

La dinámica oceánica y su simulación: fundamentos conceptuales y actividades para el laboratorio de geología

Ocean dynamics and its simulation: conceptual foundations and activities for the geology laboratory

FRANCISCO JAVIER MORALES MANZANOS¹ E INMACULADA PALOMO LOZANO²

¹ Dpto. Biología-Geología, Escuelas Francesas, S.A.L., C/Almendralejo, 18 - 41019 Sevilla.

E-mail: javier.morales@andaluciajunta.es

² Dpto. Matemáticas, Escuelas Francesas, S.A.L., C/Almendralejo, 18 - 41019 Sevilla.

E-mail: inmapalomo@escuelasfrancesas.es

Resumen Presentamos un conjunto de experiencias basadas en simulaciones que permiten modelizar diversos procesos relacionados con la dinámica oceánica. Esta y sus efectos están presentes en el currículum de diversas materias de Secundaria y Bachillerato: Biología-Geología, Geología, Ciencias de la Tierra y el Medio Ambiente. Las prácticas están diseñadas no solo para facilitar la comprensión de diversos procesos de dinámica oceánica y sus interacciones con otras fases del planeta, sino que contribuyen a la mejora en la adquisición de diversas competencias clave. Los aspectos tratados son: circulación termohalina, calentamiento global y glaciaciones, estratificación de masas de agua, corrientes oceánicas, afloramientos marinos y precipitación de sales en zonas costeras. La posibilidad de utilizar las distintas experiencias para trabajar con metodología ABP (aprendizaje basado en proyectos/problemas) o *flipped classroom* contribuye a la motivación e implicación del alumnado en su proceso de aprendizaje.

Palabras clave: Circulación termohalina, modelización dinámica oceánica, sebkha, simulación de procesos, afloramiento costero.

Abstract *We present a set of experiences based on models of different processes related to oceanic dynamics, which, together with its effects are included in the curriculum of different subjects of Secondary and Upper Secondary education: Biology-Geology, Geology, Earth Sciences and Environment. The practical activities are designed not only to ease the understanding of several processes of ocean dynamics and their interactions with other phases of the planet, but also in order to contribute to a better acquisition of several key competences. The processes studied are: thermohaline circulation, global warming and glaciations, stratification of water masses, ocean currents, upwelling and salt precipitation in coastal zones. The possibility of using the experiences to work with the PBL methodology (project-based learning / problem-based learning) or with a flipped classroom, contributes to the students' motivation and enhances their engagement in the learning process.*

Keywords: *Thermohaline circulation, oceanic dynamic modeling, sebkha, coastal upwelling, simulation of processes.*

INTRODUCCIÓN

Las capas fluidas del planeta, atmósfera y océano, están presentes en el currículum oficial de diversas materias de Secundaria y Bachillerato (Real Decreto 1105/2014 de 26 de diciembre): Biología – Geología, Geología, Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente; pero también se tratan de modo indirecto en otras como Geografía o Cultura Científica.

En este artículo usamos el término “modelo” para describir una representación simplificada de la

realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades. Podemos definirlo también como una representación externa de procesos mentales, es decir, referido a aspectos cognitivos. Para la experimentación en laboratorio con un modelo con la finalidad de aprender el comportamiento de un sistema usamos el término “simulación”.

Sobre la importancia de las prácticas científicas en los procesos de aprendizaje y la utilización de modelos y simulaciones en la enseñanza pueden consultarse: Gilbert y Ireton (2003), Krajcik y Merritt

(2012) y Osborne (2014), cuyos criterios seguimos en este trabajo.

Para hacer llegar al alumnado de una forma atractiva y que permita un aprendizaje significativo de los procesos básicos que gobiernan la circulación oceánica, proponemos el desarrollo de una serie de simulaciones de laboratorio que pueden realizarse con materiales simples, disponibles en laboratorios de secundaria o, en cualquier caso, de fácil adquisición. Todas las experiencias que presentamos han sido probadas en el aula y, adaptadas a distintos niveles y se han trabajado con alumnado de 3º, 4º de E.S.O. y Bachillerato, aunque también pueden adaptarse para trabajar con alumnado de E.P.O. También se modelizan algunos procesos consecuencia de esta dinámica o relacionados con ella, como la formación de *sebkhas* o la crisis de salinidad Messiniense y la interacción entre las dinámicas atmosférica y oceánica.

Las experiencias presentadas no se dirigen únicamente a facilitar la superación de determinados criterios de evaluación, sino que también contribuyen a la mejora en la adquisición de diversas competencias clave: competencia matemática y competencias básicas en ciencia y tecnología, aprender a aprender; en el proceso de exposición de los proyectos se desarrollan de modo más específico la comunicación lingüística, el sentido de iniciativa y espíritu emprendedor y la competencia digital. El uso y desarrollo de este tipo de experiencias en el aula mejoran por lo general la motivación del alumnado y su implicación en su propio proceso de aprendizaje.

Trabajar un conjunto de experiencias con un hilo conductor, con una metodología participativa y colaborativa donde el alumnado desarrolla el trabajo desde la búsqueda de información previa hasta el establecimiento de conclusiones, favorecen la consecución de algunos objetivos básicos entre los que se encuentran la comprensión lectora, la expresión oral y escrita. El trabajo con metodología ABP o *flipped classroom*, que debe incluir la presentación a la comunidad de los resultados obtenidos, mejora además la capacidad de argumentación en público de opiniones fundamentadas en la ciencia, la justificación de explicaciones científicas basadas en pruebas y la comunicación audiovisual, permitiendo al alumnado el desarrollo de actitudes conducentes a la reflexión y el análisis sobre el método científico (Fig. 1). En este sentido, con este conjunto de experiencias proponemos un acercamiento a la ciencia basado en prácticas científicas, haciendo que el alumnado experimente, trabaje, reflexione, sintetice e innove, en una metodología más próxima al quehacer científico que la exclusiva transmisión magistral de conocimiento.

Por último, un mejor conocimiento del medio marino en general y litoral en particular redundará en la mejora de la concienciación social con la necesidad de conservar su calidad ambiental y constituye un aspecto fundamental en el desarrollo de actitudes respetuosas con el mismo. Las actividades presentadas permiten comprender mejor la dinámica oceánica y su influencia en el funcionamiento actual del planeta, incluyendo aspectos climáticos y contribuyen al desarrollo de actitudes de respeto hacia el planeta, además del interés por la ciencia y en especial por la geología.



MODELIZACIÓN DE LA DINÁMICA OCEÁNICA A TRAVÉS DE SIMULACIONES DINÁMICAS DE LABORATORIO

El *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) define la circulación termohalina (CTH) como la “circulación oceánica a gran escala que transforma las aguas superiores, de baja densidad, en aguas intermedias y profundas de mayor densidad y las devuelve a la región superior” (IPCC, 2013). Se trata de una circulación asimétrica, en el sentido en que aguas superficiales o próximas ganan densidad (por pérdida de temperatura, incremento de salinidad o ambas) provocando su hundimiento en zonas de latitudes altas, mientras que el retorno a superficie es lento (cientos de años) y difuso (en regiones más extensas). Otros factores como fuerzas mecánicas, el viento o las mareas influyen en su formación (Kuhlbrodt *et al.*, 2007).

En nuestro caso nos hemos centrado en las variables temperatura y salinidad.

Circulación termohalina

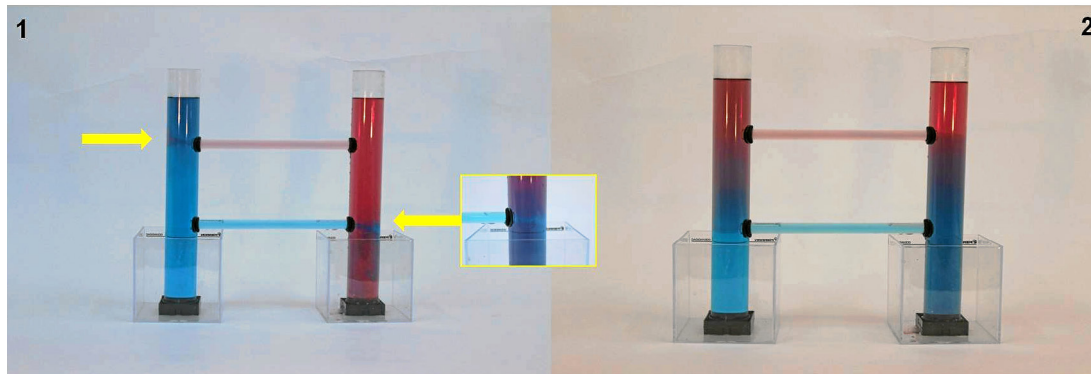
Para esta experiencia necesitaremos los siguientes materiales: un dispositivo formado por dos tubos de plástico verticales conectados por dos horizontales, colorante alimentario, permanganato potásico (KMnO_4) y agua fría y caliente, con la que hay que tener cuidado.

En un dispositivo consistente en dos tubos verticales de plástico transparente conectados por dos horizontales, que puede adquirirse en establecimientos de material de laboratorio (Fig. 2), añadimos simultáneamente en ambos tubos agua fría y agua caliente. Hay que teñir el agua fría y caliente con colorantes de distintos colores para poder apreciar el proceso, para lo cual podemos utilizar colorante alimentario. Al cabo de pocos segundos comienza a establecerse una circulación donde el agua caliente sale en una dirección por el tubo superior y la fría sale por el inferior en sentido contrario.

Otra opción consiste en teñir el agua fría con permanganato potásico, sustancia que incrementa la salinidad del medio al tiempo que actúa como colorante permitiendo visualizar mejor el proceso, estaremos simulando una circulación termohalina. Si

Fig. 1. Alumnos mostrando las simulaciones dinámicas en la Feria de la Ciencia de Sevilla. La presentación de las experiencias en distintos foros de divulgación científica o simplemente a sus compañeros de centro favorece el desarrollo de destrezas y la consecución de competencias clave.

Fig. 2. Dispositivo de circulación termohalina. Puede observarse (izq.) el movimiento de agua saliendo hacia la izquierda en la zona superior (caliente) y hacia la derecha en la inferior (fría). Cuando la diferencia de temperaturas disminuye y comienza a alcanzarse el equilibrio térmico el proceso cesa y el agua se estratifica (der.).



variamos la diferencia de salinidad de las masas de agua utilizadas, el proceso se acelera o desacelera con la mayor o menor diferencia de salinidad.

Según la escala que queramos darle al dispositivo en relación con el medio natural, podemos simular distintos procesos. Si asociamos el tubo con agua fría con cualquiera de los polos y el tubo con agua caliente con el ecuador, podemos mostrar en un modelo simple cómo se establece el sistema global de circulación oceánica -“cinta transportadora”-. A una escala mayor, también podemos simular procesos locales como el intercambio de aguas en el estrecho de Gibraltar: el agua fría entra en superficie desde el Atlántico, mientras que en profundidad sale el agua mediterránea (*Mediterranean Outflow Water* -MOW-), más fría y salina y por lo tanto más densa, en una circulación de tipo antiestuarino¹.

¿Puede un calentamiento global producir una glaciación?

El clima mundial está determinado por el equilibrio de la radiación en el planeta que, básicamente, puede variar por: variaciones en la radiación solar entrante, cambios en la radiación solar reflejada (albedo) o por alteraciones de la energía de onda larga que se irradia nuevamente al espacio. Además, el clima local depende también de la forma en que el viento y las corrientes oceánicas distribuyen el calor. Sin embargo, otros datos indican que pueden producirse cambios climáticos abruptos sin que hayan variado significativamente los factores anterior-

mente citados. Una redistribución del calor dentro del sistema climático hubiera sido suficiente para producir estos cambios. Datos obtenidos de muestras extraídas en sondeos oceánicos y modelos numéricos coinciden en que estos cambios pudieron haber sido provocados por inestabilidades en los casquetes glaciares del Atlántico (IPCC, 2007). La variación de salinidad provocada por el agua dulce liberada al océano y la modificación del sistema de corrientes oceánicas (CTH) pudieron haber inducido esos cambios climáticos.

Con el modelo podemos observar que cuando se alcanza el equilibrio térmico entre ambas masas de agua se produce una estratificación, con el agua cálida sobre la fría, interrumpiéndose toda circulación.

En el océano, el calentamiento de la capa superficial producida por la radiación solar origina una estructura térmica en tres capas: una superficial de mezcla producida por la acción del viento, una intermedia de transición en la que la temperatura disminuye rápidamente con la profundidad, (termoclina permanente) y otra inferior en la que la temperatura se mantiene relativamente constante al aumentar la profundidad. La termoclina puede verse modificada en mares templados, como por ejemplo el Mediterráneo, durante el verano. El fuerte gradiente -variación gradual de una variable entre dos puntos- de temperatura que se establece en la termoclina da lugar a fuertes incrementos en la densidad (picnoclina). Unos y otros constituyen obstáculos para la difusión de nutrientes, con las consecuencias que pueden tener sobre la productividad en las capas superficiales (Cognetti *et al.*, 2001).

La simulación reproduce, salvando la escala, una delgada capa intermedia con rápida variación de temperatura (termoclina), entre la superior ligeramente más cálida y la inferior más fría.

Si hacemos ver al alumnado que uno de los motores de la dinámica oceánica global (por ejemplo la “cinta transportadora”) se origina por la diferencia de temperatura entre los polos y el ecuador, podemos entender fácilmente por qué si los polos se funden puede alcanzarse un equilibrio térmico en el océano que interrumpa la dinámica oceánica, con lo cual se detiene la principal causa de distribución de calor en el planeta. Eso puede generar un enfriamiento en latitudes altas que induzca una glaciación y comenzar un proceso donde cada vez aumente más el albedo y la glaciación avance. Tenemos así un paradójico escenario del cambio climático: un calentamiento global puede originar una glaciación.

¹ Cuando una masa de agua tiene comunicación restringida con mar abierto (puede ser el caso de lagunas costeras, estuarios, mares, etc.), pero puede intercambiar libremente agua con el mismo, si se dan las condiciones climáticas adecuadas y un escaso o nulo aporte de agua dulce, esta masa puede verse sometida a una intensa evaporación, aumentando su salinidad y, por lo tanto, su densidad, lo que provoca que se hunda saliendo hacia mar abierto en profundidad mientras entra agua con menos concentración salina en superficie. A este tipo de circulación se denomina antiestuarina, en oposición a la estuarina que se produce cuando el agua oceánica entra en profundidad bajo una masa de agua dulce menos densa. Sobre el tema puede consultarse el artículo de Postma (1969) donde se definen los tipos básicos de circulación en los cuerpos de agua citados y mar abierto. En el estrecho de Gibraltar, el agua del Atlántico entra en superficie al Mediterráneo, donde se ve sometida a intensa evaporación. La mayor salinidad que adquieren las hace más densas, por lo que se hunden y salen de nuevo al Atlántico por el estrecho en profundidad; se origina así la Mediterranean Outflow Water (MOW).

Estratificación de masas de agua por diferente densidad en función de la salinidad y temperatura

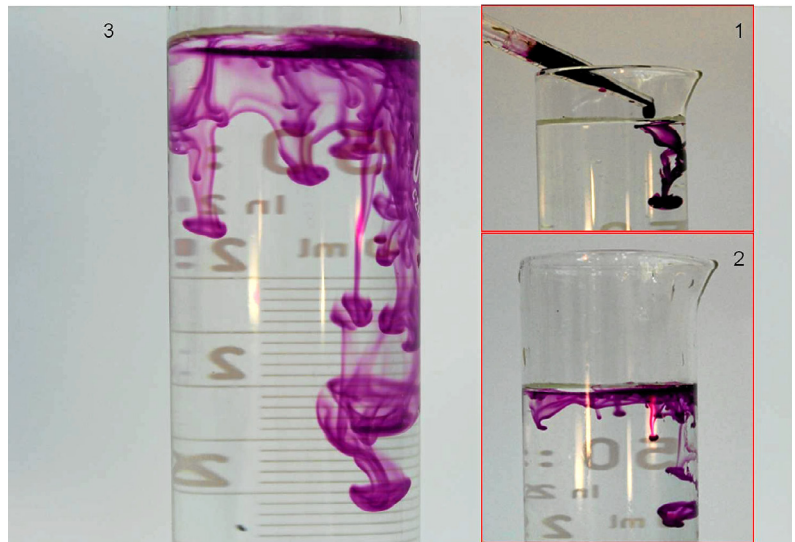
Una vez que hemos trabajado la influencia de la salinidad y la temperatura en la circulación oceánica, estamos preparados para dar respuesta a estas preguntas: ¿por qué las masas de agua no se mezclan en el océano? ¿Cómo pueden moverse unas respecto a otras?

El océano presenta masas de agua claramente diferenciadas por sus propiedades físico-químicas, especialmente temperatura y salinidad que determinan su densidad. Esto produce una compartimentación de las aguas que impiden su mezcla, a excepción de delgadas capas en la zona intermedia, en el contacto entre ambas capas. Cuando se disponen masas de agua cálida y salada sobre agua fría y más dulce, finos filamentos de agua cálida y salada que se enfría se hunden, al mismo tiempo que otros de agua fría y menos densa que se calientan y ascienden. Se genera así un patrón de estratificación donde las capas superior e inferior, de características diferentes se ven separadas por una delgada capa intermedia (Schmitt, 2001; Whitehead, 2001).

La conducción del calor en el agua es mucho más rápida que la difusión de sales, lo que implica que las masas de agua alcanzarán el equilibrio térmico antes que el químico. Por esto, masas de agua de diferentes salinidades pueden moverse unas respecto a otras, casi como si entre ambas existiera una barrera física. En este proceso, entre otros, se fundamenta la circulación de grandes masas de agua en el océano (Schmitt, 2001).

Hablamos de gradiente para referirnos a la variación gradual de un parámetro entre dos puntos; si la variación del valor es brusca utilizamos el término clina. Por regla general la salinidad aumenta con la profundidad, en ocasiones con un fuerte gradiente, estableciéndose una haloclina o capa con brusca variación de la salinidad. En determinadas zonas de mares y océanos pueden producirse inversiones en el sentido de variación de salinidad producidas por hundimiento de masas de agua más saladas y densas o por la intrusión de masas de agua con distintas características asociadas a la circulación oceánica. Cuando consideramos un fuerte incremento de densidad con la profundidad, determinada por la salinidad y temperatura de la masa de agua, hablamos de pincloclina (Cognetti *et al.*, 2001). Tal como se comentó en el caso de la termoclina, también la haloclina influye en la difusión de nutrientes y la distribución del plancton en las capas superficiales.

Para esta experiencia necesitaremos probeta, pipeta, permanganato potásico (KMnO_4) y agua (Fig. 3). La simulación que realizamos para explicar este proceso es simple: en una probeta que contiene agua dulce y fría colocamos con la pipeta, con cuidado de no producir mezcla o turbulencias, una delgada capa de agua caliente concentrada en permanganato potásico (que realiza las funciones de sal, aumentando la concentración de la disolución, y colorante simultáneamente). Casi de inmediato, comienzan a descender filamentos rosas (teñidos con KMnO_4) de agua caliente y concentrada mientras que ascienden “hilos” de agua fría con menor concentración salina. Este proceso continúa hasta que



se alcanza el equilibrio térmico entre las diferentes masas de agua, momento en el que se produce una estratificación en tres capas. Para observar este proceso es necesario que el recipiente sea lo suficientemente alto como para que se alcance el equilibrio térmico antes de que las digitaciones lleguen al fondo del mismo.

Como se ha citado anteriormente, la “cinta transportadora” lleva agua caliente hacia los polos donde se enfría y hunde regresando hacia el ecuador en profundidad. Sin embargo, en zonas tropicales y ecuatoriales, por ejemplo en el Atlántico tropical, mar Caribe, etc., el agua superficial sufre una gran evaporación, incrementando su salinidad y con ella su densidad. Esta situación genera inestabilidad, pues el agua cálida y salada se sitúa sobre agua fría menos salina. Se produce entonces el descenso de digitaciones de agua salada que se enfrían y hunden mientras otros menos salados se calientan y ascienden, provocando una estratificación en capas que presentan propiedades uniformes separadas por otra más delgada de mezcla producida por las digitaciones (Schmitt, 2001).

En la simulación obtenemos tres capas, una superior con mayor concentración salina, otra inferior menos concentrada y otra intermedia que puede representar la haloclina, donde se produce una fuerte variación de la salinidad entre las capas superior e inferior, aunque en este caso estaríamos simulando un proceso de inversión de la salinidad como el citado más arriba. Si consideramos la densidad de las capas (determinada por su temperatura y salinidad), podemos simular la formación de pincloclinas.

Corrientes oceánicas

¿Cuál es la causa de que masas de agua se hundan y circulen en profundidad sin mezclarse? Cuando el agua fría y densa de los polos se hunde comienza un desplazamiento hacia la zona ecuatorial. Este desplazamiento se realiza bajo masas de agua más calientes. Esta inversión de temperatura entre ambas masas de agua impide que el agua fría ascienda rápidamente. Si este flujo de agua polar encuentra obstáculos topográficos en su camino (crestas oceánicas, mesetas, etc.) que generan dos cuencas separadas -podemos llamarlas “cuenca

Fig. 3. Estratificación de masas de agua por diferente densidad. El agua caliente teñida con KMnO_4 se sitúa sobre el agua fría hiposalina, formándose “digitaciones” de agua caliente que descenden mientras que otras de agua fría ascienden, produciéndose una zona de mezcla.

polar” y “cuenca ecuatorial”-, la masa de agua fría se calienta por convección a partir de la masa de agua caliente superior y comienza un lento ascenso. Cuando alcanza la cima del obstáculo sigue estando más fría que el agua que llena la “cuenca ecuatorial”, por lo que inicia el descenso en “catarata” al otro lado de la misma. Este descenso genera turbulencias en la corriente y mezcla con el agua circundante (Whitehead, 2001).

Situaciones de este tipo se encuentran en todos los océanos. En el océano Atlántico podemos citar algunos ejemplos: la que se produce en el estrecho de Dinamarca, entre Groenlandia e Islandia, donde se forma una “catarata” que mueve unos cinco millones de metros cúbicos por segundo; la “catarata” de la meseta abisal de Ceará en la zona ecuatorial del Atlántico, donde se establece un flujo de sur a norte, ambas generadas principalmente por diferencias de temperatura, o la que se forma en el umbral del estrecho de Gibraltar por donde sale hacia el océano Atlántico desde el mar Mediterráneo la MOW, en este caso generada principalmente por diferencias de salinidad (Whitehead, 2001).

Para la simulación necesitaremos un acuario pequeño o recipiente similar, pipeta, placa para construir una rampa, permanganato potásico ($KMnO_4$) y agua (Fig. 4). Llenamos un recipiente (acuario pequeño) con agua caliente sin teñir y en un extremo, donde previamente hemos colocado una placa en forma de rampa, introducimos con la pipeta, agua fría teñida con permanganato potásico. Esta sal confiere al agua fría mayor densidad, al mismo tiempo que permite visualizar la masa de agua. En la naturaleza la diferencia de temperatura y salinidad es

menor, pero de esta forma aceleramos el proceso, haciéndolo más visual.

Observamos como el agua fría y densa se desliza hacia el fondo sin que se produzca mezcla entre ambas, excepto en algunas zonas de turbulencia, hasta que se alcanza el equilibrio térmico. Si colocamos un pequeño obstáculo en el camino de la corriente, se aprecia cómo ésta lo salva pasando al otro lado.

Influencia del viento en procesos de surgencia: afloramientos costeros

La dinámica atmosférica influye también en la oceánica. Por lo tanto ¿puede el viento inducir surgencia de aguas profundas?

El viento puede actuar con efecto mecánico sobre la superficie del agua. En zonas costeras, un viento dominante genera un déficit de agua en superficie, pues la aleja del continente, provocando una succión de aguas profundas que afloran en superficie (Kuhlbrodt *et al.*, 2007). Estos afloramientos sitúan en superficie gran cantidad de nutrientes que de otro modo hubieran quedado en el fondo, a veces, por debajo de la zona fótica, produciéndose una disgregación de los factores de producción: luz y nutrientes (Cognetti, *et al.*, 2001). Por este motivo, en zonas de surgencia de aguas profundas se generan zonas de alta productividad ecológica, que de otro modo sería muy baja en zonas profundas del océano.

Para la simulación necesitaremos un acuario pequeño, agua, purpurina y secador de pelo (Fig. 5). En la cubeta disponemos agua casi hasta el borde; le añadimos purpurina. La purpurina tiene la función de permitir la visualización del movimiento de agua.

Fig. 4. Corrientes oceánicas. En el modelo agua con distinta temperatura y salinidad (agua fría teñida con $KMnO_4$ y agua dulce caliente) se desplazan sin mezclarse. La pequeña turbulencia en la base de la rampa se debe al choque del agua teñida con el fondo.

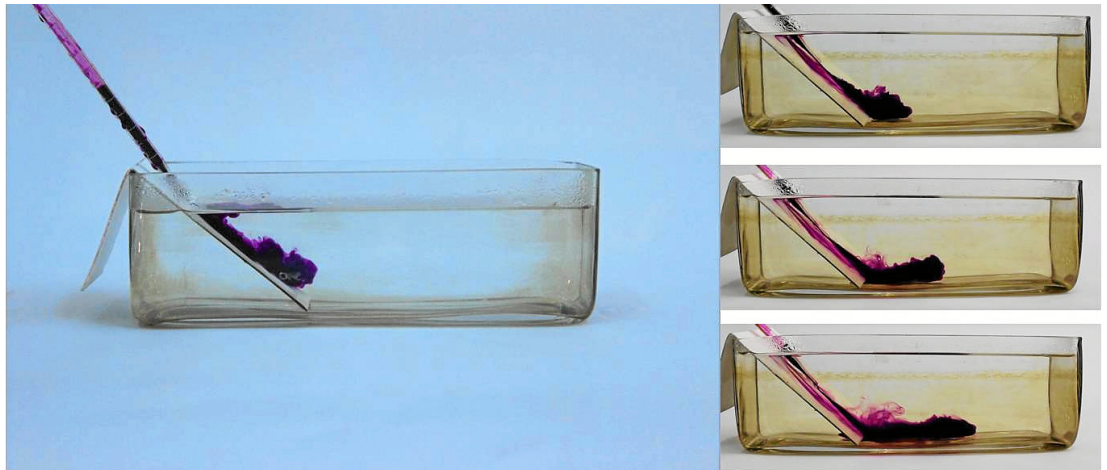
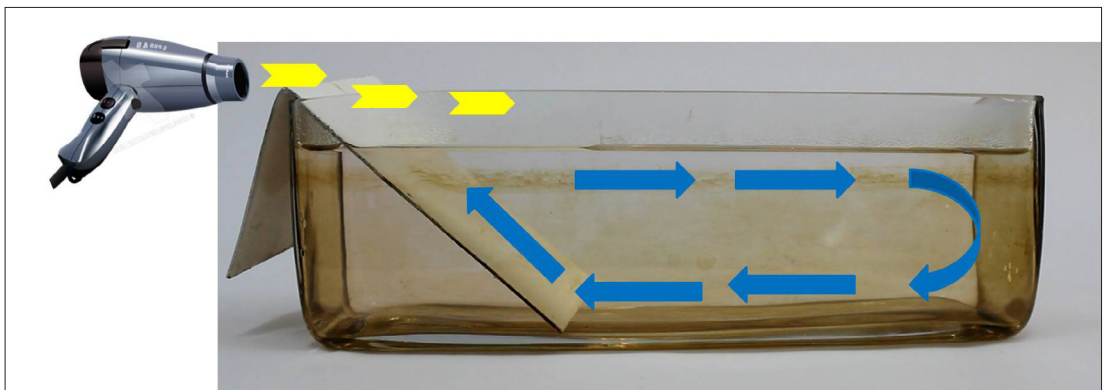


Fig. 5. Influencia del viento en procesos de afloramientos costeros. Si el viento costero dominante sopla hacia el mar, puede producirse una succión (bombeo Ekman) que hace aflorar aguas profundas cargadas de nutrientes generando zonas de alta productividad.



Con el secador hacemos incidir el aire horizontalmente sobre la superficie del agua. Vemos como el agua de la superficie se retira mientras comienza a establecerse una célula de convección, haciendo aflorar agua del fondo de la cubeta.

Disgregación de los factores de producción: el océano bicompartimentado

En el continente los nutrientes (N, P, K), el agua y la luz coinciden en el suelo, pero en el océano estos factores de producción se separan, pues la luz solar no penetra más allá de 200 m (zona fótica) y esto en las mejores condiciones, mientras que los nutrientes (procedentes de aportes fluviales y organismos muertos principalmente) se van al fondo por gravedad, acumulándose en la zona afótica. Se produce así en zonas profundas del océano una disgregación de los factores de producción que da lugar a una baja productividad primaria, pues el primer nivel trófico (productores) no dispone de los factores de producción en la cantidad necesaria.

Sin embargo, en las zonas donde la presencia de afloramientos de agua profunda transporta los nutrientes desde zonas profundas y los coloca en la zona fótica, se genera una alta productividad de plancton marino y por lo tanto del resto de niveles tróficos.

En distintas zonas del levante español y norte del mar de Alborán, en este caso asociado a la *Mediterranean Outflow Water* –MOW- en las costas andaluzas, se producen estos procesos de afloramientos costeros, generando áreas con una mayor productividad. También en las costas onubenses, cuando sopla de modo continuado el viento norte, se generan afloramientos costeros.

DINÁMICA OCEÁNICA Y PRECIPITACIÓN SALINA

Para comenzar a trabajar con el alumnado podemos plantear las siguientes preguntas: ¿puede secarse un mar? si es así ¿cómo? y si se seca, ¿qué pasa con la sal que contiene? ¿Afecta esto a la fauna y flora del mar? ¿Puede detectarse este evento si hubiera pasado hace millones de años?

Este conjunto de experiencias pueden usarse para trabajar distintos aspectos en el laboratorio de geología: consecuencias de la Tectónica de Placas, paleogeografía, paleoclimatología, rocas evaporíticas, cristalización, bombeo evaporítico.

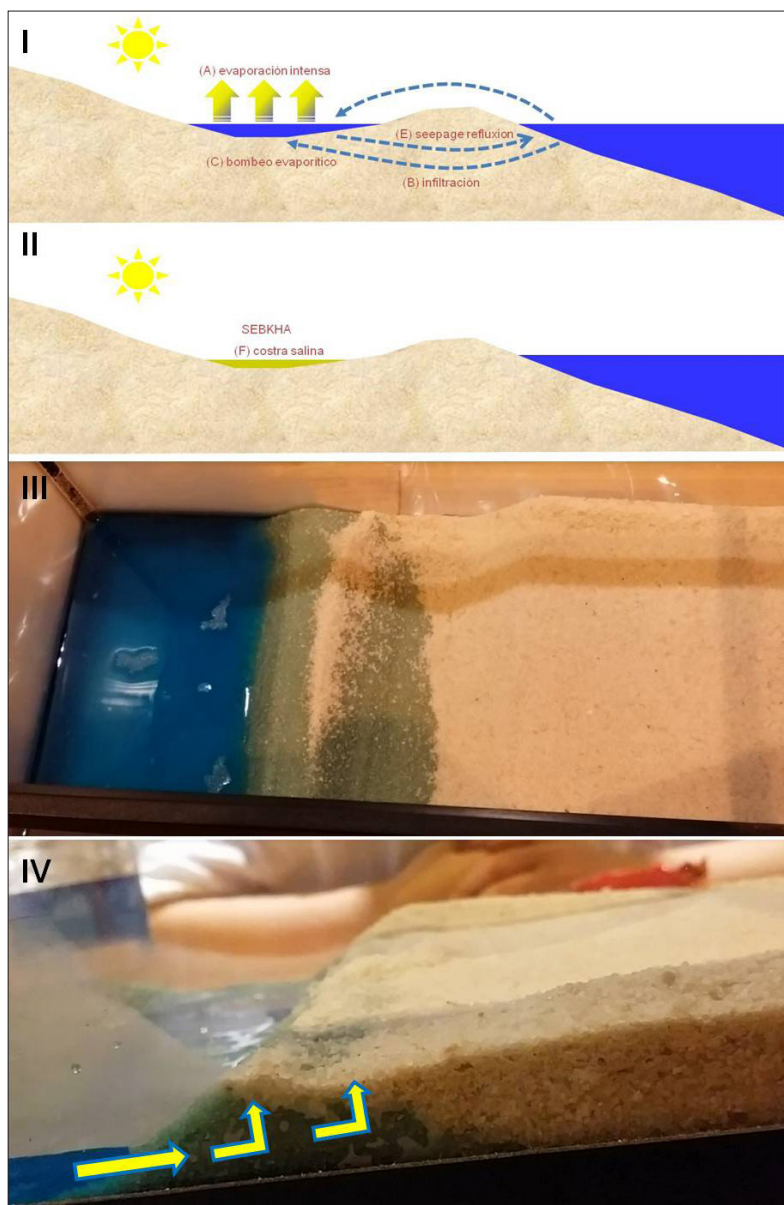
Procesos litorales: *sebkhas*

El término *sebkha* o *sabkha* es un término de origen árabe que designa depósitos sedimentarios en llanuras supramareales formadas por evaporitas, pudiendo contener restos de conchas, terrígenos, etc. En las zonas costeras con fuerte evaporación puede producirse un ascenso de agua marina a través de la porosidad del sedimento (arena). Si esta agua llega a aflorar en la superficie se evapora produciéndose la precipitación de sal que contiene. Este ascenso hacia la superficie puede verse acelerado por la intensa evaporación superficial producida por elevadas temperaturas, proceso que se denomina bombeo evaporítico. Si el sedimento es

carbonatado, cuando la relación Mg^{2+} / Ca^{2+} supera la del agua marina puede producirse dolomitización del sedimento, proceso que puede verse potenciado por el flujo descendente (*seepage reflexion*) de agua hipersalina procedente del lagoón. La consecuencia es la formación de una costra salina o *sebkha*. Estos procesos se dan también en zonas continentales, explicando la génesis de algunas llanuras salinas (Ortí, 1989; Gutiérrez, 2008).

Para la experiencia necesitaremos un acuario pequeño o recipiente transparente, arena, agua, sales (cloruro sódico, sulfato cúprico, sales potásicas, etc.) (Fig. 6). En el acuario colocamos arena en el fondo simulando el fondo del mar y la zona de playa con cordones dunares. Disolvemos en agua caliente la sal de que dispongamos. Si usamos sales cúpricas o potásicas obtendremos cristalizaciones de colores variados que darán más vistosidad a la experiencia. Vertemos la disolución en la arena con cuidado, en el área equivalente al mar. Mientras hacemos esto, podemos ver cómo por capilaridad la disolución asciende hacia la zona de playa. Dejamos cristalizar (el proceso puede tardar

Fig. 6. (I)- Formación de *sebkhas*. En zonas costeras con intensa evaporación (A), puede producirse un ascenso de agua procedente del mar por infiltración (B), en un ascenso continuo denominado bombeo evaporítico (C). También puede producirse un flujo descendente (E) o *seepage reflexion*, de agua hipersalina procedente del lagoón. (II)-La consecuencia es la formación de una costra salina (F) o *sebkha*. (III) y (IV) muestran la simulación con arena descrita en el texto.



desde horas a varios días, en función del volumen de agua utilizado). El agua, por capilaridad forzada por la evaporación en superficie, genera costras salinas en la superficie de la arena semejantes a las observadas en distintas costas del mundo. Puede usarse también para representar el proceso de creación de *sebkhas* en zonas interiores.

Crisis de salinidad

La crisis de salinidad Messiniense ha sido ampliamente empleada como recurso educativo (Soria, 2007; Corbí *et al.*, 2012; Morales y Palomo, 2017).

Los fundamentos conceptuales expresados a continuación han sido extraídos principalmente de Hsü *et al.* (1973), Hsü (1983), McKenzie (1999), Civis *et al.* (2001), García-Castellanos *et al.* (2009) y Urgeles *et al.* (2010).

El Mediterráneo presenta en la actualidad un balance hídrico negativo, es decir, la cantidad de agua que aportan ríos y lluvia es inferior a la que se evapora. Este déficit se ve compensado por la entrada de agua del Atlántico a través del Estrecho de Gibraltar. A finales de la era Terciaria, el balance hídrico del Mediterráneo era también negativo y el aporte de aguas atlánticas se realizaba por dos estrechos que existían en aquella época: el Estrecho Norbético y el Estrecho Surrifeño. La mayor parte de la actual Andalucía estaba unida al norte de Marruecos, formando una microplaca aislada de ambos continentes por los citados estrechos.

Ambos estrechos se fueron cerrando hasta que la comunicación de aguas entre el Océano Atlántico y el Mar Mediterráneo cesó. El Mediterráneo, al verse privado del aporte extra de agua comenzó a desecarse hasta quedar reducido a pequeños lagos, proceso que se vio favorecido por la existencia de un clima cálido y árido. Esto produjo la precipitación en el fondo del Mediterráneo de enormes depósitos de sal y creó un déficit de salinidad en el resto de los océanos que trajo notables cambios biológicos, ecológicos y geológicos (alteración de la dinámica oceánica, extinción de especies, etc.) Este evento, ocurrido hace 5,33 M.a., recibe el nombre de *crisis de salinidad messiniense*.

Las pruebas que lo demuestran son numerosas: depósitos salinos situados en el fondo del Mediterráneo correspondientes a la sal que precipitó al secarse el mar; cañones excavados por los grandes ríos (Nilo, Po, Ródano, Ebro, etc.) a más de 250 m bajo el actual nivel del mar; la flora y fauna fósiles (entre los que caben destacar los arrecifes fósiles de Almería); datos isotópicos, etc.

Posteriormente comenzó a abrirse el Estrecho de Gibraltar, recuperándose de nuevo el balance hídrico y, con él, el actual nivel del mar. Algunos autores suponen la existencia de una cascada gigantesca que, desde el Atlántico, volvió a llenar el Mediterráneo de nuevo. A este suceso se le estima una duración aproximada de 1000 años. En la actualidad Andalucía continúa la convergencia entre las dos placas; consecuencia de ello son los seísmos que, de vez en cuando, afectan a esta comunidad.

En España, la actual Cuenca del Guadalquivir es un resto de aquel Estrecho que comunicó el Atlántico con el Mediterráneo hace 5 M.a. Los numerosos

restos fósiles de ambiente marino que se pueden encontrar desde las Sierras de Cazorla y Segura hasta el Golfo de Cádiz así lo testimonian.

Para la representación necesitaremos una cubeta, sal (CuSO_4 , NaCl, etc.) y agua. Hacemos ver al alumno que si disponemos en un cristalizador un volumen de agua con salinidad marina normal (35 PSU) y esperamos unos días hasta que el agua evapore totalmente, recogemos la sal precipitada comprobando que sería la misma cantidad que añadimos al agua inicialmente. La capa de sal resultante es una película de escaso grosor. Este modelo no explica la acumulación de potentes capas de sal en el fondo del Mediterráneo, pues la potencia de depósitos salinos enterrados en el fondo es mayor de la que el contenido en sal de mar puede explicar.

Por el contrario, si periódicamente añadimos más agua salada, la precipitación de sal en distintas etapas genera espesores mayores. Podemos así explicar la acumulación de los depósitos localizados en el fondo. La comunicación con el Atlántico no se interrumpió totalmente, sino que ocasionalmente se produjeron entradas de agua que realimentaron las salinas.

CONCLUSIONES

Las simulaciones presentadas, aunque por fuerza deben utilizar modelos simples de procesos naturales que sabemos son complejos, ayudan a trabajar algunos de los principios que controlan la circulación oceánica y los procesos litorales.

A pesar de la necesaria simplicidad de los modelos, la influencia de la temperatura y salinidad en el establecimiento de la dinámica en fluidos queda comprobada con las simulaciones presentadas. Ambos parámetros confieren a las masas de agua oceánicas características propias que permiten el desplazamiento durante miles de kilómetros de unas sobre otras sin prácticamente mezclarse. Su influencia en el clima como distribuidores del calor en el planeta queda ilustrada. Procesos sedimentarios de precipitación salina asociados a la dinámica oceánica han sido también modelizados.

Plantear la enseñanza de la ciencia como una práctica o proceso de investigación que incluya la construcción de modelos, experimentación con simulaciones y la valoración de sus limitaciones explicativas permite una mejor comprensión de los procesos naturales.

El desarrollo y utilización de modelos y simulaciones en las prácticas de las materias de ciencias de la Tierra constituyen una potente herramienta que ayuda al alumnado a visualizar, explicar y predecir procesos geológicos. La implicación de los estudiantes en el trabajo con esta metodología constituye en sí misma una forma de construir conocimiento, además de facilitar la motivación e implicación en su proceso de aprendizaje y contribuir a la adquisición de competencias clave.

Por último, la exposición de los resultados al resto de la comunidad o presentación de los mismos en foros de divulgación científica (ferias de ciencia, museos, etc.) mejora las competencias en comunicación del alumnado.

AGRADECIMIENTOS

Queremos agradecer las valiosas aportaciones de dos revisores anónimos que han mejorado y enriquecido este manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Civis, J., Dabrio, C., González-Deldado, J.A., Goy, J.L., Ledesma, S., Pais, J., Sierro, F.J. y Zazo, C. (2001). Cuenca del Guadalquivir. En: *Geología de España*. (Ed.: J.A. Vera). Madrid, Sociedad Geológica de España; Instituto Geológico y Minero de España, 884 p.
- Cognetti, G., Sará, M. y Magazzú, G. (2001). *Biología Marina*. Ed. Ariel Ciencia, 619 p.
- Corbí, H., Giannetti, A., Baeza-Carratalá, J.F. y Falces Delgado, S. (2012). Los microfósiles y la Crisis de Salinidad del Mediterráneo como recurso didáctico en Ciencias de la Tierra. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 20.3, 249-261
- García-Castellanos, D., Estrada, F., Jiménez-Munt, I., Gorini, C., Fernández, M., Vergés, J. y De Vicente, R. (2009). Catastrophic flood of the Mediterranean after the Messinian salinity crisis. *Nature*, 462, 778-781
- Gilbert, S. W. y Ireton, S.W. (2003). *Understanding models in Earth and Space Science*. Arlington, VA: NSTA Press.
- Gutiérrez Elorza, M. (2008). *Geomorfología*. Pearson Educación, 920 p.
- Hsü, K.J., Cita, M.B. y Schreiber, B.C. (1973). Petrography of a halite sample from hole 134 – Balearic Abyssal Plain. *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 13, 11, 708-711. US Govt. Printing Office, Washington.
- Hsü, K.J. (1983). *The Mediterranean was a desert. A voyage of the Glomar Challenger*. Princeton University Press, 197 p.
- IPCC (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (Eds.: Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. Puede descargarse el informe completo (inglés) y el resumen en castellano en: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_climate_change_2007_the_ar4_synthesis_report_spanish.htm
- IPCC (Ed.: Planton, S. (2013). Glosario. En: *Cambio Climático 2013. Bases físicas*. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Eds.: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley). Cambridge University Press, 183-204. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- Krajcik, J. y Merritt, J. (2012). Engaging students in scientific practices: What does constructing and revising models look like in science classrooms? *Science and Children*, 49(7), 10-13.
- Kuhlbrodt, T., A. Griesel, M. Montoya, A. Levermann, M. Hofmann, y S. Rahmstorf (2007), On the driving processes of the Atlantic meridional overturning circulation, *Rev. Geophys.*, 45, RG2001. <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2004RG000166/full>
- McKenzie, J. A. (1999). From desert to deluge in the Mediterranean. *Nature* 400, 613-614
- Morales, F.J. y Palomo, I. (2016) Proyecto MOW. Mediterranean Outflow Water. *IX Congreso Geológico de España. GeoTemas*, 16 (1), 749-752.
- Ortí Cabo, F. (1989) Evaporitas marinas. En: *Sedimentología vol. II. Colección Nuevas Tendencias* (Alfredo Arche Coord.). CSIC, 89-177.
- Osborne, J. (2014). Teaching Scientific Practices: Meeting the Challenge of Change. *Journal of Science Teacher Education*, 25, 177-196.
- Postma, H. (1969). Sediment, transport and sedimentation in the marine environment. En: LAUFF, G.H. *Estuaries*. AAAS, 83, 158-179.
- Schmitt, R. W. (2001). Los dedos de sal del océano. *Investigación y Ciencia, Temas*, 24, 42-47.
- Soria, J.M. (2007) La crisis de salinidad del Messinense. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 15.1, 47-55
- Urgeles, R., Camerlenghi, A., García-Castellanos, D., Ben De Mol, Garcés, M., Vergés, J., Haslam, I. y Hardman, M. (2010). New constraints on the Messinian sea level draw down from 3D seismic data of the Ebro Margin, western Mediterranean. *Basin Research*, 1-23.
- Whitehead, J. A. (2001). Gigantescas cataratas oceánicas. *Investigación y Ciencia, Temas*, 24, 48-56. ■

Este artículo fue recibido el día 30 de enero de 2017 y aceptado definitivamente para su publicación el 29 de marzo de 2017.