

Transiciones de fase, una propuesta didáctica



Eric Benjamín Téllez Ugalde

*Facultad de Ciencias, UNAM, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria,
C. P. 01000, México D.F.*

E-mail: erictellez@gmail.com

(Recibido el 5 de Marzo de 2010; aceptado el 17 de Octubre de 2010)

Resumen

El agua es una de las sustancias más abundantes en la Tierra y definitivamente la más influyente. El estado sólido del agua tiene varias características que no son comunes en el resto de las sustancias. De hecho el mismo estado sólido se puede encontrar en un total de 16 fases diferentes. El hielo se acomoda de distintas formas dependiendo de la presión y la temperatura formando cristales con diversas propiedades y diversas direcciones cristalinas. En gran medida, debido a estas propiedades del sólido del agua, la vida en el planeta fue posible. Las transiciones de fase es un tema muy común y fácil de entender; aquí se aborda con ejemplos poco conocidos y explicando las implicaciones planetarias, climáticas e incluso biológicas, específicamente del agua.

Palabras clave: Transiciones de fase, enseñanza de la física con aplicaciones a otras ciencias, enseñanza con ejemplos no cotidianos.

Abstract

The water is one of the most plentiful substances on Earth and definitely the most influential. The solid phase of water has many characteristics that are not common in other substances. Indeed, the solid phase has 16 different structural arrangements. Depend on pressure and temperature; the ice can arrange its molecules with different properties and several crystalline directions. Due to some of these properties, life in Earth was possible. Phase transitions is a very simple topic and very easy to understand; here it is explained with not so common examples and introducing the weather, planetary and biological implications, specifically from water.

Keywords: Phase transitions, teaching physics with applications in other sciences, teaching with uncommon examples.

PACS: 01.30.Ee, 01.40.eg, 01.40.ek, 01.40.gb.

ISSN 1870-9095

I. INTRODUCCIÓN

El hielo es agua sólida cristalizada, congelada. Es uno de los tres estados naturales del agua. El agua pura se congela a la altitud del nivel del mar a 0°C. El agua, junto con el galio, bismuto, ácido acético, antimonio y el silicio, es una de las pocas sustancias que al congelarse aumentan de volumen (es decir, que disminuye su densidad); la mayoría de las otras sustancias se contraen al congelarse. Esta propiedad evita que los océanos de las regiones polares de la Tierra se congelen en todo su volumen, puesto que el hielo flota en el agua y es lo que queda expuesto a los cambios de temperatura de la atmósfera.

El hielo es un mineral, y así como el agua, por ser el más ligero de todos, ocupa la mayor parte de la litosfera y precisamente esto es lo que ha hecho que la vida, como la conocemos en la Tierra tenga sus fundamentos en el agua.

El hielo se puede empaquetar en 16 formas diferentes dependiendo de la presión y la temperatura.

Generalmente nosotros sólo conocemos dos tipos de hielo, ya que para crear los otros tipos de hielo, es necesario utilizar técnicas experimentales avanzadas y estos tipos de

hielo no se encuentran en la naturaleza o muy rara vez lo hacen y ni si quiera en nuestro planeta. Se piensa que algunos de estos hielos pueden ser encontrados en las lunas de Júpiter.

II. DESARROLLO

A. Estructura del agua líquida

A presión atmosférica, las moléculas de agua se estructuran de manera tetraédrica, en virtud del enlace de hidrógeno. Por esto, las moléculas de agua se amontonan de manera compacta; por lo tanto, la densidad del hielo es menor que la del agua (917kg/m³). El cristal de hielo tiene una estructura hexagonal espaciada; dependiendo de la presión atmosférica el hielo se compacta de diferentes formas, dando lugar a los diferentes tipos de hielo que hoy conocemos [1].

El agua tiene una celda de forma tetraédrica, debido principalmente al dipolo magnético que hace que los ángulos entre el oxígeno e hidrógeno sean de aproximadamente 109°.

B. Tipos de hielo

En el hielo, como en la mayoría de los sólidos, las moléculas se acomodan en una formación ordenada. Sin embargo, dependiendo de las condiciones de presión y temperatura, es posible que adopten diferentes formas. A partir de 1900, Gustavo Tamman y posteriormente en 1912 Percy Bridgman hicieron experimentos sobre el hielo aplicándole diferentes presiones y temperaturas, y obtuvieron hielos diferentes con mayores densidades a la normal (posteriormente se encontraron muchos más tipos de hielo) [2]. Todas estas formas de hielo tienen estructuras más compactas o sea que se forman varias modificaciones alotrópicas o alotropos (diferentes formas de un elemento existentes en el mismo estado físico). Hasta el momento se conocen 16 tipos diferentes de hielos, aunque estructuralmente solo son 11, ya que hay estructuras repetidas, pero estas se juntan por enlaces de hidrógeno.

En forma natural, en la Tierra (dadas sus condiciones de presión y temperatura), solamente pueden existir dos tipos de hielo (hielo I y XI). Sin embargo, en otros planetas o en satélites, como el caso de Ganimedes (la luna más grande de Júpiter), en los que las condiciones de presión y de temperatura son diferentes, el hielo puede presentarse en otras formas, como es el caso del hielo II. En otros casos, la obtención de alguna forma es realmente difícil. En el 2009 se descubrió apenas una nueva forma de cristal de hielo, llamado hielo XV, el cual es antiferroeléctrico [2]. Al contrario, el hielo XI es ferroeléctrico.

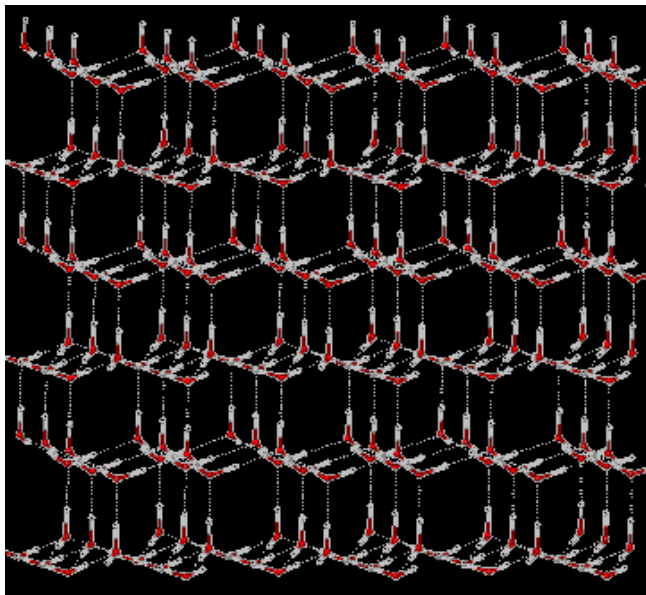


FIGURA 1. Estructura cristalina del hielo Ih.

C. Diagramas de fase

A continuación en las figuras 1-4, se muestran unos diagramas de fase que ilustran los diferentes tipos de hielos [3].

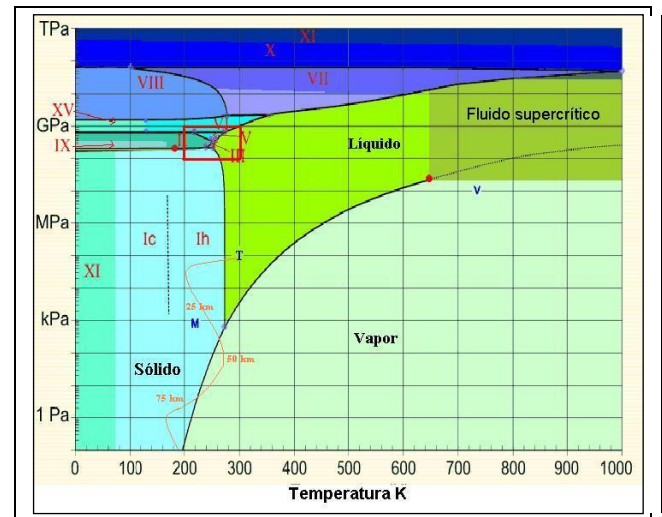


FIGURA 2. Diagrama de presión contra temperatura del agua. La T representa las condiciones normales de temperatura y presión en la superficie de la Tierra. Mientras que la M y la V representan así mismo, las de Marte y Venus respectivamente.

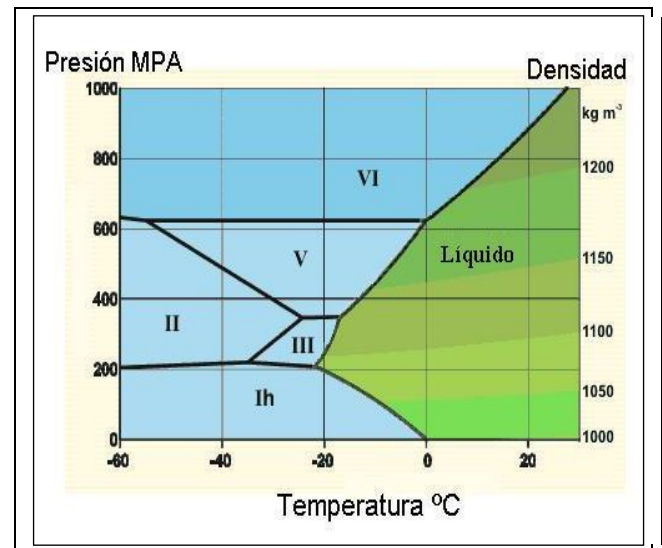


FIGURA 3. Aumento de la escala en el diagrama de presión contra temperatura. Bajando un poco la temperatura y aumentando un poco la presión podemos ver que hay varios tipos de hielo. De aquí que los glaciares tienen diversos tipos de movimientos, colores y composiciones dependiendo de la profundidad.

D. Descenso crioscópico

El descenso crioscópico es la reducción del punto de fusión de un disolvente puro por la presencia de solutos. Es directamente proporcional a la molalidad, lo que hace que sea más importante para solutos iónicos, como los que predominan en el agua de mar, que para los no iónicos. El fenómeno tiene importantes consecuencias en el caso del agua de mar, porque la respuesta al enfriamiento intenso del agua del océano, como ocurre en el invierno de las regiones polares, es la separación de una fase sólida flotante de agua pura en forma de hielo. Es así como se forma la banquisa en

torno a la Antártida o al océano Ártico, como un agregado compacto de hielo puro de agua, con salmuera llenando los intersticios, y flotando sobre una masa de agua líquida a menos de 0°C (hasta un límite de $-1,9^{\circ}\text{C}$ para una salinidad del 3,5%).

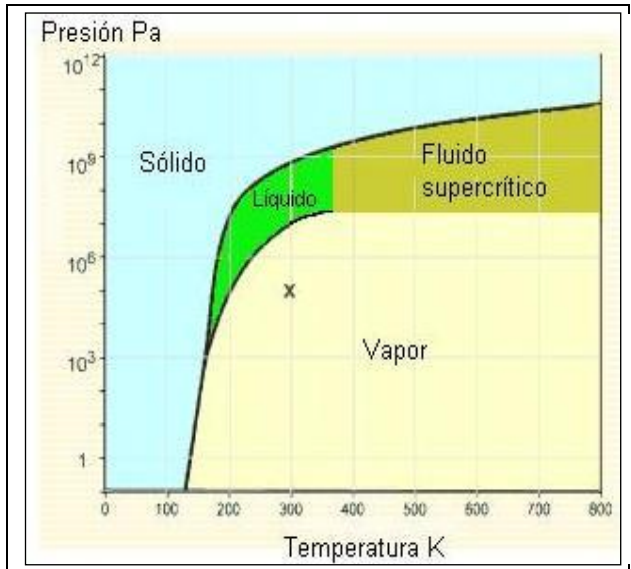


FIGURA 4. Diagrama presión contra temperatura, si el agua se comportara de acuerdo a su baja masa atómica. Si esto ocurriera, no sería posible la tecnología debida a la incompresibilidad del agua, por ejemplo.

E. Fusión eutéctica

En las condiciones terrestres y durante el invierno es frecuente agregar sal al hielo para que se funda. De hecho, lo que se funde no es el hielo, sino un compuesto de hielo y sal llamado "eutético". Cuando la sal NaCl (Na^+ , Cl^-) entra en contacto con el hielo, los iones se arreglan alrededor de las moléculas de agua, que son polares ($\text{H}_2\delta^+$, $\text{O}\delta^-$) y viene a formar un compuesto $(\text{H}_2\text{O})\cdot(\text{NaCl})$. Cuando se respetan las proporciones exactas (alrededor del 23% de sal en masa), se tiene un producto que se comporta como producto puro (particularmente, hay una temperatura de fusión constante) y que se califica de "eutética". La temperatura de fusión de esta eutéctica es de alrededor de -21°C . Si la proporción de sal es inferior a esta relación, se da una mezcla agua-eutéctica, que se funde a una temperatura superior (entre -21°C y 0°C). Si la proporción de sal es superior, se tiene una mezcla sal-eutéctica que también se funde a una temperatura superior.

Así, en teoría, sería posible impedir la formación de hielo hasta los -21°C . En la práctica, es imposible dosificar la cantidad de sal que debe usarse.

F. Anomalías importantes del agua

1. El agua tiene un punto de fusión inusualmente alto.
2. El agua tiene un punto de ebullición inusualmente alto.

3. El agua tiene un punto crítico inusualmente alto.
4. El agua sólida existe en una amplia variedad de estructuras amorfas y cristalinas estables (y metaestables).
5. La estructura del agua líquida cambia a altas presiones.
6. El agua superenfriada tiene dos fases y un segundo punto crítico cerca de -91°C .
7. El agua líquida se superenfriará fácilmente pero se cristaliza con dificultad.
8. El agua líquida existe a muy bajas temperaturas y se congela calentándola.
9. El efecto Mpemba: el agua caliente se puede congelar más rápido que el agua fría.
10. La densidad del hielo se incrementa con la temperatura (hasta 70K).
11. Agua líquida tiene una alta densidad que se incrementa al calentarla.
12. La superficie del agua es más densa que el agua debajo.
13. La presión reduce la temperatura de máxima densidad.
14. El agua tiene un bajo coeficiente de expansión.
15. La expansión térmica del agua se reduce cada vez más a bajas temperaturas (se vuelve negativa).
16. La expansión térmica del agua se incrementa con el incremento de la presión.
17. El agua tiene una inusual baja compresibilidad.
18. La compresibilidad cae así como la temperatura aumenta hasta $46,5^{\circ}\text{C}$.
19. Hay un máximo en la relación entre compresibilidad y temperatura.
20. La velocidad del sonido se incrementa con la temperatura hasta 74°C .
21. La velocidad del sonido debería mostrar un mínimo.
22. El índice de refracción del agua tiene un valor máximo justo debajo de 0°C .
23. El cambio en el volumen de líquido a gas es muy grande.
24. El calor de fusión del agua tiene un máximo a -17°C .
25. El agua tiene más del doble de capacidad calórica que el hielo o el vapor.
26. La capacidad calórica específica (PC y VC) es inusualmente alta.
27. La capacidad calórica específica PC tiene un mínimo a 36°C .
28. La capacidad calórica específica PC tiene un máximo a -45°C .
29. La capacidad calórica específica VC tiene un máximo.
30. La conductividad térmica del agua es alta y se incrementa hasta un máximo cerca de 130°C .

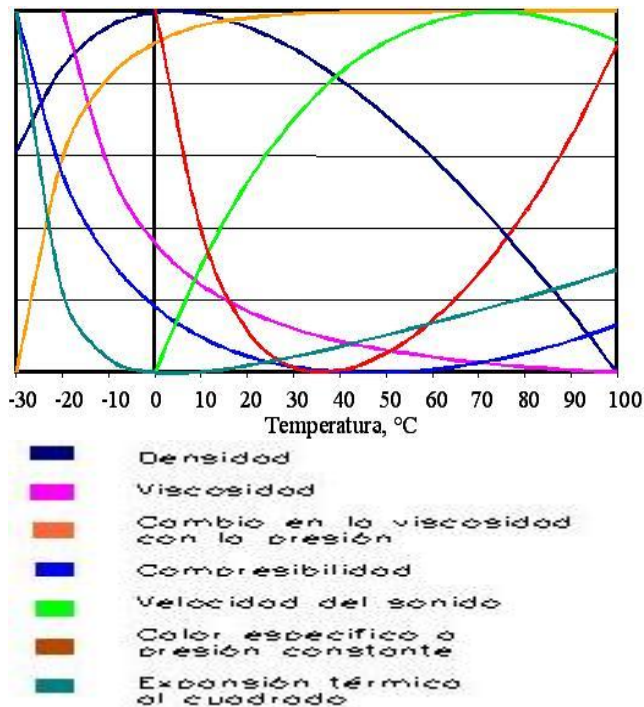


FIGURA 5. Algunas de las propiedades anómalas del agua líquida relacionadas con la temperatura. Se ha escalado entre el valor máximo y el mínimo.

G. El papel del hielo en la estructura de la Tierra

De acuerdo con Shumskii [4], las propiedades específicas del hielo ordinario le dan un lugar especial dentro de los minerales. El hielo es el más ligero y también el más frío de todos los minerales; Su gravedad específica y su calor de fusión difieren de los otros minerales. Las leyes de distribución del hielo en la tierra se derivan de estas diferencias básicas.

Los principales elementos químicos y sus componentes son distribuidos zonalmente sobre nuestro planeta: los más pesados se encuentran en las profundidades y los más ligeros en la superficie, simplemente por gravedad; no importa cuál sea el origen de los planetas, a través del tiempo se acomodaron según su peso específico. De acuerdo con esta ley, el agua en todos sus estados de agregación se comprime no más que el 8% del peso de las capas superiores de la costra Terrestre y 75% del peso de la biosfera. El H₂O congelada se expande siendo más ligera que el agua líquida, flotando en ella, lo cual es de un significado especial, ya que el agua líquida y la vida orgánica puede existir bajo la capa aislante de hielo en clima frío. Sólo hay algunas otras sustancias que tiene el mismo comportamiento como: el galio, bismuto, ácido acético, antimonio y el silicio. De esta forma, de todos los minerales, no solamente sólidos sino también líquidos, el hielo, por su peso, es el más concentrado en la superficie.

Si examinamos la Tierra como un simple, inicialmente gaseoso, cuerpo fisicoquímico, podemos distinguir cinco etapas de temperatura de diferenciación geoquímica:

1. La división en una fase gaseosa y tres fases líquidas (aleaciones ferrosas, sulfurosas, y silicosas)

2. Cristalización fraccionaria de los magmas de silicio.
3. Cristalización de soluciones acuosas.
4. Procesos en los cuales se incluye la participación de organismos.
5. Formación del hielo.

Así que, el hielo es un miembro extremo de una serie específica de minerales y obedece las leyes generales de la gravitación, térmicas y químicas para la diferenciación de la materia terrestre. Difiere en que es el más ligero y el que tiene la más baja temperatura y por esta razón es el más superficial y es uno de los minerales con más simples en su composición química capaz de formar grandes masas de roca monomineralica.

Subjetivamente, desde el punto de vista del hombre, la principal cualidad del hielo, es que está en la última etapa de formación de minerales en la secuencia térmica, situada más allá de la etapa de formación de minerales organógenos. El proceso de la vida orgánica, el cual requiere la presencia de agua líquida, está situado entre las etapas de formación de hielo y la formación de todos los otros minerales de altas temperaturas. El hielo es el medio más extraño para la vida orgánica, y una considerable acumulación de éste, rompe completamente el curso normal de todos los procesos en la biosfera.

Como la última etapa de la división geoquímica de la secuencia térmica, la etapa de formación de hielo difiere de las anteriores etapas de cristalización en que los magmas y las soluciones acuosas se comprimen a una comparativamente pequeña parte de la materia terrestre. El volumen del hielo sobre la Tierra, más de 20 millones de km³, se comprime solamente cerca del 1.7% del total del volumen de agua en la superficie terrestre, sin contar el agua en la litosfera. Sin embargo, el hielo es el componente sólido más ampliamente distribuido en la superficie de la Tierra y en la atmósfera. Solamente los glaciares cubren una área de 16 millones de km² de la superficie terrestre, incluyendo el continente antártico, con un área más grande que la de Europa; el hielo cubre un área de 3.1% de la superficie terrestre y un 10.8% de la superficie continental. Más o menos la misma área está ocupada por permafrost, el cual contiene hielo en forma de hielo cimentado y varios cuerpos con cristales de hielo. Si consideramos la nieve estacional y las capas de hielo, podríamos decir que entre 30% y 50% de la superficie de la Tierra esta cubierta por el hielo; además de que parte del año más del 50% de la superficie continental está cubierta por hielo.

De esta forma podemos darnos cuenta de que el hielo puede estar presente en cualquier parte de la Tierra, si no en la superficie entonces en la atmósfera. El hielo forma la verdadera envoltura de la Tierra llamada criosfera. Está situada entre la zona de alta temperatura de la alta estratosfera y la ionosfera en la zona de alta temperatura de la costra terrestre con un total de 10km de ancho.

H. El papel del agua y el hielo en la evolución de la vida.

Es evidente que debido a las propiedades del agua, la vida se desarrolló en torno a ella. No podemos afirmar que si fuera otra la sustancia con propiedades aún más benévolas

para el surgimiento de la vida, ésta hubiera preferido esa sustancia por encima del agua. Pero algo si es claro, de este sistema solar, el único planeta con vida conocida es éste, aquel en el que el agua predomina por encima de cualquier otra sustancia mineral, en cualquiera de sus estados de agregación y con cualquier composición o mezcla.

El hielo por su parte, debido a algunas de sus propiedades, no solamente ha favorecido la proliferación de organismos, sino que, llegado el momento debido a causas naturales climáticas, ha protegido a estos de su desaparición. Ofreciendo resguardo dentro de los mares, que de otra forma se congelarían irremediablemente y junto con ellos todo el planeta, dejando con pocas posibilidades a la vida como la conocemos.

Es un hecho de entre tantos los que se necesitaron y se necesitan para que surjan organismo por la recombinación de los diferentes elementos, pero en definitiva el agua junto con sus propiedades únicas, además de su vasta acumulación en la superficie terrestre le dieron un impulso sin comparación.

III. CONCLUSIONES

Es increíble que, el agua, siendo el material más extenso del planeta y que, teniendo la importancia para la vida y para el ser humano que se le conoce; y además por estas razones sea también el más estudiado, aún hoy se pueda obtener información nueva y se pueda hacer investigación de frontera sobre este material.

Las propiedades del agua son realmente sorprendentes y pueden ser explotadas desde muchos puntos de vista para la enseñanza de bachillerato o secundaria, ya sea en el laboratorio o en el aula.

Hervir agua, hacer hielo e inclusive ponerle sal al hielo para mantener fríos los botes del helado de sabores, son procesos cotidianos conocidos y a veces imperceptibles. Recurriendo a todos estos elementos (y muchos otros), podemos ejemplificar al alumno sin recurrir siquiera al laboratorio cuando no nos sea posible. También de esta forma se introduce al estudiante a los descubrimientos más recientes, que de hecho ocurren día a día en la ciencia, siendo que algunos de ellos tienen gran importancia y valor para el ser humano.

En su mayoría, los estudiantes no tienen gusto por la ciencia, principalmente debido a falta de motivación. La motivación no es sólo una condición indispensable para que se dé un aprendizaje exitoso, además se tiene la tarea de despertar y afianzar motivos duraderos, y esto concierne también al maestro [5]. Por ello se proponen ejemplos, unos cotidianos y otros de investigación de frontera, explicando sus valiosas aportaciones a otros campos de la ciencia como la biología, la geología, la química, la astronomía, e inclusive, aunque no abordado en este trabajo, su presencia en el arte y en los deportes.

Finalmente hay que resaltar que toda motivación siempre debe ser dirigida hacia interpretar y entender los procesos naturales, ya que de otra forma se pone de manifiesto una imagen de la física o química en el aula propia de épocas pasadas (como el activismo científico) [6] y esto podría resultar en una concepción engañosa de la ciencia actual.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al M. en C. Sergio Hernández Zapata, del Taller de fluidos de la Facultad de Ciencias de la UNAM la asistencia técnica y el apoyo prestado durante la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/ice/ice.htm>, consultado el 15-Nov-09
- [2] Hobbs, P. V., *Ice Physics*, (Clarendon Press., Oxford, 1974).
- [3] <http://www1.lsbu.ac.uk/water/index.html>, consultado el 15-Nov-09.
- [4] Shumskii, P. A., *Principles of structural glaciology*, (Dover, New York, 1964).
- [5] Aebli, H., *Factores de la enseñanza que favorecen el aprendizaje autónomo*, (Narcea Ediciones, Madrid, 2001).
- [6] Jiménez-Liso, M. R. y De Manuel Torres, E., *El regreso de la química cotidiana: ¿Regresión o innovación?*, Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas **27**, 257 (2009).