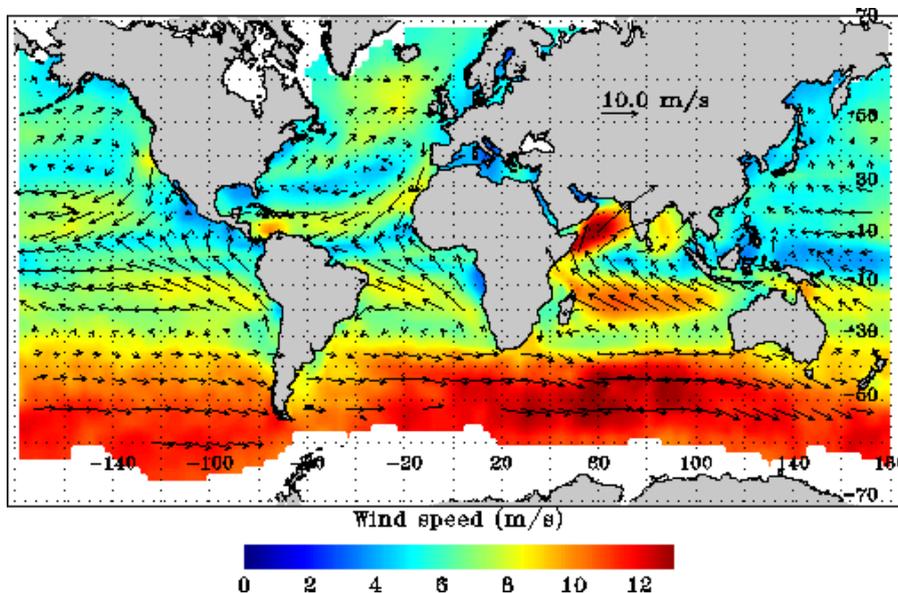
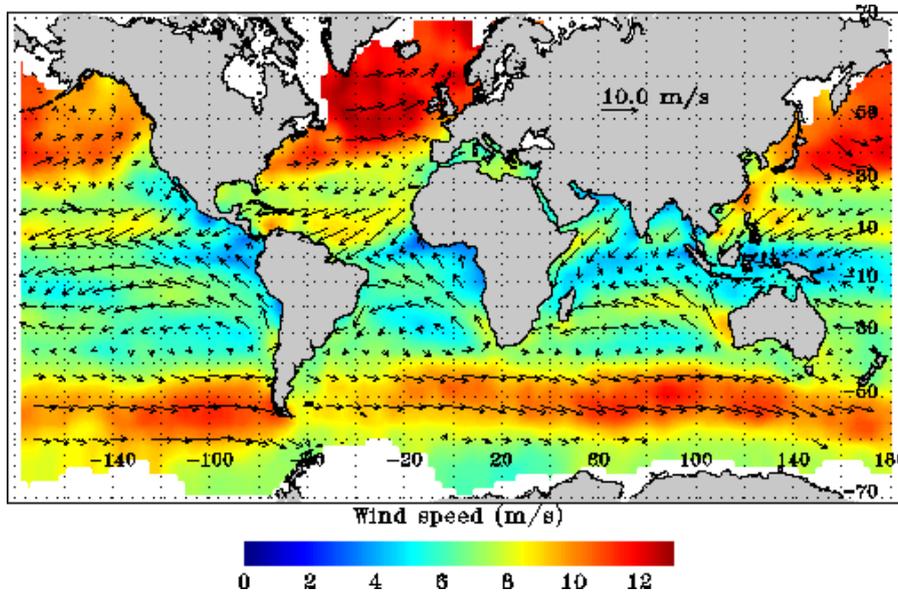


# ¿Cómo se mueven los océanos y cómo influye esto en el clima?

Enrique Fernández Barrera

Tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta están ocupadas por los océanos. Como componente del sistema climático, la hidrosfera, y por tanto, los océanos, juegan un papel importante en el clima. Entre sus principales características, podemos destacar que son la fuente principal de vapor de agua en la atmósfera, regulan el clima de zonas costeras, reducen el gradiente de temperatura entre los polos y el ecuador; por lo que suavizan el clima de latitudes medias y son un importante reservorio de carbono y energía. El movimiento global de los océanos –la circulación– es un mecanismo físico fundamental que regula todos estos factores.

La circulación de los océanos es diferente según la profundidad. Desde la superficie hasta los 200 m de profundidad (capa de Ekman), aproximadamente, el principal factor que controla el movimiento de los océanos es el viento, y a partir de esa profundidad, en el océano profundo, son los cambios en la temperatura y en la salinidad del agua los factores que controlan la circulación oceánica.



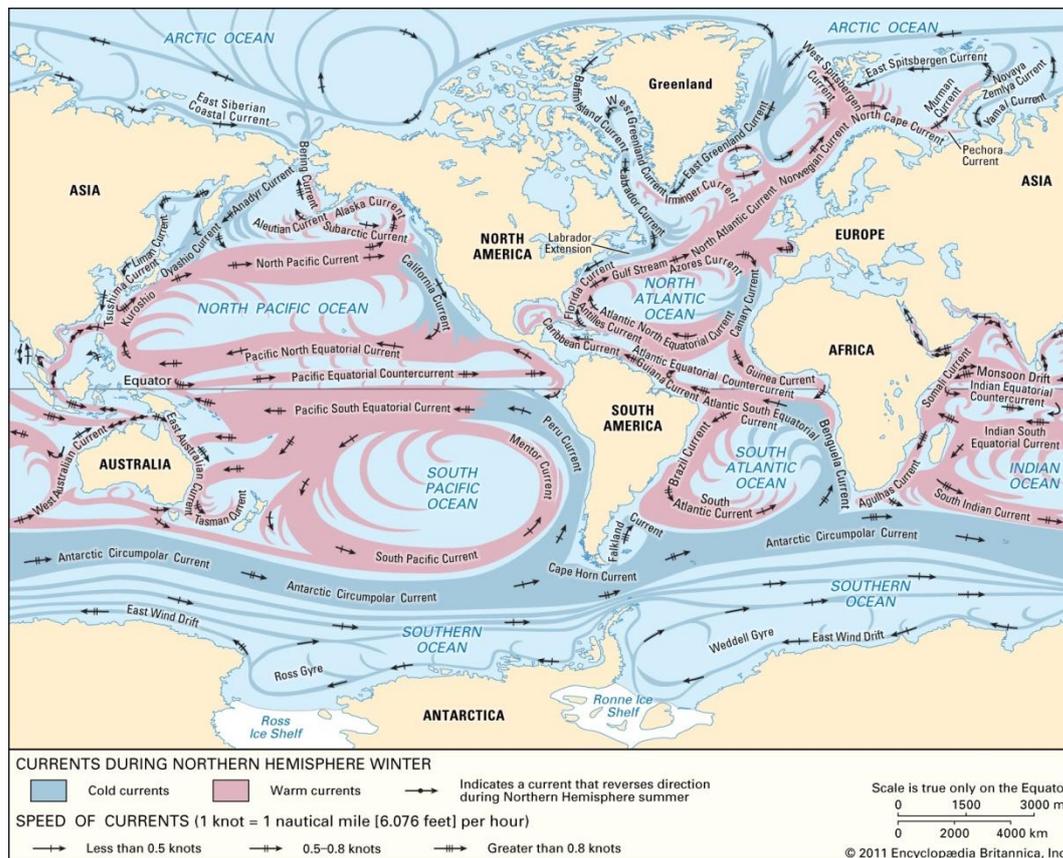


Figura 1.- Arriba: Mapas de velocidad y dirección del viento promedio en enero y julio. Fuente: <https://seos-project.eu/> Abajo: Principales corrientes oceánicas de la Tierra. Fuente: Enciclopedia Británica (<https://www.britannica.com/>)

En la Figura 1 superior se muestra la dirección y velocidad del viento promedio en enero; en el centro de la figura, lo mismo, pero en julio, y en la parte inferior, se muestran las principales corrientes oceánicas. Se aprecia cómo la dirección de las principales corrientes es similar a la del viento; por ejemplo, en los giros subtropicales sobre el Atlántico Norte, que coinciden con los grandes anticiclones subtropicales atmosféricos. La explicación de esta aparente coincidencia la ofreció el oceanógrafo sueco Vagn Walfrid Ekman (1874-1954), a través de un modelo físico. Este modelo surgió gracias a las observaciones que hizo el explorador noruego Fridtjof Nansen (1861-1930) durante una expedición al Ártico. Nansen observó que los icebergs no se desplazaban siguiendo la dirección del viento, sino que se movían a la derecha de dicha dirección y compartió estos conocimientos con Ekman.

## Circulación en superficie: el modelo de Ekman

Según el modelo teórico de Ekman, el viento ejerce una tensión mecánica en el océano, de forma similar a cuando alguien empuja una mesa y esta se mueve. Esta tensión mecánica hace que el agua en superficie siga la dirección del viento, pero con la profundidad, la influencia de esta tensión es menor y el agua va cambiando su dirección; es decir, el vector de corrientes gira en espiral (Figura 2). La forma que toma el vector de corrientes se conoce como la espiral de Ekman y abarca toda la capa homónima. El efecto neto es transportar la masa de agua unos 90° a la derecha del viento, en el Hemisferio Norte, y a la izquierda en el Hemisferio Sur. Esta diferencia se da porque en este movimiento también influyen la fuerza de Coriolis y las fuerzas de presión.

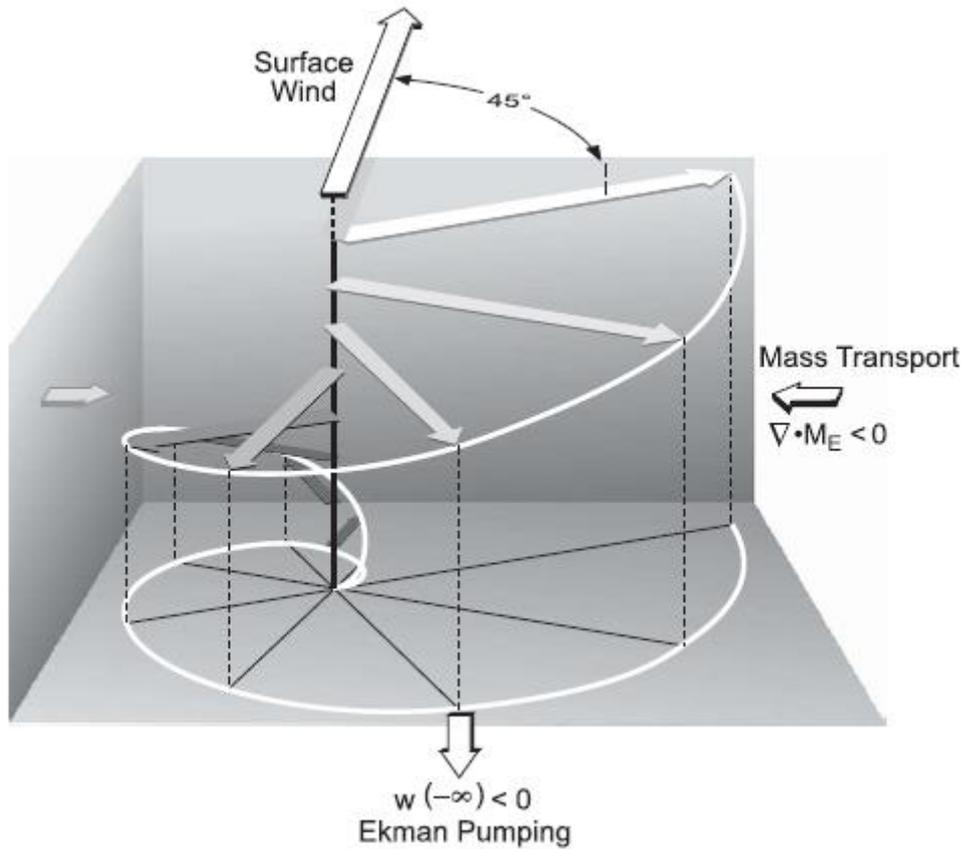


Figura 2.- Corriente agestrófica dentro de la capa Ekman. Fuente: *Physics of Climate*, Salby.

Otra consecuencia importante de este movimiento es un afloramiento de las aguas profundas. Esto es lo que se produce en los límites costeros occidentales de los continentes, como en la costa de California, en Estados Unidos. En esta zona el viento va dirigido hacia el ecuador, por lo que el transporte de masa es en dirección oeste, de acuerdo con la teoría de Ekman. Como resultado, se produce un afloramiento de aguas frías. Estas aguas frías son las responsables de las típicas nieblas que se producen en San Francisco.

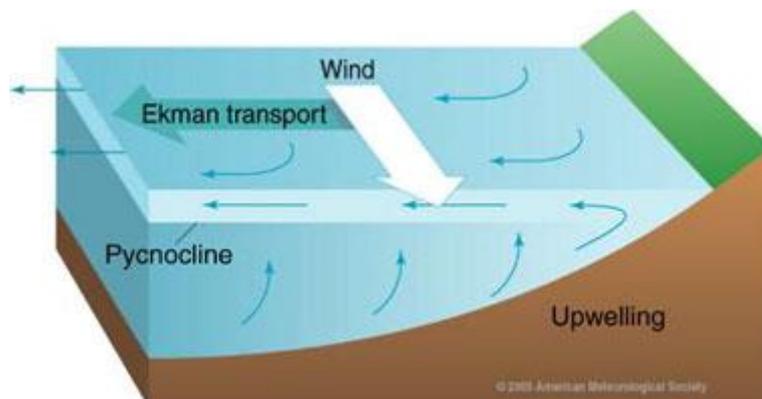


Figura 3: afloramiento de aguas por el transporte de Ekman. Fuente: *Physics of the Atmosphere and Climate*, Salby adaptada de American Meteorological Society.

Cerca del ecuador, los vientos alisios del noreste en el Hemisferio Norte y del sureste en el Sur producen un transporte de agua hacia el norte y al sur, respectivamente, favoreciendo

también el afloramiento de aguas frías. Esto produce, por ejemplo, que no se formen nubes en la zona exacta donde convergen y ascienden los alisios de ambos hemisferios (la zona de Convergencia Intertropical) sino que las nubes aparecen algo desplazadas sobre esta zona, ya que se inhibe la convección.

El afloramiento de aguas genera altas presiones cerca del ecuador y bajas presiones en los alrededores. Se crea, entonces, un equilibrio entre la fuerza de Coriolis y la de presión (equilibrio geostrófico). El equilibrio geostrófico genera corrientes con bajas presiones a la izquierda en el Hemisferio Norte y a la derecha en el Sur, que fluyen en dirección contraria a los vientos alisios, dando forma a una contracorriente ecuatorial. Las contracorrientes del Pacífico se intensifican en los años que se produce El Niño, por el aumento de presión en el Pacífico Occidental.

### Circulación en el océano profundo: la circulación termohalina

Por debajo de la capa Ekman, la circulación es completamente diferente y depende de las propiedades del agua: densidad, salinidad y temperatura. Por este motivo, a la circulación del océano profundo se le llama circulación termohalina (Figura 4). Su nombre proviene del griego *thermos* y *halos*. Estas propiedades están relacionadas entre sí:

- a) A menor temperatura del agua, más densa es, y por tanto se hunde más fácilmente
- b) A más salinidad, más densidad.
- c) A más profundidad en el océano, más densidad.

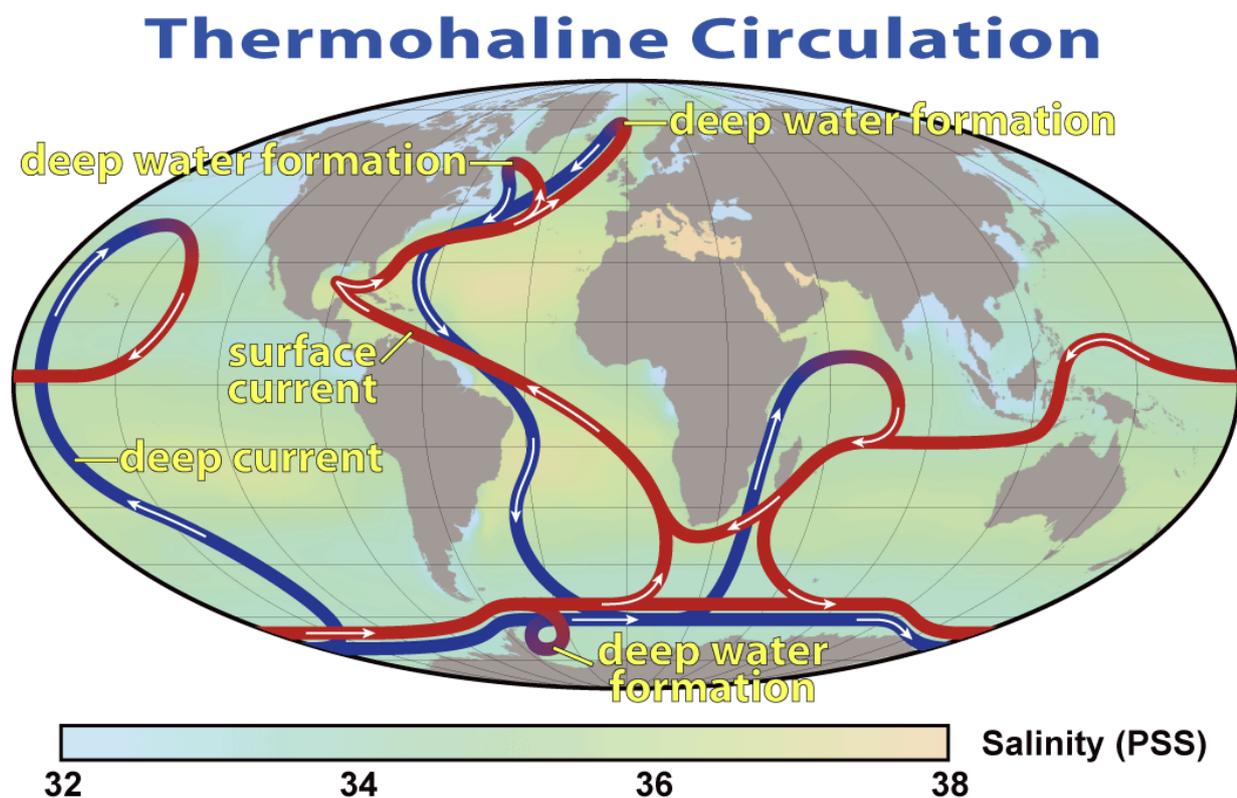


Figura 4.- La circulación termohalina. El color azul representa las corrientes de aguas profundas y el color rojo las corrientes de aguas superficiales. Fuente: NASA.

Las propiedades de esta circulación se conocen por medidas indirectas, como los gases disueltos en los océanos. Gracias a las propiedades de estos gases podemos conocer las fuentes de la formación del agua y el momento en el que el agua estuvo en la superficie, debido a que con la profundidad, la concentración de gases como el oxígeno disuelto disminuye debido a, por ejemplo, las bacterias marinas, que consumen este gas. Hay un valor para el cual el agua no puede contener más cantidad de un gas disuelto y este acaba siendo expulsado del agua. Este valor se llama “punto de saturación” y depende de la temperatura y salinidad del agua. La saturación aumenta al disminuir la temperatura.

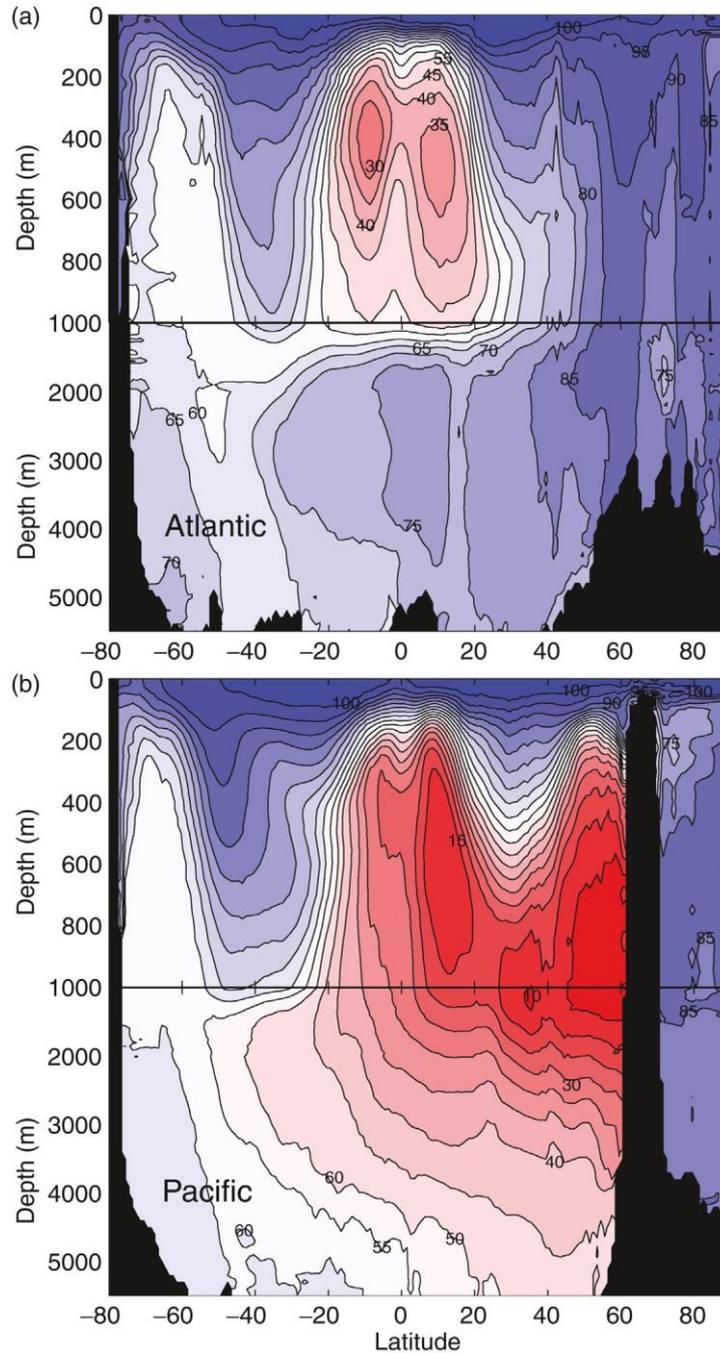


Figura 5.- Porcentaje de saturación del oxígeno en el Atlántico (a) y en el Pacífico (b). Imagen tomada de *Global Physical Climatology, Hartman*.

En la Figura 5, se muestra el porcentaje de saturación del oxígeno en el Atlántico y el Pacífico, según su profundidad y latitud. Se observa cómo en el Atlántico Norte el porcentaje

de saturación es alto. Este valor disminuye con la profundidad y aumenta al disminuir la latitud. Esto permite ver que la fuente de formación de aguas profundas está en el Atlántico Norte (NADW). La fuente de agua es esta zona porque el agua en estas latitudes es más fría, y por tanto más densa, con lo que se hunde más fácilmente. En el Atlántico tropical la saturación del oxígeno es pequeña porque hay una fuerte capa estable que impide la mezcla del agua. A continuación, el agua continúa su recorrido por el Hemisferio Sur, hasta llegar al Océano Glacial Antártico. En esta zona se forman también aguas profundas, ya que las aguas aquí tienen una baja temperatura, aunque el mecanismo de formación de aguas profundas es diferente porque las corrientes son diferentes. A continuación, estas aguas se desplazan al Océano Índico y al Pacífico, donde afloran. Las aguas más antiguas se encuentran en el Pacífico Norte. En esta zona no se forman aguas profundas, como se puede observar en la Figura 5. Sus masas de aguas continúan por el Índico, hasta unirse con las de esta zona y ser transportadas al Atlántico Norte, volviéndose a repetir el ciclo. Una vuelta al circuito completo lleva unos 1000 años.

Actualmente, el cambio climático está alterando la fuerza de la circulación termohalina. El derretimiento del hielo ártico hace que el agua se vuelva más dulce, con lo que es más difícil que se hunda. Una pista de este hecho nos la da la comparación de temperatura medias entre 2020 y el promedio de 1981-2010, en la Figura 6. Se observa cómo en el Atlántico Norte, al sur de Islandia, hay una diferencia negativa de temperatura, al contrario que en el resto de la zona. Esto parece que se está produciendo por el enfriamiento de las aguas del Atlántico Norte.

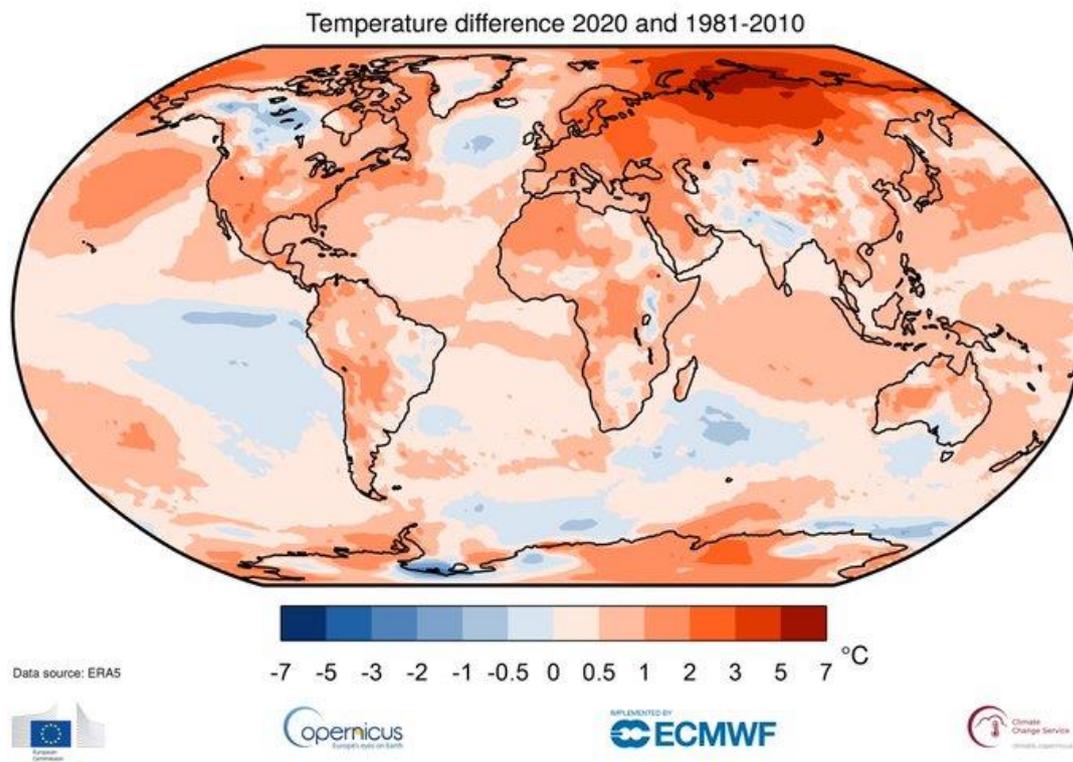


Figura 6: diferencia de temperatura media entre 2020 y el promedio 1981-2010. Fuente: OMM

Este debilitamiento de la circulación termohalina puede tener consecuencias importantes. La Corriente del Golfo y la Corriente de Noruega ejercen una importante influencia en el clima de latitudes medias en el Hemisferio Norte, ya que transportan aguas cálidas, evitando así que el clima europeo sea más frío y sea más seco.

Alteraciones de la circulación termohalina se han dado en el pasado. Cuando se producía una deglaciación, el hielo ártico se derretía, por lo que disminuía la circulación termohalina. Durante la última era glacial se desprendieron grandes cantidades de hielo –los llamados eventos Heinrich–, que enfriaban el Ártico y alteraban el clima a nivel mundial; por ejemplo, calentando de forma rápida la Antártida. Cuando estos desprendimientos cesaban (eventos interstadiales) y el Ártico volvía a enfriarse, aumentaba de nuevo la cantidad de hielo y la circulación termohalina volvía a aumentar su fuerza. En la Figura 7 se muestra la fuerza de la corriente del Golfo (AMOC) y la formación de aguas profundas durante esos eventos. El freno de la circulación termohalina por la fusión del hielo es una de las principales hipótesis que intentan explicar el periodo frío que se dio hace 12 000 años, el Reciente Dryas.

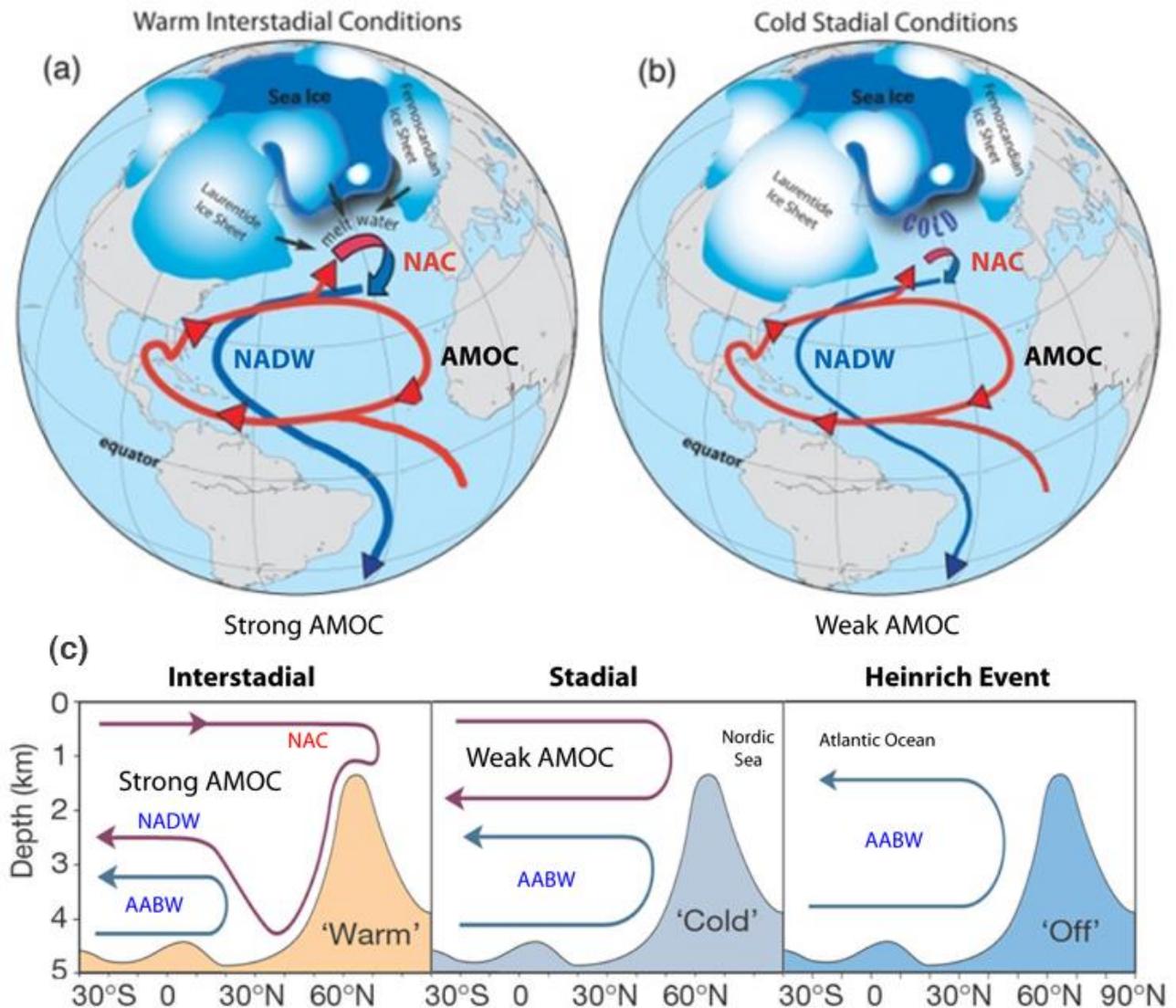


Figura 7: las corrientes oceánicas durante interstadiales (a) y estadales (b). En (c) perfil del Atlántico entre 30°S y 90°N mostrando la dorsal submarina entre Groenlandia y Escocia. Fuente: Schmidt, M.W. and Hertzberg, J.E. 2011. *Nature Education Knowledge 3 (10):11*.

El cambio climático antropogénico parece que está produciendo un freno de la circulación termohalina, pero el posterior enfriamiento se vería mitigado por el calentamiento global, aunque puede que los regímenes de precipitaciones en Europa se vean alterados.

## **Bibliografía**

- Cromin. Paleoclimates: Understanding Climate Change Past and Present (2009)
- Hartman. Capítulo 7 Global Physical Climatology. Elsevier Science (2016).
- Salby, Capítulo 17 Physical of the Atmosphere and Climate. Cambridge University Press (2012) (cap. 7)
- Barry y Chorley. Atmosphere, Weather and Climate, de Barry y Chorley (cap. 7).