

El impacto de la fusión de los icebergs en el nivel del mar

José Domingo Villarroya Villamor¹ y Daniel Zuazagoitia Rey- Baltar²

¹Departamento de Didáctica de la Matemática y las Ciencias Experimentales. Escuela de Magisterio de Bilbao. Universidad del País Vasco. España. txomin.villarroya@ehu.es

²Departamento de Química Analítica. Universidad del País Vasco. daniel.zuazagoitia@ehu.es

[Recibido en junio de 2014, aceptado en octubre de 2014]

Contrariamente a la creencia, muy extendida, de que la fusión de las grandes masas de hielo a la deriva en el océano no repercute en un aumento del nivel del mar, lo cierto es que el deshielo de icebergs, barreras de hielo e incluso de la banquisa tiene, en el actual contexto de calentamiento global, un impacto nada despreciable en el nivel de los océanos. Se presenta a continuación una revisión de este fenómeno y se propone un experimento ilustrativo que puede resultar útil para ofrecer una experiencia directa relativa al impacto que sobre el nivel del mar tiene la fusión del hielo flotante en el océano.

Palabras clave: Calentamiento global, nivel del mar, densidad, principio de Arquímedes, experimento ilustrativo.

The impact of melting icebergs on sea level

The idea that the melting process of large masses of ice that drift in the oceans has zero impact on the sea level is a very widespread belief. However, the truth is that in the current global warming situation, the melting of icebergs, ice shelves and sea ice, does have a significant impact on sea level. The following is a revision of this phenomenon as well as an illustrative experiment which can be useful to understand the impact that melting of icebergs has on sea level.

Key words: Global warming, sea level, density, Archimedes principle, iceberg.

Introducción

La repercusión que la fusión del hielo flotante tiene en la elevación del nivel del mar resulta ser un fenómeno que en no pocas ocasiones aparece obviado y muy a menudo se considera, erróneamente, que el deshielo de las grandes masas de hielo flotante, como los icebergs, tiene un impacto nulo en el aumento del nivel del mar (Jenkins & Holland, 2007; Lan, 2010).

Este trabajo repasa la cuestión del impacto que la fusión de masas de hielo, como la banquisa, las barreras de hielo o los icebergs, tiene en el aumento del nivel del mar. Se aborda este tema porque ofrece una excelente oportunidad para estimar la complejidad de los procesos naturales y también, para abordar de una manera contextualizada aspectos teóricos del curriculum, tales como el principio de Arquímedes, los estados de la materia o el concepto de densidad.

Se detalla también una experiencia de laboratorio útil para ilustrar la relación que existe entre la fusión de las masas de hielo que flotan en los océanos y el nivel de mar. Este diseño se presenta de manera que pueda ser fácilmente reproducido en el contexto escolar, incluso en los casos en los que no se dispone de material de laboratorio.

“Me estoy fundiendo”

El 5 de junio del 2006 el Departamento de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio del Gobierno Vasco celebraba el Día Mundial del Medio Ambiente publicando un anuncio en los periódicos de la Comunidad Autónoma Vasca en el que, junto con la imagen de un gran

iceberg flotando en el mar, se presentaba el eslogan “*Me estoy fundiendo*”¹. A través de este anuncio se intentaba enviar un mensaje de alarma en torno al calentamiento global. Con este fin, en el anuncio se aludía al hecho de que la fusión del voluminoso bloque de hielo que aparecía en la imagen contribuiría a aumentar el nivel del mar, y que este incremento finalmente incidiría en el litoral de la Comunidad Autónoma Vasca.

La conexión que el anuncio planteaba entre deshielo de iceberg y el aumento del nivel del mar provocó una airada respuesta en diversos medios de comunicación impresa y a través de Internet². Las críticas se fundamentaban en la supuesta falta de rigor científico en el que habían incurrido los responsables de la campaña al no haber entendido el principio de Arquímedes y la conclusión que de éste parece derivarse: el deshielo del iceberg debería tener un impacto cero en el nivel del mar.

Aunque el fundamento de estas críticas resultaría correcto en el caso de, por ejemplo, un cubito de hielo flotando en un vaso de agua del grifo, lo cierto es que no resultaban adecuadas para juzgar la imagen y el eslogan que se planteaba en la campaña aludida. Las críticas obviaban, precisamente, un aspecto esencial en la comprensión del fenómeno del impacto que la fusión del hielo a la deriva tiene sobre el nivel del mar, el hecho de que las densidades del agua de mar y la del agua proveniente del deshielo del iceberg son diferentes. Esta omisión llevó a juzgar erróneamente el cartel publicitario anteriormente aludido.

El impacto que el deshielo de los icebergs en el nivel del mar

Obviar la diferencia de densidades que existe entre el agua marina y el agua dulce proveniente del deshielo de los icebergs lleva a la errónea conclusión de que el deshielo de las grandes masas de hielo que flotan en los océanos tiene un impacto nulo en la elevación de nivel de agua en los océanos.

Para comprobar esta afirmación, considérese la diferencia entre el volumen de agua dulce originada tras la fusión del hielo (V_f) y el volumen de hielo sumergido anterior a la fusión (V_s):

$$\Delta V = V_f - V_s$$

El valor de (V_f) puede ser calculado teniendo en cuenta que la masa del iceberg no variará durante su deshielo, por lo que la masa total del iceberg m_i y la correspondiente al agua dulce en estado líquido proveniente de la fusión del bloque de hielo (m_f) deberán ser iguales. De lo anterior se deduce que $V_t \cdot \rho_h = V_f \cdot \rho_w$ ⁽¹⁾; donde ρ_w y ρ_h las densidades del agua dulce y del hielo, respectivamente.

Por otro lado y atendiendo al segundo principio de la dinámica, los módulos del peso del iceberg (P) y del empuje vertical y hacia arriba que éste sufre (E) son también iguales. En consecuencia se entiende que $V_t \cdot \rho_h = V_s \cdot \rho_m$ ⁽²⁾; siendo V_t el volumen total del iceberg, ρ_h la densidad del hielo, V_s el volumen de la parte sumergida del iceberg y ρ_m la densidad del agua de mar.

¹La imagen está disponible en la siguiente dirección web:

http://www.osanet.euskadi.net/contenidos/informacion/klima_aldaketa/eu_9997/adjuntos/cartel.pdf

²Ver por ejemplo, las siguientes referencias:

<http://magonia.com/2006/06/07/el-gobierno-vasco-contra-principio-arquimedes/>

http://elpais.com/diario/2006/06/24/paisvasco/1151178008_850215.html

http://www.elcorreo.com/vizcaya/pg060607/prensa/noticias/Cartas_OPI_VIZ/200606/07/VIZ-OPI-220.html

Considerando las igualdades (1) y (2), el volumen del líquido producido por la fusión del iceberg queda definido por la siguiente expresión:

$$V_f = V_s \cdot \frac{\rho_m}{\rho_w}$$

En síntesis, la diferencia entre el volumen final que tendrá el líquido proveniente del deshielo y el volumen de la parte de hielo sumergida que el iceberg tenía antes de fundirse se corresponde con la siguiente expresión:

$$\Delta V = V_f - V_s = V_s \cdot \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} - 1 \right)$$

Se concluye que el volumen del hielo sumergido de un iceberg será igual al volumen del líquido producido por su derretimiento (es decir, $\Delta V=0$) solamente en el caso de que el líquido del deshielo y el líquido en el cual éste se disuelve tengan la misma densidad.

Esta sería la situación de un cubito de hielo fundiéndose en un vaso de agua o la de una masa de hielo de agua dulce derritiéndose en un lago. Sin embargo, en el océano, y considerando $\rho_m=1026 \text{ kg/m}^3$ y $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$ (a 4°C), el incremento del volumen no sería igual a cero. Más bien al contrario, el volumen del agua de deshielo será un 2,6% mayor con relación al volumen de hielo que estaba sumergido ($\Delta V=0,026 \cdot V_s$).

El caso de la banquisa

La superficie de los océanos polares tiene una pérdida neta de energía a lo largo del ciclo anual y, como consecuencia, grandes extensiones de océano se transforman en un manto helado conocido como *banquisa* (Holland, 2013).

Podría pensarse que en la medida que la banquisa está formada agua marina congelada, el deshielo no revertido de esta capa de hielo debería tener un impacto cero sobre dicho nivel. Sin embargo lo cierto es que durante el proceso de congelación del agua marina la sal resulta ser excluida de los cristales de hielo, en un proceso que se conoce como exclusión de la salmuera (Vrbka, & Jungwirth, 2005).

Este fenómeno de importantes repercusiones en el medio natural se relaciona con el hecho de la marcada diferencia que agua líquida y hielo presentan en lo referente a la capacidad para disolver sales inorgánicas como NaCl. De esta manera, mientras el agua líquida es capaz de disolver cantidades molares de sales inorgánicas (la solubilidad del NaCl es $359 \text{ g}\cdot\text{litro}^{-1}$ o $6,14 \text{ moles}\cdot\text{litro}^{-1}$), el hielo apenas si logra aceptar cantidades en un rango micromolar, precisamente porque los iones resultan ser excluidos de las estructuras moleculares ordenadas que conforman el hielo.

Esta exclusión de la sal durante el proceso de formación de la banquisa tiene dos consecuencias importantes. Por un lado, un efecto colateral interesante relacionado con la formación de masas de agua densas por la mayor concentración de sal cuyo origen está, precisamente, en la exclusión de la sal durante la congelación del agua de mar (Shcherbina, Talley, & Rudnick, 2004). Por otro lado, y en lo que respecta más directamente a la cuestión de la densidad del líquido procedente del deshielo de la banquisa, se acepta que éste es menos denso que el agua de mar ($1007 \text{ kg}\cdot\text{m}^3$, según el trabajo de Noerdlinger y Brower, 2007), aunque también se ha constatado que la cantidad de inclusiones de salmuera en la banquisa resulta ser una característica extremadamente variable y sujeta a factores tales como la edad y grosor del hielo y la salinidad del líquido circundante.

De modo que el deshielo no reversible de la banquisa sí tiene un efecto en el nivel del agua del mar. Con todo este impacto resulta ser claramente inferior a por ejemplo, el que genera la fusión de las plataformas de hielo originadas por el deslizamiento de grandes masas de hielo continental en el océano y cuya masa total se estima 10 veces mayor que la resultante de la congelación de la superficie marina.

Un experimento ilustrativo

A continuación se describe una experiencia que puede resultar útil para llevar a cabo una práctica en torno a la cuestión de cómo influye el deshielo de los icebergs en el nivel del mar. En este caso se obviará el fenómeno de la exclusión de la salmuera ligado a la fusión de la banquisa.

Esta experiencia puede resultar también interesante para trabajar de una manera contextualizada algunos contenidos relacionados con el estudio de la materia y sus cambios, en la medida que están involucrados otros fenómenos y conceptos físicos tales como las nociones de masa, volumen y densidad; la variación de estas magnitudes durante los procesos de cambio de estado de agregación de la materia; el fenómeno de la flotación y por supuesto, el principio de Arquímedes y el segundo principio de la Dinámica.

Por otro lado, el procedimiento que se especifica evidencia claramente las diferencias entre las situaciones a comparar, de manera que estas diferencias resultan constatables sin necesidad de aparataje especial. El valor que tienen este tipo de aproximaciones cualitativas al estudio de los procesos físicos en el aprendizaje inicial de conceptos básicos de física es una cuestión subrayada por numerosos autores (Hewitt, 2011; Squire, Barnett, Grant, y Higginbotham, 2004; Shute, Ventura, y Kim, 2013; Taslidere, y Eryilmaz, 2012).

En línea con esta idea, se propone el empleo de recipientes de plástico de uso corriente en la vida cotidiana, de manera que la experiencia es adecuada también en contextos escolares en los que se cuente con escaso material de laboratorio. Por otro lado, se emplea agua destilada en lugar de agua dulce, y una disolución saturada de cloruro sódico en vez de agua de mar. El propósito es maximizar las diferencias de densidad entre agua dulce y salada, y lograr que los resultados sean evidentes incluso sin necesidad de mediciones. A este respecto, puede resultar interesante traer a colación el hecho de que cuanto mayor sea la diferencia entre la densidad del fluido sobre el que flota la masa de hielo y la densidad del líquido de deshielo, mayor será el incremento de volumen que se producirá tras la fusión de la masa helada (ver igualdad 4).

De esta manera, en la experiencia se emplean dos contenedores cilíndricos que albergan sendos bloques de agua destilada helada flotando, uno de ellos sobre agua destilada y el otro sobre una disolución saturada de cloruro sódico. La hipótesis de la que parte la experiencia, y acorde a lo expuesto en este trabajo, es que terminado el proceso de fusión del hielo el nivel de agua no subirá en el caso del bloque de hielo de agua destilada flotando sobre agua destilada pero sí lo hará en el caso de la masa helada de agua destilada que flota sobre la solución salina.

Materiales

Para llevar a cabo la experiencia se utiliza sal marina común y agua destilada, productos habituales en supermercados y comercios locales. También se necesitan cuatro botellas vacías de refrescos, dos de 1 L y otras dos de 2 L.

Conviene asegurarse de que el radio de las botellas sea lo más parecido posible, siempre teniendo en cuenta que la botella pequeña debe caber en la grande.

Procedimiento

Tras rellenar las botellas de 1 litro con agua destilada, teniendo la precaución de dejar un espacio que permita la expansión del agua durante su congelación, se guardan en el congelador durante 24 horas. Tras la congelación del agua, se abren con la ayuda de un cúter y se extraen los bloques de hielo.

Por otro lado, se recorta la parte superior de las botellas de dos litros de forma que los bloques de hielo que se extraen de las botellas más pequeñas quepan en ellas.

Una vez introducidos los bloques de hielo en las botellas, se rellenan hasta una marca prefijada, la primera con agua destilada y la segunda con una disolución saturada de sal marina (fotografías A_1 y B_1 en Figura 1). Ésta se ha preparado anteriormente, en recipiente aparte, mezclando aproximadamente 36 gramos de sal por cada 100 mililitros.

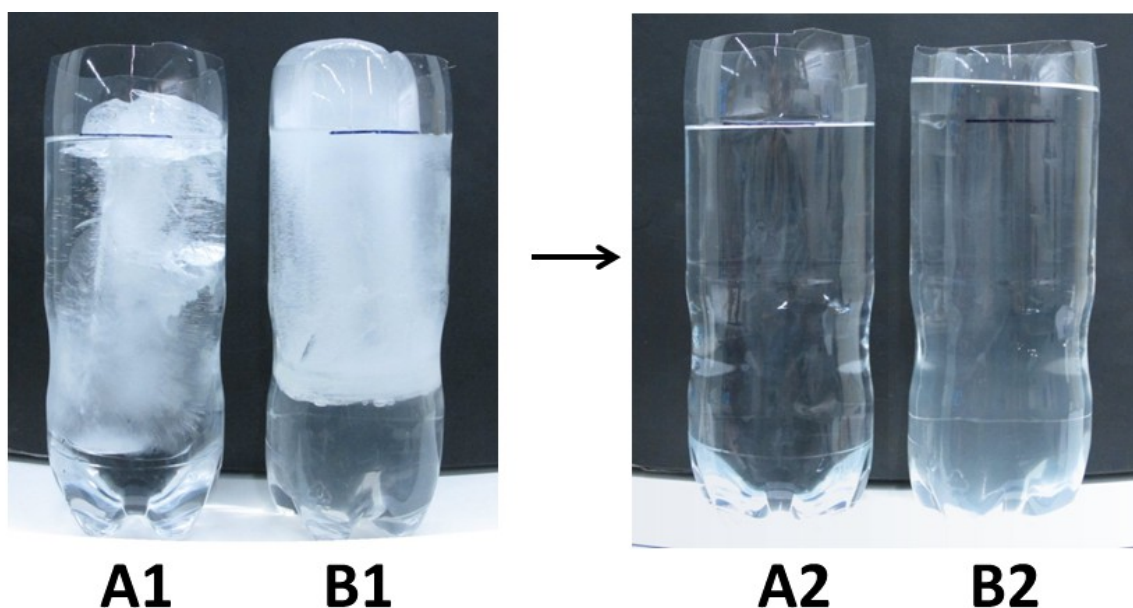


Figura 1. Experiencia para comprobar el nivel del agua tras la fusión de sendos bloques de hielo sobre agua destilada (caso A) y en el caso de una disolución saturada de sal (caso B).

Este dispositivo se deja reposar hasta la completa fusión del hielo, en torno a 12 horas dependiendo de la temperatura ambiente, y se procede a comparar los niveles del líquido en ambos contenedores tras el deshielo (ver fotografías A_2 y B_2 en Figura 1).

Resultados y discusión

Mientras que el contenedor con agua destilada mantuvo el nivel inicial (Imagen A_2 , Figura 1), para el contenedor con agua salada la diferencia de altura observada fue de aproximadamente 1,9 cm (imagen B_2 , Figura 1). Este dato, por lo demás apreciable a simple vista, indica que cuando la densidad del líquido de fusión y la densidad del agua en el que flotaba el hielo son diferentes existe un cambio de nivel significativo en el nivel del agua.

Tres variables contribuyen a que el cambio de volumen de la experiencia sea más evidente. En primer lugar, resulta determinante el uso de una disolución saturada de NaCl ($\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$) en vez de agua de mar ($\rho = 1026 \text{ kg/m}^3$) ya que de esta manera el cambio de volumen resulta ser casi 10 veces mayor:

$$\Delta V = V_f - V_s = V_s \cdot \left(\frac{\rho_m}{\rho_w} - 1 \right) = V_s \cdot \left(\frac{1190}{1000} - 1 \right) \approx 0,2 \cdot V_s$$

Por otro lado, y en la medida que el incremento de volumen es proporcional al volumen de hielo sumergido ($\Delta V \approx 0,2 \cdot V_s$), el empleo de bloques de hielo del mayor volumen posible permite realzar también los resultados finales. Finalmente, es muy importante la diferencia de radios de los recipientes utilizados. Cuanto menor sea la diferencia entre ellos, más apreciable será el aumento de nivel del agua.

Conclusiones

El diseño experimental descrito ilustra de una manera sencilla los resultados a los que, desde la adecuada consideración del principio de Arquímedes, se llega en torno a la cuestión de si el deshielo de las masas de hielo que flotan a la deriva en los océanos puede tener algún impacto en el nivel de los océanos.

La experiencia permite observar que en el caso del recipiente con agua salada se produce un aumento sustancial del nivel del líquido, mientras que éste permanece constante en el caso del contenedor con agua destilada.

Resulta destacable que un diseño experimental similar puede llevarse a cabo con probetas graduadas de 100 a 500 mL, lo que también permitiría cuantificar el fenómeno. Sin embargo, en este caso resultaría insoslayable el empleo de bloques de hielo más pequeños, lo cual reduce la apreciación cualitativa del fenómeno.

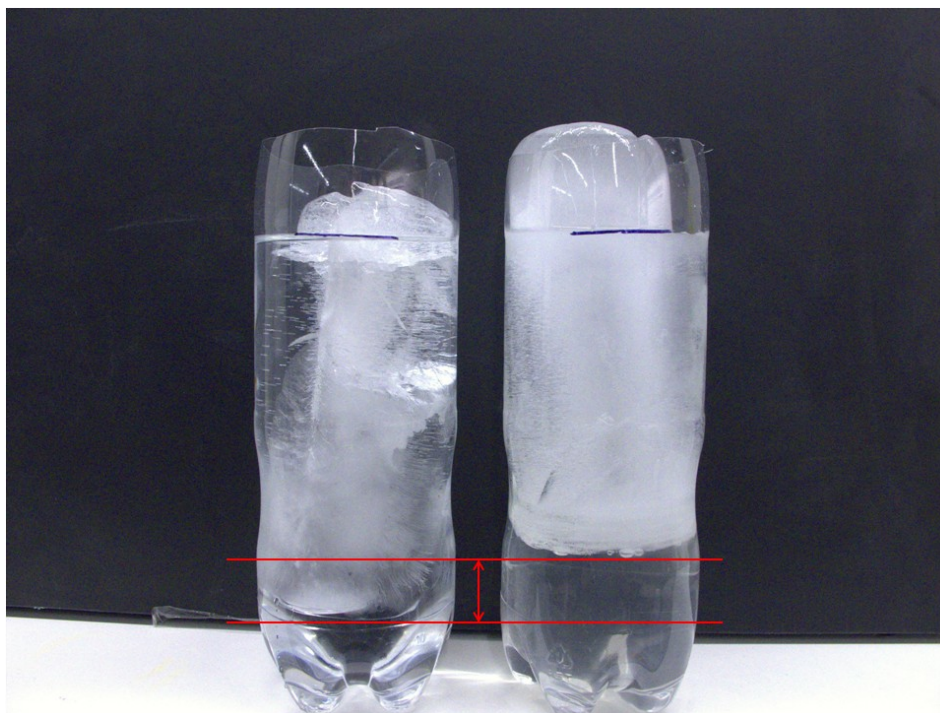


Figura 2. Diferencias en la flotación del hielo sobre agua dulce (izquierda) y sobre una disolución saturada de sal.

Un aspecto a subrayar es que el cambio de altura en el agua salada no se debe a un aporte extra de materia durante el proceso de fusión del hielo sino al hecho de que, en el caso del hielo flotando en agua salada, éste resulta elevado por la mayor densidad del fluido sobre el que flota y en consecuencia, cuando se funde, genera un aporte extra de volumen al fluido (ver diferencia de flotación del hielo en la Figura 2).

Síntesis

Las reflexiones previamente presentadas y la experiencia mostrada son coherentes con el supuesto de que el deshielo de los icebergs, plataformas de hielo y banquisa no tiene un impacto cero sobre el nivel del mar.

De hecho se estima en un 1,6% la contribución que la fusión del hielo flotante tiene en incremento del nivel del mar (Shepherd, Wingham, Wallis, Giles, Laxon, y Sundal, 2010). Ciertamente ésta resulta ser una contribución relativamente pequeña si se compara con el impacto que tienen otros elementos de la criosfera, o con la influencia que la expansión térmica de los océanos tiene en este fenómeno. Sin embargo, no por pequeña deja de ser significativa por varias razones.

En primer lugar hay que tener en cuenta que la estabilidad del hielo flotante resulta ser extremadamente dependiente a cambios en la temperatura del océano y en el contexto de cambio climático actual es previsible que el impacto que la fusión de este tipo de hielo tiene en el aumento del nivel del mar crezca rápidamente. De hecho, se estima que un incremento de tan solo una décima de grado en la temperatura del océano subyacente a las capas de hielo en la región ártica incrementaría el deshielo del espesor de la capa de hielo flotante en 1 m por año, lo que implicaría un aumento de 10 mm del nivel del mar durante el mismo periodo (Shepherd et al., 2010).

Por otro lado no se puede dejar de obviar la contribución global que podría tener la fusión de todo el hielo flotante que actualmente existe en los océanos. En este caso este fenómeno podría conducir a un aumento del nivel del mar de en torno a 4 cm (Noerdlinger y Brower, 2007; Shepherd et al., 2010).

Finalmente también hay que considerar que la liberación de agua dulce en el mar debido a la fusión de masas de hielo, y el previsible incremento del nivel del océano a nivel global, no resulta ser un fenómeno de impacto inmediato. Por el contrario, y considerando que el Océano Ártico solo constituye un fracción de un 10% del área oceánica total, parece ser que el impacto de las variaciones en el nivel del mar por causa de la fusión del hielo a la deriva podría quedar confinado a las regiones polares por periodos de tiempo relativamente largos que abarcarían varias décadas (Serreze, Barrett, Slater, Woodgate, Aagaard, Lammers,..., Lee, 2006). Este hecho implicaría que durante estos periodos de tiempo existirían diferencias regionales significativas del nivel del mar y, en consecuencia, el impacto de la fusión del hielo flotante resultaría especialmente significativo en la zona circundante al proceso de deshielo, magnificándose las consecuencias en este entorno (Shepherd et al., 2010).

A la vista de estos datos y de las reflexiones anteriores parece necesario concluir que el proceso de fusión de las grandes masas de hielo sí tiene impacto en el aumento del nivel del mar, aunque éste sea comparativamente pequeño y su repercusión final resulta estar supeditada, en gran medida, al propio discurrir del calentamiento de los océanos de las próximas décadas.

Referencias bibliográficas

- Hewitt, P. G. (2011). The joy of teaching and writing conceptual physics. *The Physics Teacher*, 49 (7), 412-416. En línea en: <http://dx.doi.org/10.1119/1.3639147>.
- Holland, D. M. (2013). The marine cryosphere. En G. Siedler, S. M. Griffies & Gould, John & Church, John A. (Eds.). *Ocean circulation and climate: a 21st century perspective. International Geophysics Series, 103*: pp 413-442. Amsterdam: Academic Press.

- Jenkins, A., & Holland, D. (2007). Melting of floating ice and sea level rise. *Geophysical Research Letters*, *34*(16), L16609. doi:10.1029/2007GL030784.
- Lan, B. L. (2010). Does sea level change when a floating iceberg melts? *The Physics Teacher*, *48*, 328-329.
- Noerdlinger, P. D., & Brower, K. R. (2007). The melting of floating ice raises the ocean level. *Geophysical Journal International*, *170*(1), 145-150. Doi:10.1111/j.1365-246X.2007.03472.x
- Serreze, M. C., A. P. Barrett, A. G. Slater, R. A. Woodgate, K. Aagaard, R. B. Lammers, M. Steele, R. Moritz, M. Meredith, and C. M. Lee (2006), The large-scale freshwater cycle of the Arctic, *J. Geophys. Res.*, *111*, C11010, doi:10.1029/2005JC003424.
- Shcherbina, A. Y., L. D. Talley, and D. L. Rudnick (2004), Dense water formation on the northwestern shelf of the Okhotsk Sea: 1. Direct observations of brine rejection, *J. Geophys. Res.*, *109*, C09S08, doi:10.1029/2003JC002196.
- Shepherd, A., D. Wingham, D. Wallis, K. Giles, S. Laxon, and A. V. Sundal (2010), Recent loss of floating ice and the consequent sea level contribution, *Geophys. Res. Lett.*, *37*, L13503, doi:10.1029/2010GL042496.
- Shute, V. J., Ventura, M., & Kim, Y. J. (2013). Assessment and learning of qualitative physics in newton's playground. *The Journal of Educational Research*, *106*(6), 423-430.
- Squire, K., Barnett, M., Grant, J. M., & Higginbotham, T. (2004). Electromagnetism supercharged!: Learning physics with digital simulation games. Paper presented at the *Proceedings of the 6th International Conference on Learning Sciences*, 513-520.
- Taslidere, E., & Eryilmaz, A. (2012). The relative effectiveness of integrated reading study strategy and conceptual physics approach. *Research in Science Education*, *42* (2), 181-199.
- Vrbka, L., & Jungwirth, P. (2005). Brine rejection from freezing salt solutions: A molecular dynamics study. *Physical Review Letters*, *95*, 148501-5.