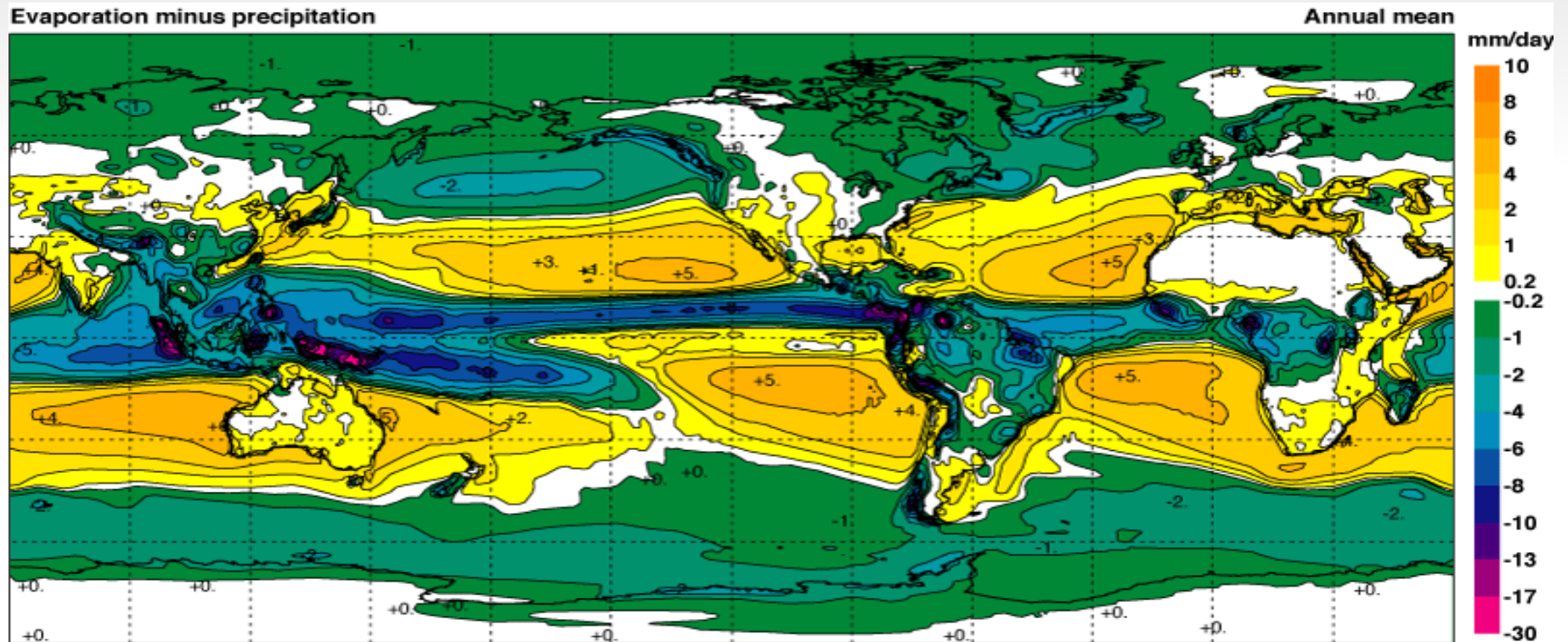


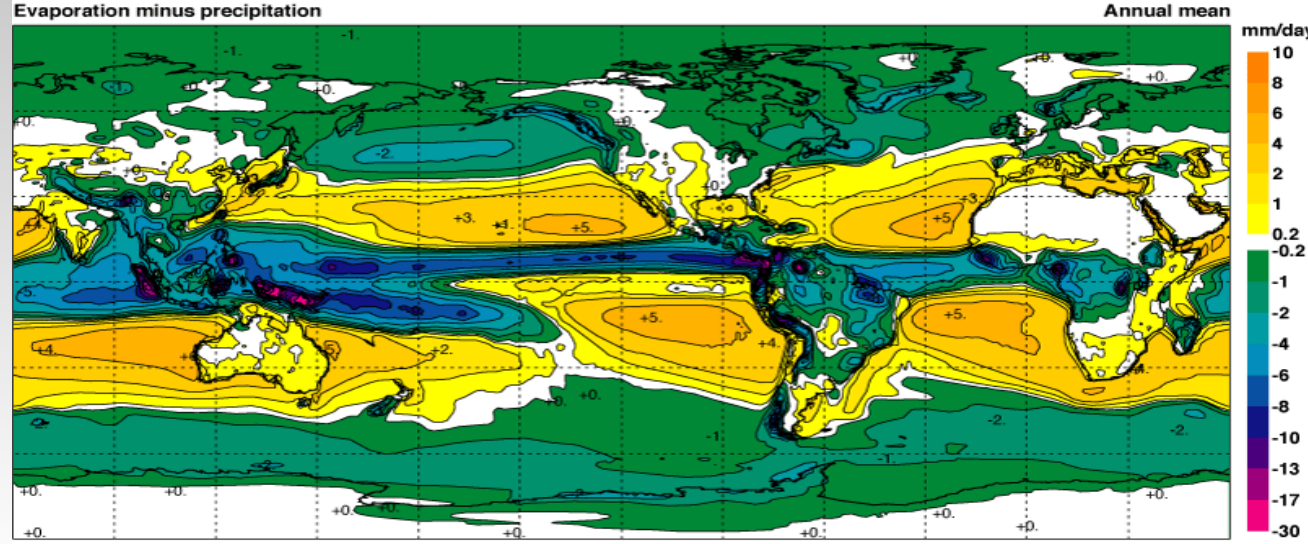
# Desiertos ¿Donde se ubican?

Evaporación – Precipitación  
Media anual



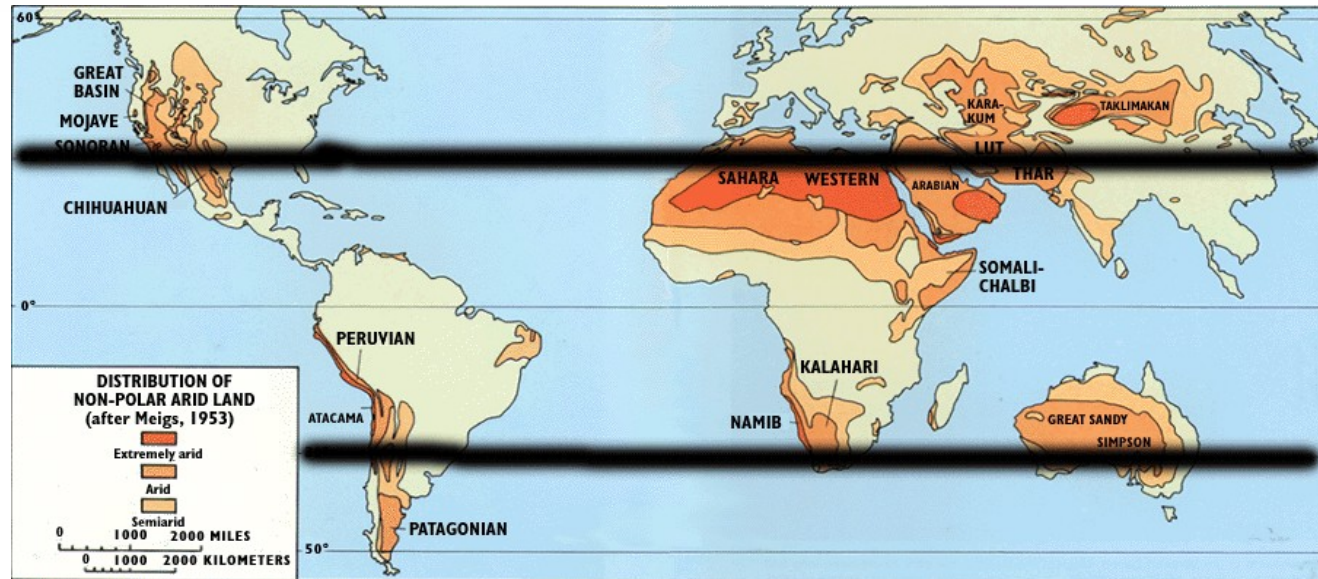
# Los desiertos ocurren donde:

- \*  $E-P > 0$
- \* Celda de Hadley: descenso 10-40 N/S
- \* Descensos locales por montañas: Patagonia

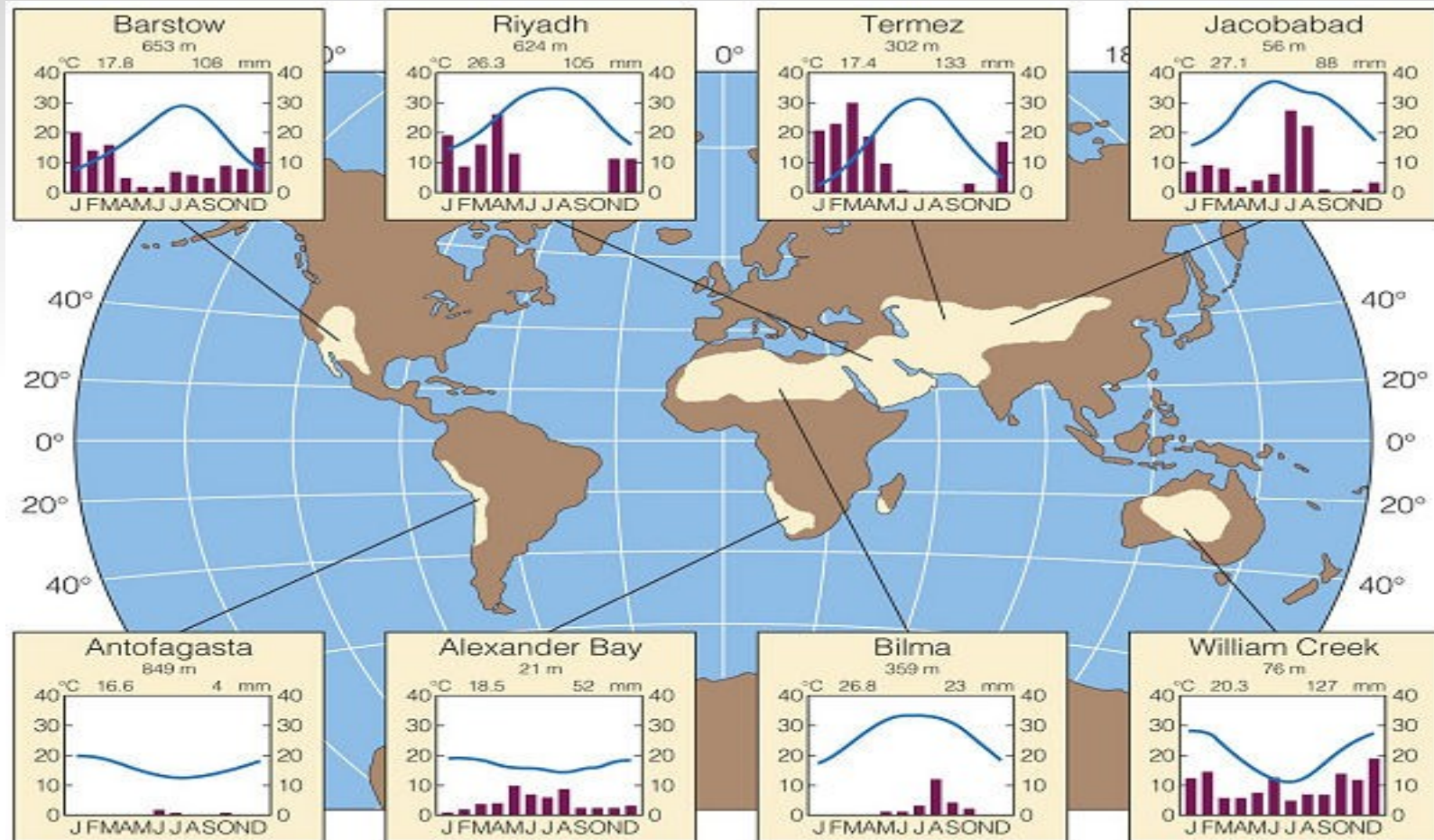


## Atacama:

- descenso global
- descenso local (alisios sobre Andes).
- Temperatura de superficie del mar fría



# Diferentes desiertos: diferentes temperatura y precipitación

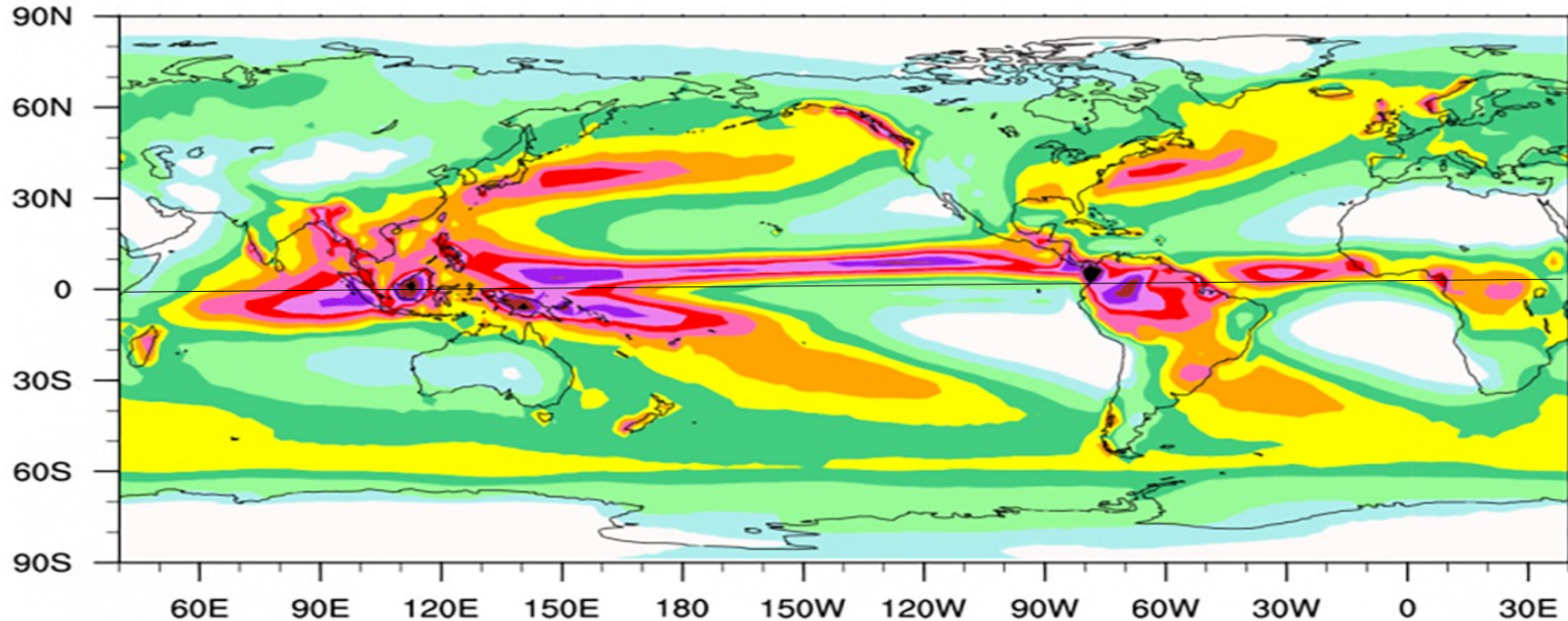


# ¿De qué dependen las lluvias en los trópicos?

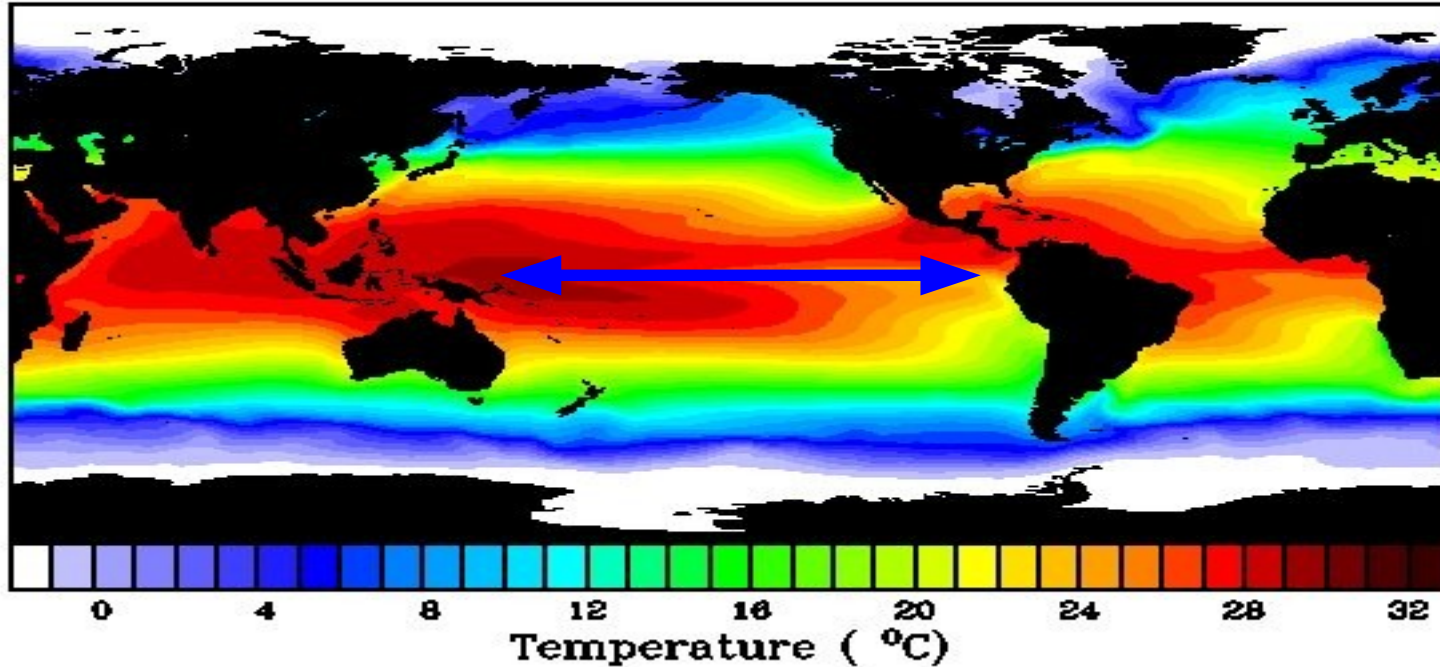
¿Donde se ubica la ZCIT?

¿Por qué llueve más en el oeste que en el este del Pacífico ecuatorial?

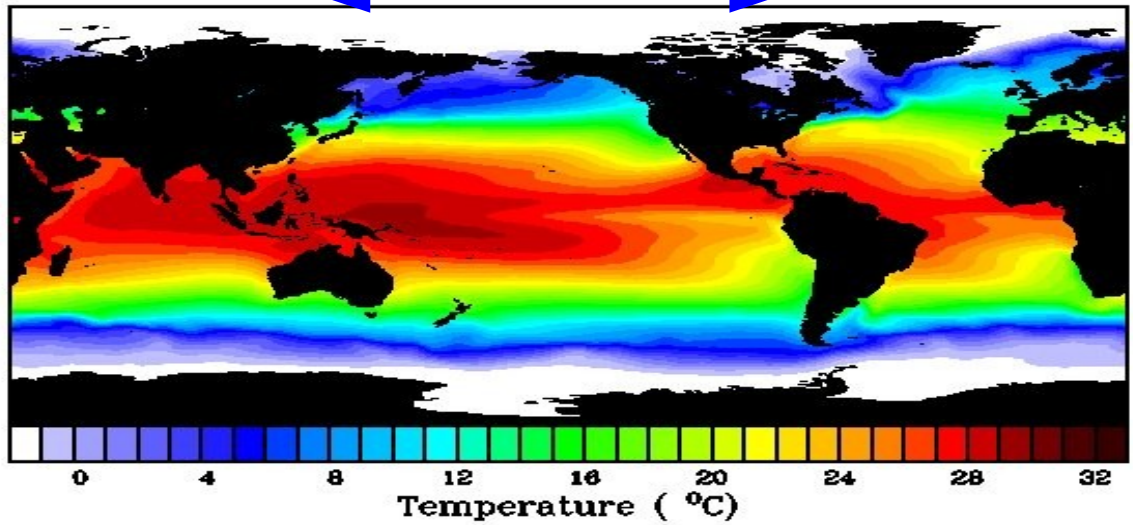
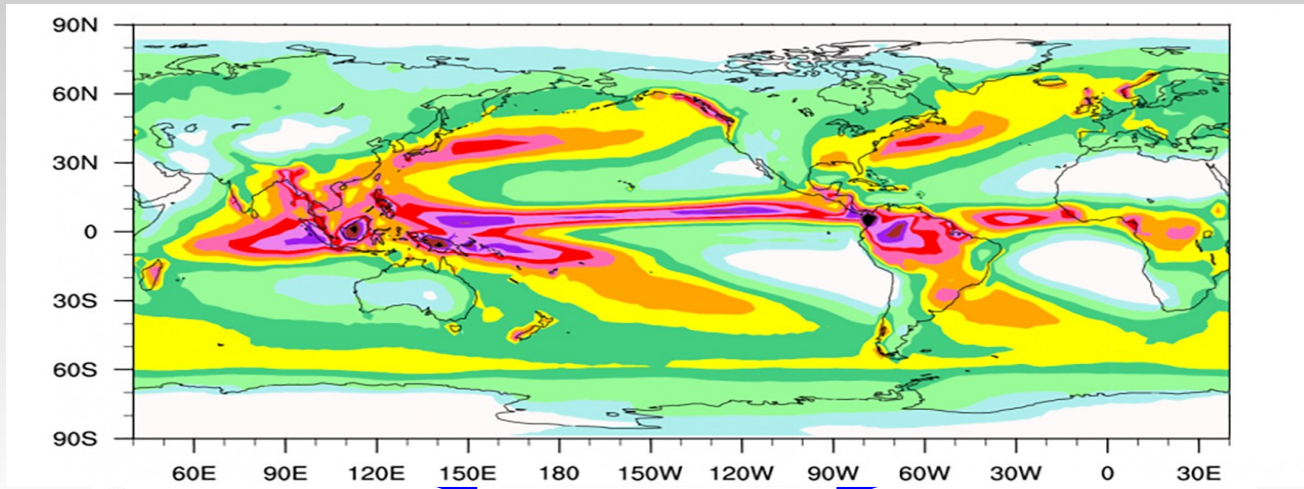
## Annual Mean Precipitation (1979–2010)



ANNUAL MEAN  
GLOBAL SEA SURFACE TEMPERATURES

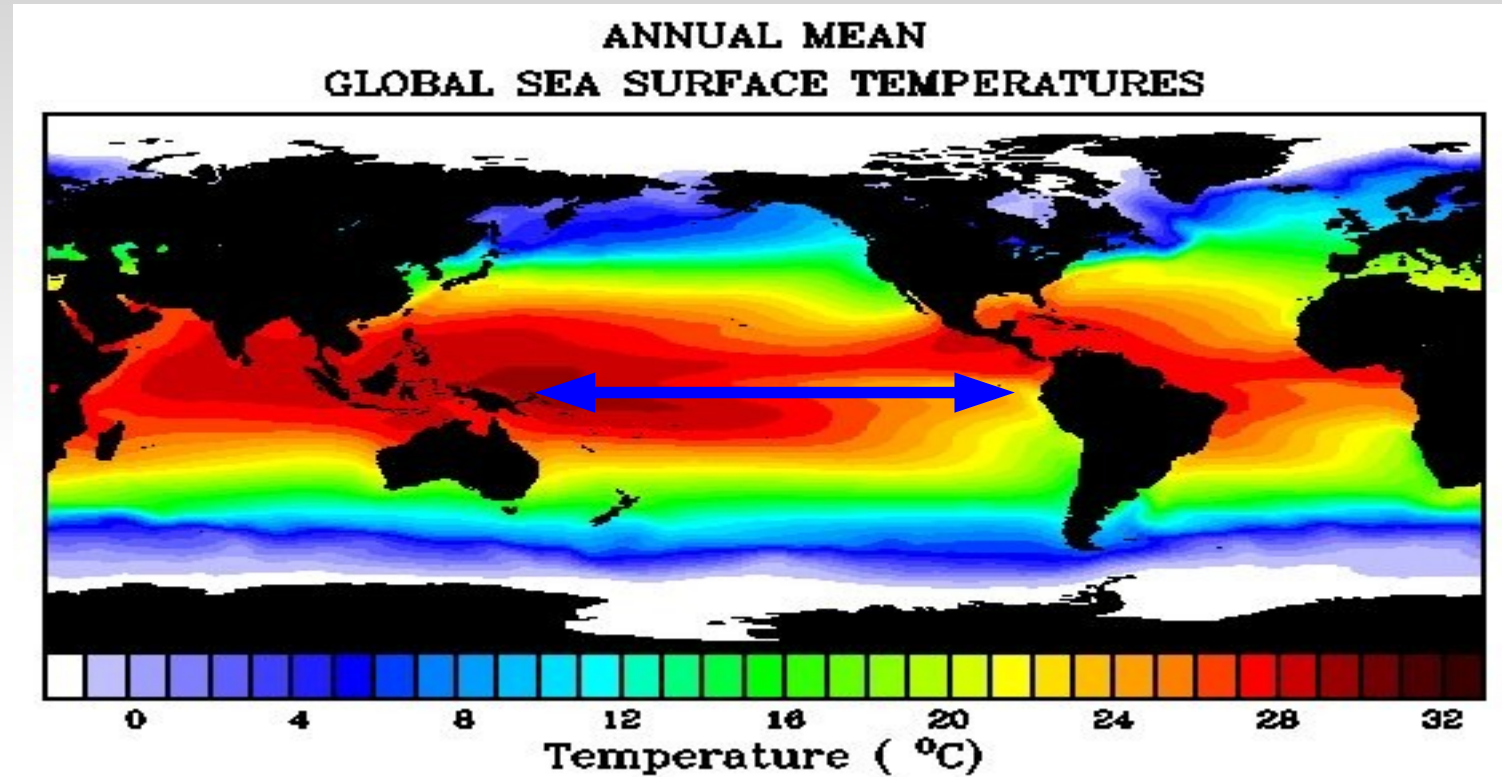


Las diferencias de temperatura de superficie no sólo existen entre océano-continente. También existen entre diferentes regiones de los océanos. En particular, el Pacífico ecuatorial este es más frío (5°C) que el oeste.

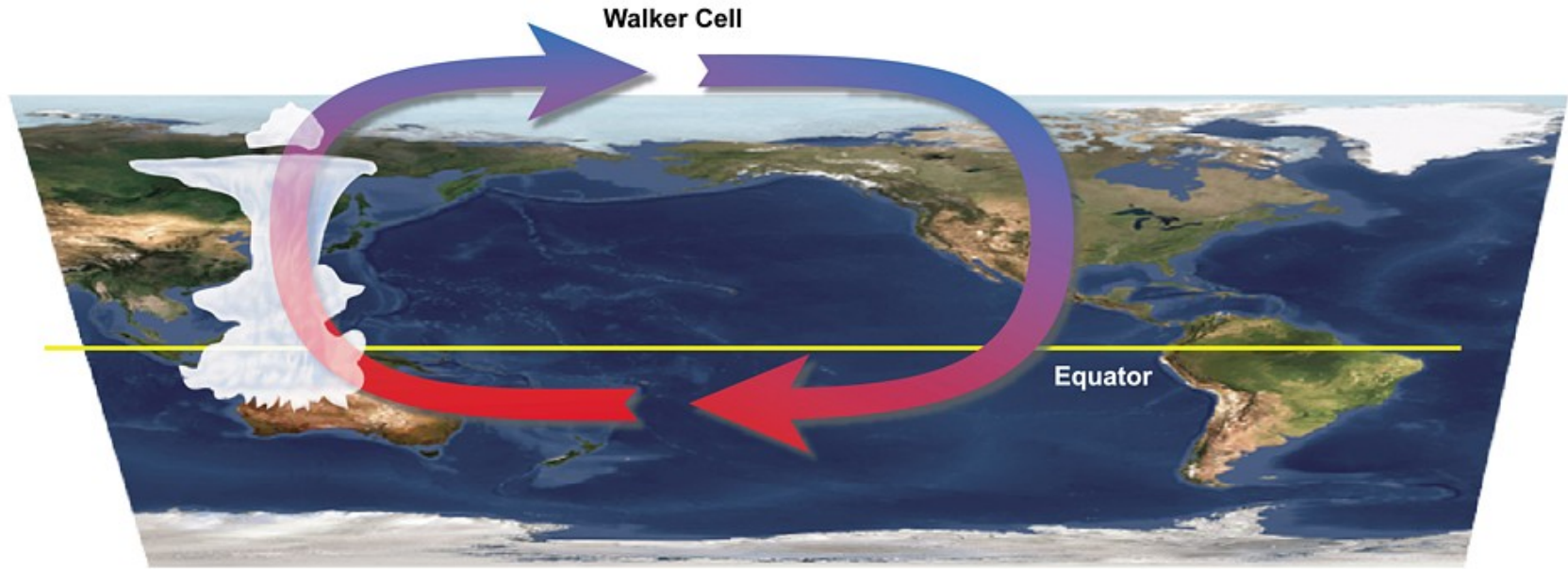


La ZCIT se ubica sobre las aguas más cálidas. Máximos de lluvia en los trópicos relacionados directamente con la temperatura de superficie del mar

# Celda de Walker



Las diferencias de temperatura de superficie entre el Pacífico ecuatorial este y oeste inducen una circulación en el plano vertical ecuatorial.

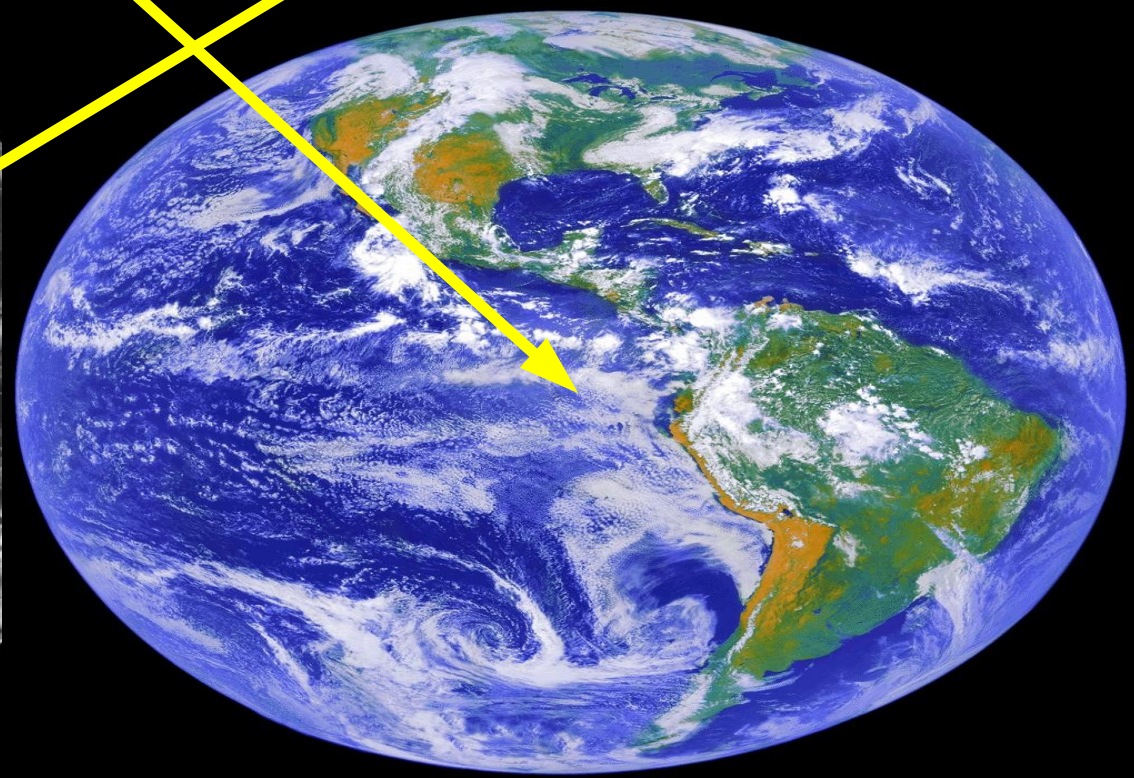
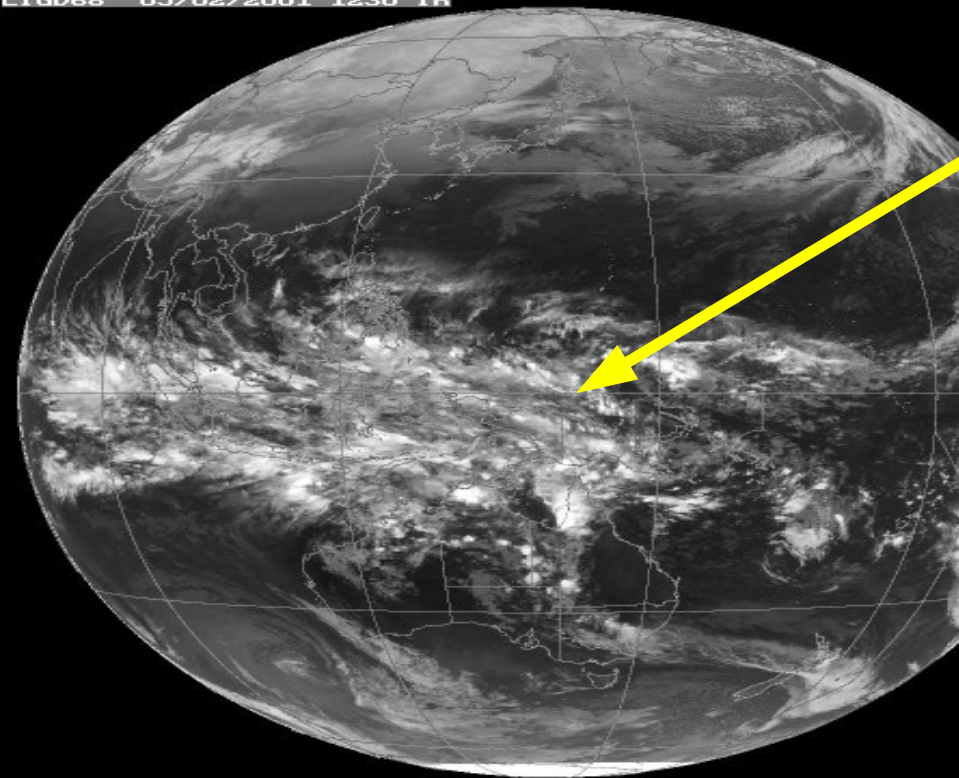


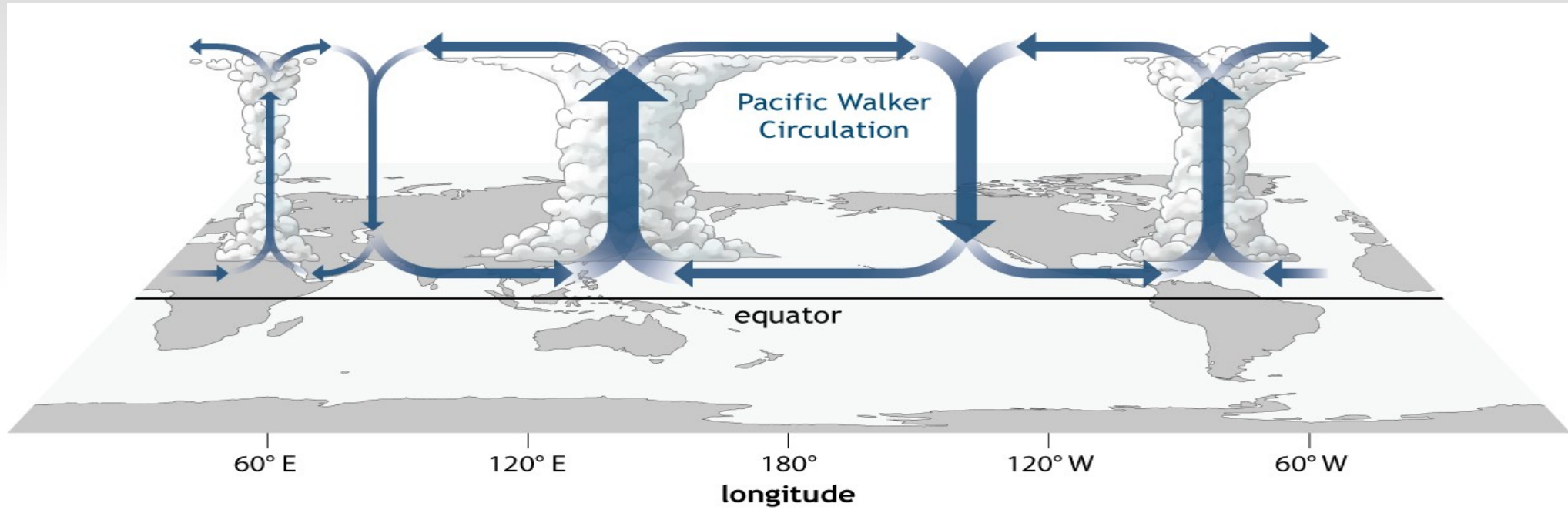
En las cálidas aguas del Pacífico oeste existe un movimiento de ascenso de aire generando nubes convectivas. Este aire se mueve en altura hacia el este, desciende en el Pacífico este donde provoca la aparición de nubes bajas tipo estratos que casi no producen lluvias y cubren las aguas frías de la costa peruana. El circuito se completa en superficie con los vientos alisios.





LIGD68 05/02/2001 1230 IR



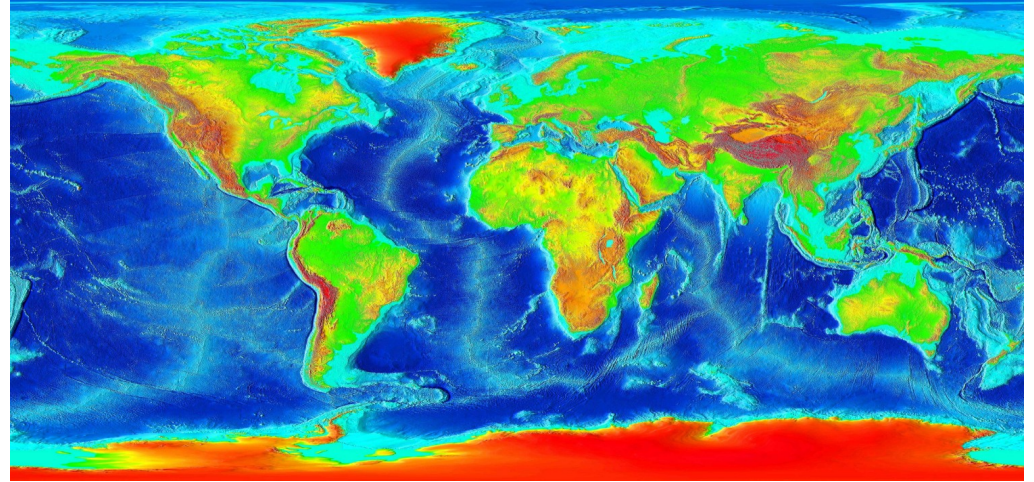


NOAA Climate.gov

Existen celdas análogas a la de Walker también en otros sectores de la línea ecuatorial

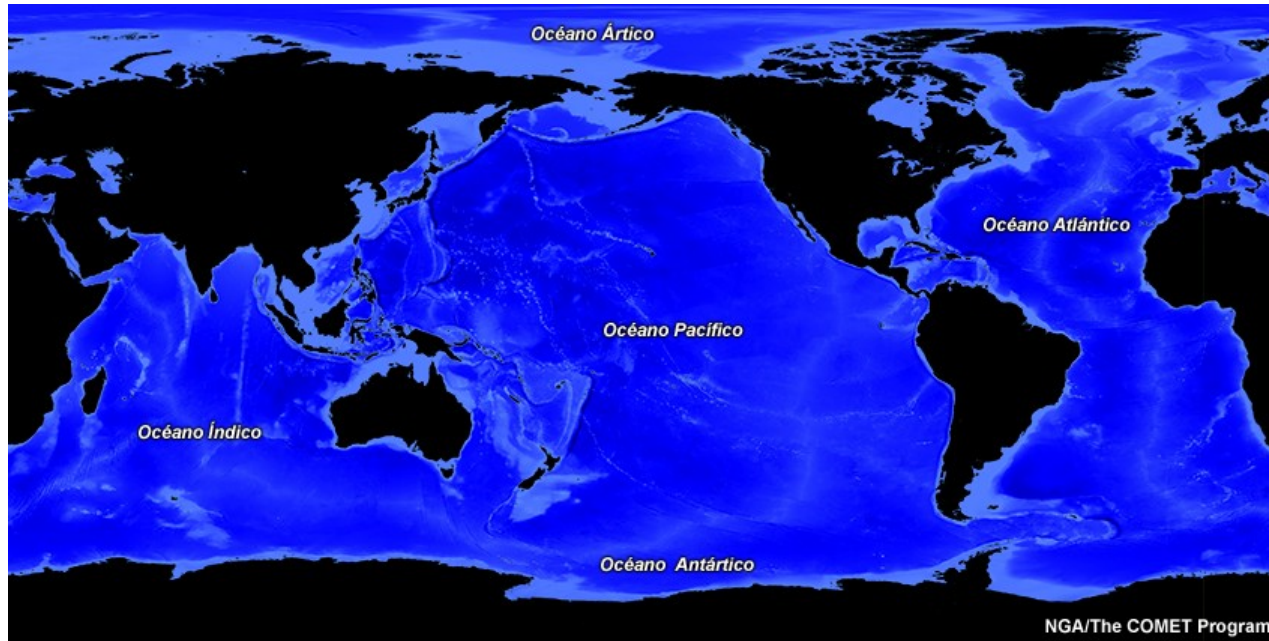
# **INTRODUCCIÓN A LA CIRCULACIÓN OCEÁNICA**

# OCÉANOS

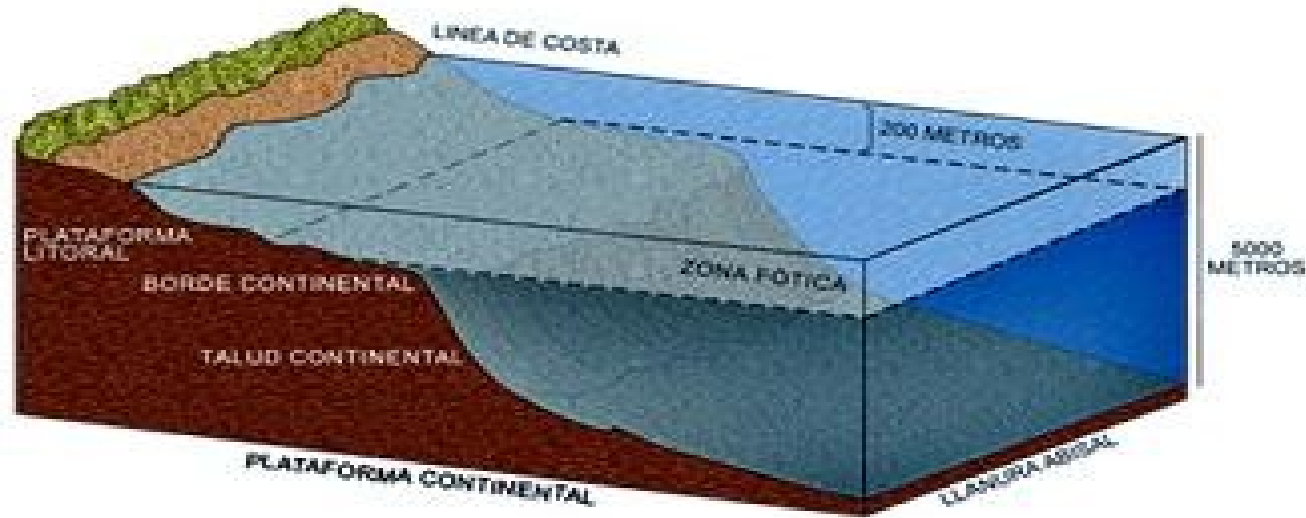


Los océanos cubren el 71% de la Tierra y tienen una profundidad promedio de 4km

# Geografía



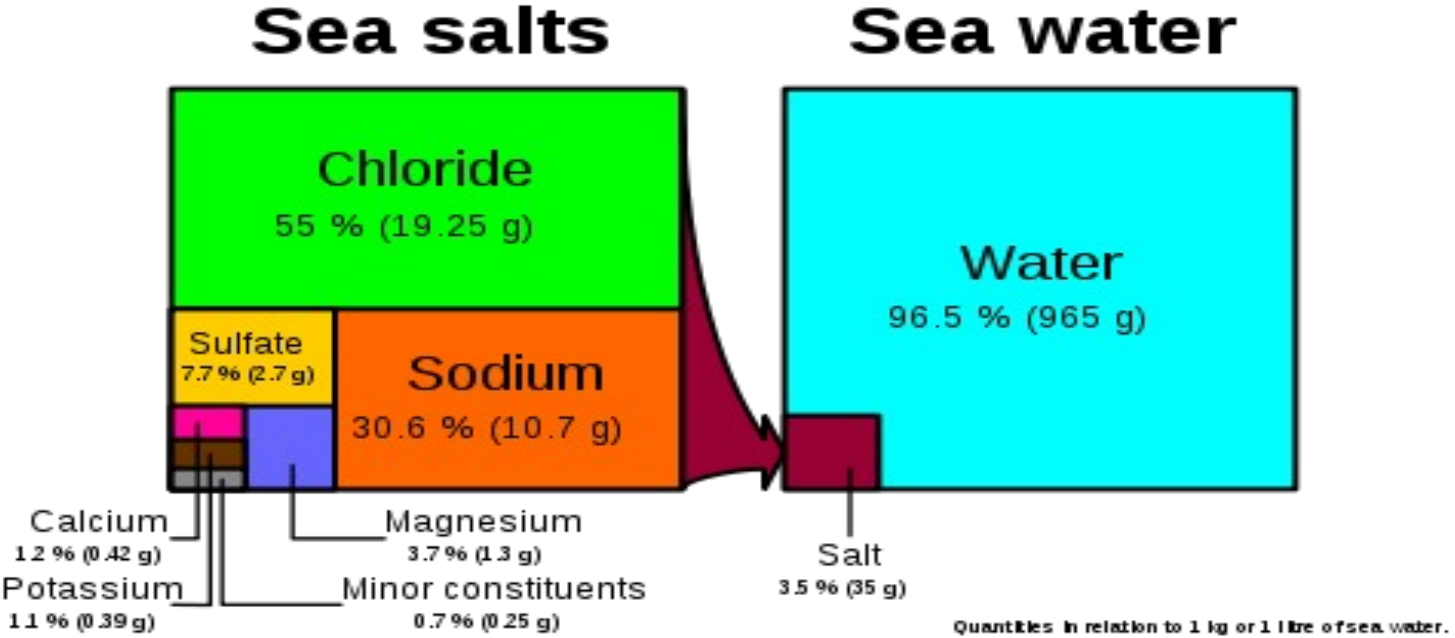
Las cuencas están atravesadas por dorsales



- Una cuenca oceánica comienza en la costa con la plataforma continental extendiéndose hasta una profundidad de 200 m.
- Puede variar en ancho desde unas decenas de m a más de mil km.
- Termina usualmente en forma abrupta dando lugar al talud, una zona de gran pendiente (entre 5% y 10%).
- El talud conecta con el fondo marino que tiene una pendiente típica de 0.01 a 0.1%.

# Propiedades del agua de mar

## Salinidad



# Propiedades del agua de mar

## Variables importantes:

- Temperatura (T):  $\sim 3,6^{\circ}\text{C}$  [valor promedio]
- Salinidad (S):  $\sim 34$  g/Kg [valor promedio]
  - Densidad

La densidad depende de T y S:

- + Sal  $\rightarrow$  + Densidad (relación lineal)
- + Temperatura  $\rightarrow$  - Densidad (el agua se expande)



# Propiedades del agua de mar

## Ecuación de estado

T- temperatura

S – salinidad: medida de la cantidad de sal disuelta en el agua de mar.

Promedio: ~34.5.

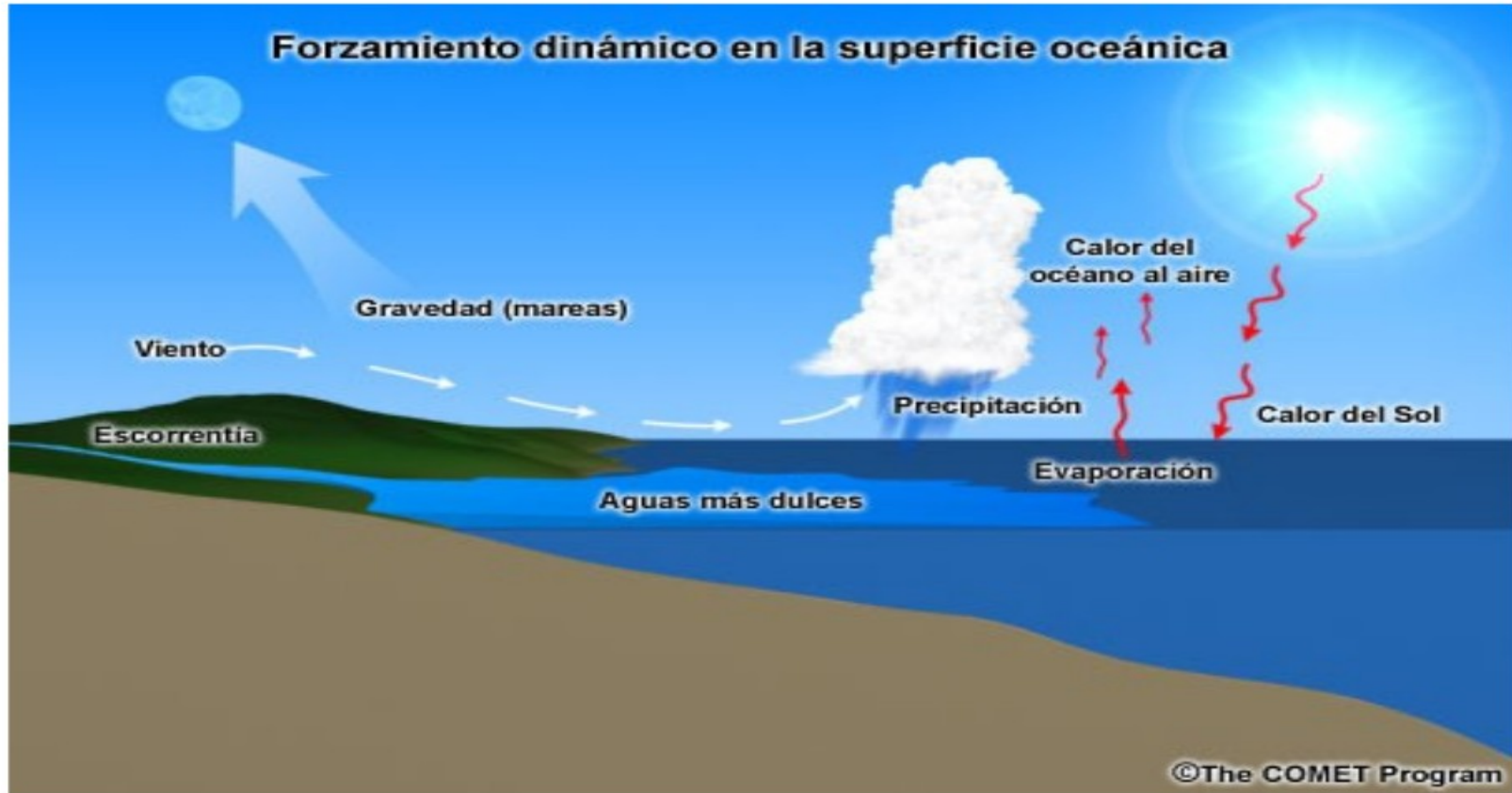
La salinidad se mide en “practical salinity units” (psu) o sin unidades.

P – presión: a pesar de que el agua no es completamente incompresible usualmente consideramos que:

$$\rho = \rho(T, S)$$

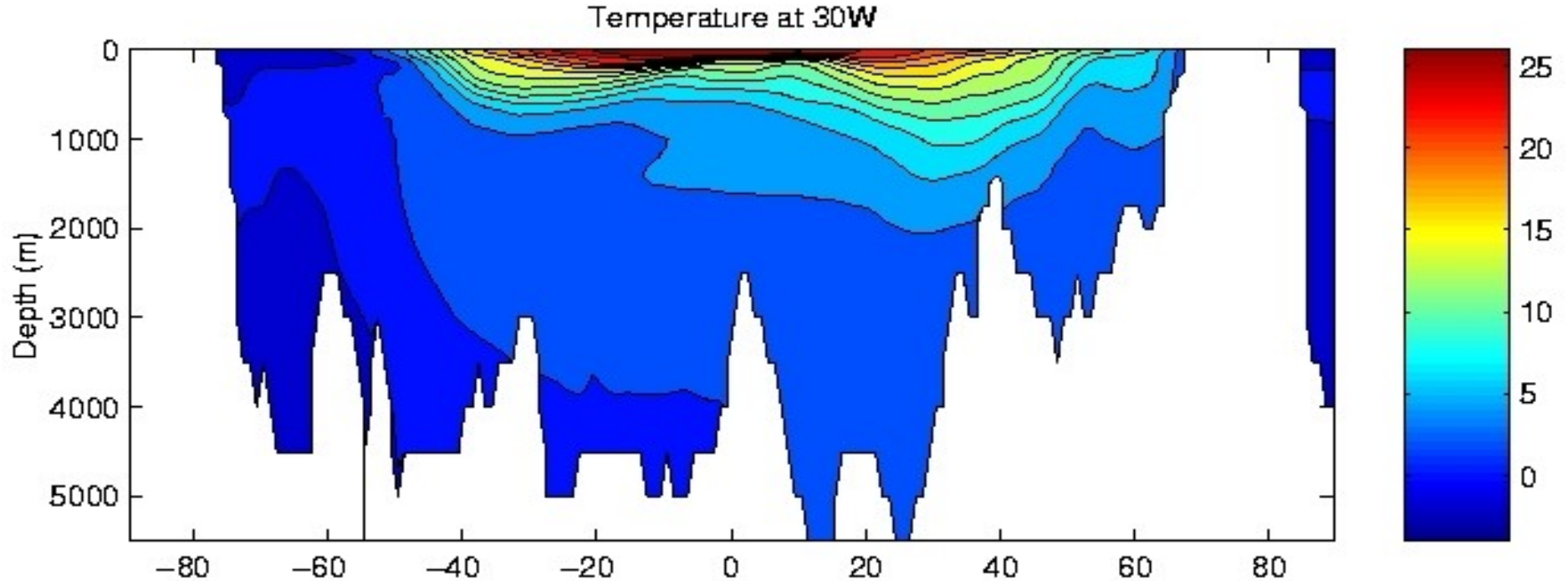
$\rho$  aumenta con la salinidad y disminuye con la temperatura

# Forzantes del movimiento oceánico



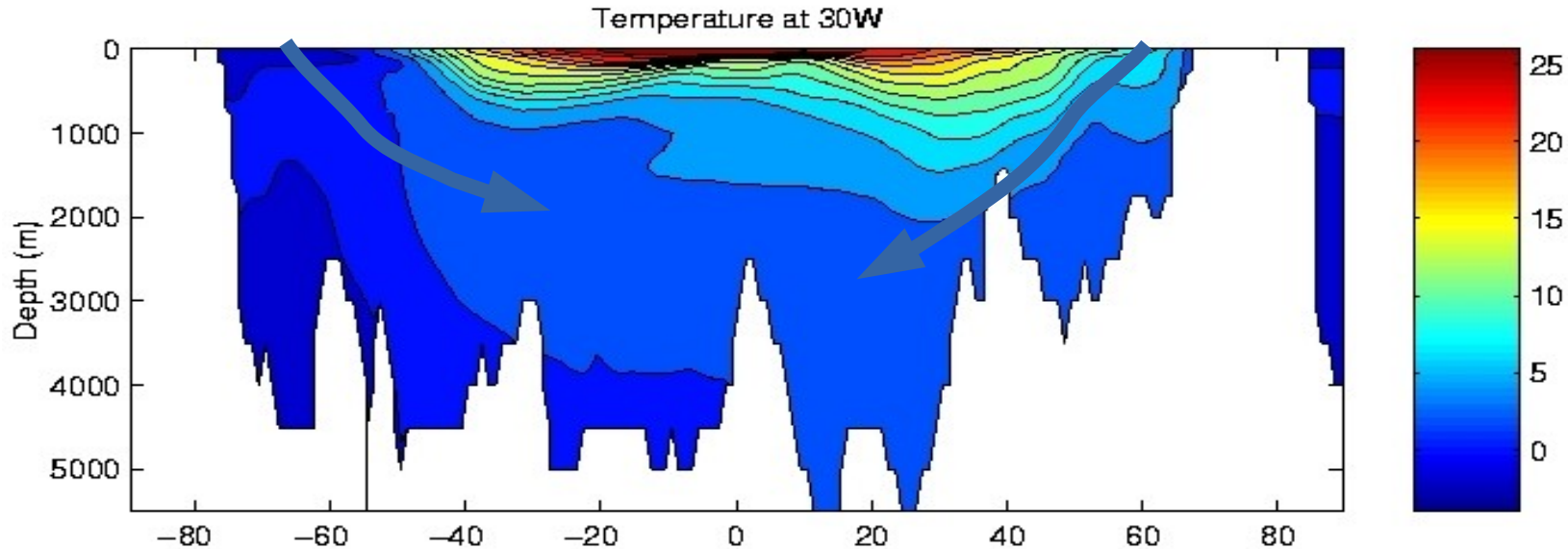
## ¿Por que el océano es relativamente frío?

En 1751, Henry Ellis, capitán de un barco de esclavos británico hizo un descubrimiento cerca de 24N: el océano profundo es frío!



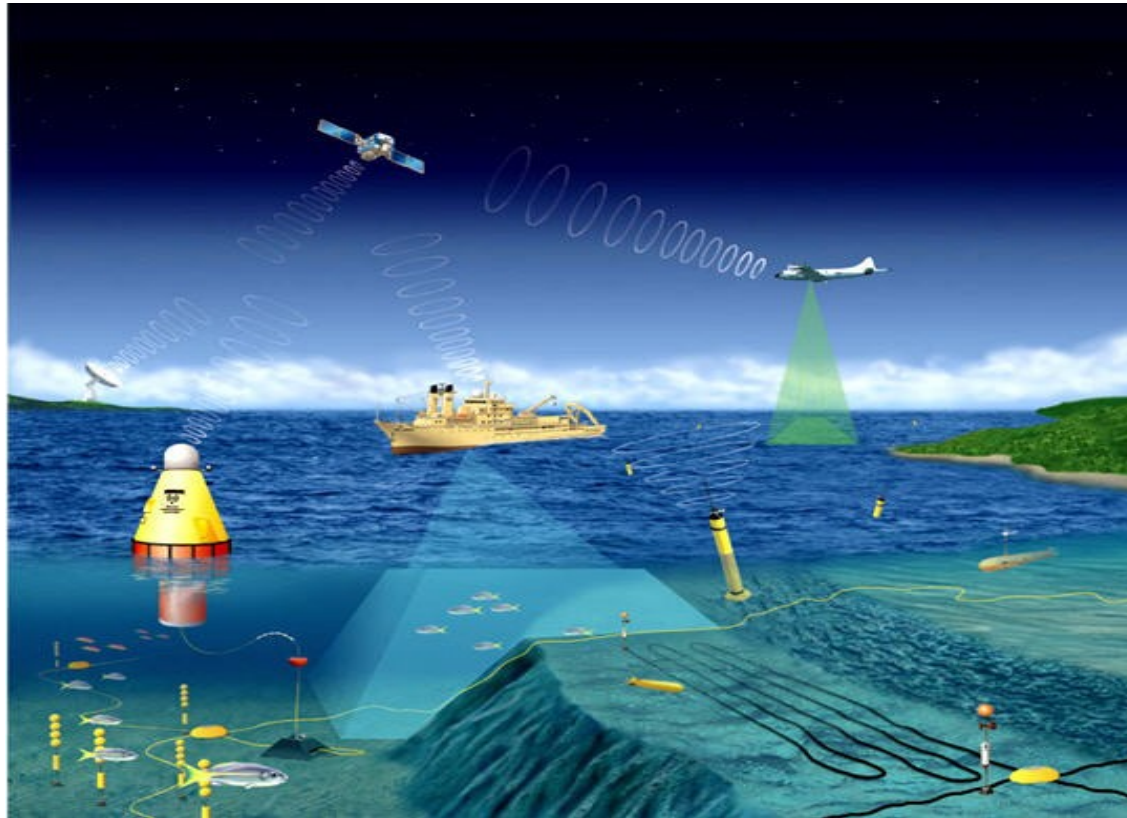
## ¿Por qué el océano es relativamente frío?

- La solución al problema fue encontrada por el conde Rumford cerca de 1800: las aguas frías descienden en los mares polares y se mueven hacia el ecuador por medio de corrientes profundas.



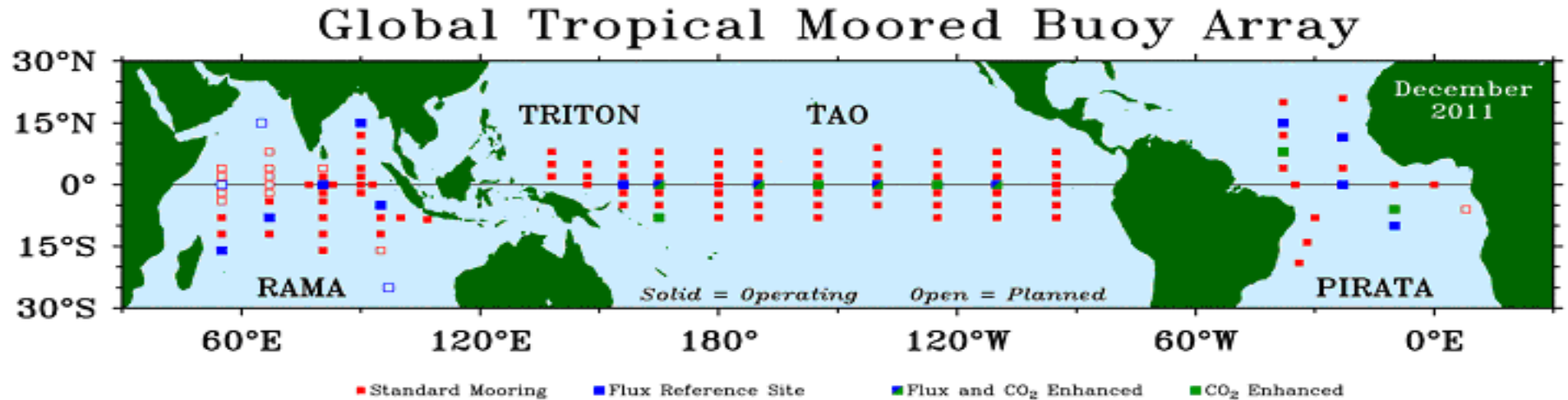
# Métodos de estudio del océano

## Sistema global de observación de los océanos



# Métodos de estudio del océano

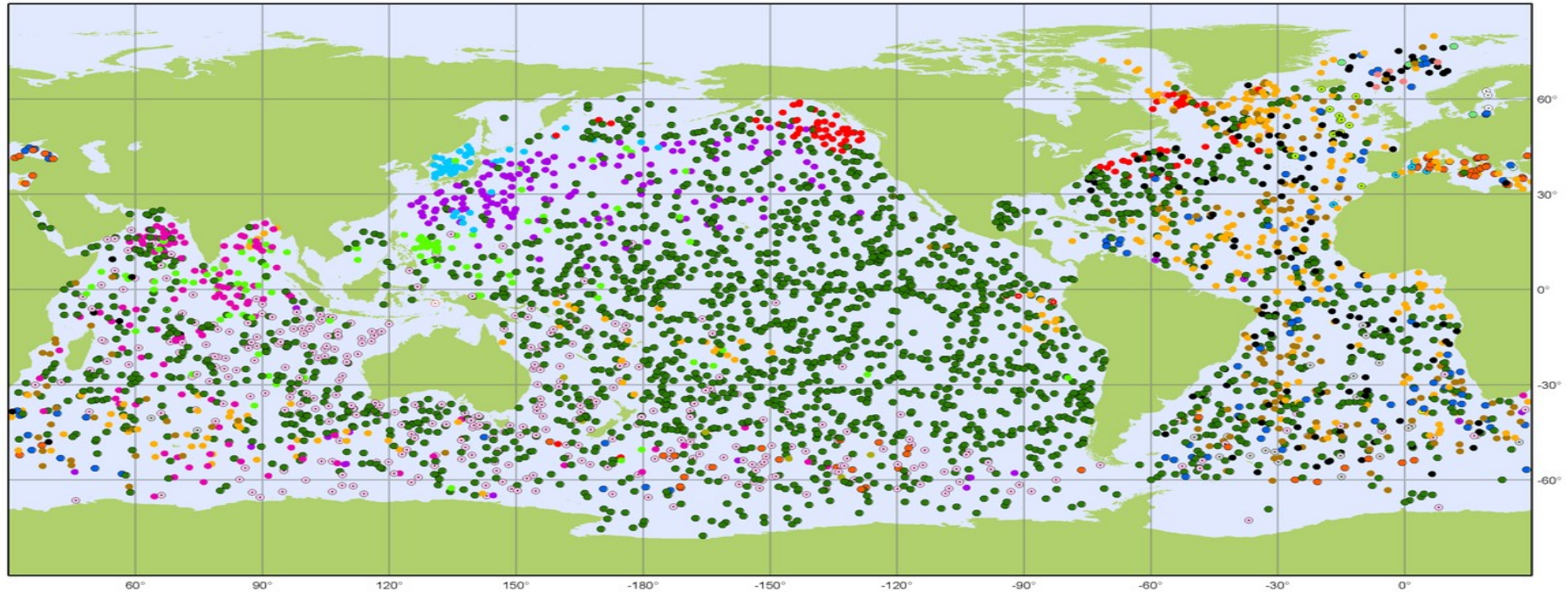
Sistema operativo de monitoreo continuo en los océanos tropicales de boyas fondeadas.



TAO Project Office, NOAA/PMEL

# Métodos de estudio del océano

## Boyas Argo



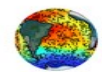
Argo

### National contributions - 3881 Operational Floats

February 2018

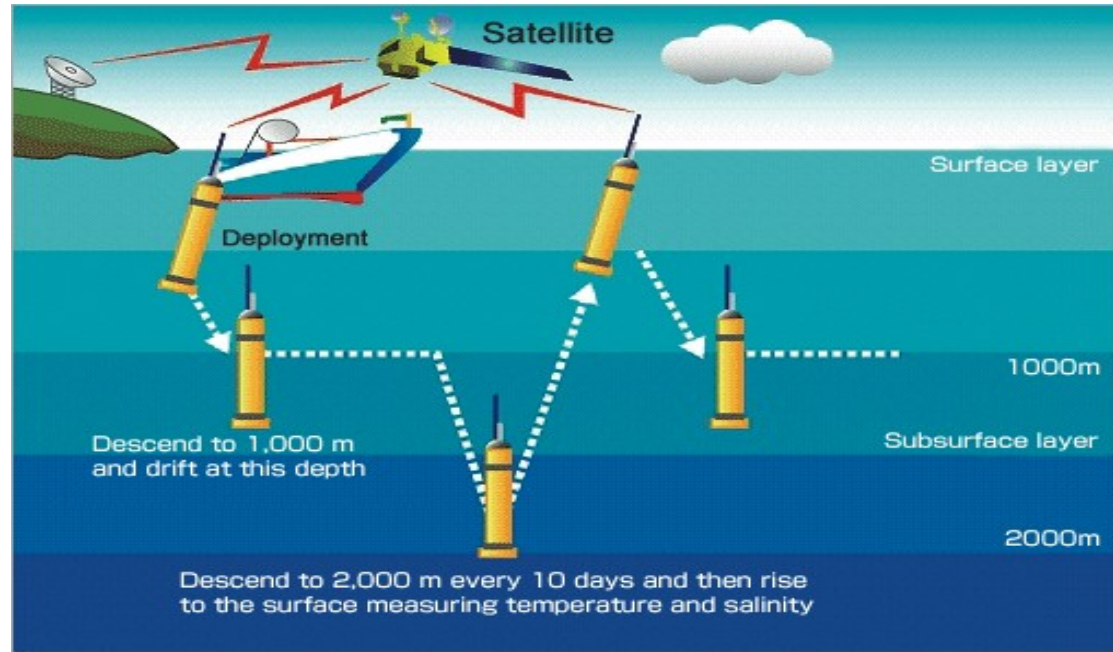
Latest location of operational floats (data distributed within the last 30 days)

● ARGENTINA (1)	● EUROPE (94)	● INDIA (124)	● KENYA (1)	● PERU (3)	● USA (2179)
○ AUSTRALIA (361)	○ FINLAND (3)	○ INDONESIA (1)	● MEXICO (2)	● POLAND (5)	
● BRAZIL (3)	● FRANCE (277)	● IRELAND (12)	○ NETHERLANDS (24)	● KOREA, REPUBLIC OF (53)	
● CANADA (87)	● GERMANY (142)	● ITALY (65)	● NEW ZEALAND (6)	● SPAIN (5)	
● CHINA (105)	○ GREECE (2)	● JAPAN (156)	● NORWAY (7)	● UK (163)	



# Métodos de estudio del océano

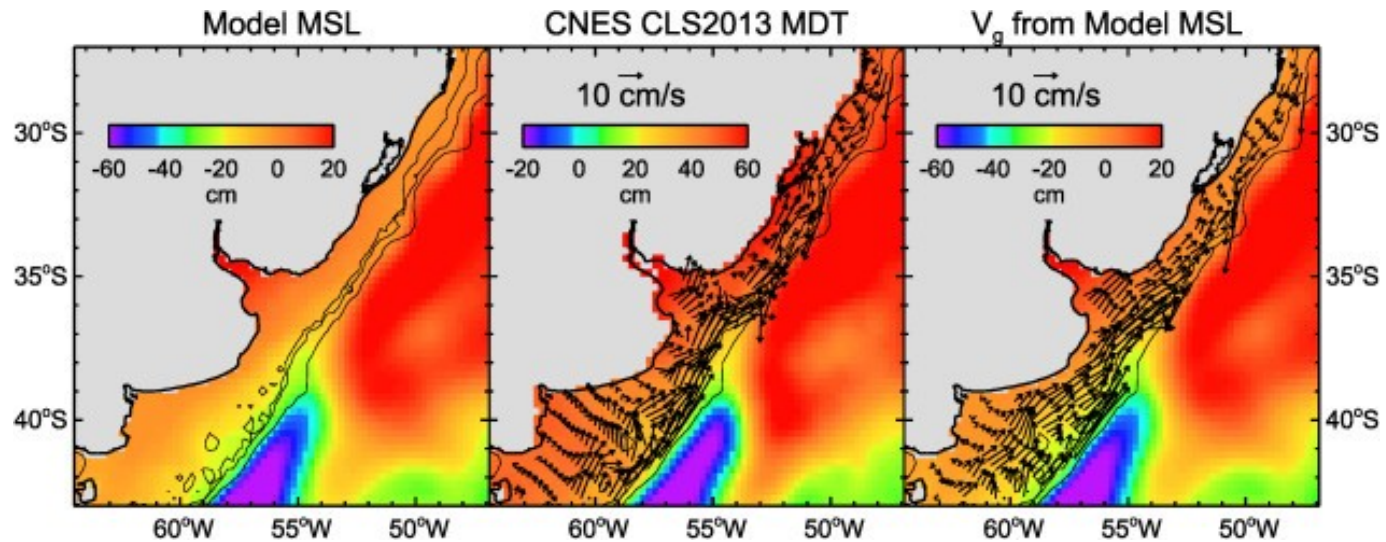
Sistemas de boyas ARGO  
T S nutrientes





# Métodos de estudio del océano

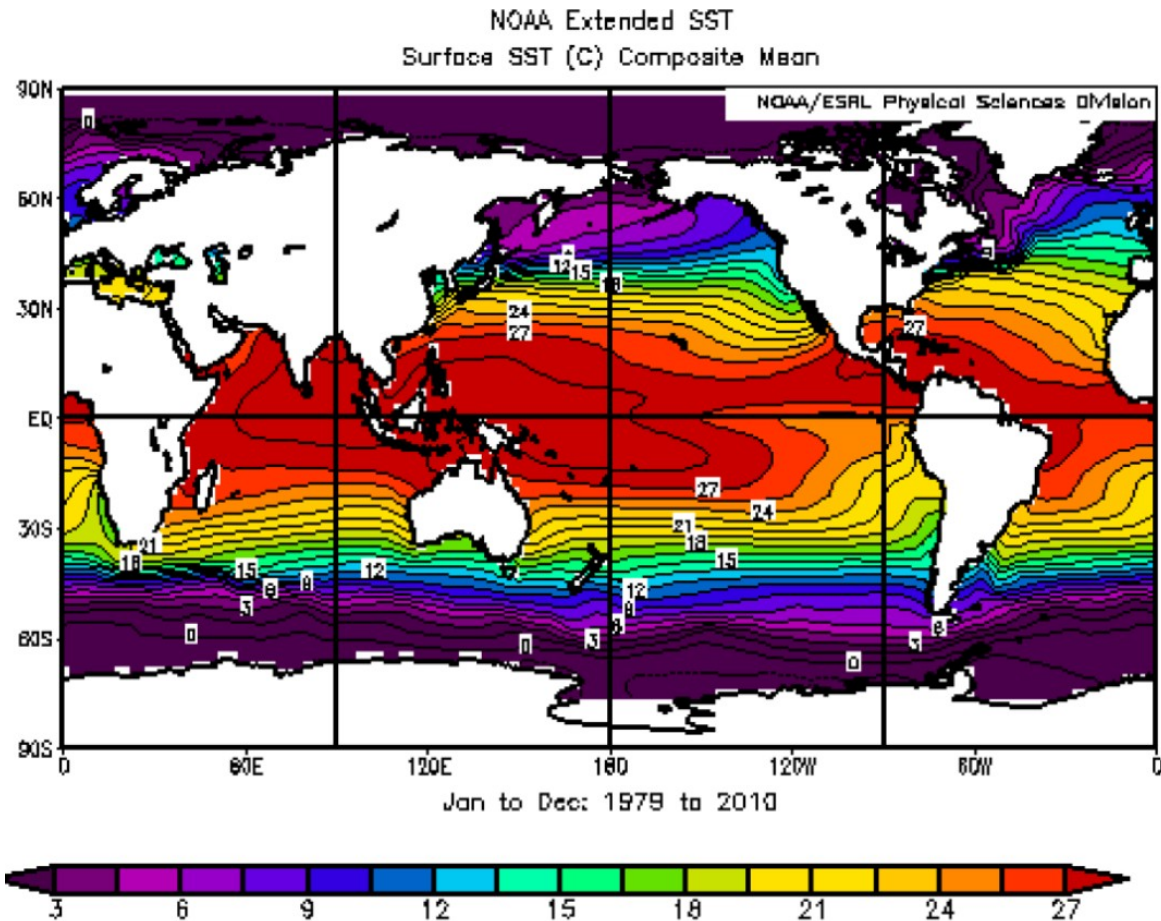
Modelación numérica



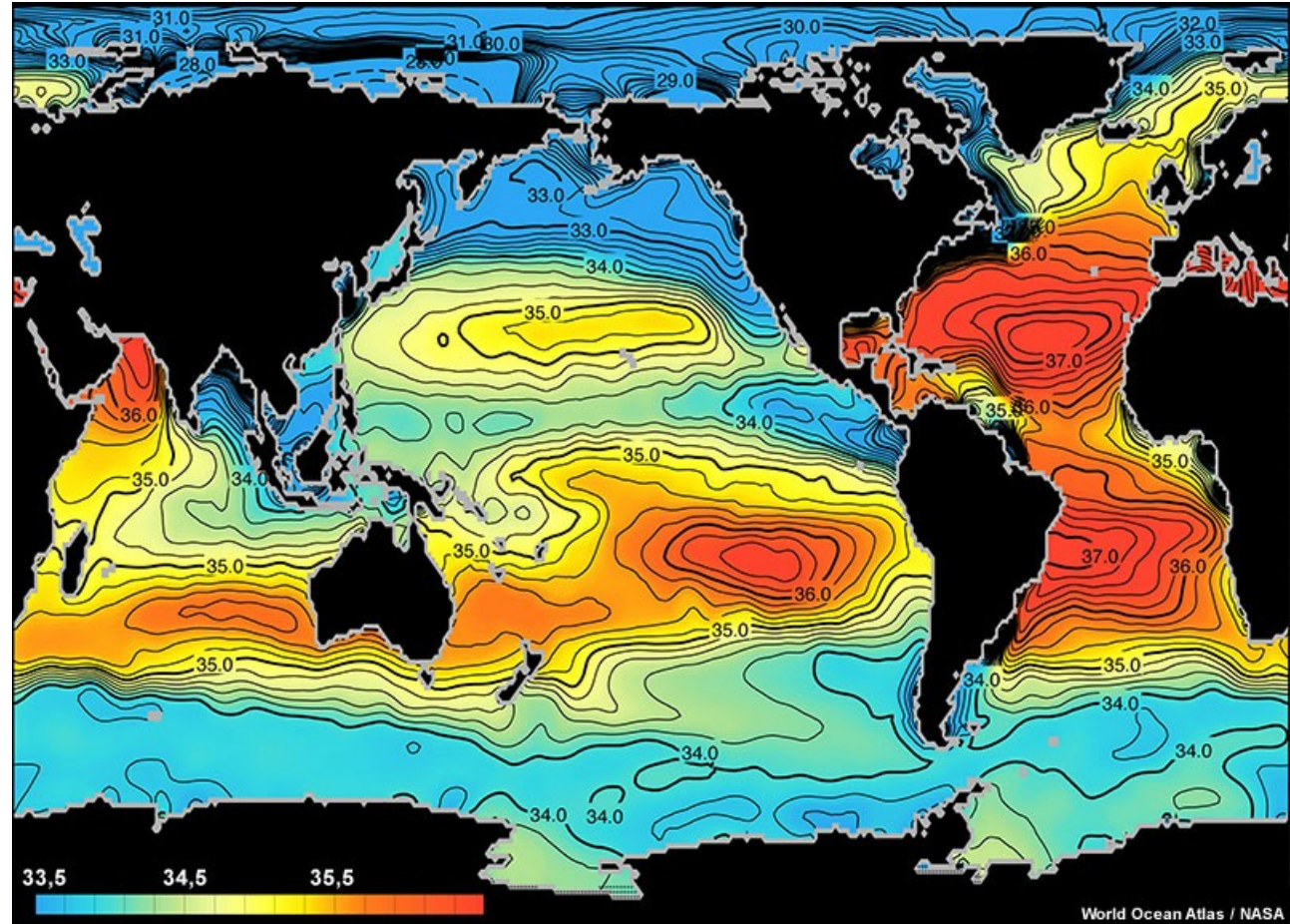
**SUPERFICIE**

# SUPERFICIE

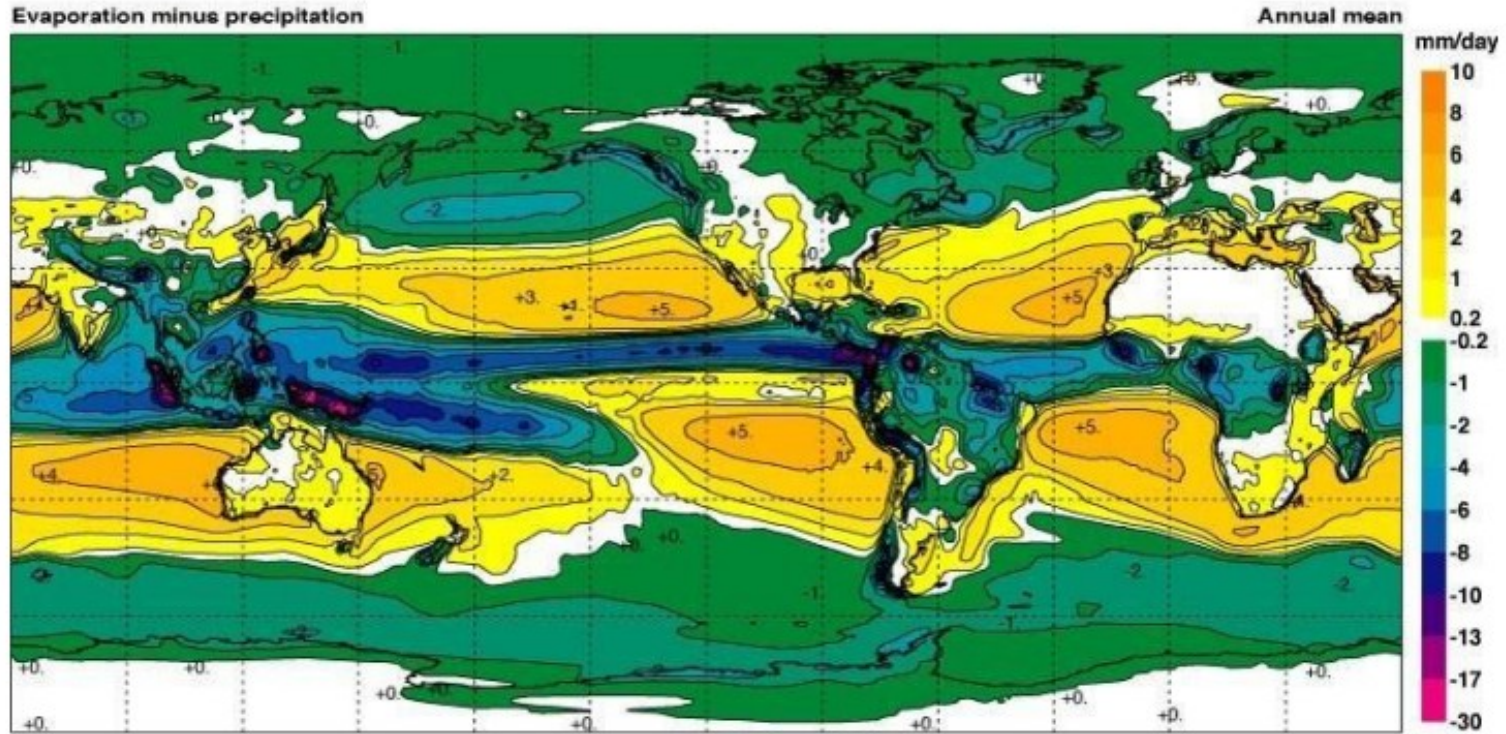
## Temperatura de la superficie del océano (SST)



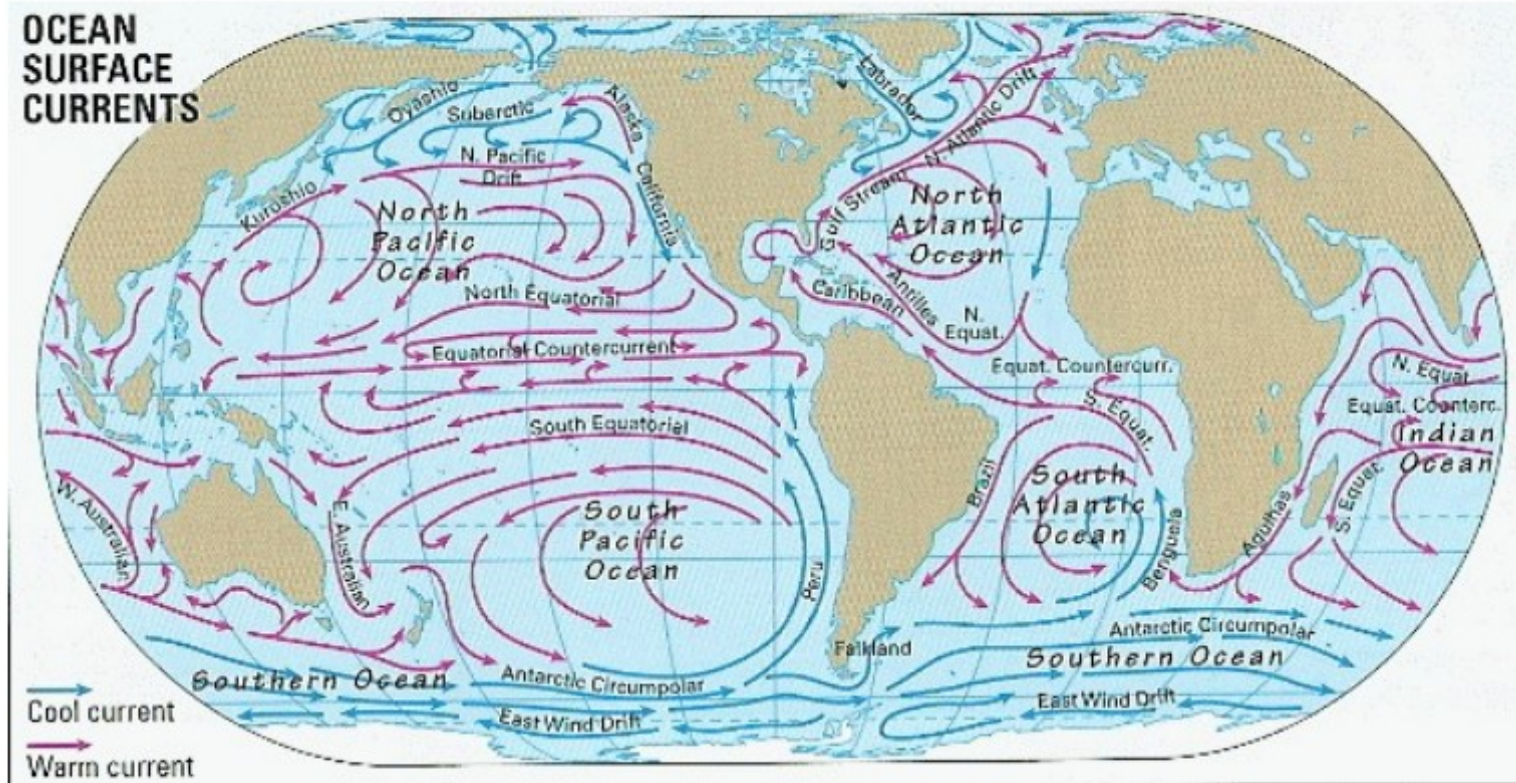
# Distribución de la Salinidad en superficie



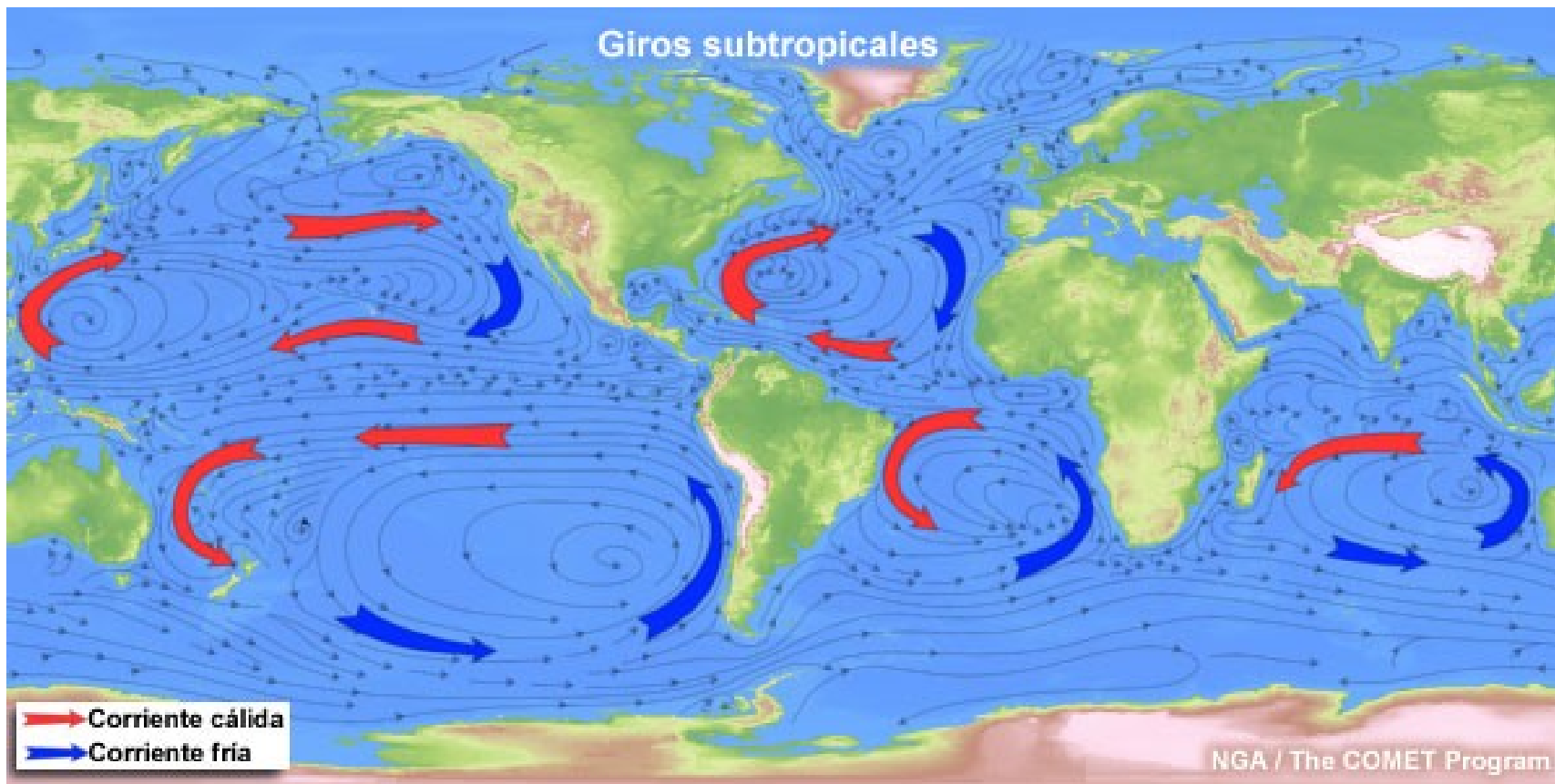
# Evaporación-Precipitación



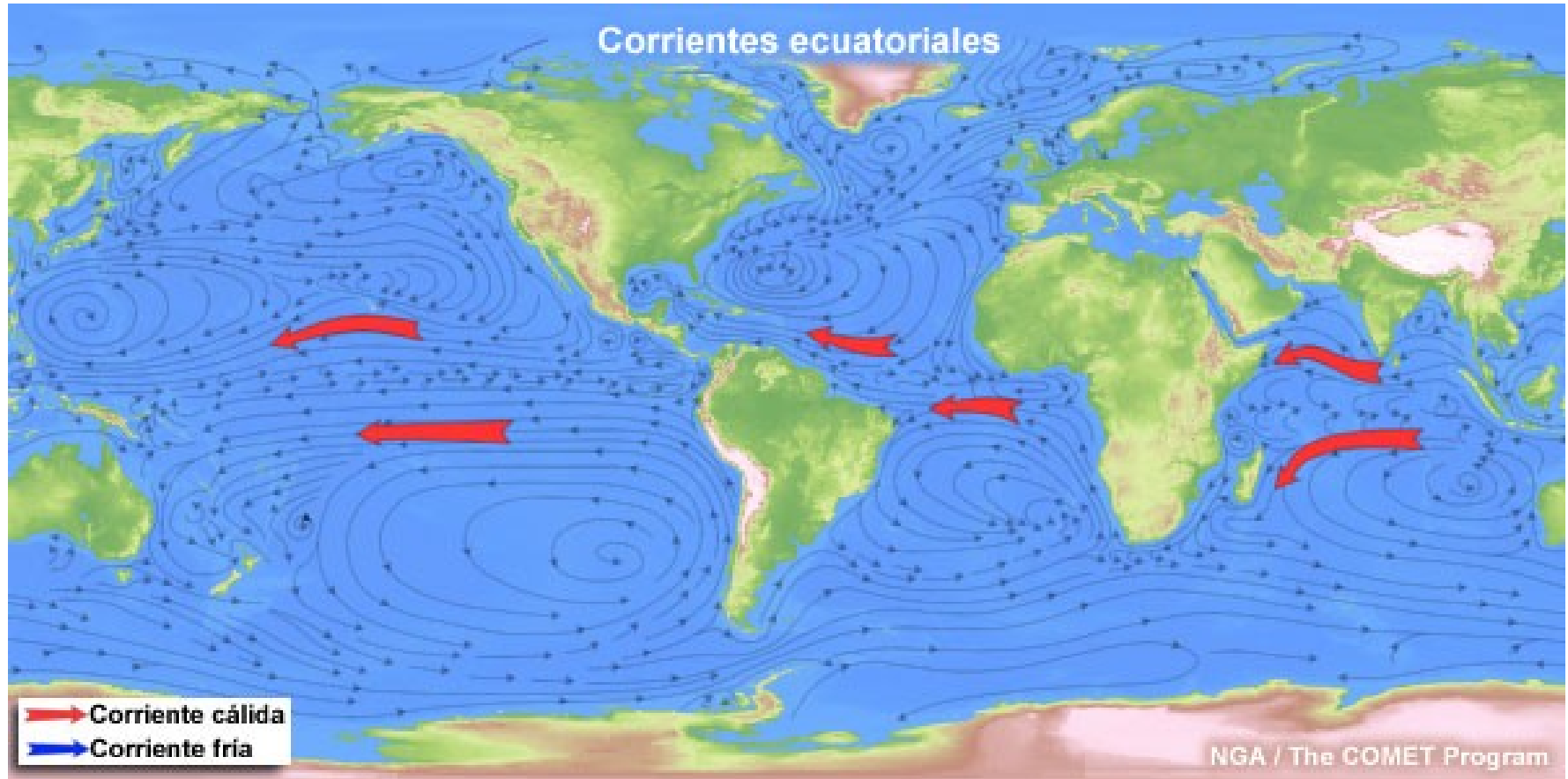
# Circulación superficial (forzada por los vientos)



## Giros subtropicales



# Circulación superficial

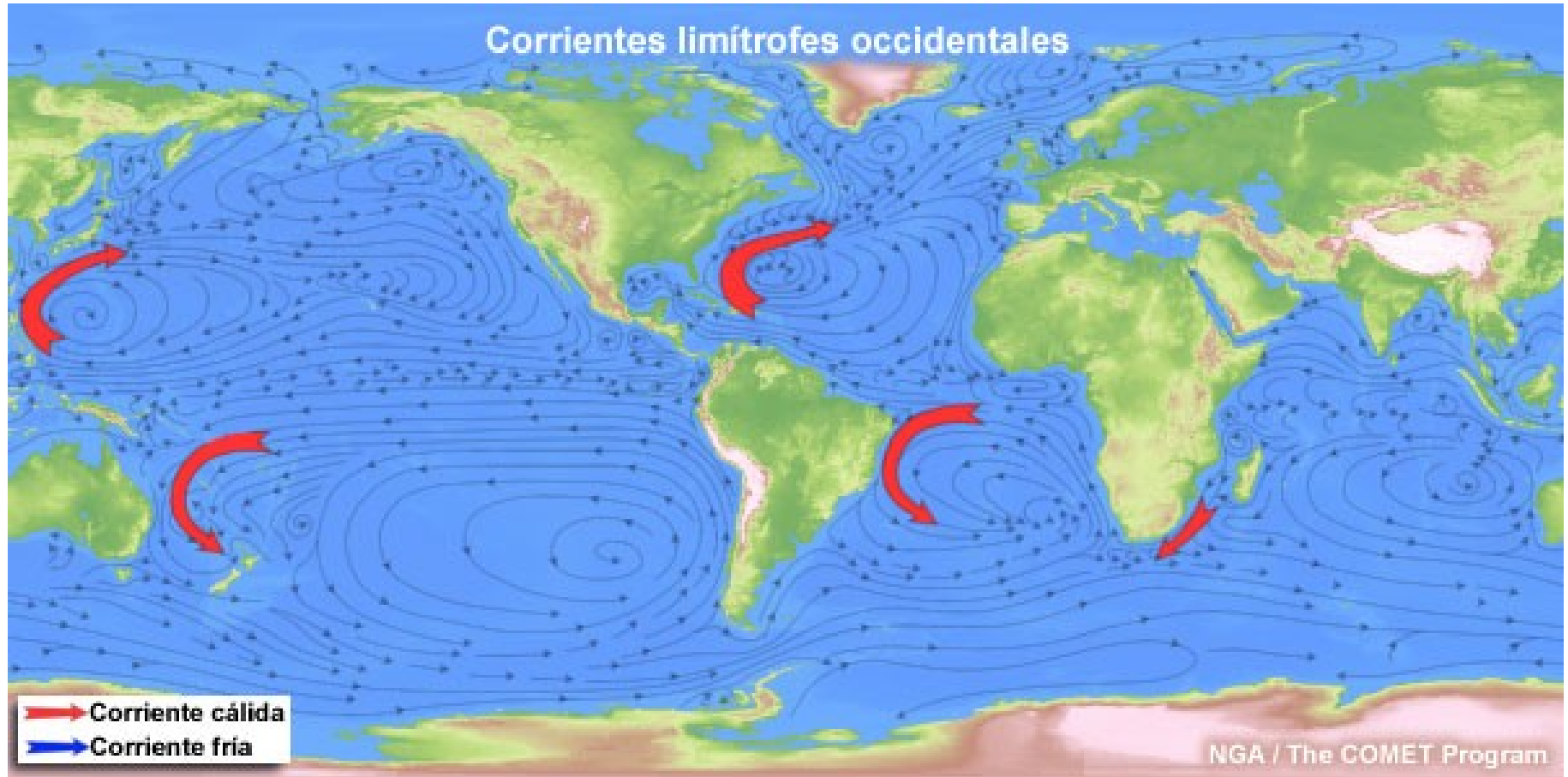




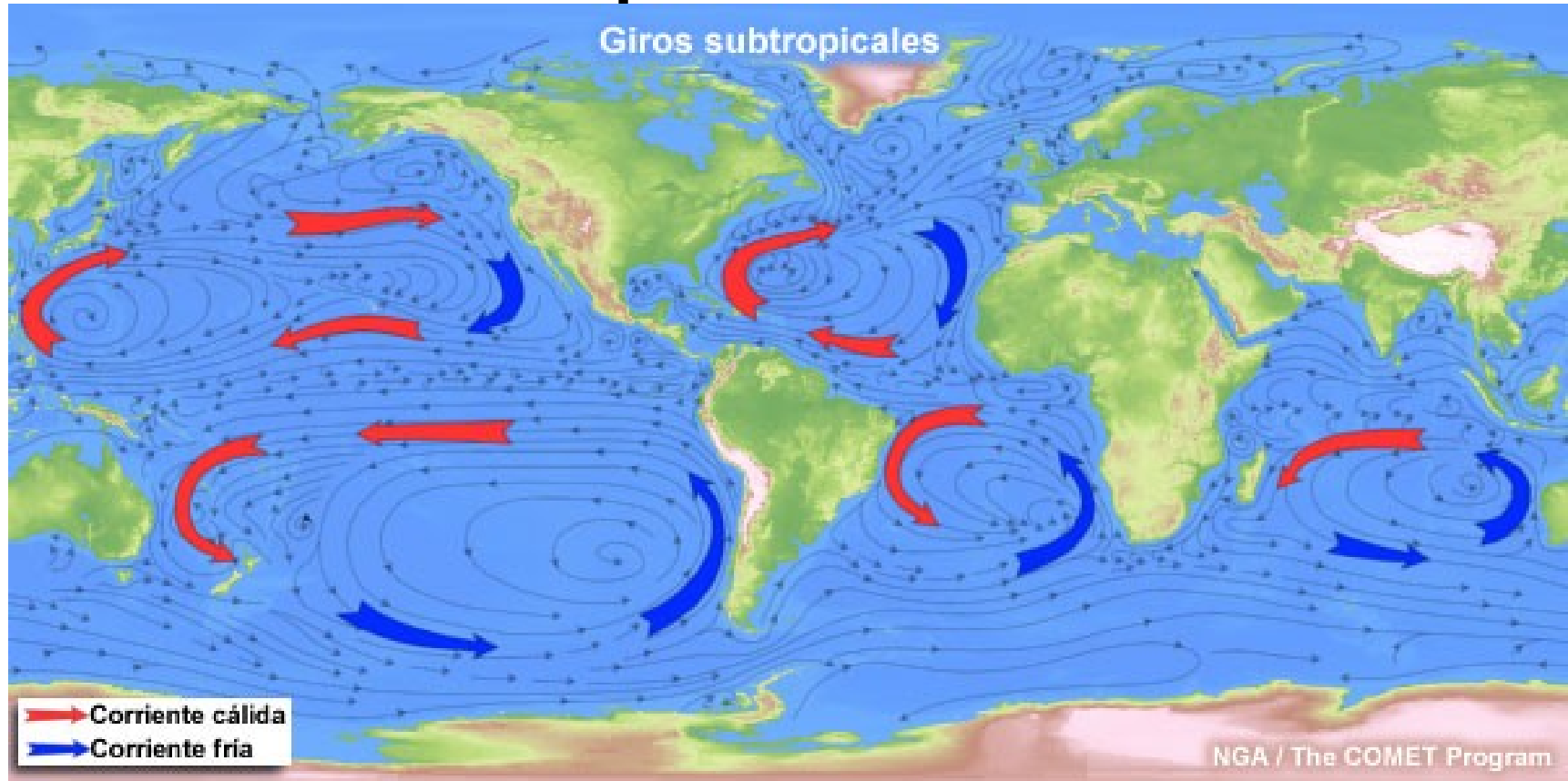
# Circulación superficial



# Circulación superficial

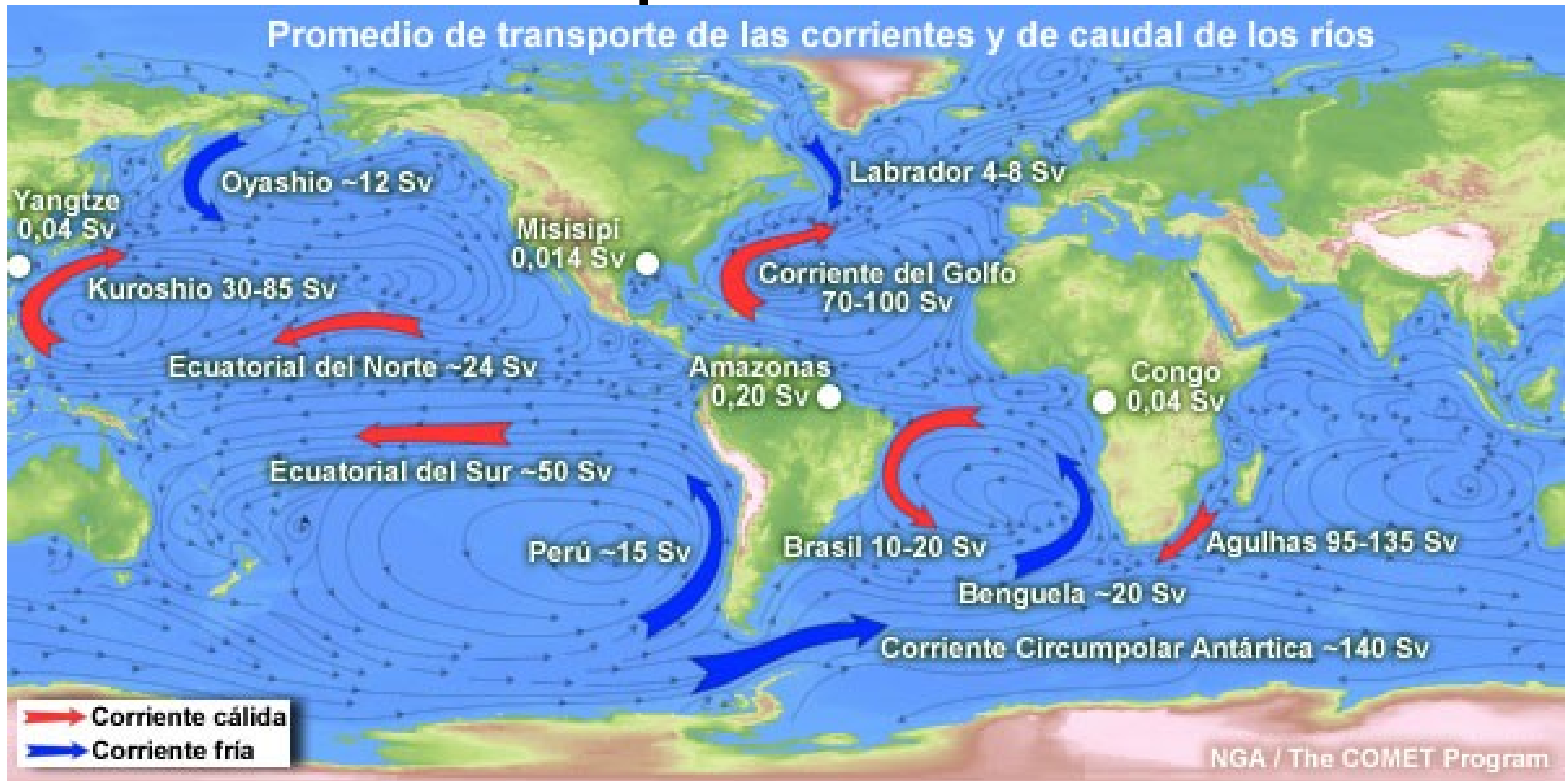


# Circulación superficial



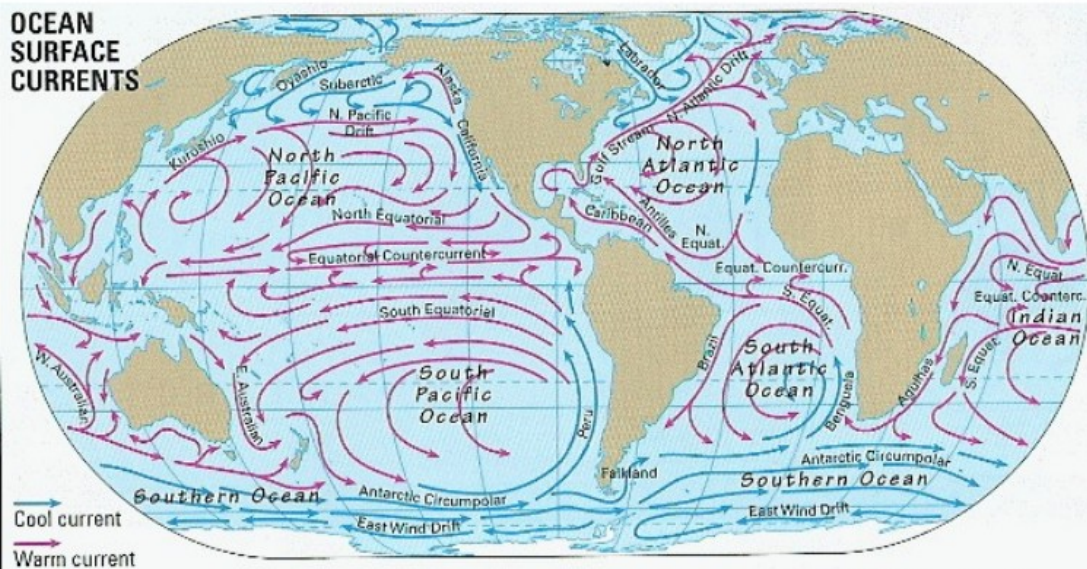
Los giros subtropicales son asimétricos debido a la rotación terrestre: las corrientes son más intensas en las costas oestes de las cuencas oceánicas.

# Circulación superficial



1 Svedrup (Sv) = 1.000.000m<sup>3</sup>/s

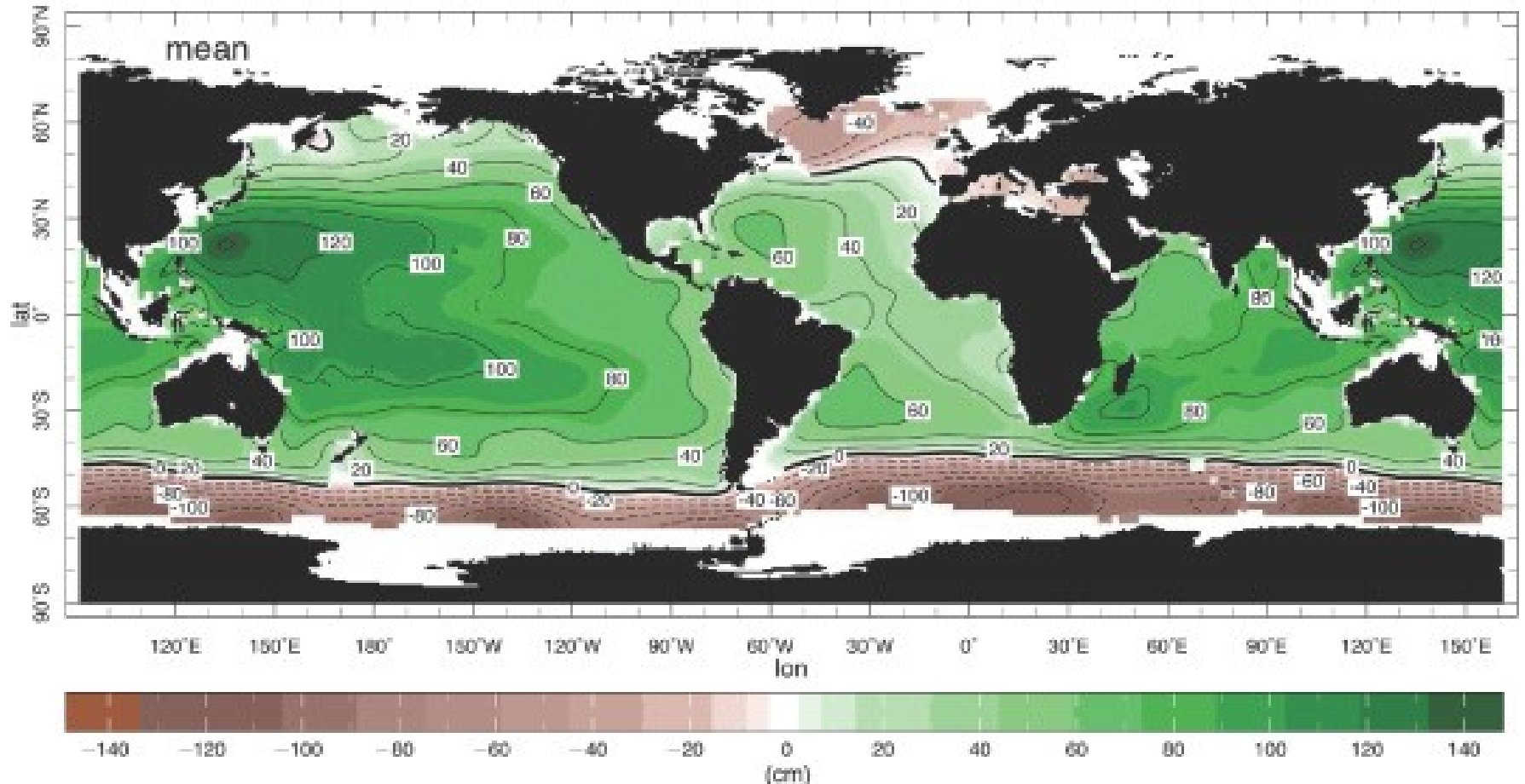
## OCEAN SURFACE CURRENTS



## Transportes típicos de las mayores corrientes

Corriente	Ubicacion	Valor
Agulas	31°S, Indico	70 Sv
Golfo	26°N, Atlantico	32 Sv
Golfo	38°N, Atlantic	88 Sv
Brazil	28°S, Atlantic	22 Sv
Kuroshio	25°N, Pacifico	22 Sv
Kuroshio	33°N, Pacifico	57 Sv
Este de Australia	30°S, Pacifico	22 Sv
CCA	150°E, Austral	147 Sv
CCA	60°E, Austral	137 Sv

# Altura del nivel del mar



## Corrientes geostróficas en superficie

- Para escalas mayores a días y a varias decenas de km, fuera de la capa límite, las corrientes están gobernadas por el equilibrio geostrófico en la dirección horizontal.
- Fuerza de Coriolis = Fuerza Gradiente de Presión (horizontal)

$$f_v = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$f_u = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

# Corrientes geostróficas en superficie

$$fv = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}$$

$$fu = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y}$$

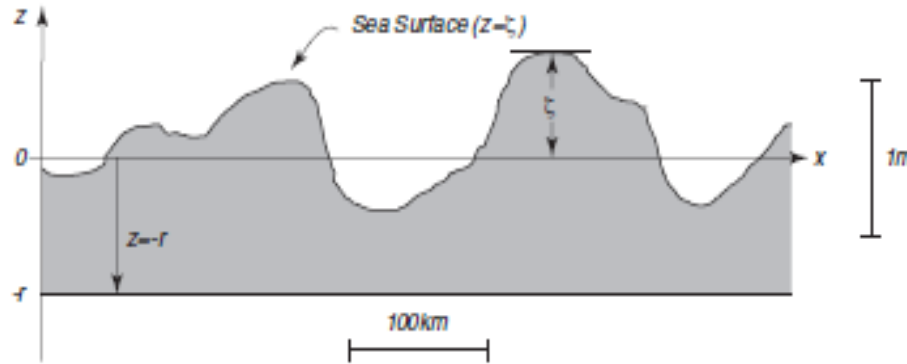
$$\rho g = \frac{-\partial p}{\partial z}$$

En superficie esas ecuaciones se pueden escribir como

$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$u = \frac{-g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

$\eta$  = altura del nivel del mar



Conociendo variaciones en la altura del nivel del mar es posible calcular las corrientes geostróficas de superficie.

Los satélites proveen mediciones directas de las variaciones en la altura del nivel del mar. La altura del nivel del mar, a su vez, es una indicación de la presión.

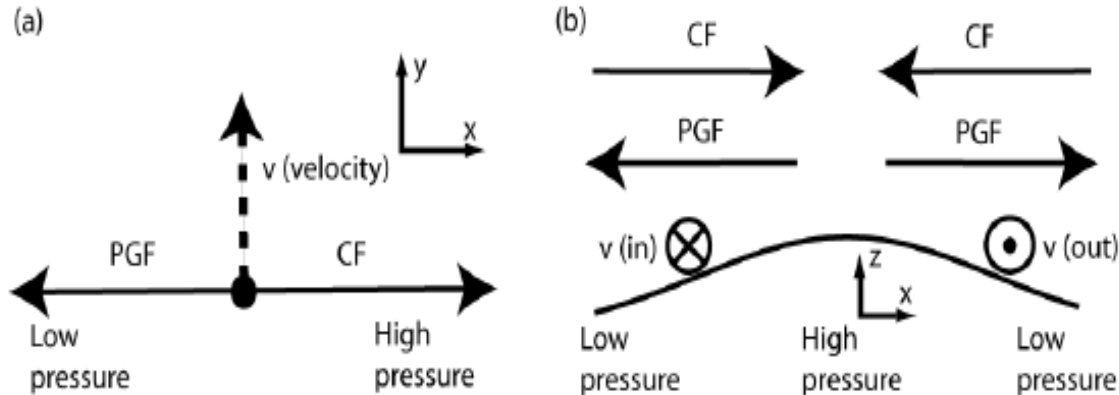


# Corrientes geostróficas en superficie

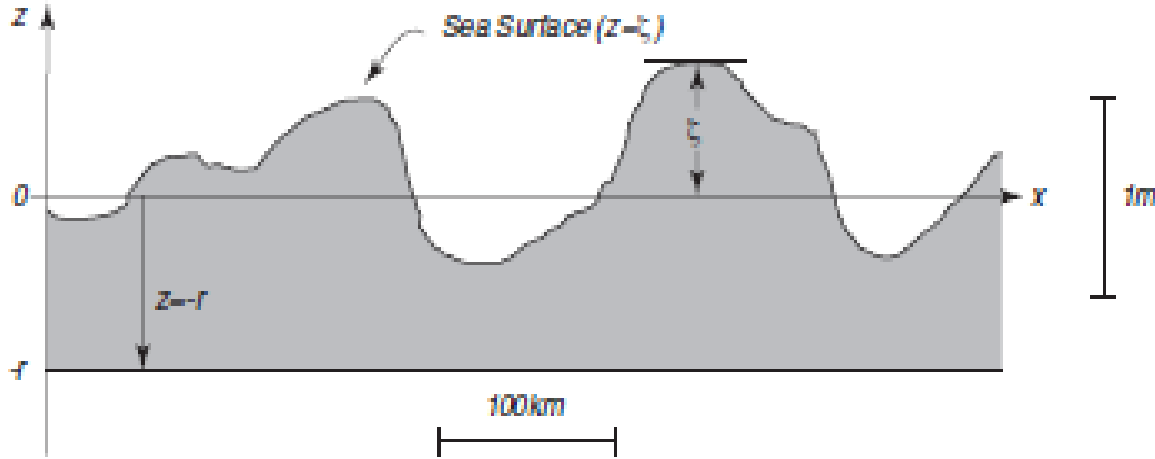
$$v = \frac{g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial x}$$

$$u = \frac{-g}{f} \frac{\partial \eta}{\partial y}$$

La intensidad de las corrientes geostróficas es proporcional a la pendiente de la altura del nivel del mar en superficie.



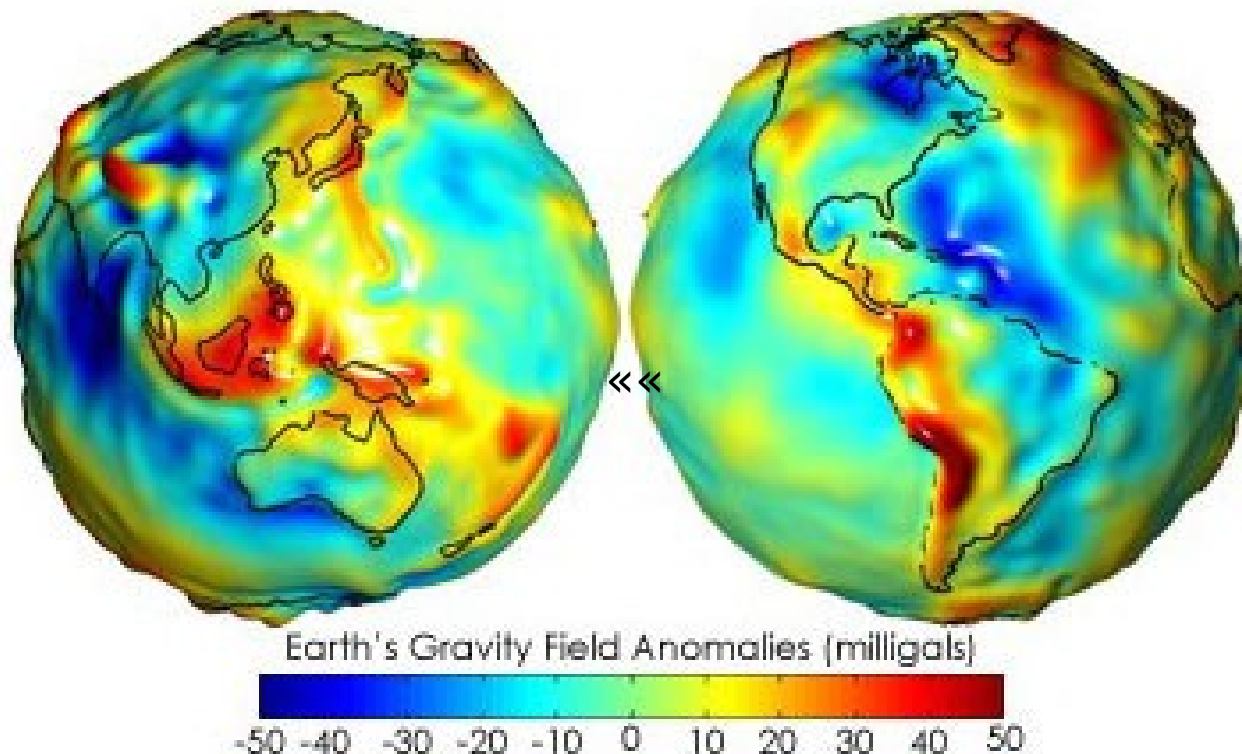
# Corrientes geostróficas en superficie



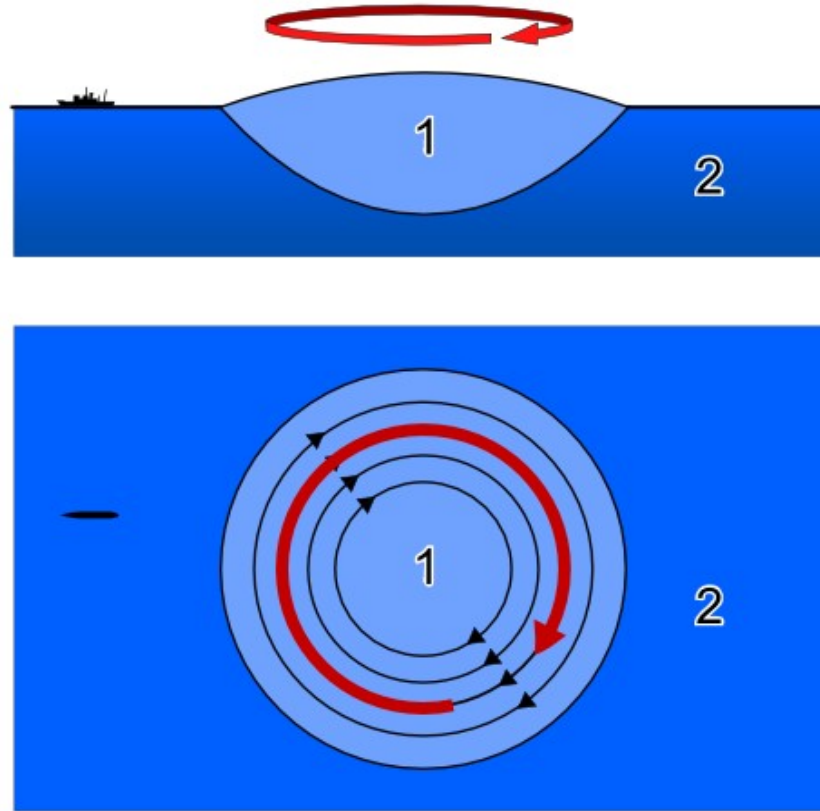
- La altura de referencia es el geoide y es aquella que tendría el océano en reposo.
- La topografía de la superficie aparece por mareas, corrientes y el efecto barométrico inverso (topografía dinámica).
- Estas variaciones son  $1/100$  de las ondulaciones del geoide.

# Corrientes geostróficas en superficie

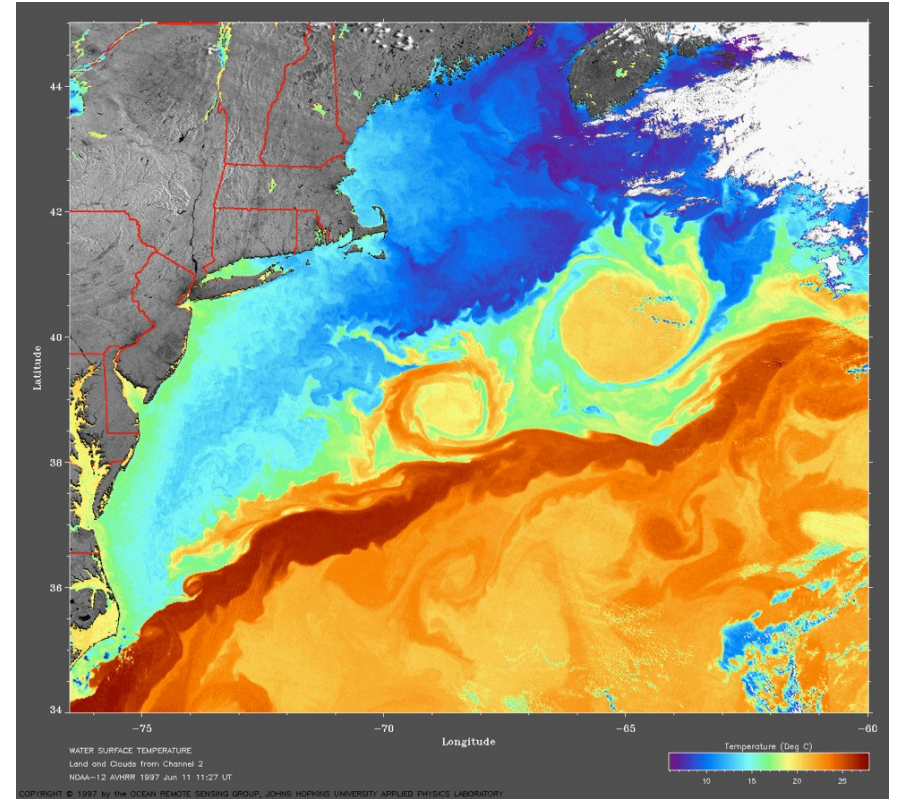
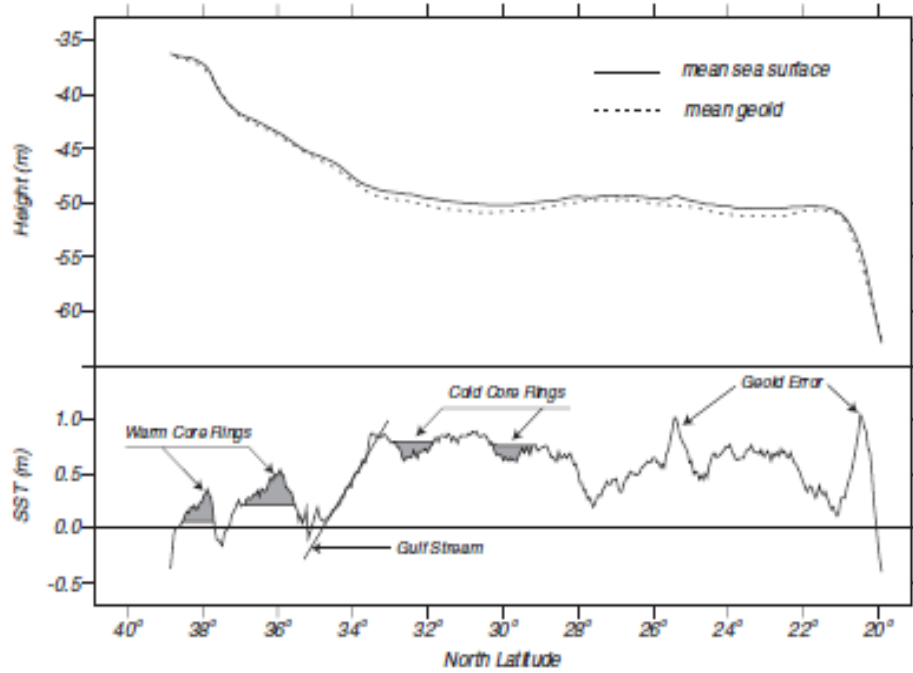
La forma de la superficie esta dominada por variaciones locales en el campo gravitatorio. La influencia de las corrientes es mucho menor. Por ello es necesario sistemas de altimetría muy precisos para medir las variaciones en la altura del mar debido a las corrientes



# Corrientes geostróficas en superficie

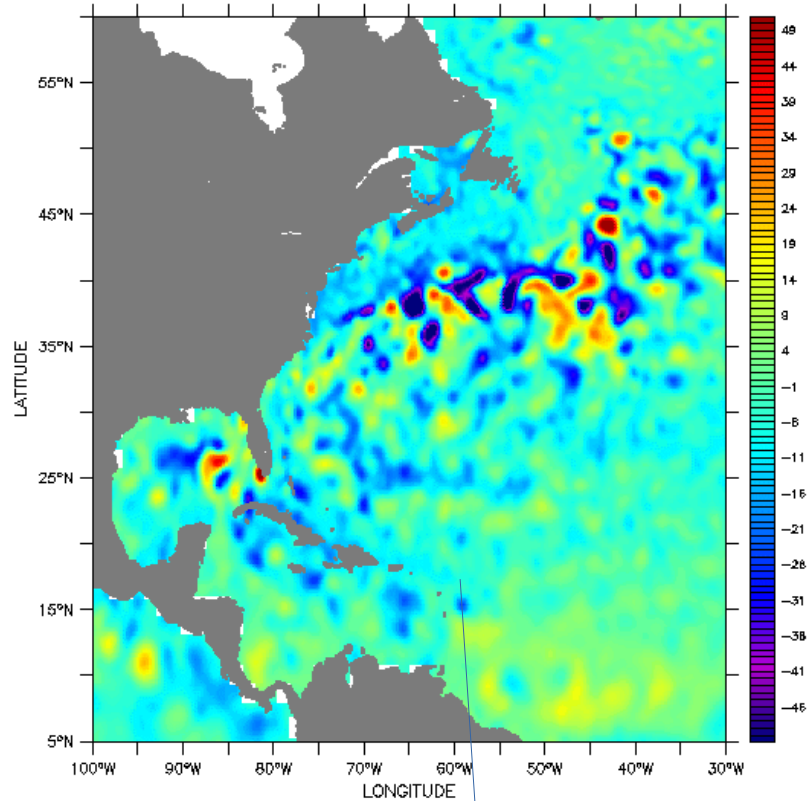


# Corrientes geostróficas en superficie

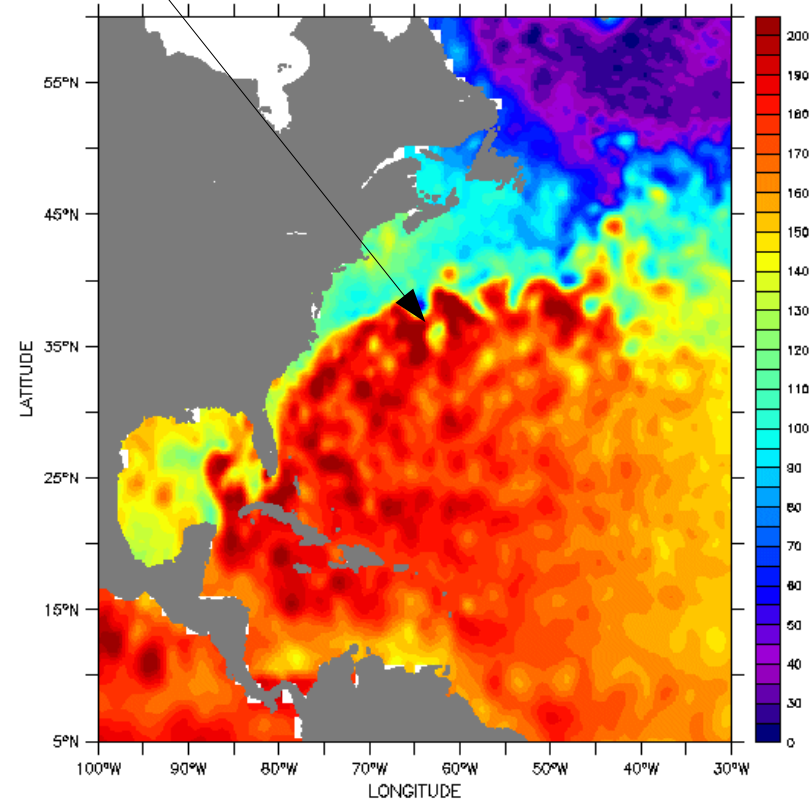


# Corrientes geostróficas en superficie

Gran pendiente asociada a la corriente del Golfo.



Maps of Sea Level Anomalies Merged (cm) from mslla oer h merged

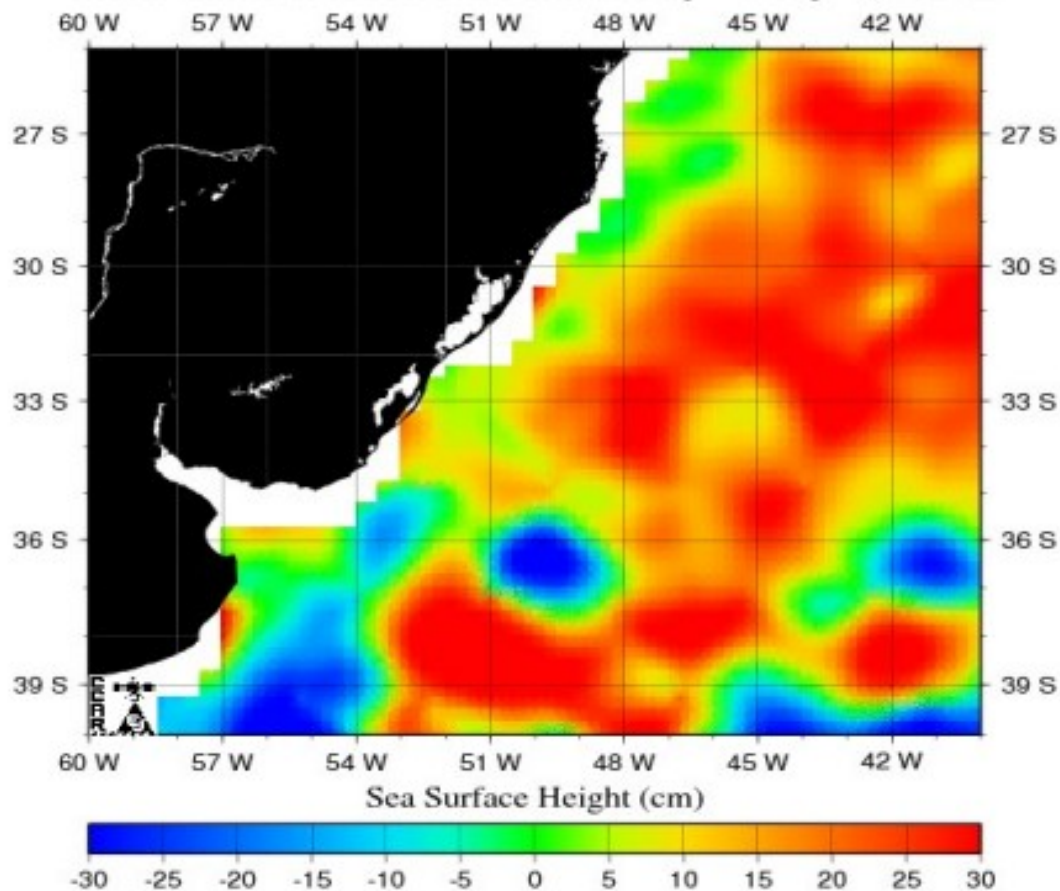


Maps of Absolute Dynamic Topography Merged (cm) from madt oer\_abs h merged

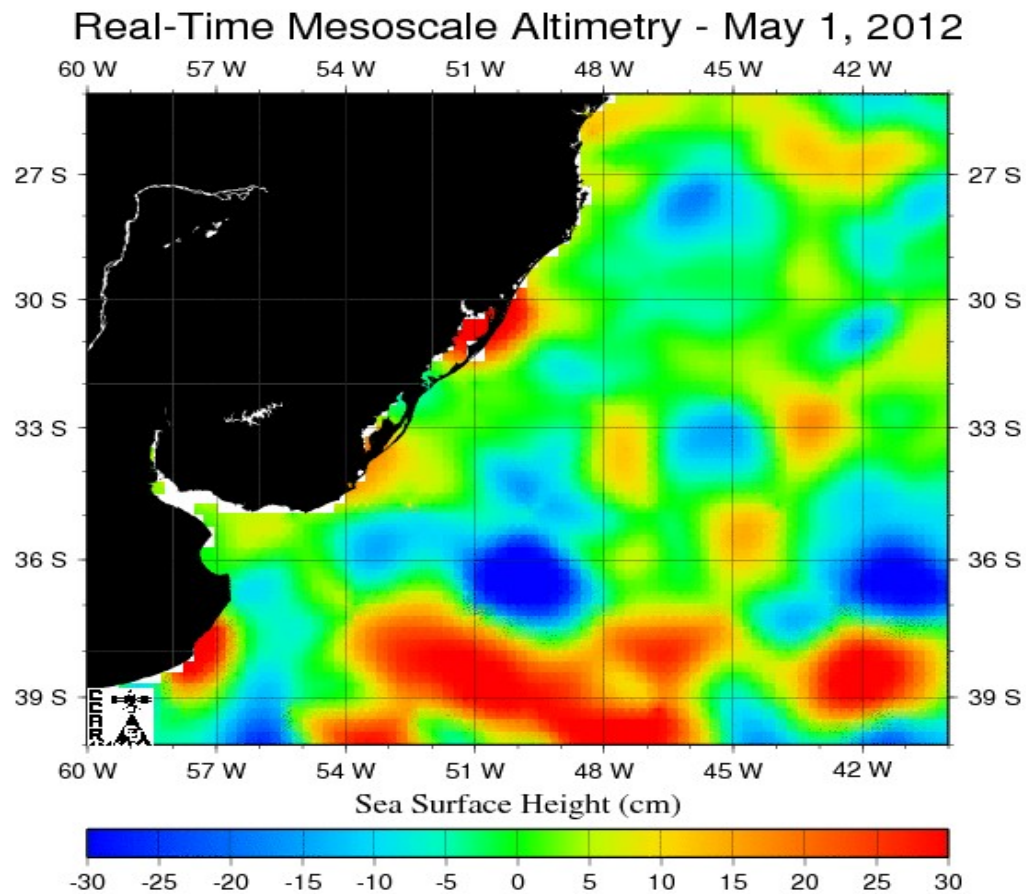
Anomalias (desviaciones) de altura de nivel del mar con respecto a la climatología (promedio).

# Campo de altura del nivel del mar (AVISO)

## Real-Time Mesoscale Altimetry - May 1, 2012

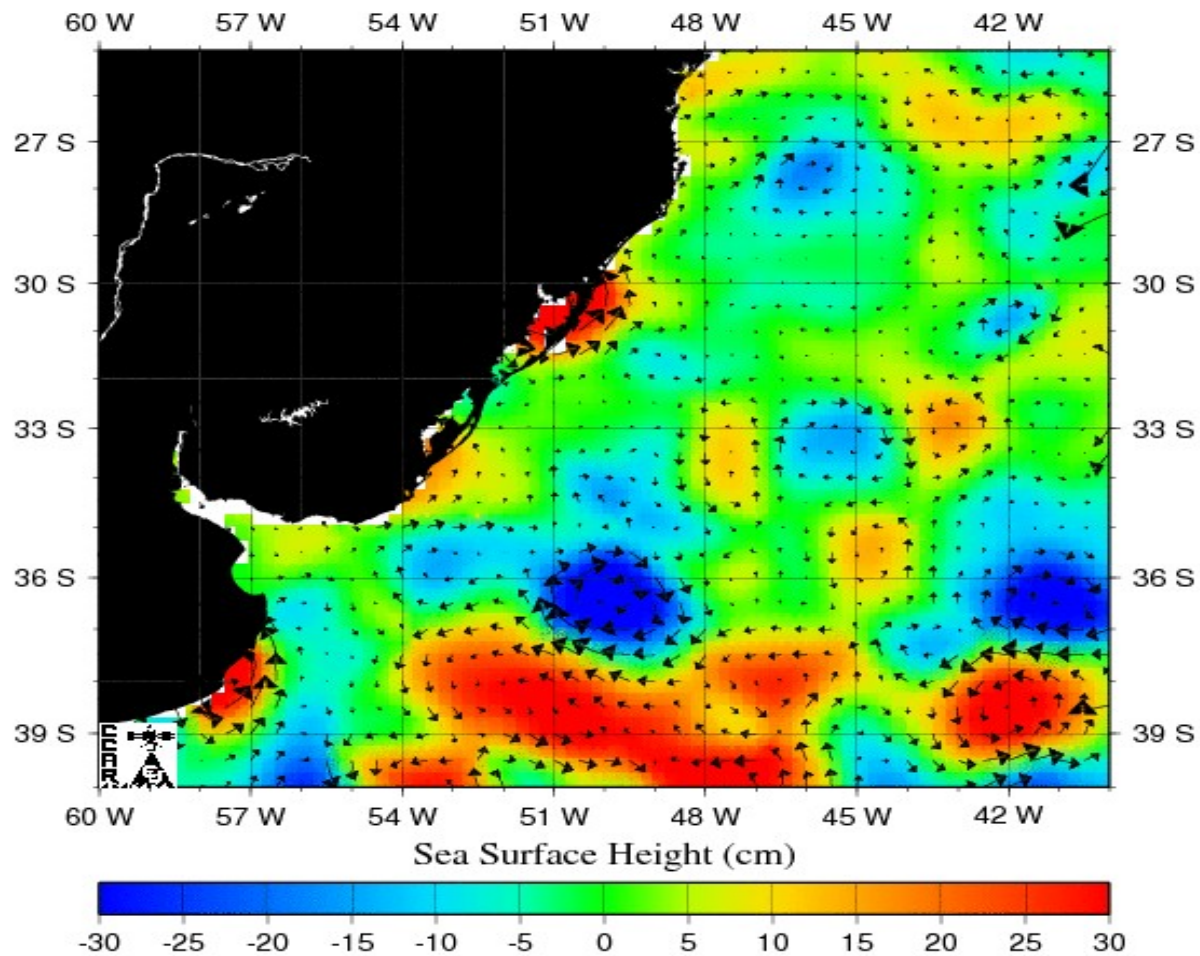


# Anomalías SSH

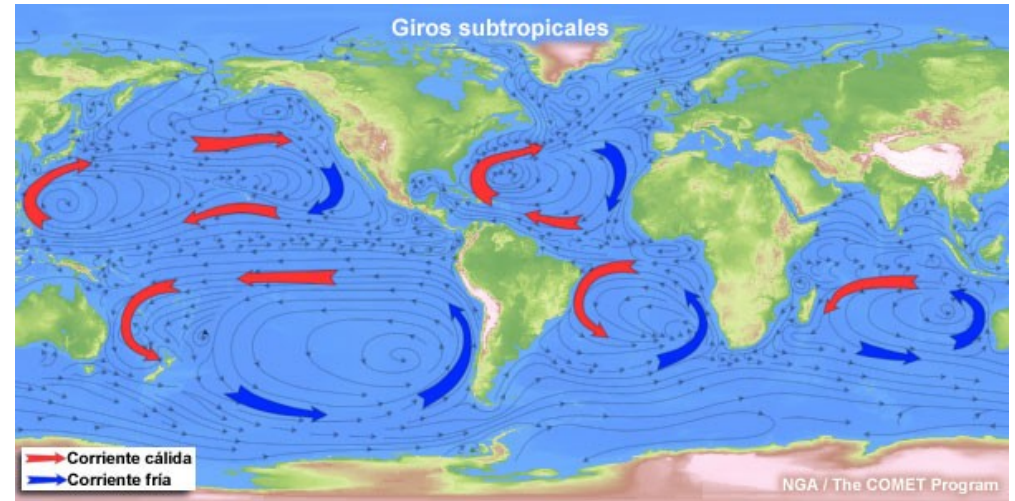
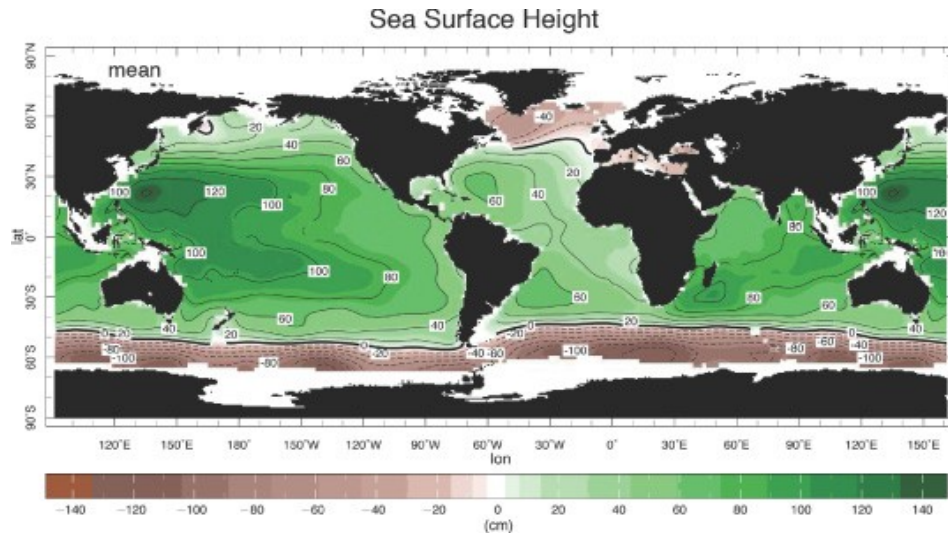




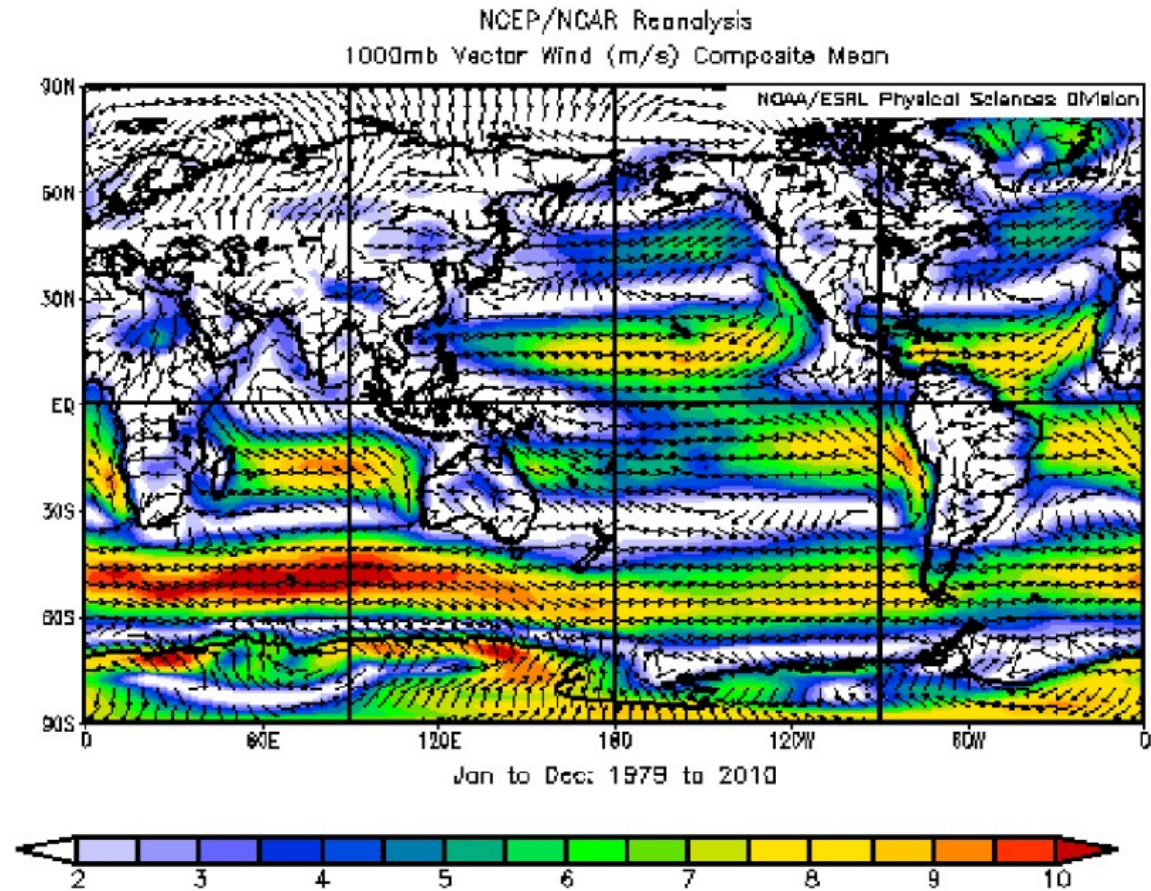
# Real-Time Mesoscale Altimetry - May 1, 2012



# Corrientes geostróficas en superficie

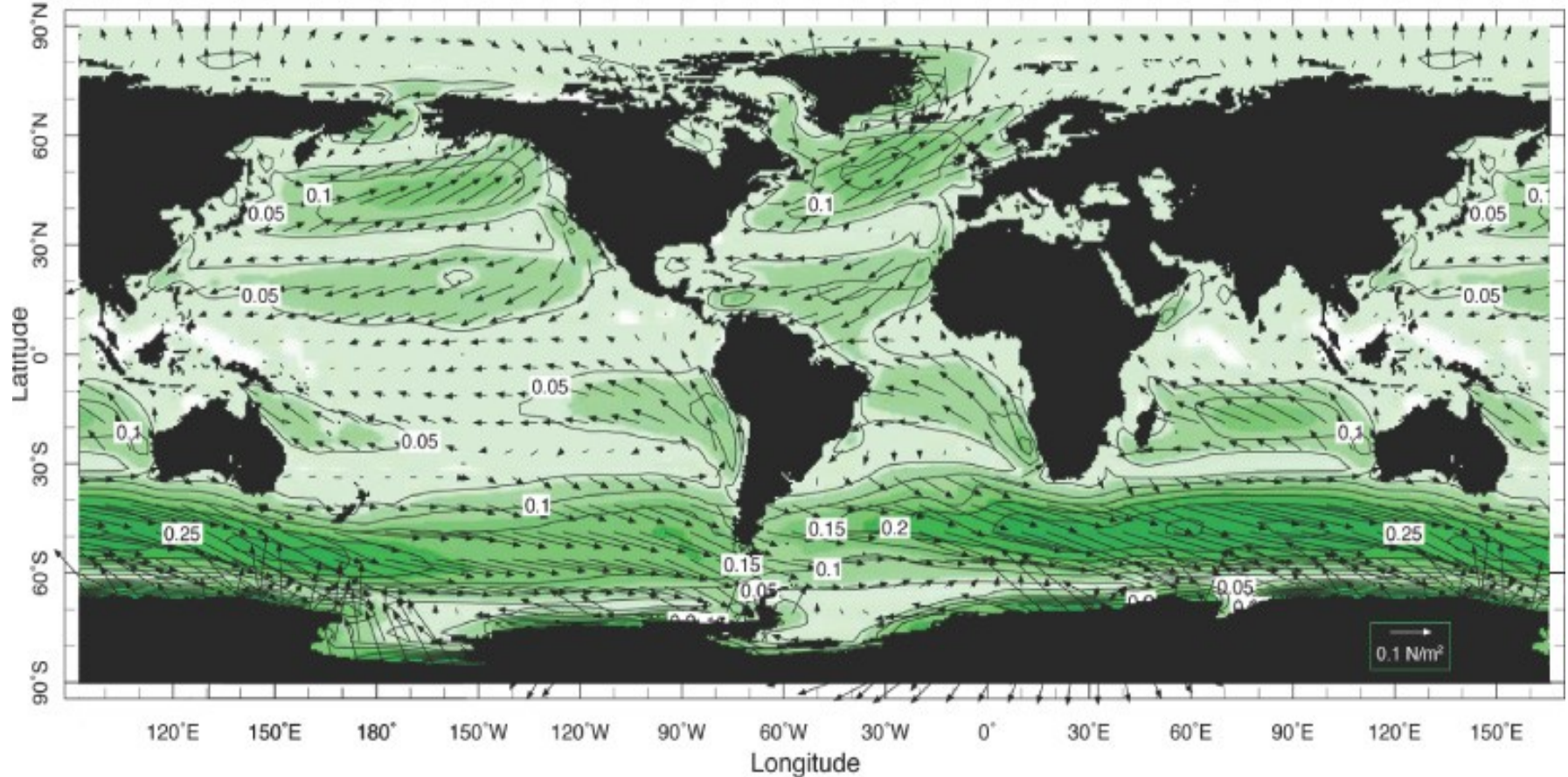


# ¿Cuál es el rol de los vientos?



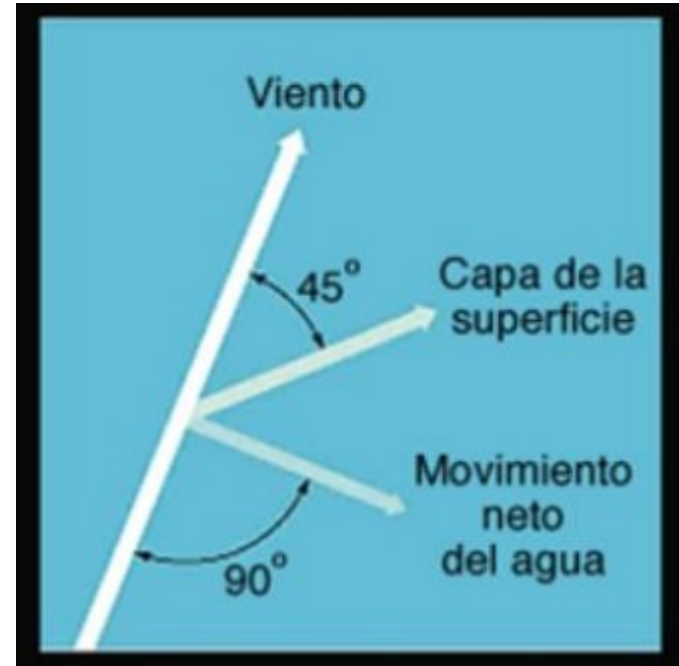
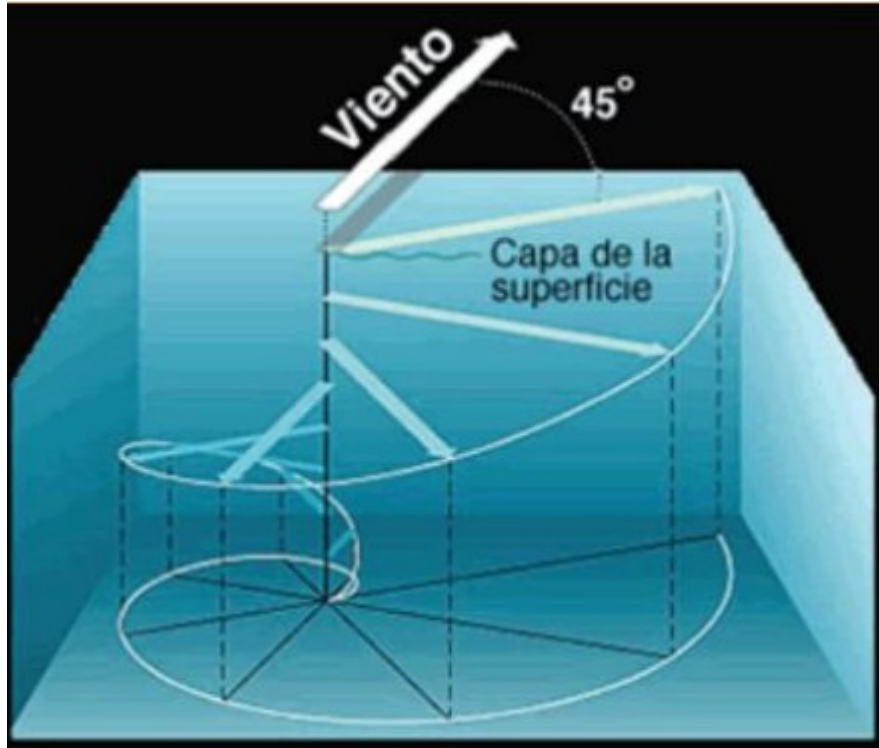
# ¿Cuál es el rol de los vientos?

Surface Wind Stress ( $\text{N/m}^2$ )



# Los vientos fuerzan al océano

## Dinámica de Ekman



# Dinámica de Ekman

Hemisferio Norte:

El agua se mueve  $90^\circ$  hacia la derecha que el viento (como en el dibujo).

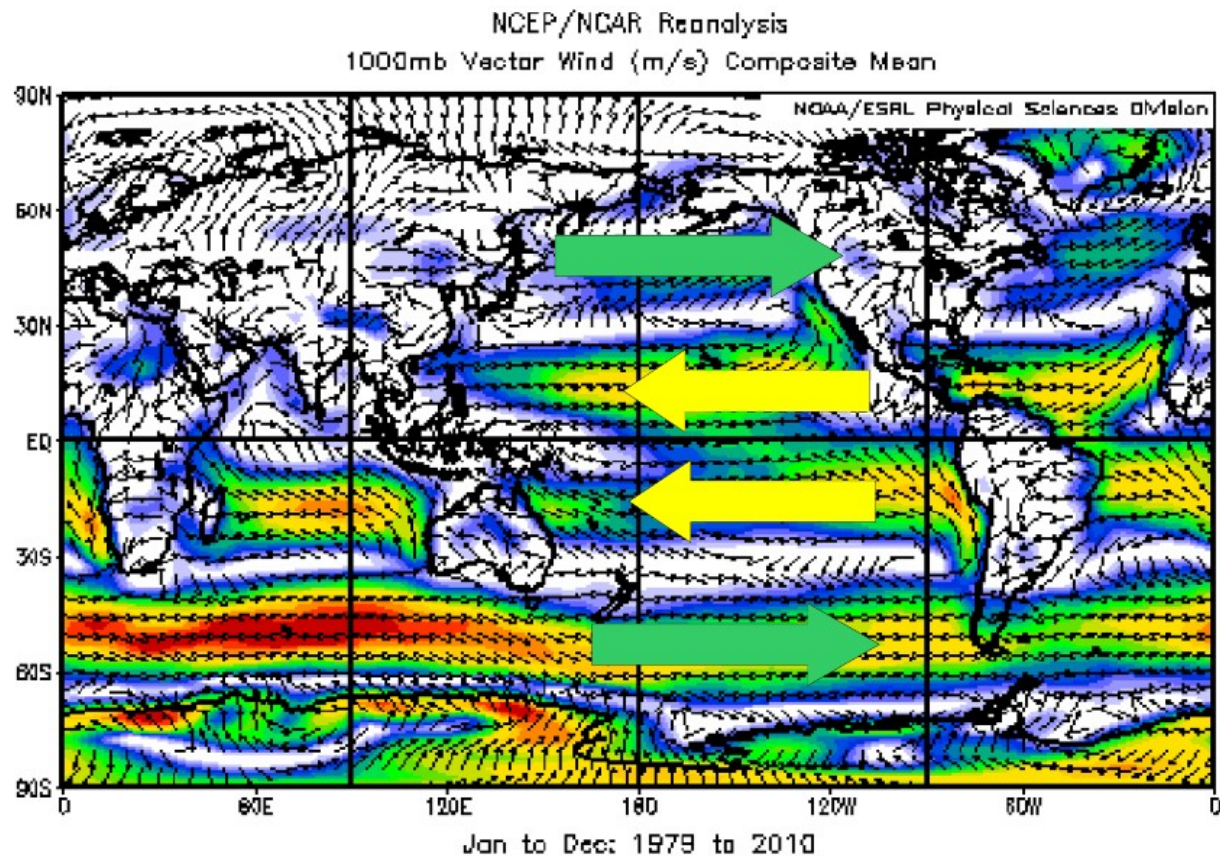


Hemisferio Sur:

El agua se mueve  $90^\circ$  hacia la izquierda del viento.

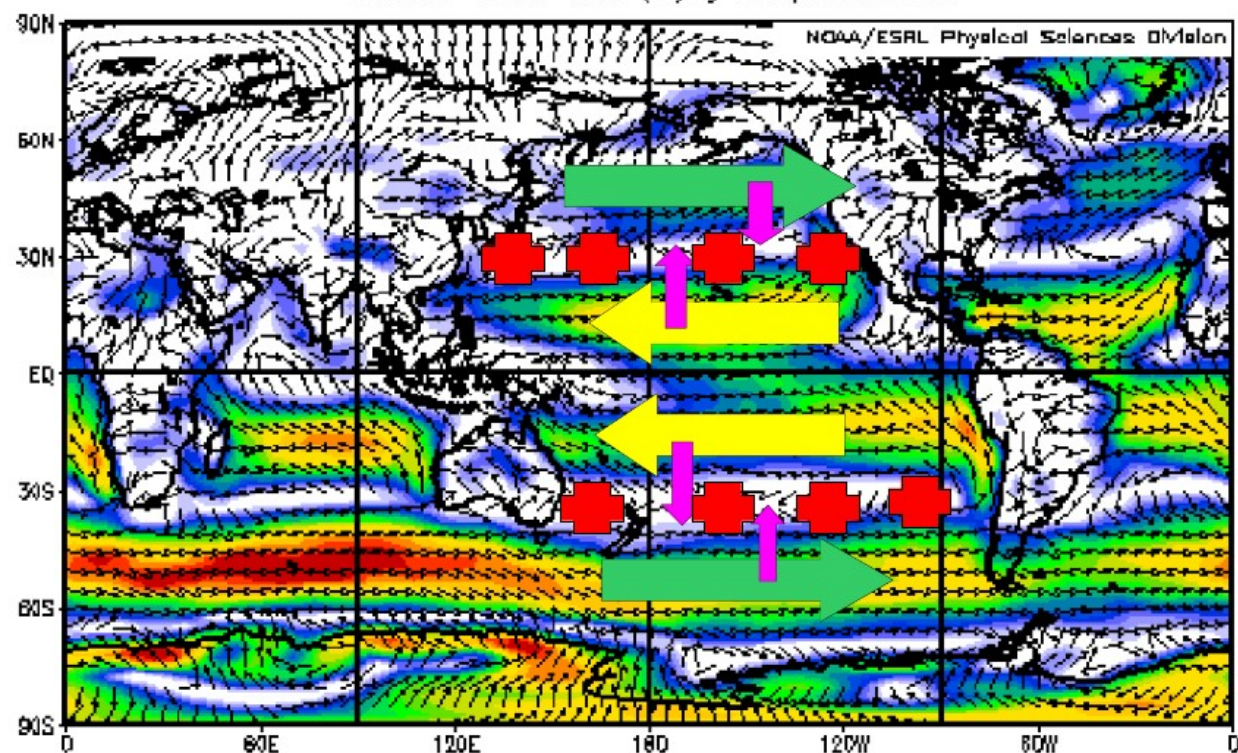


# Dinámica de Ekman



# Dinámica de Ekman

NCEP/NCAR Reanalysis  
1000mb Vector Wind (m/s) Composite Mean

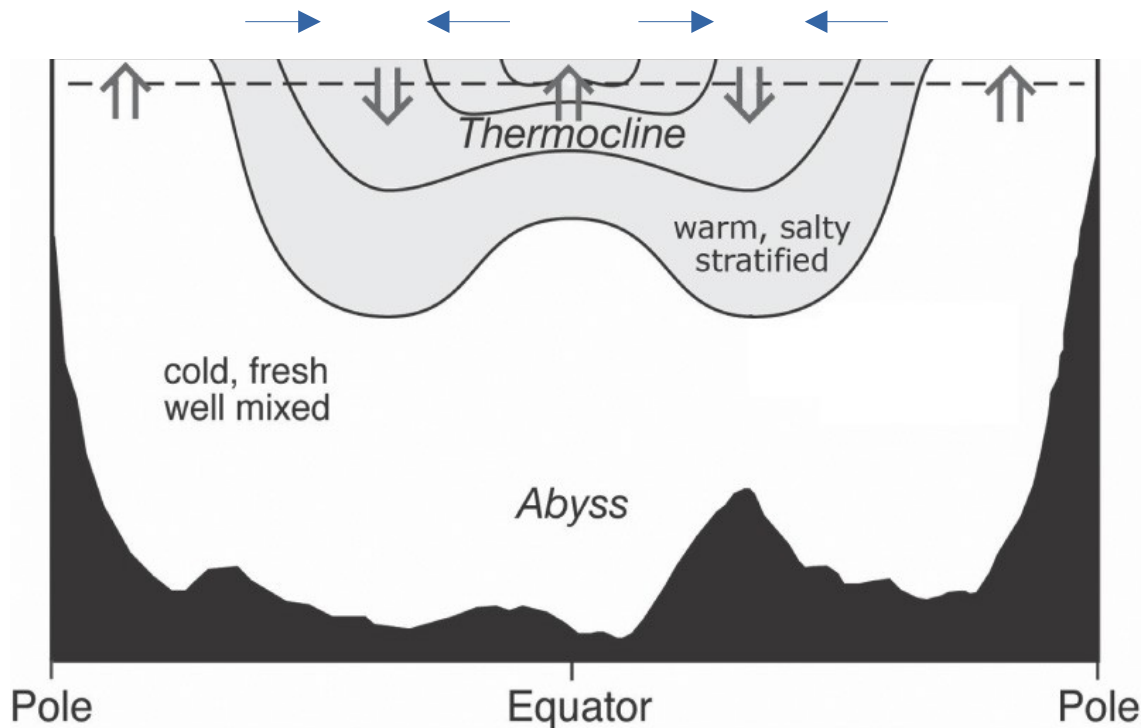




# Dinámica de Ekman

Parte del agua que se hunde fluye hacia el Ecuador por debajo de la superficie, en la Termoclina conservando la misma temperatura y salinidad.

Una vez que el agua llega al Ecuador, aflora, es calentada por la radiación solar, y es llevada de vuelta hacia los polos, completando la circulación.



# Dinámica de Ekman

El resto del agua que se hunde en  $30^\circ$  participa en Giros subtropicales que viajan hacia el polo en corrientes como la corriente del Golfo o del Brasil, antes de retornar a la región de hundimiento

# Dinámica de Ekman

En la capa límite el balance fundamental está dado por:

Fuerza Coriolis= FGP + Fricción

$$\begin{aligned} \frac{d u}{d t} - f v &= \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + FR_x \\ \frac{d v}{d t} + f u &= \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + FR_y \\ \rho g &= \frac{-\partial p}{\partial z} \end{aligned}$$

# Dinámica de Ekman

Dividimos a las componentes en una geostrofica y una ageostrofica

$$\begin{aligned}u &= u_g + u_a \\v &= v_g + v_a\end{aligned}$$

$$-f v = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + FR_x$$

$$f u = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + FR_y$$

Para la componente geostrofica vale el equilibrio geostrofico  $FC=FGP$

$$-f v_g = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad f u_g = \frac{-1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y};$$

Para la componente ageostrofica hay un equilibrio entre  $FC=FR$  (balance de Ekman)

$$-f v_a = FR_x = A_v \frac{\partial^2 u_a}{\partial z^2};$$

$$+f u_a = FR_y = A_v \frac{\partial^2 v_a}{\partial z^2}$$

$A_v$  es el  
coeficiente de  
mezcla vertical

Para la componente ageostrofica

$$u_a = \frac{A_V^2}{f^2} \frac{\partial^4 u_a}{\partial z^4}$$

$$u_a = C e^{\lambda z}$$

Entonces

$$\lambda = \pm (1 \pm i) \frac{1}{d} \quad d = \sqrt{(2 A_V / |f|)}$$

Imponiendo condiciones de borde

$$\frac{\partial u_a}{\partial z} = \frac{\tau}{\rho A_V}, \quad z = 0$$

$$u_a(z \rightarrow -\infty) = 0$$

En la superficie la variacion de la velocidad con la profundidad esta dado por el esfuerzo de los vientos

Al alejarnos de la superficie la velocidad ageostrofica disminuye y solo queda la geostrofica en profundidad

Si  $\tau = \tau_y$  entonces la solución es

$$u_E(z) = \frac{\sqrt{2}}{\rho f d} e^{z/d} \left[ -\tau_y \sin\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) \right]$$

$$v_E(z) = \frac{\sqrt{2}}{\rho f d} e^{z/d} \left[ +\tau_y \cos\left(\frac{z}{d} - \frac{\pi}{4}\right) \right]$$

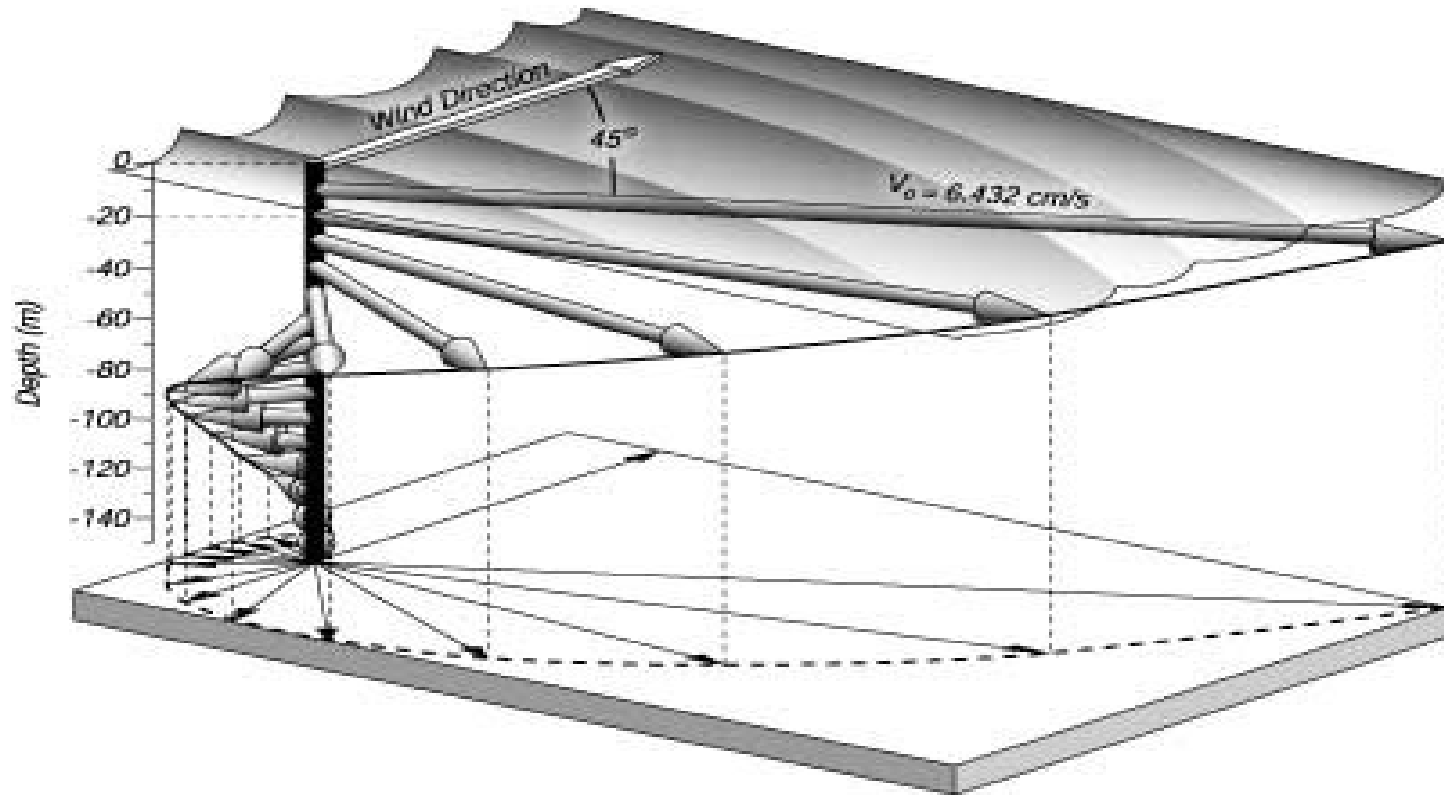
Corrientes de Ekman

$$d = \sqrt{(2 A_V / |f|)}$$

Profundidad de la capa de Ekman

A la corriente ageostrofica que cumple el balance FC=FR se le denomina corriente de Ekman.

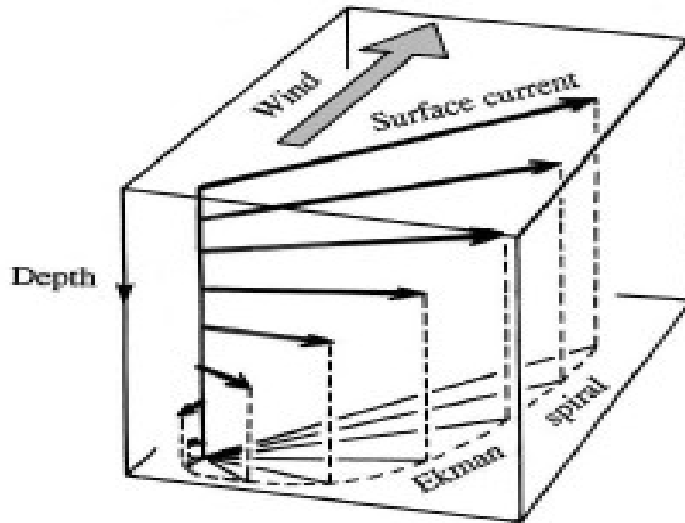
# Espiral de Ekman (H.N.)



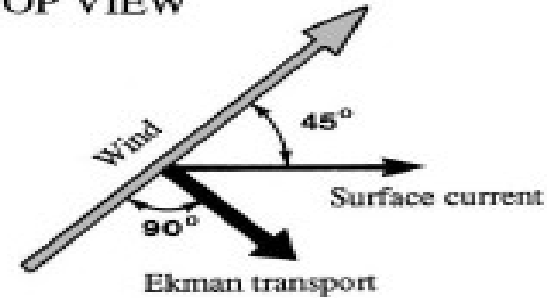
- Transporte de Ekman

$$U_E = \int_{-\infty}^0 u_E(z) dz = \frac{1}{\rho f} \tau_y$$
$$V_E = \int_{-\infty}^0 v_E(z) dz = \frac{-1}{\rho f} \tau_x$$

No depende de  $A_v$ !

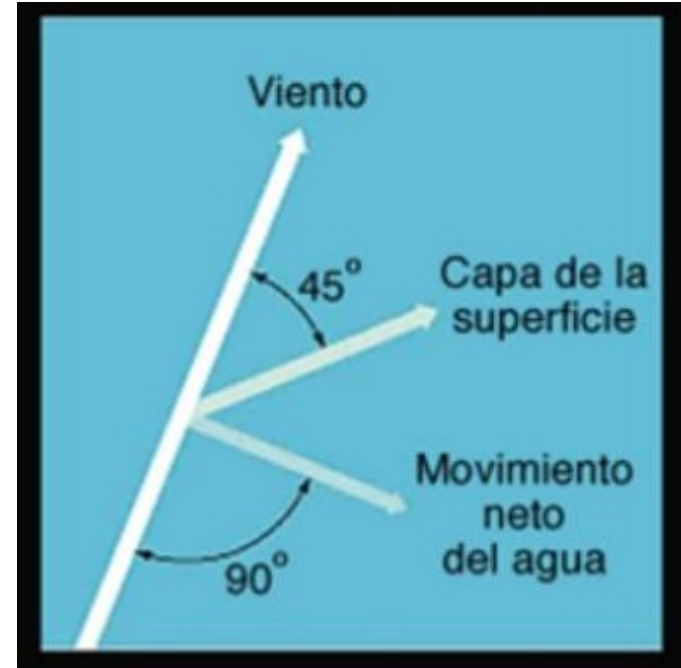
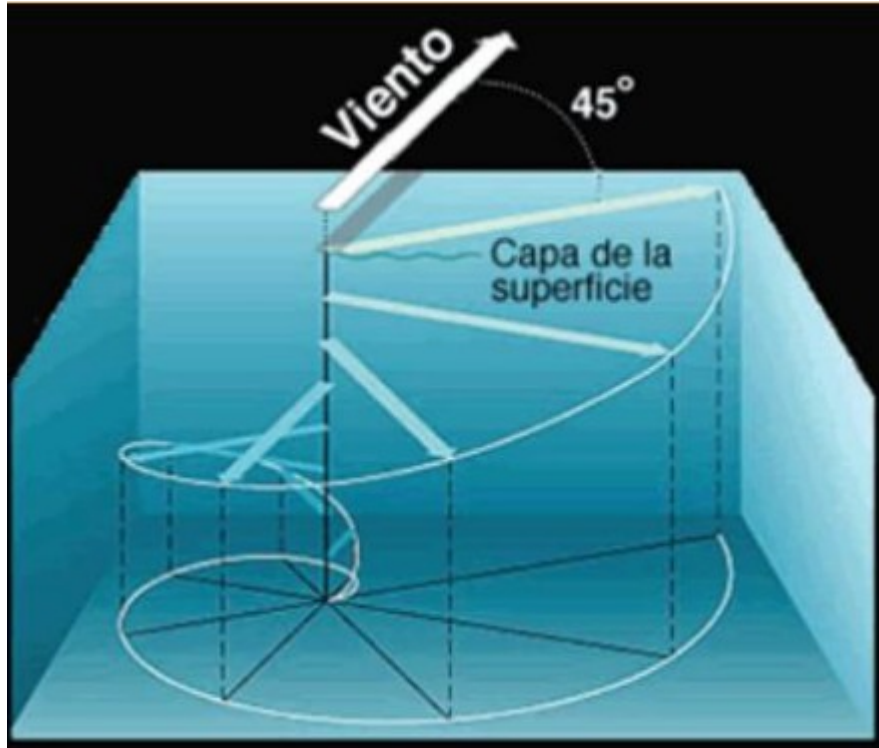


TOP VIEW

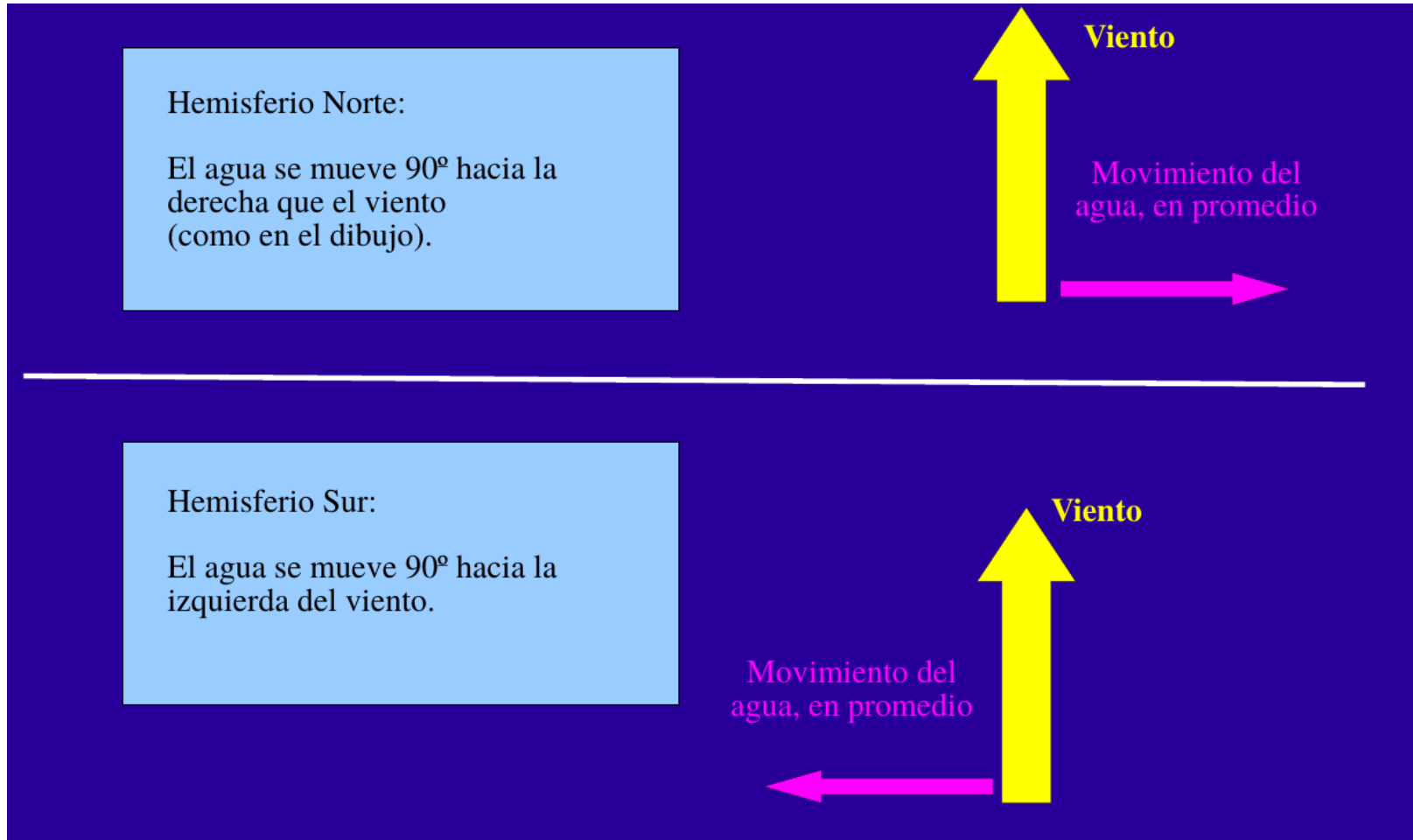




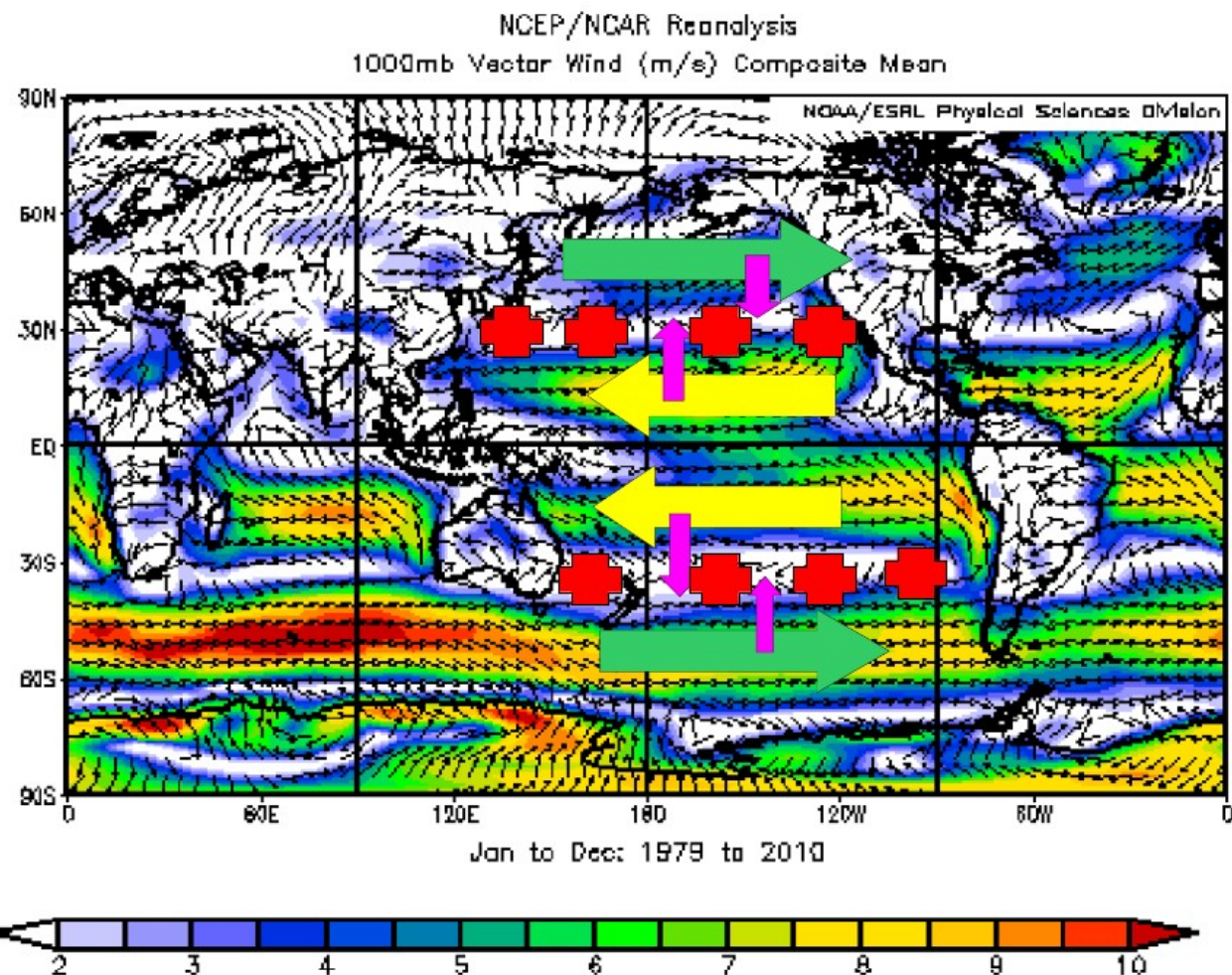
# Circulación superficial – Transporte de Ekman



# Circulación superficial – Transporte de Ekman



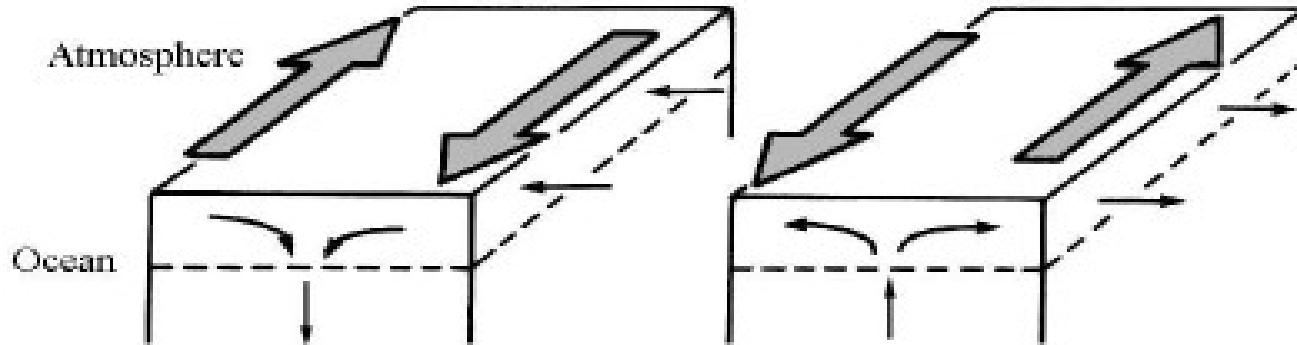
# Dinámica de Ekman



# Dinámica de Ekman

## Bombeo de Ekman

Si el viento varía espacialmente el transporte de Ekman también lo y habrá convergencia/divergencia en la capa lo cual induce movimientos verticales.



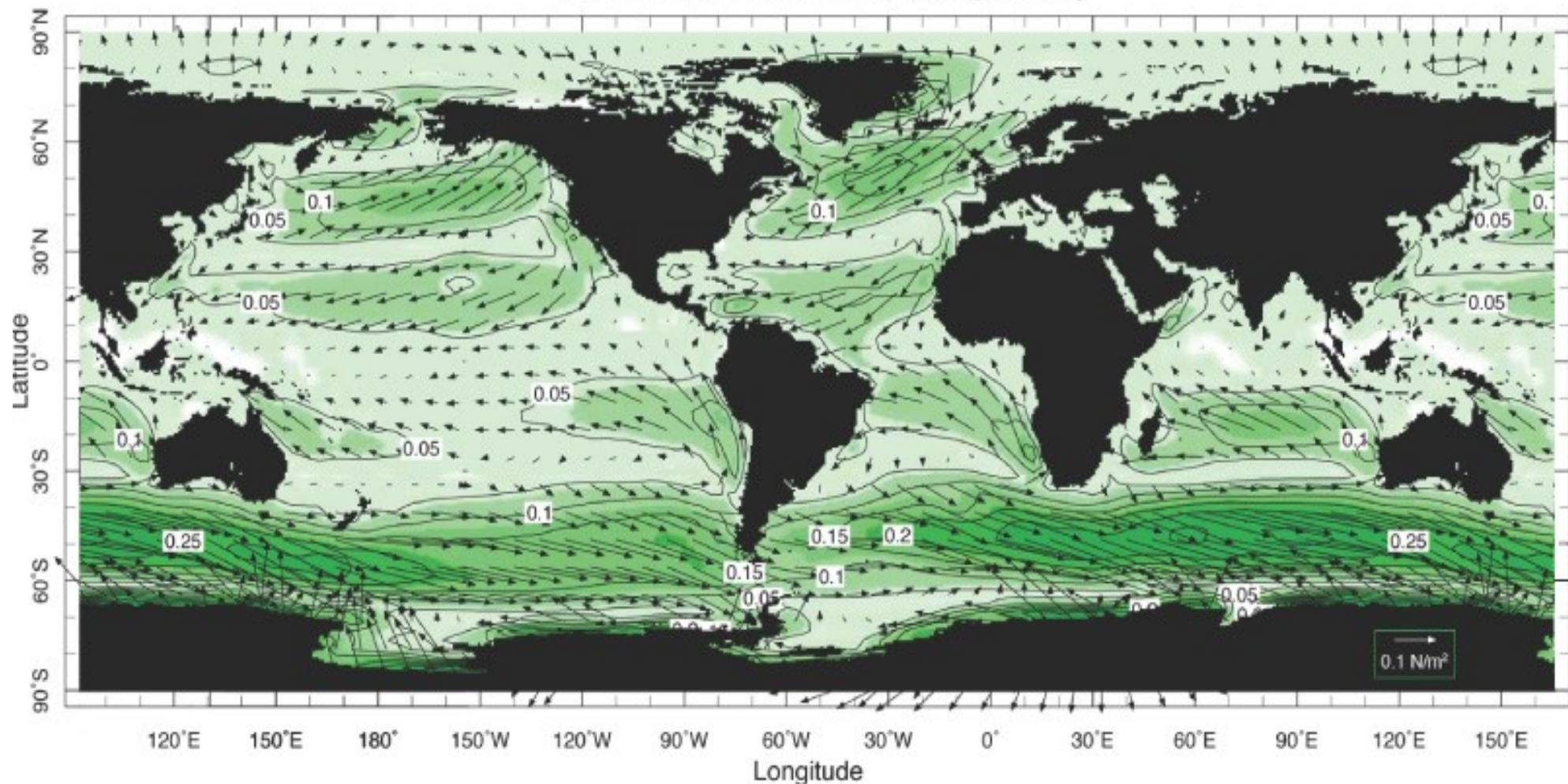
## Divergencia horizontal del transporte de Ekman

$$\nabla \cdot \mathbf{U}_E = \left( \frac{\partial U_E}{\partial x} + \frac{\partial V_E}{\partial y} \right) = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_y}{\rho f} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_x}{\rho f} \right) \right]$$

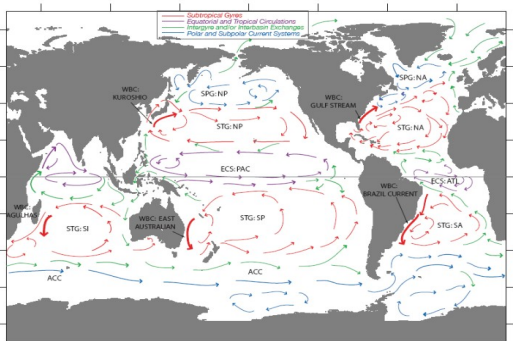
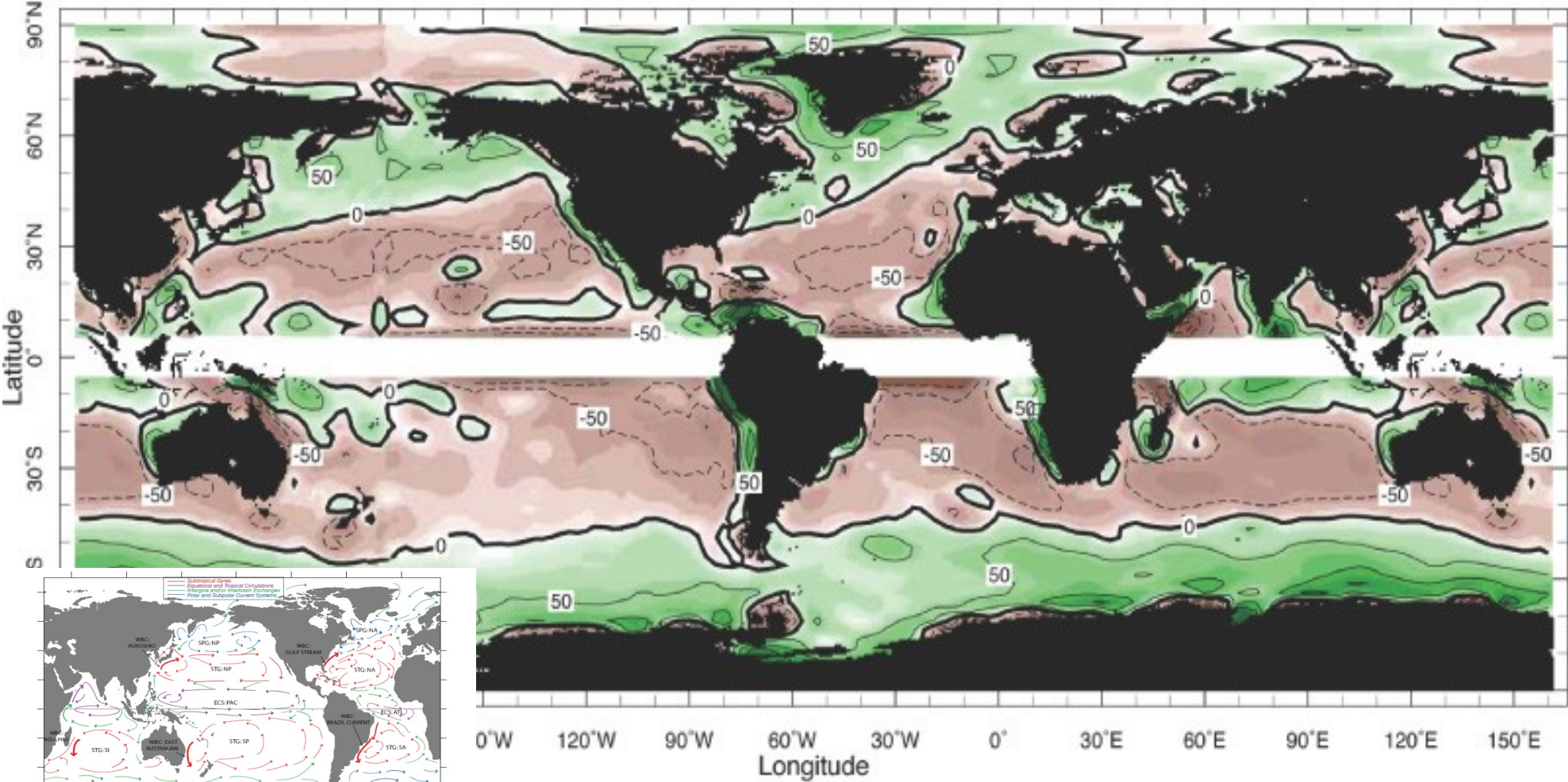
Por continuidad obtenemos el “bombeo de Ekman”

$$w_E = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\tau_y}{f} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\tau_x}{f} \right) \right]$$

# Surface Wind Stress ( $\text{N/m}^2$ )



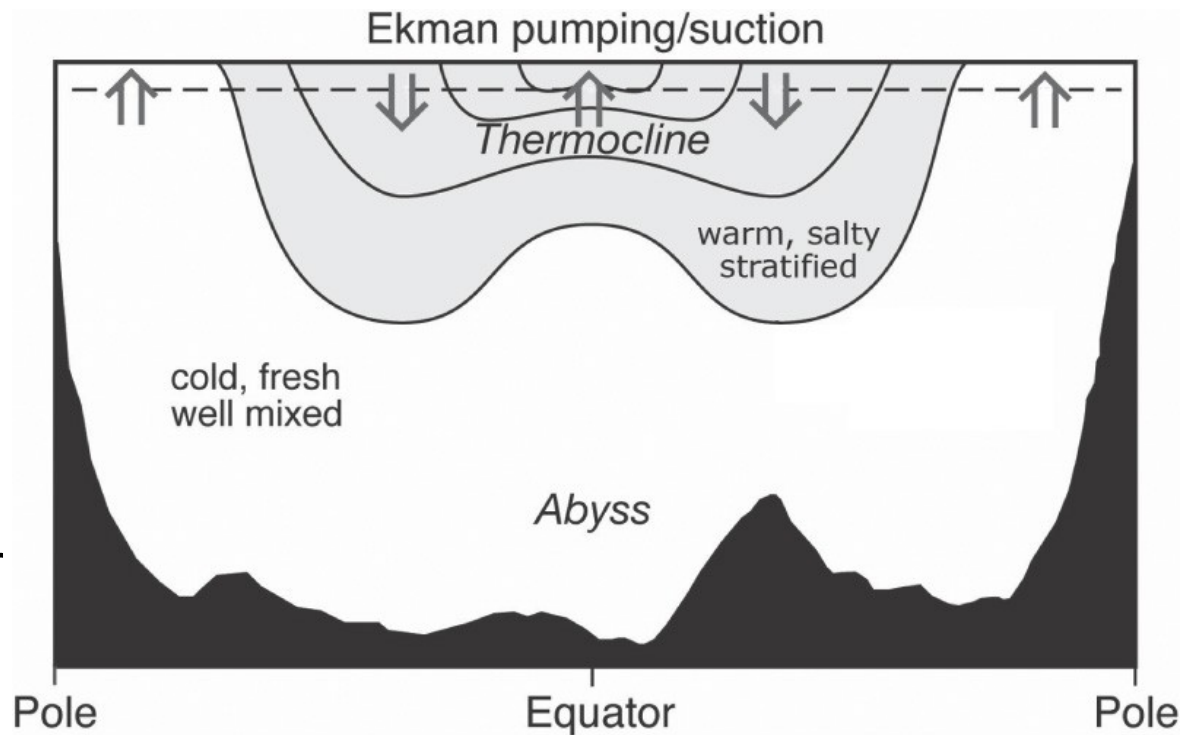
# Ekman Pumping (m/y)



# Dinámica de Ekman

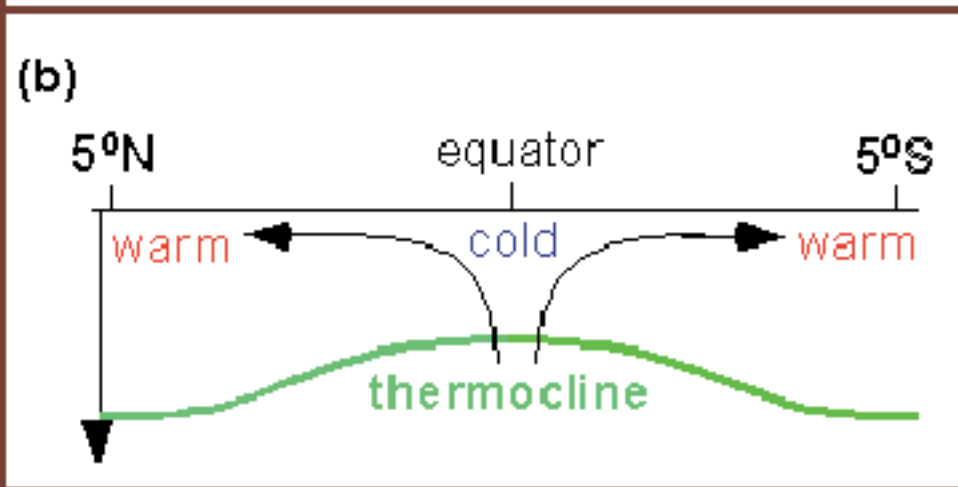
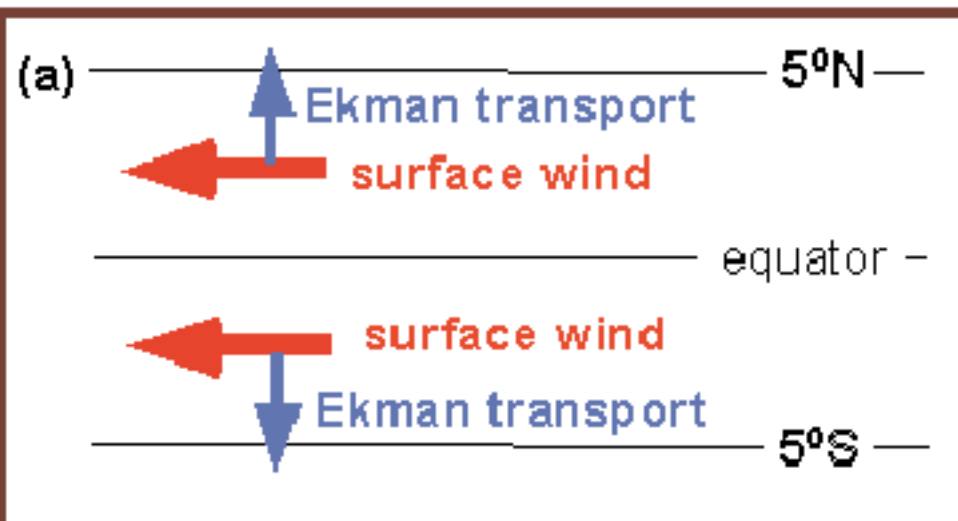
Parte del agua que se hunde fluye hacia el Ecuador por debajo de la superficie, en la Termoclina conservando la misma temperatura y salinidad.

Una vez que el agua llega al Ecuador, aflora, es calentada por la radiación solar, y es llevada de vuelta hacia los polos, completando la circulación.

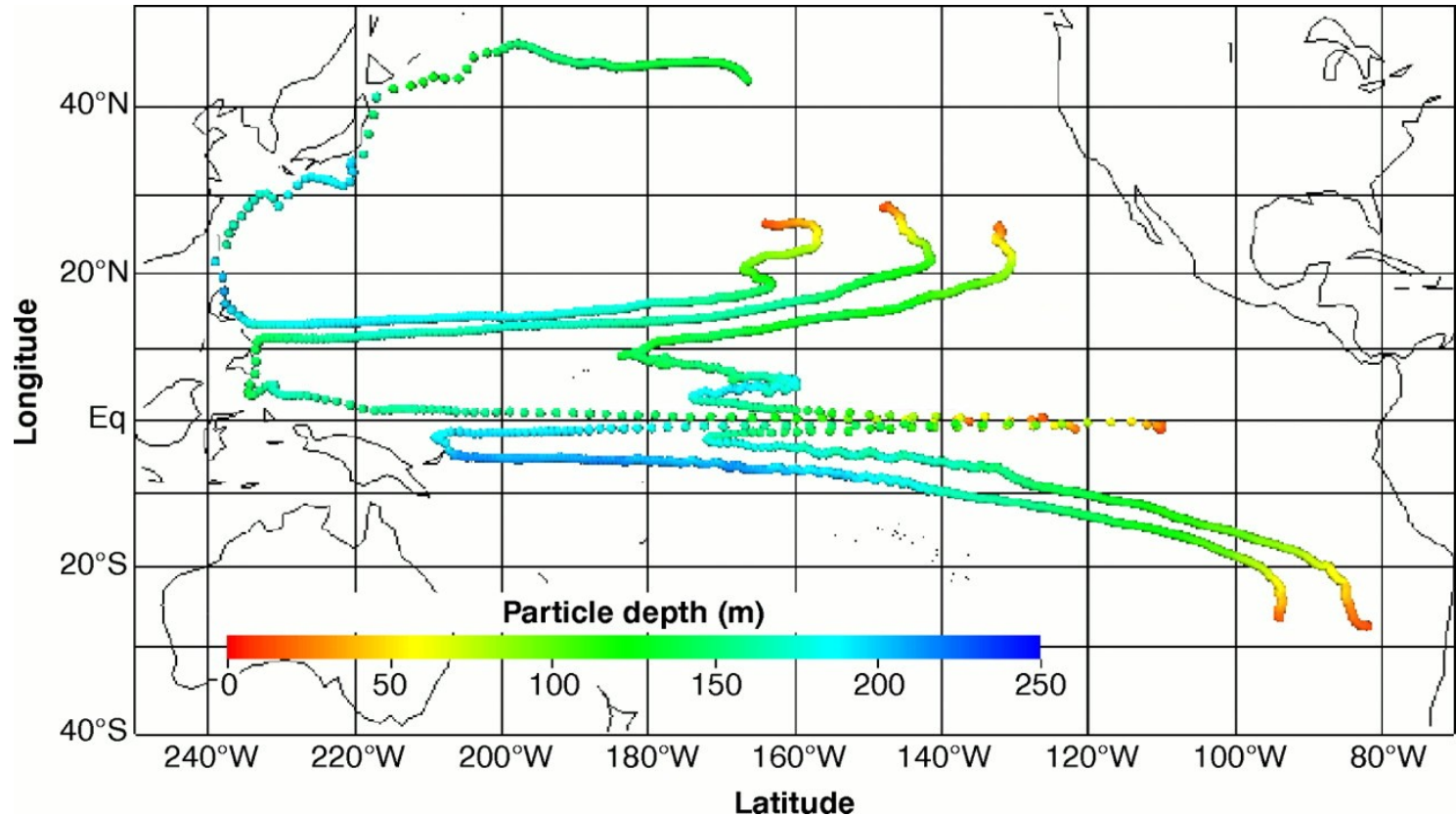




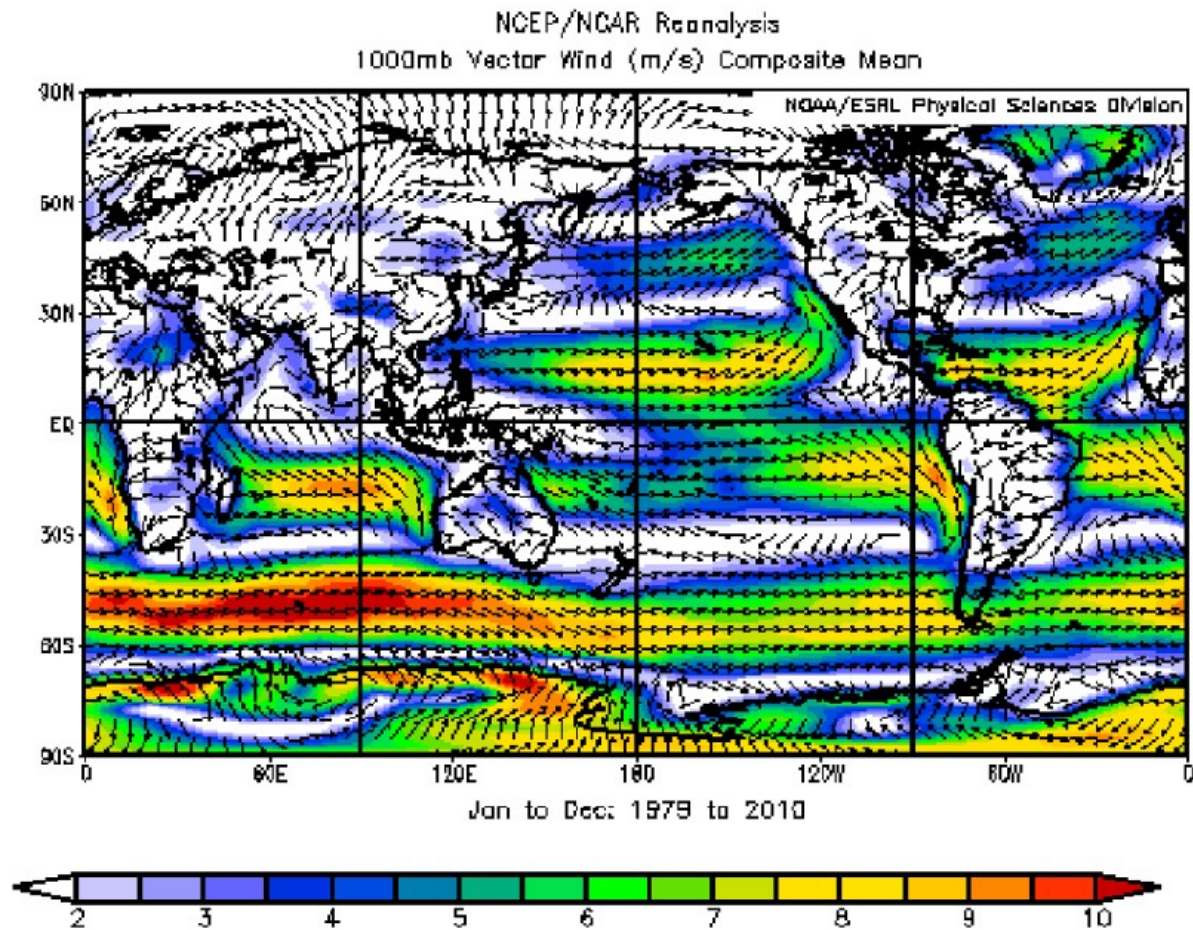




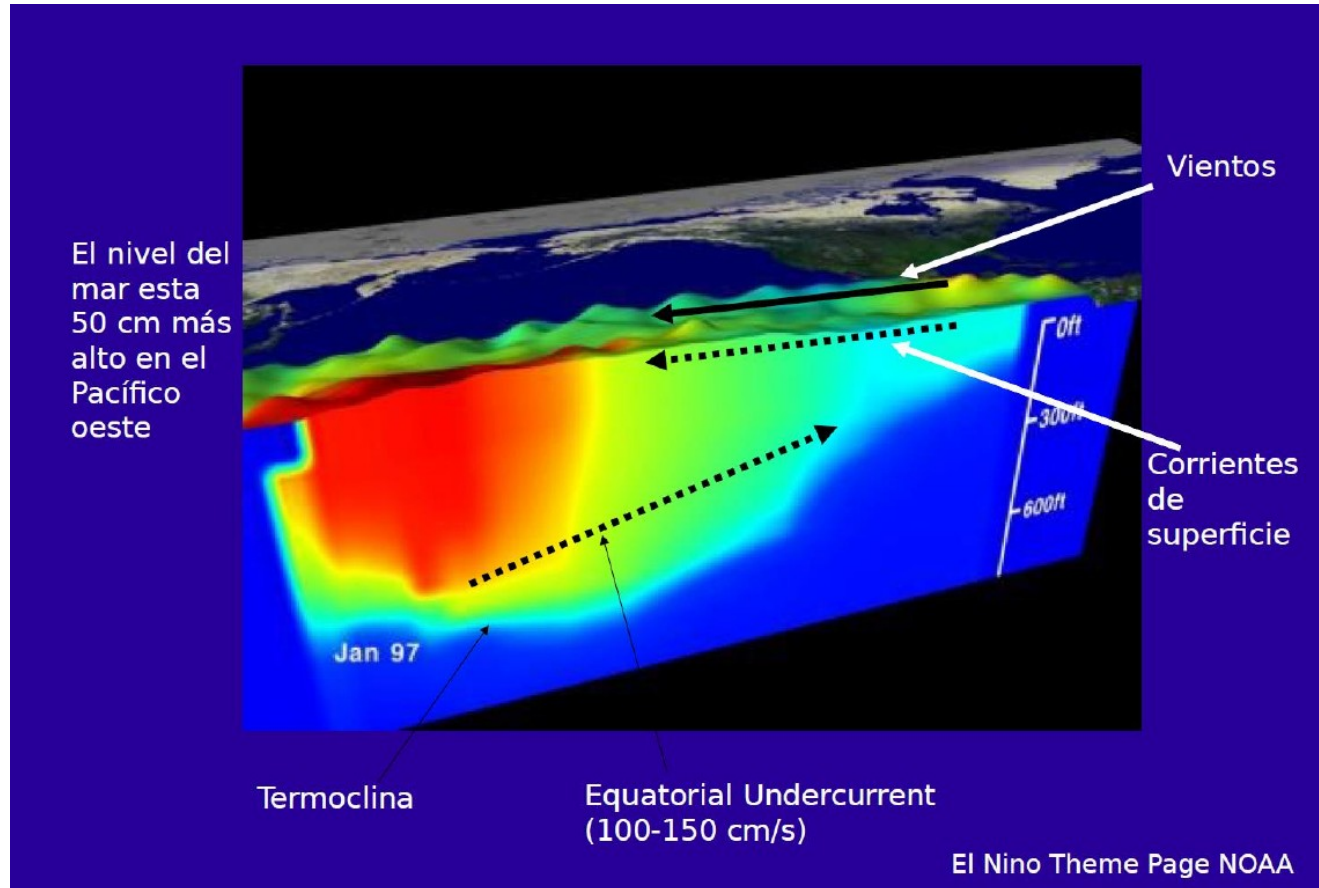
El agua se hunde en  $30^\circ$  y se mueve hacia el ecuador a unos 200 m de profundidad. Llega a la costa oeste, se mueve hacia el este y aflora en la región central y este.



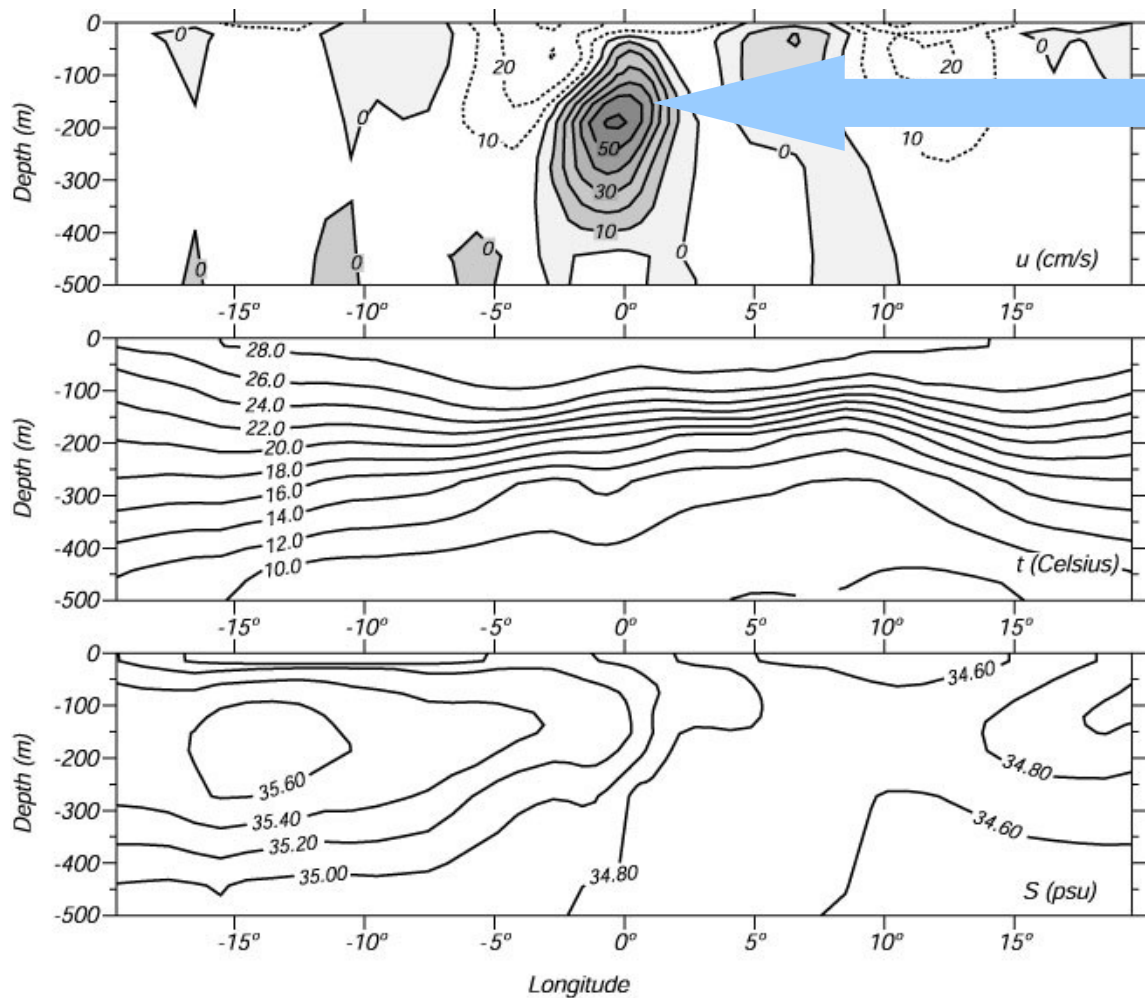
# Los vientos en superficie



# Pacífico ecuatorial

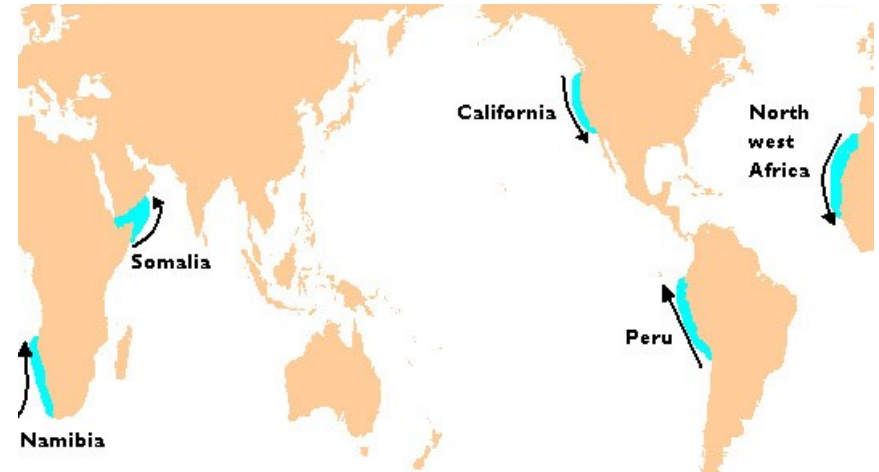
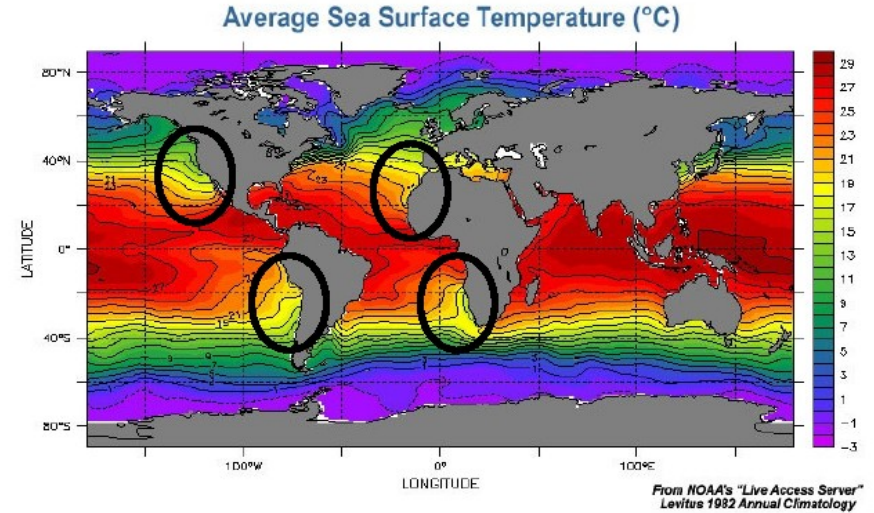
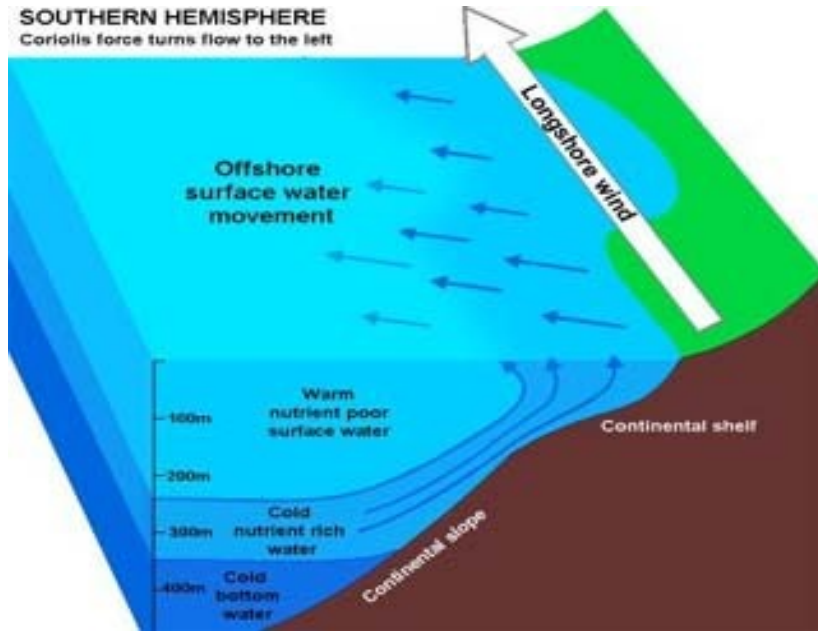


# Corte longitudinal en el Pacifico

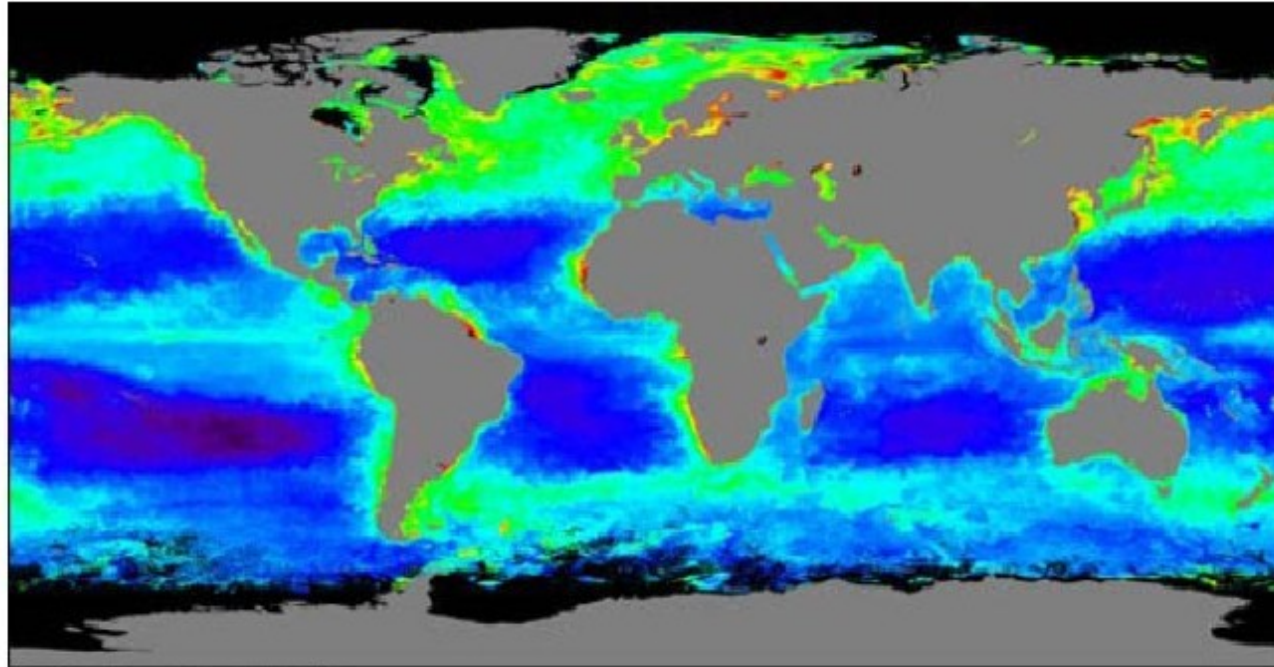


Corriente  
Subsuperficial  
equatorial

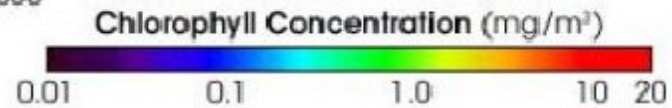
# Afloramientos costeros



# Afloramientos costeros



March 21 - June 20, 2006

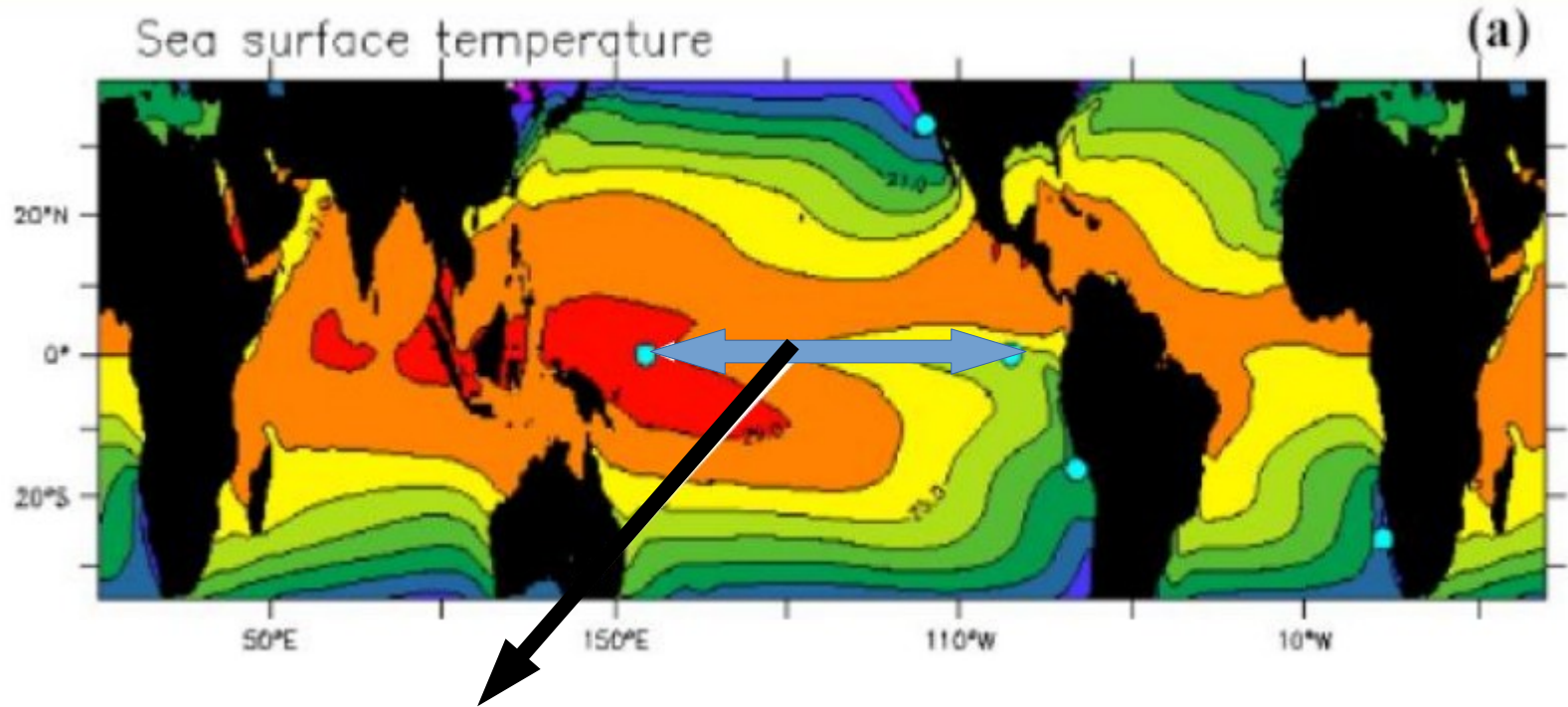






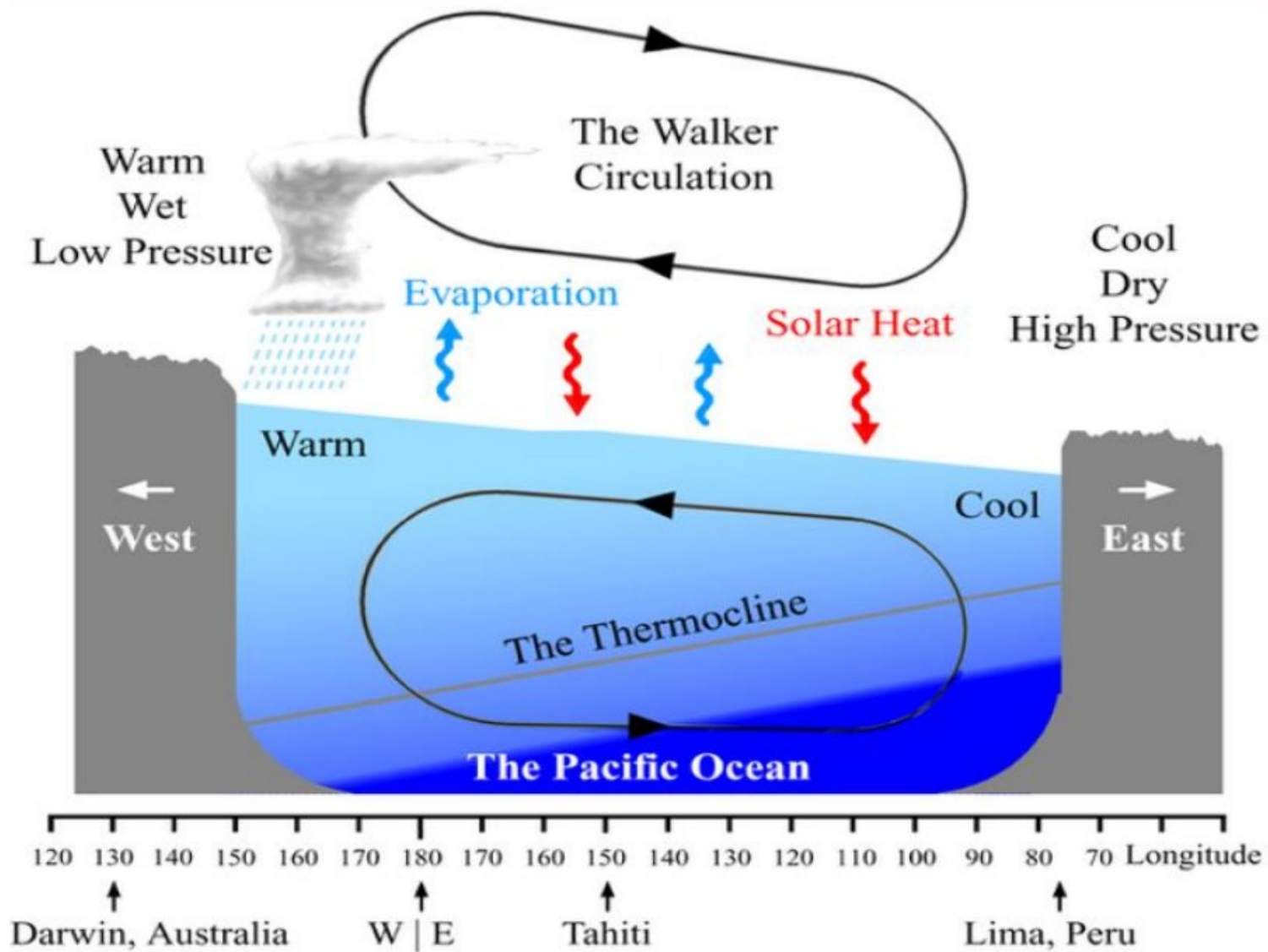
# Fenómeno El Niño – Oscilación Sur (ENSO)

# Celda de Walker



Gradiente de temperatura

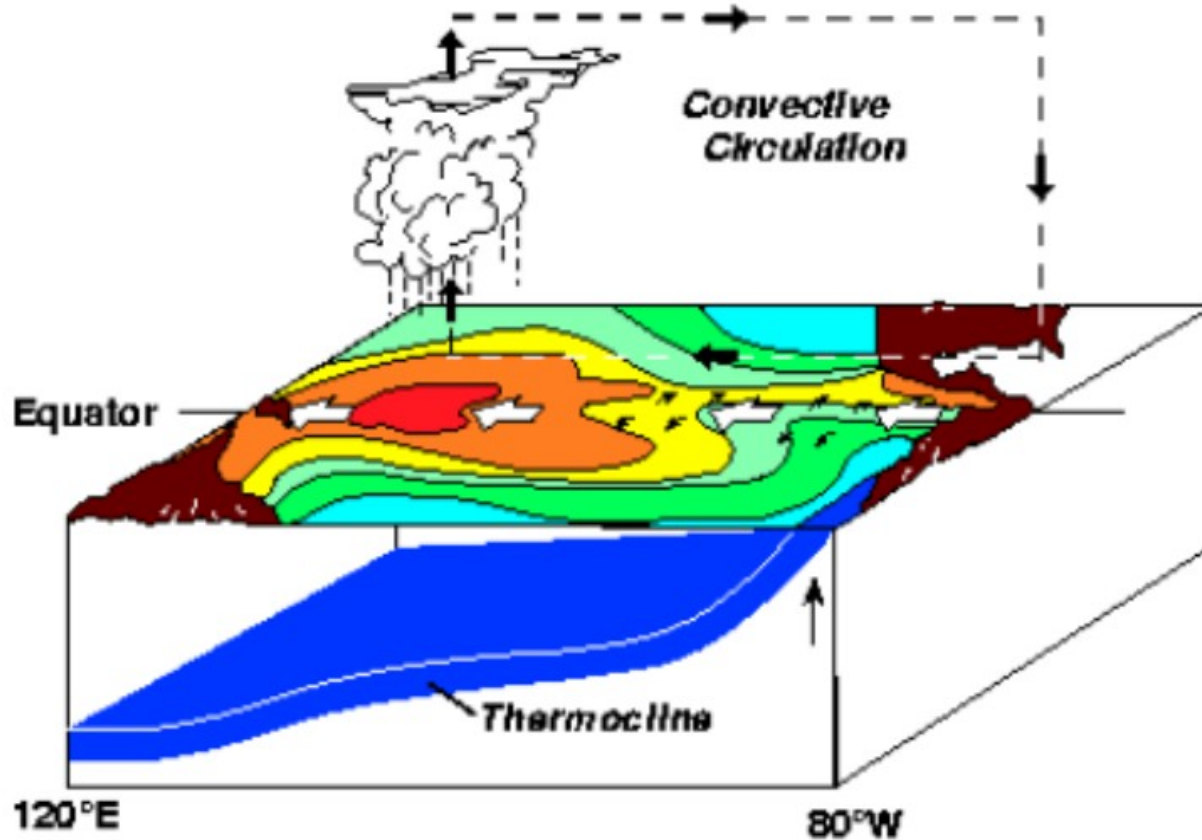




# ENSO El Niño Oscilación Sur

- Es un sistema de interacción océano – atmósfera en el Pacífico Ecuatorial.
- Su estado cambia cada año debido a cambios en la TSM.
- El Niño: TSM del Pacífico tropical E más cálida que lo usual.
- La Niña: TSM en el Pacífico tropical E más fría que lo usual.
- El tiempo entre sucesivos El Niño/La Niña es irregular, aprox 3 y 7 años.
- No todos los El Niño/La Niña son iguales en intensidad.
- Aunque El Niño/La Niña son caracterizados por anomalías de TSM, se asocian con anomalías de viento, presión, nivel del mar y precipitación.
- Tiene efectos a nivel global: Dichos efectos dependen de la región del mundo y de la época del año.

## Normal Conditions



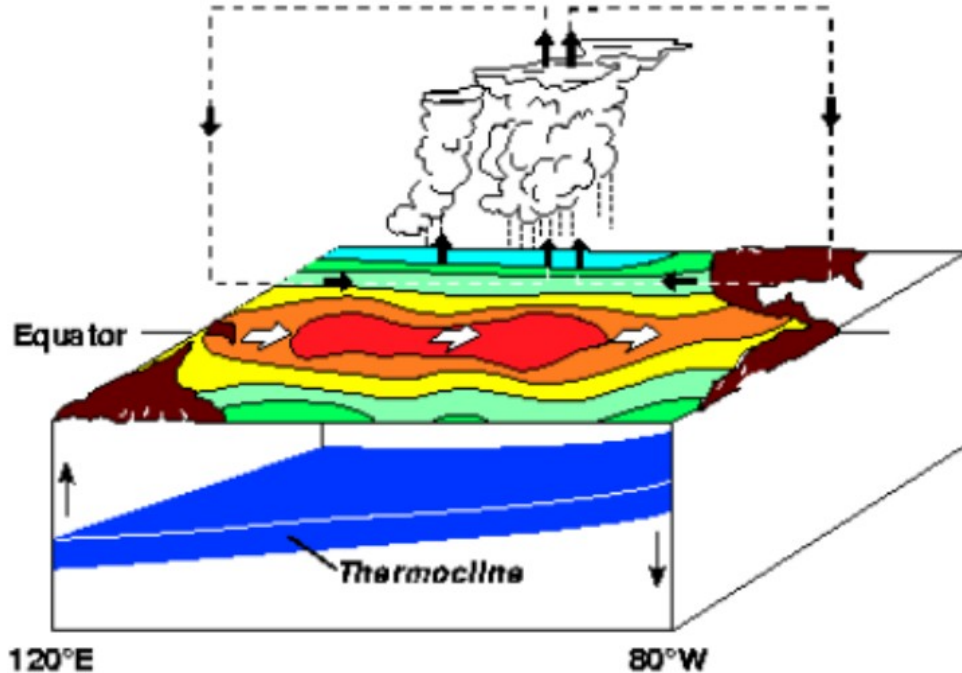
Alisios soplando hacia el W

Apilamiento de aguas  
cálidas en el pacífico W

Afloramiento de aguas frías  
en el Pacífico E

Altura del nivel del mar  
0.5m mayor en las costas  
del Pacífico W

## El Niño Conditions



Debilitamiento de alisios en la parte central y W del Pacífico

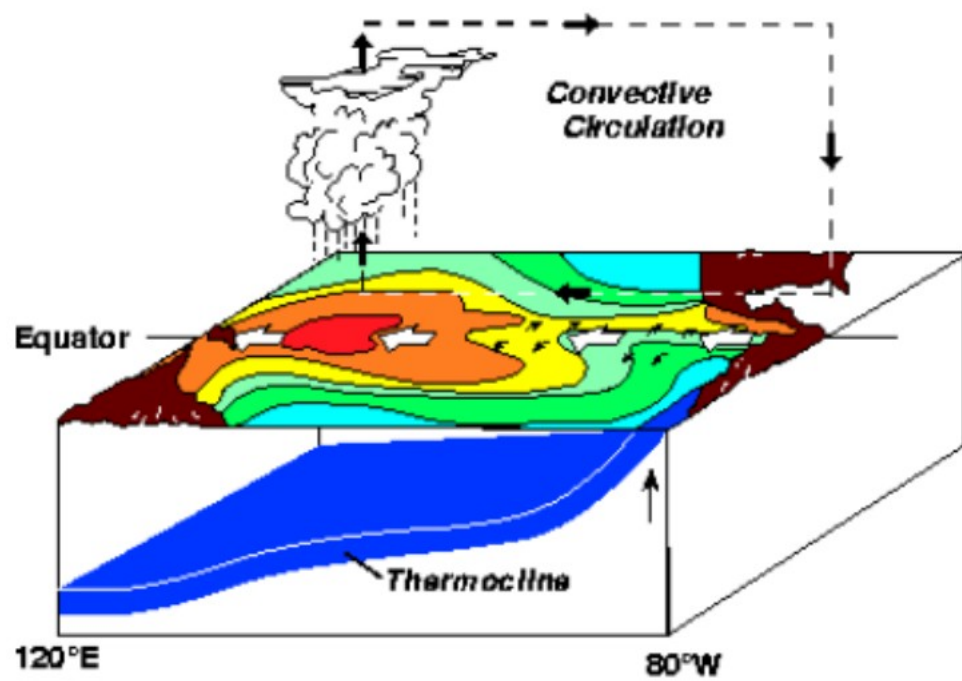
Desplazamiento del agua cálida hacia el E → hundimiento de la termoclina en el E y ascenso en el W.

Hundimiento termoclina → inhibe afloramiento → calentamiento aguas superficial Pacif E → disminución producción pesquera.

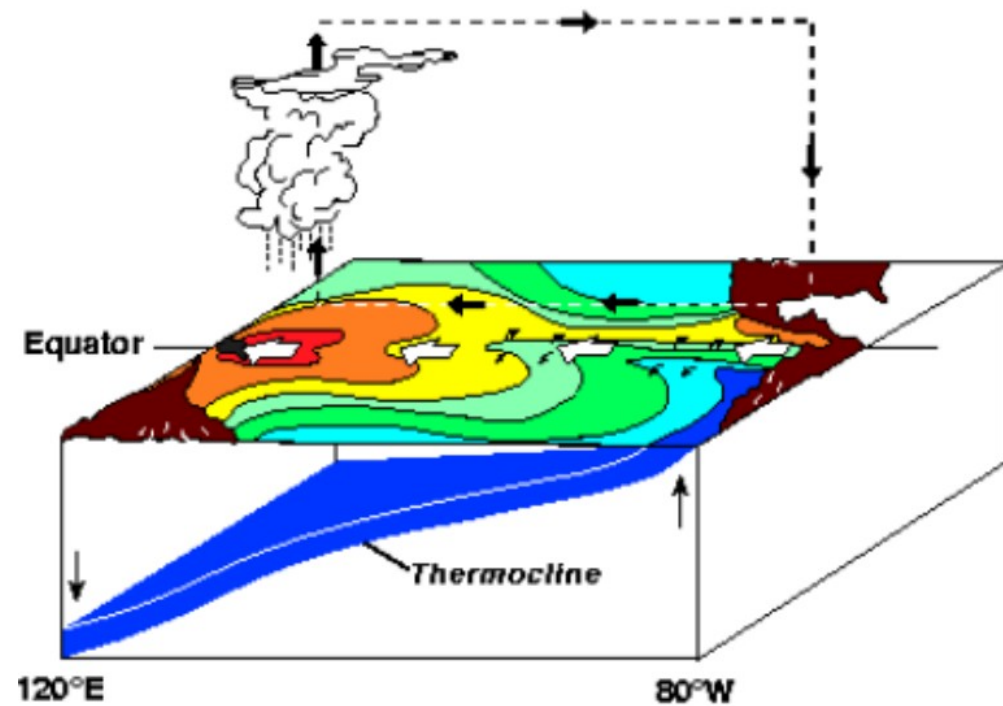
Las precipitaciones siguen al agua cálida hacia el este.



### Normal Conditions



### La Niña Conditions



# Lista de años Niño/Niña

Anomalías de TSM en la región Niño 3.4 (5°N-5°S, 120°-170°W)

Rojo: El Niño  
Azul: La Niña

Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2010	1.5	1.2	0.8	0.4	-0.2	-0.7	-1.0	-1.3	-1.6	-1.6	-1.6	-1.6
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.7	-0.6	-0.4	-0.5	-0.6	-0.8	-1.0	-1.1	-1.0
2012	-0.9	-0.7	-0.6	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.4	0.4	0.3	0.1	-0.2
2013	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4	-0.4	-0.3	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3
2014	-0.4	-0.5	-0.3	0.0	0.2	0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2015	0.5	0.5	0.5	0.7	0.9	1.2	1.5	1.9	2.2	2.4	2.6	2.6
2016	2.5	2.1	1.6	0.9	0.4	-0.1	-0.4	-0.5	-0.6	-0.7	-0.7	-0.6
2017	-0.3	-0.2	0.1	0.2	0.3	0.3	0.1	-0.1	-0.4	-0.7	-0.8	-1.0
2018	-0.9	-0.9	-0.7	-0.5	-0.2	0.0	0.1	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8
2019	0.7	0.7	0.7	0.7	0.5	0.5	0.3	0.1	0.2	0.3	0.5	0.5
Year	DJF	JFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDJ
2020	0.5	0.5	0.4	0.2	-0.1	-0.3	-0.4	-0.6	-0.9	-1.2	-1.3	-1.2
2021	-1.0	-0.9	-0.8	-0.7	-0.5	-0.4	-0.4	-0.5				

