. ¿Por qué?

⁴ Al menos se conoce entre los estudiantes de la Facultad de Química de la UNAM, porque suele ser una actividad que realizan en los laboratorios.

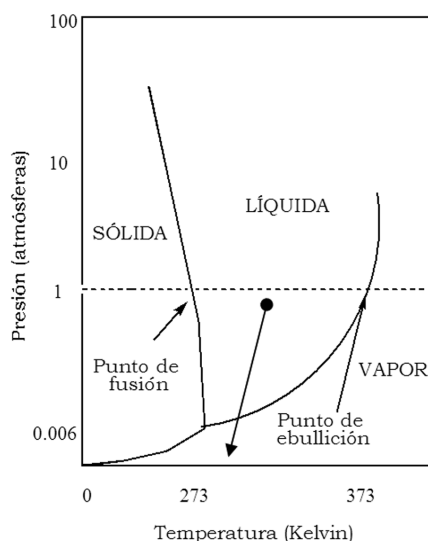


Figura 2. Diagrama cualitativo de fases del agua.

Después de describir el experimento se espera que los estudiantes generen o apliquen un modelo que les permita explicarlo. La clave de la respuesta está en los diagramas de fases del agua y del nitrógeno.

La explicación

La explicación no resulta tan fácil. Podemos empezar con el análisis del agua, que es más sencillo. Para explicar cambios de estado de agregación cuando se modifica la temperatura o la presión, generalmente se utilizan los diagramas de fase. Para el agua, el diagrama de fase se muestra en la figura 2.

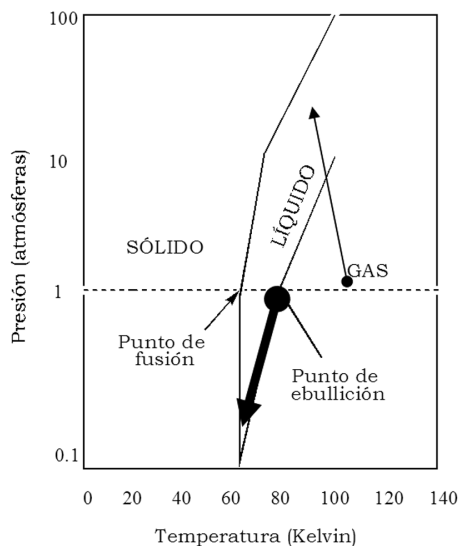


Figura 3. Diagrama cualitativo de fases del nitrógeno.

Con base en el diagrama se puede explicar la idea de que, al bajar la presión dada una temperatura constante, podemos pasar de la fase líquida a la fase gaseosa o a la fase sólida, dependiendo del valor de temperatura seleccionado. Sabemos que la ebullición de las sustancias ocurre cuando la presión de vapor se iguala con la presión externa. Lo que hacemos es disminuir la presión externa dentro del recipiente, hasta que iguala la presión de vapor que tiene el agua en esos momentos y se observa la ebullición. En realidad el experimento no se hace a temperatura constante, porque el sistema se enfría al bajar la presión. La presión se baja abruptamente con lo cual se produce una descompresión adiabática. Los cambios de temperatura y presión se pueden ver como se indica con la flecha en el diagrama de fases. Se pasa de la fase líquida a la fase gaseosa, cuando disminuye la presión y también la temperatura. La flecha comienza en la línea de una atmósfera y a 298 K porque esas son la presión y la temperatura iniciales del agua. Otro factor que contribuye a que baje la temperatura es la presencia del nitrógeno líquido que está en ebullición. Al hervir está extrayendo energía del entorno, con lo cual baja la temperatura del sistema.

Ahora veamos que ocurre con el nitrógeno. La figura 3 muestra el diagrama de fases del nitrógeno de manera esquemática.

El punto triple del nitrógeno, es decir, donde coexisten el líquido, el sólido y el gas, se encuentra a 0.123 atm y 63.15 K. El punto de ebullición a 1 atm se ubica en 77.4 K, mientras que el punto de fusión a la misma presión está en 63.3 K (Young, 1991). Al inicio del experimento, cuando la presión es de una atmósfera y el nitrógeno está en ebullición, la temperatura a la que se encuentra es 77.4 K. Nótese que a esta presión el nitrógeno es líquido en un intervalo de temperatura muy pequeño (alrededor de 14 K). Sólo para comparar pensemos que en el agua ese intervalo es de 100 K. Al disminuir la presión, igual que pasa con el agua, la temperatura también disminuye. Bajamos la presión y como consecuencia disminuye la temperatura. Como la presión disminuye, la temperatura de ebullición del nitrógeno también baja (igual que pasaba con el agua). Bajan la temperatura y la presión a lo largo de la línea de ebullición, hasta llegar al punto triple como se indica con la flecha gruesa en la figura 2. Como la presión sigue bajando, el nitrógeno se solidifica. Esto no le pasa al agua porque la presión en el punto triple es mucho más baja (0.006 atm). Las dos flechas en los distintos

diagramas son idénticas, porque las condiciones de temperatura y presión durante el experimento cambian de la misma forma para ambas sustancias.⁵ Con los mismos argumentos se puede explicar por qué se congela el nitrógeno.

Con el diagrama de fases experimental del nitrógeno o incluso con los datos de temperatura y presión de su equilibrio líquido-vapor, los estudiantes deberían de poderse explicar la forma en la que se obtiene el nitrógeno líquido. ¿Por qué necesito aumentar la presión y bajar la temperatura para que pase de la fase gaseosa a la líquida? Con el análisis del diagrama queda claro que también subiendo la presión y bajando la temperatura se realizó este cambio de fase, como se muestra con la flecha delgada que apunta hacia arriba en el diagrama.

Con respecto al nitrógeno líquido y sólido se pueden encontrar en la literatura distintas historias, útiles para analizar si los estudiantes han entendido los diagramas de fases y su utilidad. Los físicos que realizan investigaciones con sistemas en condiciones de altas presiones han conseguido someter al nitrógeno a presiones del orden del millón de veces la presión atmosférica (1,000,000 atm) y lo han convertido en un sólido semiconductor. ¿Por qué al aumentar la presión el nitrógeno también se puede convertir en sólido? Con historias como éstas se puede continuar con el uso del diagrama de fases para encontrar explicaciones.

Esta experiencia puede ser aprovechada por el docente para explicar o recordar con los estudiantes conceptos generales que se utilizan para entender los cambios de fase, como por ejemplo hervir, vaporizar, evaporar, volatilizar, solidificar, la idea del punto crítico y los equilibrios de fase. También puede utilizarse la experiencia para retar a los estudiantes que en principio ya manejan los conceptos y saben explicarlos, pero que no los han utilizado para predecir un resultado, ni tampoco para explicar un experimento inesperado.

⁵ Los diagramas de fase son sólo para condiciones de equilibrio. En este caso el nitrógeno no está en estado de equilibrio, por lo que formalmente no se podría utilizar el diagrama; el agua tampoco está exactamente en una situación de equilibrio entre otras cosas porque se está evaporando; sin embargo, podemos utilizar los diagramas para entender lo que ocurre. En condiciones de equilibrio no cambiará mucho nuestra explicación.

¿Un truco de magia?

Brujos, magos y hechiceros comparten el placer de sorprender, de manejar la realidad como ningún “normal” puede hacerlo y con eso dejarnos a todos turulatos. Los científicos podemos hacer lo mismo y con eso invitar a los “normales” a que se unan a nuestro clan. Hacer ciencia es divertido porque sorprende, porque cada día se puede encontrar algo nuevo pero sobre todo, porque nos permite entender. Este experimento salió por casualidad cuando buscábamos otras cosas. Uno de los estudiantes que observaba fue el que anunció que el nitrógeno estaba sólido y todos los demás nos quedamos pasmados. Como era la primera vez que para nosotros ocurría algo similar, desde nuestra perspectiva fuimos los descubridores del asunto, lo cual nos hizo tener un día divertido. Después tardamos mucho en encontrar una explicación. Tan placentero para nosotros fue el descubrir al nitrógeno sólido como el encontrar la razón de ser de lo que observábamos.

Lamentablemente el estudiante que lo vio con nosotros por primera vez no se quedó para encontrar la explicación, con lo cual su goce fue más pequeño que el nuestro. Brujos, magos, hechiceros, profesores y científicos compartimos el placer de ver y de mostrarle a la gente cosas nuevas y maravillosas. La diferencia entre ellos y nosotros es que para profesores y científicos el espectáculo no termina con la demostración porque siempre buscamos una explicación y en eso, en encontrar la respuesta, es donde encontramos el mayor éxtasis y el máximo placer. Ver el experimento nos divirtió el día... entenderlo nos llenó de alegría. ▀

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente apoyado por la DGAPA-UNAM, proyecto PAPIME No. EN107003.

Bibliografía

- Donnelly, B.L. & Jensen, H. Freezing Nitrogen: A Modification, *American Journal of Physics*, **36**(10) 919, 1968.
- Hunter, P.W.W ; Knoespe, S.L. & Parker, G.A. Cryophori, Hot Molecules, and Frozen Nitrogen (TD), *Journal of Chemical Education*, **71**(1) 67-68, 1994.
- Levine, I.N. *Fisicoquímica*. 3ª edición. McGraw Hill, México, 1991.
- Shakashiri, B.Z. *Chemical demonstrations*. Vol. 1. The University of Wisconsin Press, USA, 1983.
- Sutton, R.M. *Demonstration Experiments in Physics*. McGraw Hill, New York, 1938.
- Wild, R.L. & McCollum, D.C. Dramatic Demonstration of Change of Phase, *American Journal of Physics*, **35**(6) 540-541 (1967).
- Young, D.A. *Phase diagrams of the elements*. University of California, USA, 1991.