CIENCIA
AL DIA *Internacional*
NOVIEMBRE, 2001 NUMERO 2 VOLUMEN 4

Copyright © 2000 Ciencia al Día Internacional

Cambio Climático: ¿Qué está pasando en el océano?

© Joachim Ribbe 2001
Joachim.Ribbe@usq.edu.au

RESUMEN

Existe un continuo debate tanto público como científico acerca de la posibilidad de un cambio futuro en el clima producto de las actividades humanas tales como la quema de combustibles fósiles a partir del siglo XVIII. En este contexto, este artículo presenta una breve revisión del rol del océano en el sistema climático donde se ilustra cómo el océano regula y controla el clima terrestre. Una característica importante del presente estado climático oceánico es la circulación termohalina global que permite el intercambio de calor y gases invernaderos de una manera semejante a una cinta transportadora a través del interior del océano. La detección de un efecto invernadero producido por el hombre es una tarea difícil debido a la variabilidad natural del clima. Cambios diarios, estacionales y decadales en la temperatura son mucho mayores, por ejemplo, que los cambios anticipados de origen antropogénico que serían de unas décimas de grado. Esta variabilidad climática es discutida describiendo varios ejemplos relevantes. En la última sección del artículo se describen observaciones de cambio climático en el océano Pacífico Sur Oriental. Es en este lugar donde se estaría manifestando el indicio de un calentamiento global oceánico a través de datos recientemente adquiridos. Una comparación con registros de los años 60 indica un calentamiento del océano subsuperficial. Mientras los personas que toman decisiones y generan políticas hoy esperan por señales más acentuadas de un incremento en el efecto invernadero y la comunidad científica continúa indagando por evidencia más contundente al respecto, se ha logrado construir

conocimiento de fenómenos climáticos desconocidos hace 2 décadas producto de la investigación global del clima y del océano.

ABSTRACT

There is continued scientific and public debate about the possibility of future climatic changes that may result from human activity such as the burning of fossil fuels since the 18th century. Within this context, the article provides a brief review of the ocean's role within the global climate system. It illustrates how the ocean regulates the Earth's climate and how it asserts control over the climate system. One key feature of the present state of the ocean climate is a global thermohaline circulation, which allows for an exchange of heat and greenhouse gases in a conveyor belt type fashion throughout the ocean interior. Continuous mixing of surface water into the deep ocean caused by complex ocean and atmosphere processes may have already led to a global ocean warming. The detection of a human induced greenhouse effect against the background of natural climate variability is a difficult task. Daily, seasonal, or decadal changes in temperature, for example, are much larger than the anticipated human induced temperature increase of only several tenths of a degree. This climate variability is discussed by using several prominent examples. In the last section of this article, observations of climate variability in the South Pacific Ocean are described. It is here, where a fingerprint of global ocean warming may have already been found in recently collected data. When compared to historical data records from the 1960s, these new data indicate a warming of the subsurface ocean. Today's policy and decision makers wait for more pronounced signals of an enhanced greenhouse effect to arrive and scientists continue to search for further convincing evidence. However, one benefit of global climate and ocean research is the discovery and study of a suite of previously unknown climate system phenomena during the last two decades.

Parte I: Estado Promedio del Sistema Climático

El efecto invernadero natural permite la vida en la tierra. Sin la barrera protectora de la atmósfera y sus constituyentes naturales como el vapor de agua, dióxido de carbono y otros gases del efecto invernadero, la temperatura promedio de la superficie terrestre sería de -19ºC. La mayor parte de las formas de vida presentes en la actualidad no habrían prosperado. Por el contrario, la radiación solar entrante en onda corta es re-emitida como radiación de onda larga en la superficie que es absorbida por los gases de invernadero evitando que se escape al espacio. Estos gases absorben radiación

en onda larga emitida por la superficie terrestre calentando el planeta hasta una temperatura promedio de 15ºC. El balance natural entre la energía solar entrante y la radiación re-emitida en onda larga mantiene el estado de equilibrio del sistema climático global (Intergovernmental Panel on Climate Change - Panel intergubernamental de cambio climático- IPCC, 1995). Una consecuencia lógica de los cambios en la concentración de gases invernadero en la atmósfera sería, por ejemplo, cambios en la temperatura media. Existe hoy evidencia convincente producto de observaciones y estudios con modelos del sistema climático global, que esto está de hecho ocurriendo. El equilibrio del sistema climático está siendo alterado por la actividad del hombre.

La cantidad de radiación solar que entra a la superficie de la tierra posee una distribución no uniforme geográficamente. Existen intercambios continuos de calor entre el océano y la atmósfera, el océano gana calor en el ecuador y lo entrega, a la atmósfera, en las zonas polares. El resultado neto es que la atmósfera y el océano transportan aproximadamente la misma cantidad de calor desde el ecuador hacia los polos. A su vez, esta diferencia de temperatura mantenida por la radiación solar entrante es una de las principales causas de la circulación oceánica y atmosférica. Si bien la atmósfera y el océano juegan un rol similar en el transporte de calor desde el ecuador hacia los polos, la distribución de este calor en el interior de ellos es bastante diferente. El contenido calórico atmosférico total es almacenado sólo en los primeros 1 a 2 metros del océano debido a una mayor capacidad calórica del agua y de su habilidad para absorber calor. Por lo tanto, el océano al ocupar un 70% de la superficie terrestre actúa como el regulador del estado medio climático en el planeta. El océano mitiga las variaciones extremas de temperatura ya sea absorbiendo o transmitiendo calor desde o hacia la atmósfera. Un ejemplo bien estudiado de este tipo de interacción océano-atmósfera y de como el océano regula y suaviza las condiciones extremas es el océano Atlántico Norte. La corriente del golfo y su extensión hacia Europa transporta calor hacia altas latitudes cediéndolo a la atmósfera y moderando el clima regional de Europa Noroeste.

La circulación de la capa superficial del océano Atlántico Norte es, en parte, un componente de la circulación oceánica global, que es a su vez creado principalmente por el viento. Esta circulación también forma la rama superior de la circulación termohalina. Esta circulación opera a escalas temporales de varios siglos. El agua es transportada de una región a otra mucho más lentamente que la circulación creada por el viento. El flujo es promovido por una combinación de enfriamiento del agua superficial, congelamiento,

dilución, formación de agua densa en las regiones polares de ambos hemisferios, mezcla vertical y surgencia de agua en otras partes del océano. Para compensar la formación de agua fría y densa que desciende, agua más cálida y liviana circula hacia las regiones donde se hunde el agua cerrando así el giro de la circulación. Este 'transportador' oceánico es un componente clave del sistema climático global controlando su estado promedio.

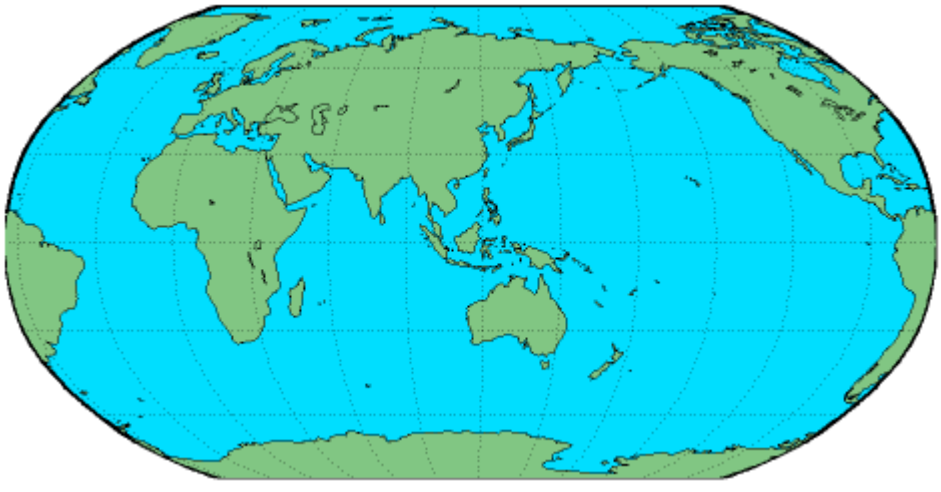

Figura 1: Animación del sistema de transporte basada en Broecker (1991) y otros autores. Este esquema es una aproximación muy general de la situación real en el océano. La circulación global del transportador es causada principalmente por la formación de agua fría y densa en ambos hemisferios; aquí indicado en azul. Ambos flujos de agua profunda se unen en el hemisferio sur para formar parte de la corriente Circumpolar Antártica que fluye hacia el este. Desde aquí se ramifica hacia el océano Indico y Pacífico donde el agua surge hacia la superficie y forma un flujo de retorno cálido y salino hacia el hemisferio norte (en rojo). Para mas detalle referirse al texto.

Los gases invernadero en la atmósfera como el dióxido de carbono determinan la temperatura media de la atmósfera. Al igual que los flujos de calor entre la atmósfera y el océano, estos gases son continuamente intercambiados entre ambos sistemas. Los reservorios susceptibles a ser perturbados por el efecto antropogénico en el ciclo del carbono son la biosfera, la atmósfera y el océano. De éstos, el mayor reservorio de carbono es el océano y la mayoría del dióxido de carbono emitido por la quema de combustibles fósiles va a ser almacenado eventualmente en el océano profundo. El proceso natural de almacenamiento es causado por una combinación de producción de agua profunda en las áreas polares y de procesos biológicos que operan en todo el océano a escala global. Ambos

procesos bombean carbono en el océano y son conocidos como la bomba de solubilidad y bomba biológica respectivamente. Frecuentemente se piensa que el hundimiento de agua superficial es un mecanismo de ventilación ya que aguas superficiales saturadas en oxígeno fluyen hacia las zonas más profundas, rejuveneciendo las aguas subsuperficiales pobres en oxígeno. Las áreas de hundimiento del océano global son verdaderas ventanas en las cuales el océano profundo se comunica con la atmósfera. Propiedades como el oxígeno y dióxido de carbono son transportadas lejos de estas ventanas a través del interior del océano semejante a lo que ocurre en una cinta transportadora. Una parcela de agua superficial y su contenido de propiedades atmosféricas toma, en promedio, varios siglos en regresar a la superficie a su posición inicial. De esta forma el océano actúa como memoria de los estados climáticos del pasado reciente de la atmósfera. El almacenamiento de propiedades atmosféricas en el océano, en una escala temporal de varios siglos, cambia las condiciones atmosféricas del futuro.

Originalmente se pensaba que la mayor parte del hundimiento de agua que fuerza la circulación termohalina ocurría en el océano Atlántico septentrional. En ese lugar un promedio de 10 a 15 millones de metros cúbicos de agua cada segundo, equivalentes a más de 10 veces toda el agua que entra al océano por ríos, es llevada a profundidades de varios miles de metros (Figura 1). Esta agua se conoce como North Atlantic Deep Water (NADW, -Agua Noratlántica Profunda-). Para reemplazar el contenido total de agua producto de este proceso de formación se requieren alrededor de 1000 años, estableciéndose así la escala de tiempo de la cinta transportadora. El agua que circula en el océano profundo actualmente tuvo su último contacto con la atmósfera varios siglos atrás.

Desde las áreas polares en el norte el agua profunda fluye como una corriente de profundidad hacia el sur. Una vez cruzado el ecuador, ésta se mueve hacia el hemisferio austral donde finalmente se une a la corriente Circumpolar Antártica. Esta corriente es ocasionada por el viento y circula hacia el oriente sin limites continentales extendiéndose por 16000 Km. El flujo de la corriente Circumpolar Antártica facilita el transporte del NADW hacia las profundidades de los océanos Indico y Pacífico. Debido al principio de conservación de masas la NADW removida del hemisferio norte debe ser reemplazada por un flujo de agua superficial hacia el norte. Es allí, en hemisferio sur y en los océanos Indico y Pacífico donde el agua surge y las propiedades del océano profundo ascienden lentamente hacia la superficie. Este movimiento es muy lento con un promedio global de 4-5 metros por año

aproximadamente. El agua superficial forma la rama menos densa de la circulación termohalina y se combina con las corrientes causadas por el viento en su viaje de retorno hacia el océano Atlántico Norte. Este simple concepto de la circulación termohalina surgió durante los últimos 50 años, comenzando con los clásicos trabajos de Stommel y Arons (1960a y 1960b) y Munk (1966), culminando con Broecker (1991) y su popular representación esquemática de la cinta transportadora. Recientemente la comunidad científica ha retomado las hipótesis propuestas originalmente por Stommel y Arons. Se argumenta nuevamente que una cantidad equivalente de agua profunda se forma en el océano austral (Broecker et al. 1998) contribuyendo como una segunda fuente para la circulación de la cinta transportadora. Bajo revisión está también la visión original en la que el movimiento emergente del agua profunda tiene lugar uniformemente en el océano (Munk y Wunsch, 1998). Existe evidencia que el movimiento hacia arriba, de agua fría y pesada, es posible a través de la acción global de mareas causadas por el efecto de la luna y el sol. Gran cantidad de la energía mareal es disipada sobre la intrincada topografía de las dorsales oceánicas, taludes y plataformas continentales, potenciando localmente la mezcla vertical que tradicionalmente se pensaba era uniforme en el interior del océano. Esta mezcla revuelve agua de la superficie y del fondo calentando así el océano profundo y enfriando su superficie.

La circulación termohalina actual depende del balance de los flujos de calor y agua dulce en el océano Atlántico Norte. Ambas propiedades controlan la densidad y flotabilidad del agua oceánica superficial. Existe evidencia que este balance ha sido perturbado en el pasado. La circulación termohalina global colapsó en varias ocasiones durante el pasado geológico de la tierra. El colapso mismo puede ocurrir en un periodo de tan solo pocas décadas, un proceso rápido en comparación con otros procesos geológicos, y tendría graves consecuencias sobre las condiciones atmosféricas locales y globales.

Actualmente, se lleva a cabo investigación en forma continua sobre la circulación termohalina con el uso de modelos oceánicos y climáticos. Además, un número siempre creciente de observaciones del sistema climático es utilizado para validar los resultados de estos modelos que son la única herramienta de predicción de las consecuencias de un cambio climático futuro. El World Ocean Circulation Experiment (WOCE) coordinado en una oficina internacional en el Reino Unido (ver web link más abajo) comenzó a principio de los noventa con el objetivo de establecer una base de datos global

del presente estado del clima oceánico. La base de datos va a estar disponible para vigilar cambios climáticos futuros de escala global (Siedler et al. 2001).

Parte II: Variabilidad Climática del Oceáno

El clima de la tierra, que puede ser caracterizado por variables tales como la temperatura promedio de la superficie, sufre variaciones en diferentes escalas de tiempo. Algunas de estas variaciones resultan en cambios semi-permanentes y por lo tanto resultan en cambios climáticos. Un ejemplo es el paso de períodos glaciares a interglaciares y vice-versa, que ocurre en escalas de decenas de miles de años. Muchas iniciativas se están llevando a cavo para registrar el estado presente del clima interglaciar. El WOCE va a proveernos de una visión actualizada de este estado oceánico interglaciar. Cambios en el estado medio del clima presente entendidos como variabilidad natural ocurren en escalas de tiempo de meses, años décadas o incluso siglos. El ciclo anual a través de las estaciones, por ejemplo, resulta en una alternancia de calentamiento y enfriamiento de las capas superiores del océano en orden de varios grados Celsius (Figura 2). Habiéndose establecido el comportamiento basal del presente estado climático a través de experimentos como WOCE, el programa de Variabilidad y Predicción del Clima (CLIVAR), con participación multinacional, ha empezado recientemente a estudiar todos los aspectos del clima terrestre por los próximos diez años.

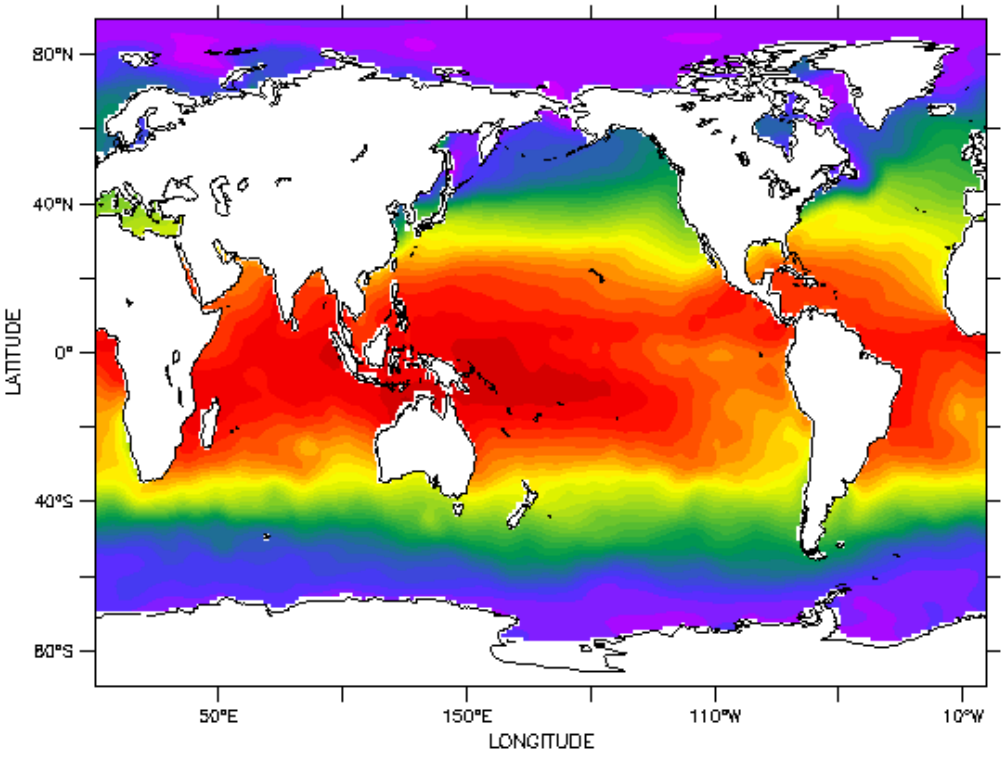

Figura 2: Animación del ciclo estacional de la temperatura superficial del mar basado en la climatología de Levitus (1994). El sombreado es en intervalos de 1ºC. Nótese la alternancia de enfriamiento y calentamiento en cada hemisferio indicado por un movimiento norte-sur (y vice versa) de las isolíneas de temperatura. Las temperaturas superficiales más altas (mayores que 30ºC en rojo) se encuentran en la zona ecuatorial; con la masa de agua cálida en el Pacífico Occidental al norte de Australia. Nótese también la lengua de agua fría en el Pacífico Ecuatorial Oriental y el enfriamiento del océano Pacífico Sur Oriental durante el invierno austral. En ambos hemisferios las aguas superficiales más frías se encuentran en las regiones polares coloreadas en azul.

Una cantidad creciente de evidencia práctica y teóricas indica que el estado climatológico medio o estado de equilibrio del sistema climático global está siendo activamente perturbado por la sociedad. Desde el comienzo del siglo XVIII la sociedad moderna comenzó el uso masivo de combustibles fósil como carbón, petróleo y gas. Estos poseen grandes cantidades de carbono que es lanzado a la atmósfera durante el proceso de combustión en forma de dióxido de carbono. De hecho, el incremento atmosférico de dióxido de carbono desde los años 50 no tiene precedentes en la historia del globo. Hoy en día, la concentración de dióxido de carbono atmosférico crece más rápido que en cualquier período geológico registrado. Los registros geológicos de temperatura atmosférica y concentración de dióxido de carbono muestran una alta correlación entre ambos. Estos registros se extienden por varias decenas de miles de años y parecen señalar que los incrementos en dióxido de carbono son seguidos por aumento en la temperatura.

Inicialmente, sólo estudios teóricos y de modelación del sistema climático sugerían que la temperatura media de la tierra podría verse afectada por la gran cantidad de carbono lanzado a la atmósfera por la actividad humana. Durante la última década se realizaron sendos esfuerzos para detectar este incremento a través de observaciones. La búsqueda y detección de evidencia de cambio climático antropogénico son deseadas por muchos funcionarios que trabajan en instituciones donde se determinan políticas. Tal hallazgo entregaría una guía clara para los legisladores y para futuras acciones de reducción de gases invernadero. En su reporte más reciente, el Intergovernmental Panel on Climate Change (Panel Intergubernamental de Cambio Climático, ver web link) confirmó el consenso de más de 2000 investigadores del clima: 'La actividad humana está cambiando el sistema climático hacia un estado medio global más cálido'.

El esfuerzo para detectar cambio climático antropogénico por medio de observaciones se ha hecho particularmente difícil debido a que el sistema climático exhibe variabilidad en diferentes escalas de tiempo. El rango de temperatura asociada a tal variabilidad excede el cambio pronosticado, como consecuencia de los gases de invernadero, en varios grados (ver Figura 2). La variabilidad del sistema climático se extiende desde ciclos diarios y estacionales a fenómenos interanuales como la Oscilación Austral de El Niño, e incluso la Oscilación del Atlántico Norte que tiene una escala temporal de varias décadas. Los cambios diarios de la temperatura superficial del mar se extienden sólo algunas decenas de metros bajo la superficie, por otra parte, los cambios estacionales se propagan por algunos cientos de metros generando una capa de mezcla de variación estacional (Figura 3). El océano compensa cualquier variabilidad de corto término. Sin embargo perturbaciones persistentes en la atmósfera poseen impacto a escala de la circulación global que a su vez retroalimenta la circulación atmosférica.

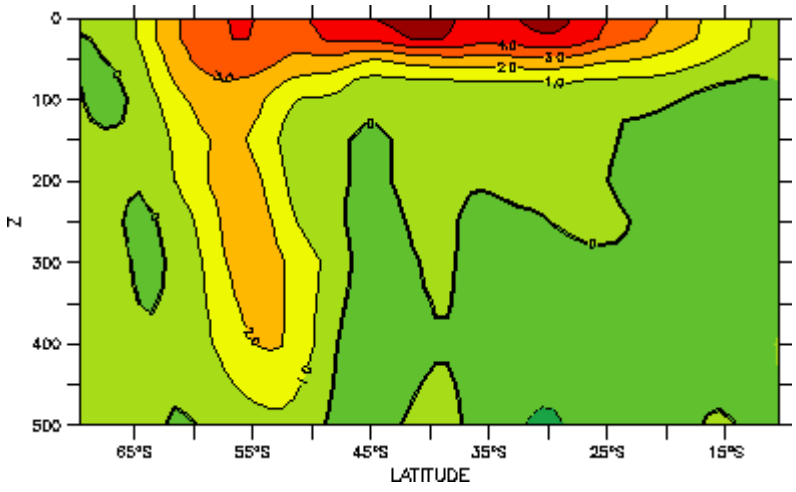

Figura 3: Anomalía promedio de temperatura dentro de los primeros 500 metros en el océano Pacífico Sur (ver Figura 2). La anomalía es calculada como la diferencia entre la temperatura de Enero y Septiembre. Durante el invierno del hemisferio sur, la capa superficial entre los 20-40ºS está alrededor de 1-5ºC más cálida (sombreado en rojo). Entre los 50-60ºS una anomalía térmica alcanza profundidades de 400-500 m. Esta es un área donde el enfriamiento del agua superficial y la mezcla profunda conlleva la formación de masas de agua (ver texto). Bajo esta capa de mezcla, el océano no es afectado por cambios estacionales de la temperatura atmosférica. La información es de la climatología de Levitus (1994).

Un conocido y estudiado ejemplo de variabilidad interanual es la Oscilación sur de el Niño en el océano Pacífico Ecuatorial (ver web link). Este fenómeno es recurrente en intervalos de 3-4 años aproximadamente. Bajo condiciones normales, los vientos alisios acumulan agua superficial cálida del este en el oeste, estableciendo una región de agua cálida en el Pacífico Occidental con las temperaturas superficiales más altas de todo el océano (ver Figura 2, achurado rojo oscuro). Durante el evento del Niño los vientos alisios se revierten y empujan esta agua cálida desde el oeste hacia el este, resultando en un calentamiento anómalo del Pacífico Oriental. El retorno a condiciones normales de viento resulta en una inversión del flujo que devuelve la masa de agua cálida al Pacífico Occidental. Esta oscilación es comparable a un efecto balancín causante de variación interanual de la temperatura superficial del mar (Figura 4). Un sobre-flujo de agua cálida hacia el oeste (comparado a condiciones normales) es causante del evento de la Niña, un enfriamiento inusual del Pacífico Oriental. En consecuencia, la circulación del océano y de la atmósfera alternadas se asocian a anomalías en las precipitaciones las

cuales generan perturbaciones significativas tanto sociales como económicas a los países afectados. La industria pesquera es particularmente sensible a estas perturbaciones. El episodio del Niño 1982 produjo una pérdida de ocho mil millones de dólares para la economía mundial sin mencionar las pérdidas humanas debido a las inundaciones aluviones y otros desastres naturales.

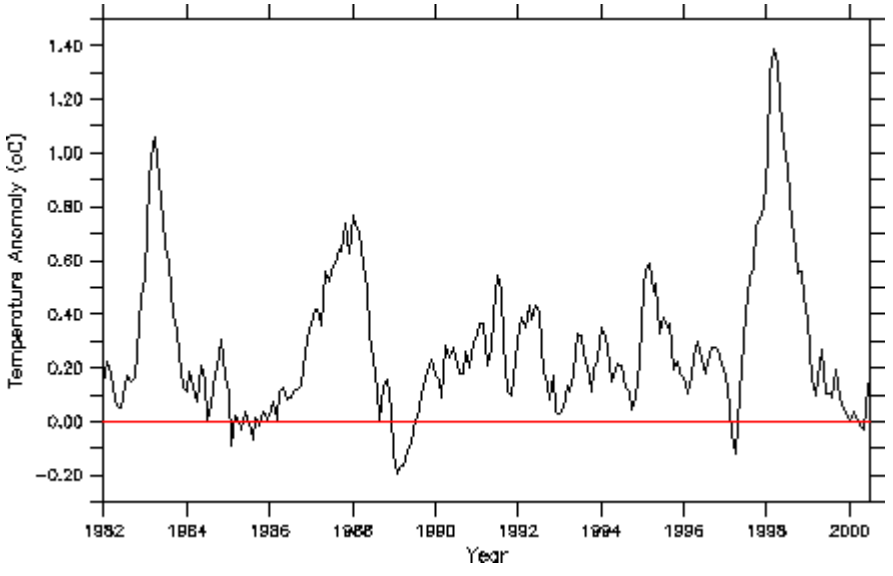

Figura 4: Representación de la anomalía promedio mensual de la temperatura superficial del mar calculada para el área de El Niño 1+2 (0-10ºS y 90-80ºO) localizada en el Pacífico Oriental (números obtenidos de Smith et al., 1996). Hay tres picos principales cerca de 1983, 1987 y 1998. Durante esos años ocurrieron eventos El Niño que dieron lugar a anomalías de la temperatura superficial, i.e. un calentamiento inusual del Pacífico Oriental. En otros años como 1989 y 1997 las bajas temperaturas superficiales son indicativas de la fase La Niña donde ocurre un enfriamiento inusual del Pacífico Oriental.

Mucho esfuerzo se ha invertido en entender los fenómenos físicos que causan esta variabilidad interanual del sistema océano-atmósfera ecuatorial. Esto llevó al establecimiento de un sistema de monitoreo que consiste en un arreglo de alrededor de 70 estaciones permanentes a lo largo del Pacífico Ecuatorial (ver web link). Éstas vigilan continuamente el océano y las condiciones atmosféricas tales como temperatura y velocidad del viento. Un sistema de observación oceánica en combinación con el desarrollo de modelos acoplados océano-atmósfera permite ahora predecir futuros eventos con cierto grado de confiabilidad. Del análisis reciente de temperaturas del océano superficial basadas en mediciones satelitales de temperatura oceánica y mediciones de correntómetros se ha concluido que el inicio de El Niño en el

Ecuador puede estar precedido, en varios meses, por un calentamiento en el océano Pacífico Sur Oriental. Por lo tanto, la vigilancia de los cambios de temperatura en esas localidades podría establecer un sistema de alerta temprana para un evento como El Niño Ecuatorial (Shaffer et al., 1999).

El estudio de la variabilidad del clima y la vigilancia global del sistema océano-atmósfera ha conducido al descubrimiento de otras perturbaciones del sistema climático global. Las más recientes se han denominado Onda Circumpolar Antártica, Oscilación del Atlántico Norte y Dipolo del Océano Indico. Estas perturbaciones son cambios del estado medio del clima que ocurren cada 3-7 años o después de varias décadas. En el océano Pacífico se ha detectado una oscilación referida actualmente como Oscilación Decadal del Pacífico. Esta es una rotación natural del estado climático que ocurre cada 20 a 30 años. En ella, el estado climatológico medio cambió hacia condiciones más cálidas a mediados de los 70. Estas rotaciones de las condiciones marinas tales como la temperatura superficial del mar son a menudo descritas definiendo un índice. Un ejemplo es el índice de oscilación austral, que está basado en las diferencias de presión atmosféricas en la superficie del mar y proporciona información sobre el estado de la Oscilación El Niño del Sur. Un segundo ejemplo está basado en las diferencias de los promedios mensuales de temperatura superficial del mar, y es conocido como es el Índice de Oscilación Decadal del Pacífico (Figura 5).

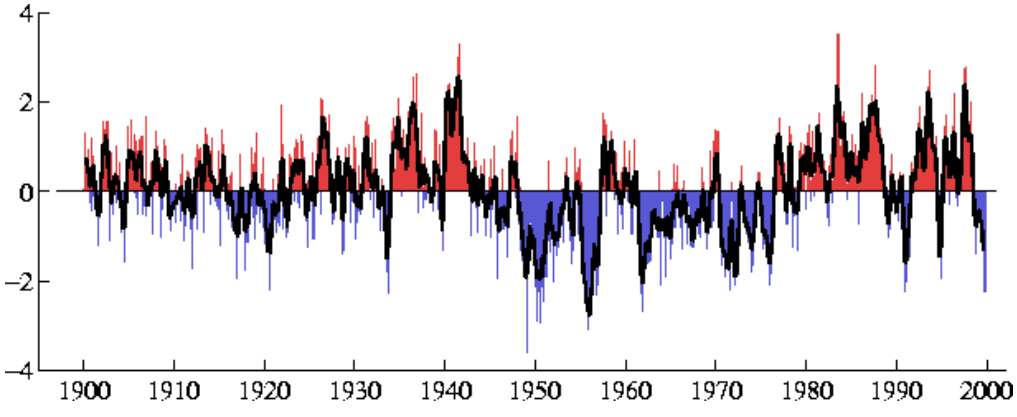

Figura 5: Representación del índice de la Oscilación Decadal del Pacífico basado en anomalías mensuales de la temperatura superficial del mar en el océano Pacífico Norte entre 1900 y 2000. Se cree que después de una fase cálida persistente, ocurrida alrededor de 1977 y 1999 (en rojo), resultados recientes sugieren que se está gestando una fase fría (en azul). Grafico hecho por el Dr. Steven Hare de la International Halibut Commission y Nate Manuta del Joint Institute for the Study of the Ocean and Atmosphere, University of Washington,

Seattle, EE.UU. Para mayor información acerca de la Oscilación Decadal del Pacífico véase también el web link.

Parte III: Cambio Climático en el Pacífico Sur Oriental

Un cambio similar, al observado inicialmente en la temperatura superficial en el Pacífico Occidental, fue encontrado a lo largo de la costa sudamericana, donde datos de temperatura en la costa de Valparaíso (Chile) revelan un efecto de calentamiento persistente desde mediado de los años 70 (Figura 6).

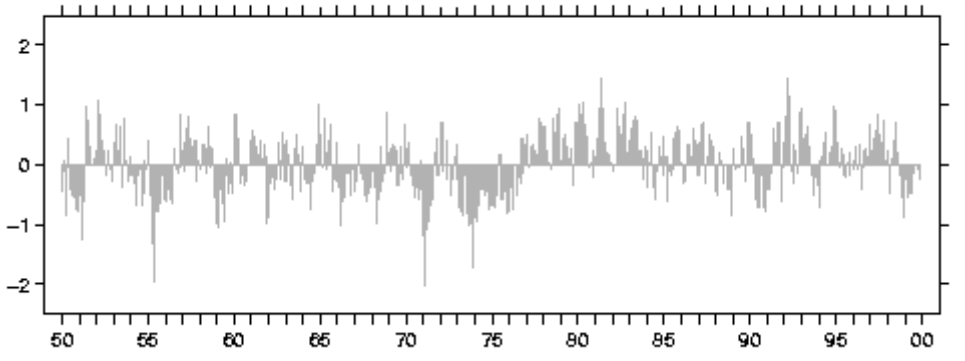

Figura 6: Serie de tiempo de la anomalía de temperatura superficial del mar en la costa de Valparaíso, Chile entre 1950-1999. La figura fue hecha por el Dr. Todd Mitchell, JISAO, University of Washington basado en resultados de Smith et al. (1996). Lo más evidente es el cambio desde anomalías negativas a positivas alrededor de 1977.

La formación de masas de agua en distintas regiones del océano es un mecanismo a través del cual el cambio climático es llevado al interior del océano. A escala global, se ha demostrado la importancia de la NADW. Antes de que esta masa de agua circule nuevamente en el Atlántico Norte, como parte de la circulación termohalina, experimenta diversas transformaciones y tipos de circulación a modo de cintas transportadoras secundarias de escala regional. Esto ocurre en cuencas oceánicas individuales como la del Pacífico Sur bordeada por Sudamérica en el este y por Australia en el oeste (Figura 1). Uno de estos patrones de circulación de cinta transportadora involucra la formación de Subantartic Mode Water (que se refiere a una de las variedades o 'modo' de agua Subantártica) y su transformación en Antartic Intermediate Water (Agua Intermedia Antártica). Mientras el NADW ventila el océano global y substituye el agua profunda del océano por agua superficial nueva en

escalas de tiempo de varios siglos, la formación del agua 'modo' e intermedia ventila el océano a profundidades medias en escalas de tiempo de varias décadas. La vía de circulación propuesta se muestra en la Figura 1 como un amplio camino rayado en el océano Pacífico Sur. El agua formada es removida de la superficie del océano a través de la mezcla profunda de la capa superficial durante el invierno del hemisferio sur (Figura 3) y luego fluye por el interior del océano. Luego circula con los giros oceánicos y surge en las regiones polares o ecuatoriales después de varias décadas.

Las aguas 'modo' e intermedia son caracterizadas por una máxima concentración de oxígeno y una mínima salinidad. A escala global, el agua intermedia es el agua subsuperficial más dulce del océano (Figura 7). Las lenguas de baja salinidad se extienden desde la superficie del océano austral hacia abajo y hacia el norte en el rango de 800-1000 m de profundidad.

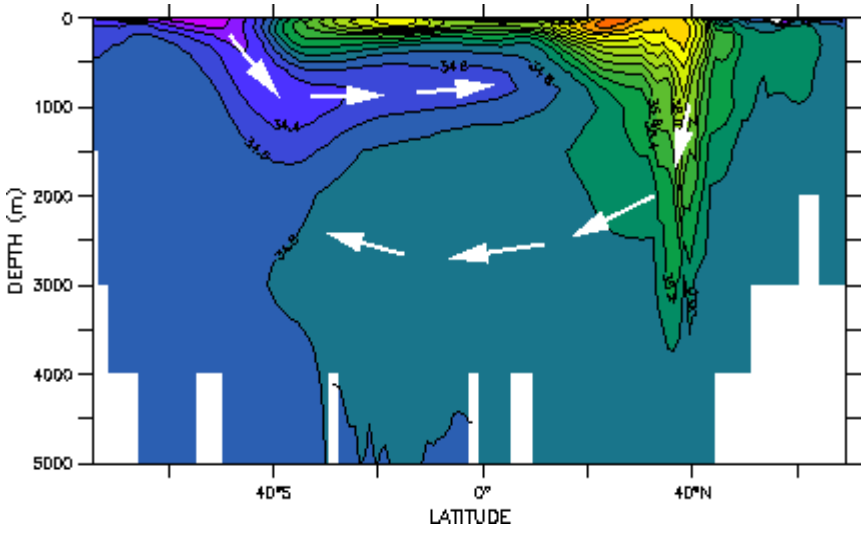

Figura 7: Se muestra una sección norte-sur de salinidad a través del océano Atlántico. En el océano Austral se produce agua de baja salinidad la cual se hunde a profundidades de alrededor de 800-1000m y se mueve como una lengua de agua levemente salina hacia el hemisferio norte (sombreado púrpura-azul). El NADW se produce en el hemisferio norte (sombreado verde-amarillo), se hunde a una profundidad cercana a los 2500-3000m y se mueve dentro del hemisferio sur. Ambas masas de agua son parte de la circulación global de cinta transportadora (ver Figura 1). Las flechas indican la dirección de la vía de ventilación. Resultados provenientes de la climatología Levitus (1994).

Al parecer existe suficiente evidencia, proveniente de observaciones y modelos, que sugiere que una de las regiones del océano austral donde esta

agua intermedia es removida de la superficie es el extremo sur del océano Pacífico Oriental cerca de las costas Chilenas meridionales (Figura 8). Baja salinidad y alto contenido de oxígeno indican una ventilación o una renovación rápida del agua subsuperficial en esta región. En este contexto, se realiza investigación sobre el origen del agua intermedia por el Programa de Oceanografía Física y Clima de la Universidad de Concepción (ver web link), Chile, y el Danish Center for Earth System Science en Copenhague, Dinamarca (ver web link). Hasta ahora, este trabajo ha sido limitado a estudios de modelación de los procesos en el océano remoto (Ribbe 2001) y a las observaciones distantes de las regiones donde las aguas intermedia y modo son formadas, pero en el futuro incluirán una expedición a las regiones de formación de masas de agua cercanas a la costa del sur de Chile.

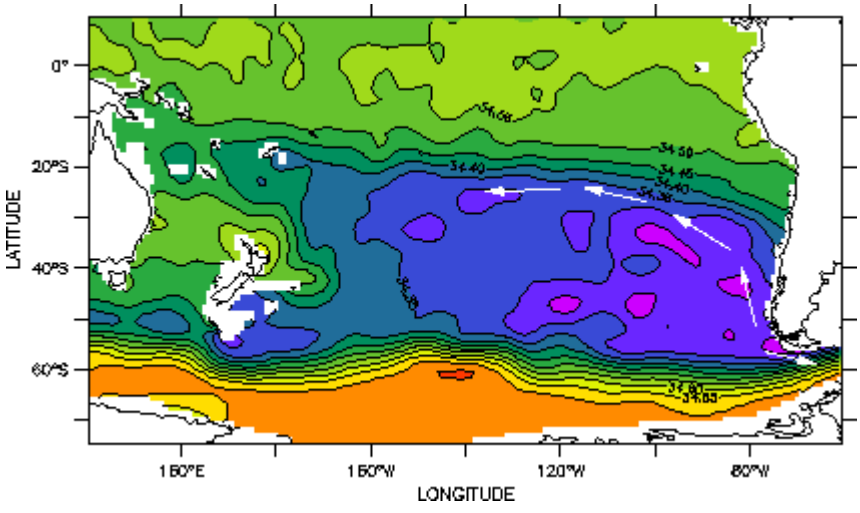

Figura 8: Distribución horizontal de salinidad en el Pacífico Sur a una profundidad de alrededor de 800 m. Australia se encuentra localizada en el Oeste y Sudamérica en el Este. Las salinidades más bajas se encuentran apenas al oeste de la costa sur de Chile (sombreadas en azul-púrpura). El mínimo de salinidad es característico del Agua Modo Subantártica y el Agua Intermedia antártica que se mueve dentro del Pacífico lejos de su lugar de formación en Chile. Una fracción del agua Intermedia deja también el Pacífico Sur vía el Paso de Drake y entra en el océano Atlántico Sur. Las flechas indican el camino seguido por las masas de agua. La data proviene de la climatología Levitus (1994).

Investigaciones acerca de la distribución, formación y circulación de las aguas intermedia y 'modo' en el océano Pacífico Sur Oriental pueden ser cruciales para el entendimiento de cambios del estado medio del océano mundial. Podrían ser los primeros indicadores de que el estado medio está experimentando cambios debido al calentamiento global. Por ejemplo,

publicaciones recientes sugieren que el estado climatológico medio del océano Pacífico ha cambiado durante los últimos 40 años comparando datos provenientes de cruceros de investigación moderna con aquella recopilada durante los años 60. La comparación de las temperaturas subsuperficiales de las aguas 'modo' e intermedias demostraron un calentamiento de varios décimas de grado en este nivel (Figura 9). Este hallazgo en el Pacífico Sur Oriental es consistente con aquellos obtenidos en otras regiones del océano Pacífico lo que demuestra un calentamiento a través de la cuenca del Pacífico en el rango de las aguas intermedias y 'modo' (Bindoff y Church, 1992) durante las ultimas 2 a 3 décadas. No sabemos todavía con seguridad si este calentamiento es el resultado y la primera indicación de un calentamiento global, pero es un hallazgo que indica que la vigilancia de propiedades de las masas de agua intermedias y 'modo' puede ayudar a detectar señales del cambio climático global en el interior del océano.

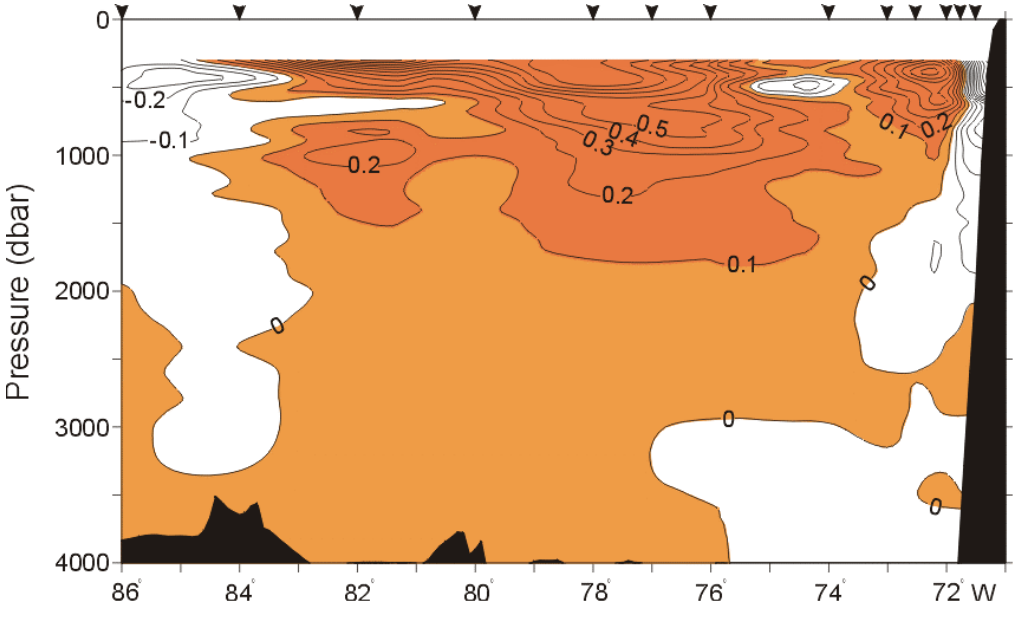

Figura 9: Diferencia de Temperatura calculada de datos provenientes del otoño 1967 y 1995 en el área del Pacífico Sur Oriental. Sudamérica se encuentra al Este (derecha). No hay datos para los 300 metros superiores que contienen la capa de mezcla. Las diferencias de temperaturas más grandes 0.5ºC (sombreadas en rojo) se encuentran en el rango de profundidades de 500-800 m dentro de la vía hacia el norte de la Subantartic Mode Water y la Antartic Intermediate Water. Este calentamiento podría indicar un cambio en el estado medio climatológico del océano. Fuente: Shaffer et al. (2000). Reproducido y modificado con permiso de la American Geophysical Union.

Agradecimientos

El autor desea agradecer al Dr. Todd Mitchell por proporcionar acceso a los datos y a las figuras al mantener una pagina web en el Joint Institute for the Study of the Atmosphere and Ocean, University of Washington, USA (ver link más abajo). Dr. Ole Kraup Leth proporciono una nueva Figura 9 publicada originalmente en Shaffer et al. (2000). También quisiera agradecer a Carlos Moffat de la Universidad de Concepción por la ayuda en la producción de las 2 animaciones y Ricardo De Pol-Holz por la traducción del manuscrito al Español. Otros gráficos fueron hechos con FERRET, que es una herramienta de análisis desarrollada por E. Harrison y S. Hankin del NOAA's Pacific Marine Environmental Laboratory, Seattle, USA.

Punteros de Interés

Panel Interguvernamental sobre Cambio Climático: http://www.ipcc.ch/
Programa Clima y Variabilidad: http://www.soc.soton.ac.uk/CLIVAR

Estudio TAO-TOGA: http://www.pmel.noaa.gov/toga-tao/home.html

Página sobre El Nino: http://www.pmel.noaa.gov

Programa para Estudios en Oceanografía Regional y Clima:
http://w.profc.udec.cl

Centro Danés de Ciencias de Systemas de la Tierra:
http://www.dcess.ku.dk

Pacific Decadal Oscillation: http://topex-
www.jpl.nasa.gov/discover/PDO.html

Experimento de Circulación Oceánica Global:
http://www.soc.soton.ac.uk/OTHERS/woceipo/ipo.html

Referencias

Bindoff, N. L. and J. A. Church (1992), Warming of the water column in the southwest Pacific Ocean. Nature, 357, 59-62.

Broecker, W. S. (1991). The Great Ocean Conveyor Belt. Oceanography, 4, 79-89.
Broecker, W. S., S. L. Peacock, S. Walker, R. Weiss, E. Fahrbach, M. Schroeder, U. Mikolajewicz, C. Heinze, R. Key, T. H. Peng, and S. Rubin (1998). How much deep water is formed in the Southern Ocean. Journal of Geophysical Research, 103, 15833-15843.
Intergovernmental Panel on Climate Change (1995). Climate Change 1995. The Science of Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, 572pp.
Levitus, S. (1994). World Ocean Atlas. Informal Report No. 13, National Oceanographic Data Center, Ocean Climate Laboratory, Washington D.C.
McCartney, M. S., R. G. Curry, and H. F. Bezdek (1996). North Atlantic's transformation pipeline chills and redistributes subtropical water. Oceanus, 39, 19-23.
Munk, W. H. (1966). Abyssal recipes. Deep-Sea Research, 13, 707-730.
Munk, W. H. and C. Stommel (1998). Abyssal recipes II. Deep-Sea Research, 45, 1977-2000.
Ribbe, J. (2001). Intermediate Water Mass Production Controlled by Southern Hemisphere Winds. Geophysical Research Letters, 28, 535-538
Siedler, G., J. Church, and J. Gould (2001). Ocean Circulation and Climate. Observing and Modelling the Global Ocean. International Geophysics Series, Vol. 77, Academic Press, San Diego, 715pp.
Shaffer, G., S. Hormazabal, O. Pizarro, and S. Salinas (1999). Seasonal and interanual variability of currents and temperature off central Chile. Journal of Geophysical Research, 104, 29951-29961.
Shaffer, G., O. Leth, O. Ulloa, J. Bendtsen, G. Daneri, V. Dellarossa, S.Hormazabal and P.-I. Sehlstedt (2000). Warming and circulation change in the eastern South Pacific Ocean. Geophysical Research Letters, 27, 1247-1250.
Smith, T. M., R. W. Reynolds, R. E. Livezey, and D. c. Stokes (1996). Reconstruction of historical sea surface temperatures using empirical orthogonal functions. Journal of Climate, 9, 1403-1420.
Stommel, H., and Arons, A. B. (1960a) On the abyssal circulation of the world ocean - I. Stationary planetary flow patterns on a sphere. Deep-Sea Research, 6, 140-154.
Stommel, H., and Arons, A. B. (1960b). On the abyssal circulation of the world ocean - II. An idealized model of the circulation pattern and amplitude in oceanic basins. Deep-Sea Research, 6, 217-233.

Joachim Ribbe es oceanógrafo físico, actualmente a cargo de la cátedra de Climatología en la Universidad de Southern Queensland, Australia. Anteriormente fue investigador y profesor asociado en la Universidad de Concepción, Chile, dentro del Programa Regional de Oceanografía Física y Clima, teniendo como principales intereses el modelamiento oceánico de gran escala, procesos climáticos y el rol del océano en el sistema climático.