

# Circulación de gran escala de la atmósfera antártica

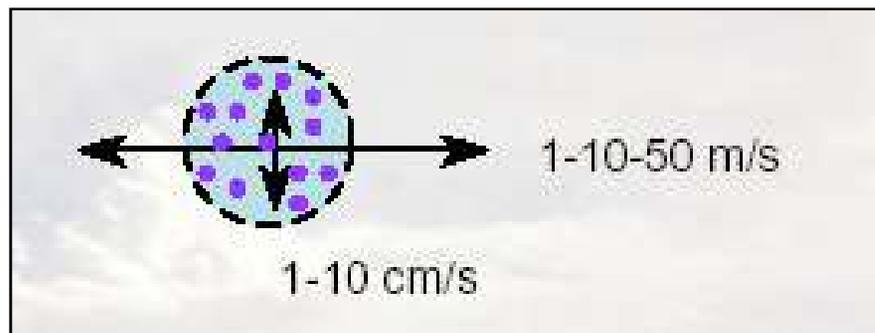
- Vientos
- Circulación General de la Atmósfera
- Mecanismos básicos que explican la circulación media observada en la Antártida

# Vientos:

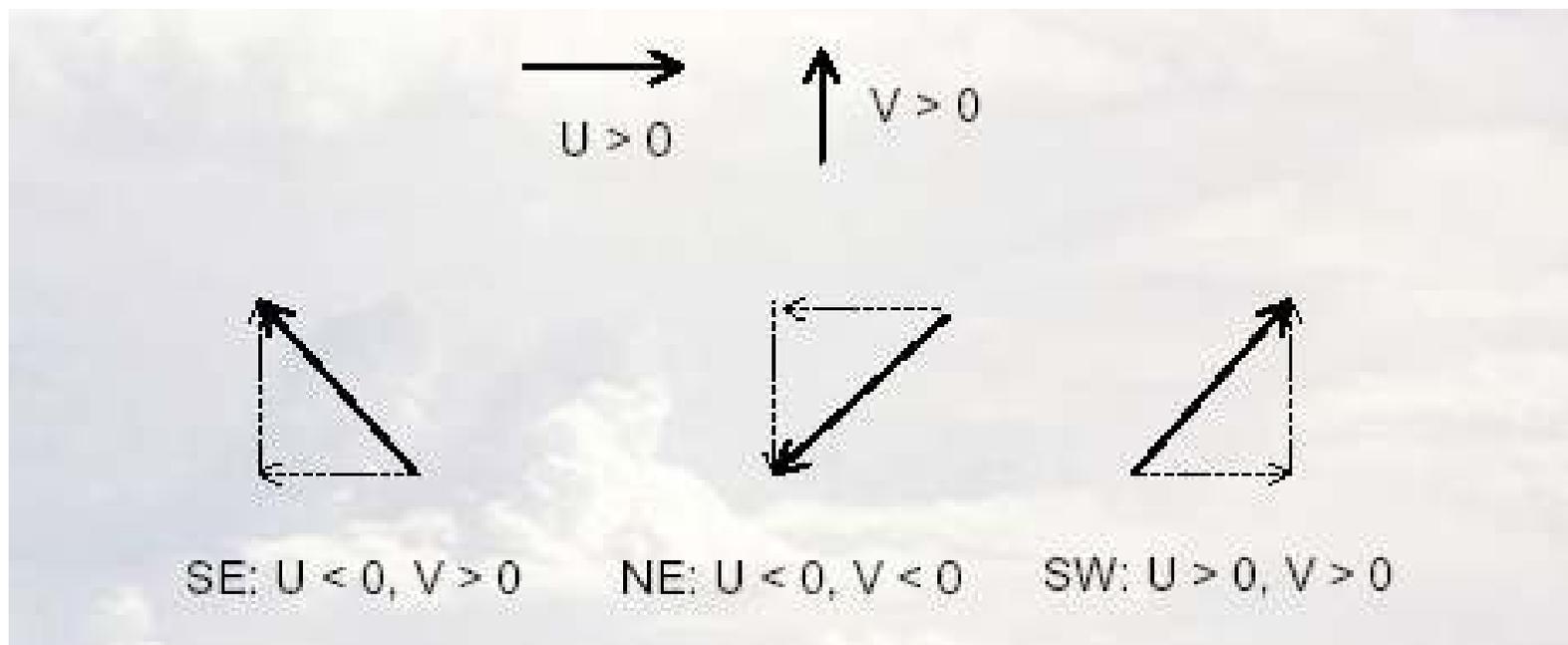
## La atmósfera en movimiento

Las parcelas de aire se mueven en la horizontal y vertical, con velocidad variable. El **viento** se asocia con la componente horizontal.

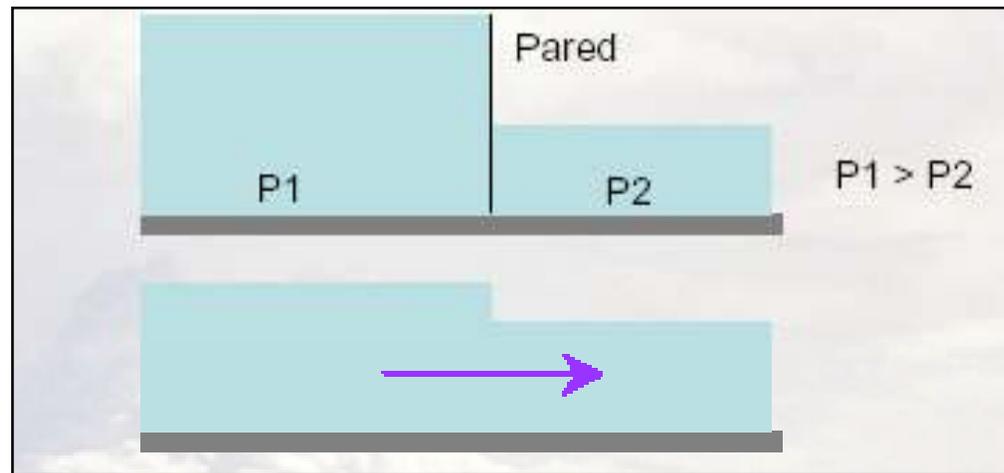
Los movimientos verticales son, generalmente, mucho más débiles que los horizontales.



Generalmente el viento es descompuesto en su **componente zonal [U] (oeste-este)** y **meridional [V] (sur-norte)**



# Qué hace mover el aire?



Diferencia de presión entre lado izquierdo y derecho del fluido, produce un flujo desde la zona de alta presión hacia la zona de baja presión. El flujo intenta producir una situación de equilibrio redistribuyendo la masa del fluido.

La principal fuerza que produce el viento es la fuerza de gradiente de presión.

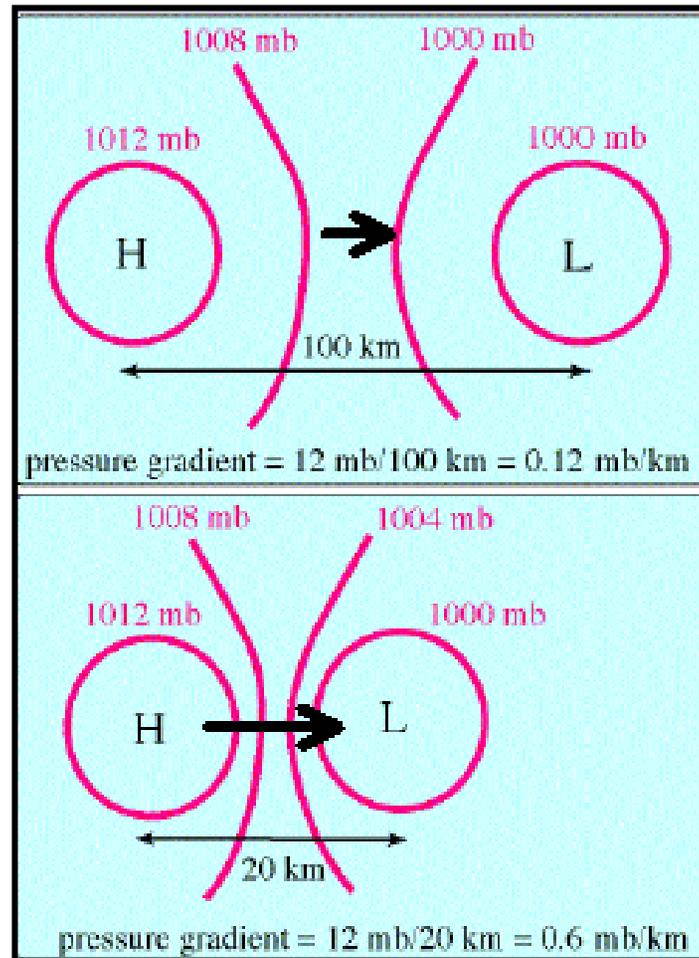
## Ecuación del movimiento:

$F=ma$                       **F:** Fuerzas actuantes sobre el fluido    **m:** masa    **a:** aceleración

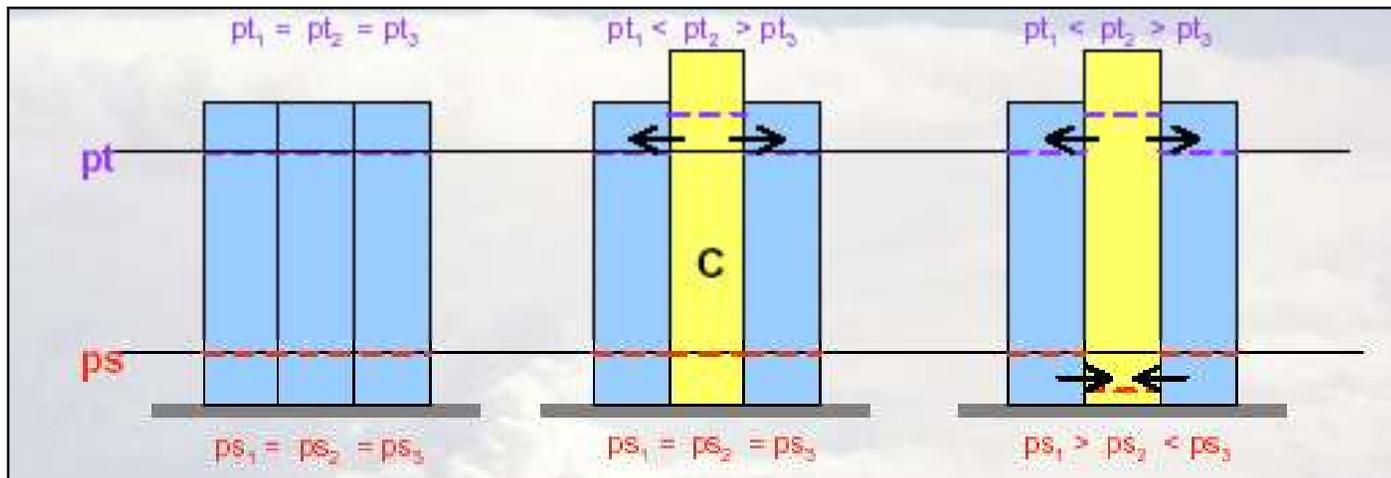
### Módulo de la fuerza de presión:

$$F_p = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n}$$

El vector fuerza de presión apunta hacia las bajas presiones

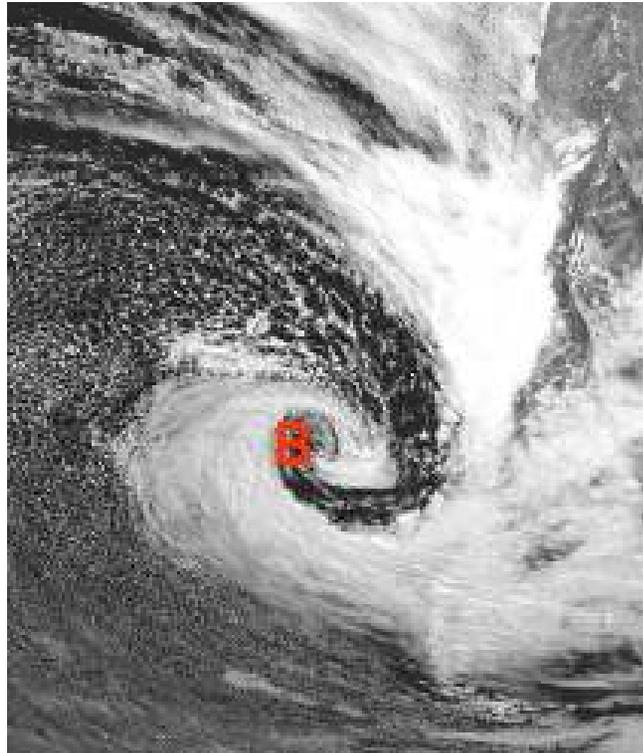


Los gradientes de presión en la atmósfera son muchas veces generados por calentamiento/enfriamiento diferencial del aire.

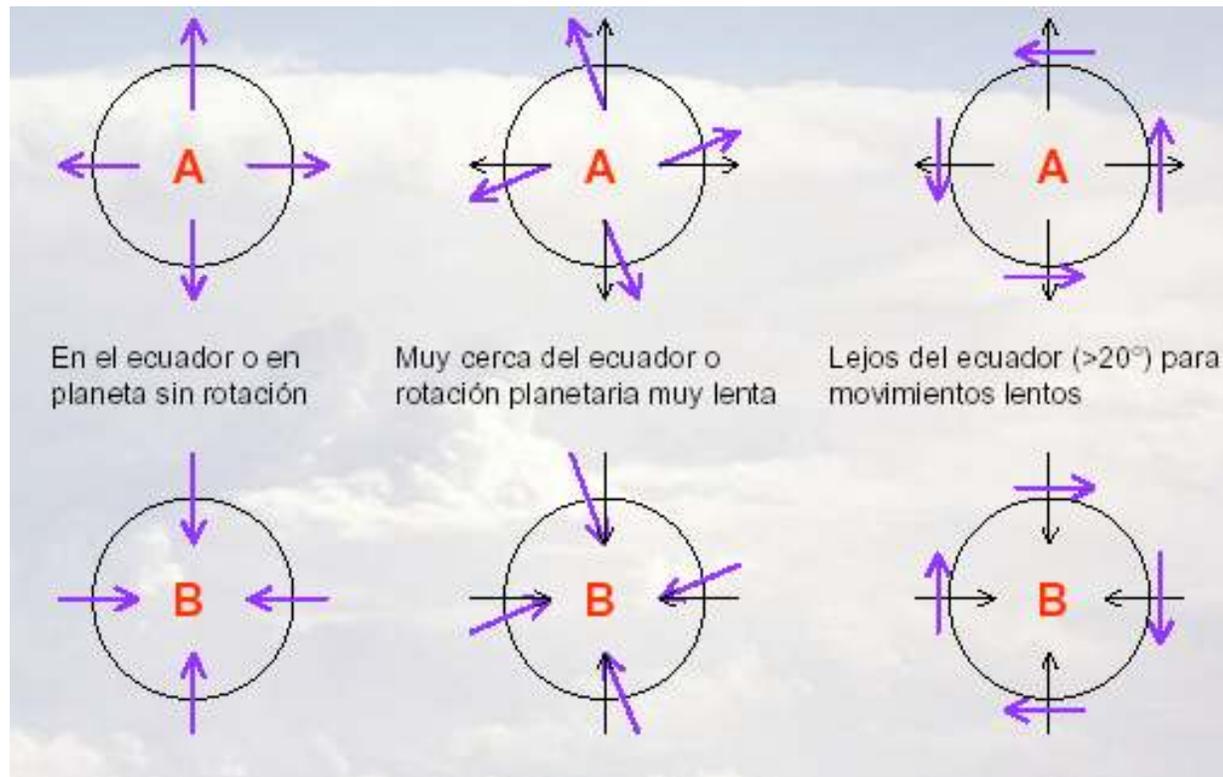


1. Inicialmente, las tres columnas son idénticas
2. La columna central se calienta diferencialmente
3. Aire en columna más cálida se expande... Aparece gradiente de presión en altura
4. Viento diverge, sacando masa de la columna
5. Presión cae en superficie... aparece gradiente cerca de la superficie
6. Viento converge, agregando masa de la columna

Sin embargo, el aire tiende a circular (mas que converger/ divergir) en torno a los centros de alta/baja presión debido al efecto de la rotación terrestre: fuerza de Coriolis



## ¿Como circula el aire en torno a los centros de alta y baja presión (HS)?



$$F_{Co} = 2 \omega V \sin \varphi$$

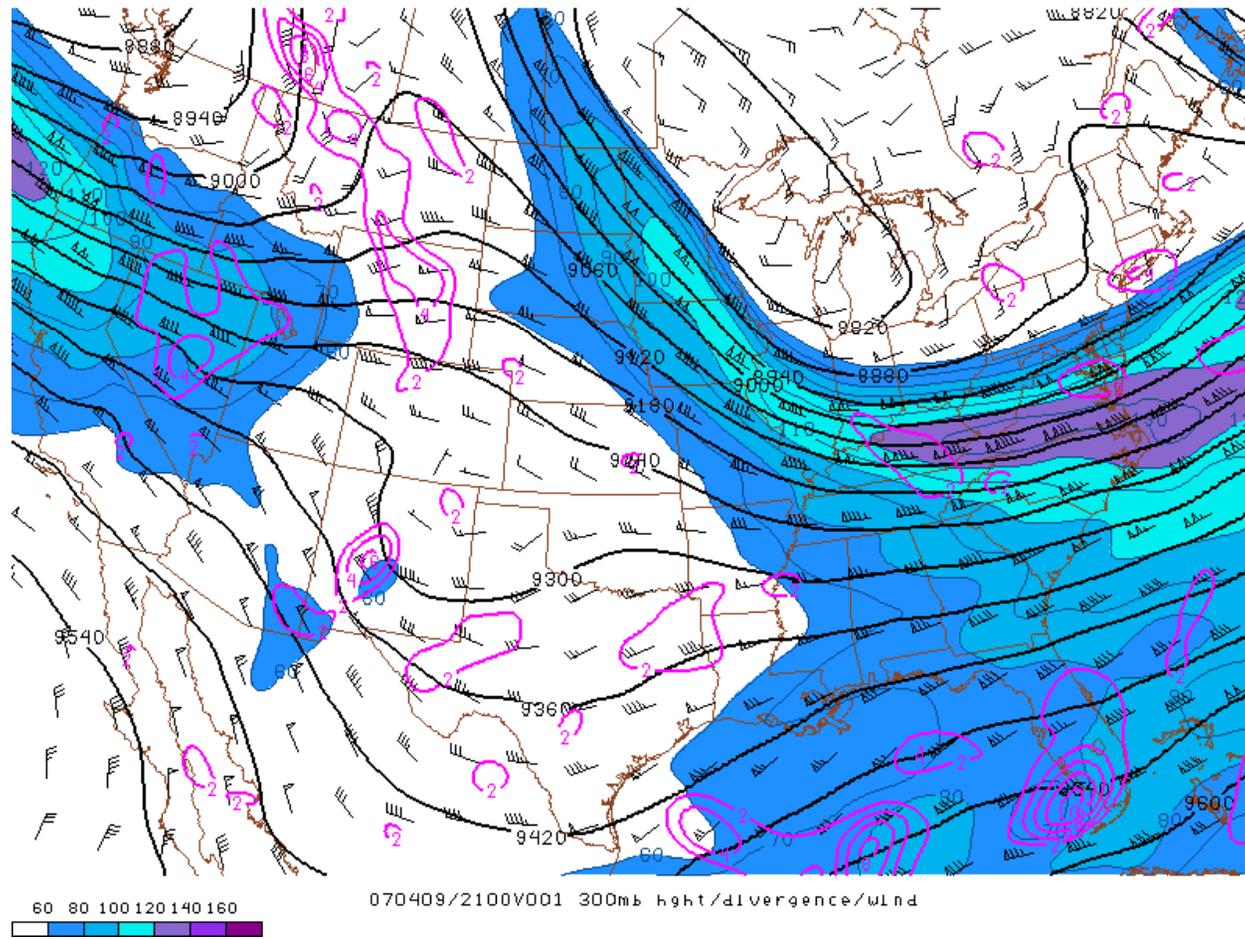
La Fuerza de Coriolis es perpendicular al Vector Viento hacia la izquierda (derecha) del movimiento en el HS (HN)

El efecto de la Fuerza de Coriolis varía también según la escala temporal y espacial del movimiento. Una estimación de su magnitud se obtiene de comparar el tiempo de vida del fenómeno con el periodo de rotación planetaria (24 horas en la tierra).



# El Vector Viento y el campo de presión

Altura geopotencial (contornos) , Viento (barbas) y su intensidad (colores) en 300 hPa



# Viento geostrófico

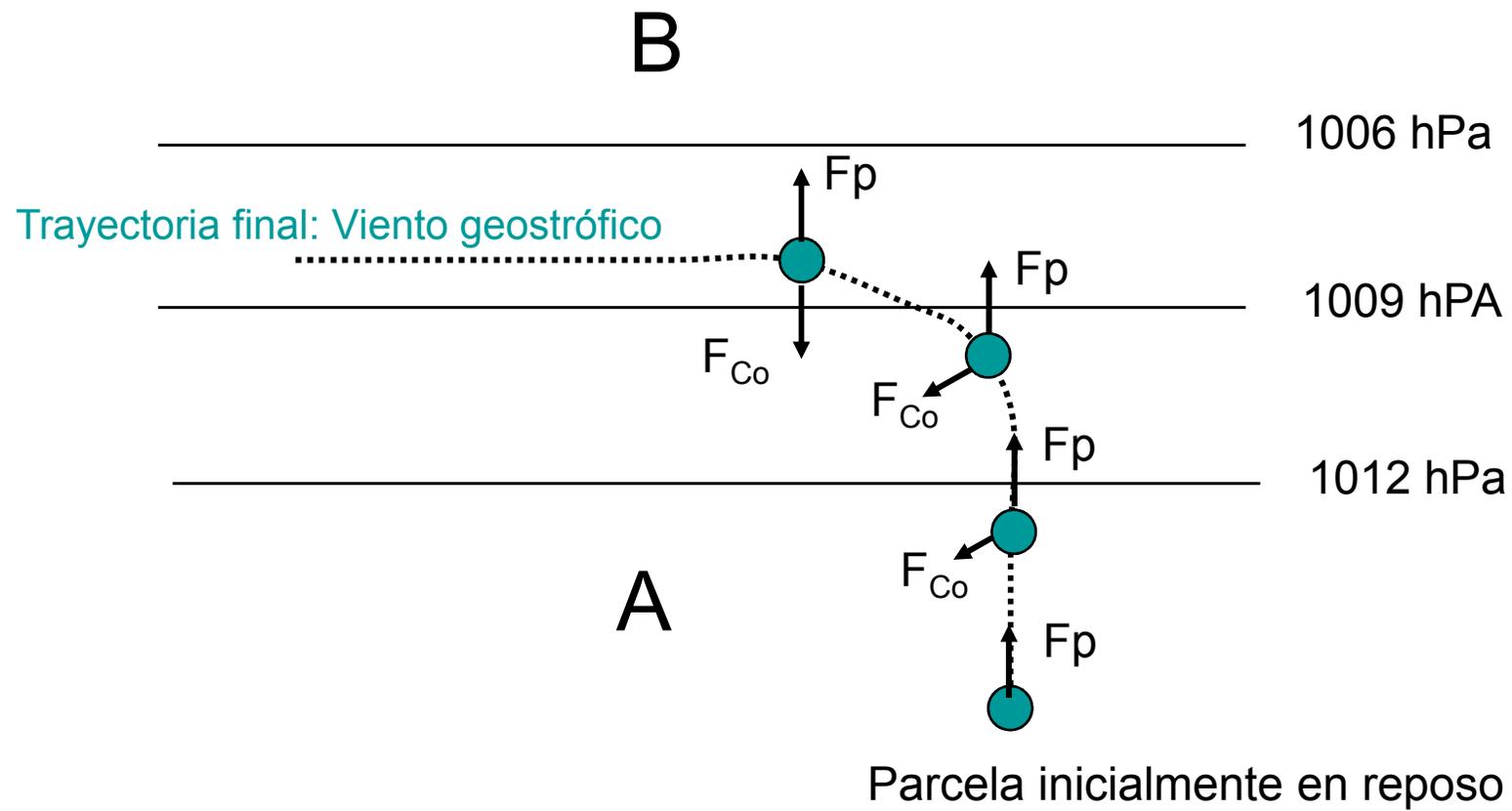
Para la mayoría de los sistemas del tiempo, la fuerza de gradiente de presión tiende a estar en balance con la fuerza de Coriolis.

El viento que resulta de este balance se denomina viento geostrófico y es una excelente aproximación del viento real en los niveles de la atmósfera donde la fricción es despreciable (sobre el océano o por encima de los 1000m de altura).

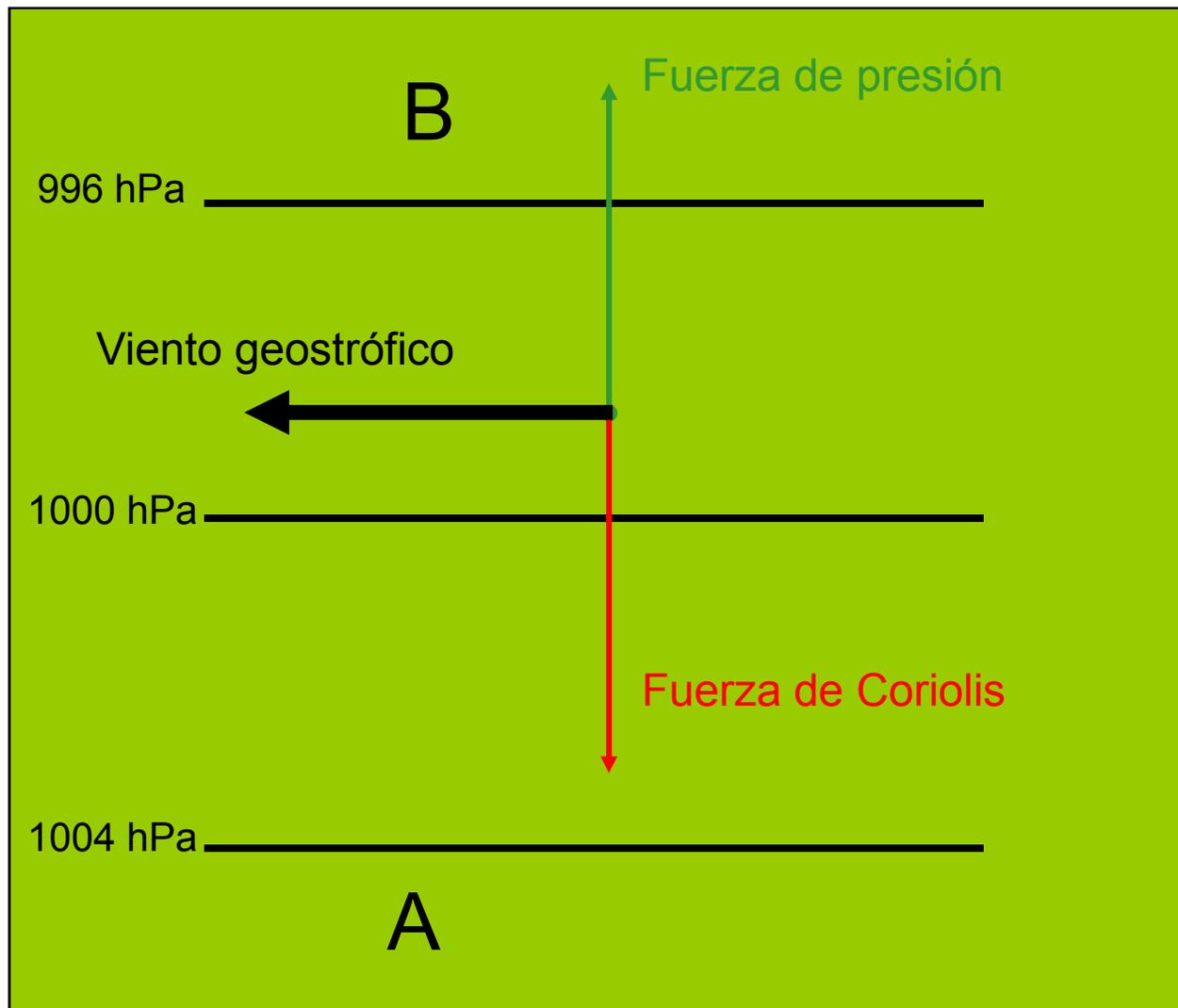
**El viento geostrófico es paralelo a las isobaras y su magnitud es proporcional al gradiente de presión. Su sentido depende del hemisferio.**

En consecuencia, las cartas de presión o altura geopotencial nos permiten tener una muy buena aproximación del viento real.

H.S.



H.S.



El viento geostrófico ( $V_g$ ) deja las bajas presiones a la derecha en el HS y a la izquierda en el HN.

## Formulación matemática: intensidad del viento geostrófico

$$F_{Co} = 2 \omega V \sin \varphi \qquad F_p = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n}$$

$$2 \omega V_g \sin \varphi = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n}$$

Balance entre las  
fuerzas de Coriolis  
y presión

$$V_g = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta p}{\Delta n} \frac{1}{2 \omega \sin \varphi}$$

Si  $f = 2 \omega \sin \varphi$  : parámetro de Coriolis

$$V_g = \frac{1}{\rho f} \frac{\Delta p}{\Delta n}$$

Latitud	$\varphi < 0$ H.S.	Parámetro	$f < 0$ H.S.
	$\varphi > 0$ H.N.	de Coriolis	$f > 0$ H.N.

El  $V_g$  es un vector donde la magnitud se calcula según la ecuación:

$$V_g = \frac{1}{\rho f} \frac{\Delta p}{\Delta n}$$

Resumiendo:

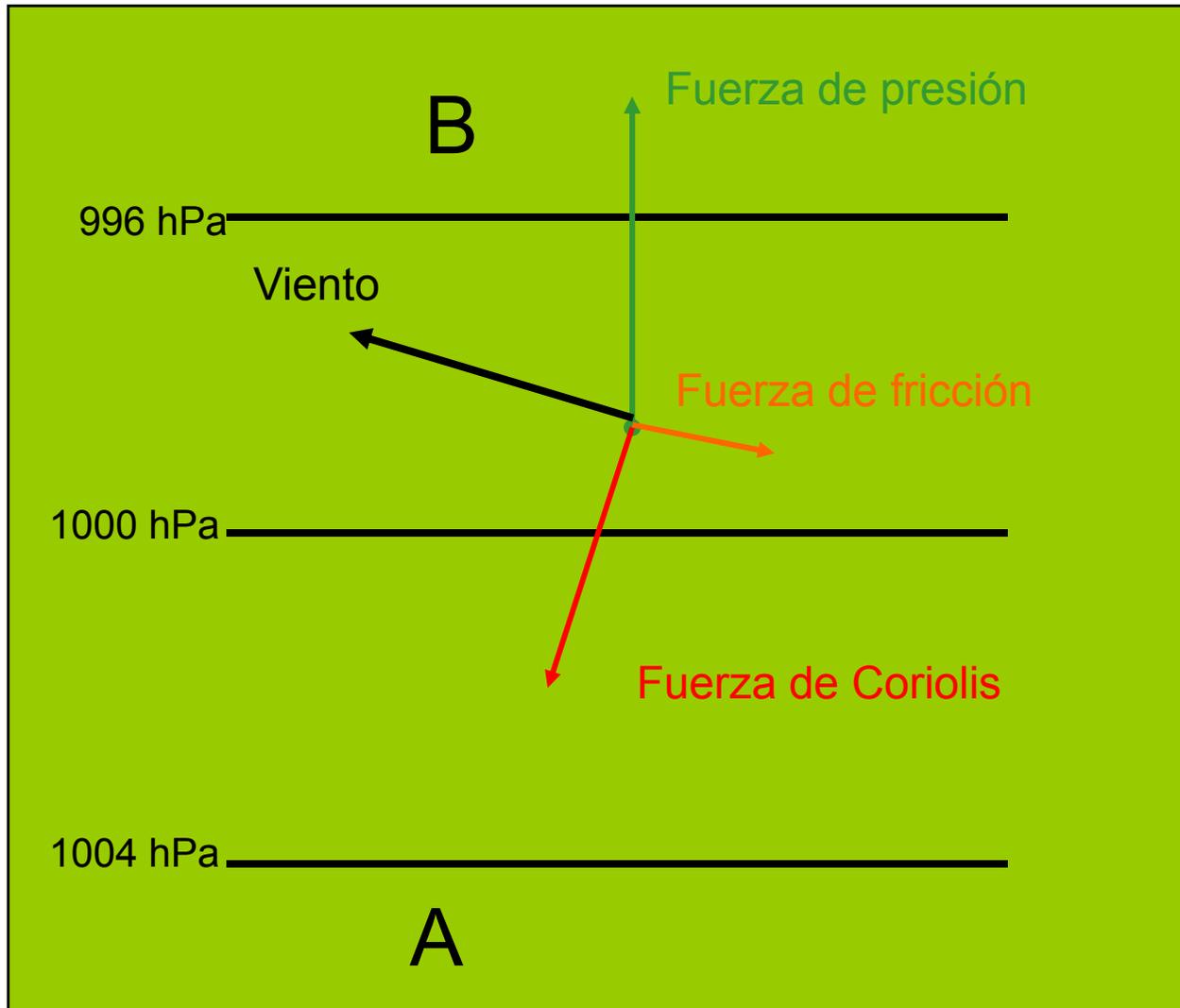
El viento geostrófico es el viento que habría en la atmósfera si el movimiento fuese:

- horizontal
- sin aceleración
- sin fricción

Bajo estas suposiciones, la aproximación de balance geostrófico ( $F_p = F_{Co}$ ) no es válida en latitudes ecuatoriales.

# Efecto de la fricción

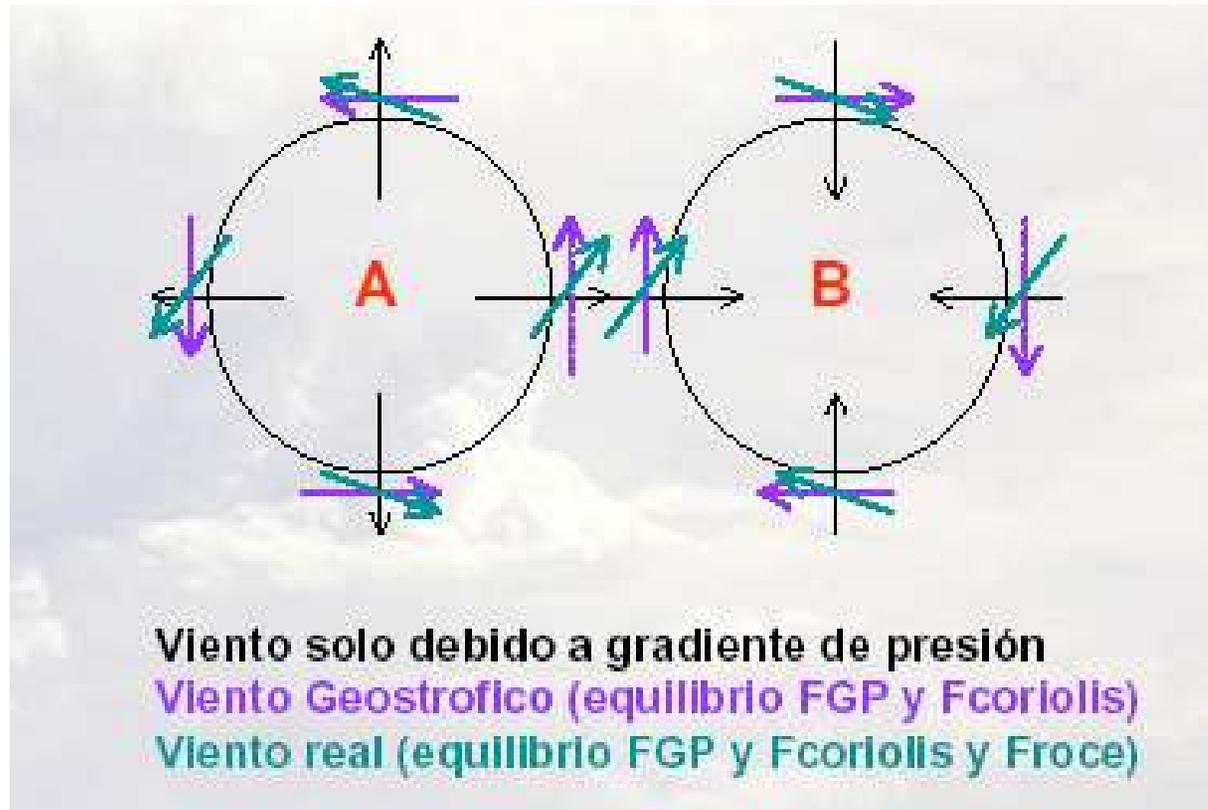
H.S.



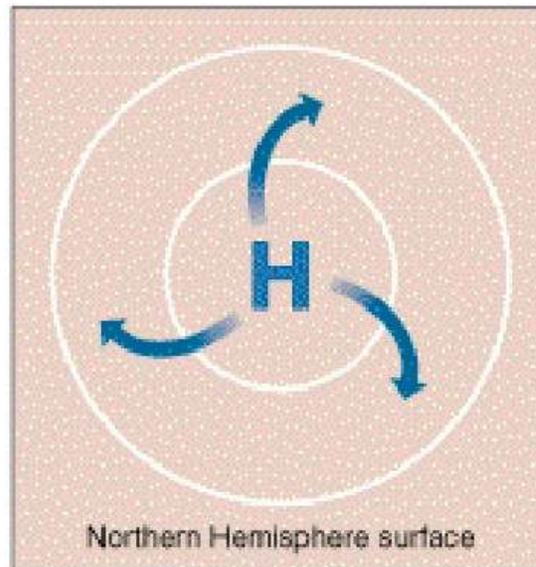
## Cómo es el balance de fuerzas cuando se considera la fuerza de fricción?

- ...el viento cruza las isobaras. Por lo tanto el viento ya no es geostrofico
- ...el viento es menor que si no hubiera fricción
- ...la fuerza de fricción siempre se opone al movimiento
- ...la fuerza de Coriolis sin embargo se mantiene perpendicular hacia la izquierda del movimiento en el H.S. (hacia la derecha en el H.N.)

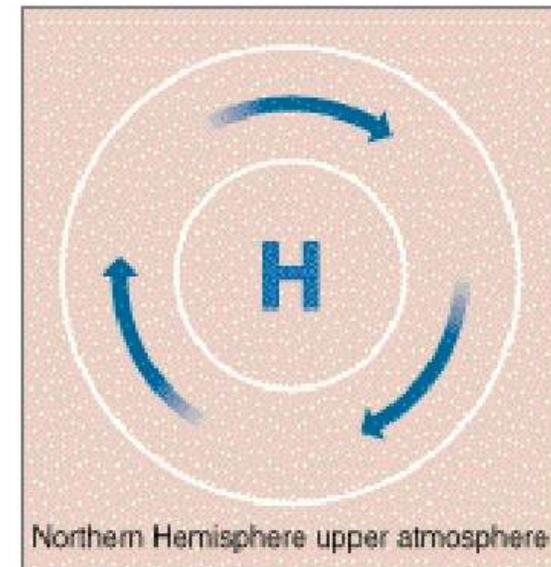
H.S.



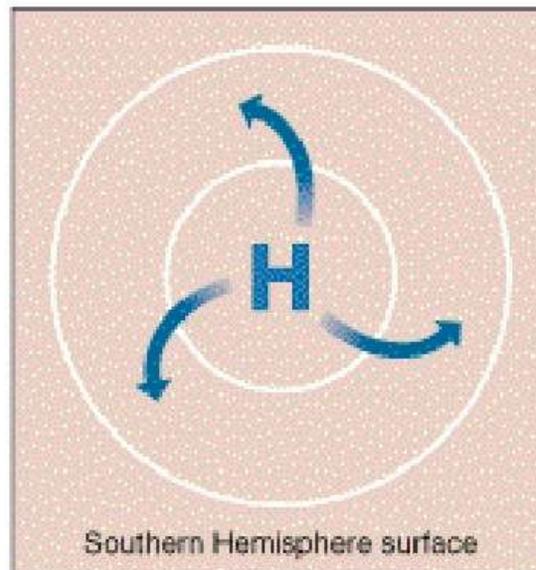
## Anticiclones (H)



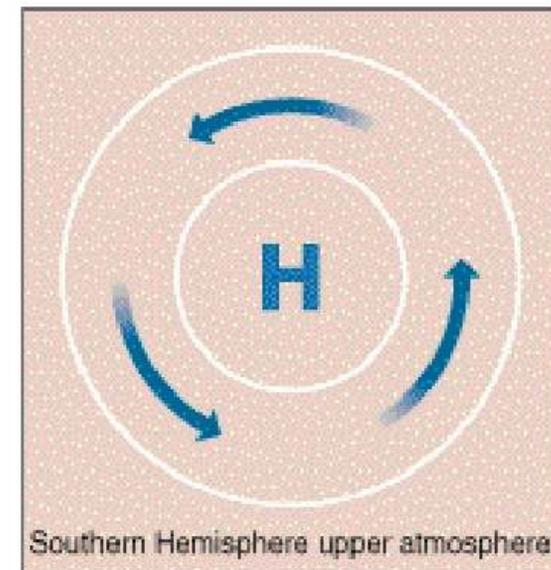
(a)



(b)

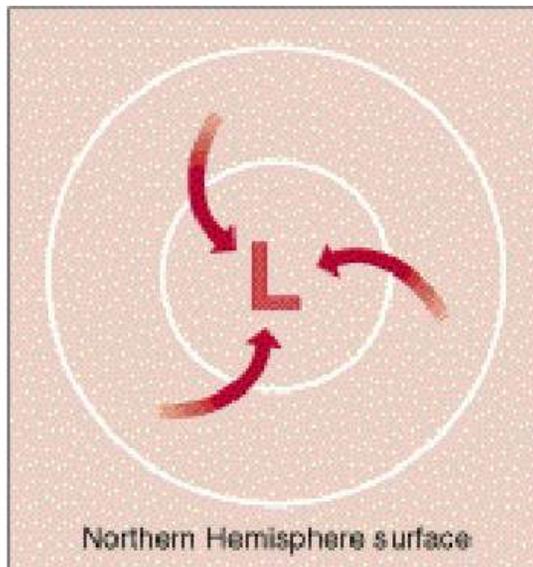


(c)

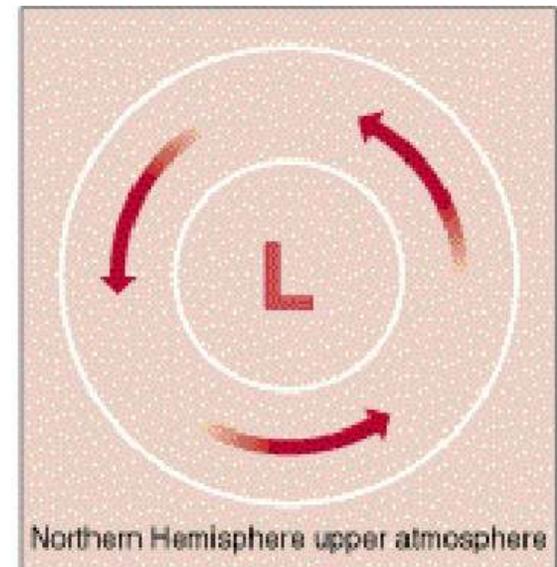


(d)

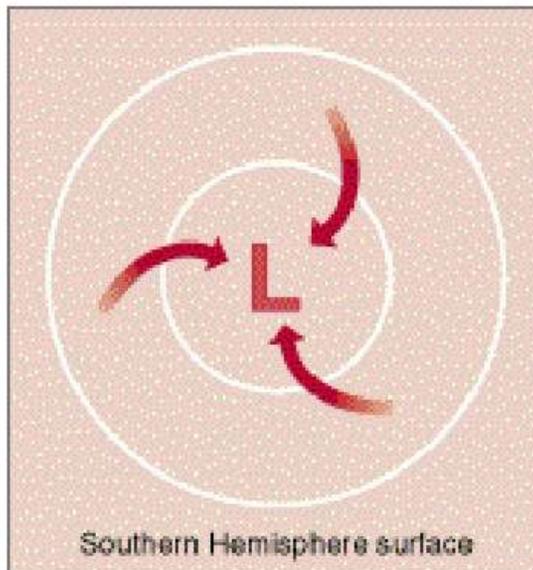
## Ciclones (L)



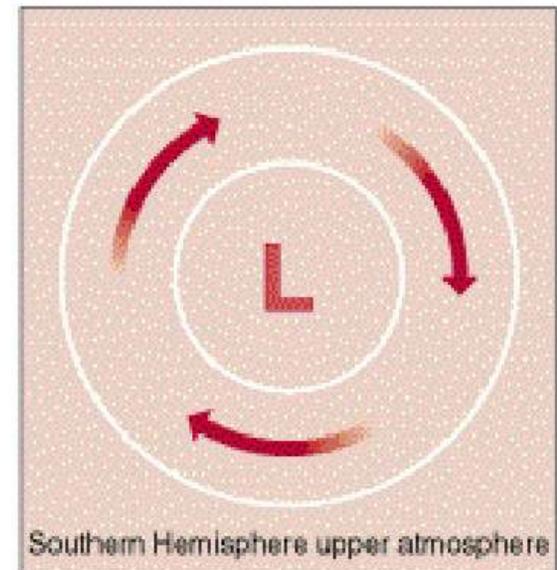
(a)



(b)



(c)



(d)

# Circulación general de la Atmósfera

Se llama **circulación general de la atmósfera** al sistema de vientos en escala planetaria

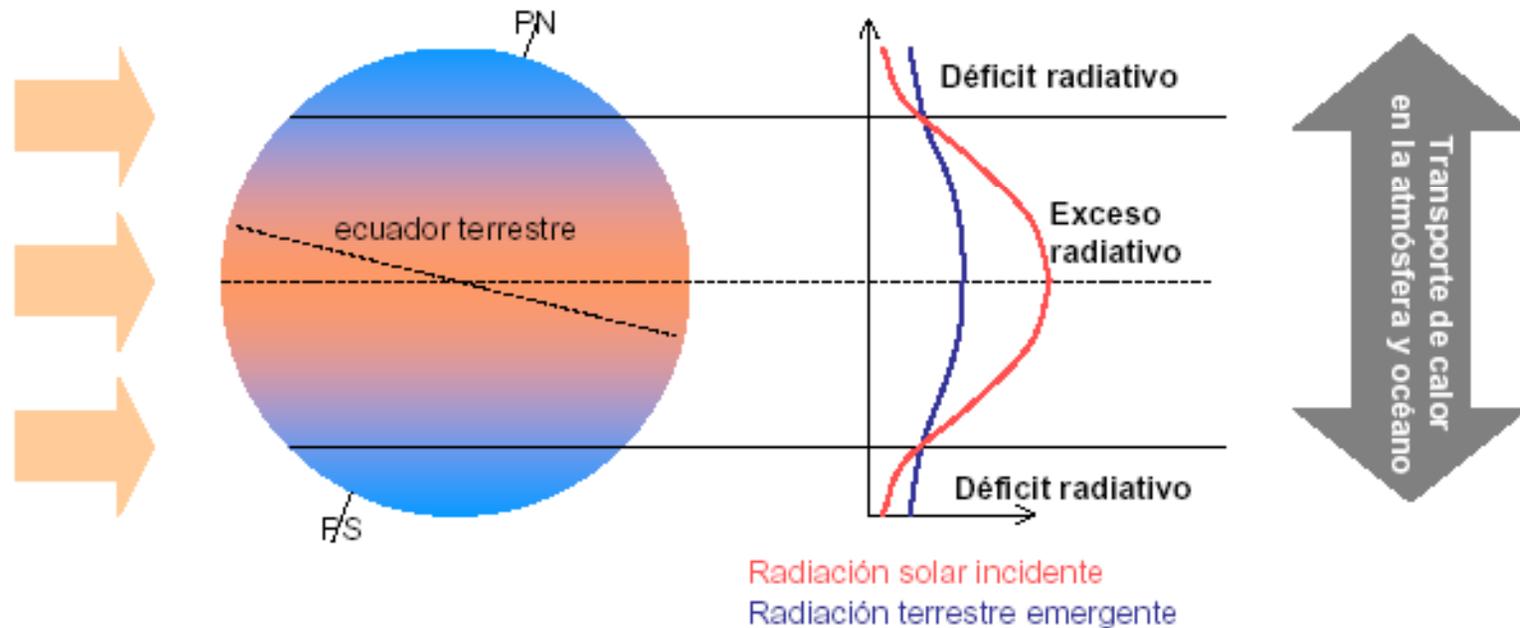
➤ Factores principales que explican la circulación general:

- Balance de energía global
- Rotación terrestre

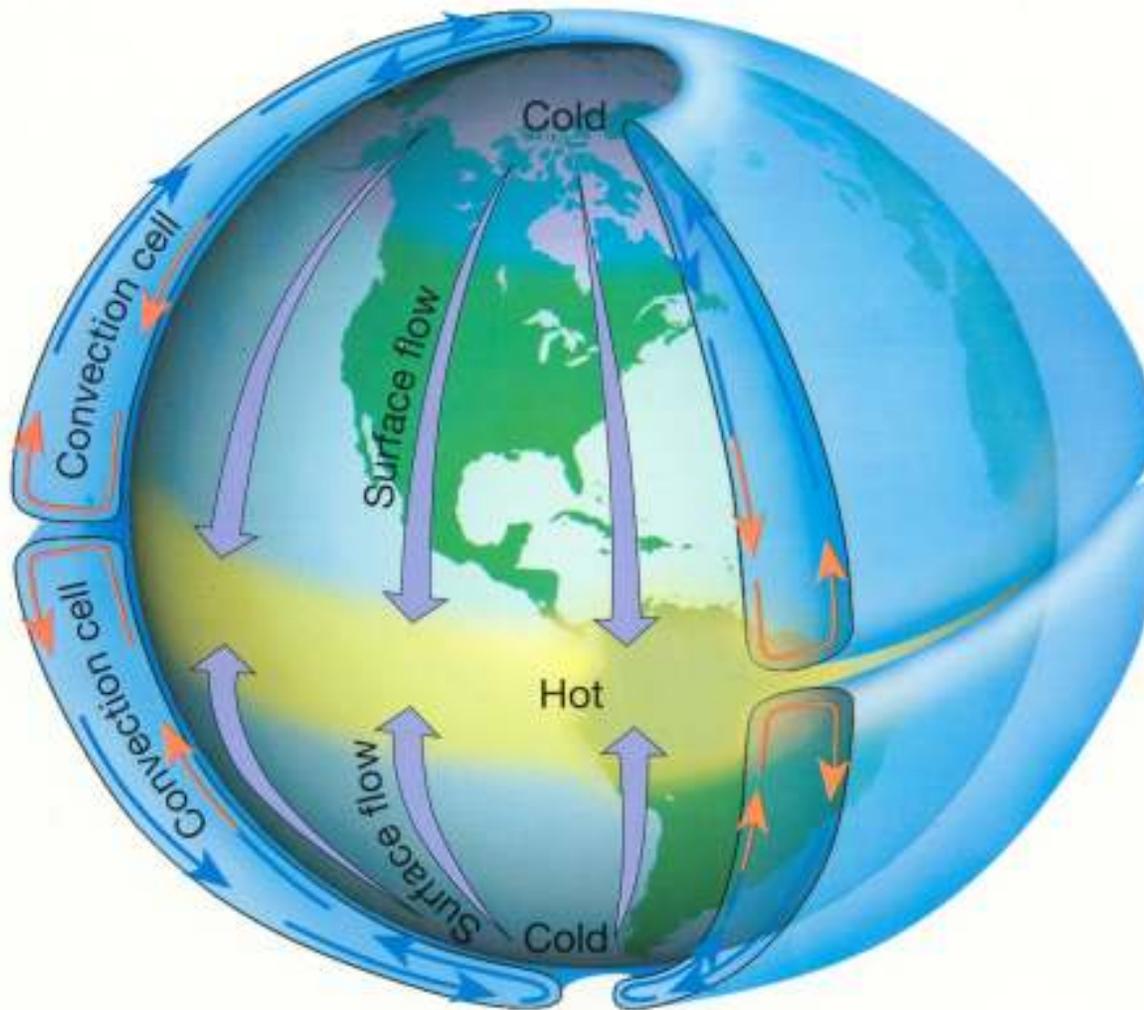
➤ Otros Factores:

- Distribución continental
- Orografía, condiciones de la superficie
- Etc.

La circulación **de la atmósfera y los océanos** distribuye el exceso de energía que reciben las zonas tropicales hacia latitudes altas, manteniendo así el equilibrio térmico del planeta.



# Celda de Hadley

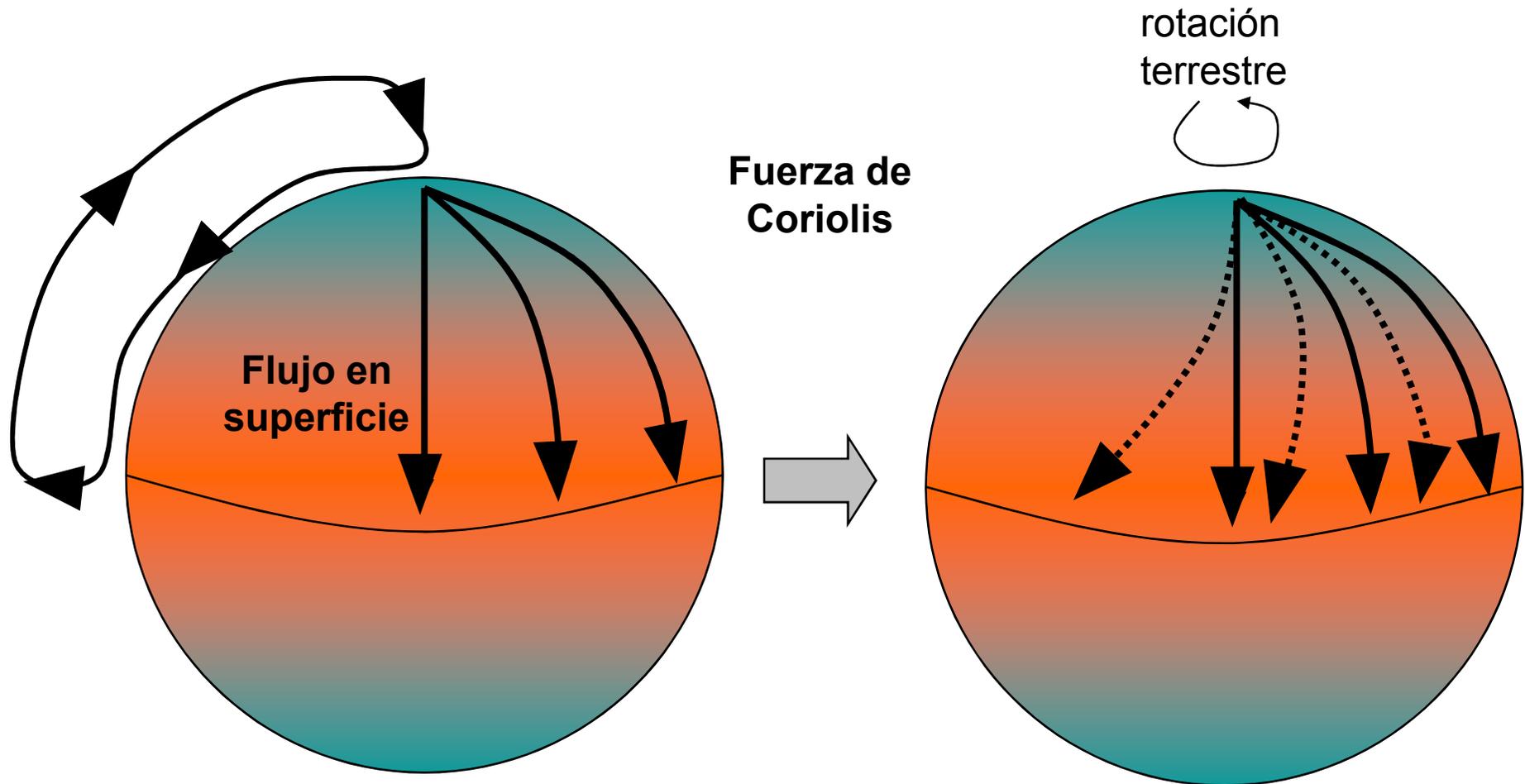


## Modelo teórico unicelular:

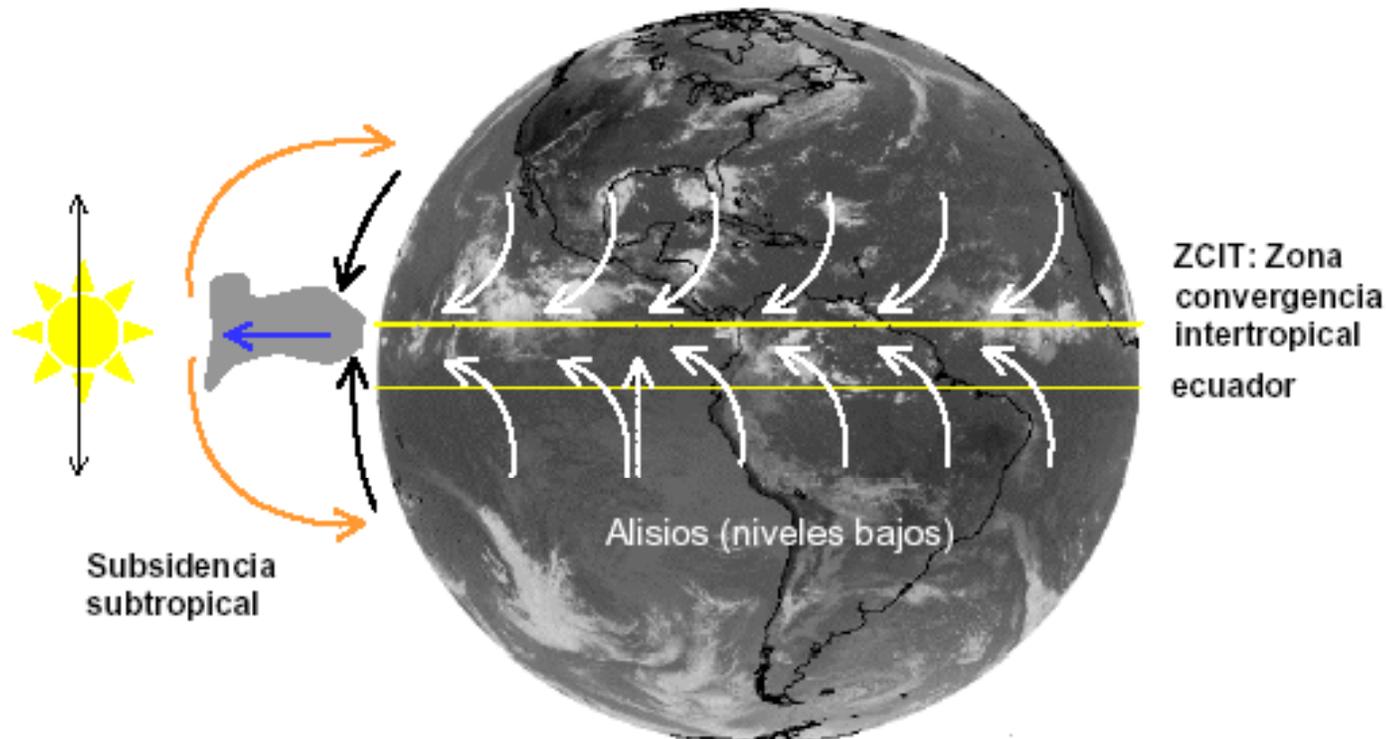
La superficie terrestre está cubierta uniformemente por agua ( $\Rightarrow$  se desprecia el calentamiento diferencial entre el suelo y el agua)

La Tierra no rota

# Pero la Tierra rota...



Las observaciones muestran una celda de circulación directa (celda de Hadley) restringida a  $\pm 30^\circ$  latitud.

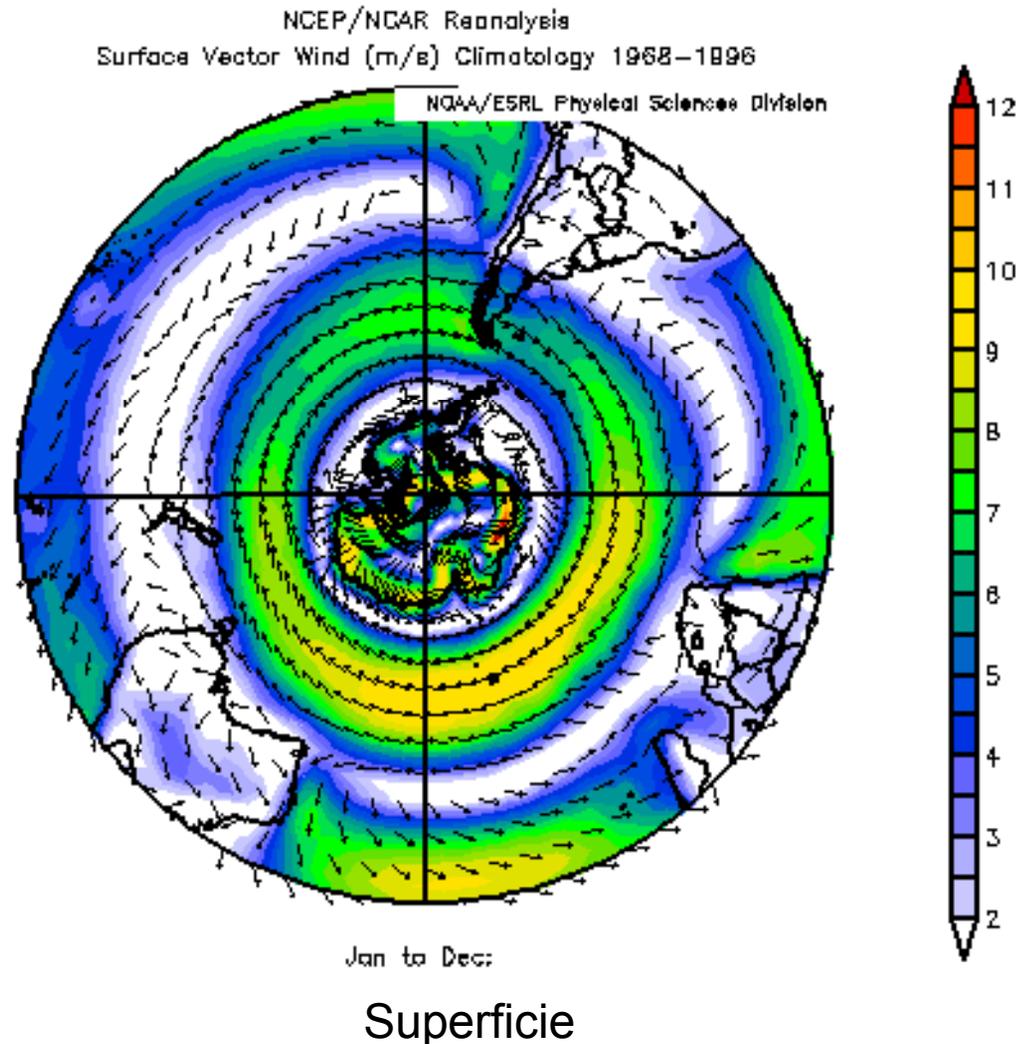


**Si la Celda de Hadley solo transporta calor entre el Ecuador y los subtrópicos,**

**¿Cómo se transporta el calor desde los subtrópicos hasta las regiones polares?**

# La circulación general y el efecto de la rotación

## Vectores Viento medios anuales y su intensidad (colores)



# Distribución global de presión y viento en superficie

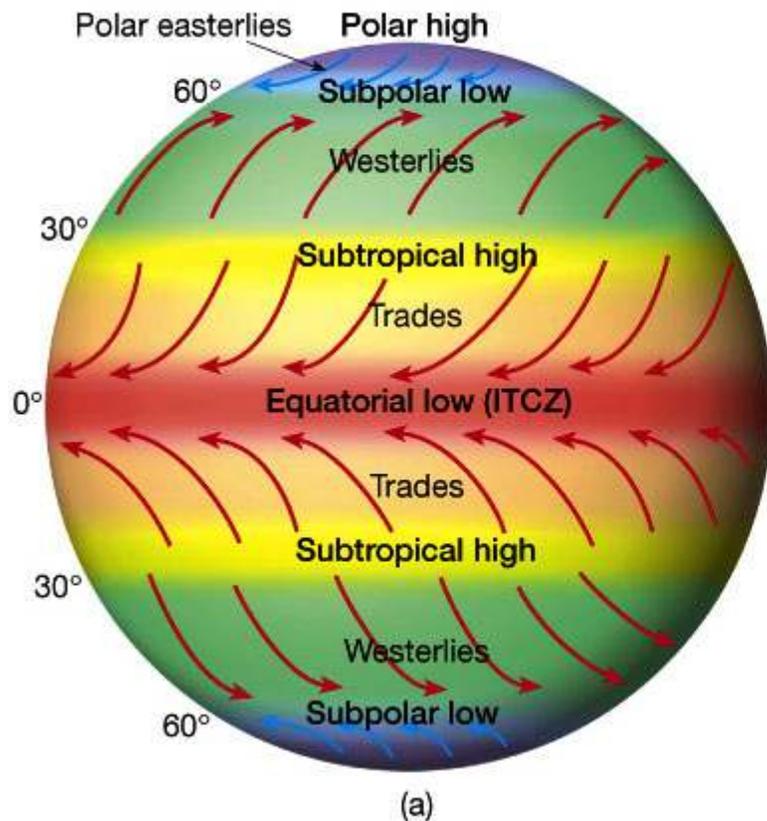
Los vientos en superficie están relacionados con la distribución de presión.

En el modelo ideal de una Tierra en rotación, pero sin considerar la distribución de océanos ni continentes, se obtiene una primera aproximación de los campos globales de presión y de viento en superficie.

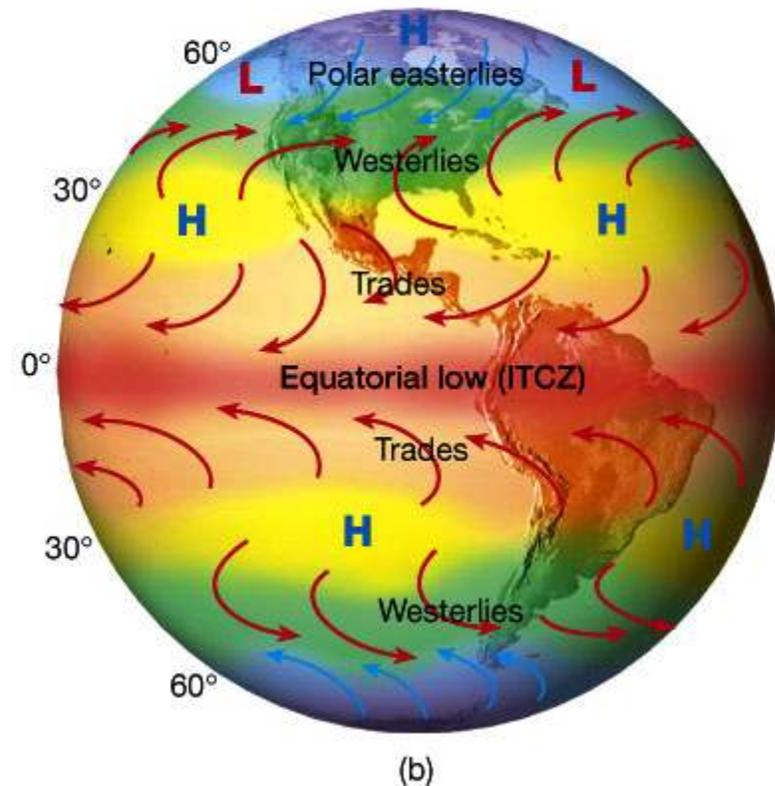
En esas condiciones se distinguen cuatro franjas latitudinales de altas y bajas presiones en cada hemisferio.

# Distribución global de presión y viento en superficie

Los vientos en superficie están relacionados con la distribución de presión.

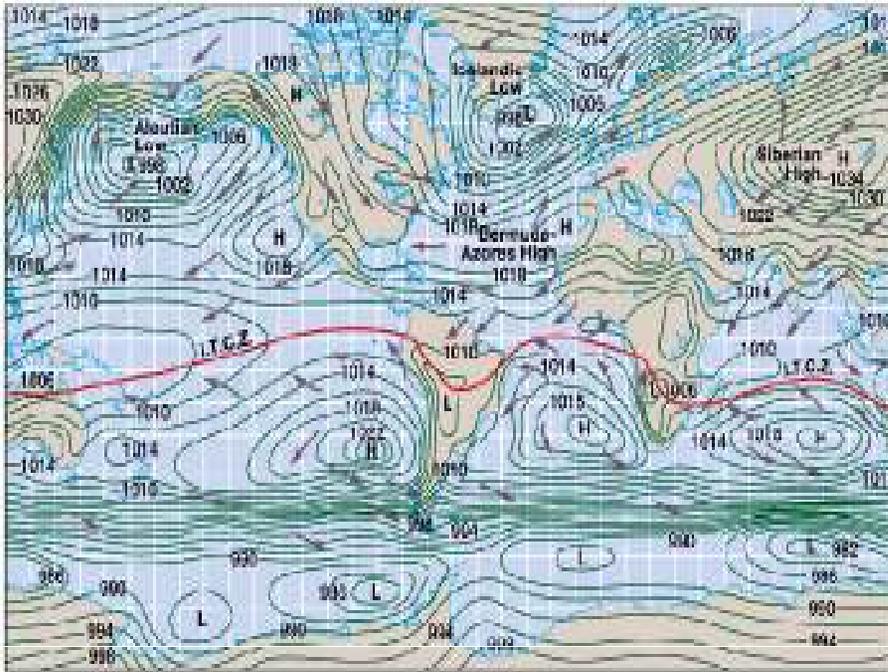


Distribución idealizada de presión y viento en superficie

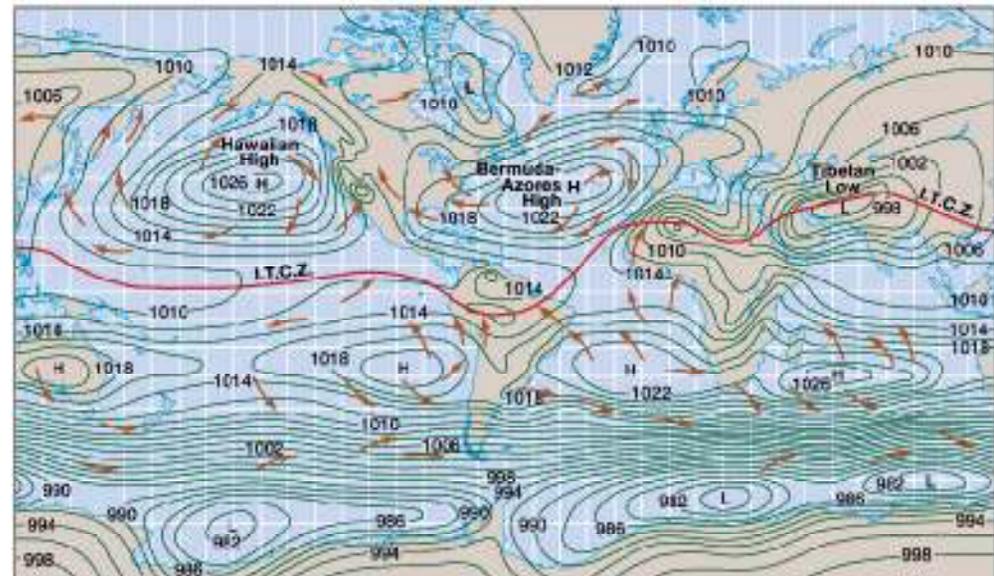


Modificación de la distribución zonal por la presencia de los continentes

## Distribución global de presión y viento en superficie: **ENERO**

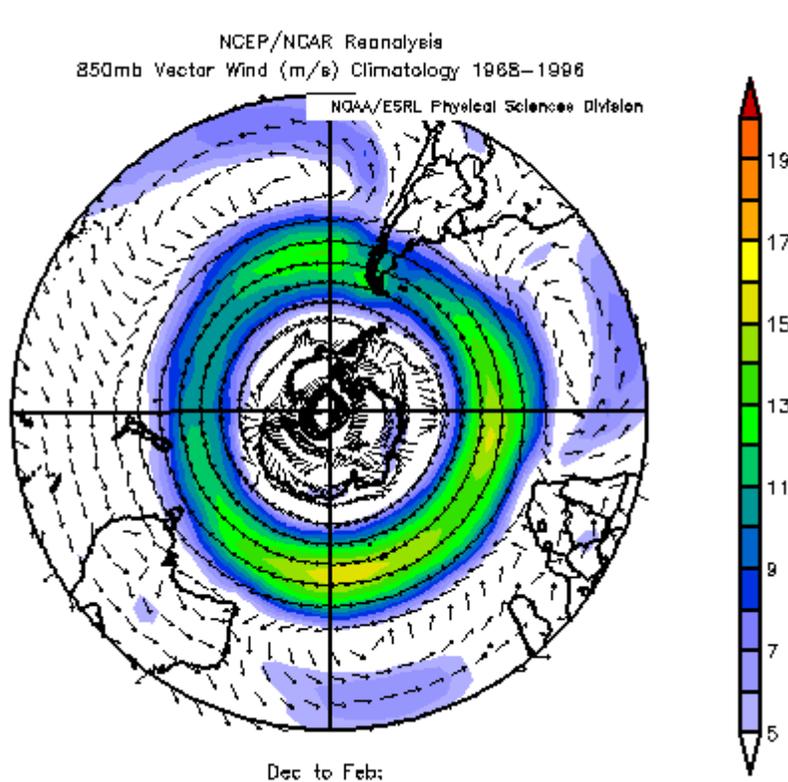


## Distribución global de presión y viento en superficie: **JULIO**

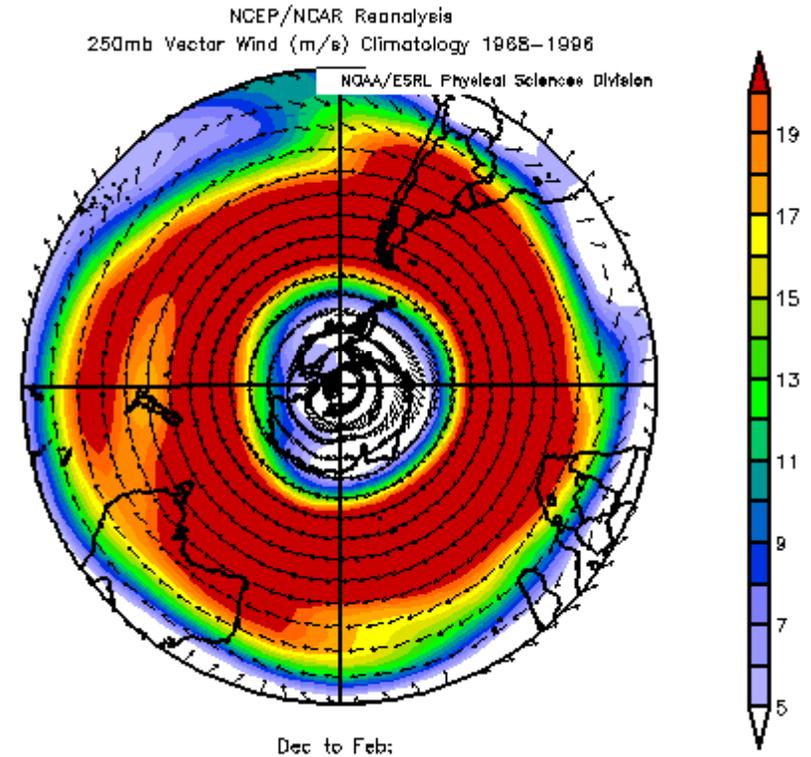


En los niveles altos de la atmósfera **el flujo es del oeste y aumentando su intensidad con la altura**

Niveles bajos (850 hPa)



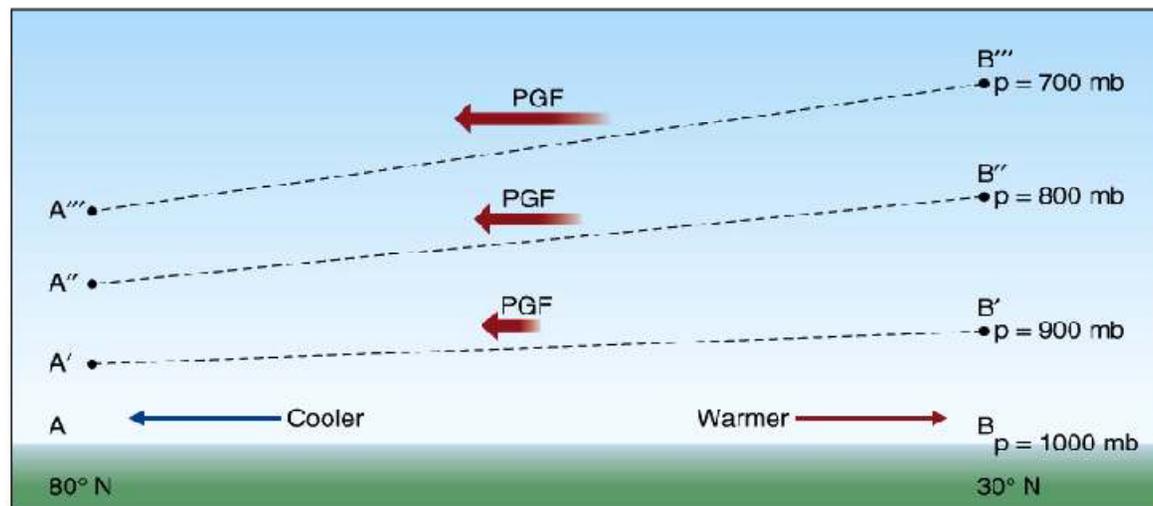
Niveles altos (250 hPa)



**Vectores Viento medios anuales y su intensidad (colores) en Verano (DJF) del HS**

## La troposfera superior: vientos del oeste

- **Aspectos importantes:**
  - La presión disminuye mas rápidamente en el aire frío
  - La temperatura en la baja troposfera disminuye hacia los polos
- **Se crean gradientes de presión en altura**



PGF: Fuerza de presión

# Corrientes en chorro

El gradiente de presión ecuador-polo aumenta con la altura por lo que la intensidad de los vientos del oeste aumenta.

Inmersas en los oestes se producen angostas franjas de vientos muy intensos, que serpentean por miles de kilómetros de largo como ríos de aire, por esta analogía se les llama **corrientes en chorro o jets**.

## Características

Altura: 7.5 a 12 km

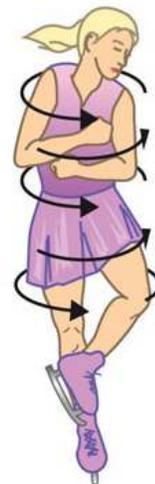
Ancho: 100 y 500 km

Espesor vertical: 1 a 2 km

Velocidad del viento: 80-200 km/h

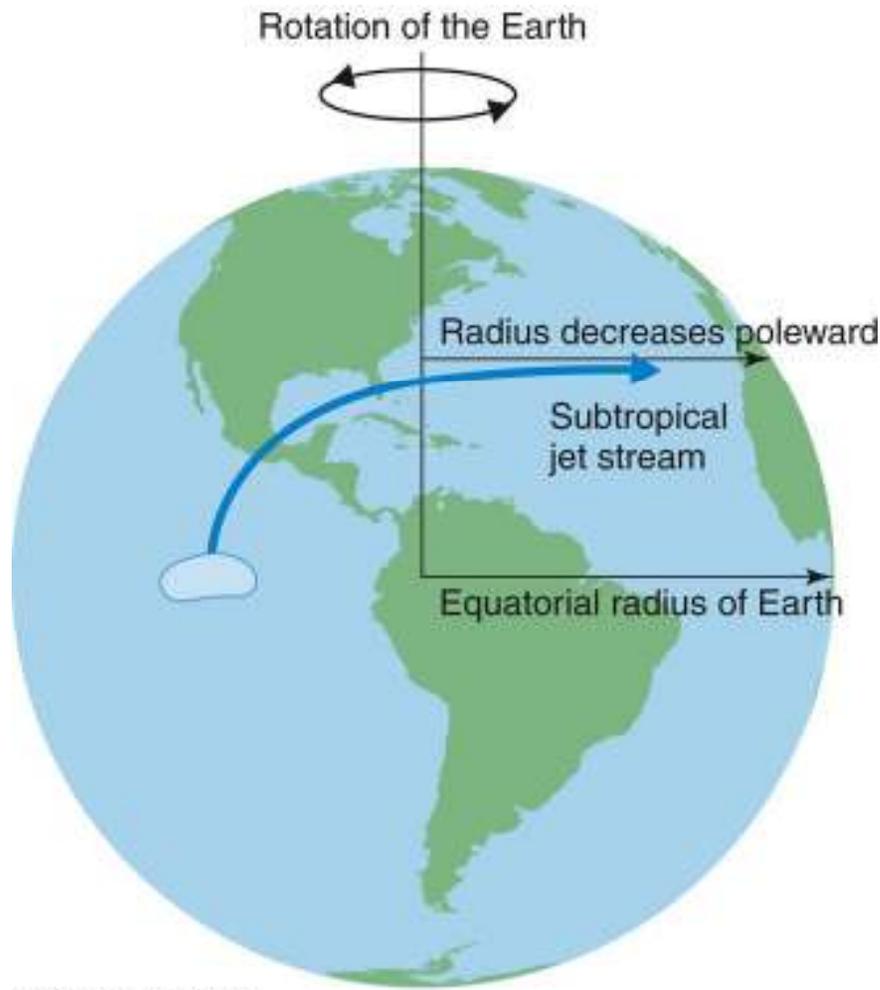
# Conservación del momento angular

Momento angular = masa x velocidad de rotación x distancia al eje de rotación



Cuando la patinadora junta sus brazos aumenta la velocidad de rotación

Una parcela de aire que se desplaza hacia el N reduce su distancia con respecto al eje de rotación.



A medida que la parcela se desplaza desde el Ecuador hacia  $30^\circ$ , aumenta su velocidad para conservar el momento angular.

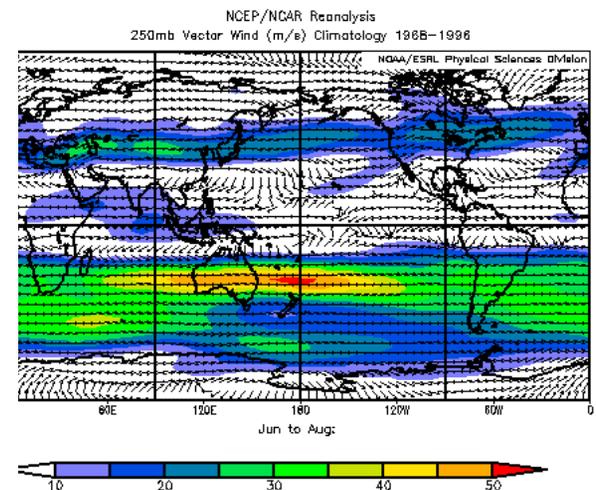
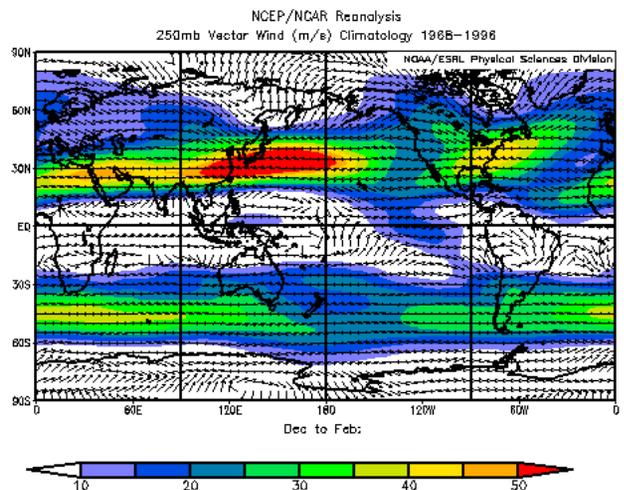
Al mismo tiempo la fuerza de Coriolis actúa para producir vientos del oeste intensos: el jet subtropical.

• En latitudes subtropicales la corriente en chorro subtropical, semipermanente, se produce sólo en invierno, en torno a 25° de latitud y alrededor de 12 km de altura.

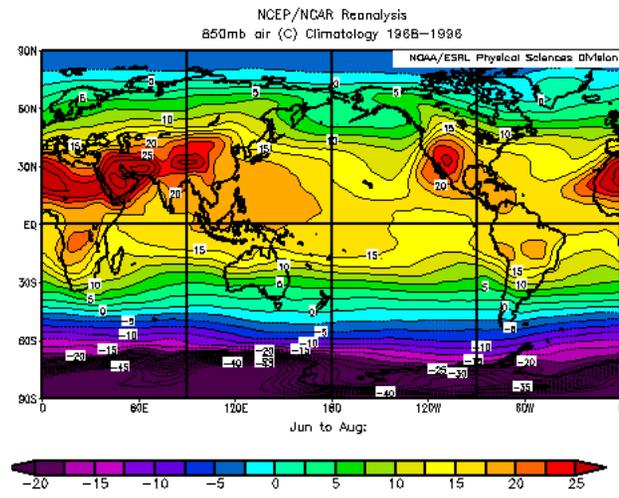
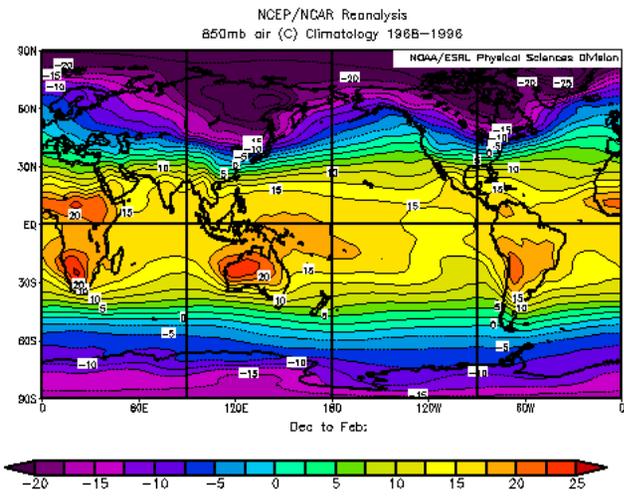
• Las corrientes en chorro se ven favorecidas cuando existen grandes contrastes de temperatura en superficie que originan mayores gradientes de presión en niveles superiores, y por lo tanto aumentan la velocidad del viento.

• Como los mayores contrastes de temperatura se producen en latitudes medias se produce la corriente en chorro subpolar. En el HS está presente todo el año.

### VIENTO MEDIO EN ALTURA (250 hPa)



### TEMPERATURA MEDIA EN NIVELES BAJOS (850 hPa)



Verano (DJF) HS

Invierno (JJA) HS

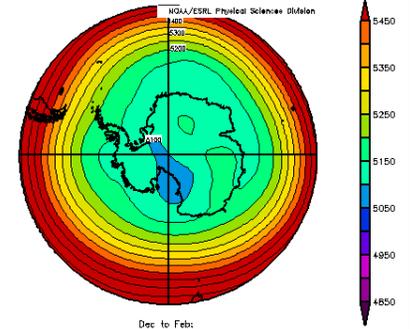
# Los oestes y el transporte de calor

- La función principal de la dinámica de la atmósfera es transportar calor desde el Ecuador hacia los polos
- Cómo se realiza este transporte en las latitudes medias si los vientos predominantes son zonales (oeste a este o este a oeste)?

# Ondas de Rossby

Los oestes de altura tiene un movimiento ondulatorio cuando se los observa día a día , circundando el planeta formando meandros: alrededor del globo denominadas **ondas de Rossby**.

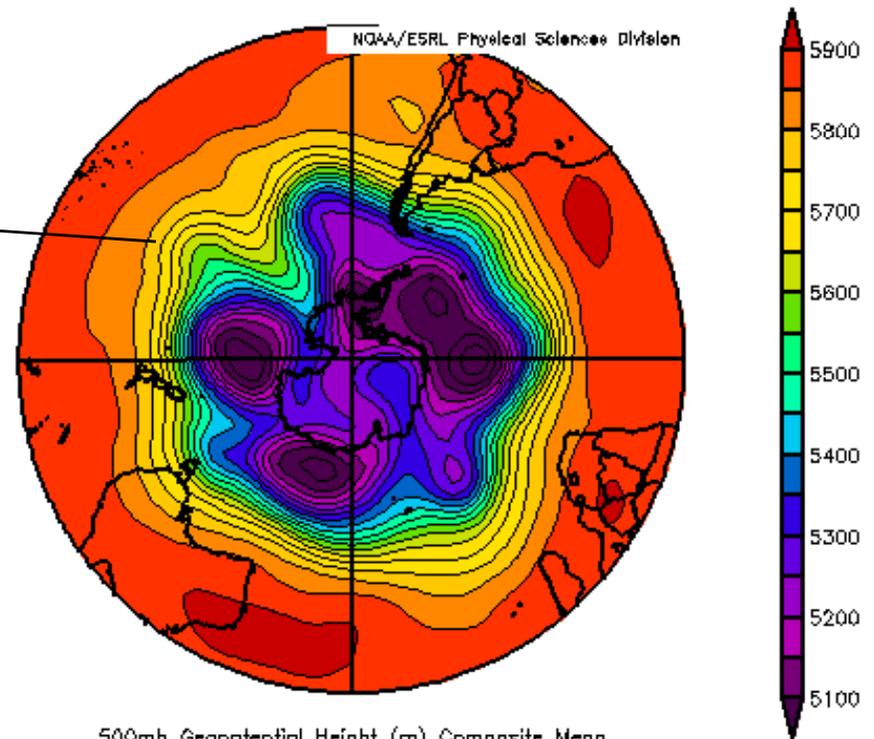
Alturas geopotenciales medias del verano en 500 hPa



meandros



Mapa de alturas geopotenciales en 500 hPa del 2 de Enero de 2010



500mb Geopotential Height (m) Composite Mean 1/2/10

NCEP/NCAR Reanalysis

# Ondas de Rossby

- Las corrientes en chorro son inestables: las perturbaciones tienden a amplificarse formando cuñas y vaguadas de gran amplitud, favoreciendo la formación de ciclones y frentes.
- Las ondas (con componente meridional, norte a sur o sur a norte) inmersas en las corrientes en chorro mezclan en forma continua el aire cálido con el frío transportando de esta forma calor.

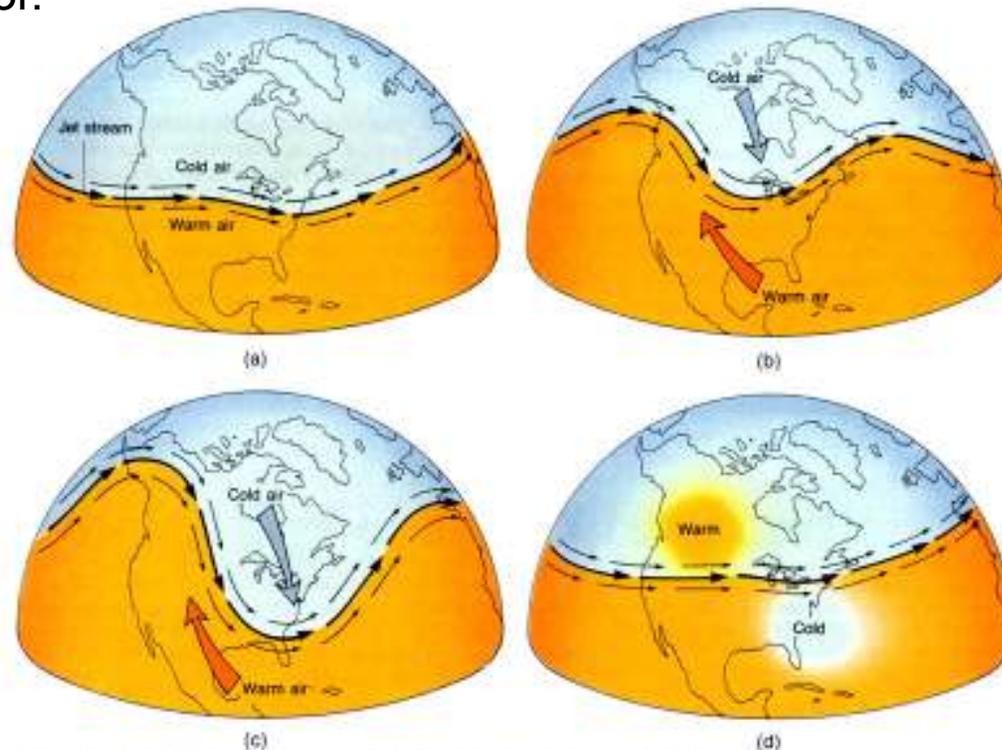


Figure 9-9 Cyclic changes that occur in the upper-level airflow of the westerlies. The flow, which has the jet stream as its axis, starts out nearly straight and then develops meanders that are eventually cut off. (env J. Niman, NOAA)

**En resumen,**

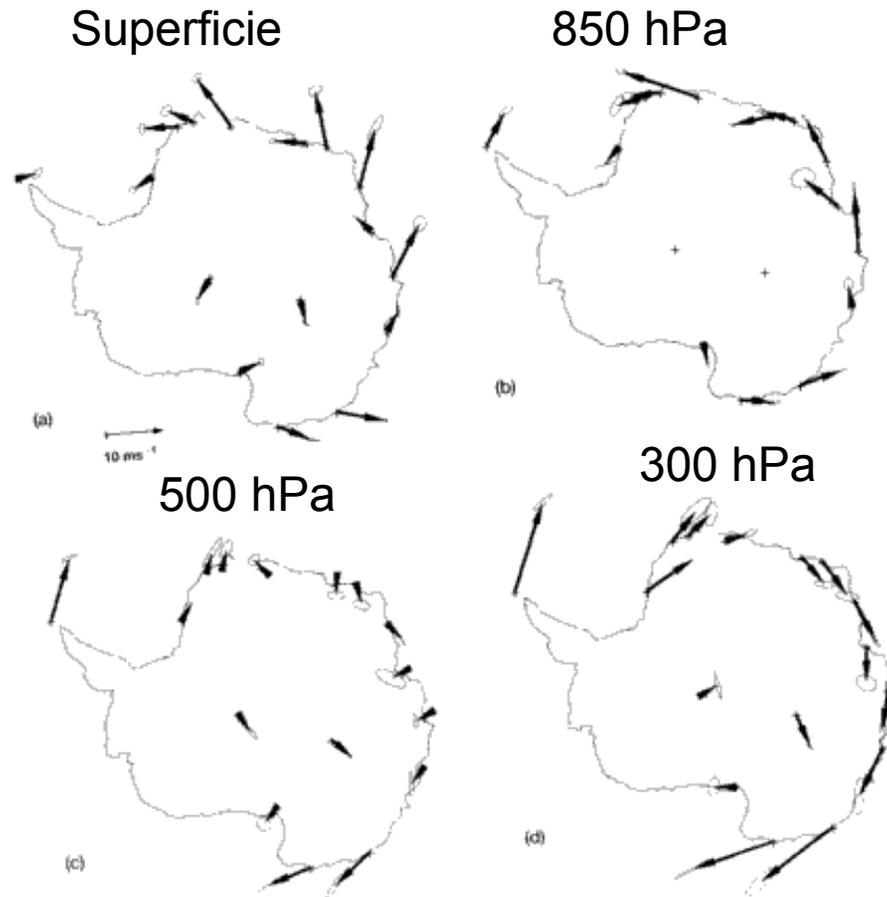
**La atmósfera realiza transporte de calor Ecuador-polo por medio de:**

- **la Celda de Hadley (latitudes tropicales y subtropicales) y**
- **las ondas de Rossby (latitudes medias y polares)**

# Circulación media de gran escala de la atmósfera antártica

- Mecanismos básicos que explican la circulación observada:
  - Balance de Calor
  - Balance de Vorticidad
  - Balance de cantidad de movimiento

# Distribución vertical de vientos en la Antártida

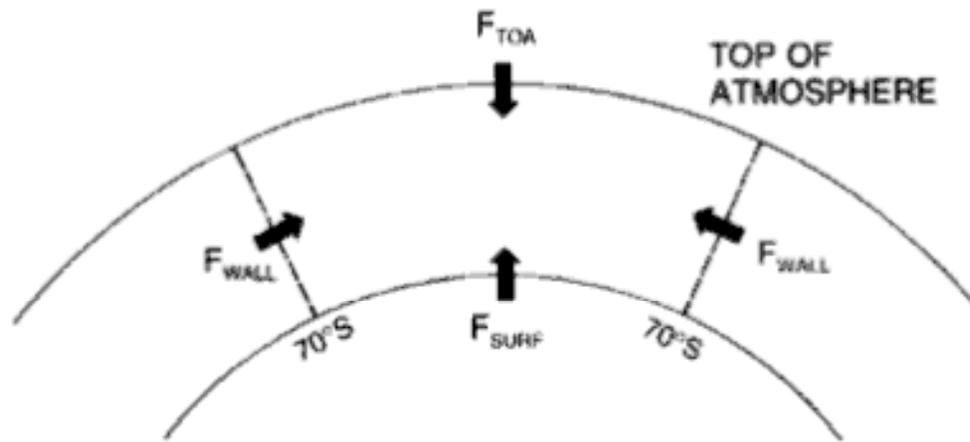


**Vientos medios anuales  
obtenidos de observaciones  
de radiosondeos (Connolley  
and King 1993)**

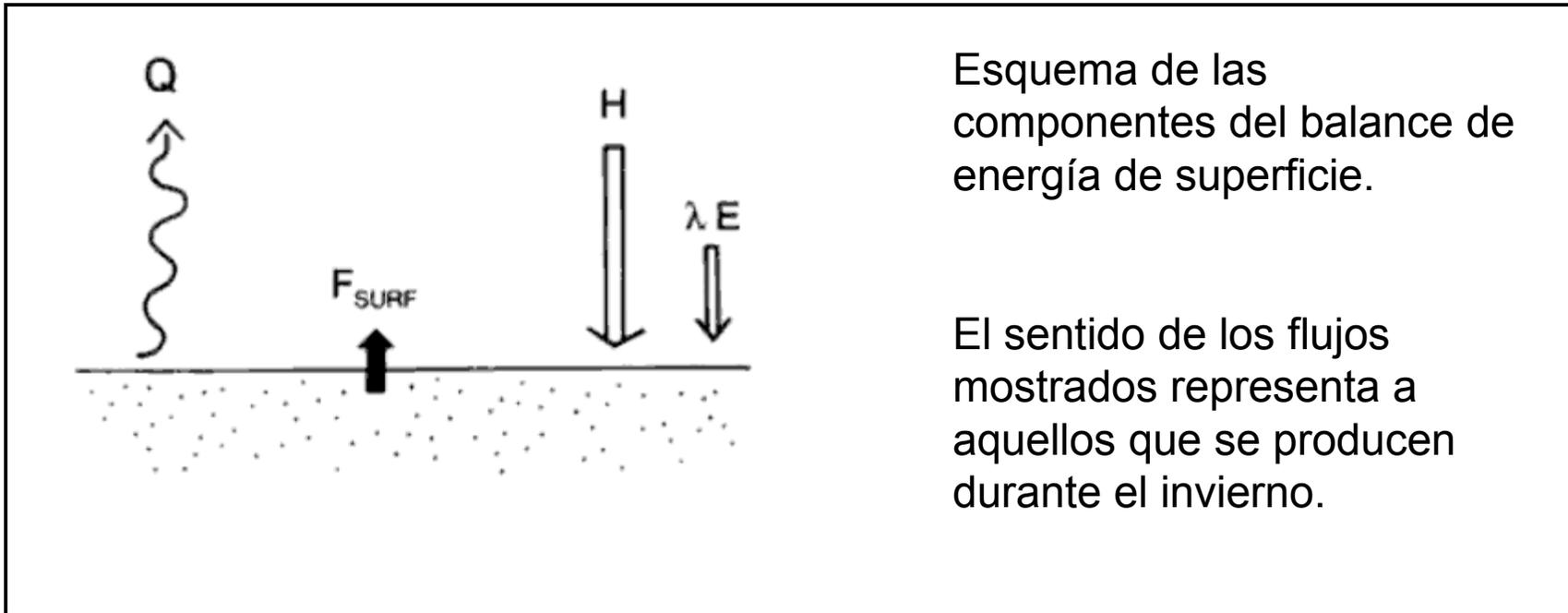
Las escasas observaciones  
de radiosondeos existentes  
en la Antártida confirman la  
existencia de:

- vientos medios del Este y disfluentes cerca de superficie
- vientos medios del oeste en la altura

# Balance de Calor de la Atmósfera Antártica



$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = F_{TOA} + F_{SURF} + F_{WALL}$$



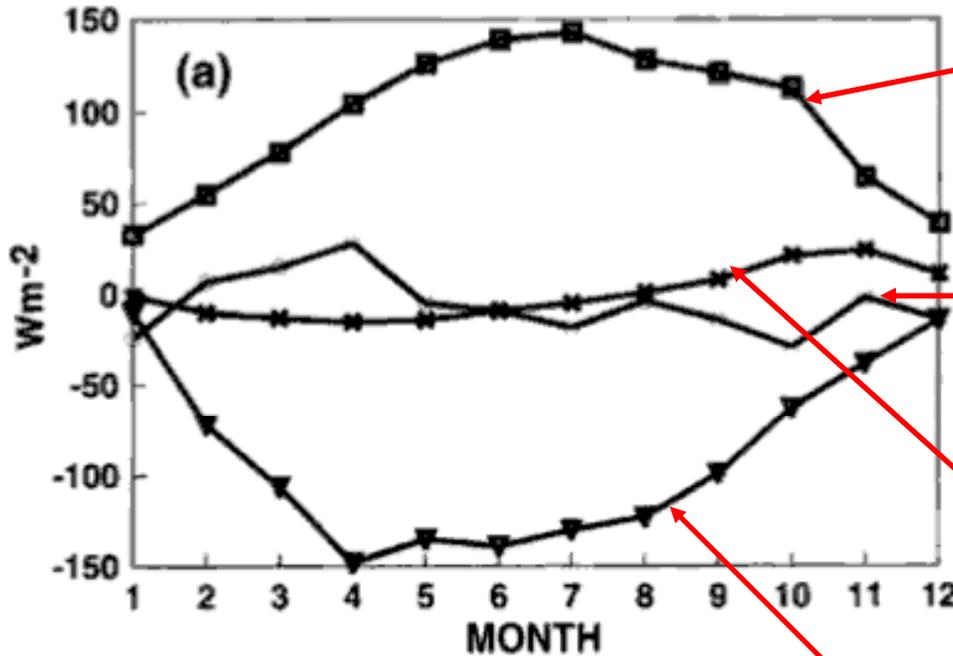
$$F_{SURF} + Q + H + \lambda E = 0$$

$Q$ : Flujo radiativo neto

$H$  : Flujo atmosférico de calor sensible

$\lambda E$  : Flujo atmosférico de calor latente

# Ciclo anual del balance de calor

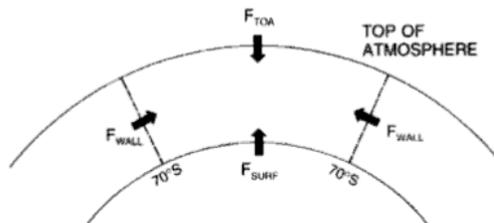


$F_{WALL}$  : Flujo a través de la "pared" en 70°S (por ondas de Rossby)

$F_{SURF}$ : Flujo desde la superficie

$\Pi$  : Contenido de energía térmica total

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} = F_{TOA} + F_{SURF} + F_{WALL}$$



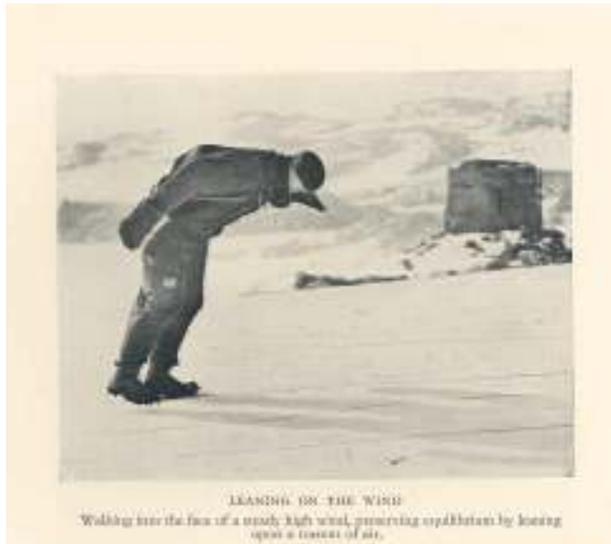
$F_{TOA}$ : Flujo en el tope de la atmósfera

# La circulación atmosférica de gran escala y la Antártida

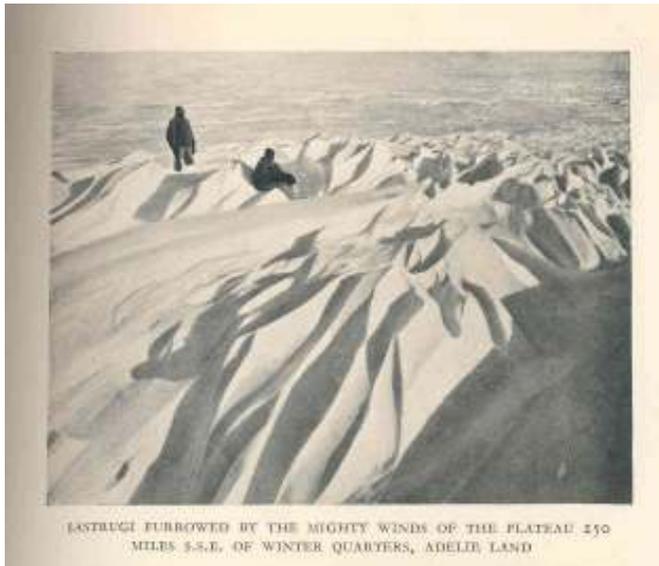
- El balance de energía condiciona fuertemente la circulación de gran escala.
- La estructura térmica de la Antártida y la circulación de gran escala se encuentran acopladas por la existencia de la fuerte inversión térmica sobre el interior del continente.
- Este patrón acopla la circulación a la topografía subyacente: Vientos catabáticos.

# Vientos Catabáticos

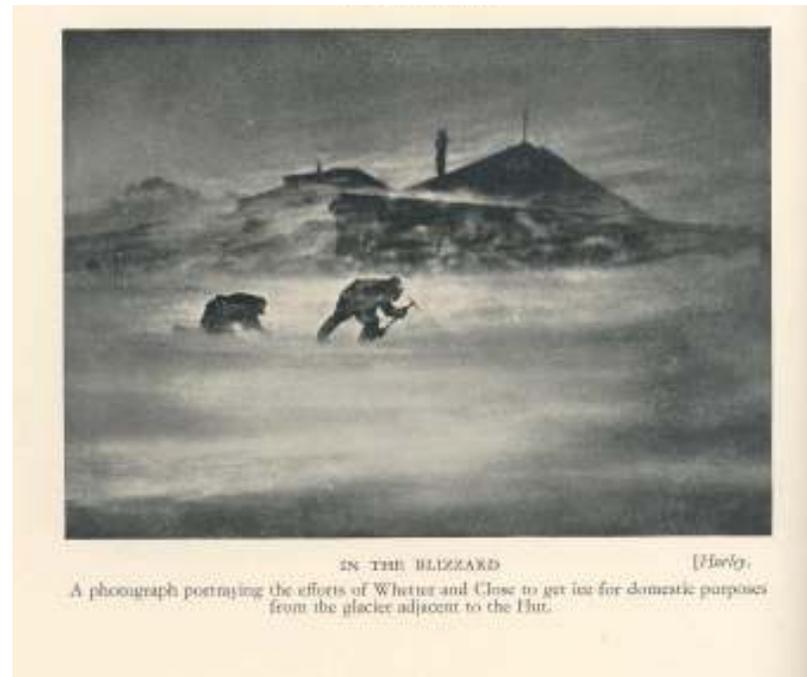
- Características de los vientos catabáticos antárticos
- Generación de los vientos catabáticos
- Impacto de los vientos catabáticos en el clima de la Antártida



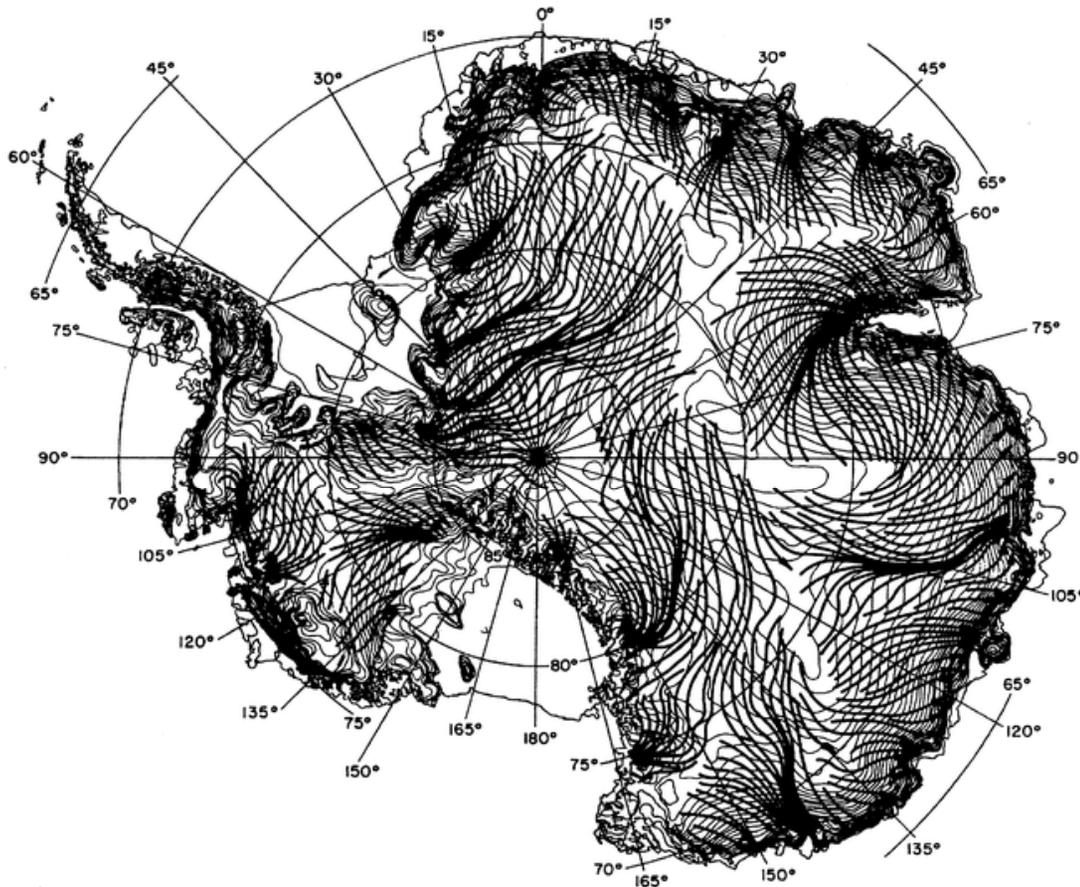
LEANING ON THE WIND  
Walking into the face of a steady high wind, preserving equilibrium by leaning upon a trunk of ice.



LASTRUGI FURROWED BY THE MIGHTY WINDS OF THE PLATEAU 250  
MILES S-S.E. OF WINTER QUARTERS, ADELIE LAND



IN THE BLIZZARD [Harty,  
A photograph portraying the efforts of Whetter and Close to get tea for domestic purposes  
from the glacier adjacent to the Hut.

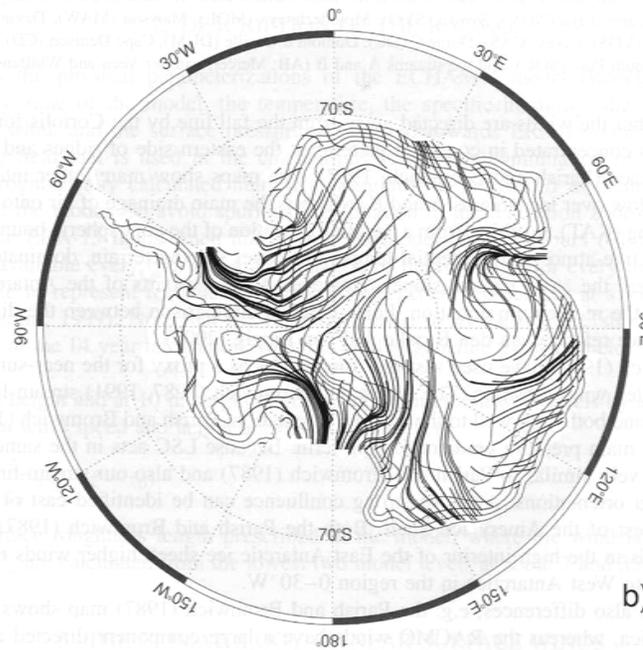


- ***“A downslope flow driven by cooling at the slope surface during periods of light larger-scale winds”***
- ***AMS Glossary***

Promedio temporal de las líneas de corriente del invierno (Líneas gruesas) y contornos de elevación (líneas finas). (Parrish y Bromwich, 1987)

# Características de los vientos catabáticos

- Persistencia
- Constancia direccional
- Sequedad



- Intensidad

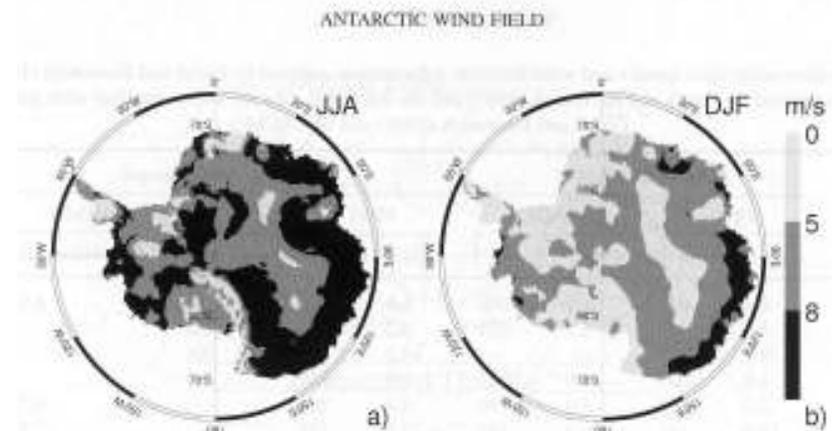


Figure 3. Mean winter (a) and summer (b) 7 m wind speed for 1980–93.

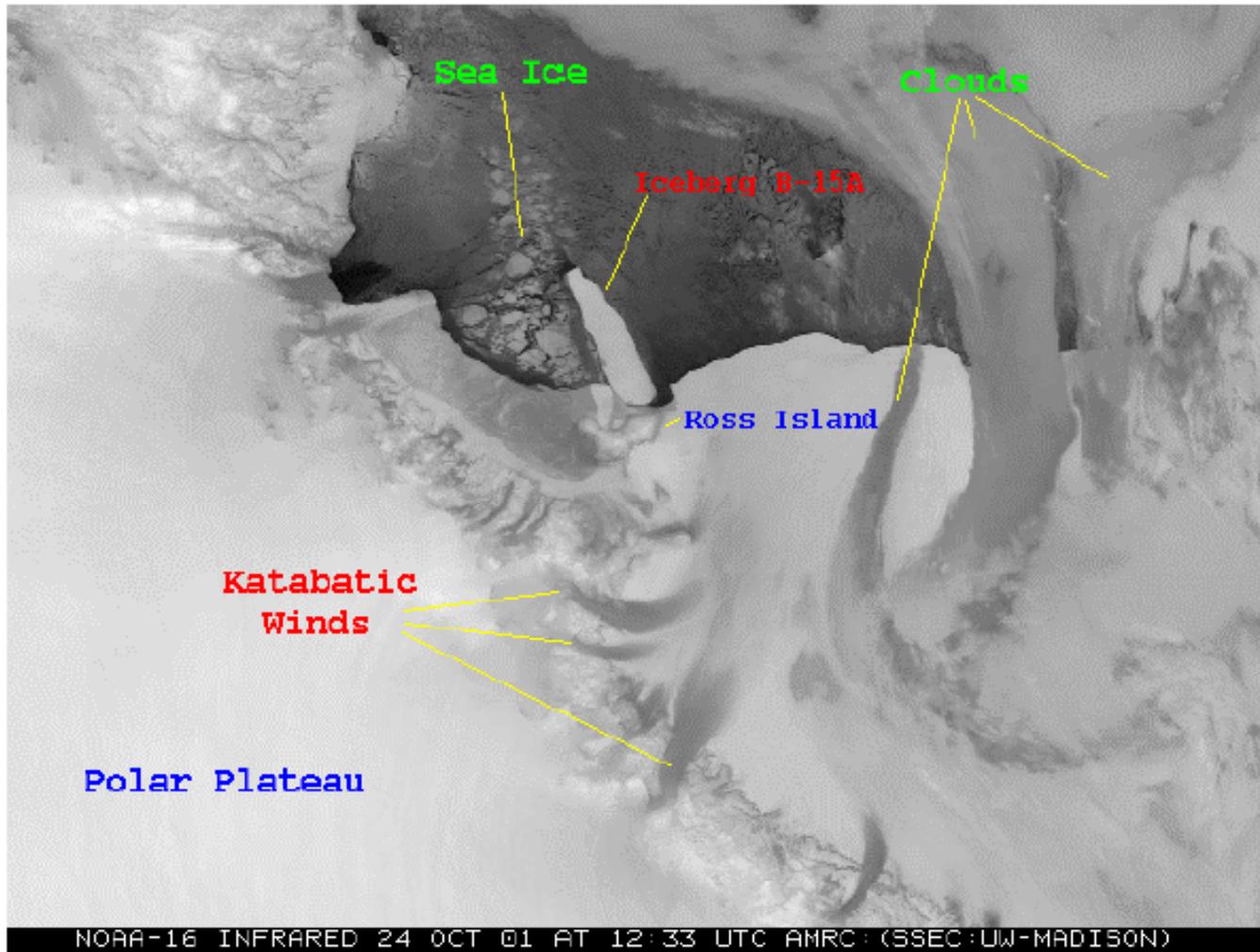
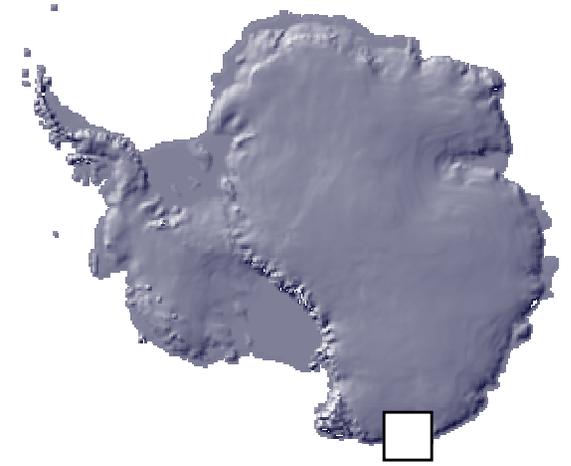
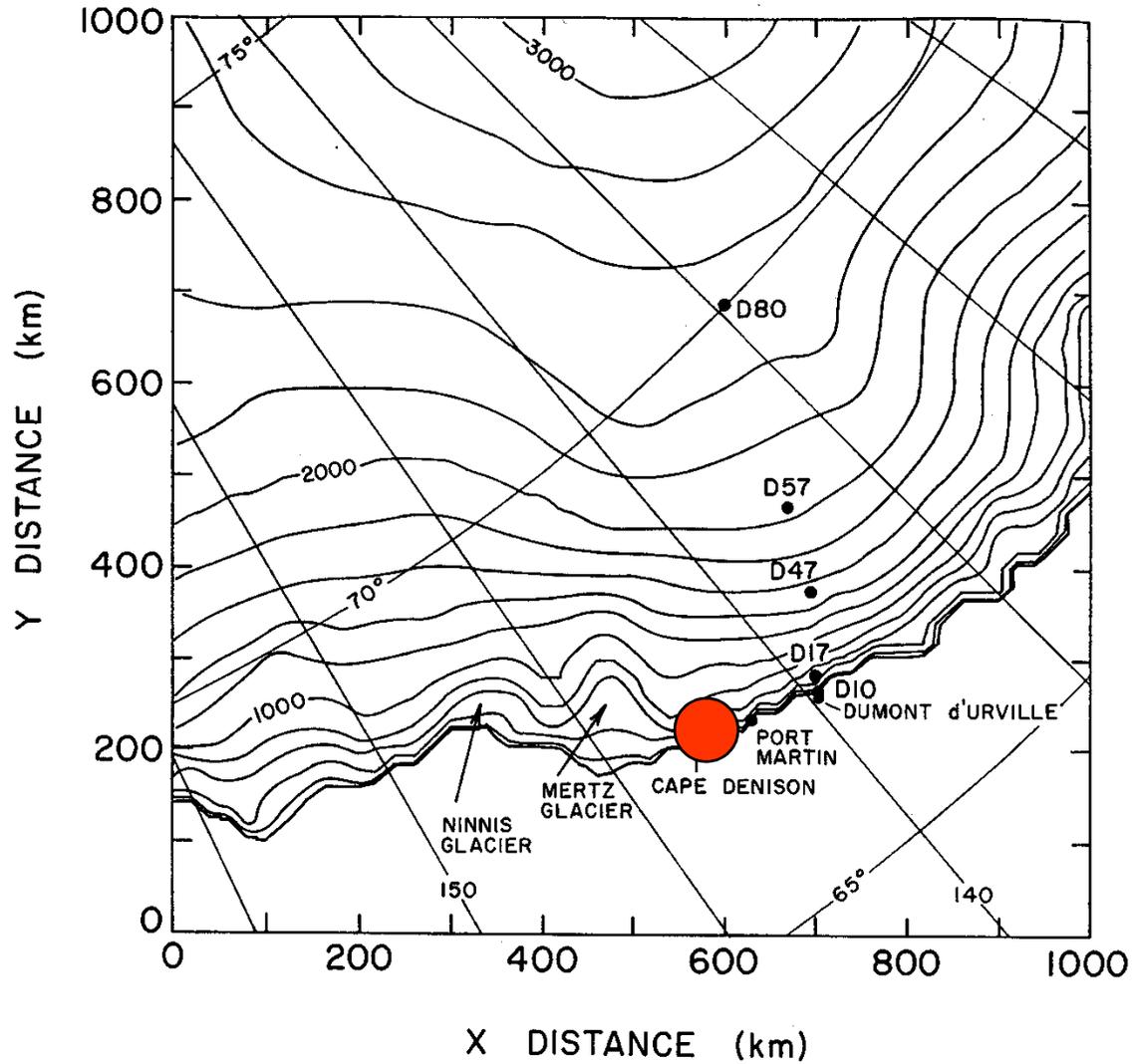
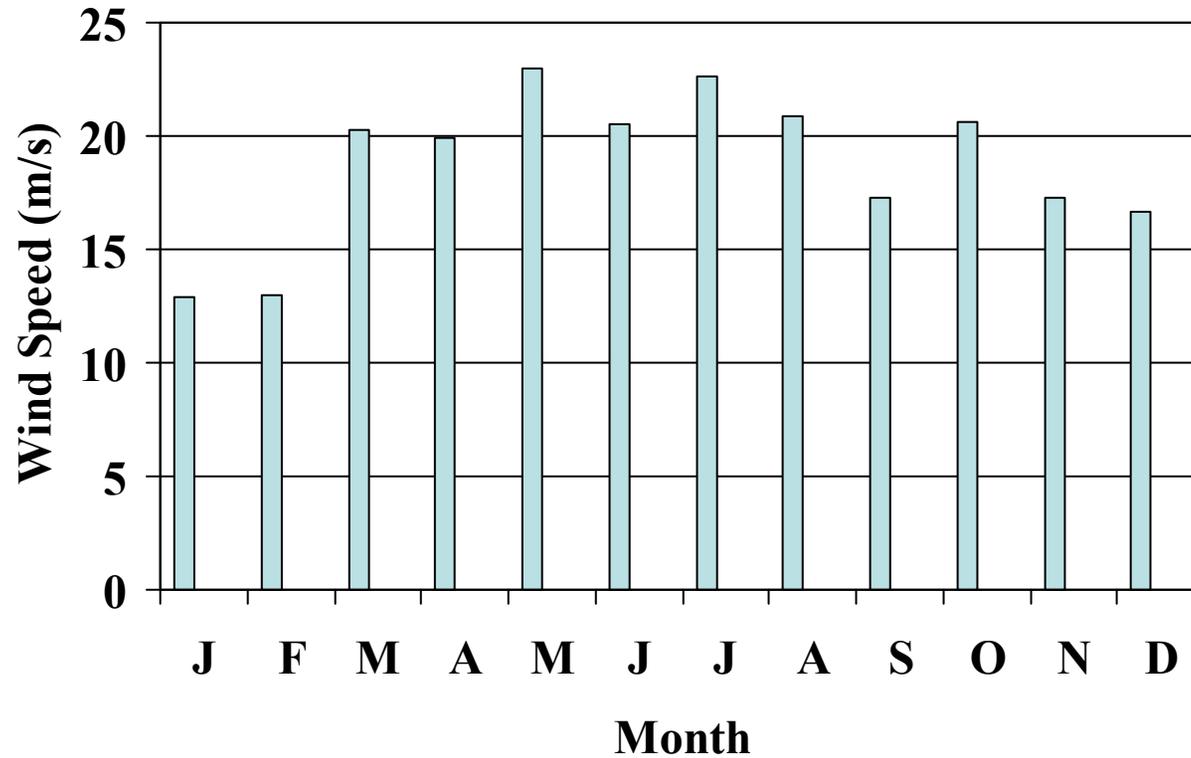


Imagen satelital infrarroja del NOAA-16 mostrando regiones de flujo catabático en la barrera del Ross.



Parish and Wendler, Int. J. Climatol, 1991

# Cape Denison Feb. 1912 - Dec 1913



**Annual mean: 19 m s<sup>-1</sup> - windiest sea-level station on Earth**

# Cape Denison Feb. 1912 - Dec 1913

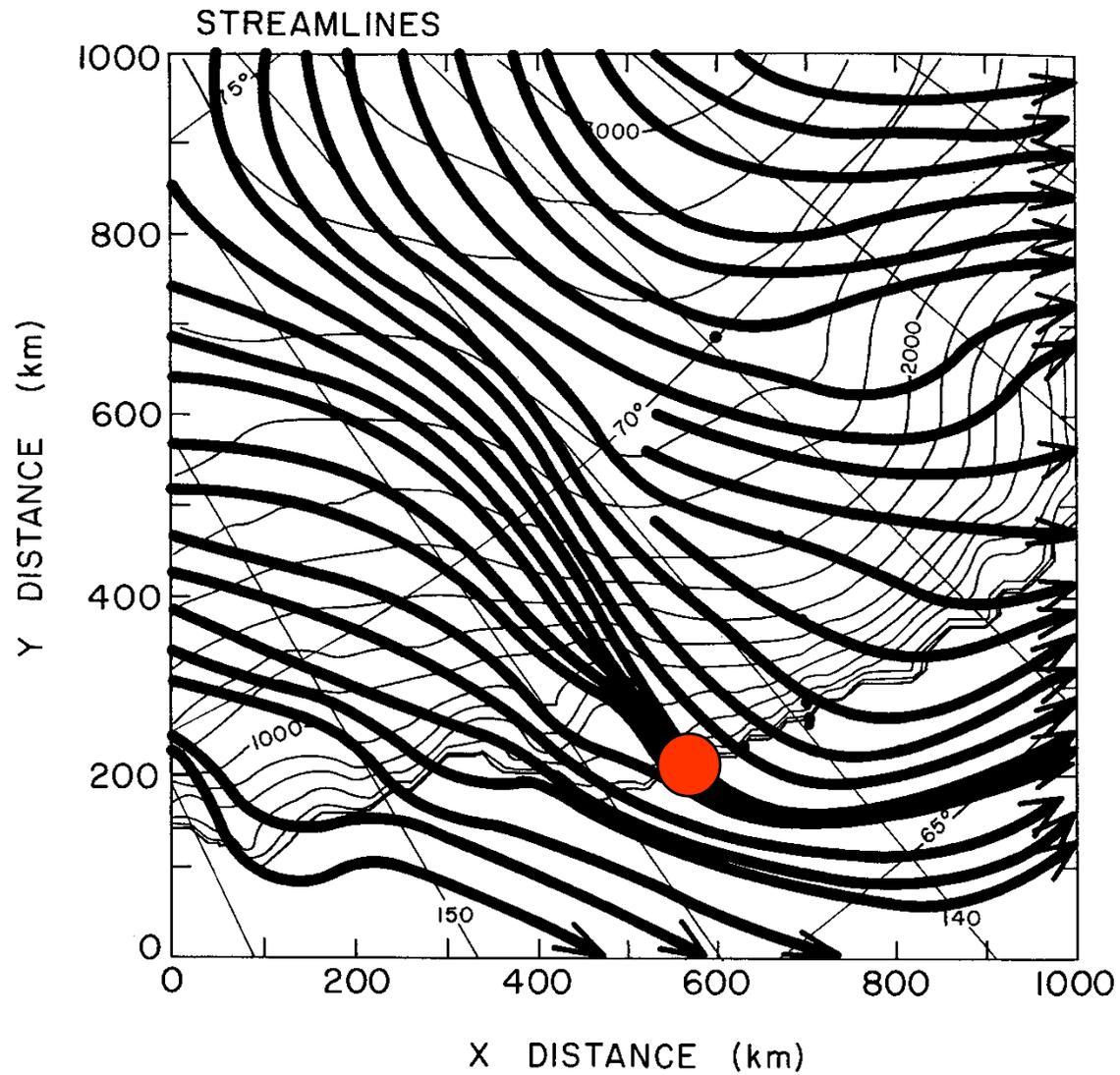
**Winiest month: 24.8 m s<sup>-1</sup> (July 1913)**

**Winiest day: 36.0 m s<sup>-1</sup> (16 August 1913)**

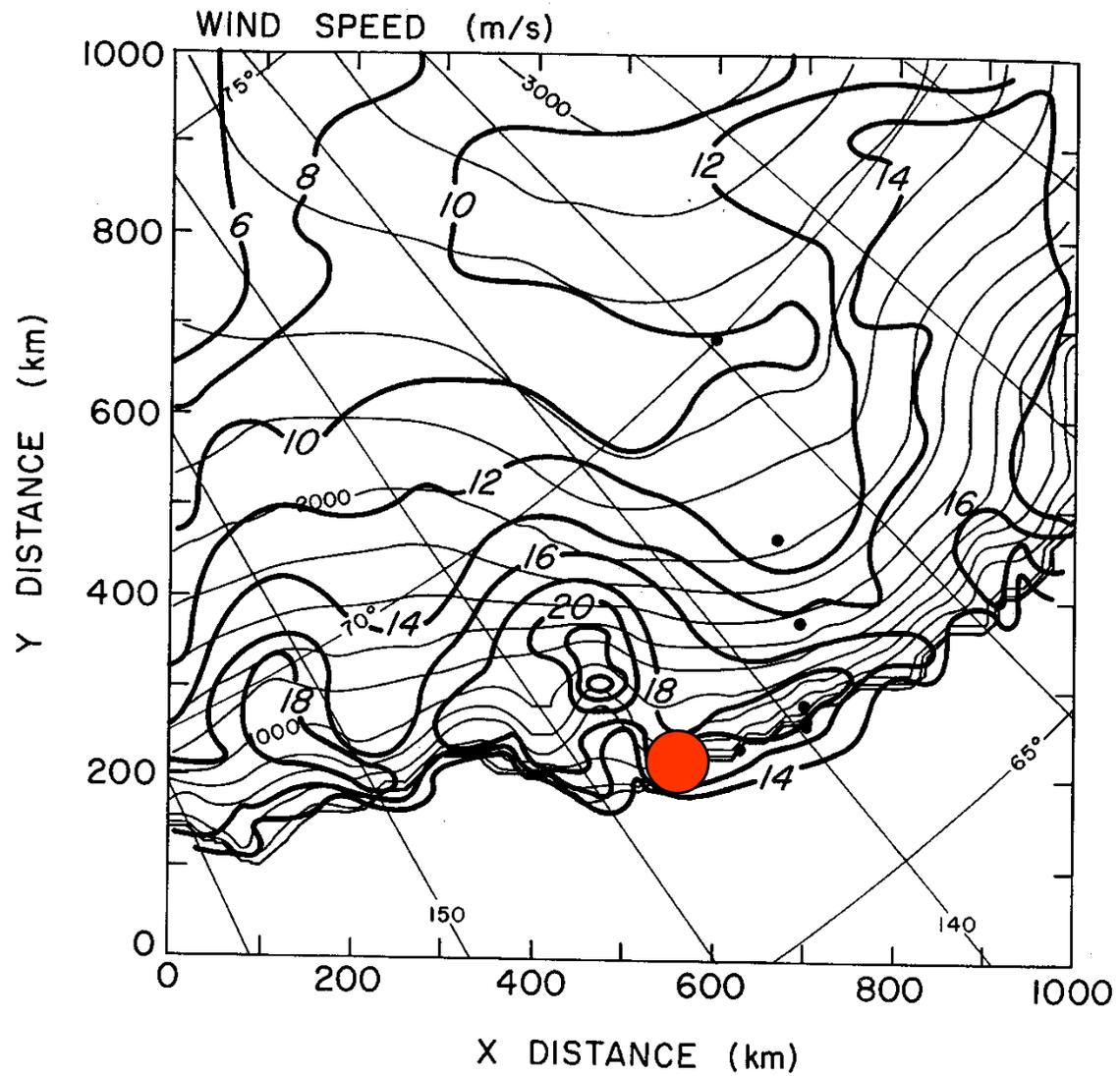
**Winiest hour: 42.9 m s<sup>-1</sup> (6 July 1913)**

**Calmeit month: 11.7 m s<sup>-1</sup> (February 1912)**

**Strongest gust: ~80 m s<sup>-1</sup>**

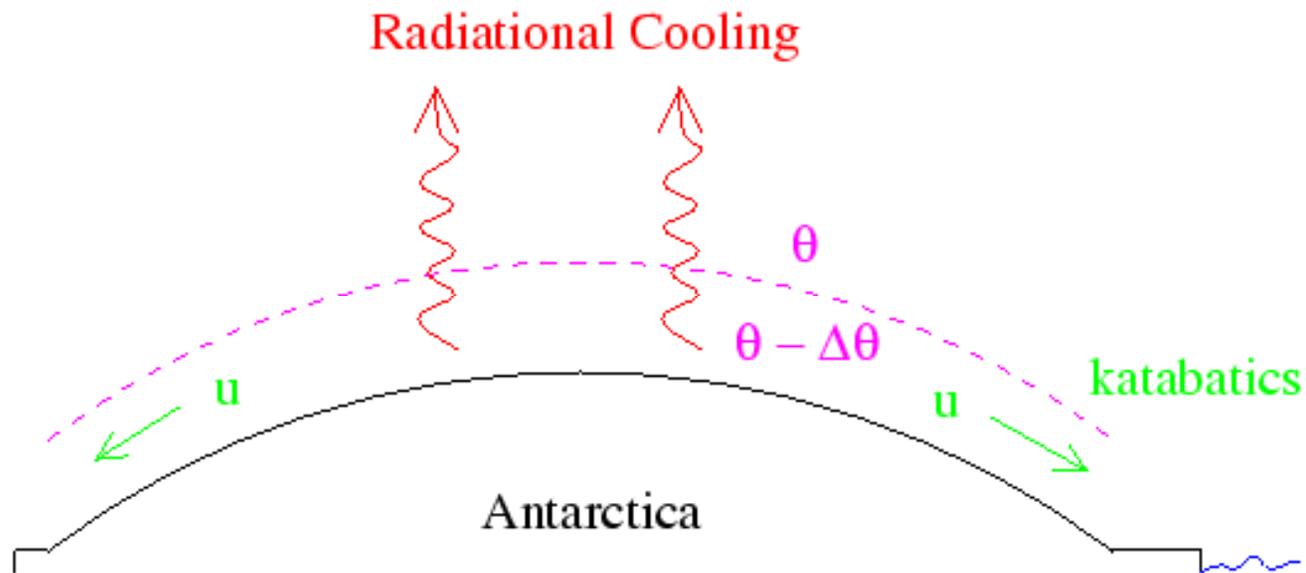


Parish and Wendler, Int. J. Climatol, 1991

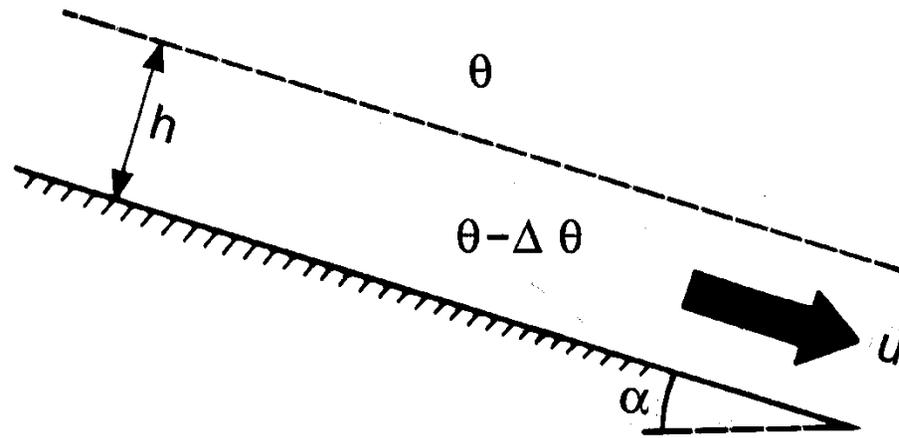


Parish and Wendler, Int. J. Climatol, 1991

# Generación de vientos catabáticos antárticos



# Generación de vientos catabáticos antárticos



Ball (1956) 2-layer model

## Balance de movimiento en los vientos catabáticos

Forzante catabático      Coriolis      fricción

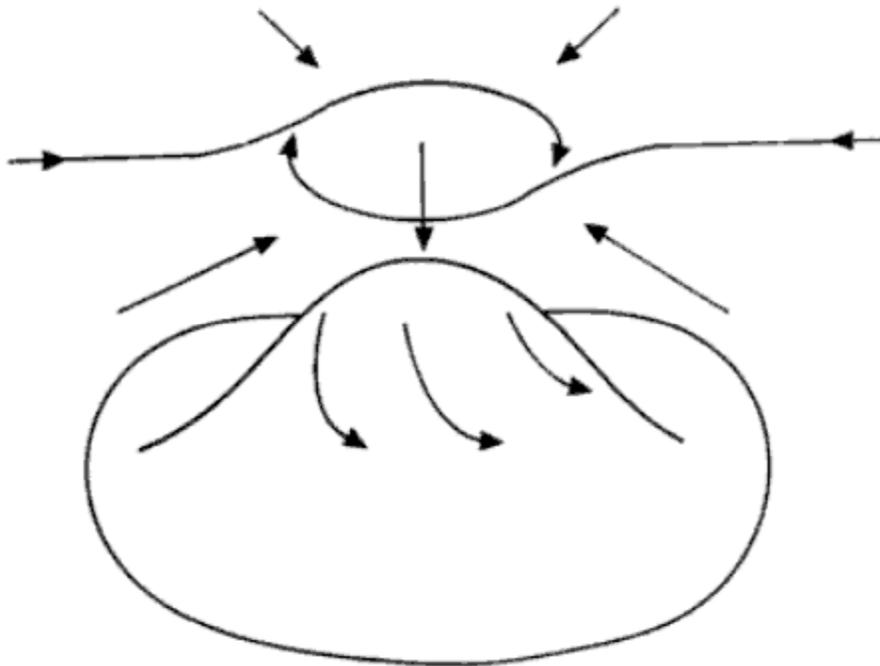
$$hg\alpha \frac{\Delta\theta}{\theta} + hfv - kVu = 0 \quad \text{Pendiente abajo}$$

$$- hfu - kVv = 0 \quad \text{A través de la pendiente}$$

Pendientes suaves: Forzante cat. ~ Coriolis. Domina flujo a través de la pendiente

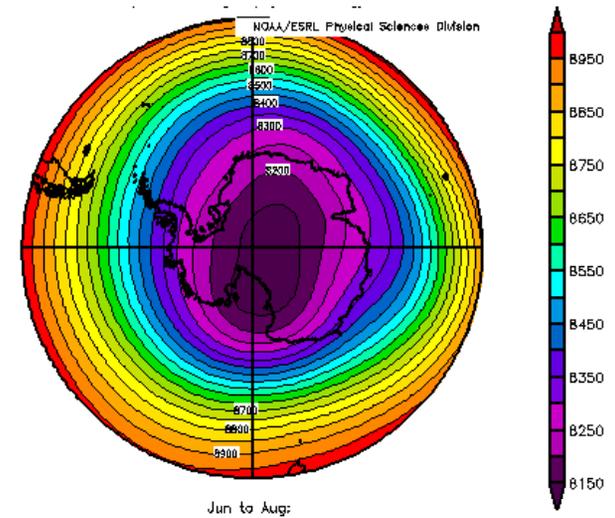
Grandes pendientes: Forzante cat. grande ~ fricción. Flujo pendiente abajo

## Modelo conceptual de la circulación atmosférica en la troposfera baja y media de la Antártida

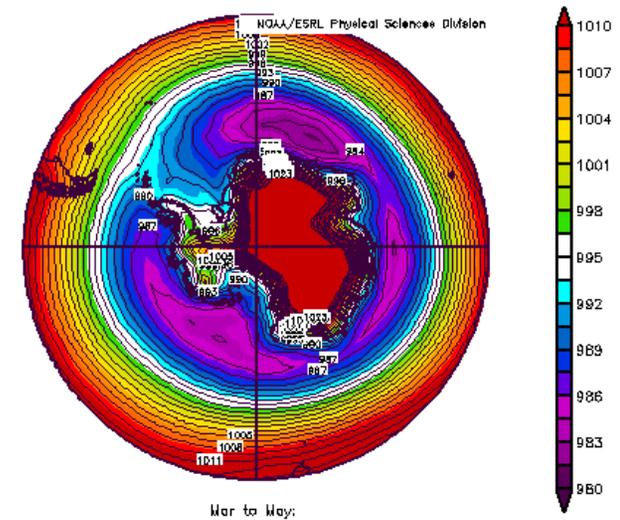


**Circulación atmosférica en la Antártida:**  
Combinación de l forzante de gran escala y  
el forzante catabático

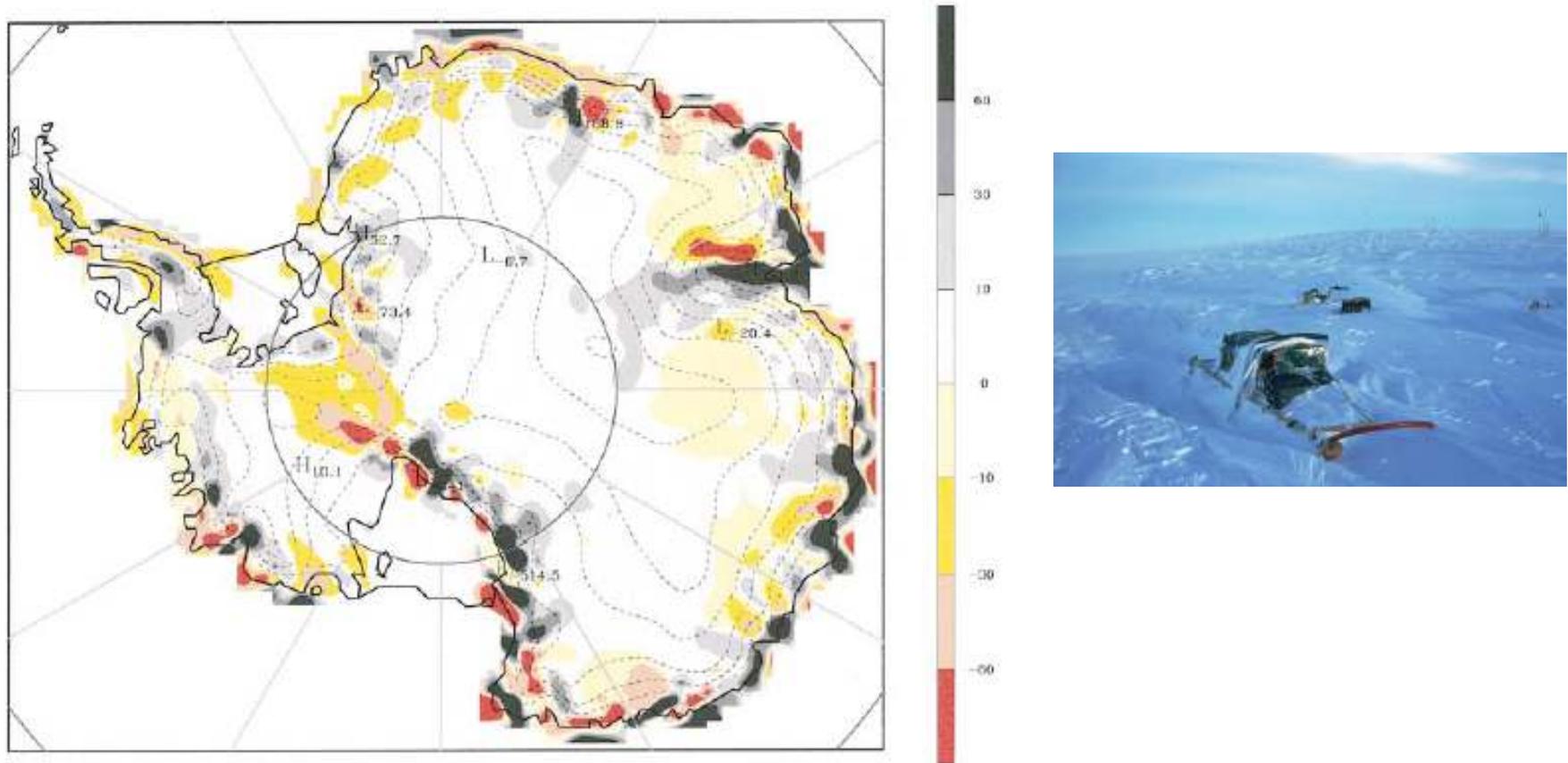
## Alturas geopotenciales medias (300hPa)



## Presión media al nivel del Mar



# Transporte de nieve por los vientos catabáticos



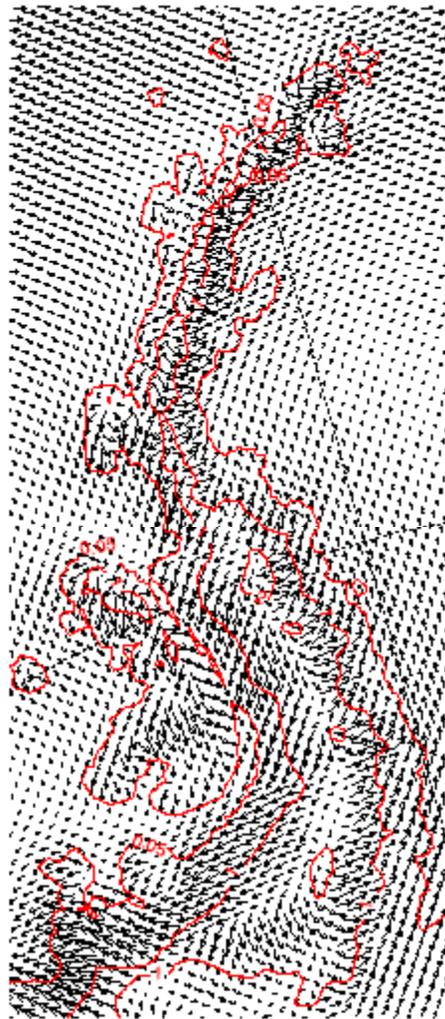
Divergencia del transporte de nieve derivante obtenido a partir de las simulaciones del MM5

*(Bromwich et al. 2004)*

### 10m wind

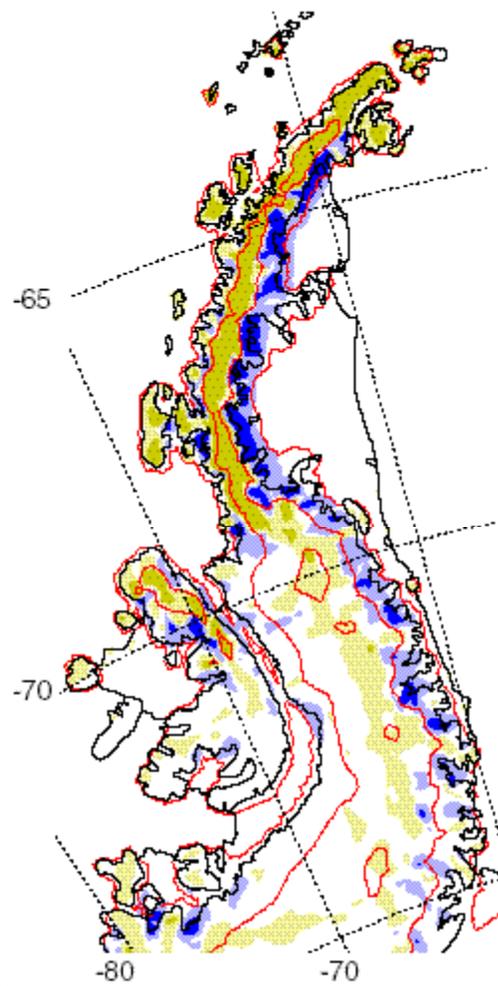
### Blowing snow

### P-E-BS



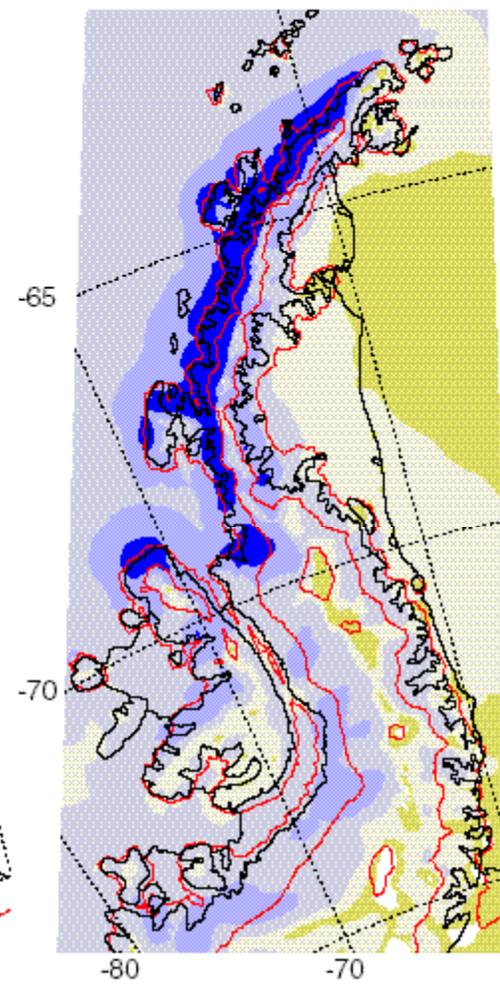
→ 10 ms<sup>-1</sup>

a)



-80 -70  
-300 -50 50 300  
mm w.e. yr<sup>-1</sup>

b)



-80 -70  
200 300 500 1000 2000  
mm w.e. yr<sup>-1</sup>

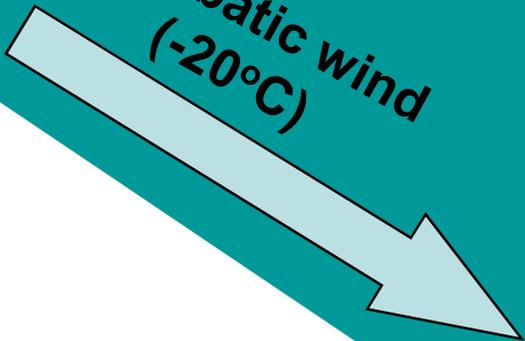
c)

van Lipzig et al, *JGR*, 2004

# Viento catabáticos y el hielo marino



Katabatic wind  
(-20°C)



Large ocean-atmosphere  
heat flux (rapid production  
of sea ice)



Polynya

Sea ice

Ocean  
(-1.8°C)

Brine production



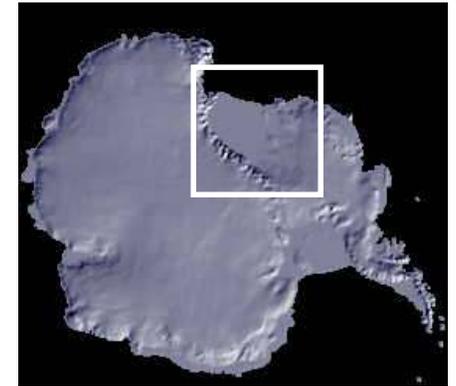
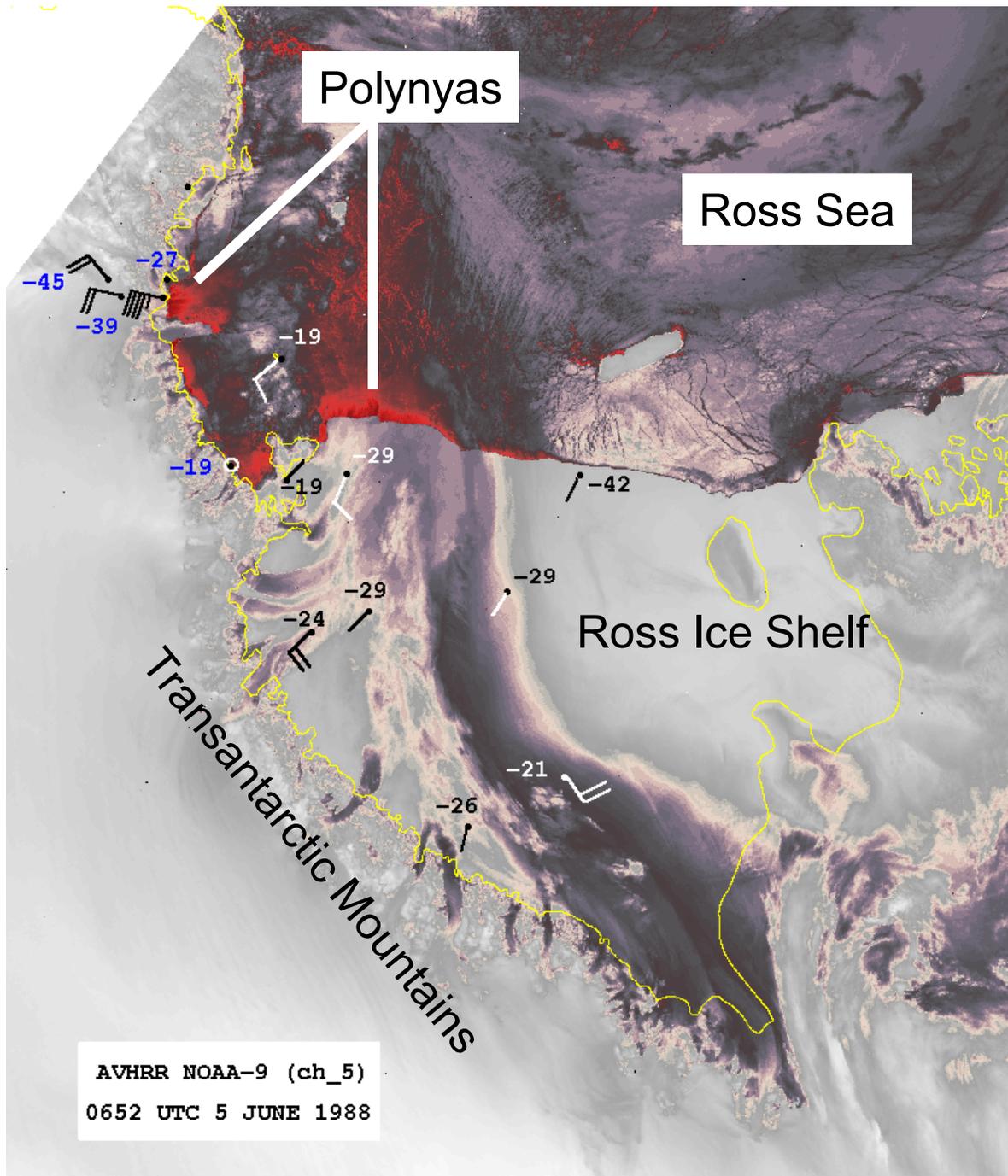


Image: D. Bromwich  
Byrd Polar Research  
Center

# Referencias

- King, J. C., and J. Turner, 1997. Antarctic Meteorology and Climatology. J. C. King, and J. Turner, Cambridge Atmospheric and Space Science Series, Cambridge University Press.
- Van den Broeke and Lipzig, 2003: Factors controlling the near-surface wind field in Antarctica. *Mon. Wea. Rev.* 131, 733-743
- Parish, T., and G. Wendler, 1991: The Katabatic Wind Regime At Adelie Land, Antarctica. *Int. Jou. Of Clim.* 11, 97-107.
- Van Lipzig, N. P. M., J. C. King, T. A. Lachlan-Cope, and M. R. Van den Broeke, 2004: Precipitation, sublimation, and snow drift in the Antarctic Peninsula region from a regional atmospheric model. *J. Geophys. Res.*, **109**.D24106, doi:10.1029/2004JD004701.