



Meteorologia Básica

Aula – Variabilidade e Mudanças Climáticas

Prof. Reinaldo Haas

Universidade Federal de Santa Catarina
- UFSC

O **Clima** da Terra possui variações em várias escalas de tempo, como a variação **sazonal** (e. g. Inverno e Verão); algumas variações que possuem frequência de alguns anos, como o

fenômeno **El Nino**, as **variações decadais**, e outros efeitos como o impacto dos **vulcões**.

Além disto outras variações **centenárias** e **milenaes** também causam mudanças embora sejam estas muito lentas.

Nesta aula vamos explorar alguns aspectos destas **variações climáticas**, vamos avaliar também as **mudanças climáticas** mais recentes, e os possíveis **cenários** futuros.

O Clima Global

Os fatores que produzem o clima em uma dada região (os **controladores climáticos**) são os mesmos que controlam as condições meteorológicas do dia a dia.

Estes controladores são:

1. A intensidade da **radiação solar** em função da latitude;

2. A distribuição de **terra-água**

3. As **correntes** oceânicas

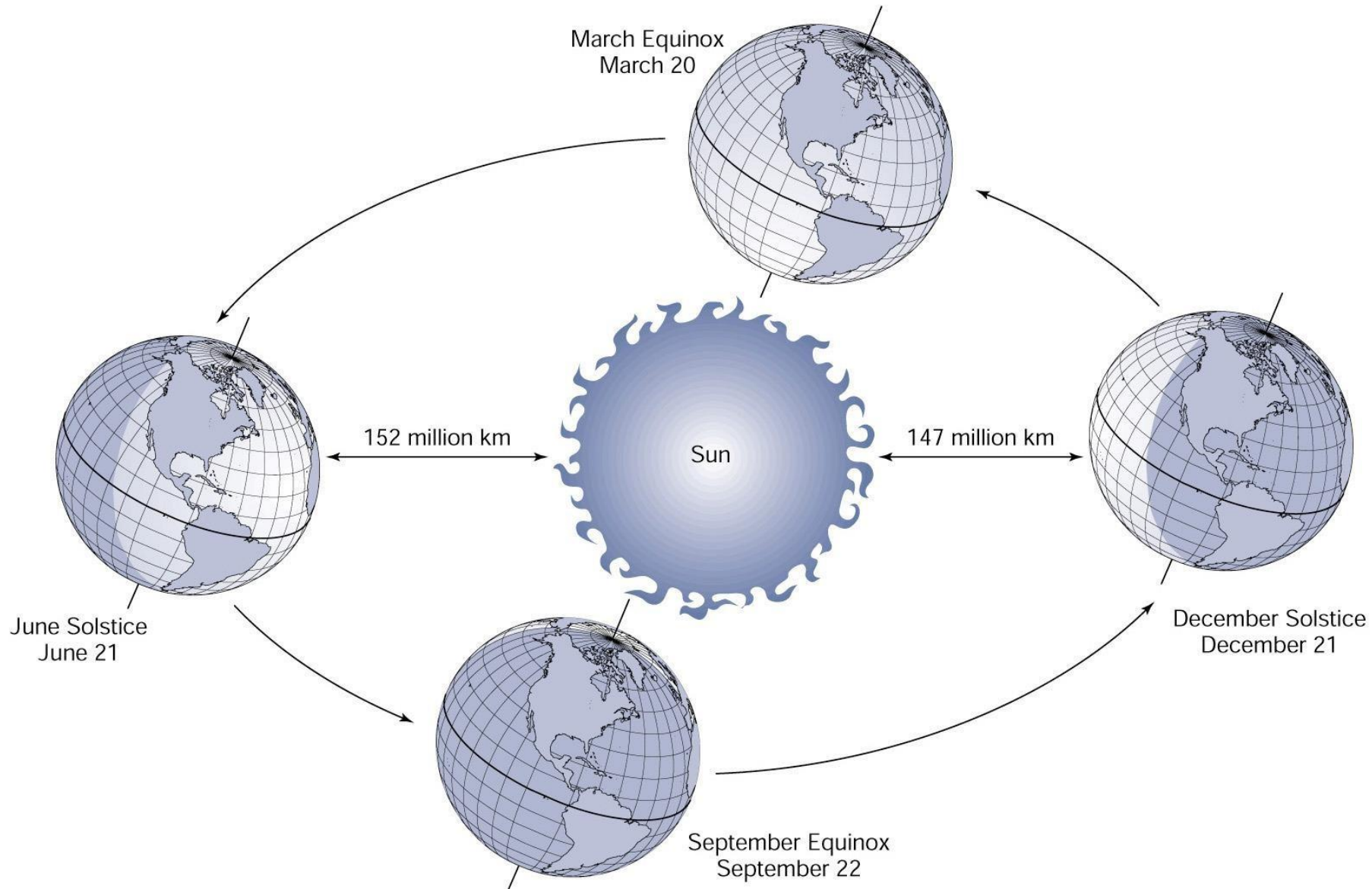
4. Os **ventos** predominantes

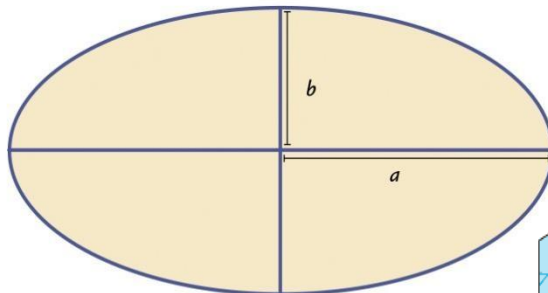
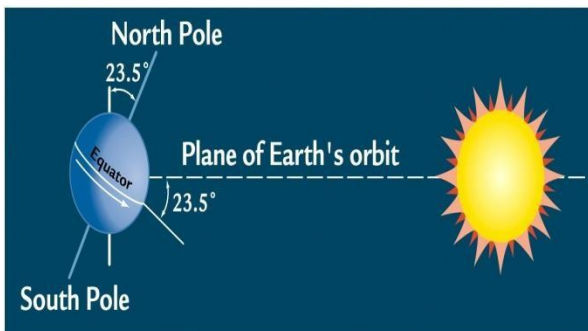
5. A posição média das regiões de alta e baixa **pressão**

6. As barreiras **montanhosas**

7. A **altitude**

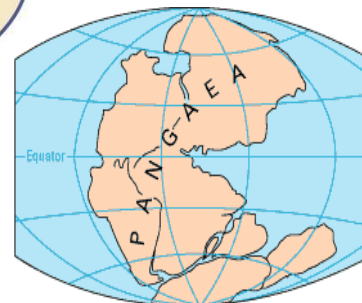
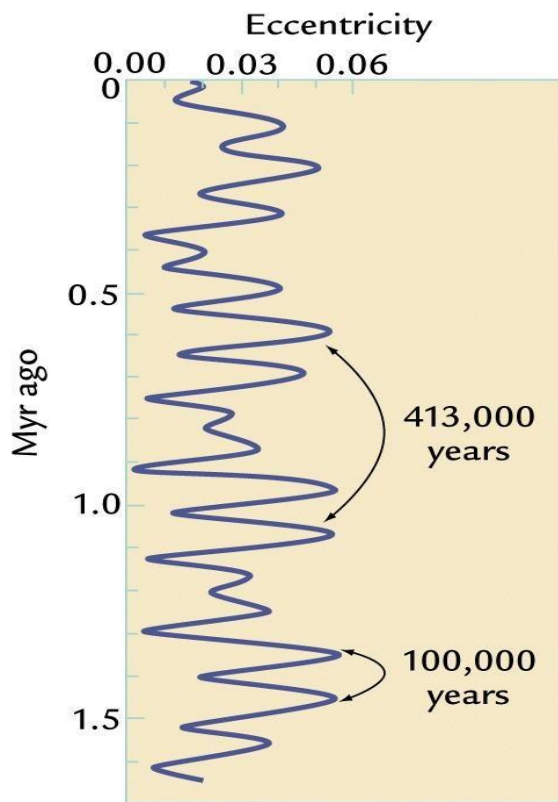
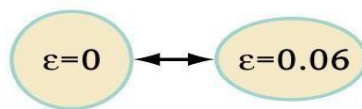
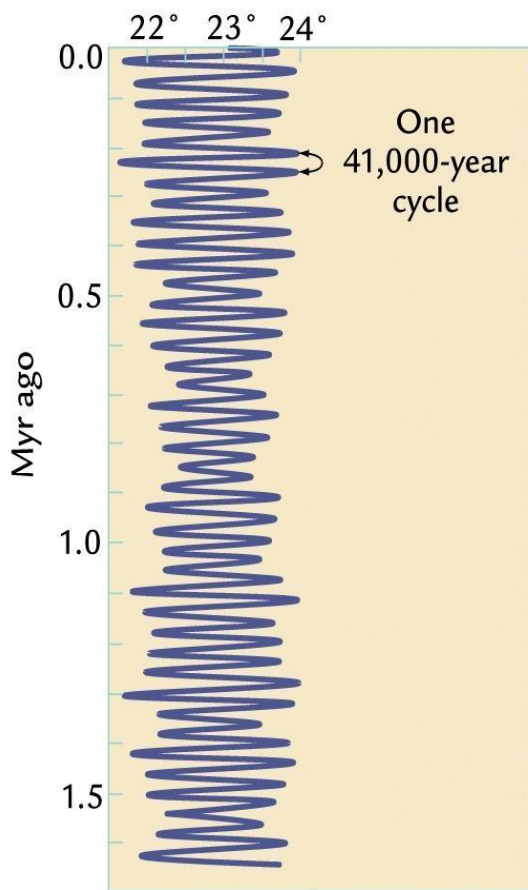
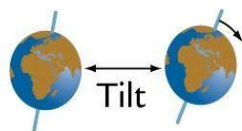
VARIABILIDADE SAZONAL





$$\text{Eccentricity } \epsilon = \frac{(a^2 - b^2)^{1/2}}{a}$$

Ciclos Milankovich



PERMIAN
225 million years ago



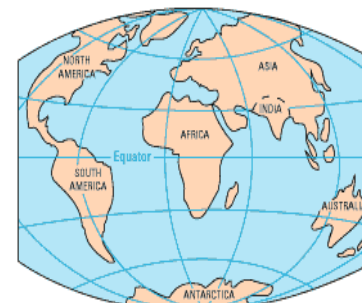
TRIASSIC
200 million years ago



JURASSIC
135 million years ago

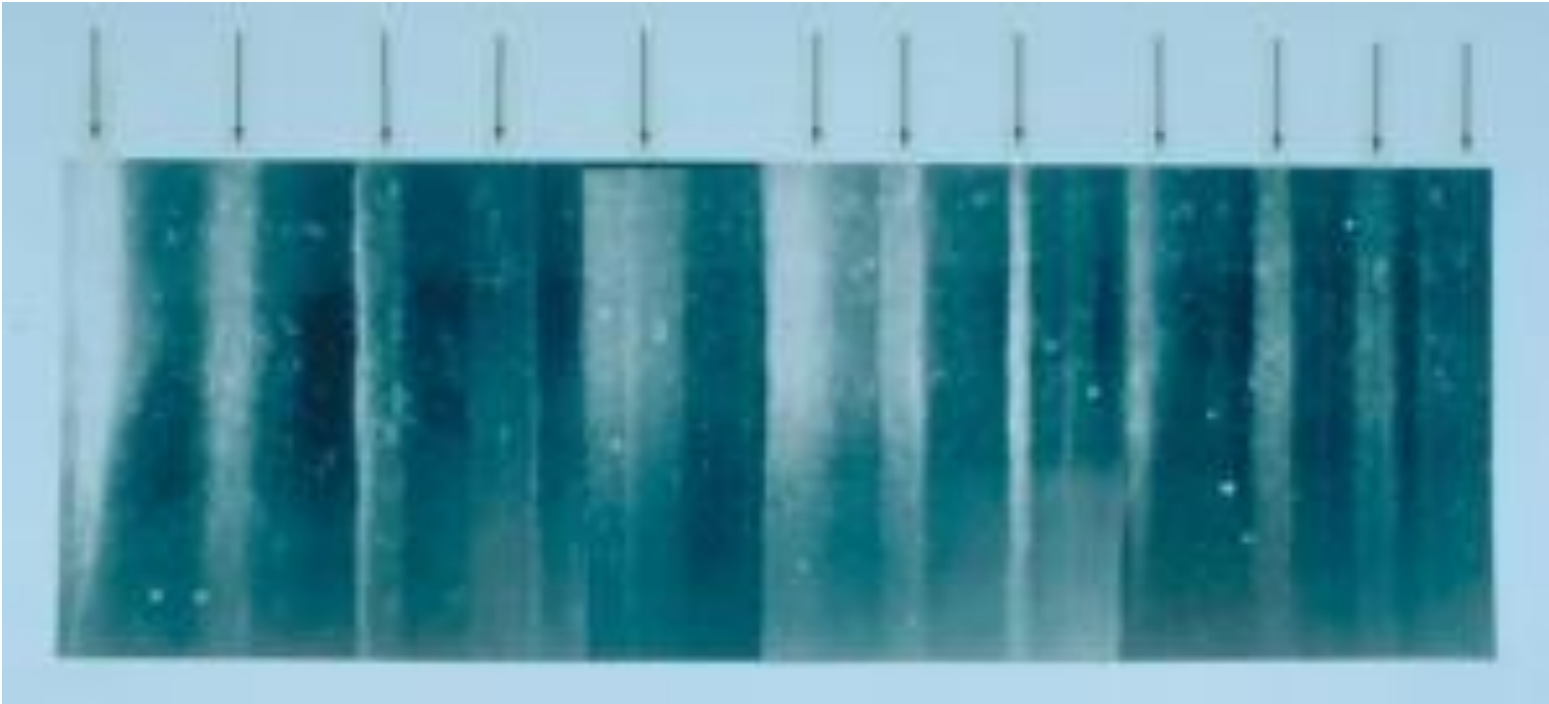


CRETACEOUS
65 million years ago



PRESENT DAY

O Clima no Passado (**Paleoclima**) pode ser estimado pela análise de blocos de gelo.



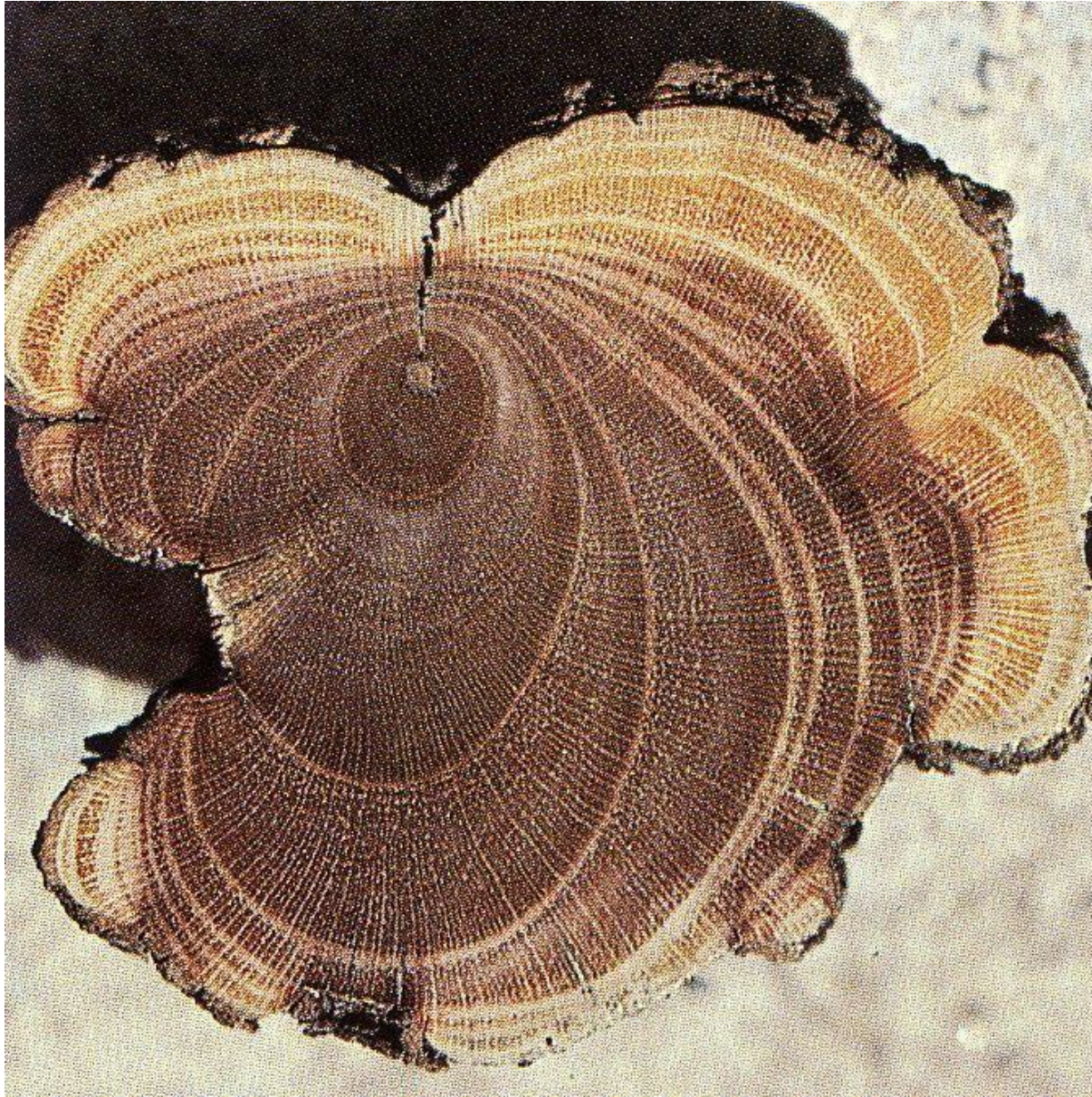
Este núcleo de gelo com 19 cm de comprimento e obtido de 1855 m de profundidade mostra camadas anuais no gelo. Esta seção contém 11 camadas anuais com camadas de **verão** (com setas) impressadas entre camadas de **inverno** mais escuras. Datação e análise isotópica das bolhas de ar aprisionadas permitem identificar o clima e gases atmosféricos.

<http://www.antarcticglaciers.org/glaciers-and-climate/ice-cores/ice-core-basics/>



Cilindros de Gelo

O Clima no Passado (**Paleoclima**) pode ser estimado pela análise de troncos de árvores e sedimentos de lagos e oceanos.

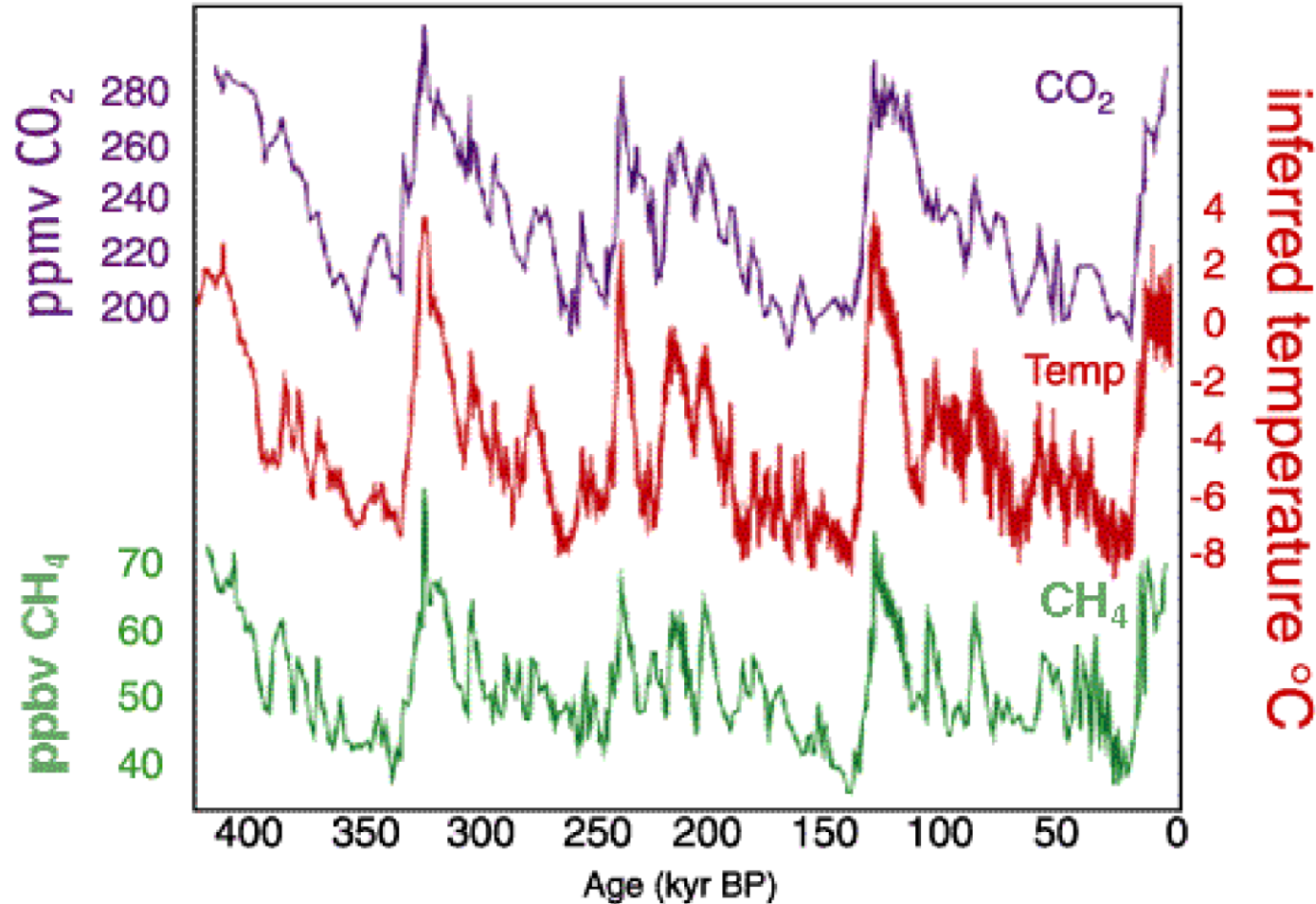


Cilindros de Arvores

Sedimentos de Lagos e Oceanos

Dados dos cilindros de gelo da Antártida mostram que houveram variações de temperatura com grande associação com as variações dos gases do efeito estufa (e.g. CO_2 , CH_4 = metano).

4 glacial cycles recorded in the Vostok ice core

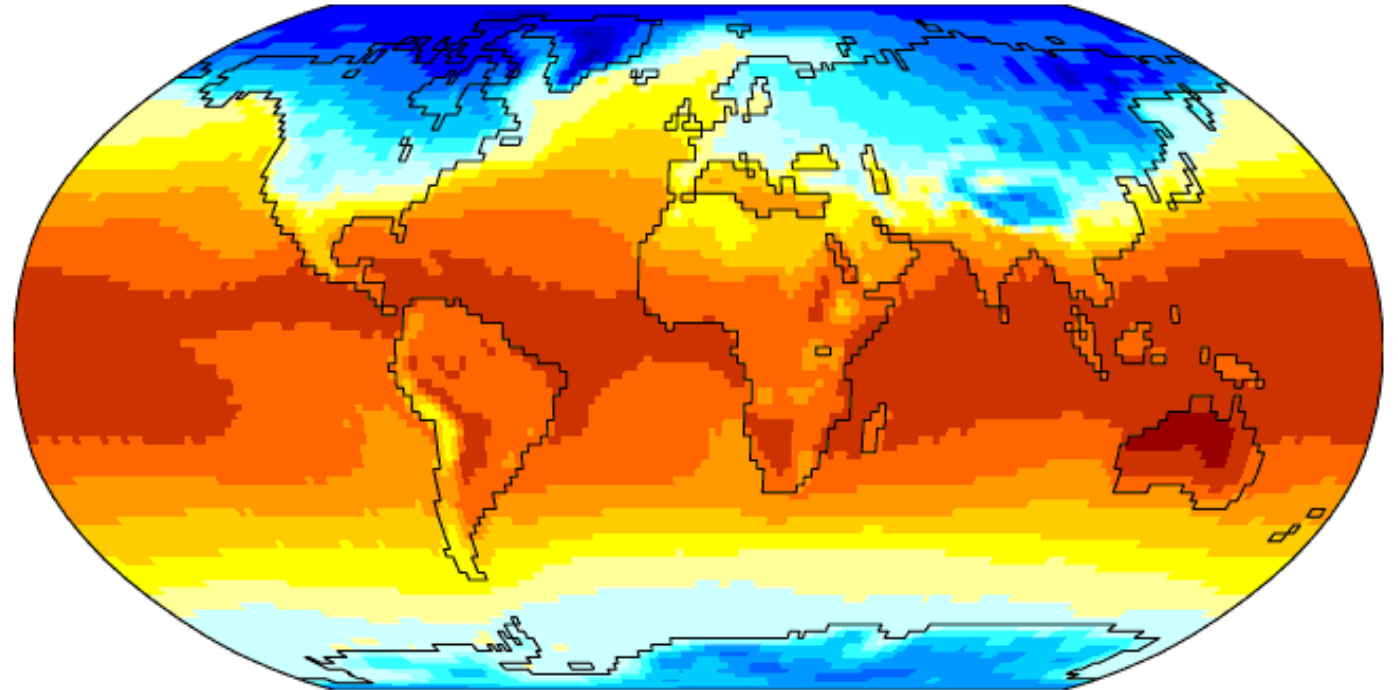


Temperatura do ar global

OBS: Próximo dos continentes temos variações devido em parte ao **aquecimento** diferencial e das **correntes** oceânicas. Próximo da América do Sul temos as correntes do Brasil e das Malvinas no Oceano Atlântico e ventos de sul a leste do Oceano Pacífico que causam **ressurgência**. Como as regiões continentais se aquecem e se resfriam mais rapidamente do que os oceanos, as variações serão muito maiores sobre os continentes.

Air Temperature

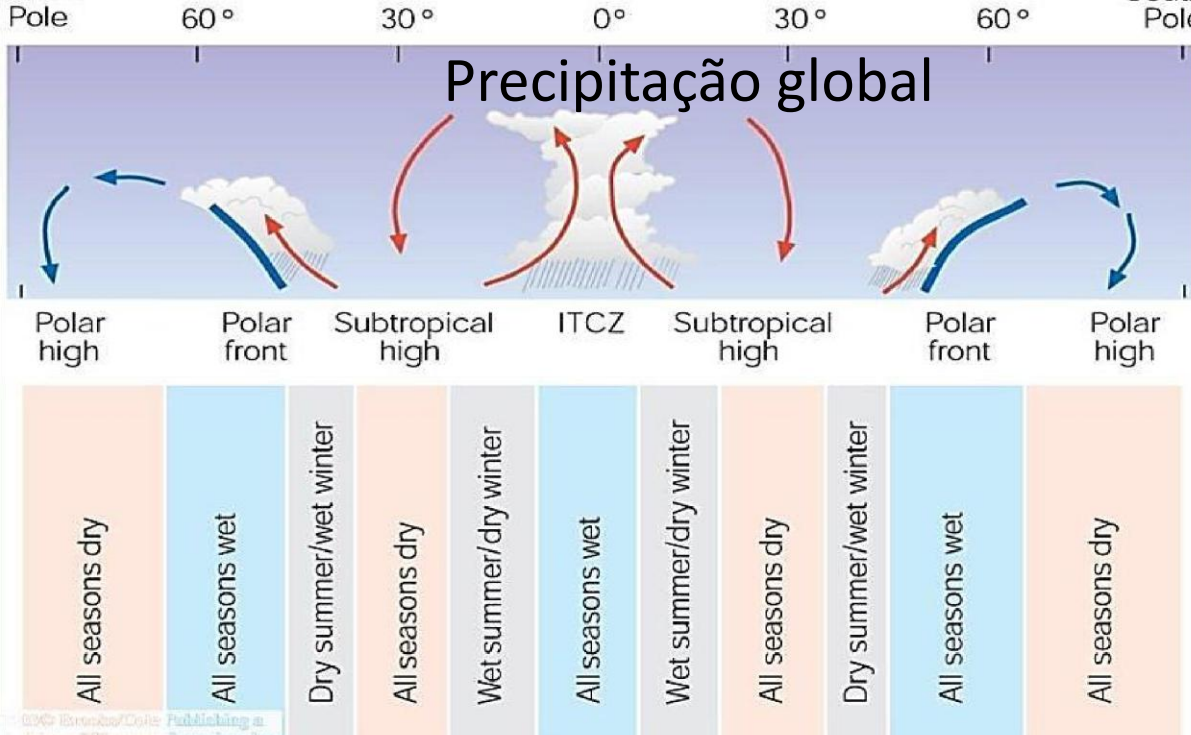
Dec



-50 -40 -35 -30 -25 -20 -15 -10 -5 0 5 10 15 20 25 30 35°C

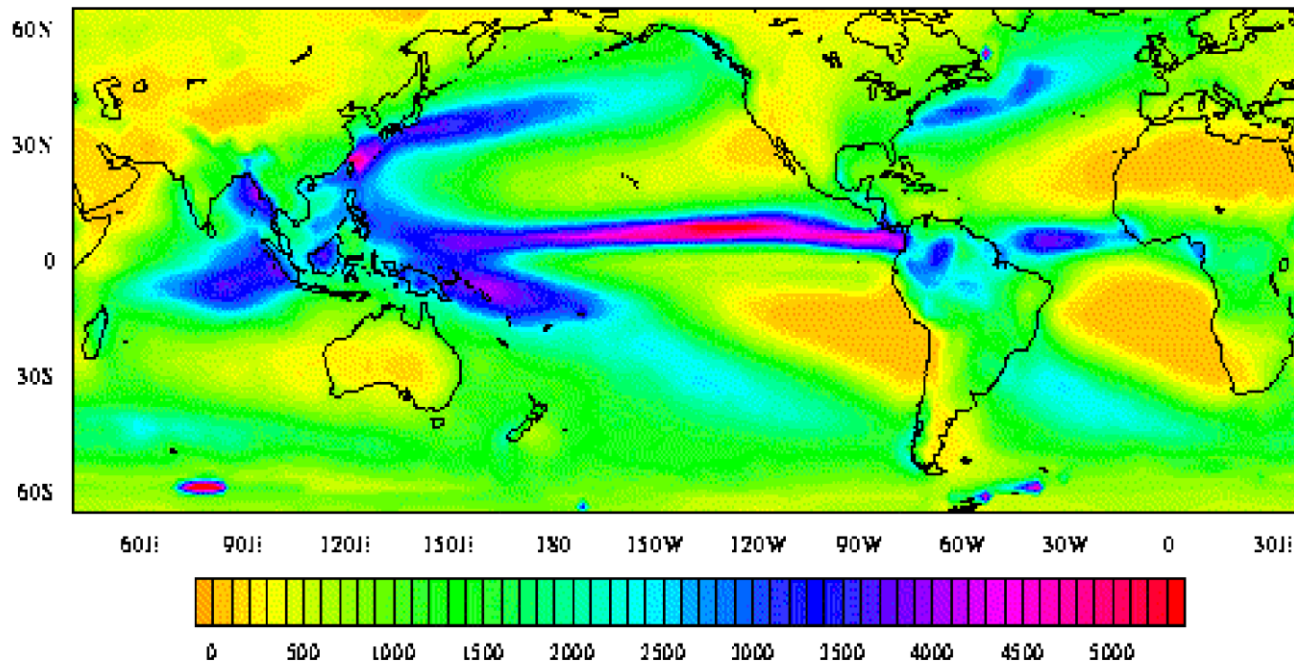
Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies
Animation: Department of Geography, University of Oregon, March 2000

Em geral o clima do **interior dos continentes** são mais extremos, tendo temperaturas mais altas no verão e mais frias no inverno, se comparadas com as regiões costeiras.

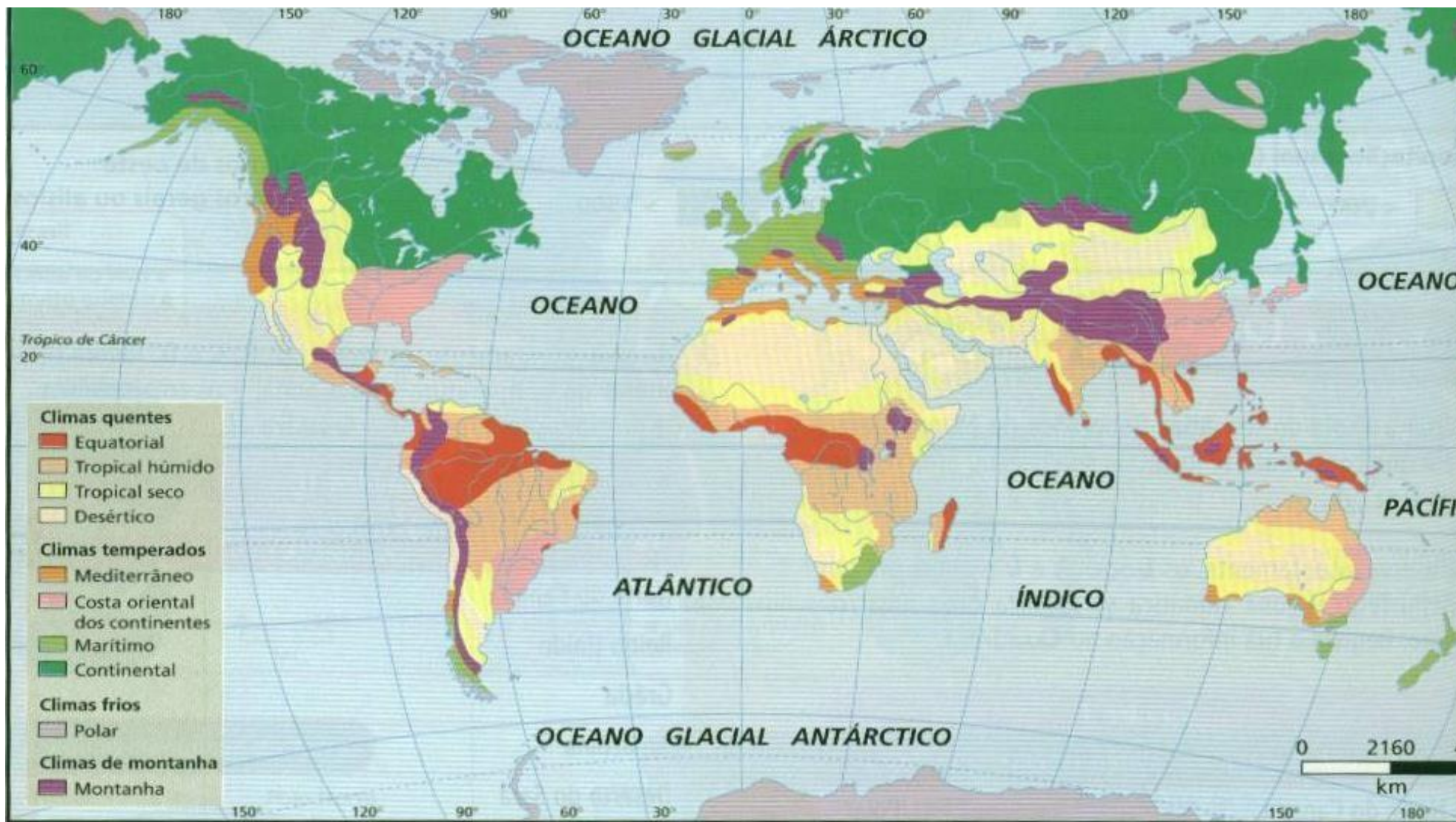


A circulação global determina em média a distribuição de **precipitação** do planeta.

Geralmente ocorre maior precipitação nos locais onde o ar sobe (e.g. **ITCZ** e frente polar) e menor onde ocorre subsidência (alta subtropical).

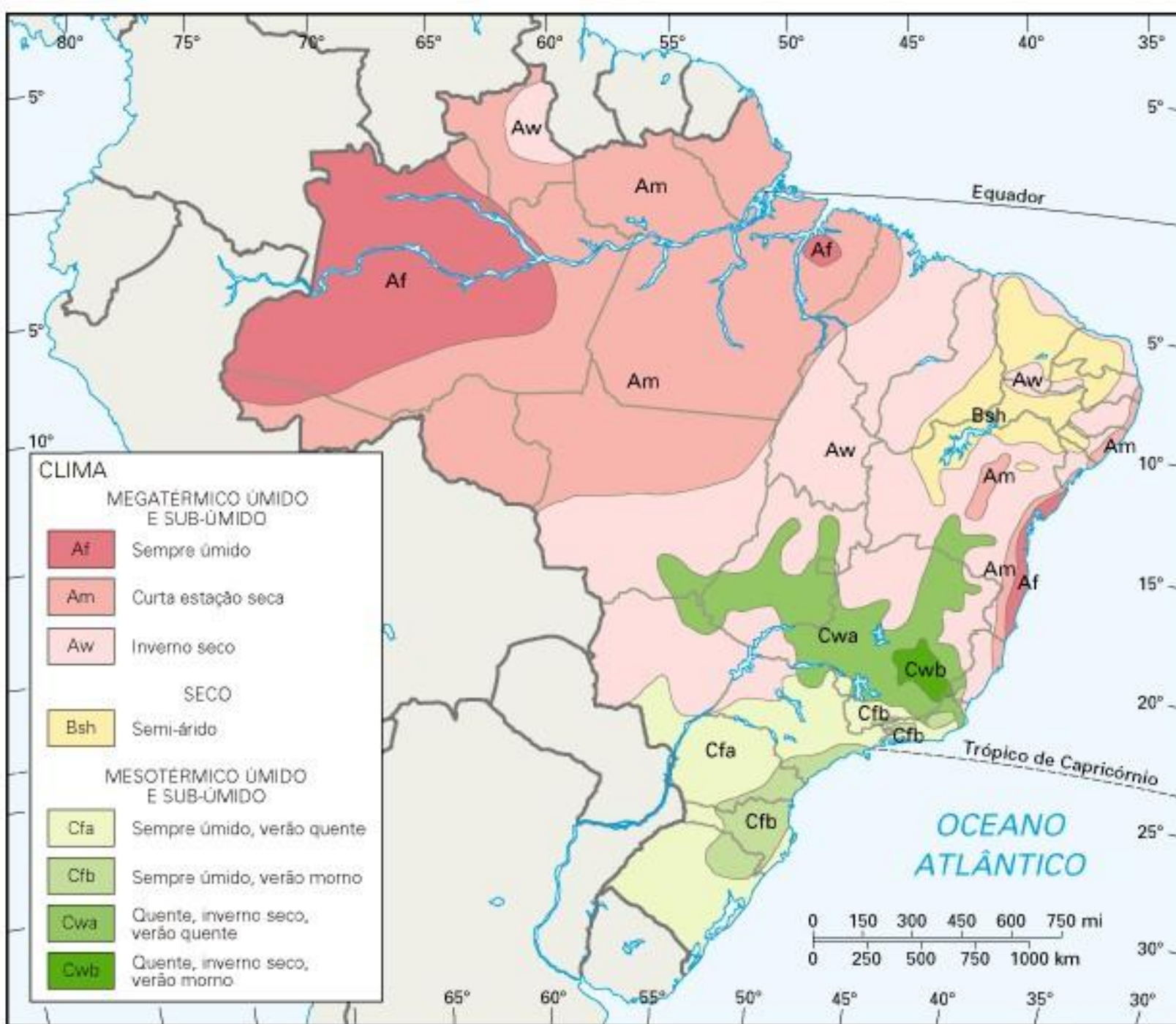


Mapa climático
segundo Köppen)



Neste mapa, podemos observar a diversidade de **climas** que existe no nosso planeta. Eles influenciam, entre outros fatores, as formações vegetais, as espécies animais, as características e os modos de vida dos povos.

Aplicação da classificação Köppen para o Brasil



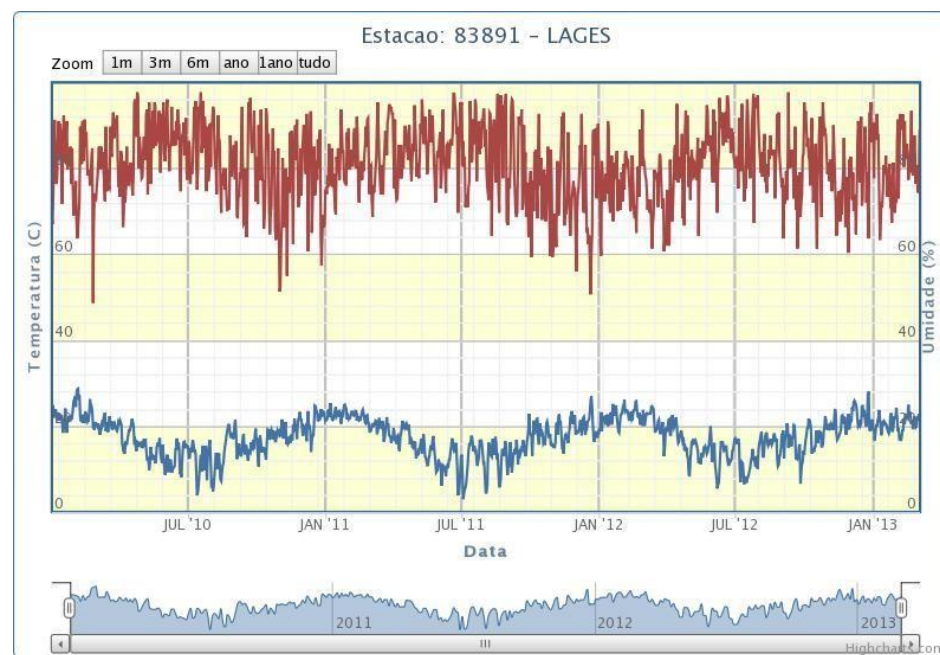
Clima do interior x litoral

Em geral as áreas **continentais** possuem maior variabilidade do que as áreas **litorâneas**, pois as superfícies de terra se esquentam e se resfriam mais rápido do que as superfícies aquáticas (oceânicas).

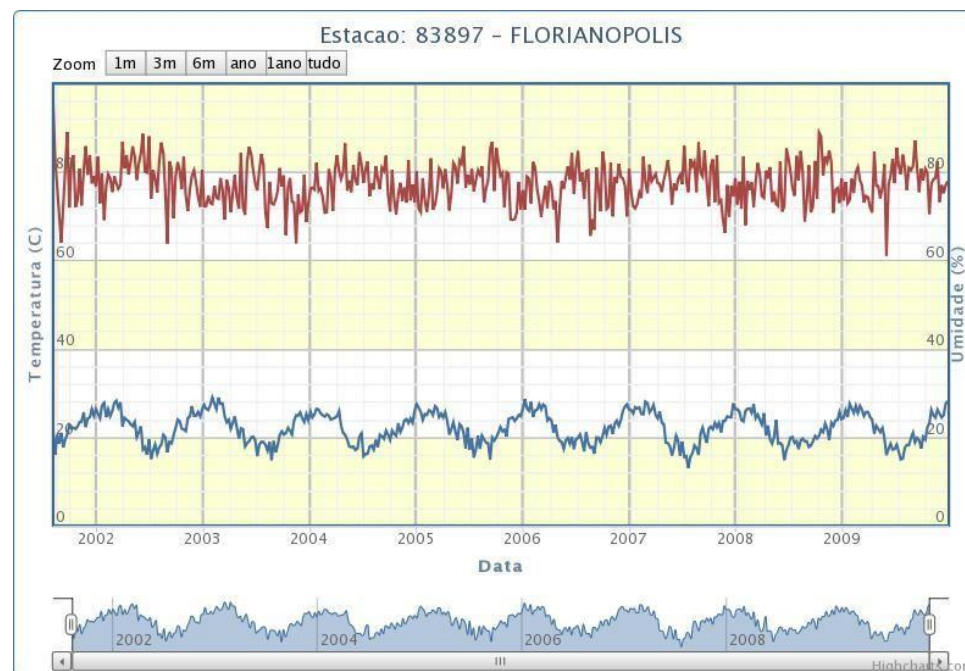
Localidades mais altas também possuem climas mais frios.

Fonte: INMET

http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=rede_estacoes_conv_graf

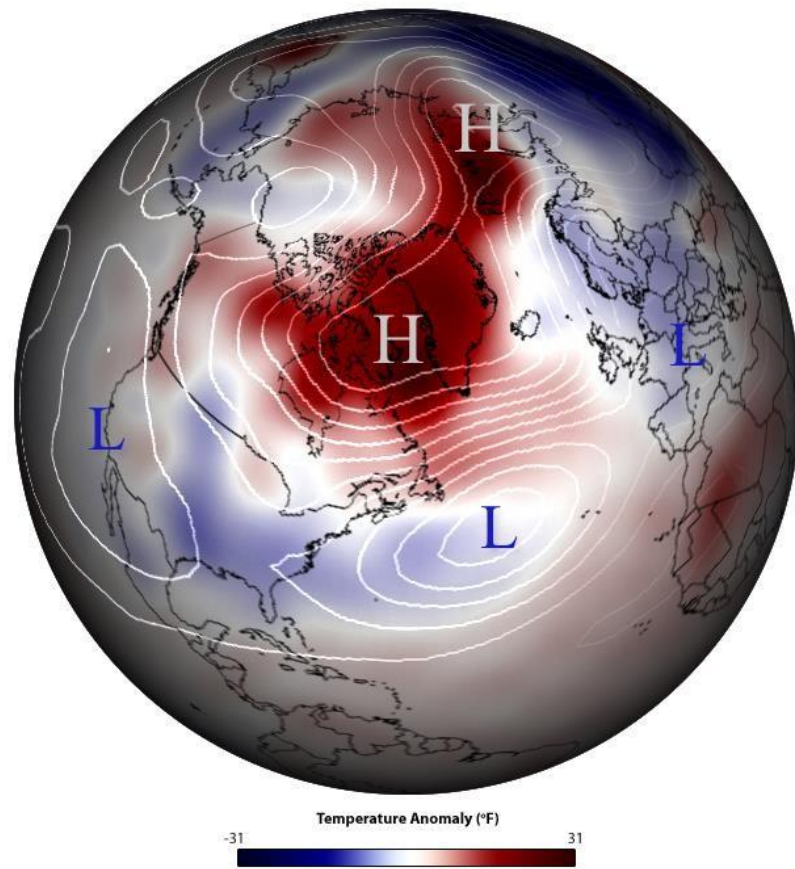


Lages
Continental

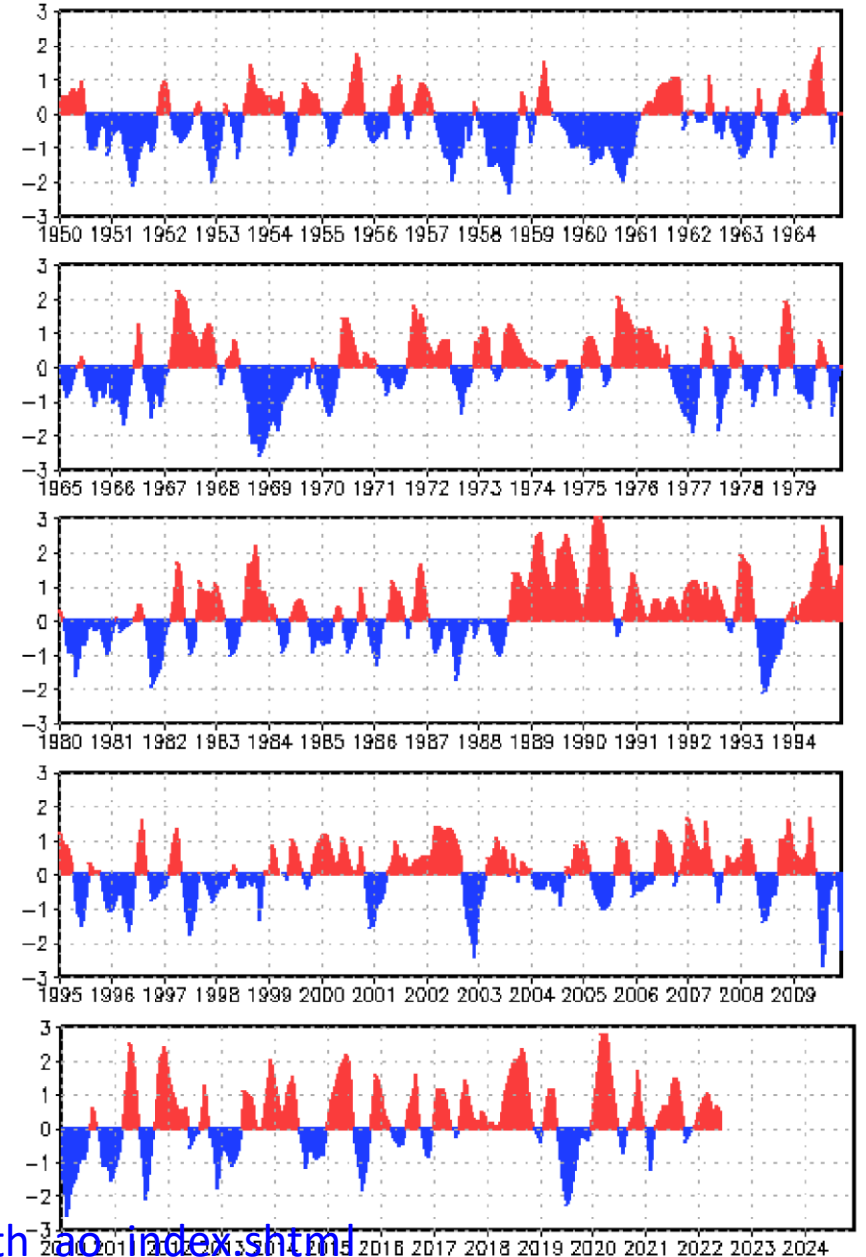


Florianopolis
Litoral

A **Oscilação do Ártico** refere-se variações dos padrões de **campos de pressão opostos** na região do Ártico nas regiões que compreendem as latitudes médias e altas do Hemisfério Norte.

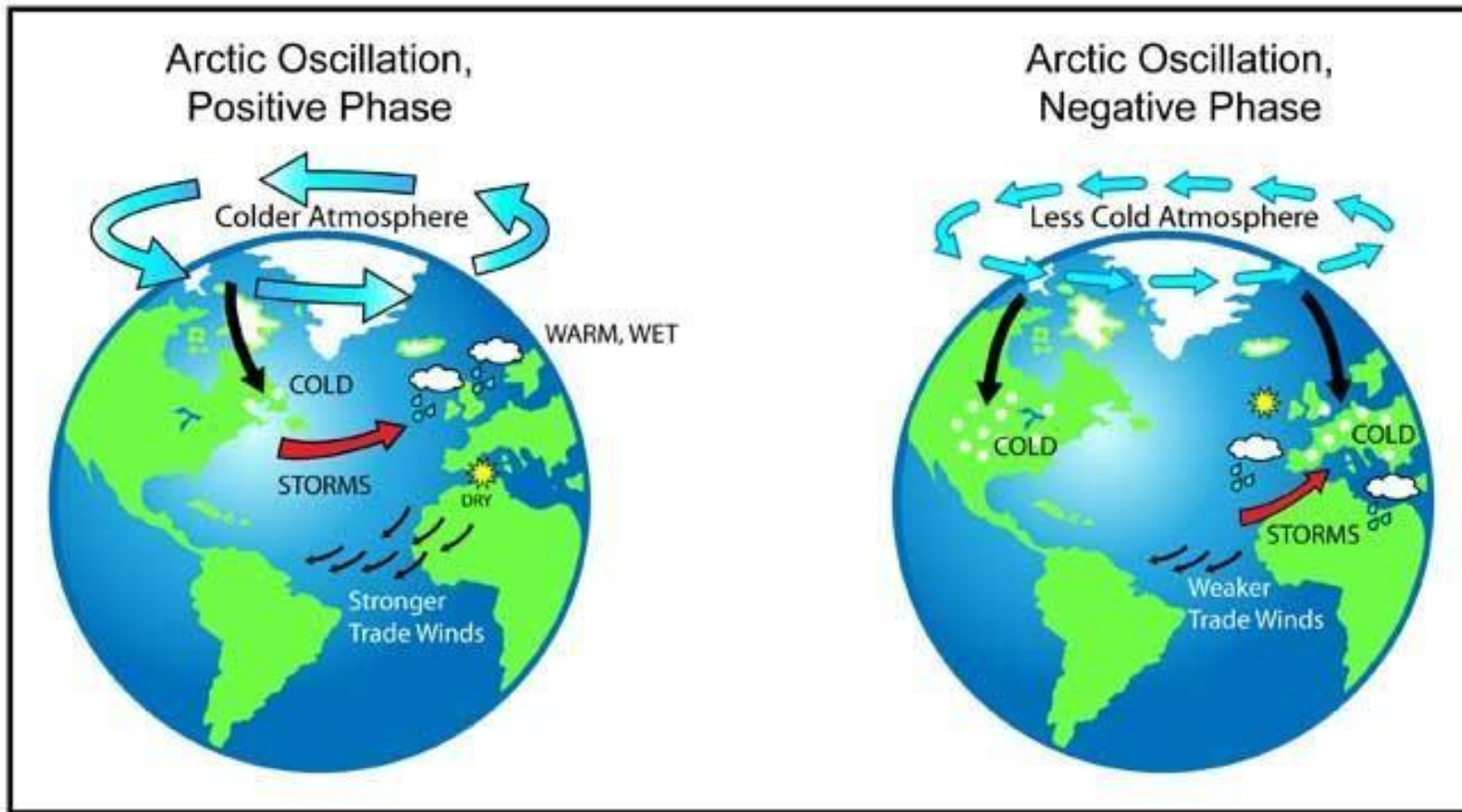


Standardized 3-Month Running Mean AO Index Through June 2022



https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/month_ao_index.shtml

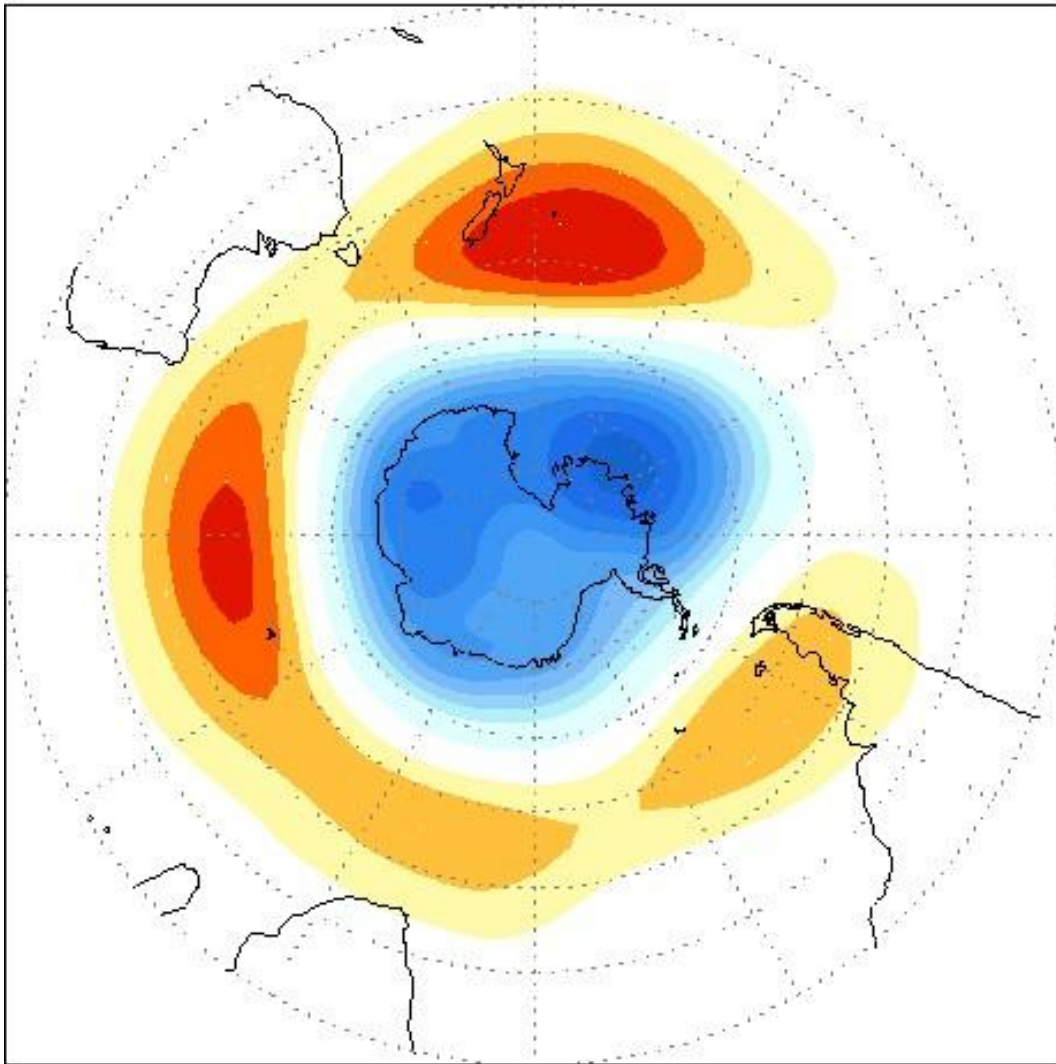
Oscilação do Ártico e o clima



Na fase **positiva** (esquerda) é observada alta pressão atmosférica (H) nas latitudes médias em comparação com o Ártico causando invernos moderados na América do Norte e Europa, e **ventos alíseos mais fortes**.

Na fase **negativa** (à direita) a pressão atmosférica no Ártico fica mais alta causando invernos rigorosos na América do Norte e Europa, e **ventos alíseos mais fracos** nos trópicos.

Leading EOF (27%) shown as regression map of 700mb height (m)



Padrão do modo principal de uma **Função Ortogonal Empírica (EOF)** a partir de dados mensais da altura da camada de 700 hPa para o período entre os anos de 1979-2000.

Oscilação Antártica

A **Oscilação Antártica** é a variação do padrão dominante da circulação troposférica sendo caracterizado pelas anomalias de pressão atmosférica entre a região da Antártica e da região entre 40-50 latitude Sul.

Um índice **positivo** está associado a condições de seca sobre o sul da **América do Sul**, Nova Zelândia e Tasmânia e condições de chuva sobre grande parte da Austrália e África do Sul. Fortes ventos contribuem para manter massas de ar frios na região Antártica.

Oscilação Antártica

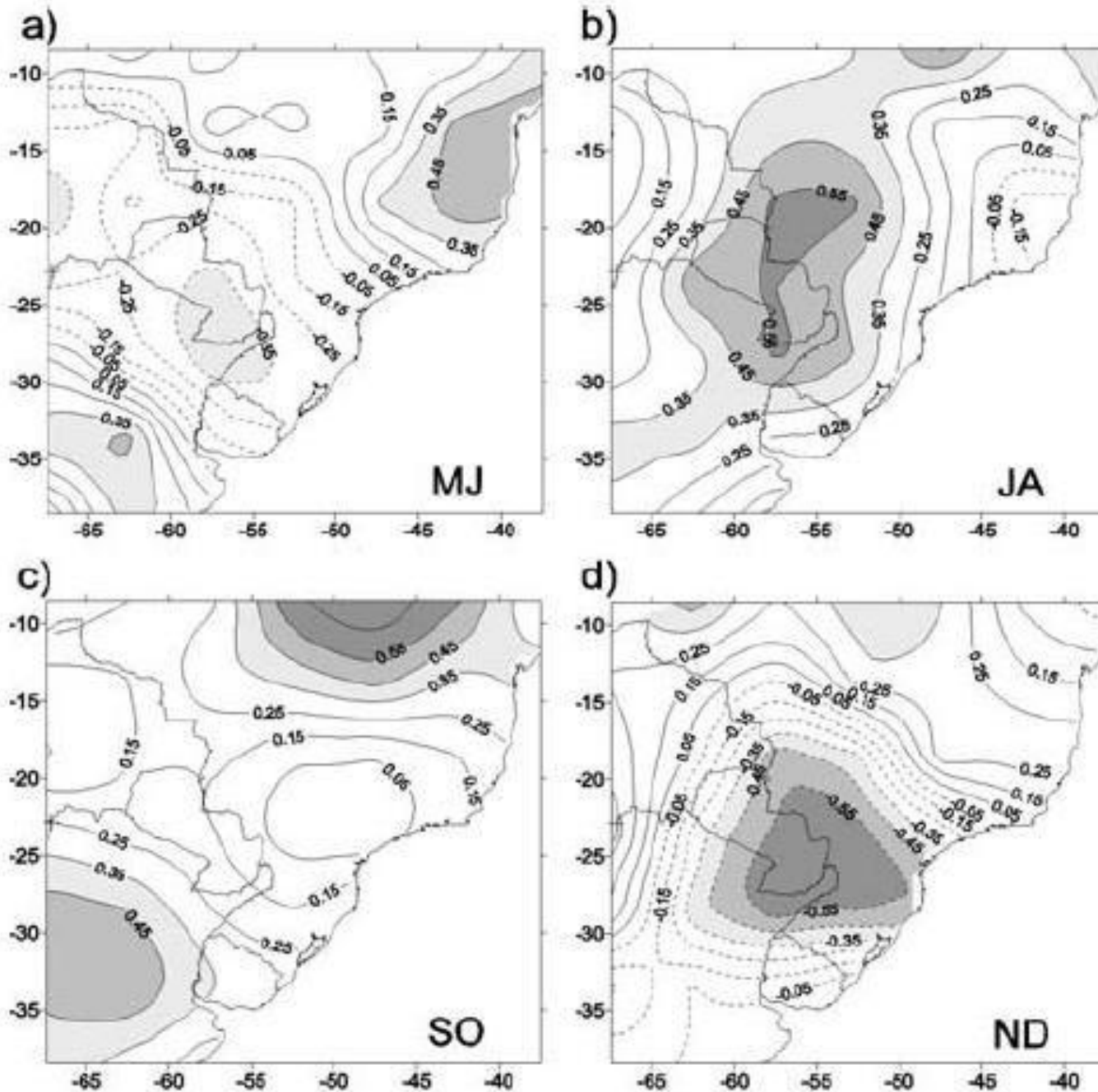
Oscilação Antártica

Mapa de correlação entre o índice da **Oscilação Antártica** (excluindo El Niño) e **precipitação** (chuvas).

Note as correlações positivas no oeste do sul-sudeste do Brasil.

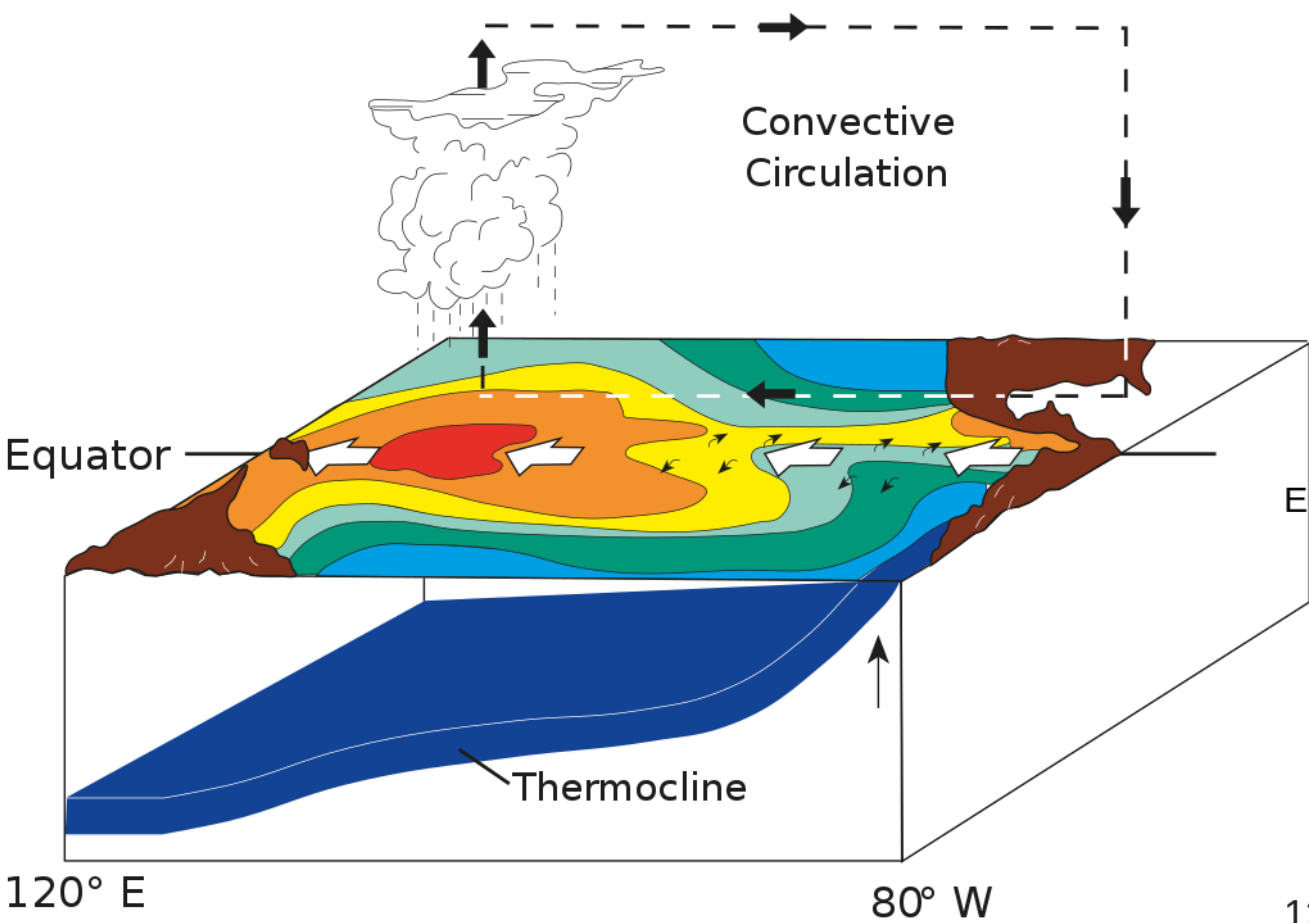
(Silvestri e Vera, GRL 2003)

https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/aao/aao.shtml

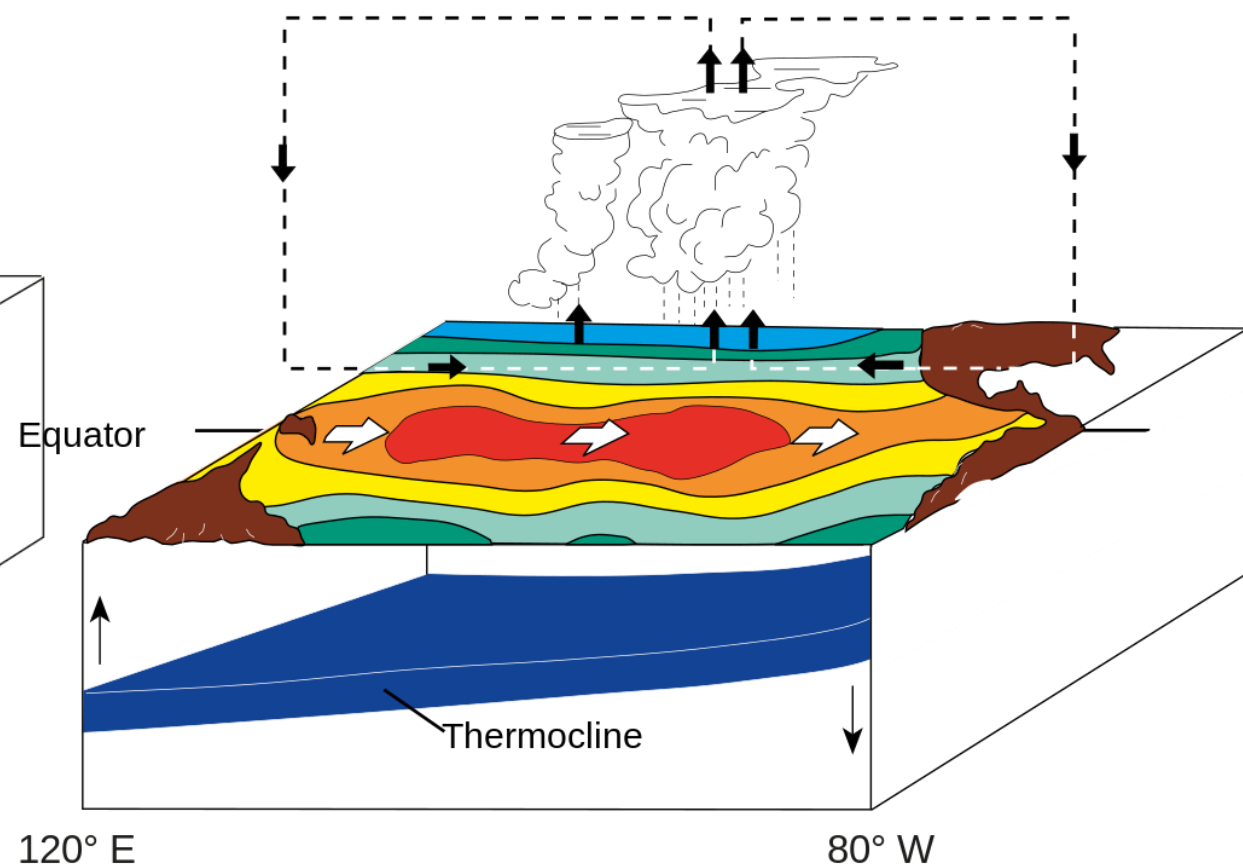


El Niño

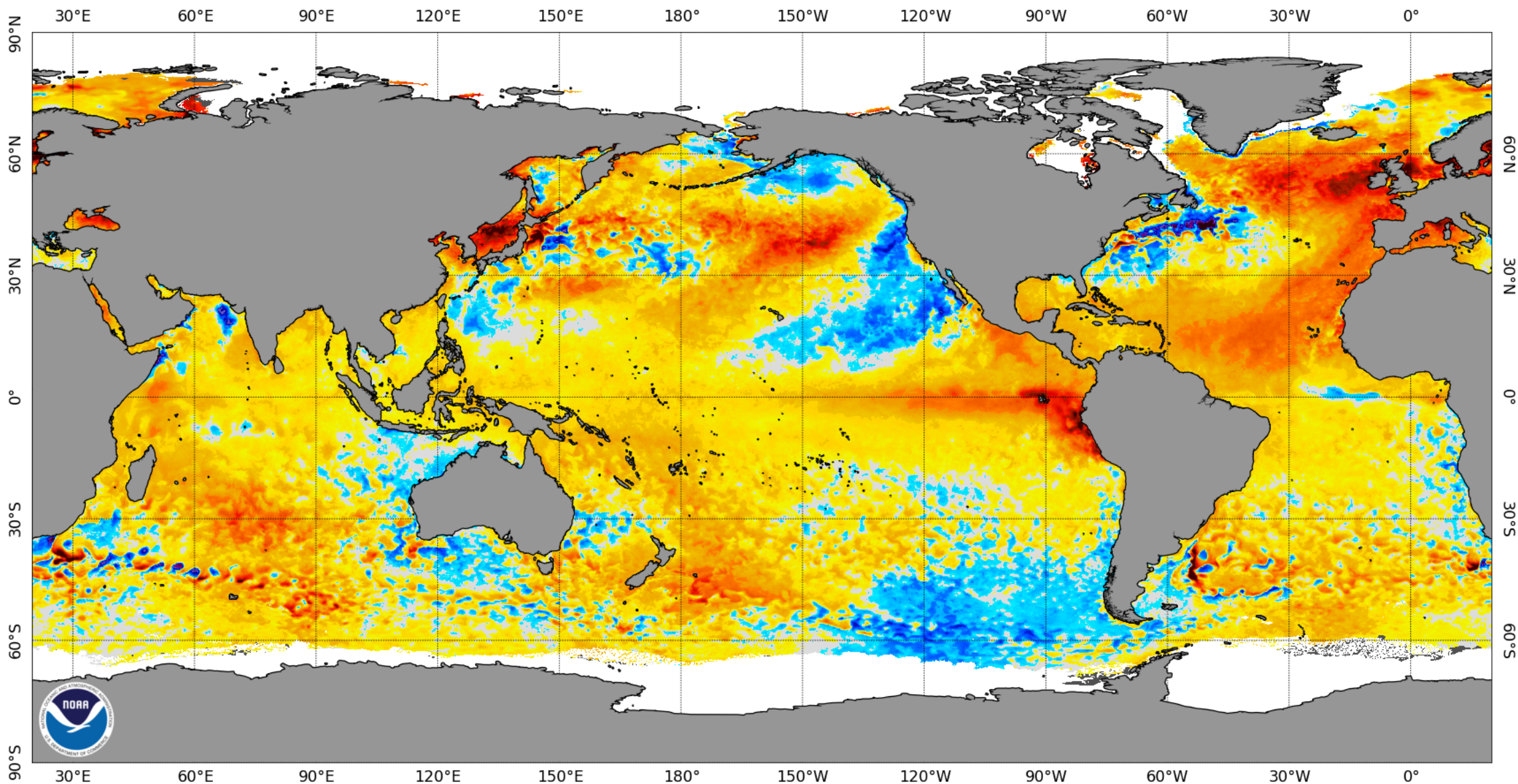
Normal Conditions



El Niño Conditions

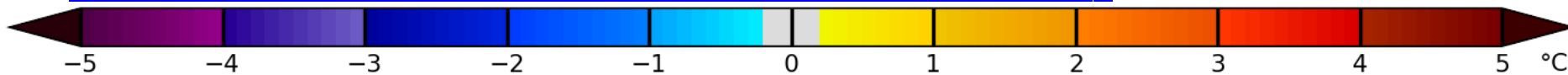


NOAA Coral Reef Watch Daily 5km SST Anomalies (v3.1) 18 Jun 2023



https://www.ospo.noaa.gov/data/cb/ssta/ssta_daily.current.png

■ No data
■ Ice



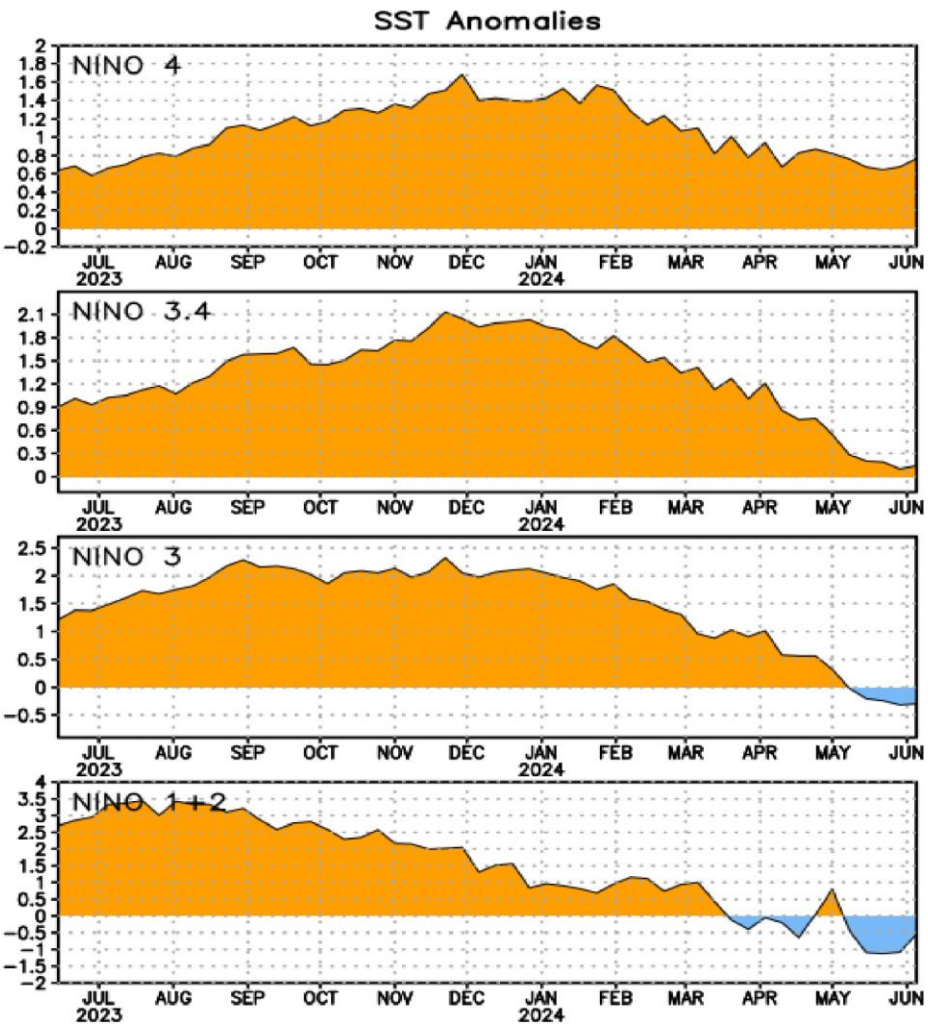
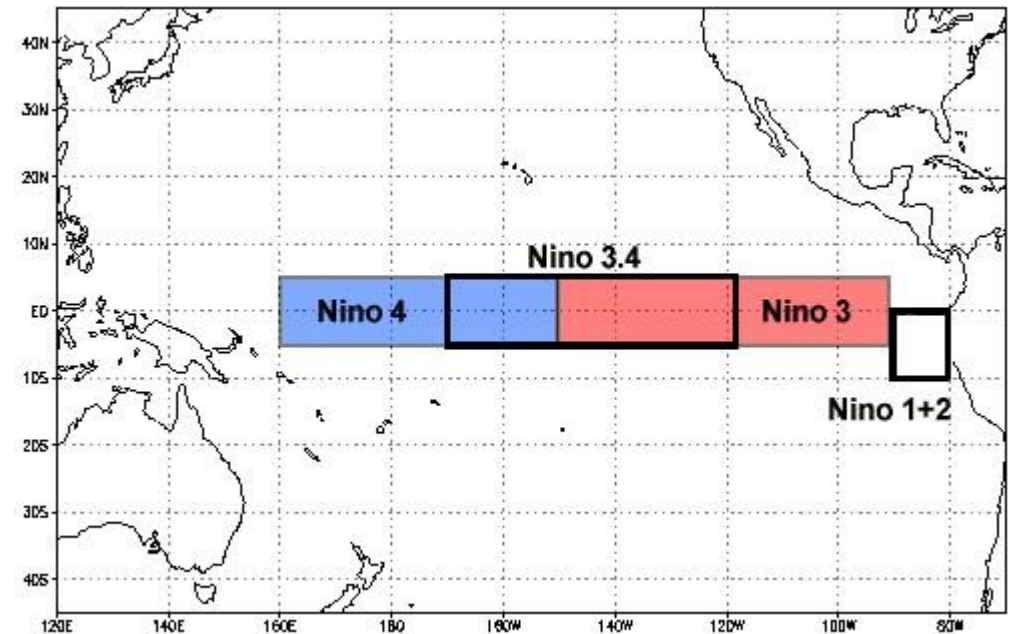


Figure 2. Time series of area-averaged sea surface temperature (SST) anomalies ($^{\circ}\text{C}$) in the Niño regions [Niño-1+2 (0° - 10°S , 90°W - 80°W), Niño-3 (5°N - 5°S , 150°W - 90°W), Niño-3.4 (5°N - 5°S , 170°W - 120°W), Niño-4 (5°N - 5°S , 150°W - 160°E)]. SST anomalies are departures from the 1991-2020 base period weekly means.

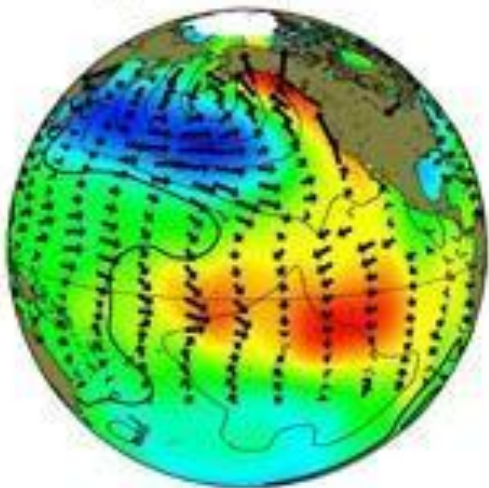
Os índices em **Niño 4** foram positivos nos últimos meses.

O **Niño 3** mostra uma diminuição de temperatura e o **Niño 1+2** mostram um resfriamento.

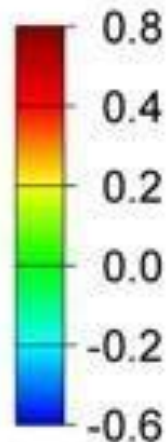
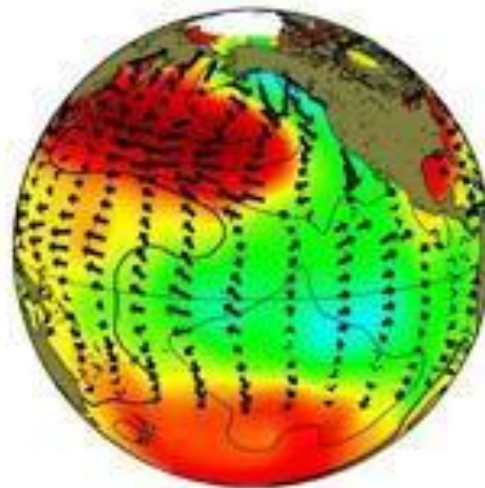


Pacific Decadal Oscillation

positive phase



negative phase

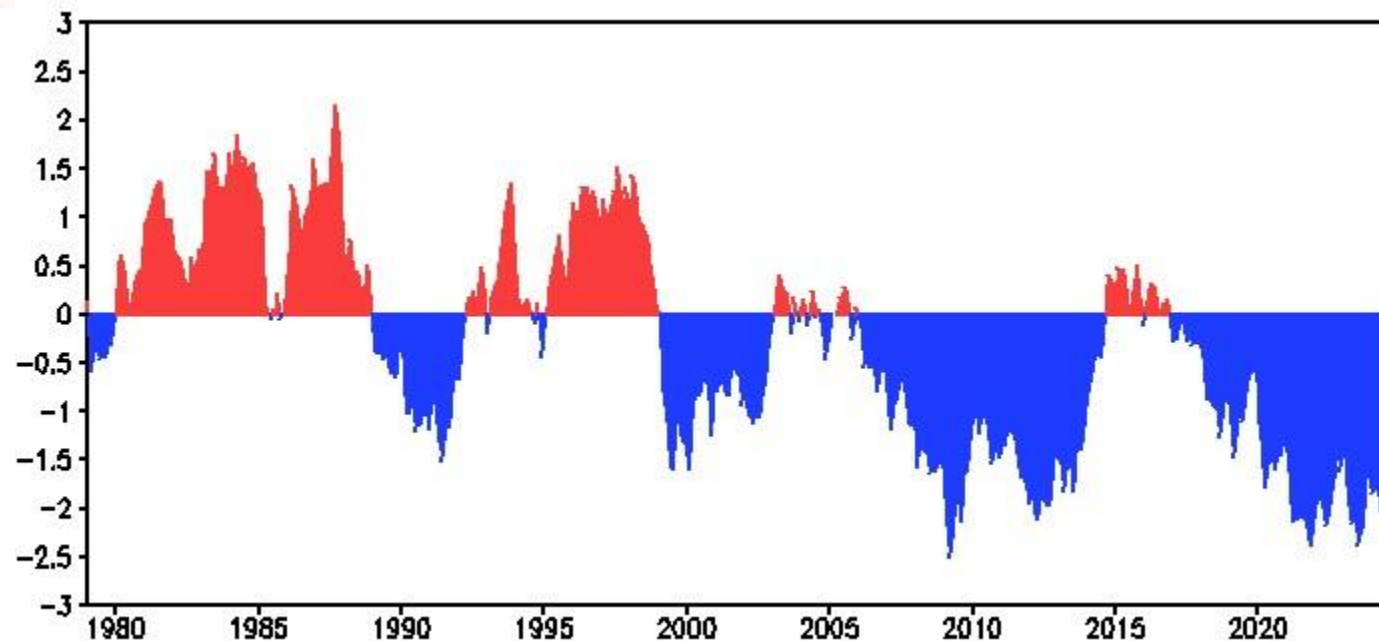


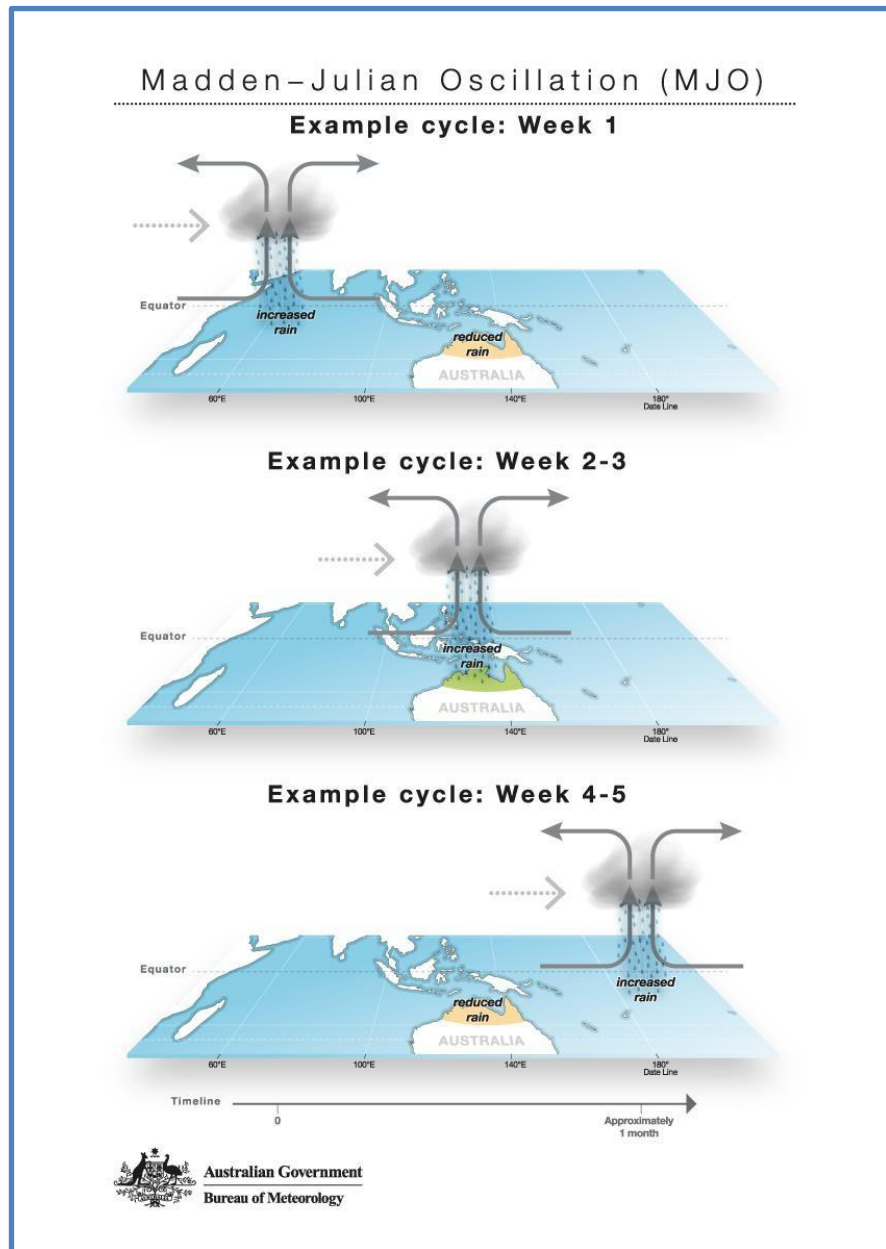
A Oscilação Decadal do Pacífico (ODP) é um padrão climático natural que ocorre na região do Oceano Pacífico.

Ela é caracterizada por mudanças lentas e periódicas nas temperaturas da superfície do mar e nos padrões de circulação atmosférica, com um período médio de variação de aproximadamente 20 a 30 anos.

Na fase positiva da ODP, as temperaturas da superfície do mar são mais quentes do que a média no oeste do Pacífico

Na fase negativa da ODP, ocorre o oposto. As temperaturas da superfície do mar são mais frias no oeste do Pacífico e mais quentes no leste





Oscilação Maden Julian

Perturbação que se propaga pela região equatorial ao redor do globo

A **Oscilação Madden-Julian (OMJ)** é um fenômeno climático de grande escala que ocorre nos trópicos.

Ela foi descoberta pelos meteorologistas Roland Madden e Paul Julian na década de 1970.

A OMJ é caracterizada por uma perturbação atmosférica que se propaga de oeste para leste e afeta os padrões de precipitação e os ventos em escala global.

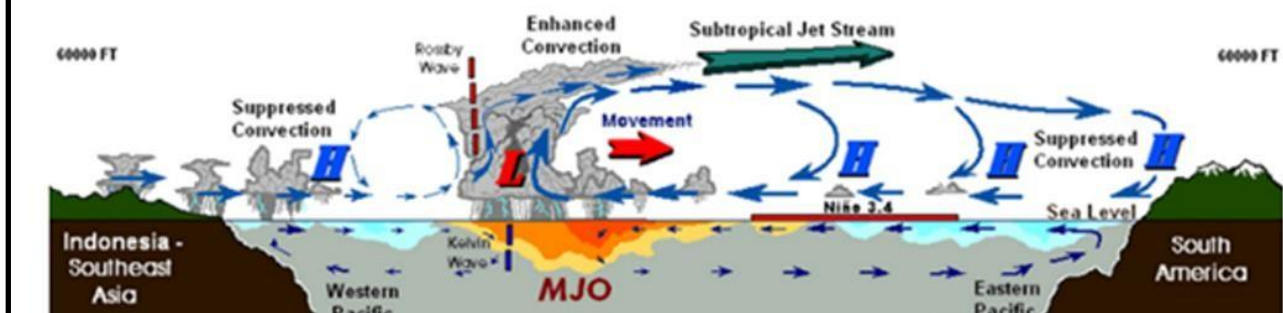
A OMJ é um fenômeno de curta duração, geralmente com um ciclo de 30 a 90 dias. Ela é caracterizada por um padrão de nuvens e chuvas que se desloca ao longo dos trópicos.

<https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/MJO/mjo.shtml>

Oscilação Maden Julian

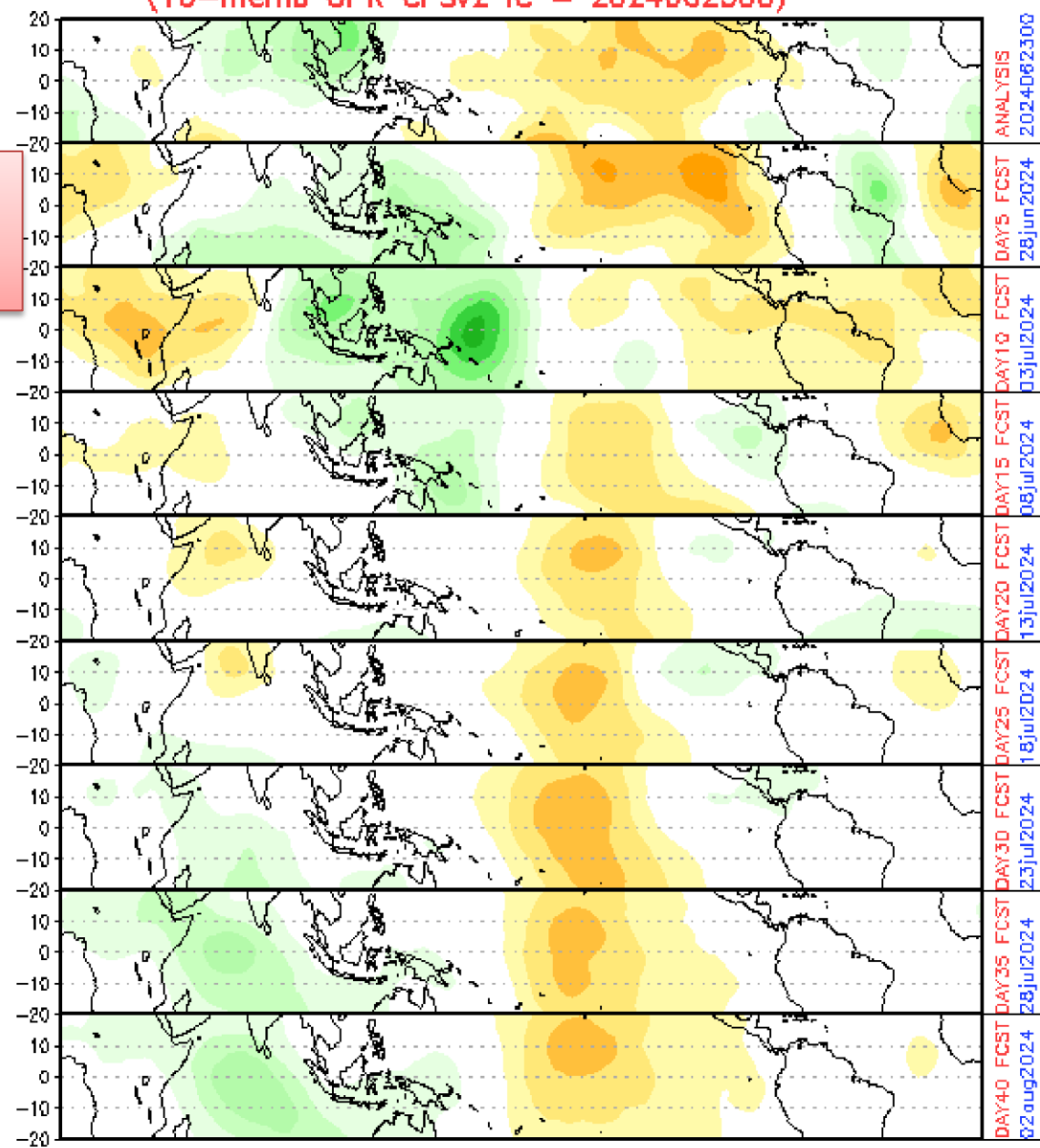
Perturbação que se propaga pela região equatorial ao redor do globo

Madden-Julian Oscillation (MJO) in the Tropical Pacific Ocean

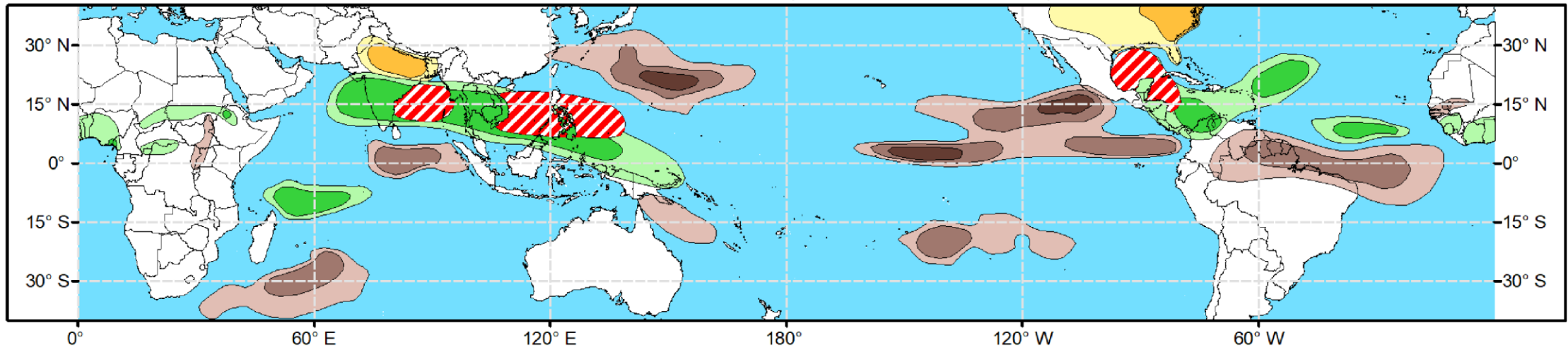


Previsão empírica

CHI 200 hPa 40-DAY forecast (00z23jun2024-02aug2024)
(16-memb OPR CFSv2 IC = 2024062300)

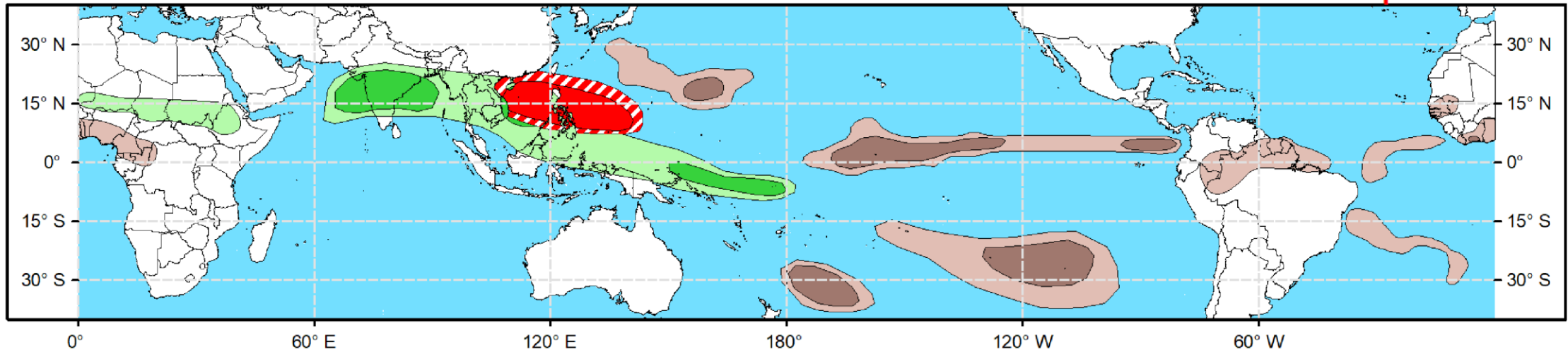


Week 2 - Valid: Jun 26, 2024 - Jul 02, 2024



Week 3 - Valid: Jul 03, 2024 - Jul 09, 2024

**** Experimental ****



Tropical Cyclone (TC) Formation Probability

>20% >40% >60%

Tropical Depression (TD) or greater strength

Above-Average Rainfall Probability

>50% >65% >80%

Weekly total rainfall in the Upper third of the historical range

Below-Average Rainfall Probability

>50% >65% >80%

Weekly total rainfall in the Lower third of the historical range

Above-Average Temperatures Probability

>50% >65% >80%

7-day max temperatures in the Upper third of the historical range

Below-Average Temperatures Probability

>50% >65% >80%

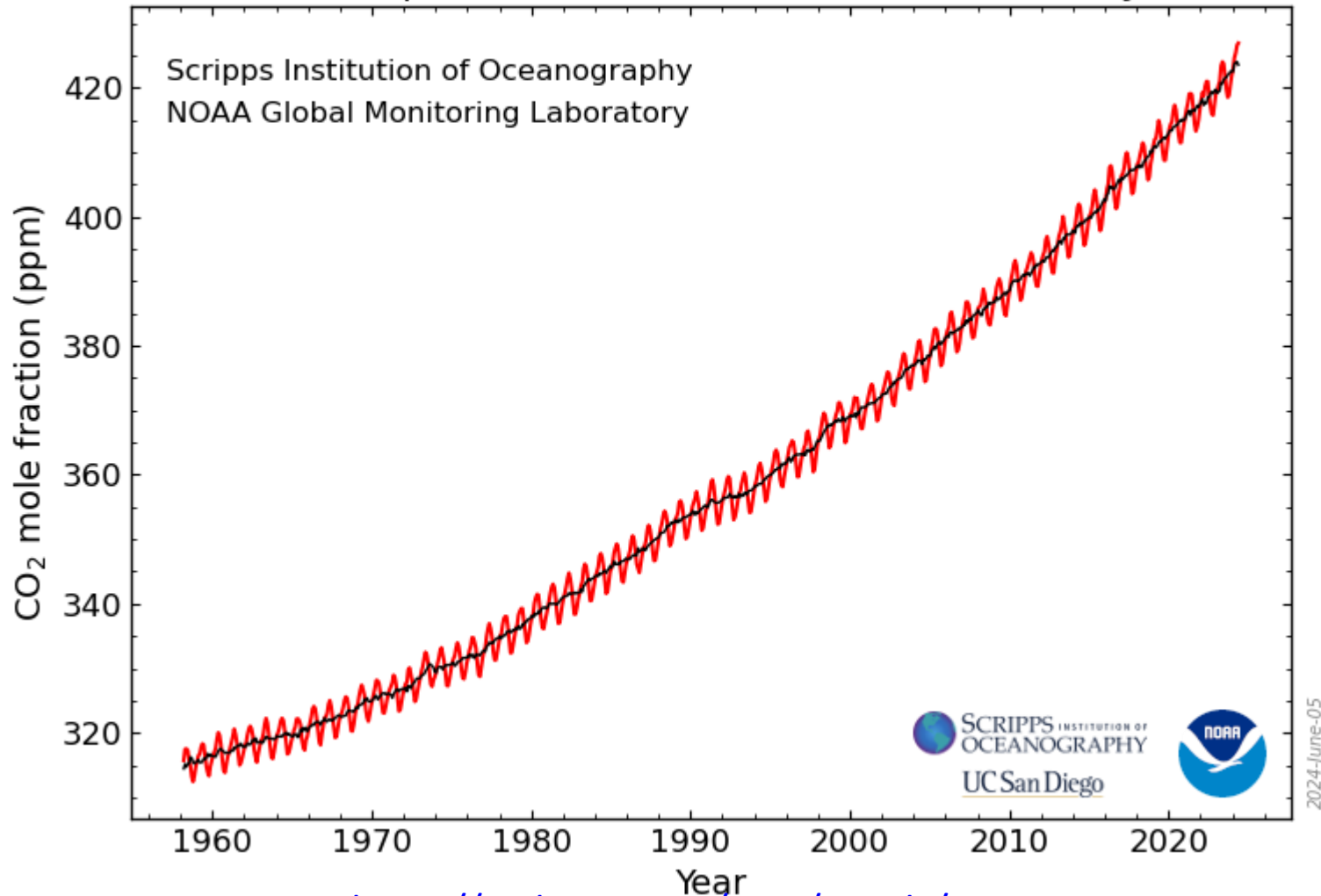
7-day min temperatures in the Lower third of the historical range

Mudanças climáticas recentes

Nos últimos anos (100 anos) com o advento das medições meteorológicas pode-se monitorar a mudança do clima baseado em dados climáticos.

Variação de Concentração de CO₂

Atmospheric CO₂ at Mauna Loa Observatory



<https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>

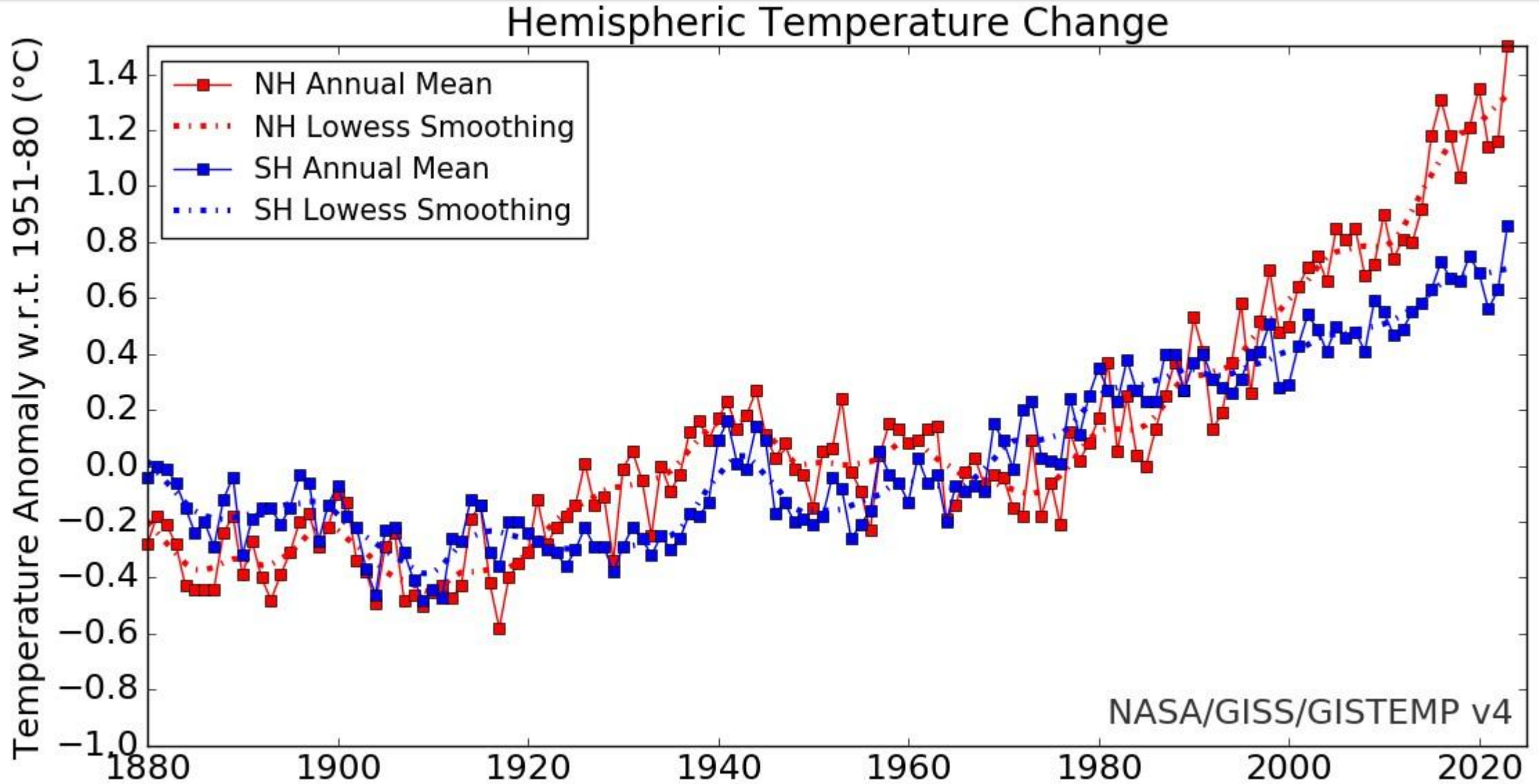
Maio 2024 426.90 ppm

Maio 2023: 424.00 ppm

Maio 2022: 420.99 ppm

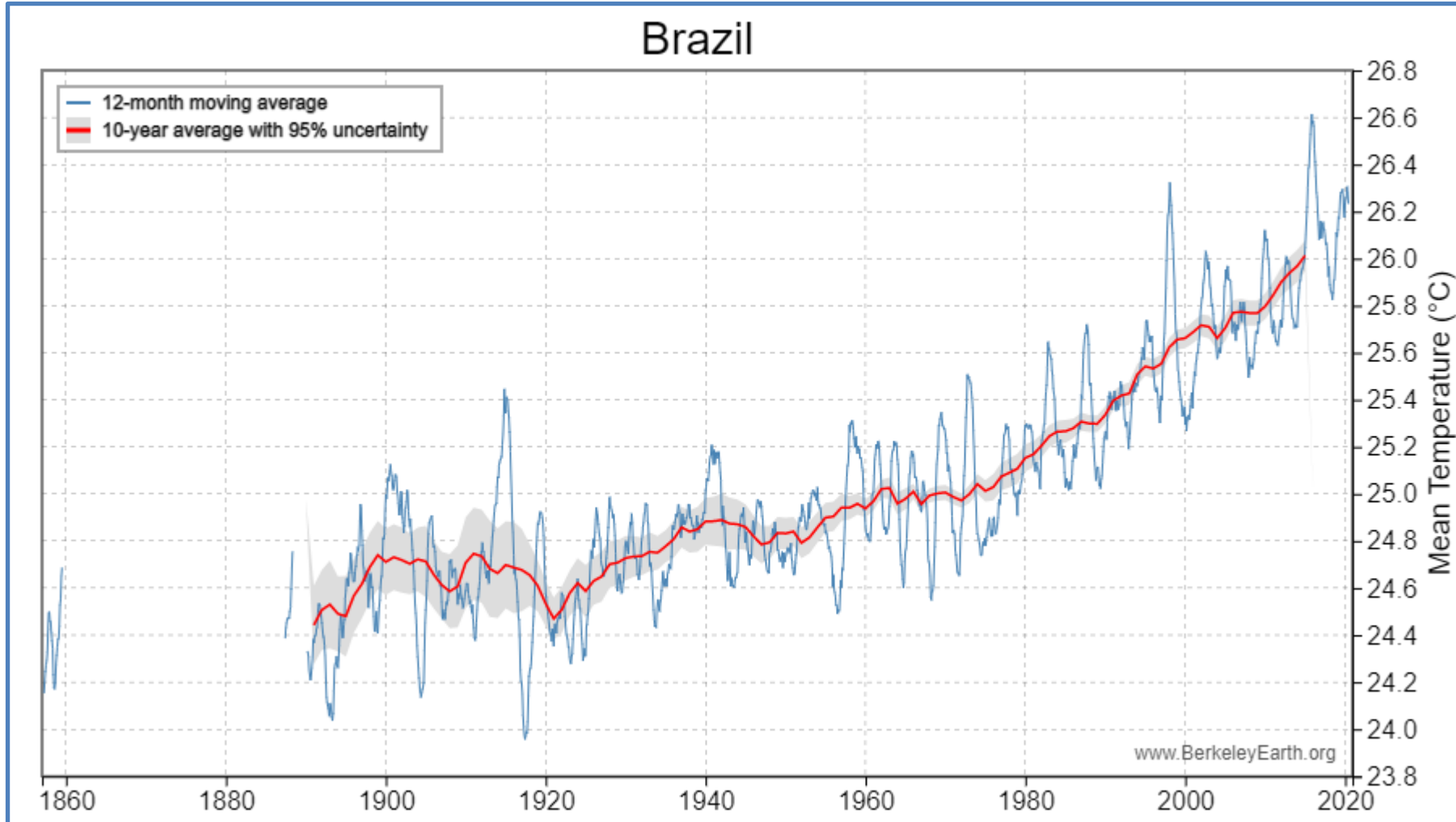
Abril 2020: 416.45 ppm

Anomalias da Temperatura média global referente ao período 1951-1980 mostram que o **Hemisfério Norte** tem se aquecido mais que o **Hemisfério Sul**.



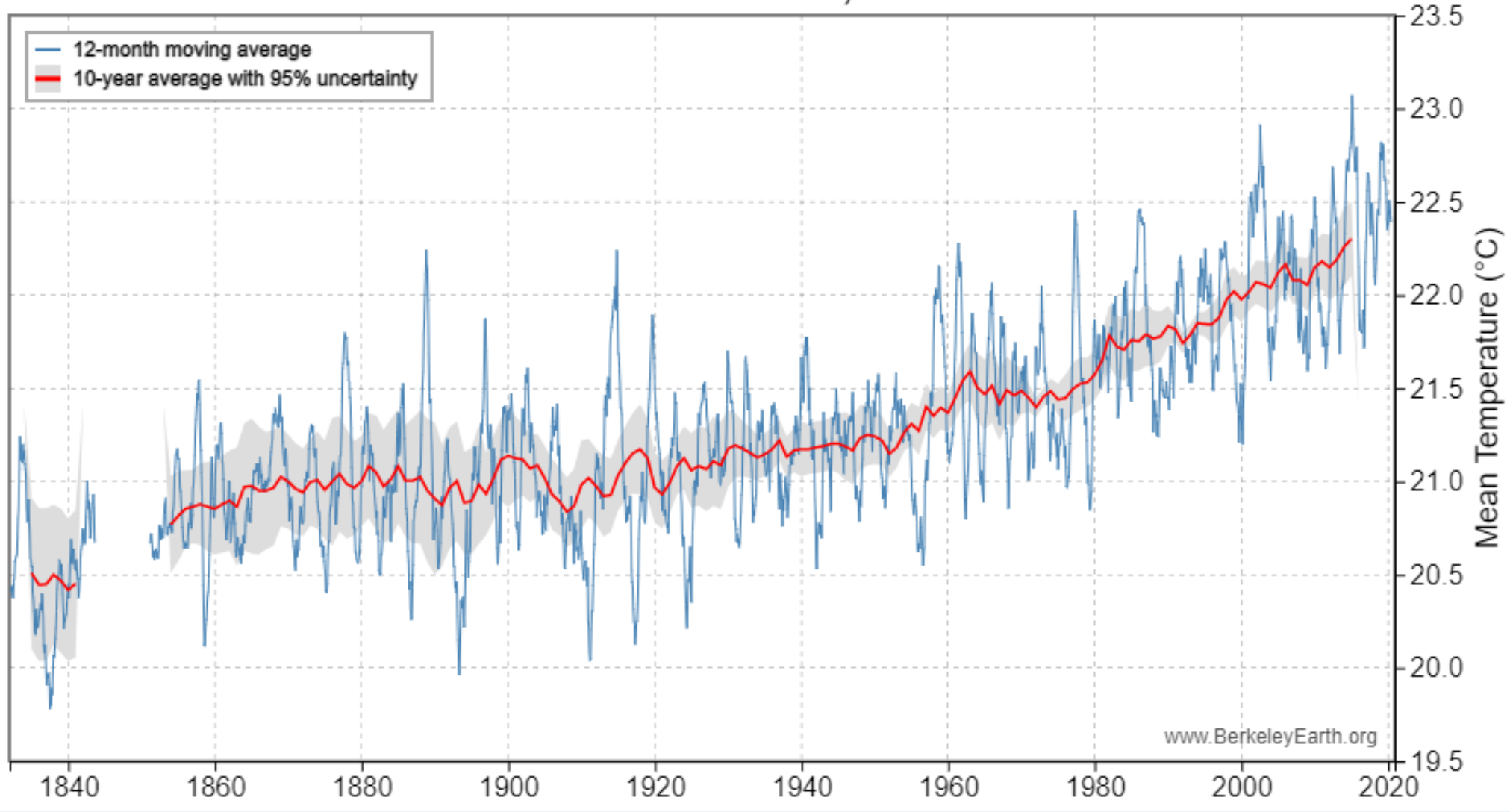
Aumento da temperatura média no Brasil

1.7 C



https://data.giss.nasa.gov/gistemp/graphs_v4/graph_data/Hemispheric_Temperature_Change/graph.png
<http://berkeleyearth.org/>

Local Climate: 28.13 S, 48.18 W



Florianópolis
 $\Delta T \sim 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$
desde 1960

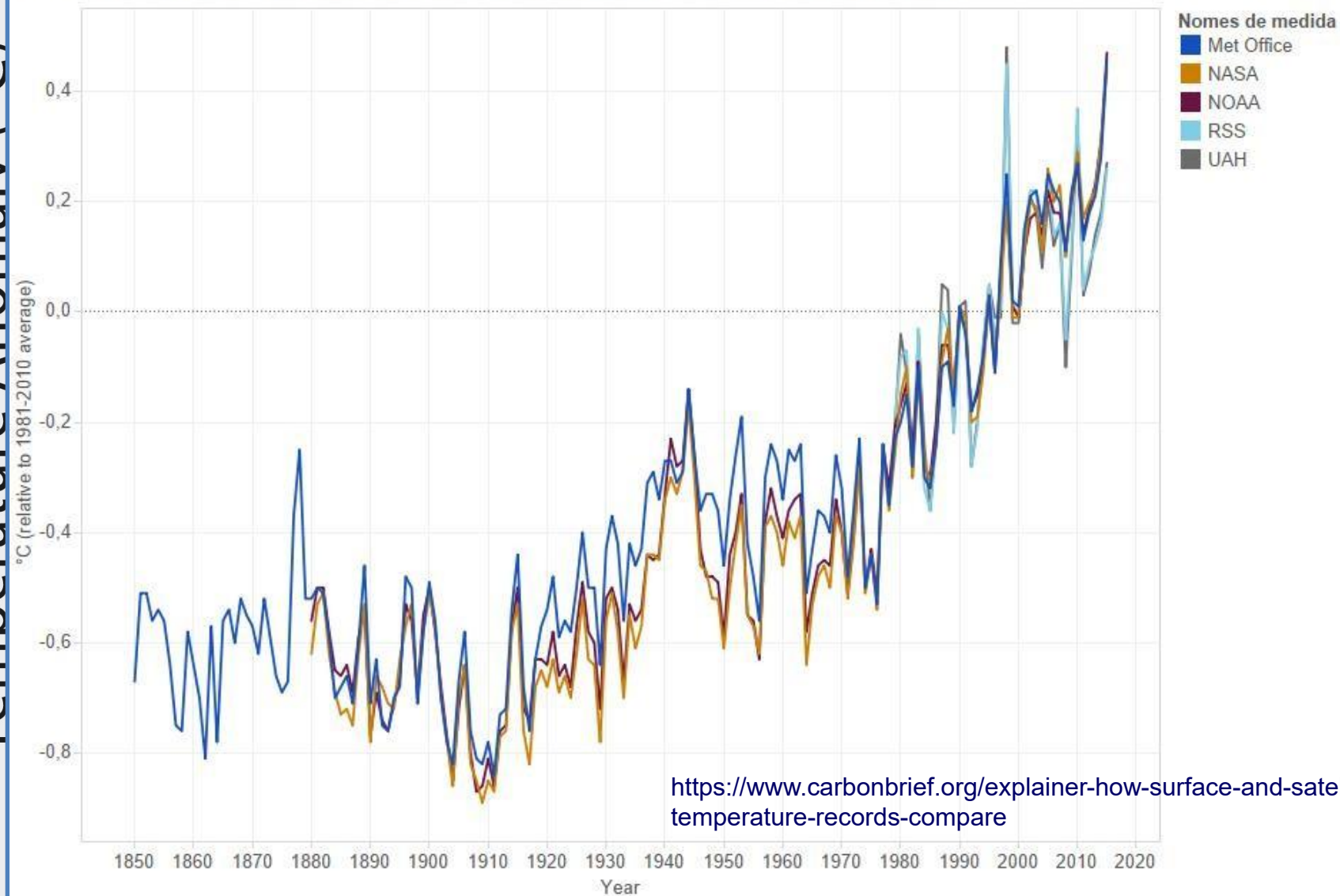
www.BerkeleyEarth.org

<http://berkeleyearth.lbl.gov/locations/28.13S-48.18W#>

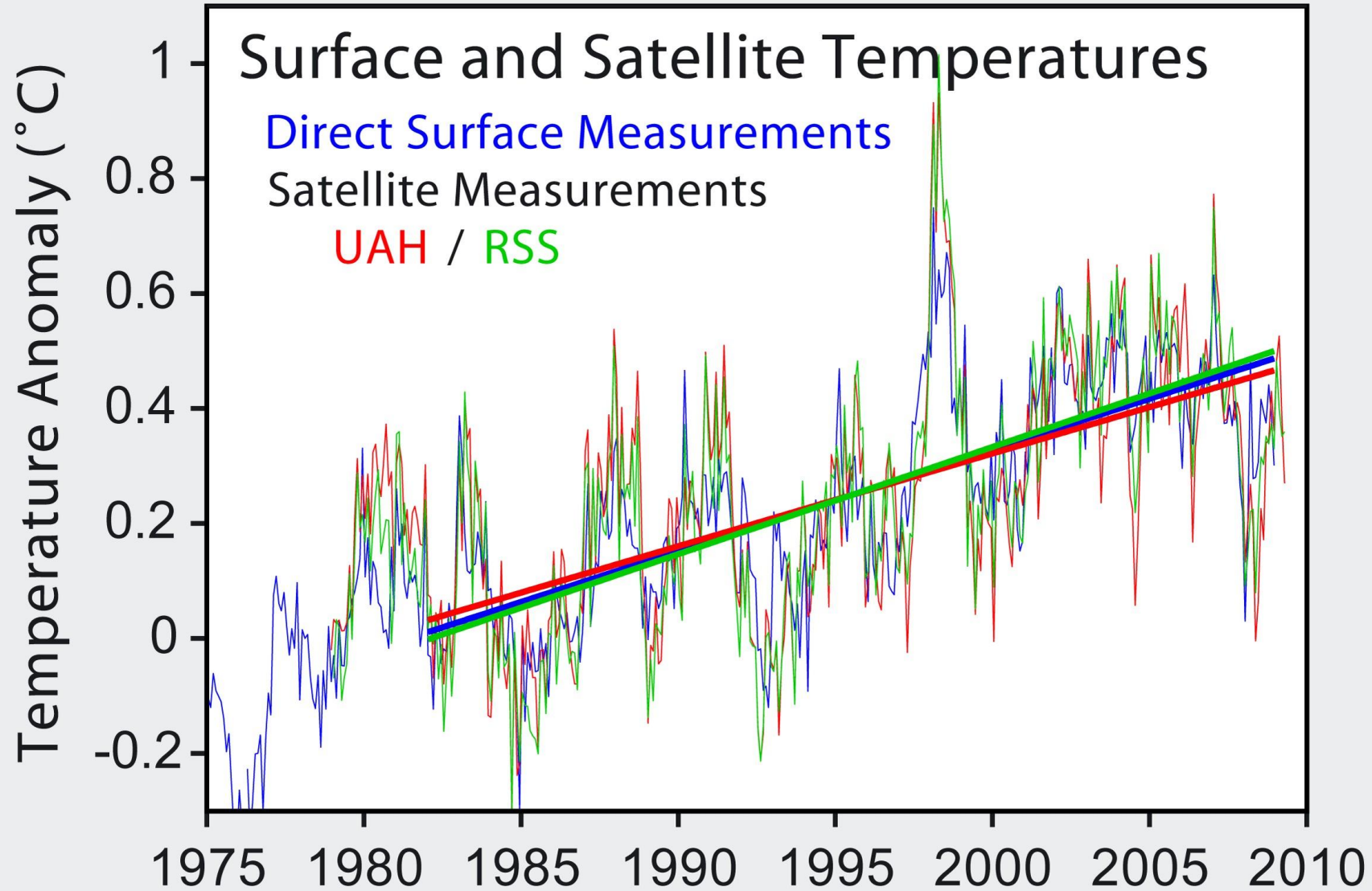
Anomalia de Temperatura média global obtida de dados de satélite.

Temperature Anomaly (°C)

Global surface temperature anomaly - with satellite data



Anomalia de Temperatura média global obtida de dados de **satélite** também mostram a mesma tendência de aumento de temperatura.



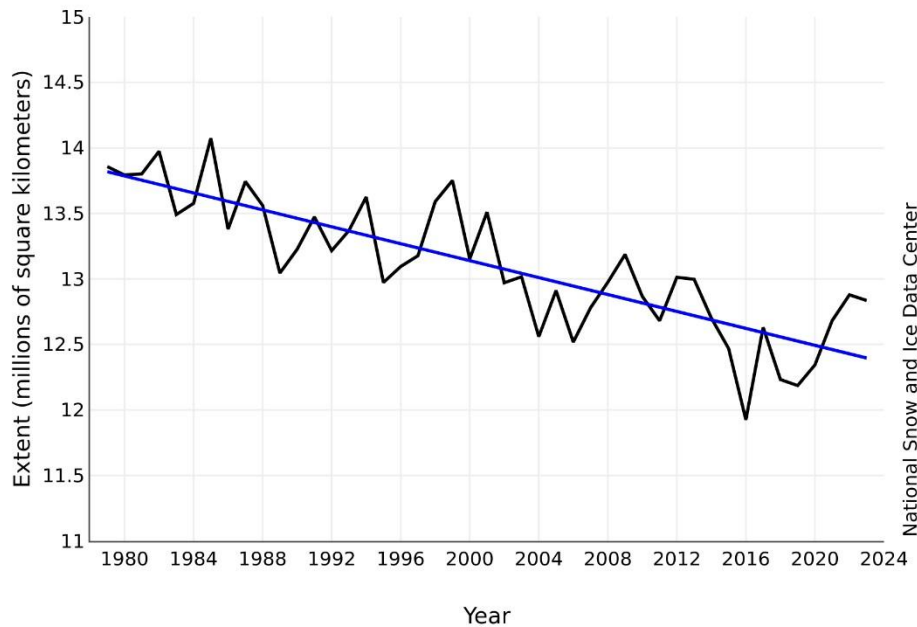
<http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/309/5740/1548>

A cobertura de gelo do Oceano Ártico tem diminuído aprox. **12% por década**

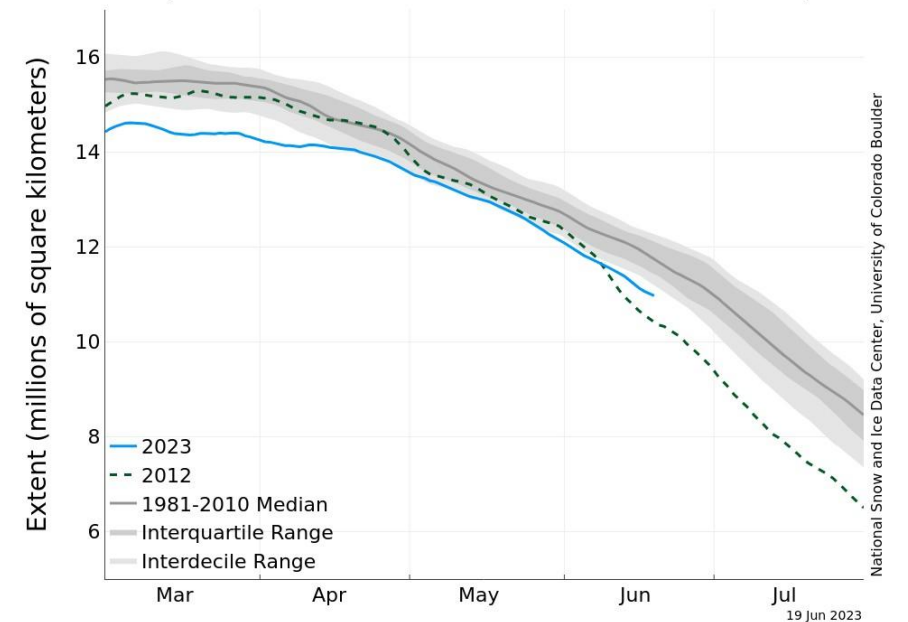
<http://nsidc.org/>



Average Monthly Arctic Sea Ice Extent
May 1979 - 2023



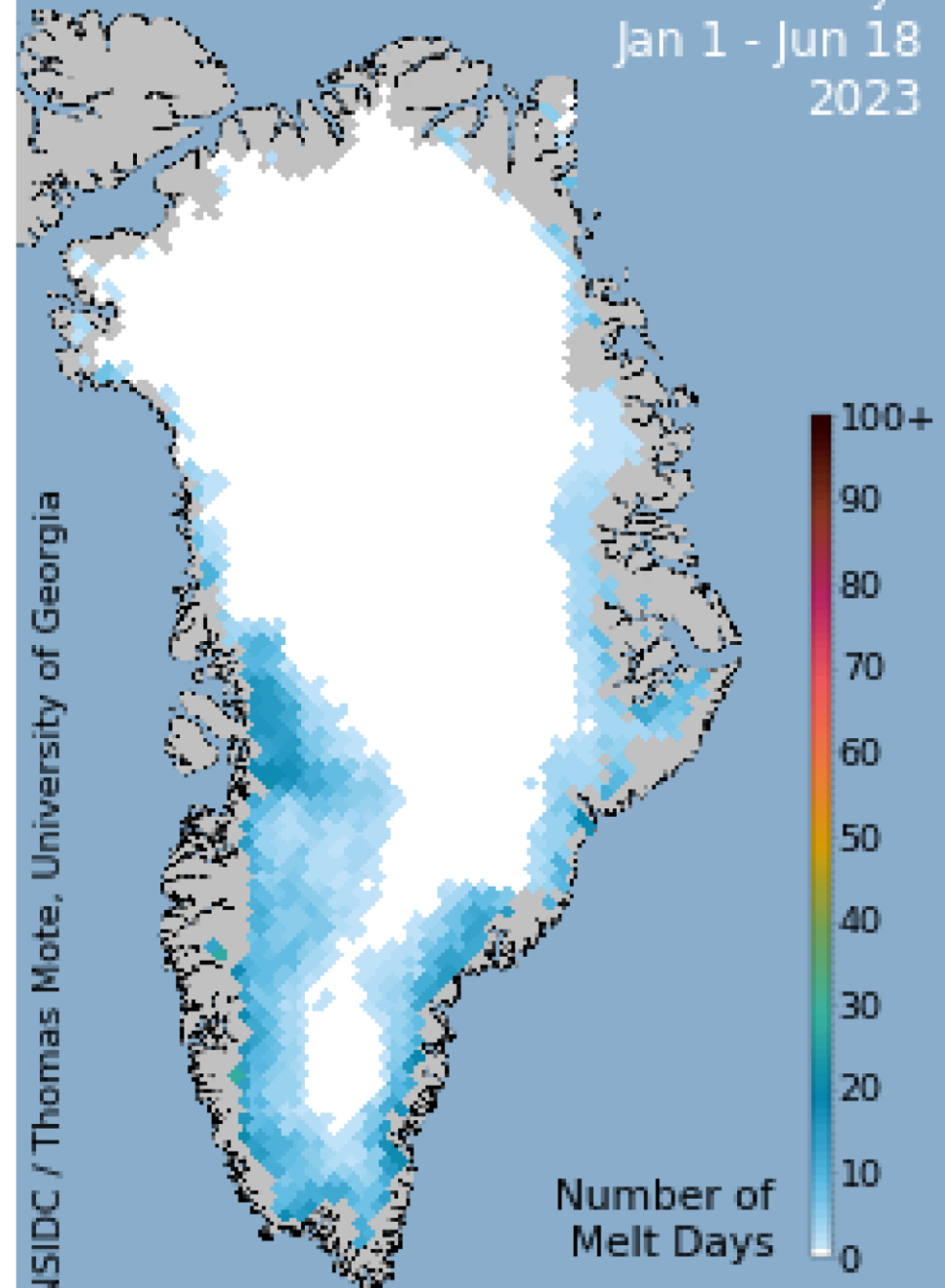
Arctic Sea Ice Extent
(Area of ocean with at least 15% sea ice)



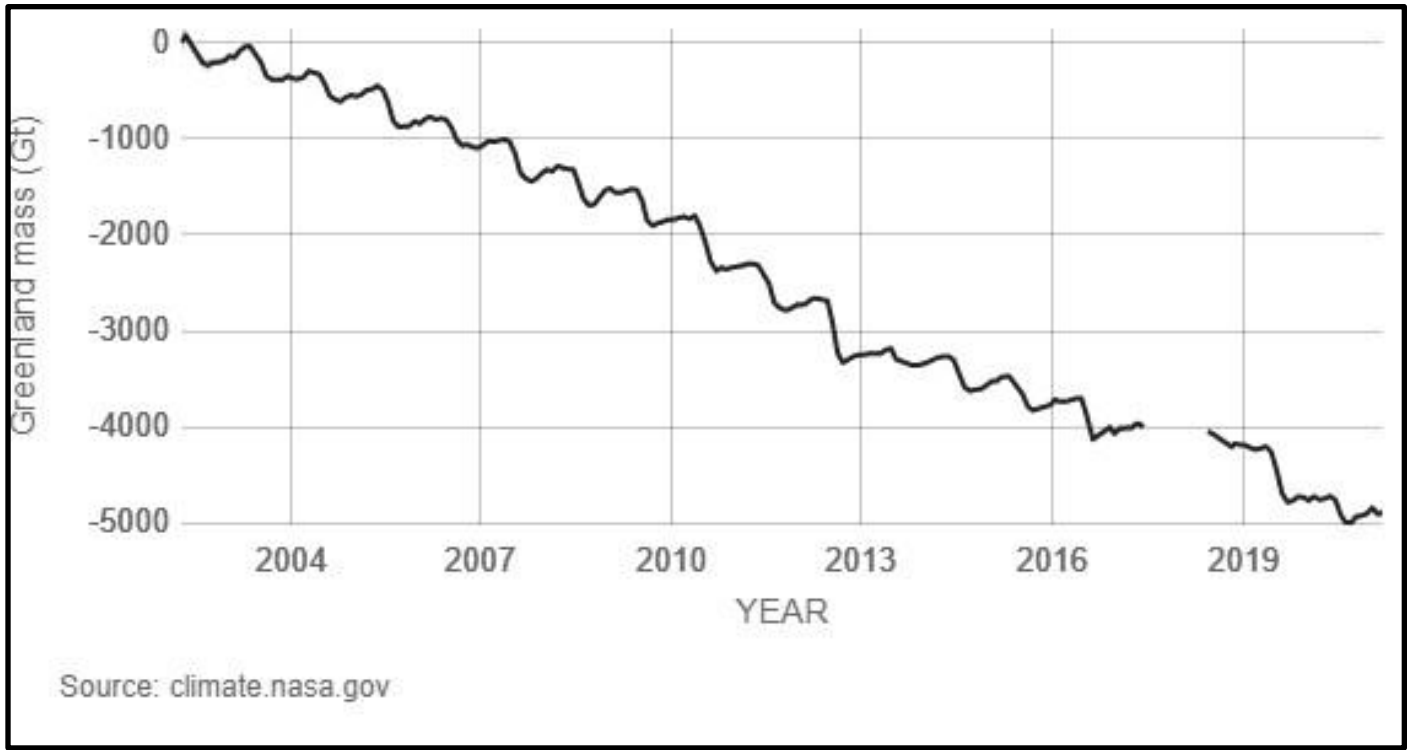
<http://nsidc.org/arcticseaicenews/files/2021/05/Figure3.png>

Greenland Cumulative Melt Days Jan 1 - Jun 18 2023

NSIDC / Thomas Mote, University of Georgia



Cobertura de Gelo sobre a **Groelândia** estimada por satélite.
<https://nsidc.org/greenland-today/>

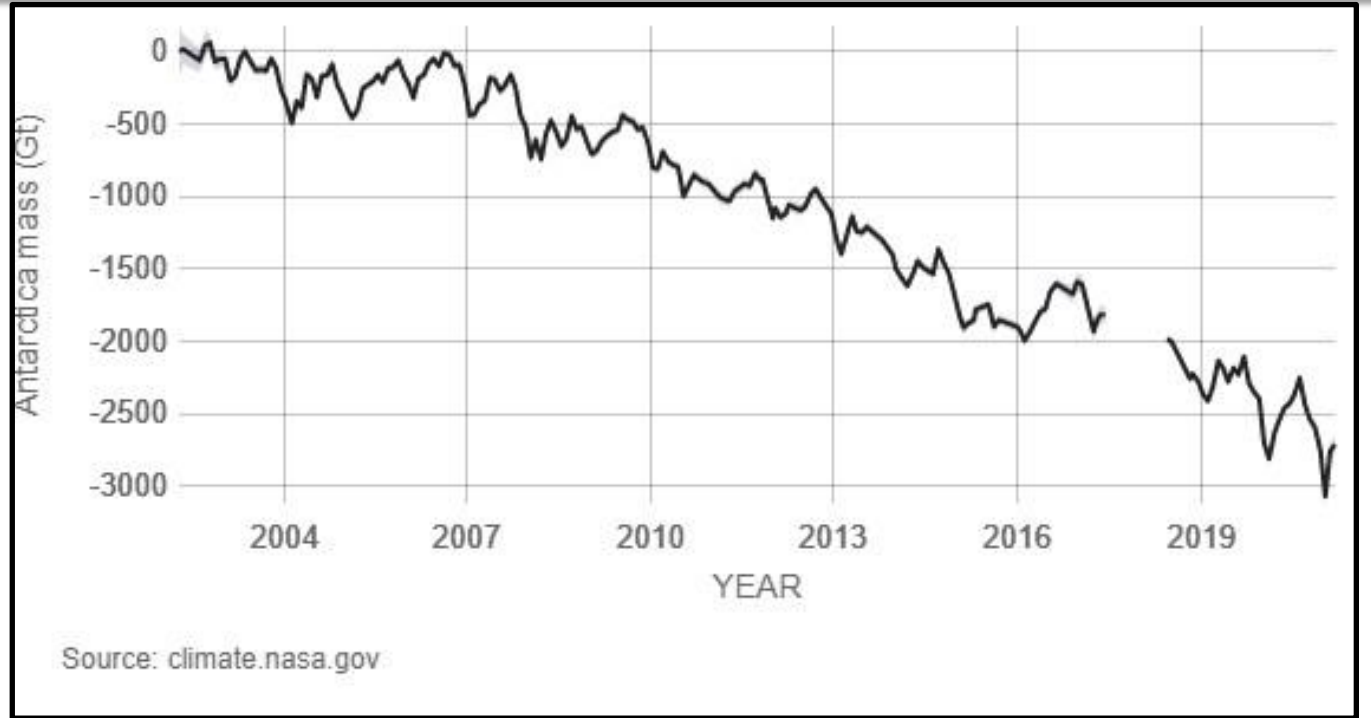
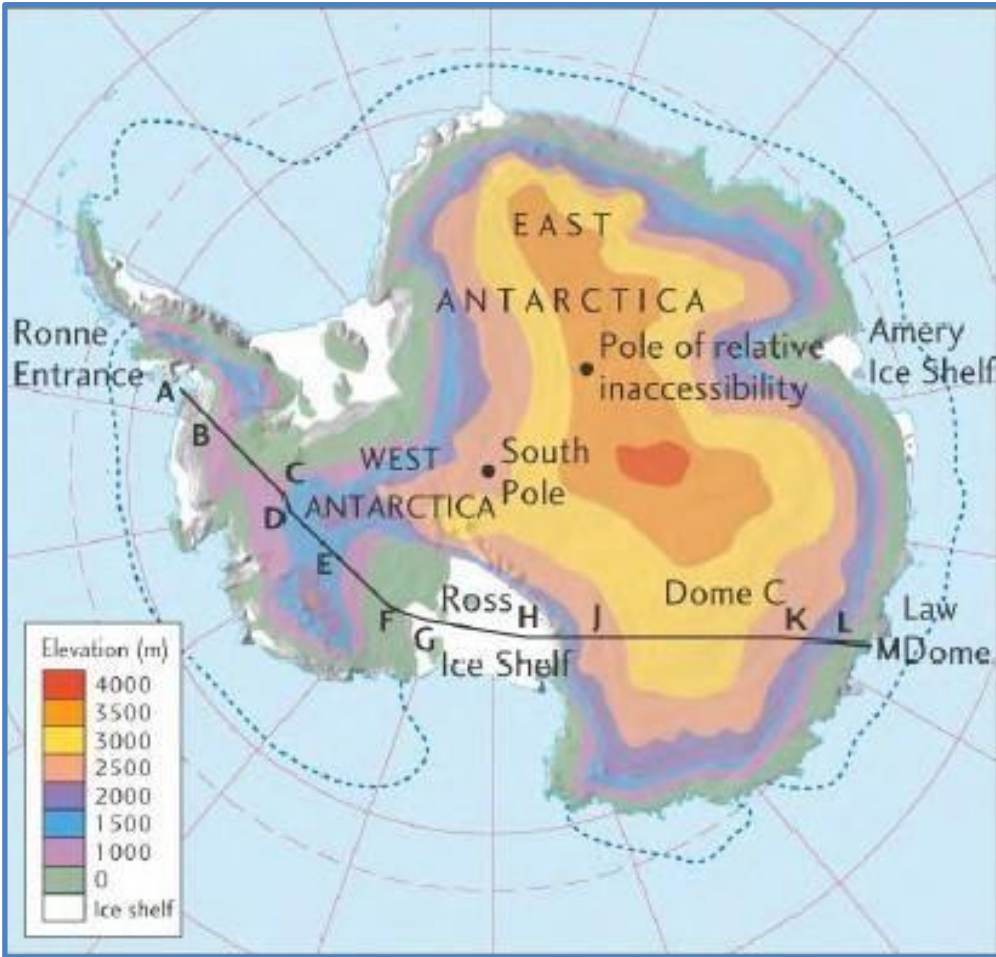


Massa gelo estimada pelo Satélite
GRACE. (-278 GigaT/ano)

<http://climate.nasa.gov/vital-signs/land-ice/>
<https://climate.nasa.gov/vital-signs/ice-sheets/>

Será que o gelo da Antártida está derretendo?

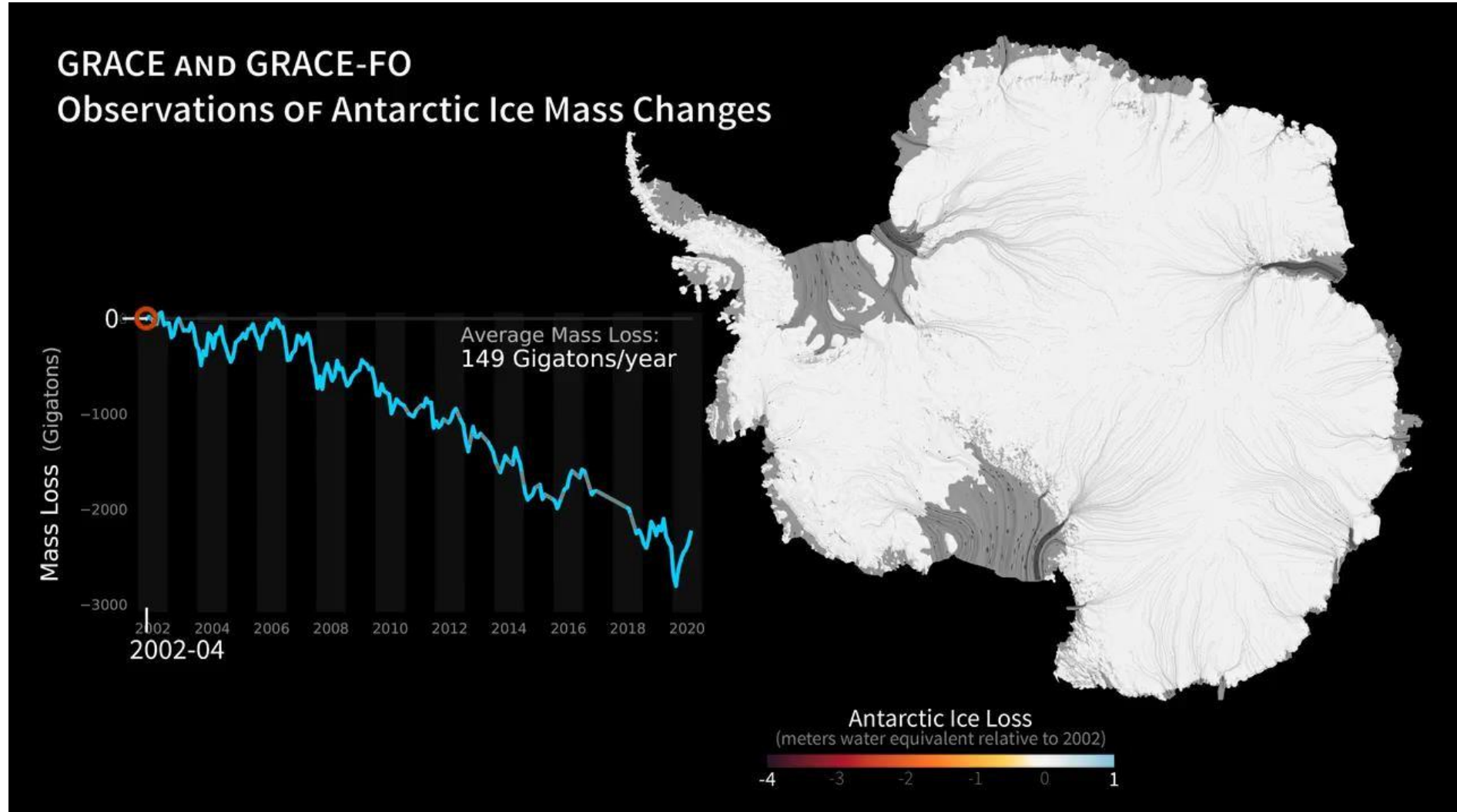
Dados de satélite (GRACE) mostram que embora o gelo superficial não tenha se alterado muito, a massa total de gelo tem diminuído rapidamente (-150 Gigatons/ano).



<http://climate.nasa.gov/vital-signs/land-ice/>

Será que o gelo da Antártida está derretendo?

Dados de satélite (GRACE) mostram que embora o gelo superficial não tenha se alterado muito, a massa total de gelo tem diminuído rapidamente (- 150 Gigatons/ano).



Glacier Bay National Park and Reserve's White Thunder Ridge (Alaska).



As **geleiras** estão retraindo em várias partes do Globo. As fotos acima mostram a situação no ano de 1941 e em 2004.

Estima-se que os solos congelados (**permafrost**) de regiões de altas latitudes armazenam grandes concentrações de CO₂ e metano.

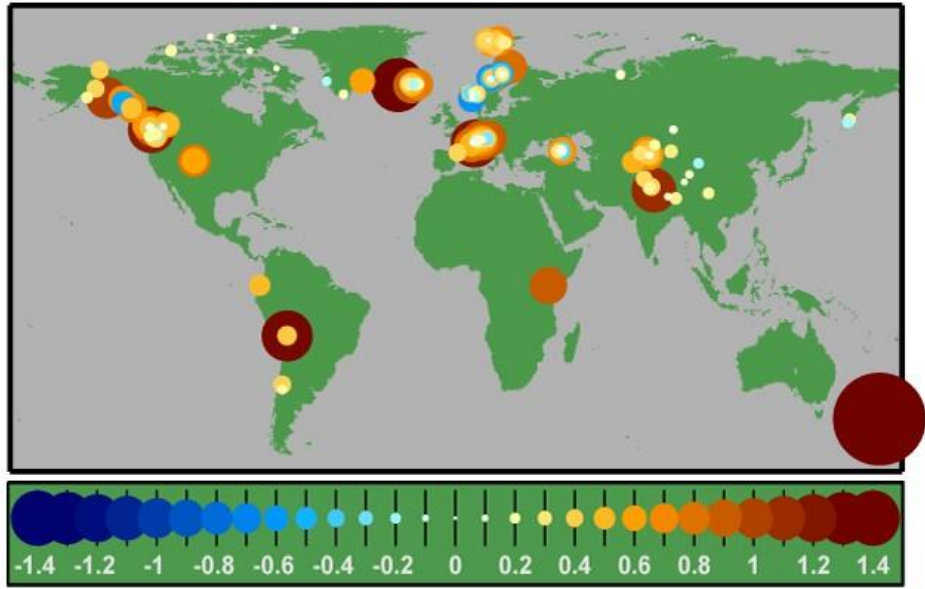
<https://nsidc.org/cryosphere/glaciers/gallery>



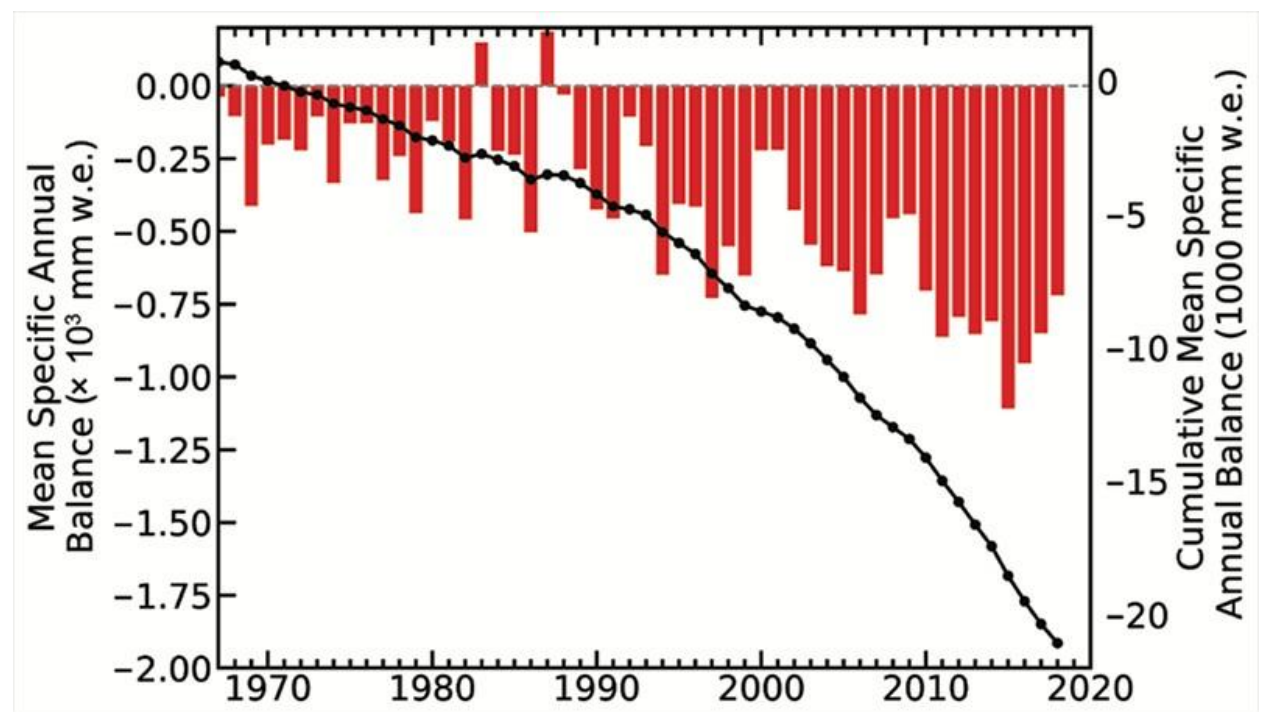
South Cascade
Glacier in the
Washington
Cascade
Mountains,
USGS.

Dados observados mostram que a espessura das geleiras tem diminuído.

Mudanças nos glaciares de montanhas desde 1970

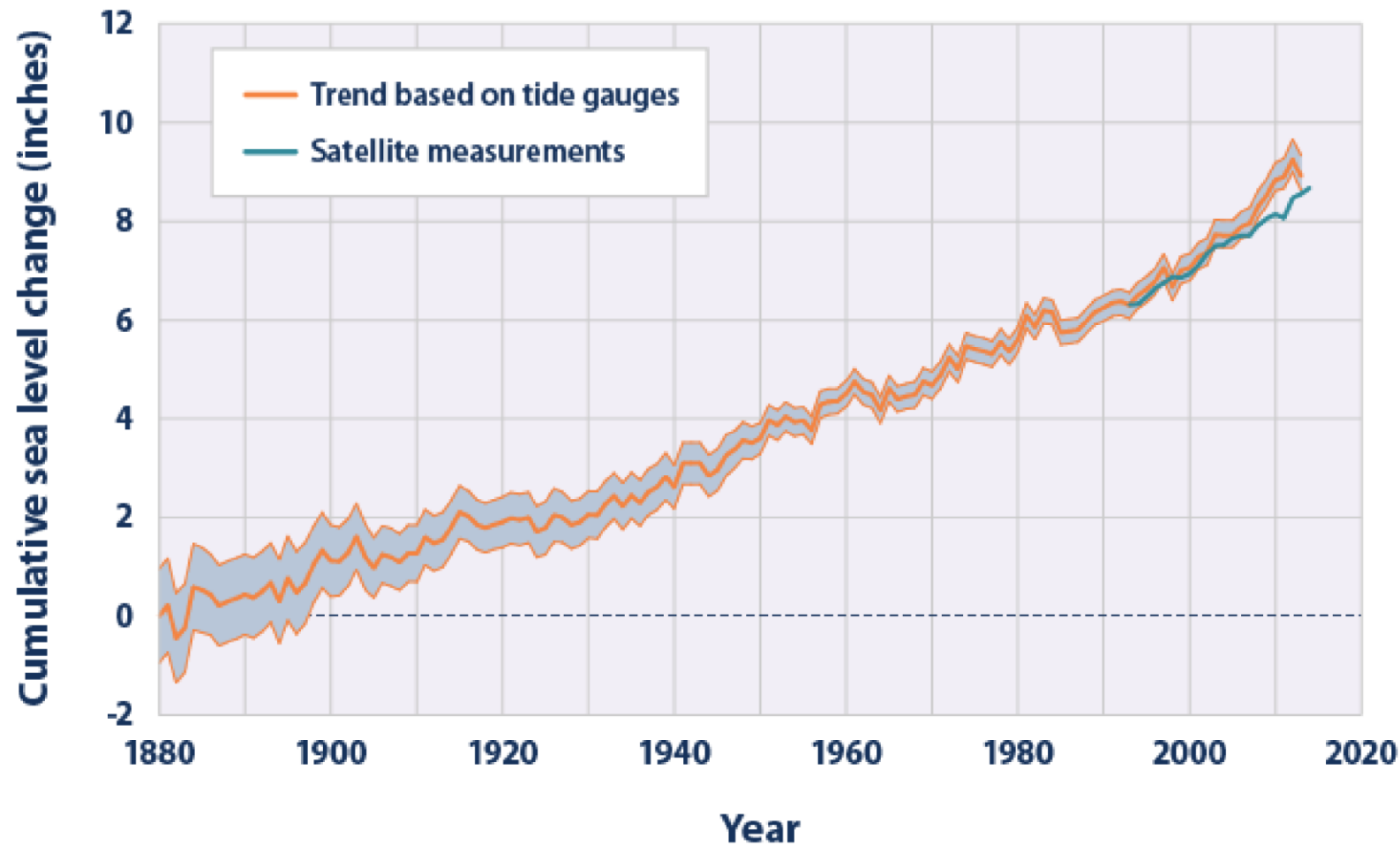


adelgaçamento efectivo (m/ano)



http://nsidc.org/sotc/glacier_balance.html

Global Average Absolute Sea Level Change, 1880–2014



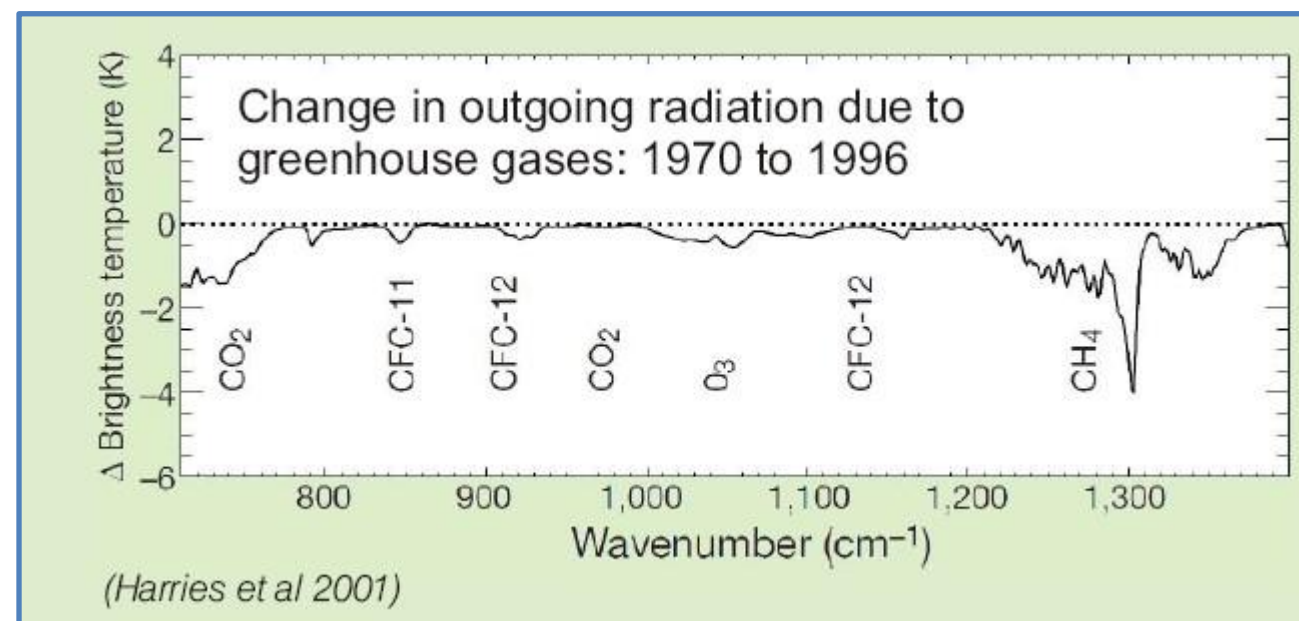
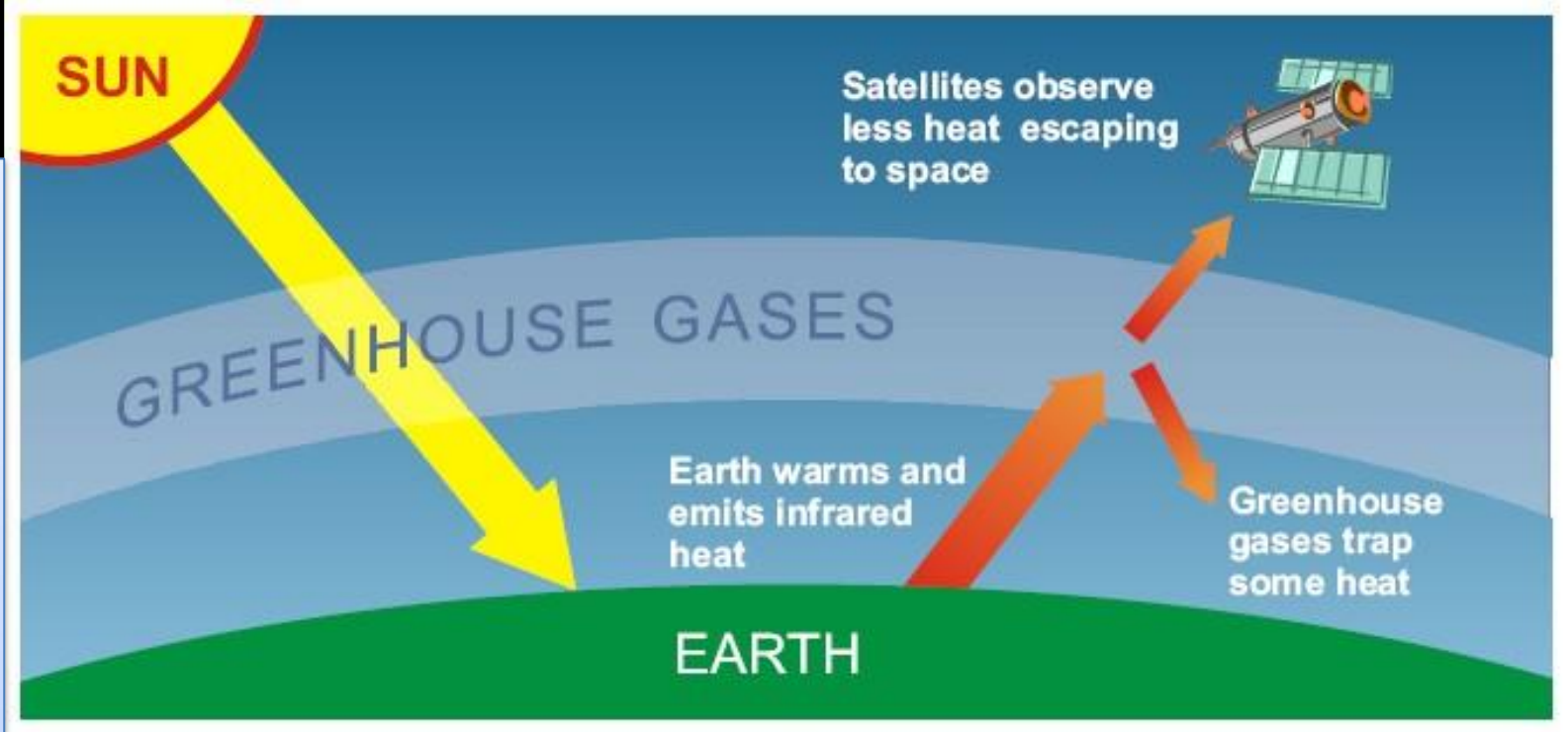
A variação da altura do nível do mar tem aumentado gradativamente.

Data sources:

- CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). 2015 update to data originally published in: Church, J.A., and N.J. White. 2011. Sea-level rise from the late 19th to the early 21st century. *Surv. Geophys.* 32:585–602. www.cmar.csiro.au/sealevel/sl_data_cmar.html.
- NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). 2015. Laboratory for Satellite Altimetry: Sea level rise. Accessed June 2015. http://ibis.grdl.noaa.gov/SAT/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_global.php.

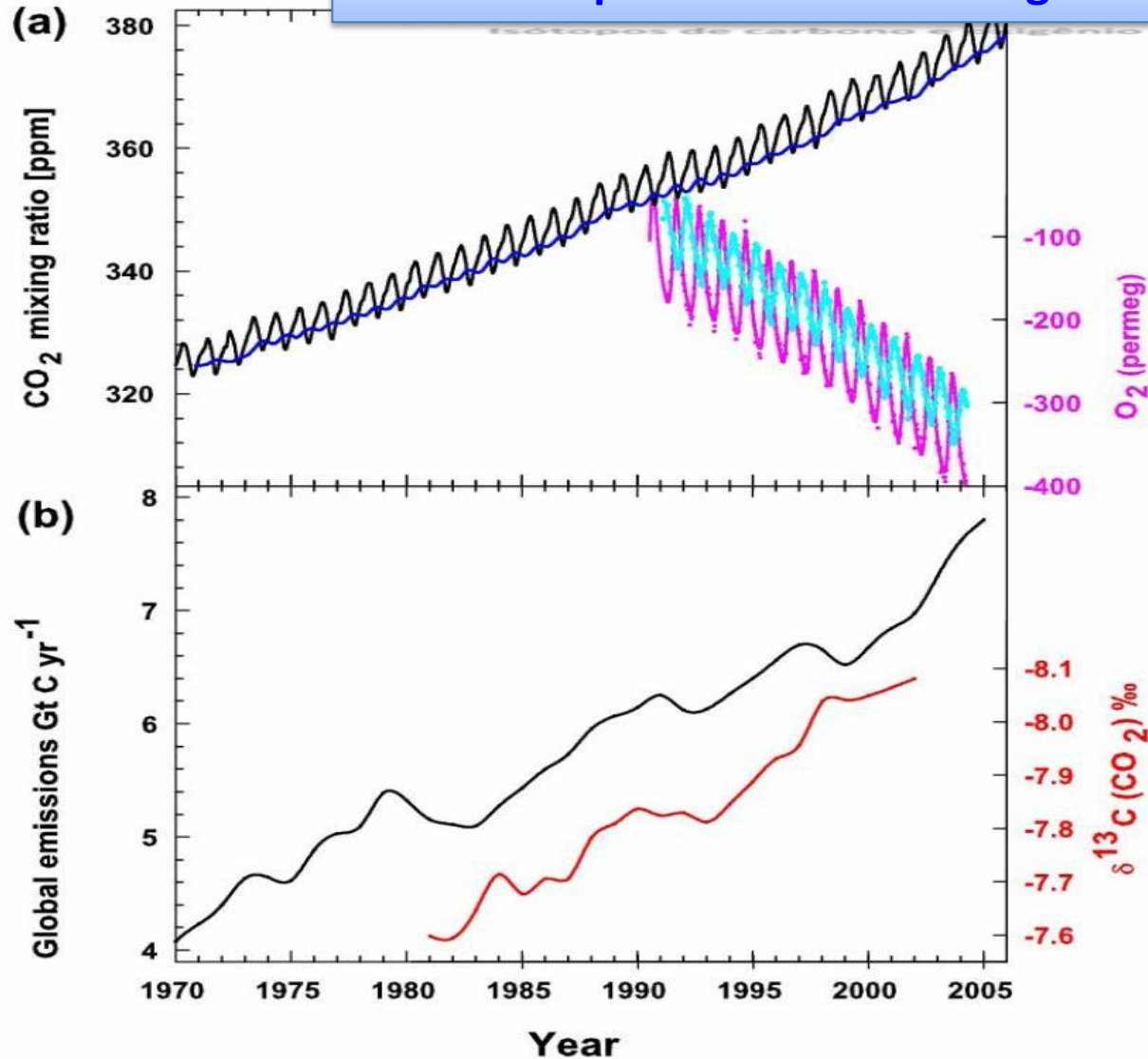
For more information, visit U.S. EPA's "Climate Change Indicators in the United States" at www.epa.gov/climatechange/indicators.

Dados de satélite meteorológico mostram que a emissão de radiação térmica para o espaço tem diminuído. Esta diminuição ocorre principalmente nas bandas de absorção dos gases do efeito estufa (e.g. CO₂, CH₄).



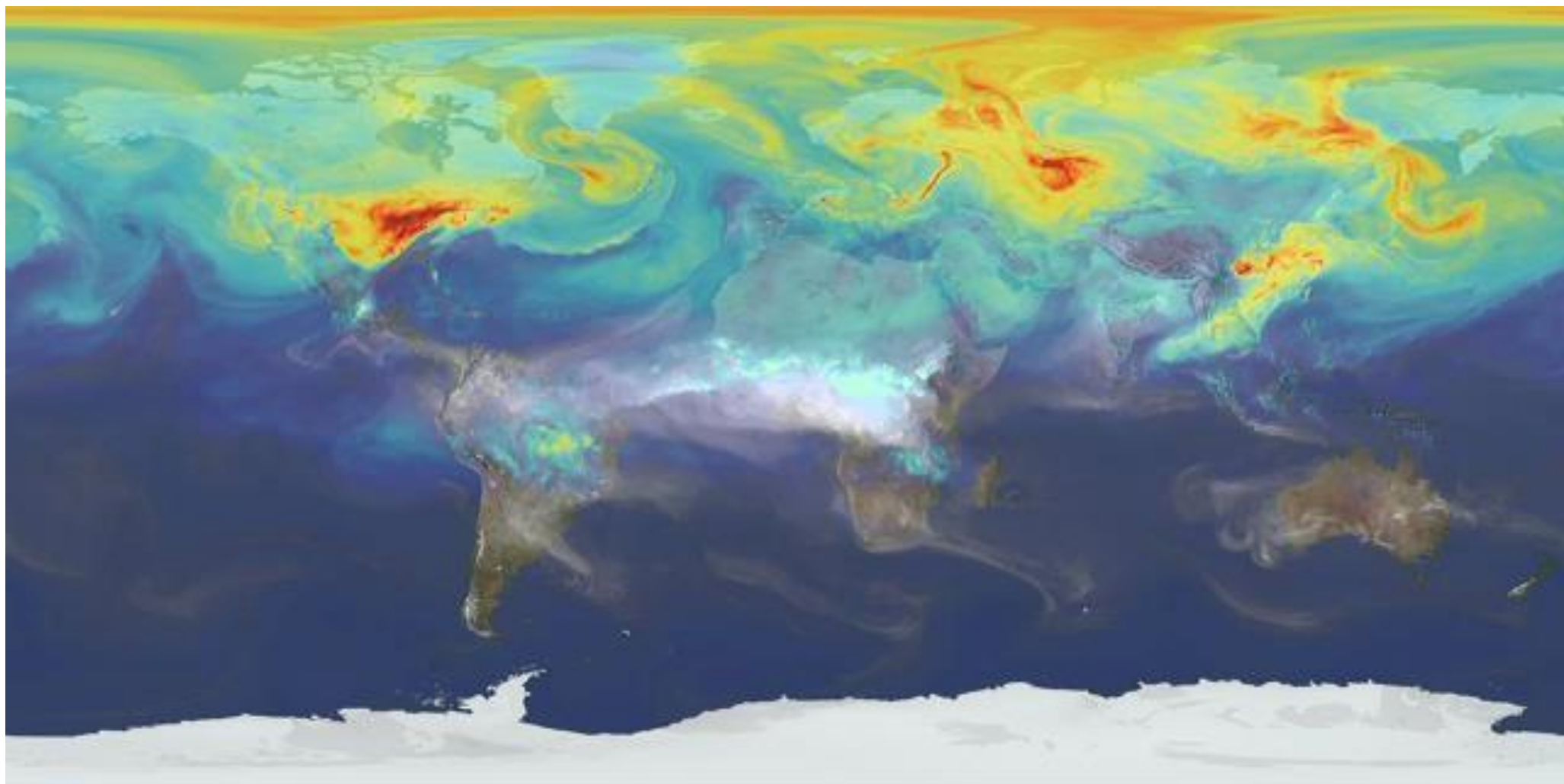
O aumento de CO_2 é devido às emissões antropogênicas

Isótopos de carbono e oxigênio mostram fontes antropogênicas



A concentração de oxigênio está diminuindo

Composição isotópica mostra aumento de carbono fóssil



2006 / 01 / 01

Global Modeling and Assimilation Office

Carbon Monoxide Column Abundance [$1.0e18$ molec cm^{-2}]

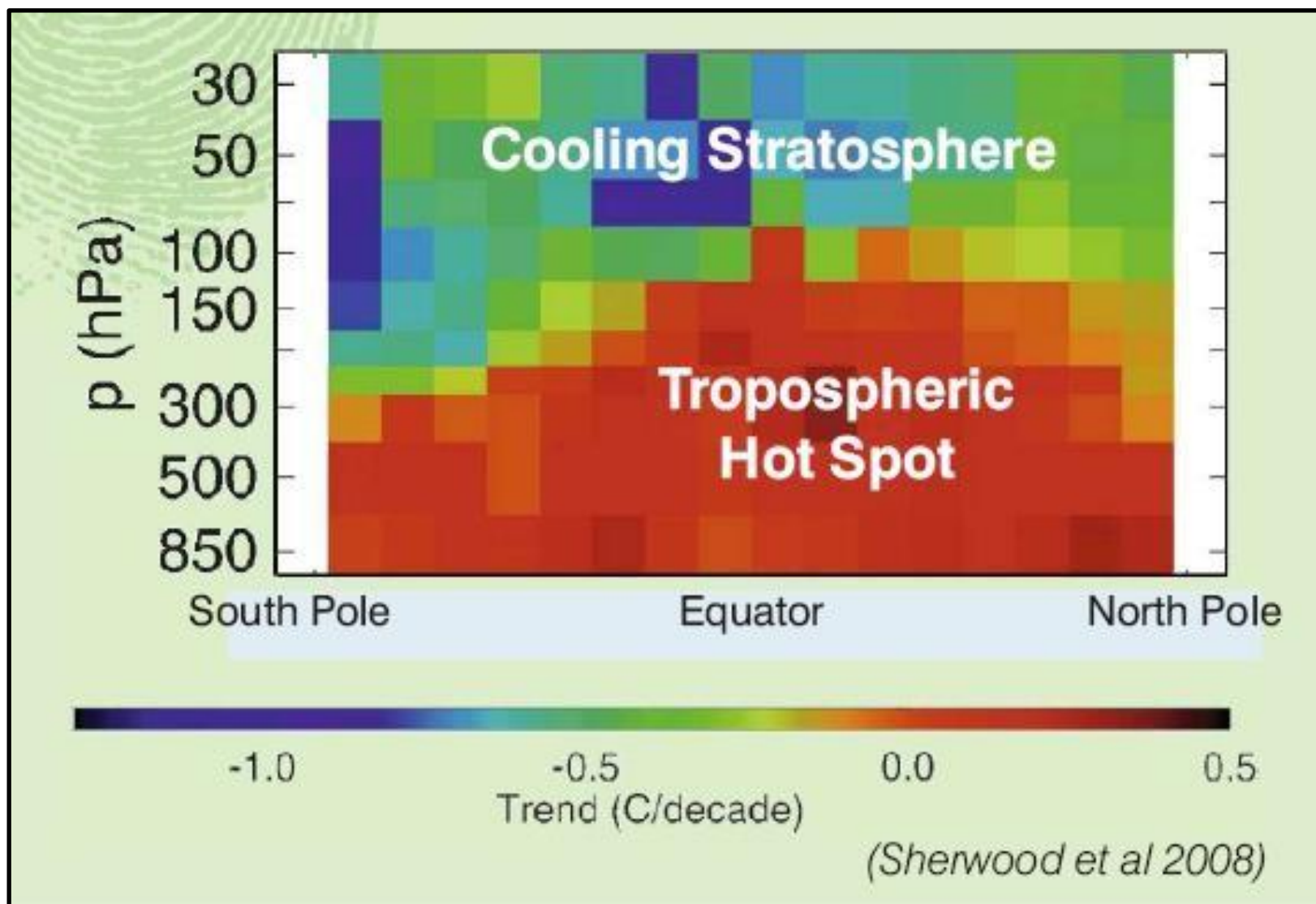


Carbon Dioxide Column Concentration [ppmv]

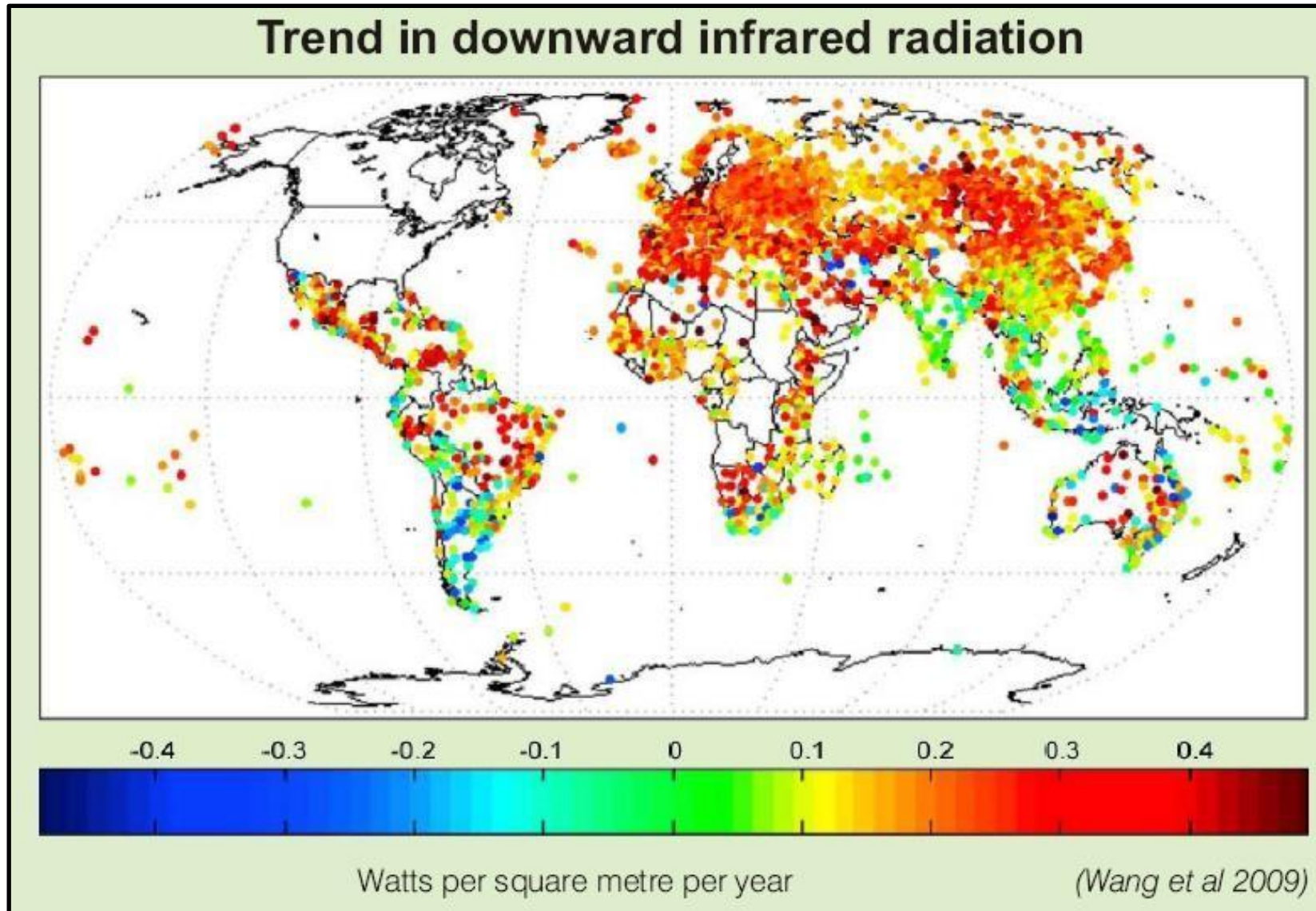


https://svs.gsfc.nasa.gov/vis/a010000/a011700/a011719/2006_full-1920-MASTER_nasaportal.mov

Tendências de Anomalia da Temperatura atmosférica baseados em dados de Radiosondas e Satélites Meteorológicos mostram que tem havido um **aquecimento da troposfera** e **resfriamento da estratosfera**, compatível com o efeito estufa.

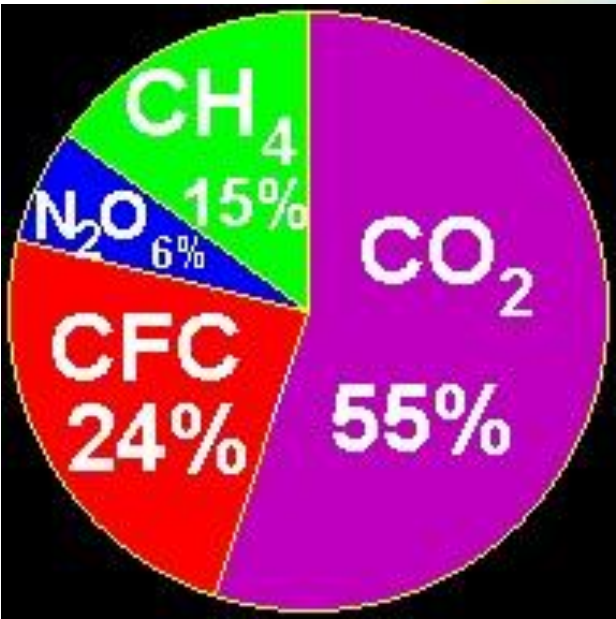
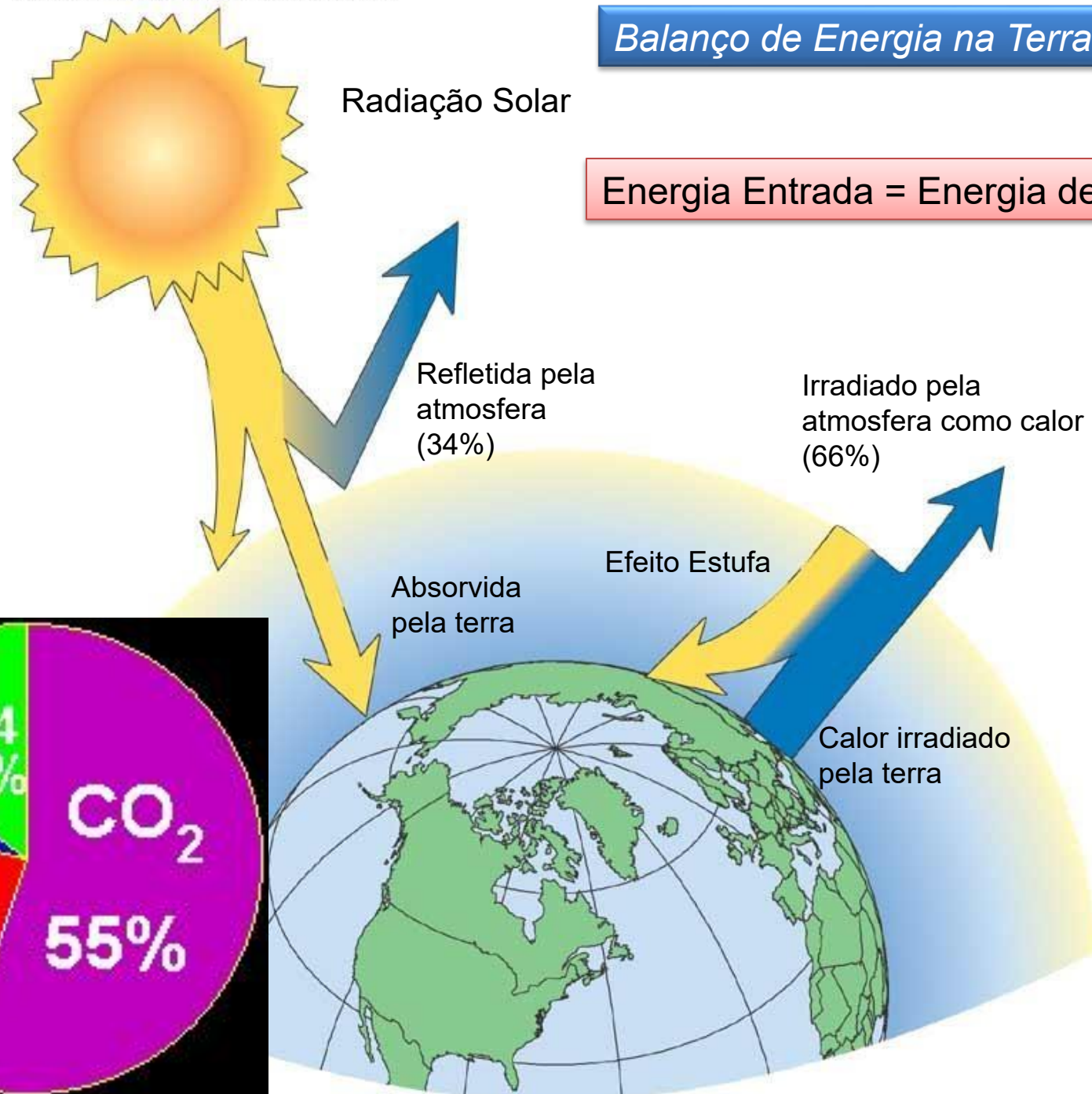


Dados de superfície mostram que **mais radiação térmica (infra-vermelha) está chegando à superfície** da Terra.



Balço de Energia na Terra

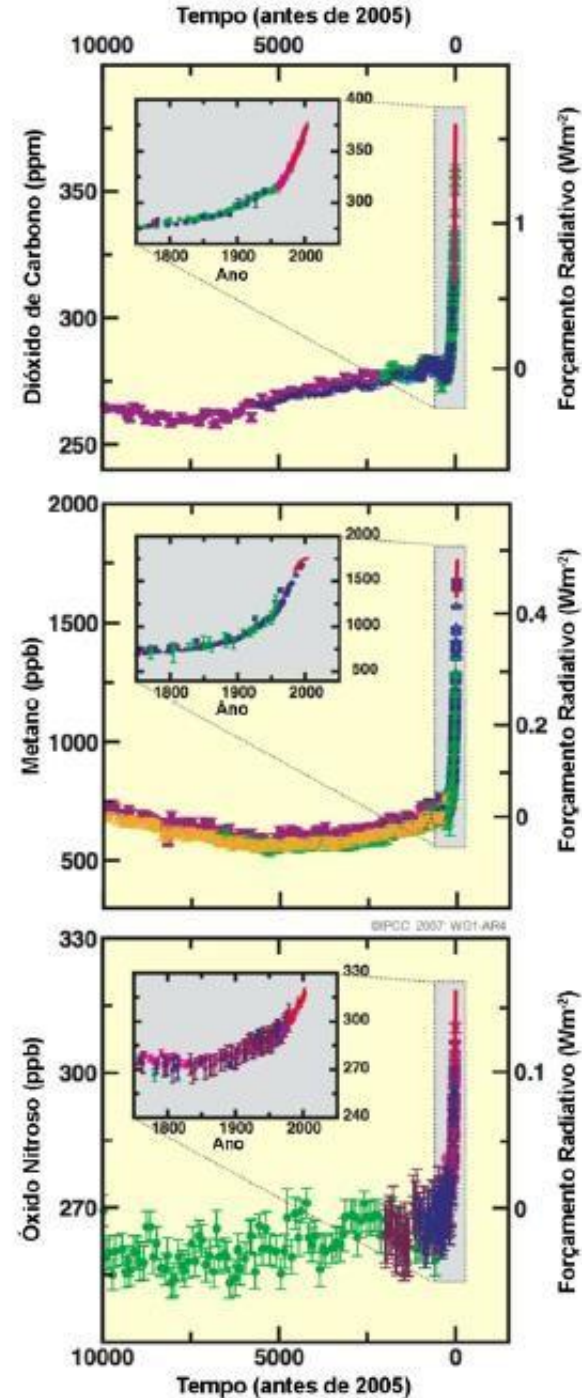
Energia Entrada = Energia de Saída



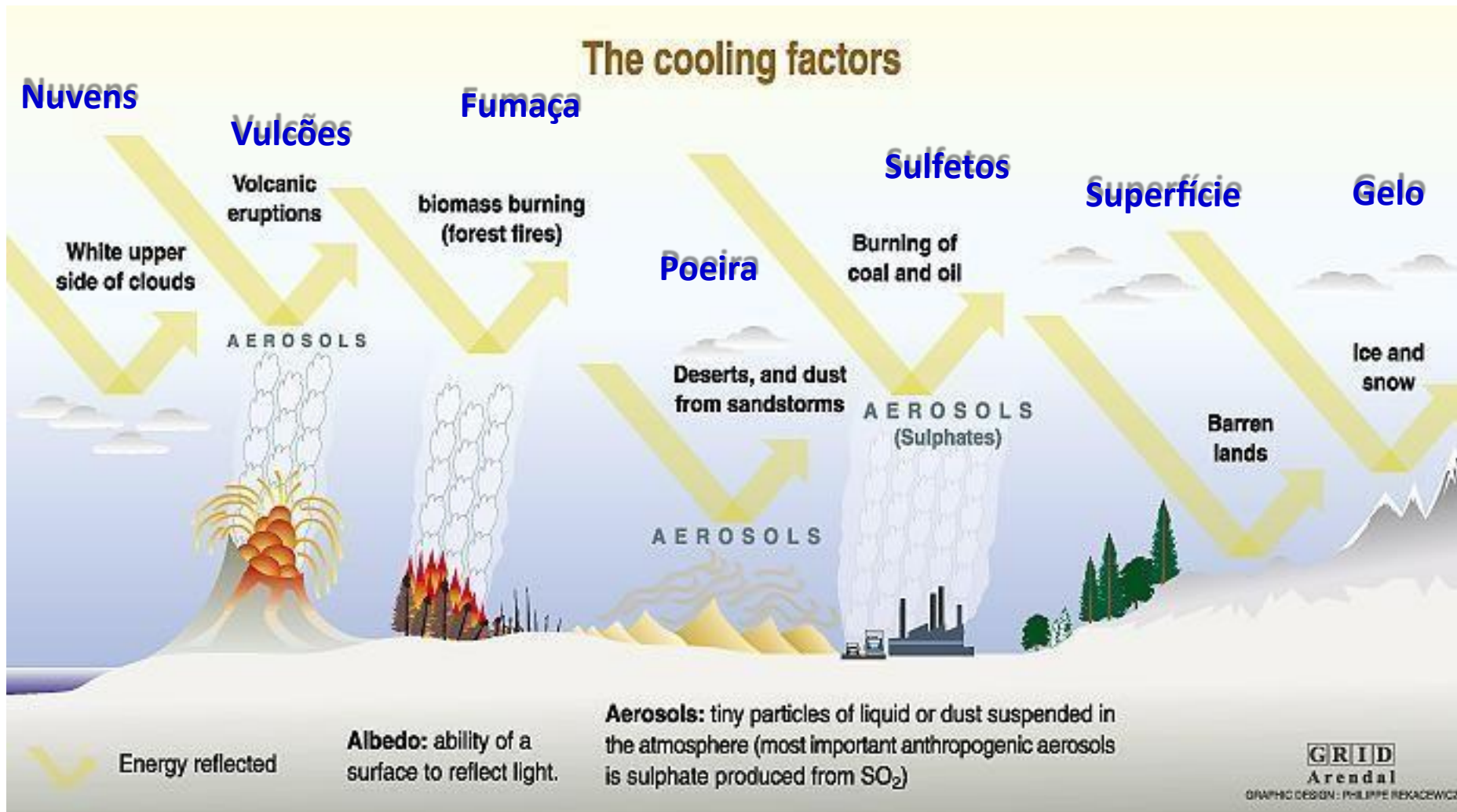
As concentrações atmosféricas globais de **dióxido de carbono**, **metano** e **óxido nitroso** aumentaram bastante em consequência das atividades humanas desde 1750 e agora ultrapassam em muito os valores préindustriais determinados com base em testemunhos de gelo de milhares de anos.

Os aumentos globais da concentração de dióxido de carbono se devem principalmente ao uso de **combustíveis fósseis** e à **mudança no uso da terra**.

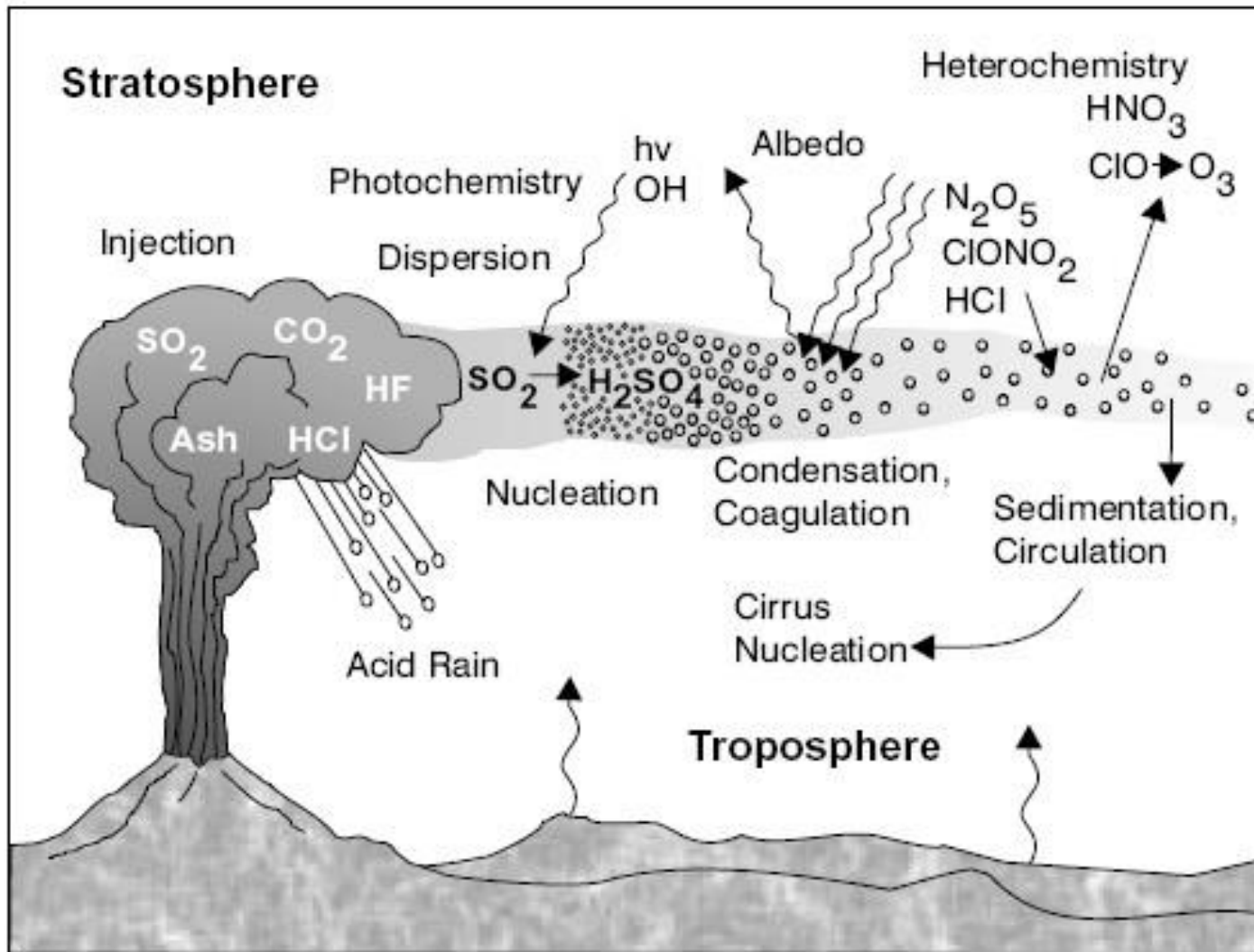
Já os aumentos da concentração de **metano** e **óxido nitroso** são devidos principalmente à agricultura.



Outros fatores afetam o balanço de radiação e o clima (resfriamento da superfície).



Sources: Radiative forcing of climate change, the 1994 report of the scientific assessment working group of IPCC, summary for policymakers, WMO, UNEP; L.D. Danny Harvey, Climate and global environmental change, Prentice Hall, Pearson Education, Harlow, United Kingdom, 2000.



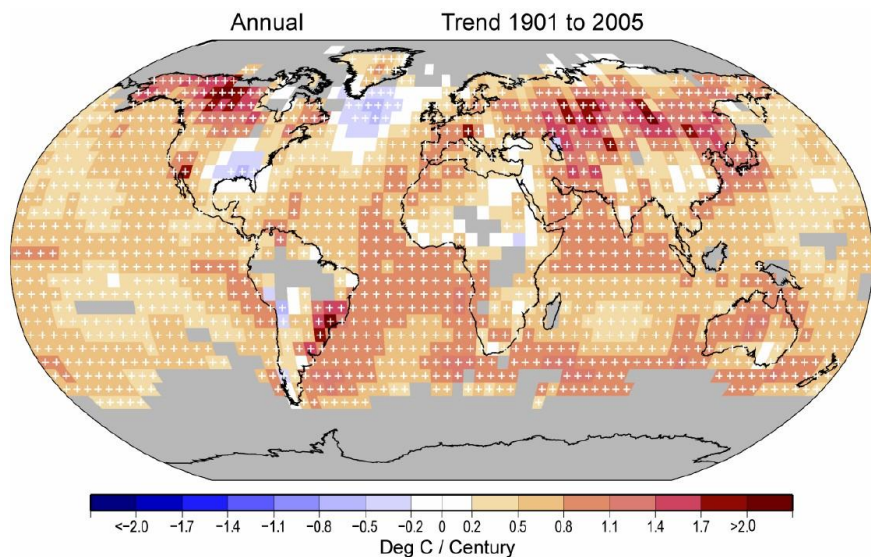
Os vulcões emitem várias partículas e gases que alteram o balanço de energia e o clima.

$\text{SO}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$ sulfuric acid
(aerosols)

<http://vulcan.wr.usgs.gov/Projects/Emissions/>

Vulcão-Isândia 2021 <https://youtu.be/7ljWi-4syBl>

O aquecimento tem ocorrido globalmente.



- Temperaturas médias anuais subiram $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a T_{min} de Inverno subiu quase $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ nos últimos 50 anos no Brasil

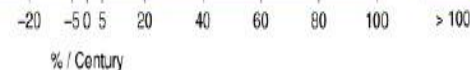
- Temperaturas médias anuais subiram $0,83\text{ }^{\circ}\text{C}$ na Amazônia nos últimos 100 anos

Sul do Brasil tem tendência observada de aumento de chuvas nos últimos 50 anos

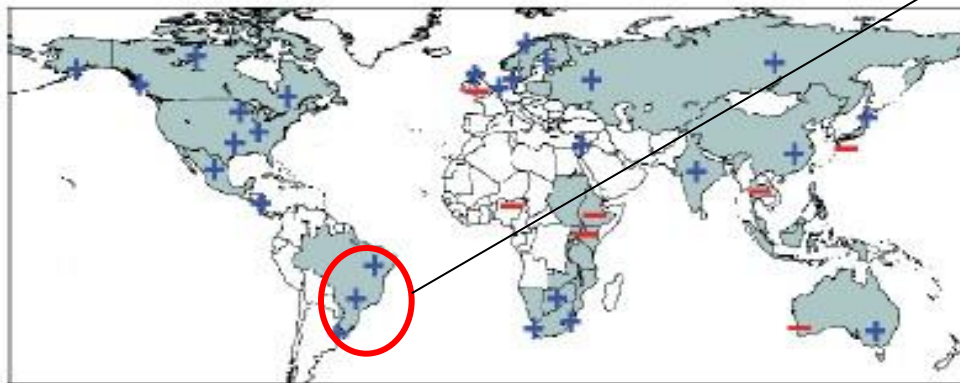
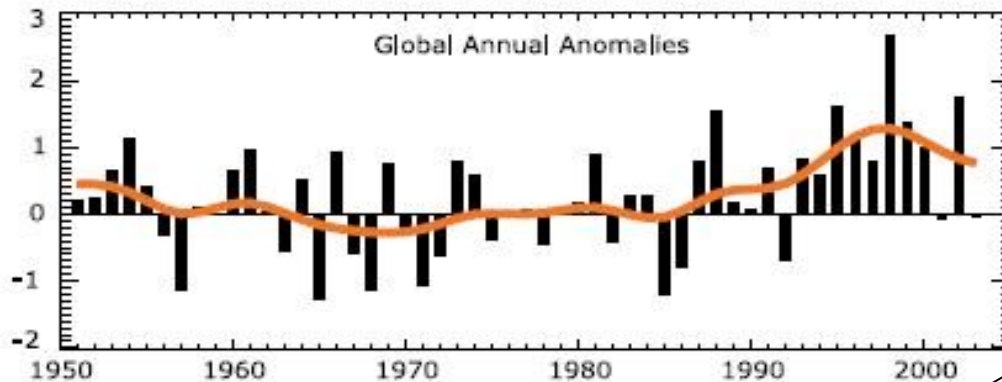
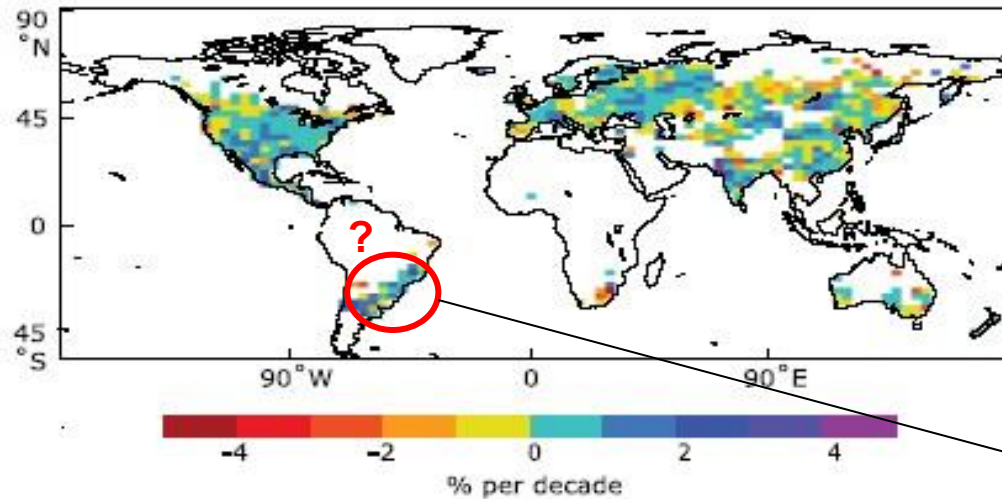


Causa do Aumento das Chuvas: Variabilidade Natural ou Aquecimento Global?

Trend in Annual PRCP, 1901 to 2005

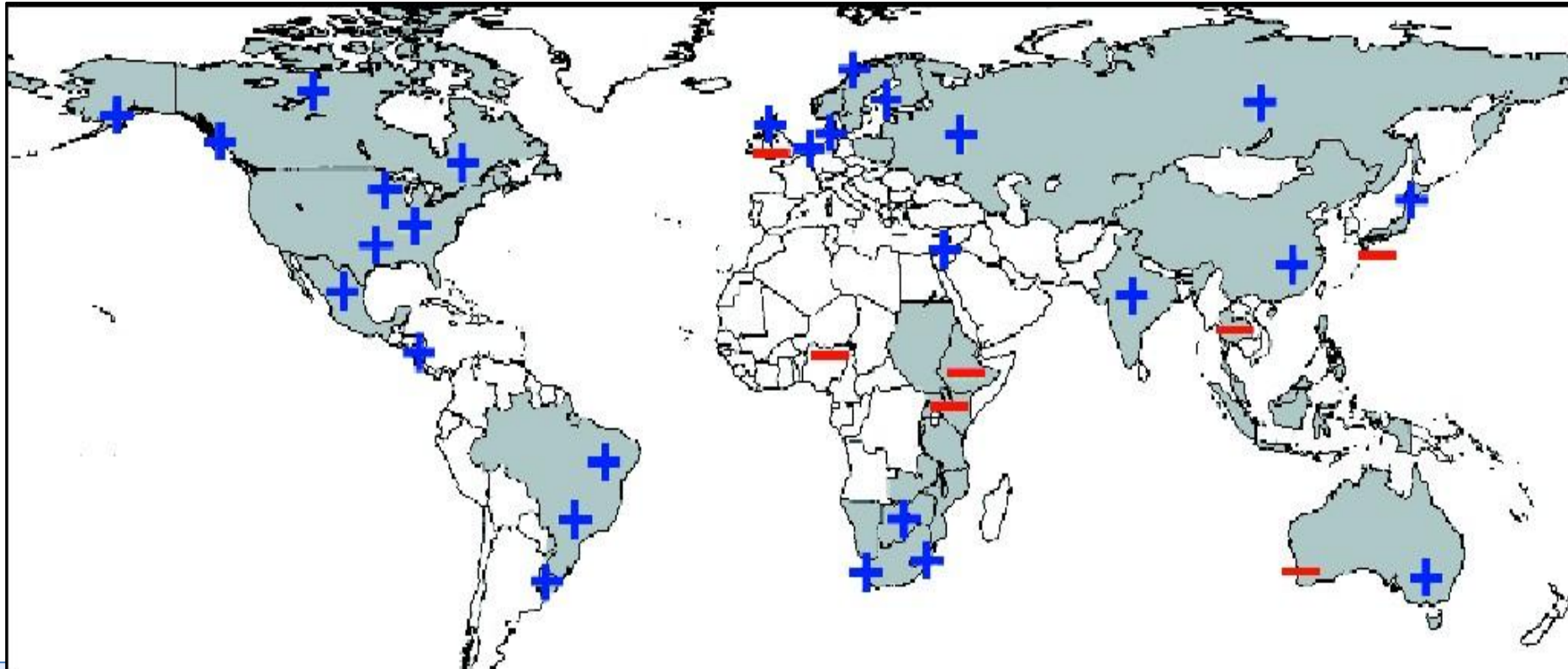


Trend 1951 - 2003 contribution from very wet days



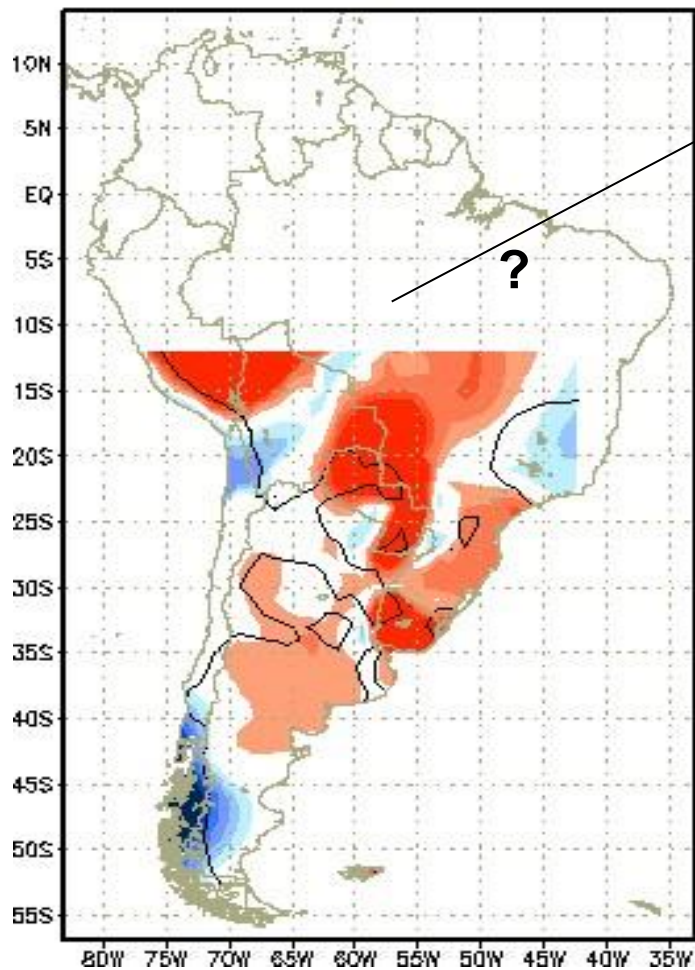
Aumento na frequência de eventos extremos de chuva (95th percentile-% per década) no período 1951-2003 em relação a 1961 to 1990 (IPCC 2007)

O A maioria das regiões sobre continentes tem apresentado **tempestades mais severas.**



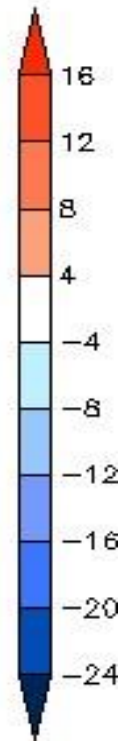
Sudeste da América do Sul: Aumento na intensidade e frequência de dias com chuva intensa (1951-2000)

Observacoes R10mm



Vazio de dados na Amazônia, Nordeste e partes do Centro-Oeste.

DAYS



Índice R10 - Número de dias com chuva acima de 10 mm/dia