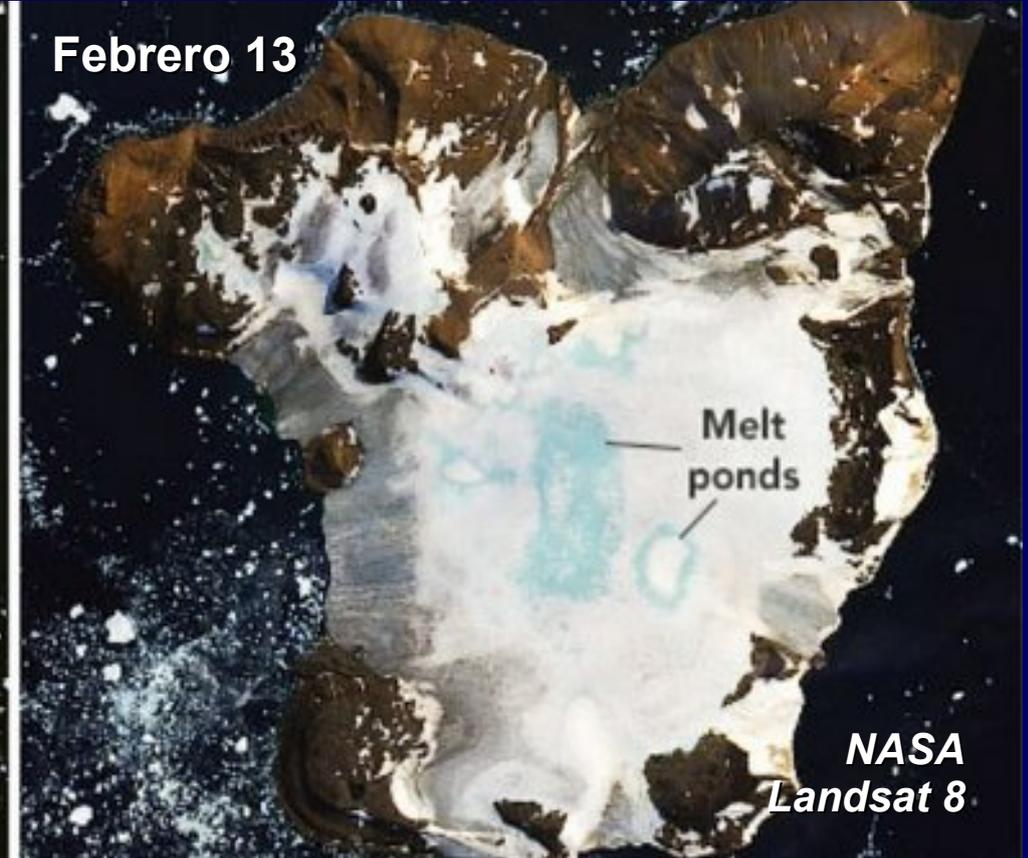


# Paralelo 60: Continente Antártico y su interacción basculante con el cambio climático global

## *Impacto del cambio climático en la Antártida*



*Isla Águila (Eagle), extremo norte de la península Antártica  
Febrero 2020*



*Junio 2020*

**Dr Gustavo Víctor Necco Carlomagno**  
**IMFIA/FING/UdelaR**

# Tratado Antártico

*Firmado en Washington DC, EEUU  
1º de diciembre 1959*



## **Uruguay**

Fecha de adhesión  
11 de enero 1980

# Señales preocupantes

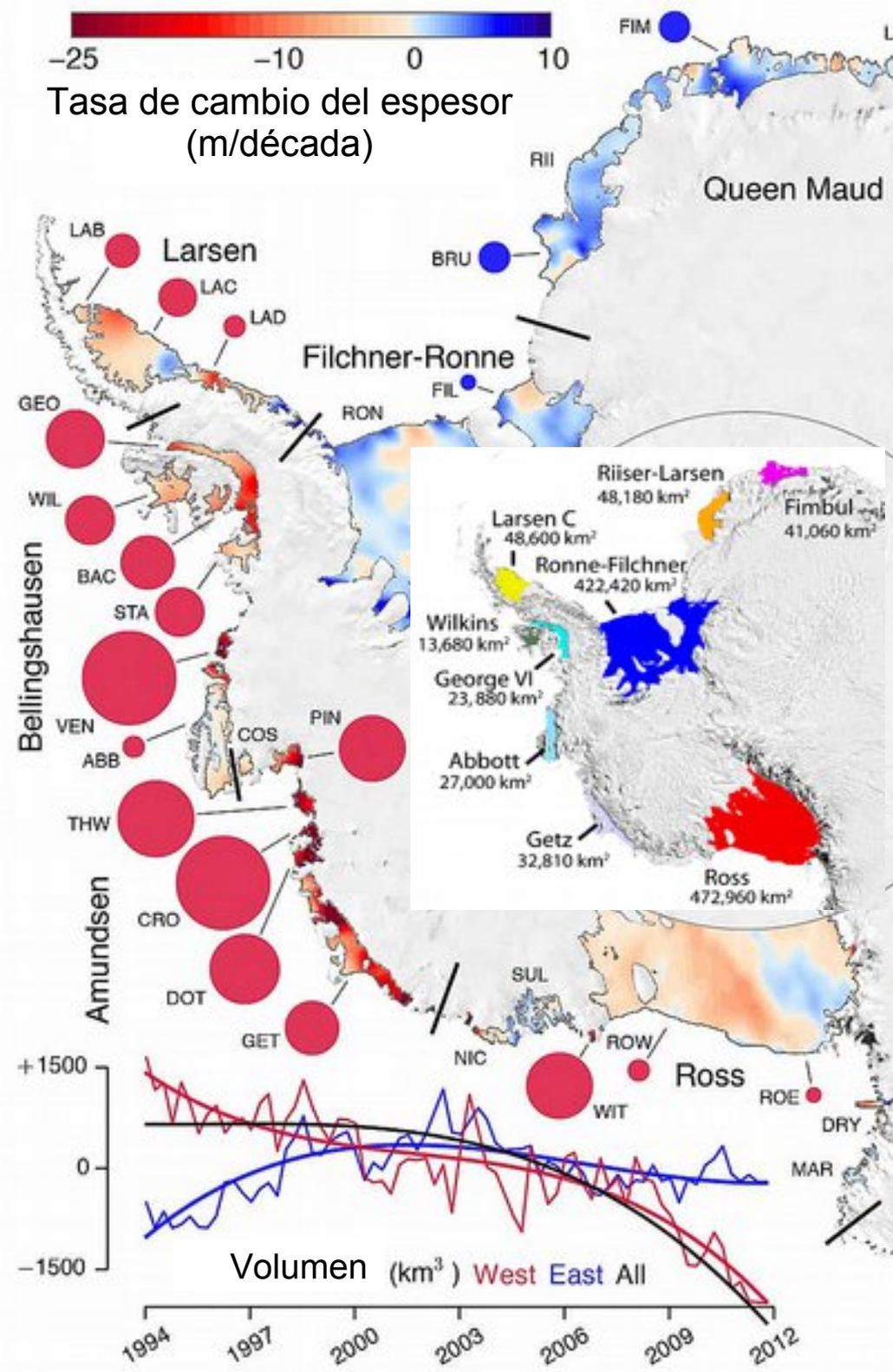
La barrera de hielo Larsen A se desintegró en 1995 y la Larsen B se desintegró casi en su totalidad en 2001 quedando algunos sectores remanentes, que se estima se desintegrarán próximamente.

La plataforma de hielo George VI puede estar al borde de la inestabilidad.

El volumen total de hielo perdido en lo que va del siglo es de unos  $1800 \text{ km}^3$ : equivale al total de agua potable consumida por Uruguay (600 litros diarios per capita) ¡en más de **2000 años!**

En la Isla Águila (Eagle), extremo norte de la península Antártica, la nieve y el hielo se han retirado espectacularmente (ver primer diapositiva)

El Servicio Meteorológico Nacional de Argentina informó que el extremo norte de la península Antártica (Base Esperanza) se batió el 6 de febrero 2020 el récord de calor al alcanzar los  $18,3^\circ\text{C}$ .



# Tiempo y clima

“Weather is what you get, climate is what you expect”

**“Tiempo es lo que tienes, clima es lo que esperas”**

*Mark Twain*

**tiempo meteorológico / temperie (weather)**

*Elementos diarios como temperatura, precipitación o viento que cambian en forma horaria o diurna*



*Tiempo cronológico (time)*

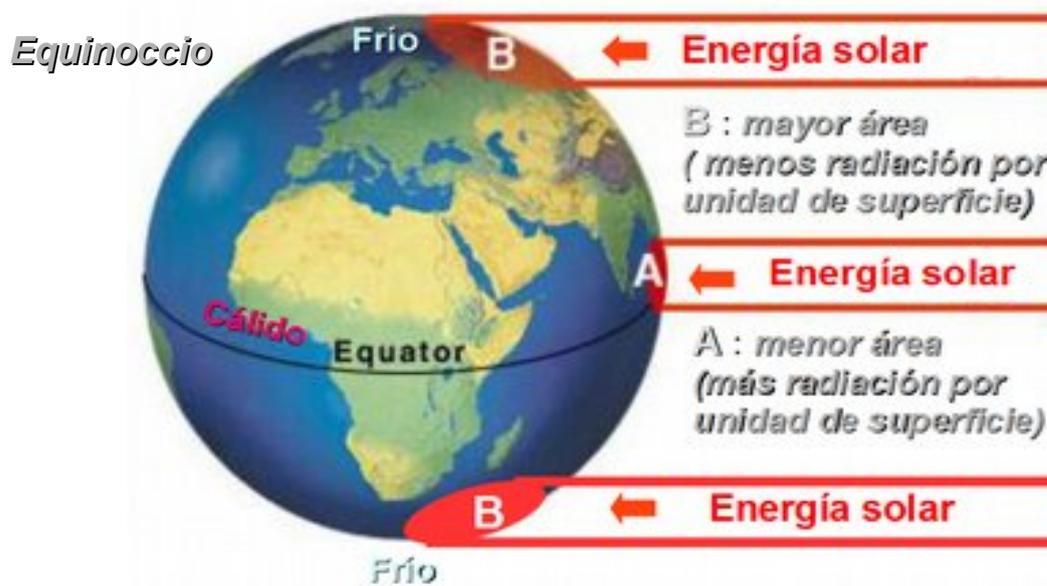


**clima**

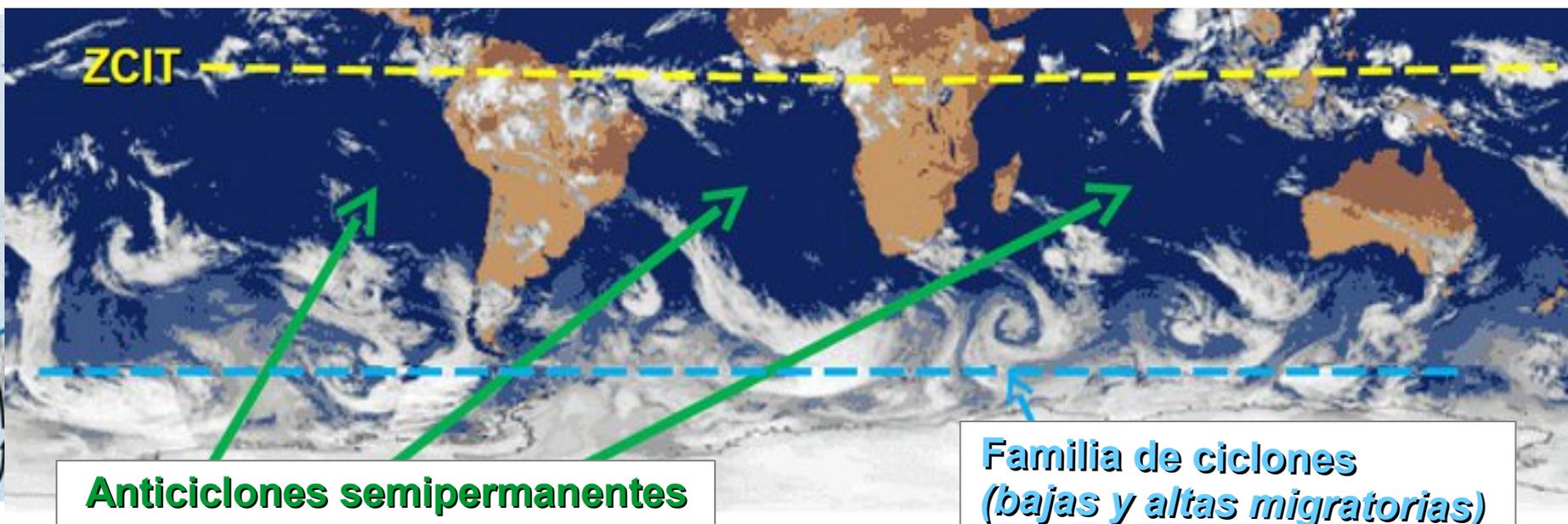
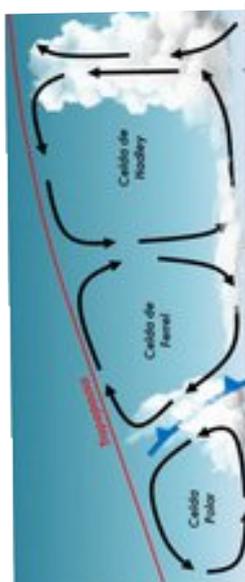


Como cambia el tiempo en periodos largos (normalmente 30 años).  
Puede pensarse como el comportamiento estadístico en un largo periodo.

# Origen de los sistemas meteorológicos (tiempo)



La atmósfera es forzada por el **calentamiento diferencial** ecuador – polo y la **rotación** de la Tierra, produciendo vórtices (**ciclones y anticiclones**) y **circulaciones meridionales**.

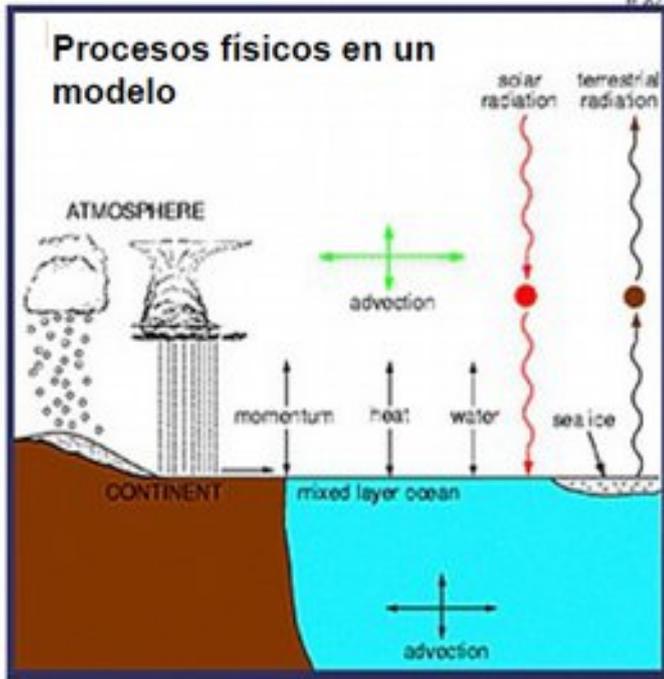


# Modelos numéricos del tiempo (y del clima)

## Esquema para un modelo global de la atmosfera

Malla horizontal (latitud-longitud)

Malla vertical (altura o presión)



Física newtoniana

## Sistema completo de ecuaciones

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g} - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + \nu \nabla^2 \mathbf{V}$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad p\alpha = RT$$

$$c_v \frac{dT}{dt} + p \frac{d\alpha}{dt} = Q$$

Sistema de 7 ecuaciones con 7 incógnitas:  $\mathbf{V}$  ( $u, v, w$ ),  $\rho$  o  $\alpha$ ,  $T, q$  y  $p$

$$\frac{dq}{dt} = E - C$$

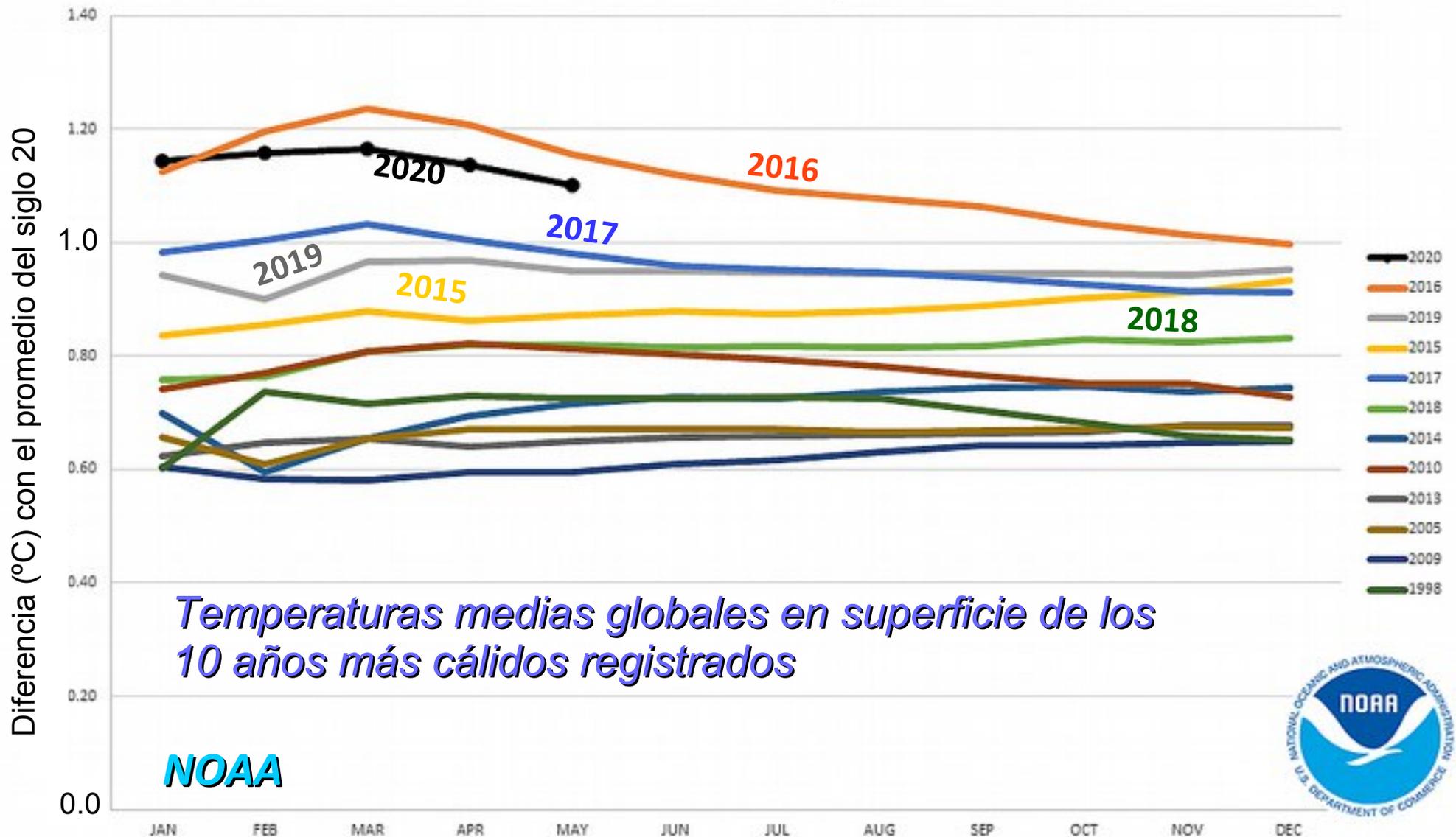
No existen soluciones analíticas del sistema y se resuelven con métodos numéricos sobre una malla 3-D (regional, hemisférica o global)

V. Bjerknes, 1904

L. F. Richardson, 1922

J. Charney, R. Fjørtoft & J. von Neuman, 1950

# Calentamiento global observado



Los últimos cinco años registran temperaturas globales medias de alrededor de **un °C por encima de la media del siglo pasado**

# Cambio climático

Es un cambio en el estado de la atmósfera que puede ser identificado (p.e. usando pruebas estadísticas) por **cambios en el promedio y/o la variabilidad de sus propiedades**, y que **persiste por un periodo extenso**, típicamente décadas o más.

Para el **IPCC** de la ONU (*Intergovernmental Panel for Climate Change – Grupo Intergubernamental para el Cambio Climático*) se refiere a cualquier cambio del clima en el tiempo cronológico, sea debido a la **variabilidad natural** o como resultado de la **actividad humana**

Para el **UNFCCC** *United Nations Framework Convention on Climate Change* (*Convención Marco de la NNUU para el Cambio Climático*) el cambio climático se refiere a un cambio en el clima que se atribuye directa o indirectamente a la **actividad humana**

# Cambio global o cambio medio-ambiental global (GEC - Global Environmental Change)

Aborda las **perturbaciones químicas, biológicas, geológicas y físicas a gran escala de la superficie de la Tierra, la superficie del océano, la superficie terrestre y el ciclo hidrológico**, prestando especial atención en escalas de tiempo de décadas a siglos, a **perturbaciones causadas por el hombre y sus impactos en la sociedad**. Este impacto humano creciente llevó a la definición de **antropoceno**, término que designa a un intervalo geológico, no reconocido aún de manera oficial o unánime, caracterizado por varios disturbios ecológicos ocasionados por la acción humana.

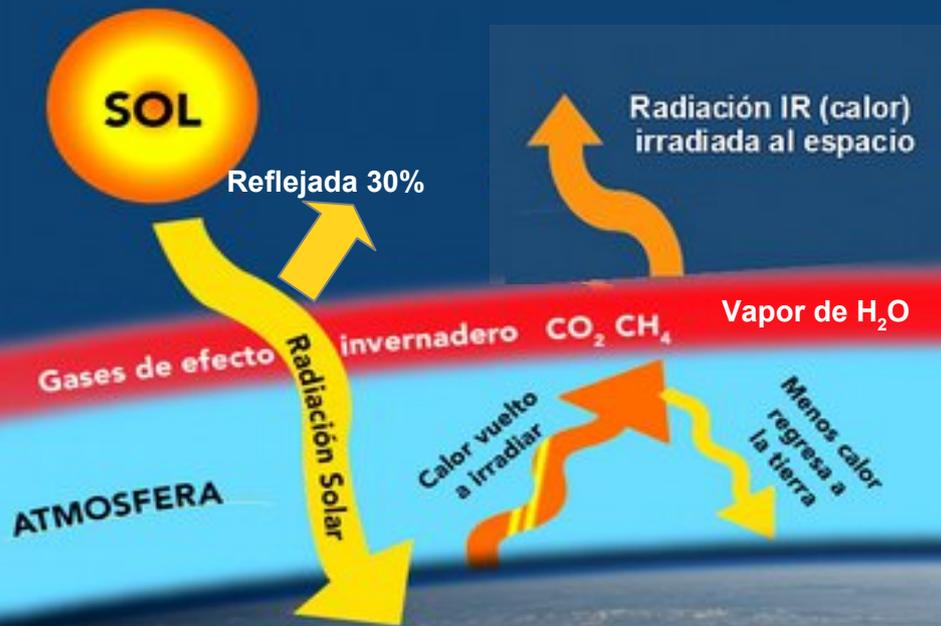
El antropoceno denota un comportamiento reciente distinguido por la **alteración transversal y desproporcionada en todos los ecosistemas de la Tierra**, particularmente por el uso de energía proveniente de la extracción y utilización de combustibles fósiles.

La segunda mitad del siglo XX es única en la historia de la existencia humana. Muchas actividades humanas alcanzaron los puntos de despegue en algún momento del siglo XX y se aceleraron bruscamente hacia el final del siglo (llamada **“la gran aceleración”**). Las últimas décadas han visto sin duda la transformación más profunda de la relación humana con el mundo natural en la historia de la humanidad.

Los efectos de los cambios humanos acelerados son ahora claramente discernibles a nivel del sistema Tierra. **En este tiempo la humanidad ya es una fuerza geofísica global, comparable a los factores naturales por sus efectos sobre la evolución de la Tierra.**

# Efecto invernadero

## Efecto Natural de gases invernadero



*Mantiene la temperatura media global de la atmósfera a unos 15°C*

*Si no existiera ésta sería de -18°C*

## Efecto de gases invernadero aumentado por el hombre



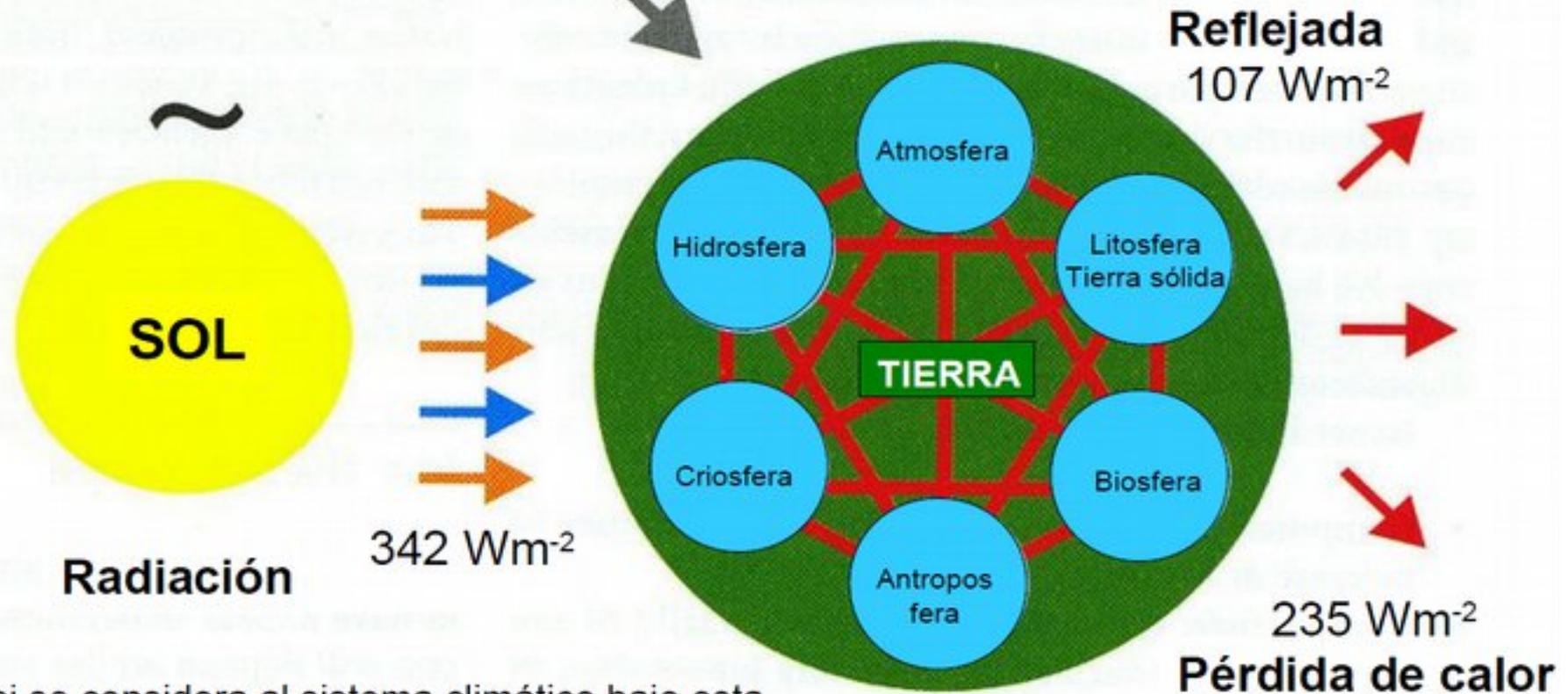
*Aumento en el último Siglo por acción del Hombre:*

Dióxido de Carbono: 30 por ciento +  
Metano: 100 por ciento  
Óxido Nitroso : 15 por ciento  
Halocarbonos: ?

# Flujos de energía en el sistema Tierra

Fenómenos Astronómicos

El *clima* es consecuencia del vínculo que existe entre la *atmosfera*, la *hidrosfera*, las *capas de hielos (criosfera)*, los *organismos vivientes (biosfera)*, los *suelos, sedimentos y rocas (litosfera)* y el *hombre (antroposfera)*.



Sólo si se considera al sistema climático bajo esta visión **holística**, es posible entender los flujos de materia y energía en la atmosfera y finalmente comprender las causas del cambio global .

Efecto de los GEI :  $+2.8 \text{ Wm}^{-2}$   
¡más del 1%! Aunque son gases "traza"

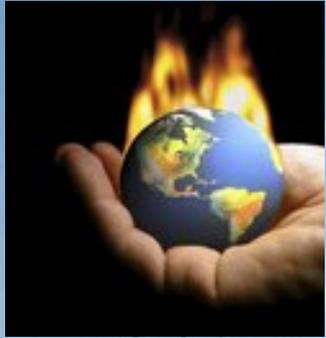
## *¿Debemos preocuparnos por un aumento de la temperatura global de 1,5 a 2,0 grados centígrados?*

Si del invierno al verano pasamos de unos 10-15 grados a 30-35, es decir un aumento de unos 20 grados ¿porqué preocuparse de uno o dos grados?

*Son dos situaciones totalmente diferentes. La primera resulta de una variación estacional recurrente en una zona o punto determinado de suma cero. La energía que se gana en una estación del año se pierde en la otra.*

*En la segunda es el calentamiento de gran parte de la masa de la atmósfera. En los 5 primeros kilómetros de la atmósfera se encuentra el 50% de la masa atmosférica. Con un volumen de unos  $1.28 \cdot 10^{10} \text{ km}^3$  da una masa de alrededor de  $1.62 \cdot 10^{16}$  toneladas (16200 billones de toneladas). Calentar en uno o dos grados esta exorbitante masa requiere ingresar al sistema enormes cantidades de energía, que provocan fuertes alteraciones al comportamiento de la atmósfera (y por consiguiente al tiempo meteorológico y al clima) e inclusive afectar fuertemente al medio ambiente global.*

Temperatura del aire (estratosfera baja)  
desde 1958



Temperatura del aire (troposfera baja)  
desde 1958

Humedad  
desde 1973

Temperatura sobre tierra y océanos  
desde la segunda mitad del siglo 19

Glaciares  
desde 1980

Cubierta de  
nieve desde  
1966

Temperatura de la superficie del mar  
desde 1950

Capa de hielo en Groenlandia  
desde 2002

Hielo en el mar  
desde 1979

Temperatura sobre tierra  
desde la segunda mitad del siglo 19

Contenido de calor del océano  
desde 1950

Nivel del mar  
desde fines del siglo 19

- Rojo indica niveles record o casi record

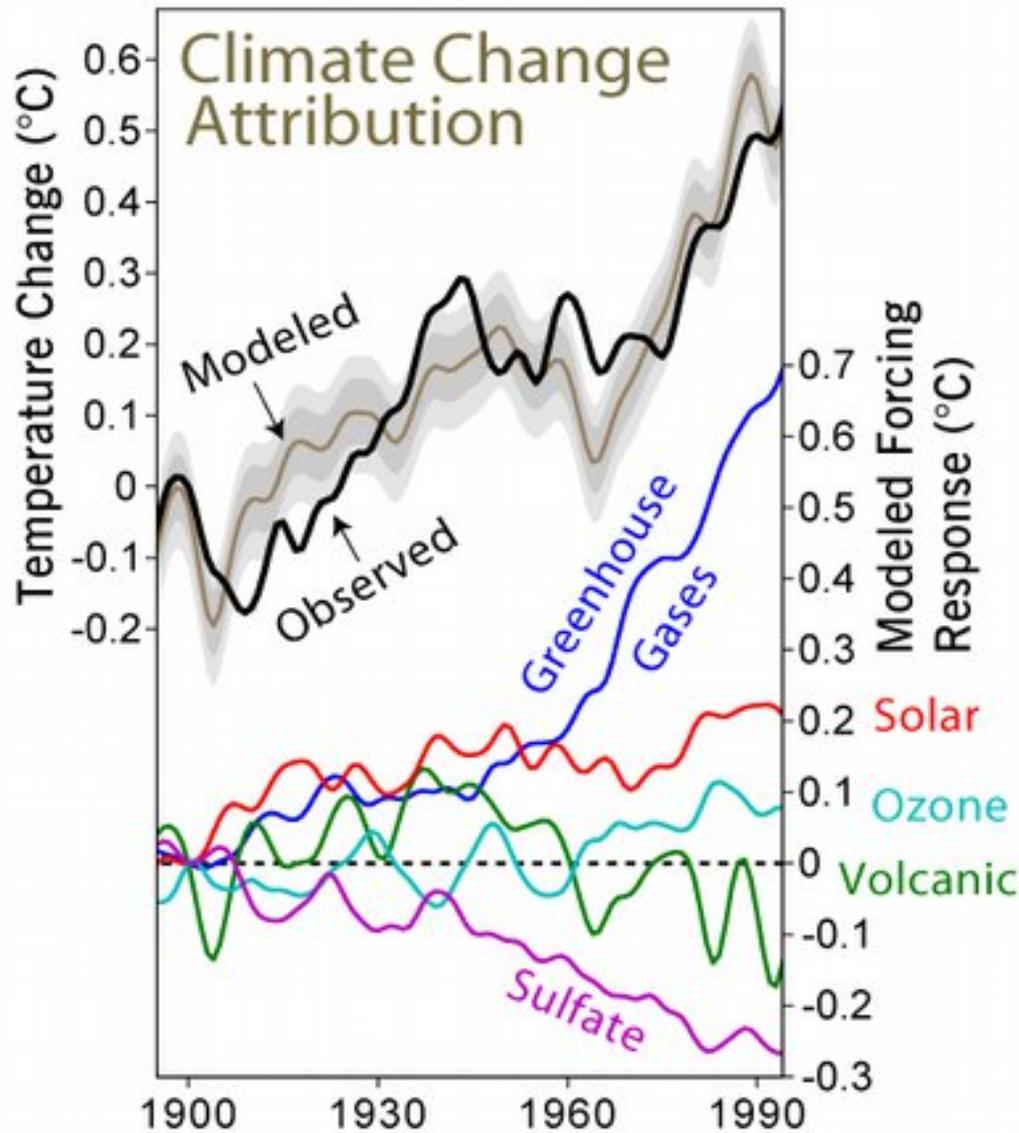
NOAA's National Climatic Data Center

# Indicadores de un planeta que se calienta

## Algunas consecuencias reales y potenciales del aumento de los gases de efecto invernadero que atrapan el calor y provocan el cambio climático

- **Cambio de poblaciones y hábitats** de vida silvestre, así como extinción de animales.
- La **pérdida de tierras habitables** a baja altitud debido al aumento del nivel del mar.
- **Menos agua potable** debido a la fusión de los glaciares que almacenan aproximadamente las tres cuartas partes del agua dulce del mundo.
- **Océanos más ácidos** que amenazan la vida marina, los ecosistemas y la cadena alimentaria.
- Mayor frecuencia de **sequías severas**, que provocan incendios forestales, pérdida de cultivos y escasez de agua.
- **Interrupción** en nuestro **suministro de alimentos** tanto de los cultivos como de la producción de carne debido al aumento de las temperaturas.
- **Amenazas económicas** como mayores precios mundiales de los alimentos, inflación, pobreza y otras .
- **Especies dañinas que prosperan**, como mosquitos, garrapatas, medusas y plagas de cultivos.
- **Más enfermedades diseminadas** como la malaria, transmitida por mosquitos, y el virus del zika.
- **Bosques moribundos** por insectos que matan árboles, incendios, calor y estrés por sequía.
- **Aumento de precipitaciones** provocando **inundaciones**, o **frío extremo** en algunas regiones por nevadas más intensas.
- Los **huracanes** se vuelven más **fuertes, más intensos y frecuentes**.
- Mayor frecuencia de feroces **olas de calor** que pueden conducir a la pérdida de vidas.

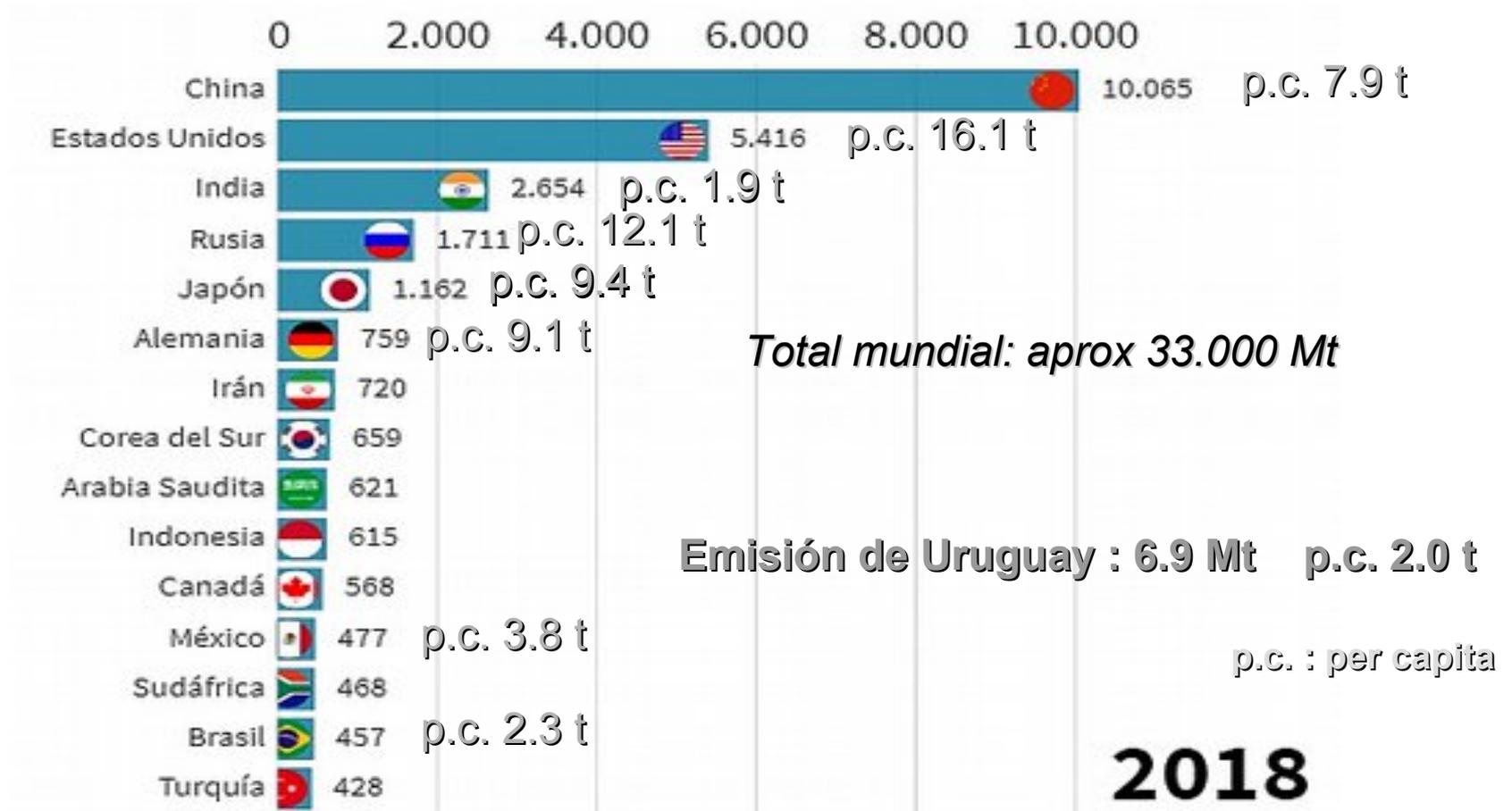
# Causas (físicas) del calentamiento global



Los **forzantes externos** son los mecanismos dominantes externos al sistema climático —pero no necesariamente externos a la Tierra — que causan el calentamiento global observado en el registro de temperaturas. Las investigaciones se han centrado en las causas del calentamiento observado desde mediados de la década del 70, período en el que la actividad humana ha tenido un crecimiento más rápido y se han podido realizar mediciones satelitales sobre toda la atmósfera.

El IPCC ya en su cuarto informe (AR4, 2007), citando simulaciones numéricas (ver gráfico), había confirmado a los **GEI como principal forzante** del calentamiento global observado.

## Emisión de dióxido de carbono de las mayores economías en el 2018 (megatoneladas)

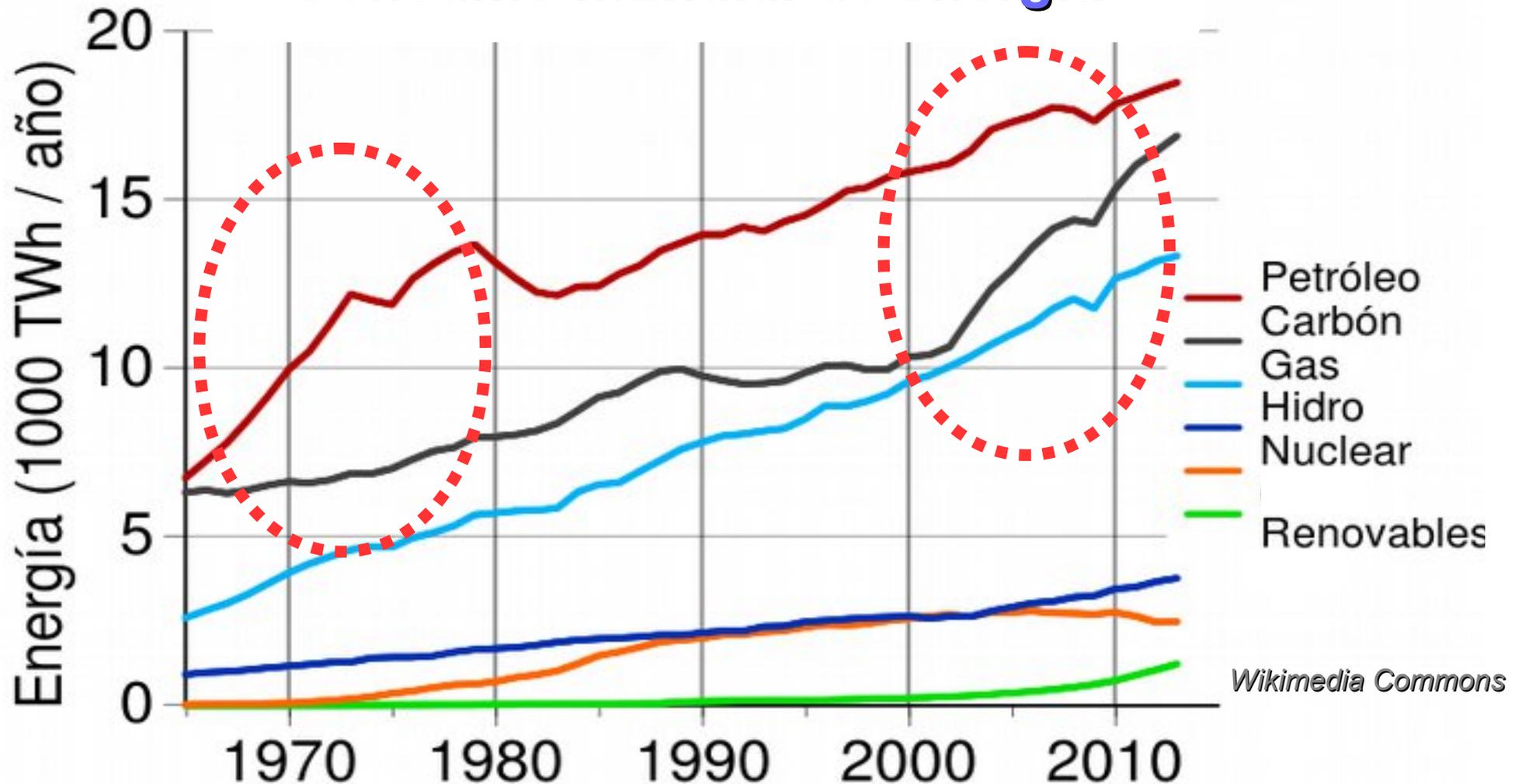


Fuente: Global Carbon Atlas

**CO<sub>2</sub>**: gas neutro, incoloro, inodoro, insípido, no es un veneno, hace crecer las plantas, es despreciable en la composición del aire (0,04 % - 400 partes por millón)

Por lo que vimos al describir el clima como resultado de un balance energético **el impacto del aumento de los GEI** en el forzante radiativo (+ 2.8 W/m<sup>2</sup>) es unas **56 veces mayor al de los cambios en la irradianza (0.05 W/m<sup>2</sup>)**

# Consumo mundial de energía

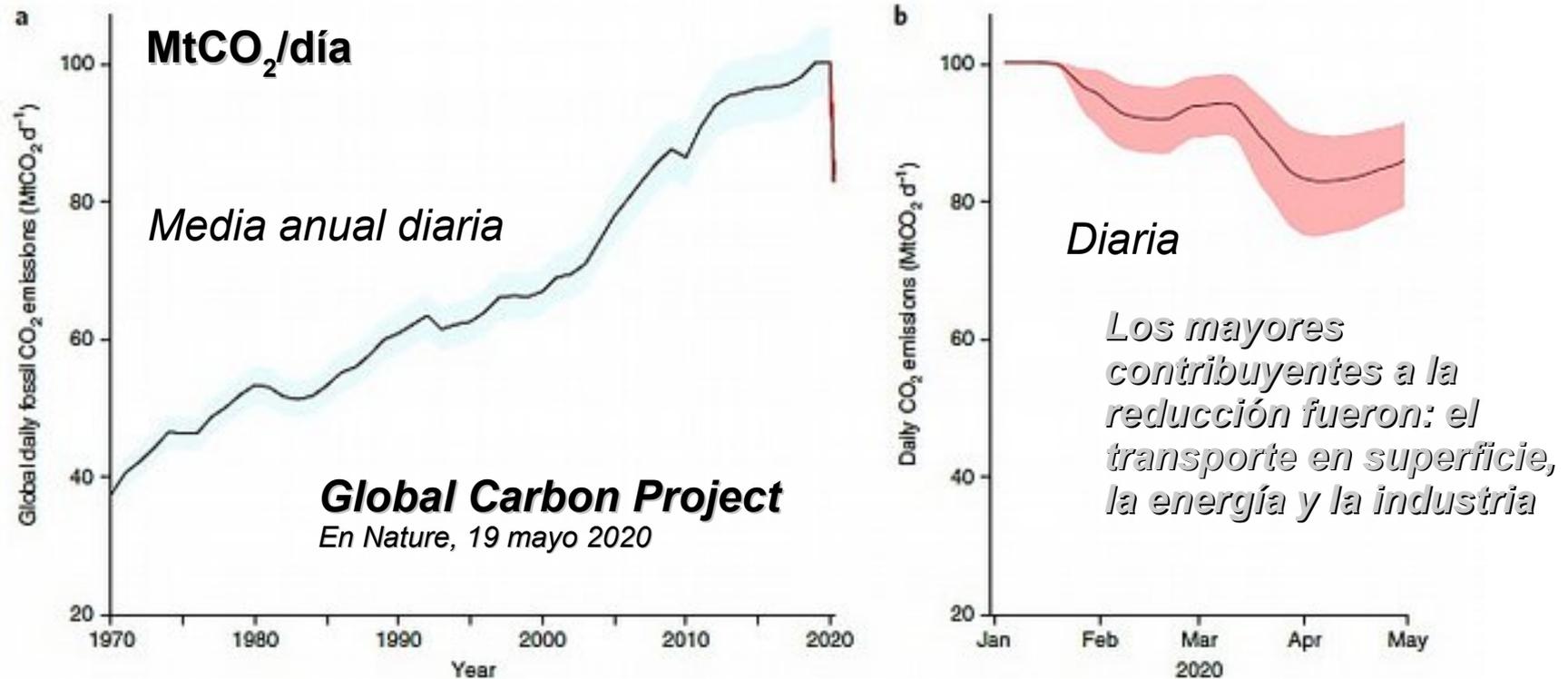


Wikimedia Commons

*Nótese que el consumo de combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas) aumentó desde 1970 a un ritmo medio de alrededor de 1.5 (1000 TWh/año) por década pero en la década 1970-80 el ritmo de consumo de petróleo aumentó unos 4 (1000 TWh/año) y en la década 2000-2010 el carbón a unos 5 (1000 TWh/año) por década. En esos períodos aparecieron los mayores ritmos de crecimiento global de temperatura.*

***¿Casualidad o causalidad?***

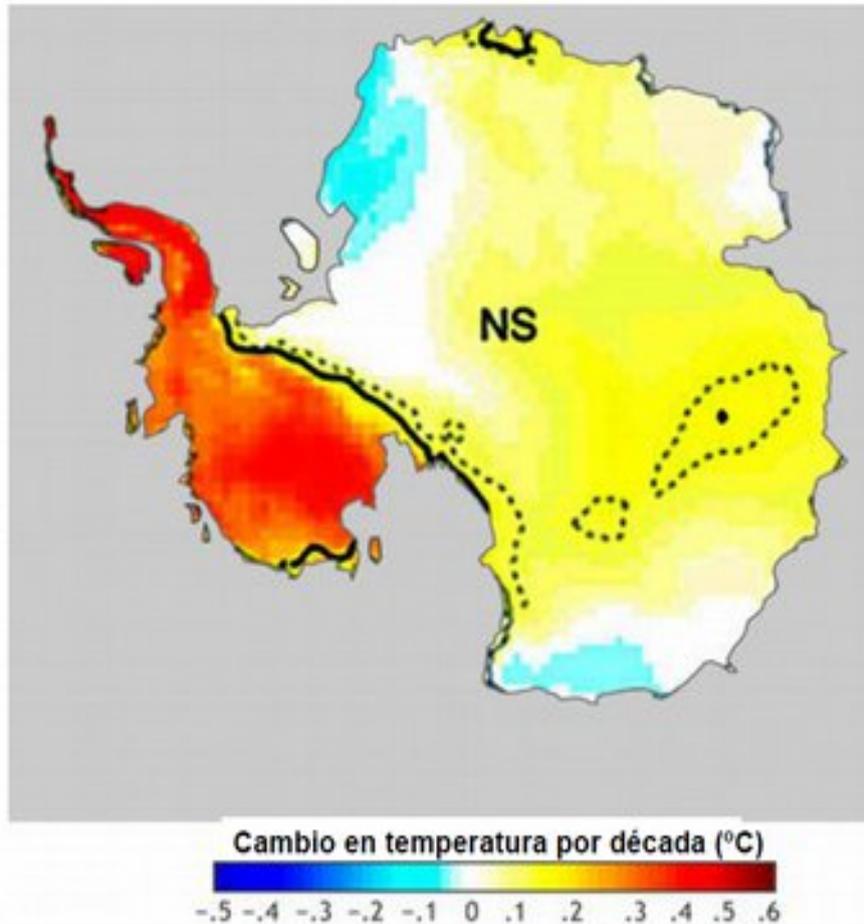
# Emisión global de CO<sub>2</sub> : el efecto de la pandemia



Emisiones diarias medias anuales de dióxido de carbono en el período 1970–2019 (línea **negra**), con una incertidumbre de  $\pm 5\%$  ( $\pm 1\sigma$ ; sombreado gris). Se observa el aumento en el ritmo de crecimiento en la década 2005-2015 (a pesar de las innumerables reuniones internacionales para reducir la emisión).

En la derecha la línea **roja** muestra las emisiones diarias hasta mayo de 2020 estimadas y la incertidumbre (sombreado rojo). Estas emisiones se suavizaron con un filtro móvil de 7 días para dar cuenta de la transición entre los niveles de confinamiento. Se observa una rápida vuelta a la “normalidad”.

# Cambio climático en la Antártida



**Tendencias en la temperatura en superficie  
(1963 – 2012)**

NOAA, adaptada de Nicolas & Bromwich (2014)

La Antártida es el lugar más **seco**, más **frío** y más **ventoso** de la Tierra. Es también el almacén de los registros climáticos de hielo más antiguos del mundo, conservado en la helada Antártida durante millones de años.

La ciencia es clara: el cambio climático ya está afectando negativamente a la Antártida, incluyendo una mayor **pérdida de hielo y nieve**.

La Península Antártica Occidental es **una de las áreas de calentamiento más rápidas en la Tierra** (sólo algunas áreas del Círculo Polar Ártico experimentan cambios térmicos más rápidos).

La línea negra gruesa de la figura limita el área de alta confianza (Antártida Occidental y Península Antártica). NS indica que el área al este de la línea negra gruesa tiene niveles de confianza que no son estadísticamente significativos. Dentro de esa región, las líneas punteadas indican áreas de confianza media.

# Criosfera:

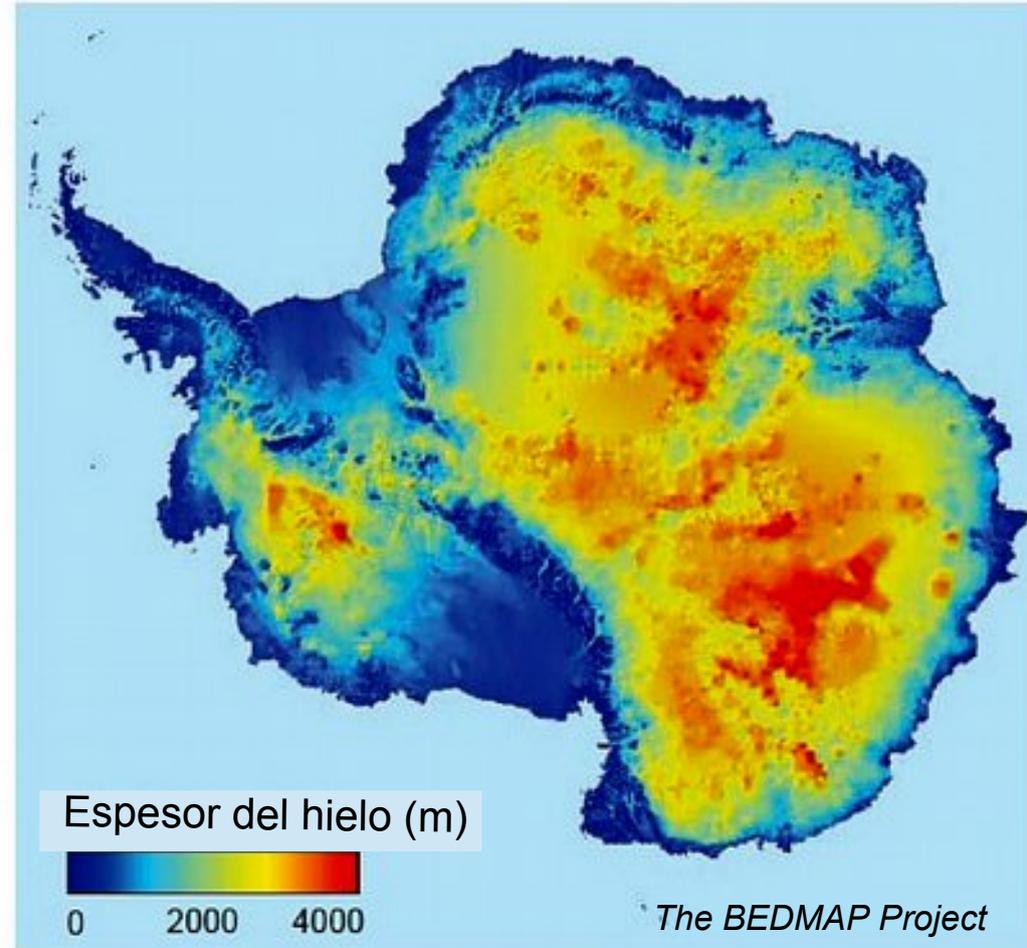
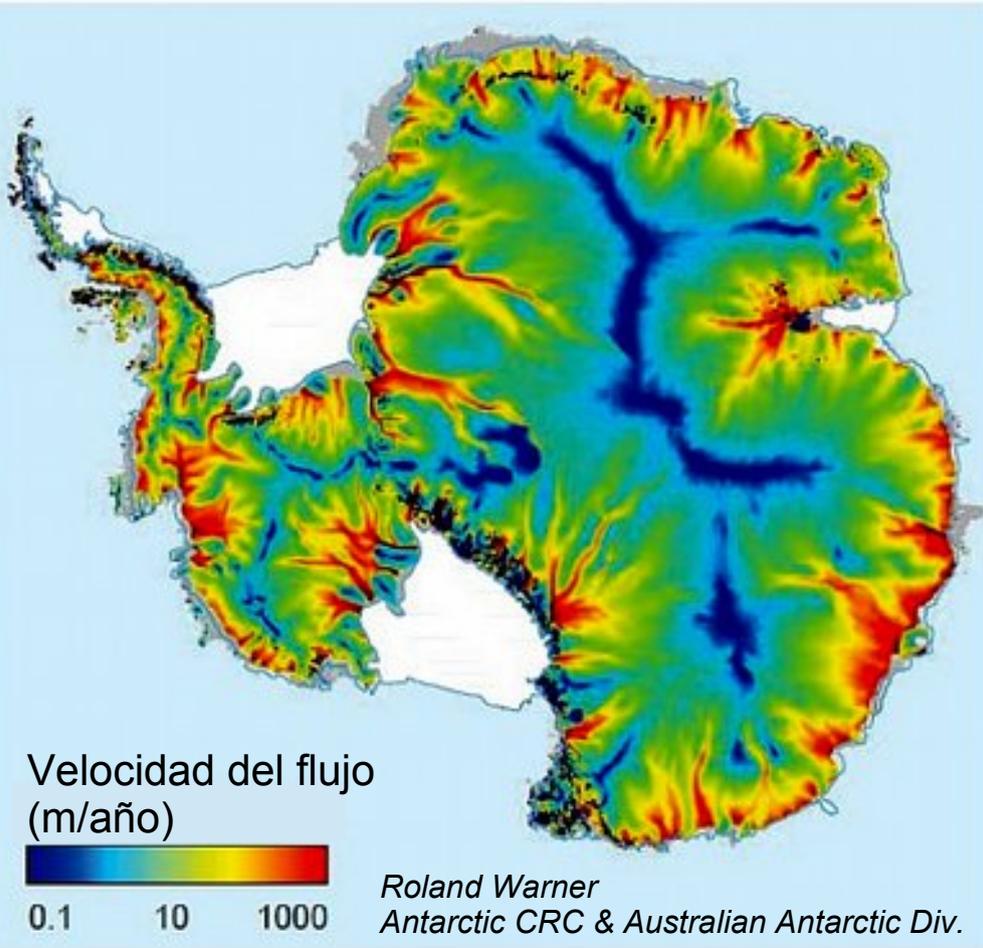
*Nieve, hielo marino, hielo continental, casquetes polares, permafrost (suelo congelado), hielo en ríos y lagos*

- Contribuye al albedo terrestre (porcentaje de radiación solar reflejada)
- Influencia la circulación oceánica termohalina a través de cambios en el contenido de sal
- Es un reservorio de agua que puede influenciar el nivel del mar significativamente

*Como hemos visto, la criosfera es una **parte integral del sistema climático global**, con importantes vínculos y reacciones generadas a través de su influencia en los flujos de energía de superficie y la humedad, las nubes, la precipitación, la hidrología, la circulación atmosférica y oceánica.*

# El hielo continental (ice pack) antártico

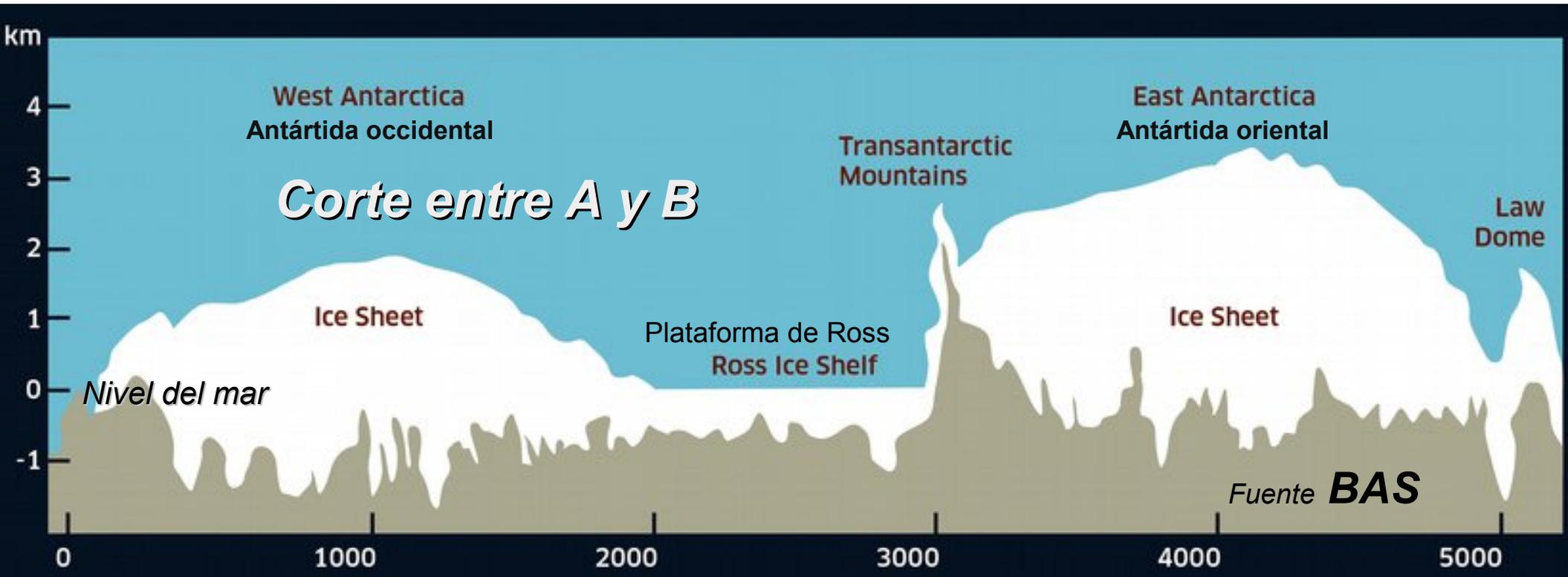
La región de *acumulación* está en el *interior del continente* y las de *ablación* en *zonas periféricas*



*El hielo se desplaza varias centenas de metros por año como lo muestra esta simulación numérica. Las corrientes rápidas se concentran en los márgenes, pero pueden originarse en el interior.*

*El hielo continental antártico tiene un espesor de hasta 3000 m, pero se adelgaza hacia los márgenes del continente*

# El hielo continental antártico



**Distancia (km)**

La **capa de hielo antártico** (ice sheet) es la masa de hielo más grande en la Tierra. Cubre un área de casi **14 millones de km<sup>2</sup>** y contiene **30 millones de km<sup>3</sup>** de hielo. Alrededor del **60% del agua dulce del mundo** se encuentra en esta capa de hielo, lo que equivale a un aumento de unos 70 m en el nivel global del mar. En la Antártida oriental, la capa de hielo descansa sobre una gran masa de tierra, pero en la Antártida occidental, el lecho está, en algunos lugares, a más de 2.500 metros bajo el nivel del mar.

# Aceleración del derretimiento del hielo en la Antártida

Se multiplicó por seis desde 1979 para alcanzar más de 250.000 millones de toneladas en 2017



La Antártida tiene suficiente agua congelada como para elevar 57 metros el nivel del mar



**LARSEN C**  
Plataforma de hielo de 5.800 km<sup>2</sup> que se desprendió en julio de 2017

Barrera de hielo

RONNE

OCEANO ANTÁRTICO

AMERY

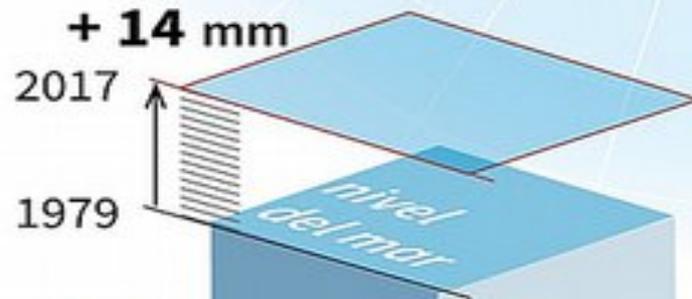
+ Polo Sur

ROSS

500 km

Mar de Ross

El derretimiento de hielo de la Antártida elevó el nivel de los océanos de 14 mm desde 1979



El derretimiento en la Antártida en miles de millones de toneladas por año

40  
1979-1990

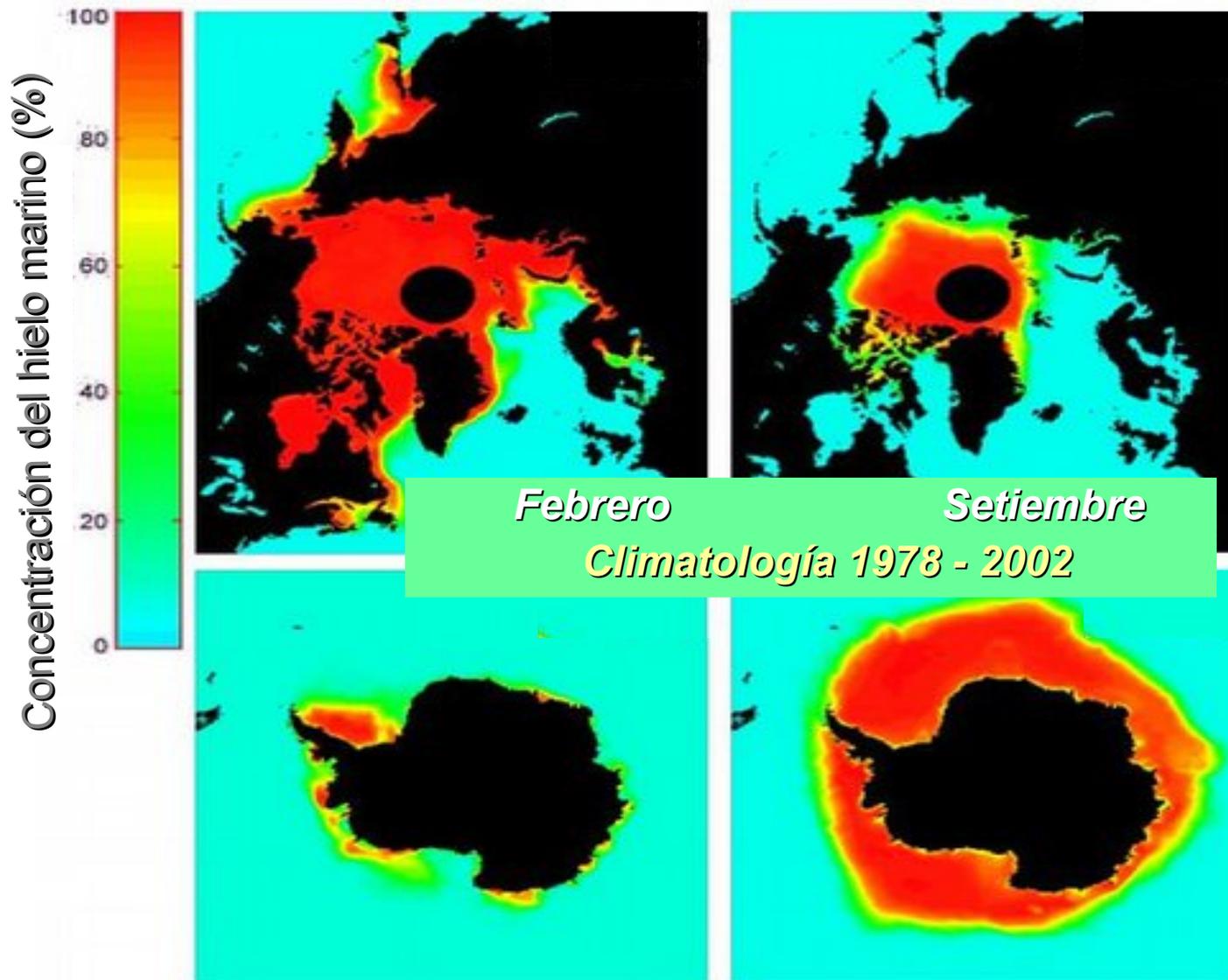
50  
1989-2000

166  
1999-2009

252  
2009-2017

INFOBAE

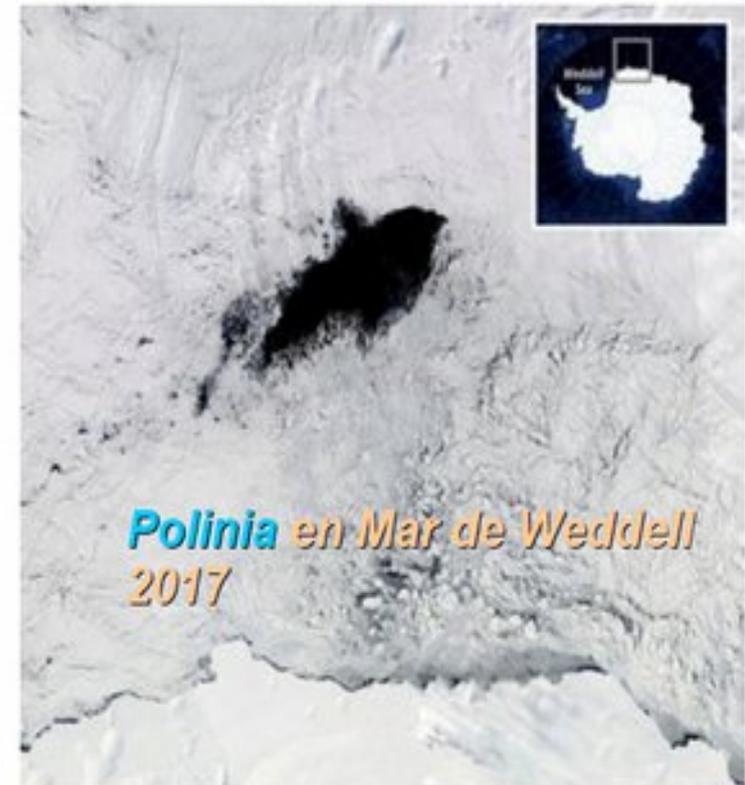
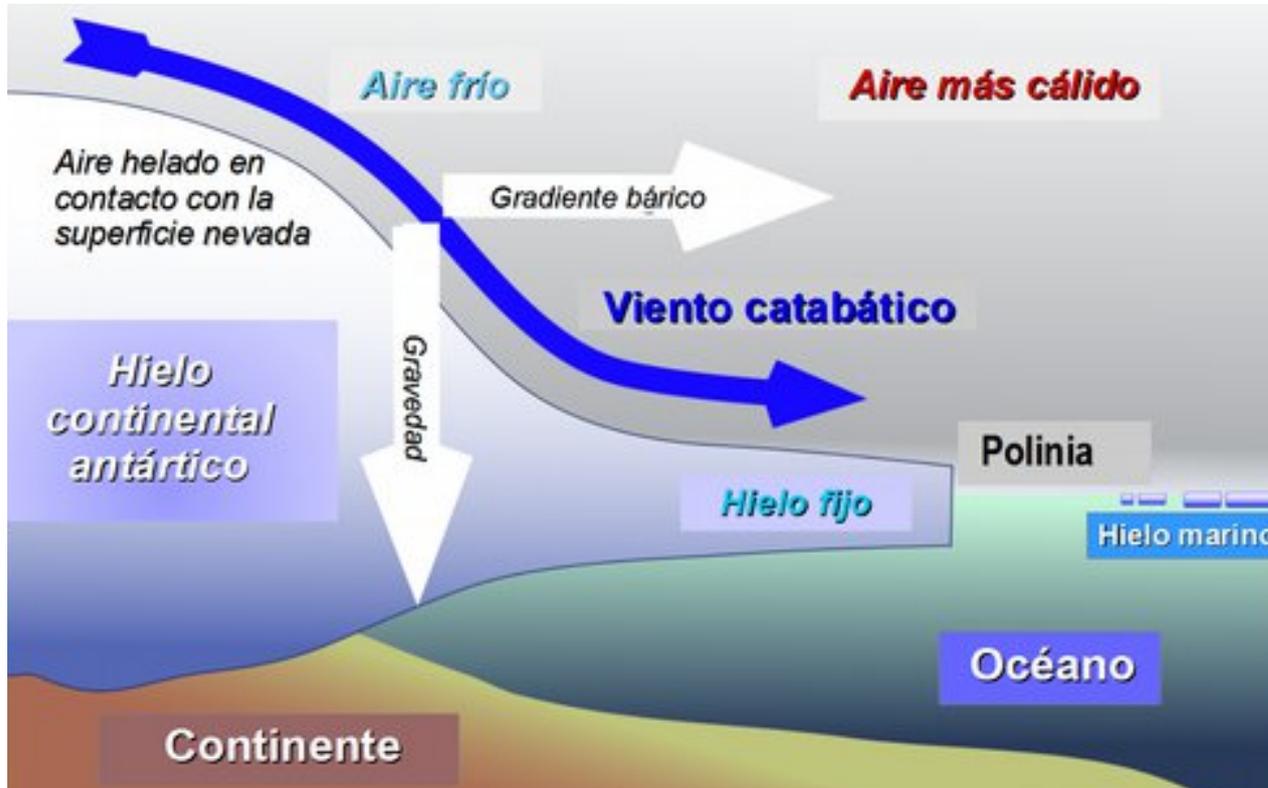
# Hielo marino ártico vs antártico



*Los hielos marinos antárticos desaparecen en el verano. Los cambios estacionales de cobertura de hielo marino son más importantes en el ártico*

# Polinias en la Antártida

Una **polinia** (del ruso *polynye* - *Польня*) es un espacio abierto de agua rodeado de hielo marino.



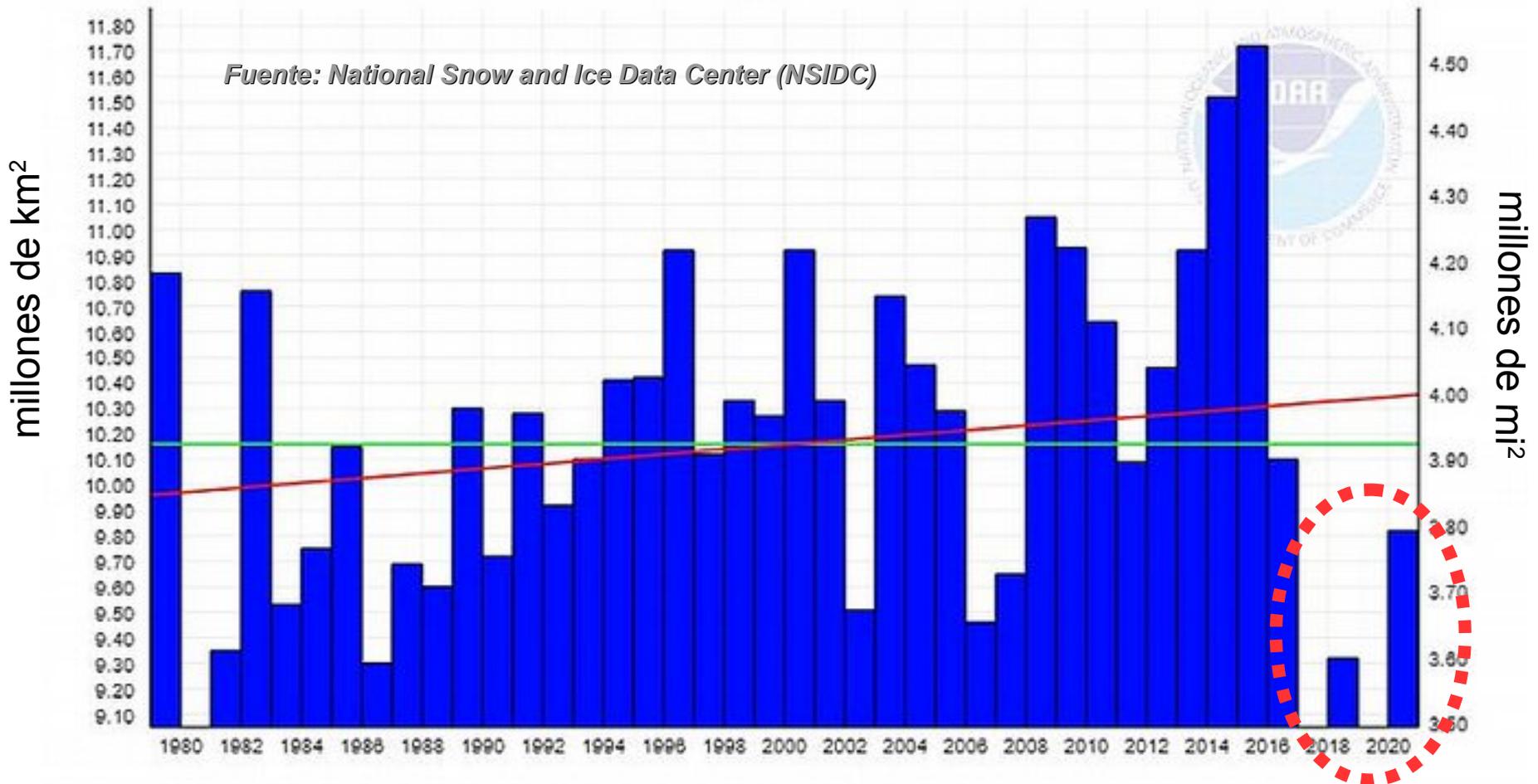
Se forman fundamentalmente de dos maneras:

**Polinia de calor sensible** – p.e. por la **surgencia** en una región de agua caliente, lo que reduce la producción de hielo y que puede incluso detenerla por completo y

**Polinia de calor latente** – p.e. por la acción del **viento catabático** o las corrientes oceánicas, que actúan para llevar el hielo fuera de la frontera fija de hielo permanente.

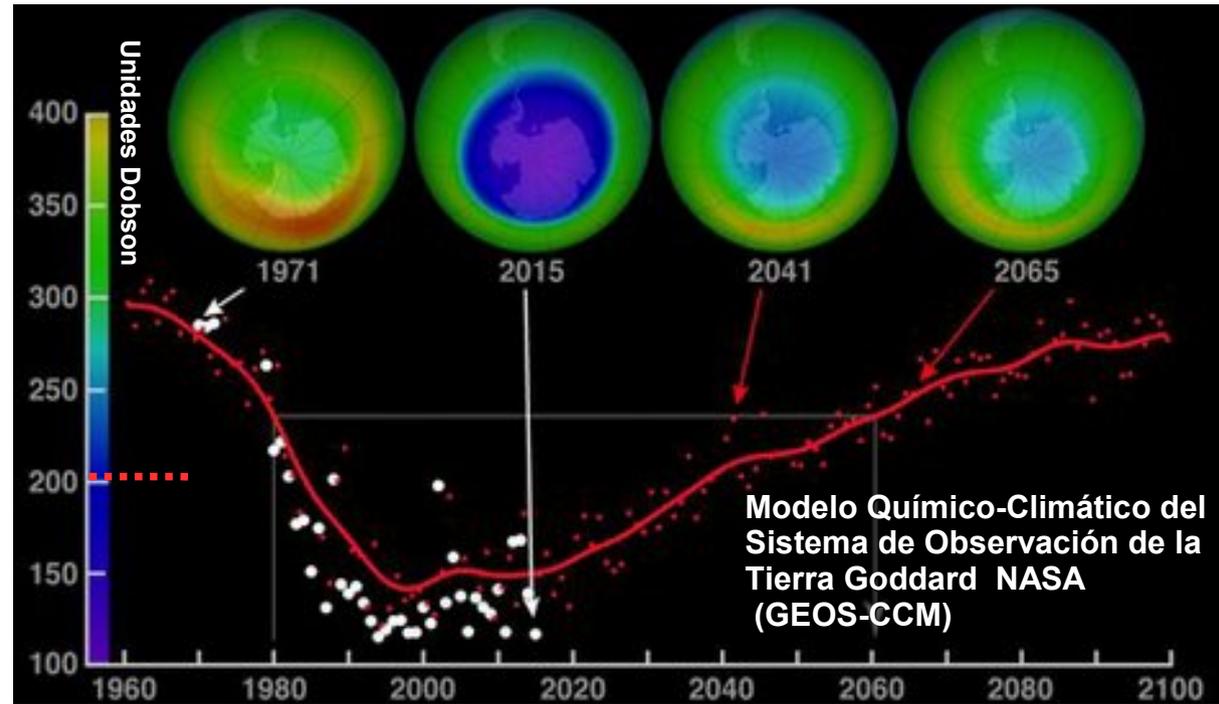
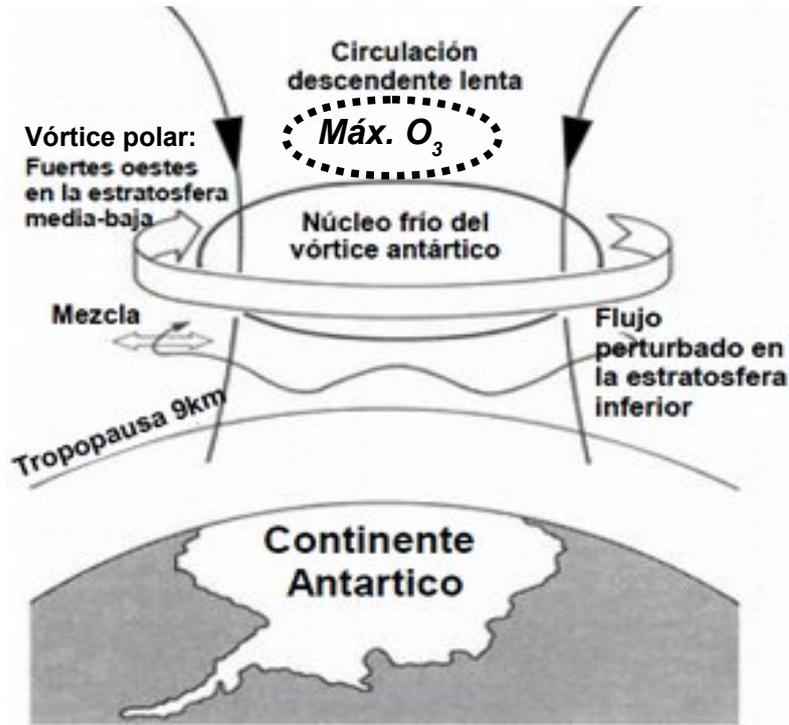
# Hielo marino en el Hemisferio Sur en Mayo (1979-2020)

 Hielo marino  Promedio 1981–2020: 10.16 millones de km<sup>2</sup>  
 Tendencia 1979–2020: +0.09 millones de km<sup>2</sup>/década (0.89%)



*La cobertura del hielo marino antártico continúa con un pequeño repunte que ha experimentado desde su declive precipitado de 2015 a 2017, aunque está lejos de recuperarse a su expansión récord de 2015. Esta reducción dramática reciente sorprendió a los científicos.*

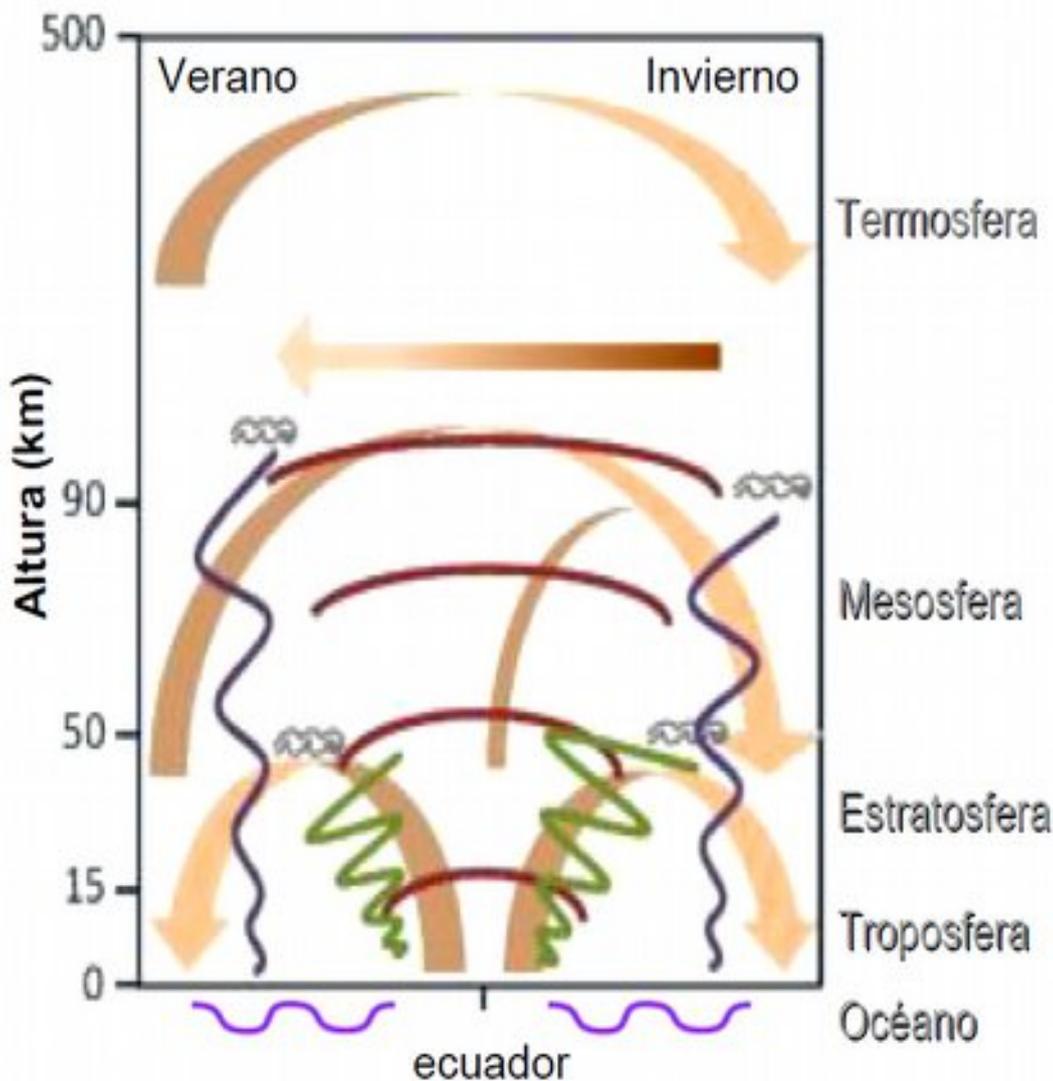
# Agotamiento del ozono antártico



El **ozono estratosférico** es un escudo solar natural de la Tierra, que **protege la vida de la peligrosa radiación solar ultravioleta**. Los productos químicos introducidos por el hombre en nuestra atmósfera, como los clorofluorocarbonos (CFC) utilizados durante muchos años como refrigerantes y en latas de aerosol, han afectado la capa de ozono de la Tierra (en particular en la Antártida). Gracias al Protocolo de Montreal (1987) desde mediados de los 90 los niveles mundiales de ozono se han vuelto relativamente estables. Los puntos blancos del gráfico son mediciones satelitales en los meses de octubre hasta 2017, a partir de allí (puntitos rojos) simulaciones numéricas que sugieren que debería volver a sus niveles anteriores a 1980 en la década del 2070.

El gráfico de la izquierda esquematiza los procesos atmosféricos en la ozonósfera que, de alguna manera, la aíslan de las circulaciones en latitudes medias.

# La atmósfera como un todo



Esquema muy simplificado

*La atmósfera inferior y media afectan las ondas atmosféricas de la atmósfera superior que se propagan hacia arriba.*

*Estas ondas pueden romperse, transfiriendo energía e impulso a la atmósfera circundante, lo que impulsa las circulaciones globales a gran escala y provoca mezcla.*

*Existe evidencia de que, como resultado del cambio climático provocado por el hombre en la atmósfera baja y media, tanto los procesos de generación de ondas como las condiciones de propagación han cambiado en las últimas 4-5 décadas, y se esperan más cambios en el futuro.*

*Esto ya ha causado cambios en los patrones de circulación a gran escala en la troposfera y la estratosfera, y es probable que también afecte el clima de la atmósfera superior.*

# Una hoja de ruta para la ciencia antártica y del océano austral para las próximas dos décadas y más allá

*La comunidad antártica internacional se reunió para identificar las preguntas científicas de mayor prioridad que los investigadores deberían aspirar a responder en las próximas dos décadas y más allá. En abril de 2014, el Comité Científico de Investigación Antártica (SCAR) convocó a 75 científicos y responsables políticos de 22 países para acordar estas prioridades.*

**Esta fue la primera vez que la comunidad antártica internacional formuló una visión colectiva, a través de discusiones, debates y votaciones.**

*Las preguntas se agruparon en siete temas:*

- i) **Atmósfera Antártica y Conexiones Globales** *(atmósfera)*
- ii) **El Océano Antártico y el hielo marino en un mundo cálido** *(hidrósfera y criósfera)*
- iii) **Capa de Hielo Antártico y Nivel del Mar** *(hidrósfera y criósfera)*
- iv) **Tierra dinámica – Sondeo bajo el hielo antártico** *(litósfera)*
- v) **La vida antártica en el precipicio** *(biósfera)*
- vi) **El espacio cercano a la Tierra y más allá – Los ojos en el cielo**
- vii) **Presencia humana en la Antártida** *(antropósfera)*

¡Muchas gracias por su atención!

