

Modelización Climática: Como el superordenador Marenostrum4 nos ayuda a entender el cambio climático.



Roberto Bilbao

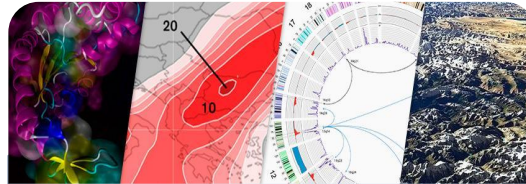
Earth Sciences Department [Climate Variability & Change]
Barcelona Supercomputing Center

Barcelona Supercomputing Center Centro Nacional de Supercomputación

BSC-CNS objectives



Supercomputing services
to Spanish and EU researchers



R&D in Computer, Life, Earth
and Engineering Sciences



PhD programme, technology
transfer, public engagement

BSC-CNS is
a consortium
that includes

Spanish Government

60%



Catalan Government

30%

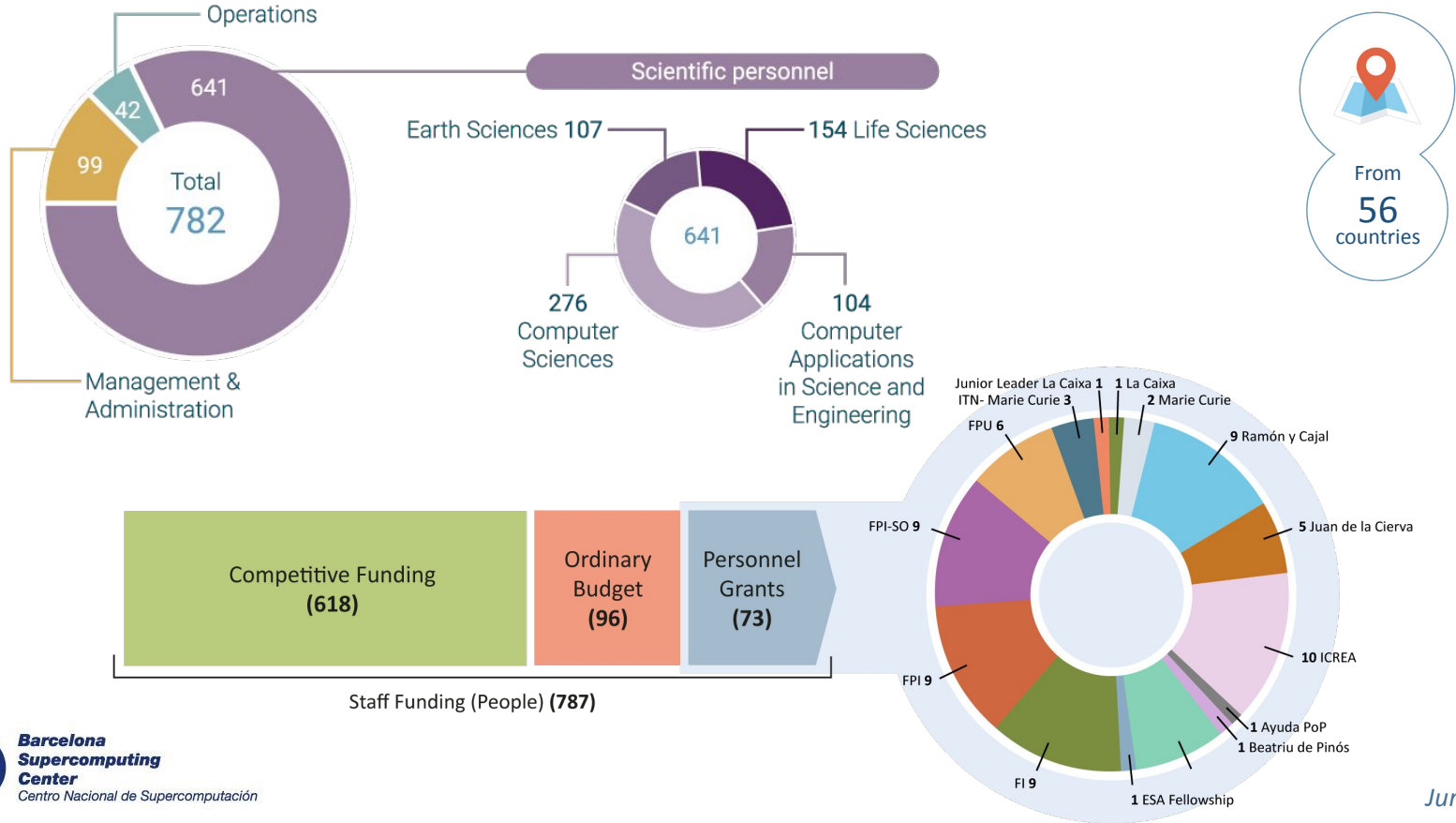


Univ. Politècnica de Catalunya

10%



People



Mission of BSC Scientific Departments

A semi-circular graphic with a background of vertical lines in various colors (green, yellow, red, blue) resembling a digital or data visualization.

Computer Sciences

To influence the way machines are built, programmed and used: programming models, performance tools, Big Data, Artificial Intelligence , computer architecture, energy efficiency

A semi-circular graphic showing a stylized Earth with various colors representing different geographical features and atmospheric conditions.

Earth Sciences

To develop and implement global and regional state-of-the-art models for short-term air quality forecast and long-term climate applications

A semi-circular graphic with a dark background, featuring glowing, colorful molecular structures in shades of green, yellow, and purple.

Life Sciences

To understand living organisms by means of theoretical and computational methods (molecular modeling, genomics, proteomics)

A semi-circular graphic with a dark green background, showing a stylized map of the world with various colors representing different regions or data points.

CASE

To develop scientific and engineering software to efficiently exploit super-computing capabilities (biomedical, geophysics, atmospheric, energy, social and economic simulations)



Earth Science Department

Modelización y predicción con un enfoque en el clima y calidad del aire.



Director del Departamento: Francisco Doblas-Reyes

MareNostrum 4



MareNostrum 1
2004 – 42,3 Tflops
1st Europe / 4th World
New technologies

MareNostrum 2
2006 – 94,2 Tflops
1st Europe / 5th World
New technologies

MareNostrum 3
2012 – 1,1 Pflops
12th Europe / 36th
World

MareNostrum 4
2017 – 11,1 Pflops
2nd Europe / 13th World
New technologies

MareNostrum 4

General Purpose:
for current BSC workload

11.15 Pflops/s (10^{15} floating point
operations per second)

48 racks: 3,456 nodes of Intel Xeon
Platinum processors (165,888)

390 Terabytes of Main Memory

14PB storage

**Coming
Soon!**

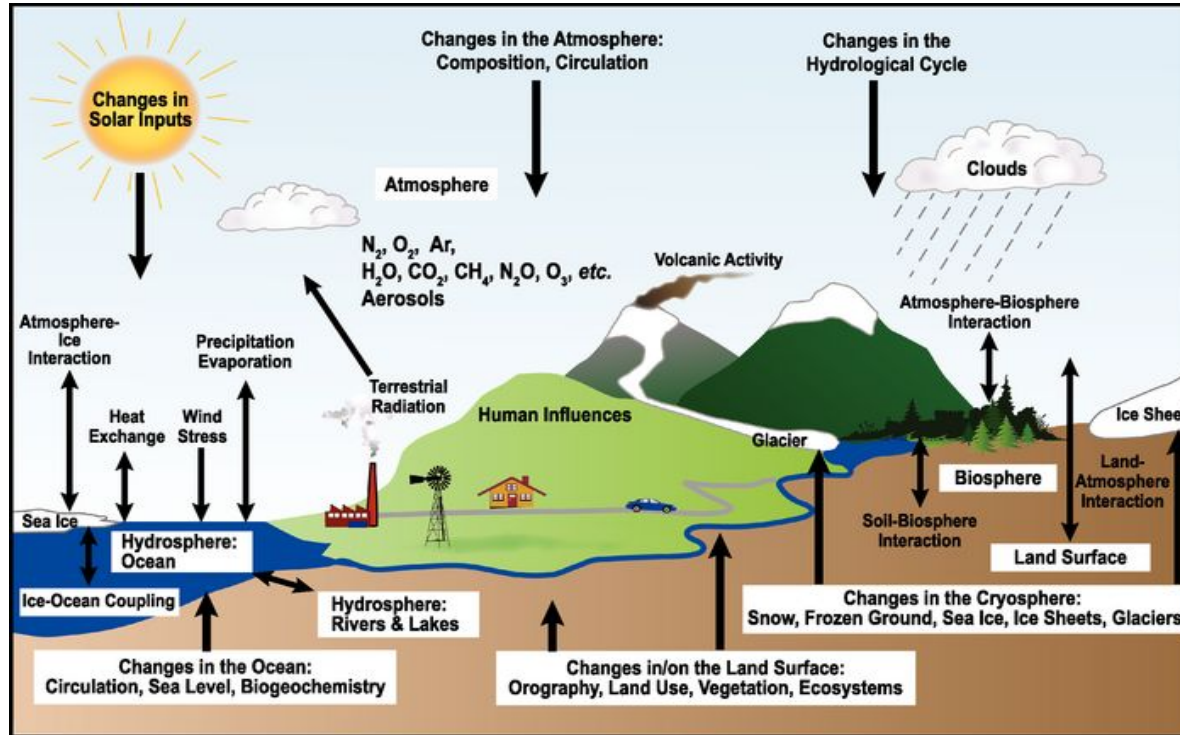
MareNostrum 5

EuroHPC pre-exascale supercomputer

314 Pflops/s (10^{15} floating point operations per second)

200PB storage

Sistema Climático Terrestre

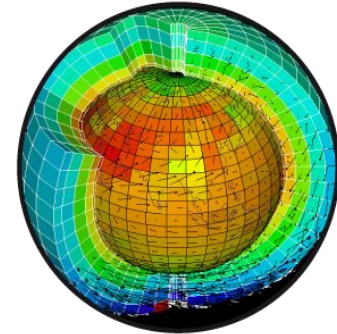


Modelización Climática

¿Qué es un modelo de clima?

Representación matemática del sistema terrestre a través de las leyes fundamentales que describen la evolución y las interacciones entre los componentes.

- Conservation of momentum
$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k_m \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$
- Conservation of energy
$$\rho c_{\vec{v}} \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_{\vec{v}} (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k_T \nabla T) + C + S$$
- Conservation of mass
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$
- Conservation of H_2O (vapor, liquid, solid)
$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k_q \nabla q) + S_q + E$$
- Equation of state
$$p = \rho R_d T$$



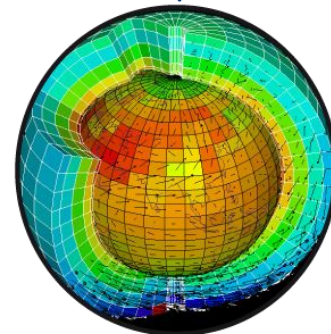
Modelización Climática

¿Qué es un modelo de clima?

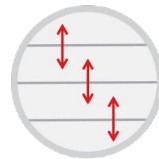
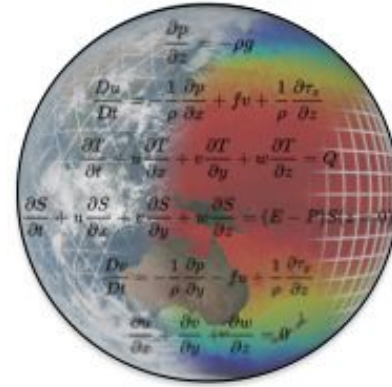
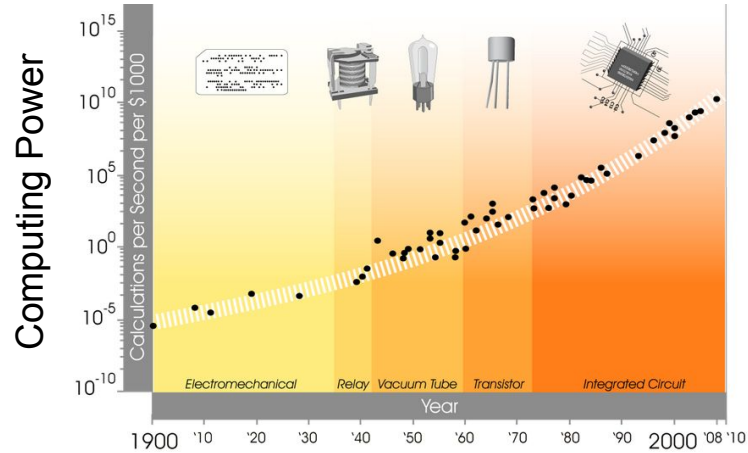
Representación matemática del sistema terrestre a través de las leyes fundamentales que describen la evolución y las interacciones entre los componentes.



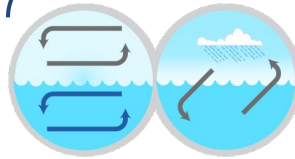
- Conservation of momentum
$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V} - \frac{1}{\rho} \nabla p - \vec{g} - 2\vec{\Omega} \times \vec{V} + \nabla \cdot (k_m \nabla \vec{V}) - \vec{F}_d$$
- Conservation of energy
$$\rho c_{\vec{v}} \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_{\vec{v}} (\vec{V} \cdot \nabla) T - \nabla \cdot \vec{R} + \nabla \cdot (k_T \nabla T) + C + S$$
- Conservation of mass
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) \rho - \rho (\nabla \cdot \vec{V})$$
- Conservation of H_2O (vapor, liquid, solid)
$$\frac{\partial q}{\partial t} = -(\vec{V} \cdot \nabla) q + \nabla \cdot (k_q \nabla q) + S_q + E$$
- Equation of state
$$p = \rho R_d T$$



Modelización Climática



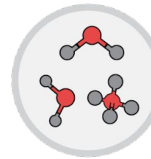
1890s
Radiative
Transfer



1960s
Non-Linear
Fluid Dynamics
Hydrological
Cycle



1970s
Sea Ice and
Land Surface



1990s
Atmospheric
Chemistry



2000s
Aerosols and
Vegetation



2010s
Biogeochemical
Cycles and Carbon

Energy Balance Models

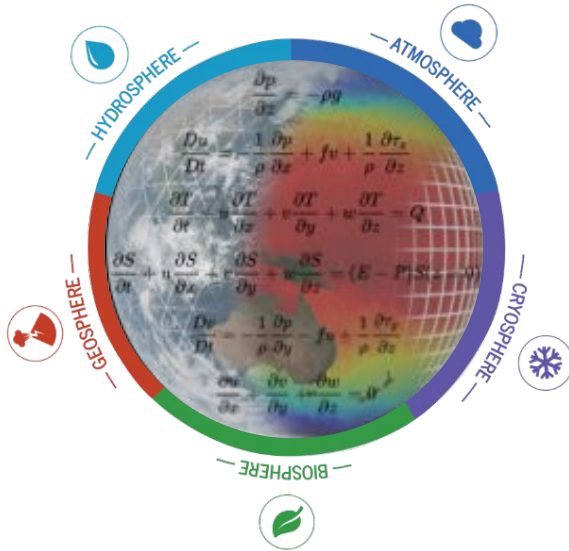
Atmosphere-Ocean General Circulation Models

Earth System Models



**Barcelona
Supercomputing
Center**
Centro Nacional de Supercomputación

Modelización Climática

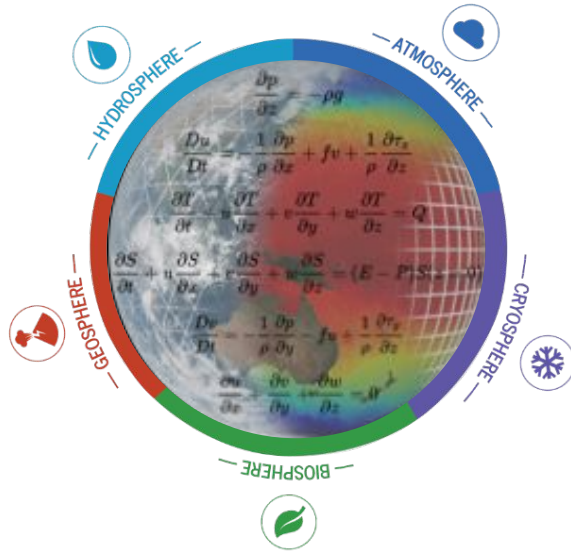


Herramienta principal para desarrollar el conocimiento científico sobre el clima mediante el contraste de hipótesis en temas diversos:



Detectar y atribuir cambios en el clima.

Modelización Climática



Herramienta principal para desarrollar el conocimiento científico sobre el clima mediante el contraste de hipótesis en temas diversos:

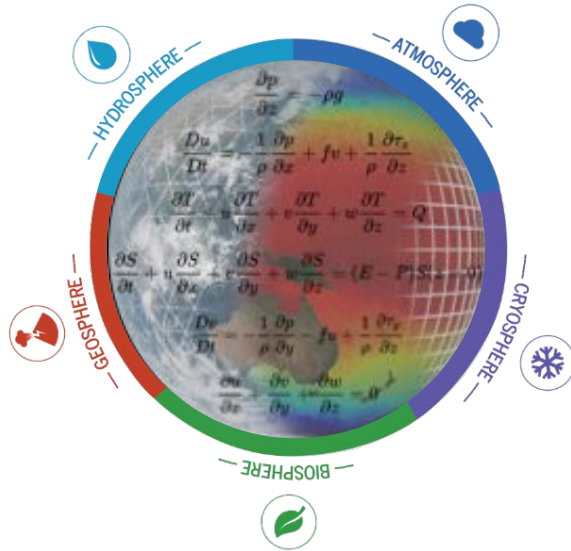


Detectar y atribuir cambios en el clima.



Adaptación /mitigación del cambio climático futuro.

Modelización Climática



Herramienta principal para desarrollar el conocimiento científico sobre el clima mediante el contraste de hipótesis en temas diversos:



Detectar y atribuir cambios en el clima.

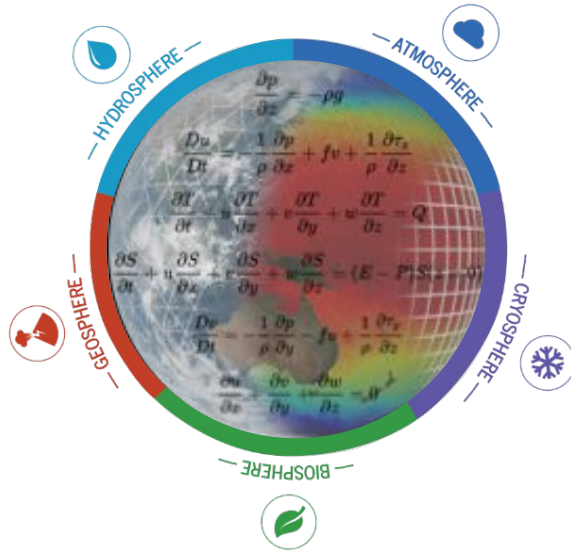


Adaptación /mitigación del cambio climático futuro.



Riesgo de cambios irreversibles.

Modelización Climática



Herramienta principal para desarrollar el conocimiento científico sobre el clima mediante el contraste de hipótesis en temas diversos:



Detectar y atribuir cambios en el clima.



Adaptación /mitigación del cambio climático futuro.



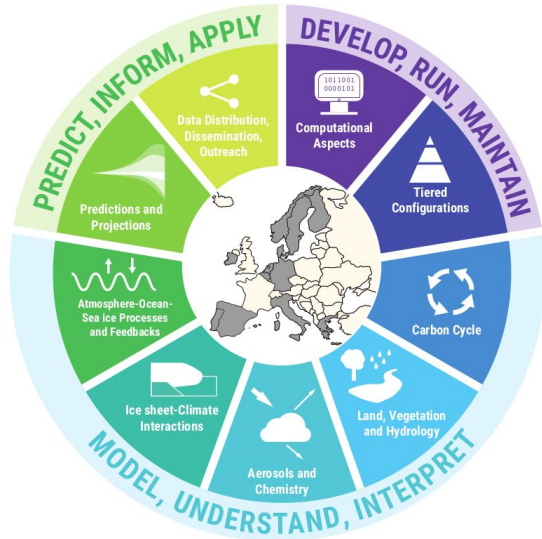
Riesgo de cambios irreversibles.



Predicción climática.

EC-Earth3

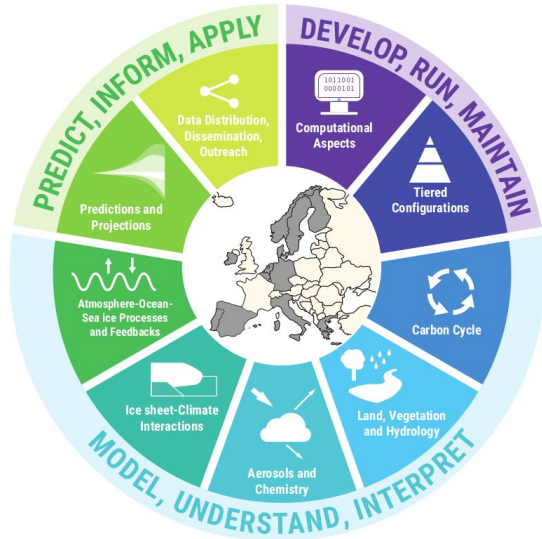
European Community Earth-System Model



30 Centros de Investigación
12 países Europeos

EC-Earth3

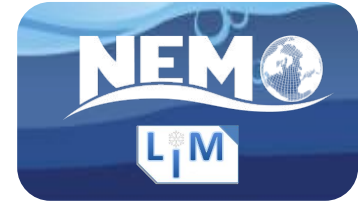
European Community Earth-System Model



30 Centros de Investigación
12 países Europeos



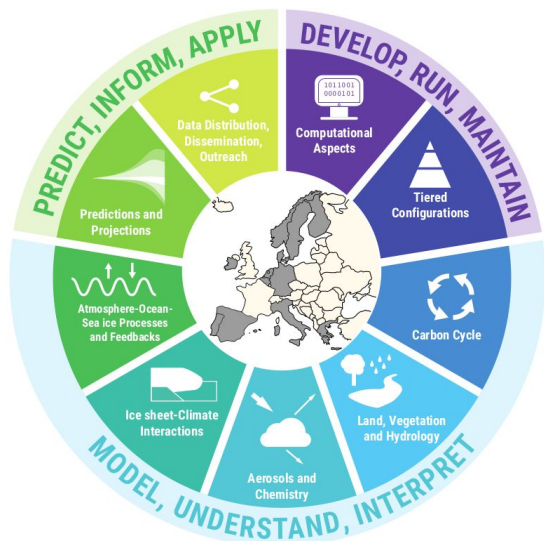
Atmósfera y
Superficie Terrestre



Océano y Hielo Marino

EC-Earth3

European Community Earth-System Model



30 Centros de Investigación
12 países Europeos



Atmósfera y Superficie Terrestre



Océano y Hielo Marino



Vegetación



Química Atmosférica



Biogeoquímica Oceánica



Hielo de Groenlandia

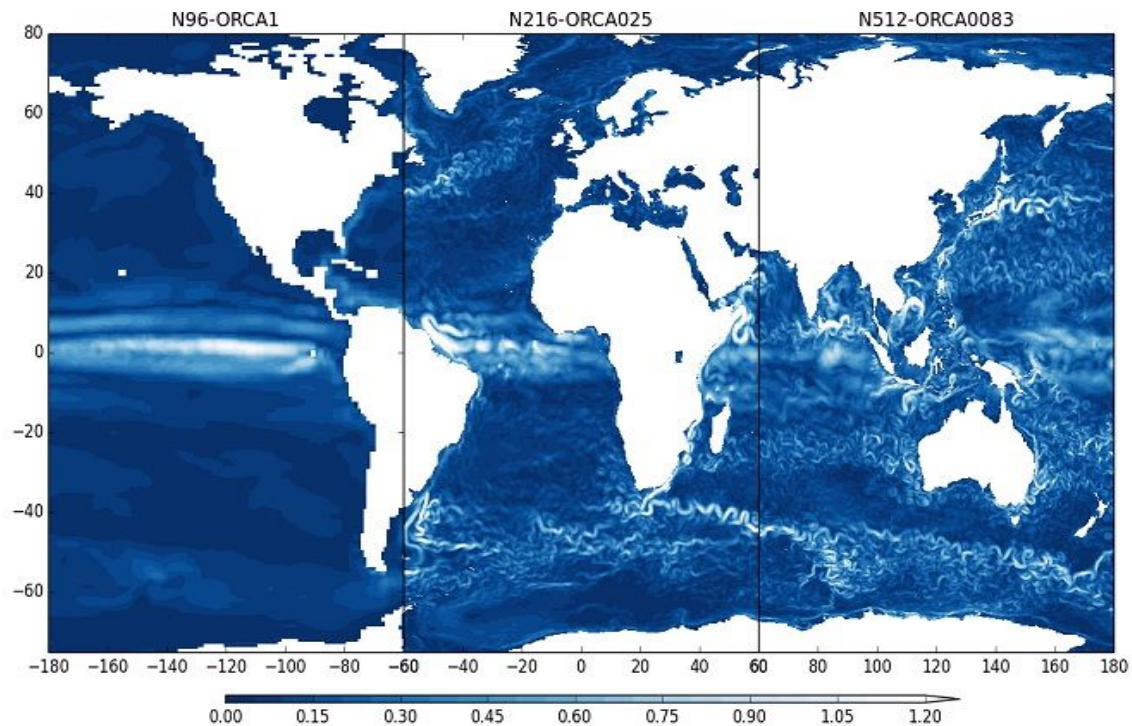
EC-Earth3

European Community Earth-System Model

Resolución Estándar

Resolución Alta

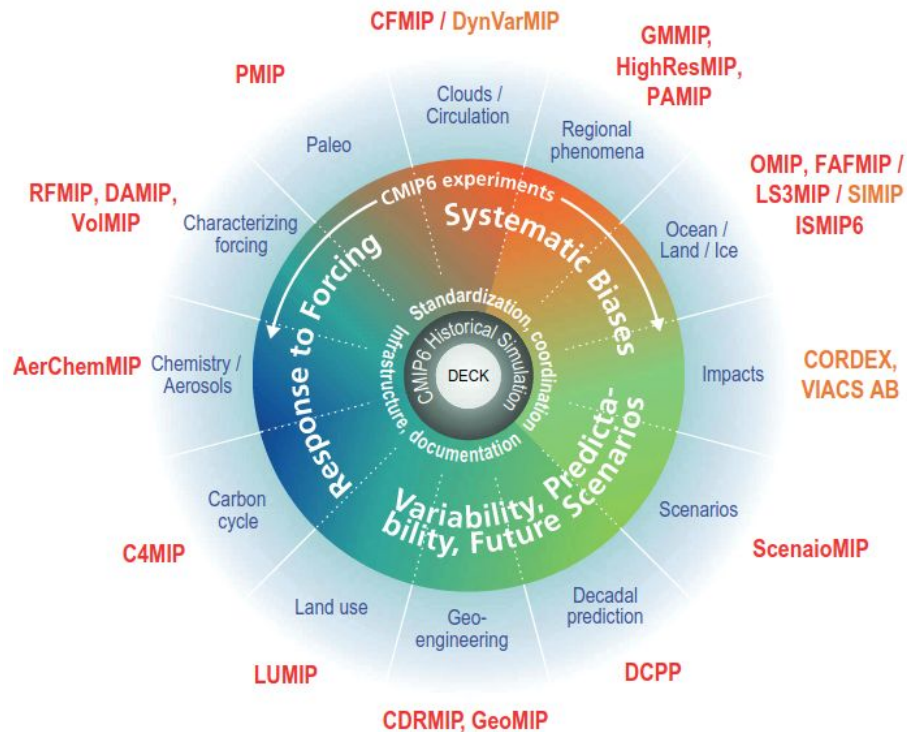
Resolución Muy Alta



Climate Model Intercomparison Project 6 (CMIP6)

CMIP es un proyecto del World Climate Research Programme (WCRP) que tiene como objetivo coordinar las simulaciones que hacen los centros de modelización de todo el mundo.

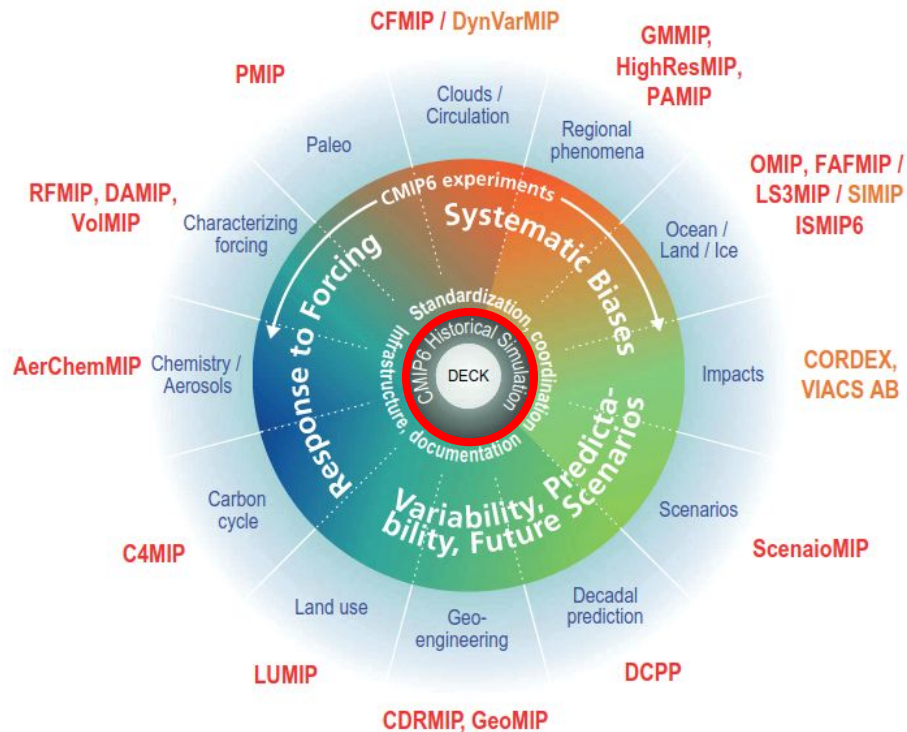
Establece una serie de protocolos experimentales, forzamientos y variables de salida comunes.



Climate Model Intercomparison Project 6 (CMIP6)

CMIP es un proyecto del World Climate Research Programme (WCRP) que tiene como objetivo coordinar las simulaciones que hacen los centros de modelización de todo el mundo.

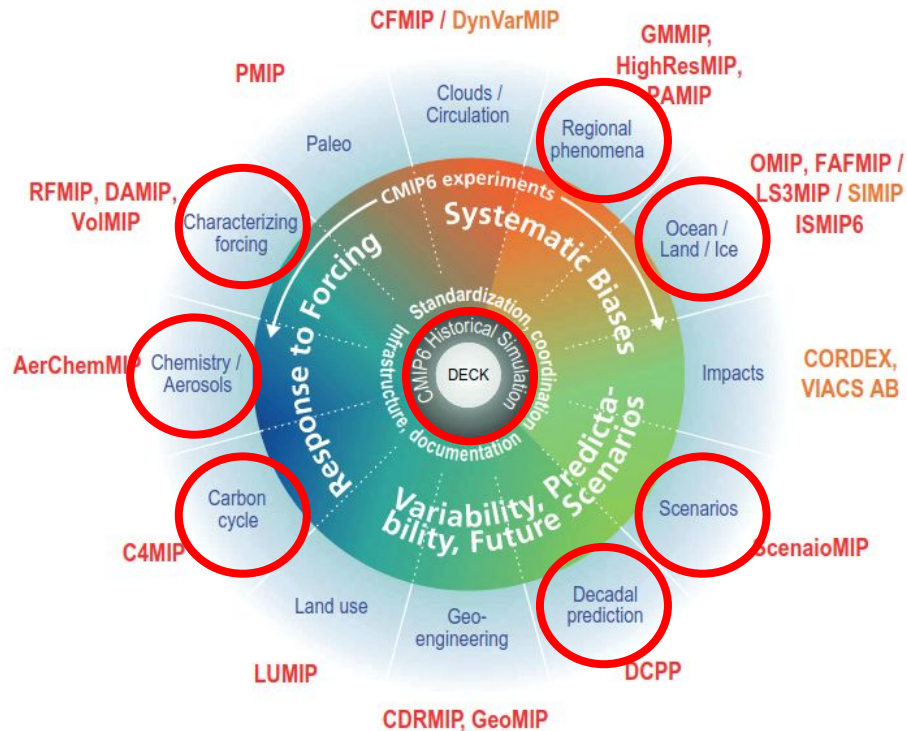
Establece una serie de protocolos experimentales, forzamientos y variables de salida comunes.



Climate Model Intercomparison Project 6 (CMIP6)

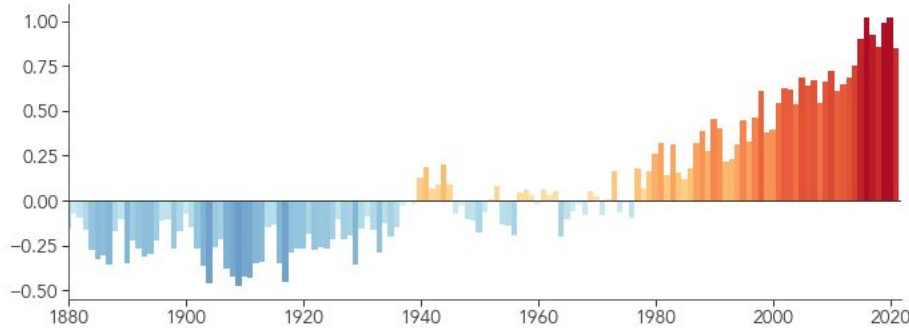
CMIP es un proyecto del World Climate Research Programme (WCRP) que tiene como objetivo coordinar las simulaciones que hacen los centros de modelización de todo el mundo.

Establece una serie de protocolos experimentales, forzamientos y variables de salida comunes.

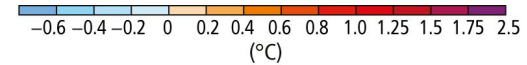
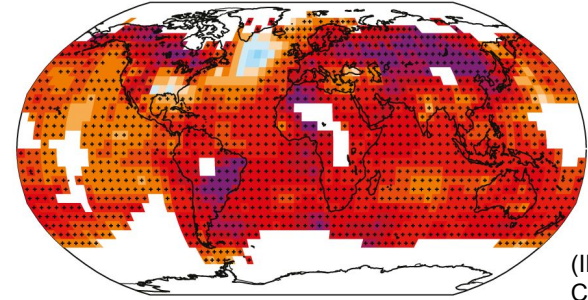


Detectar y atribuir cambios climáticos

Global Temperature Anomaly (°C compared to the 1951-1980 average)



(Source: <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>)

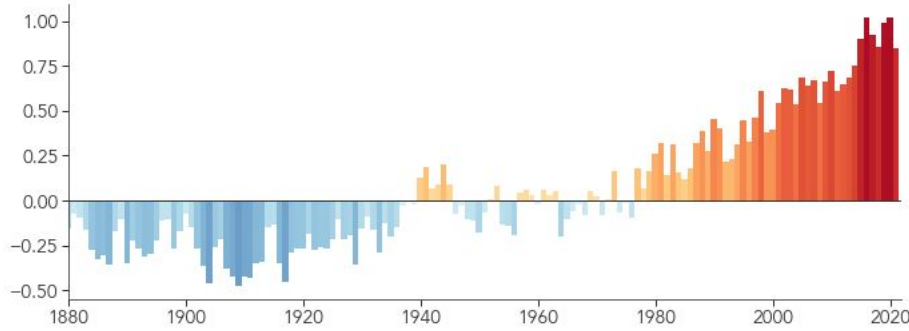


Tendencias (1901-2012)

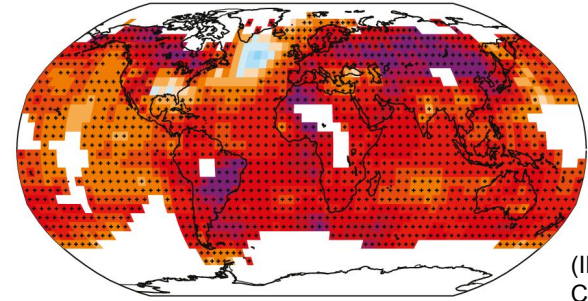
(IPCC AR5
Chapter 2)

Detectar y atribuir cambios climáticos

Global Temperature Anomaly (°C compared to the 1951-1980 average)



(Source: <https://earthobservatory.nasa.gov/world-of-change/global-temperatures>)

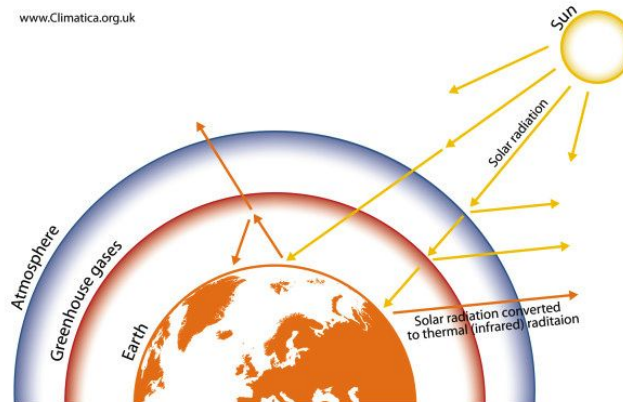


-0.6 -0.4 -0.2 0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 1.25 1.5 1.75 2.5
(°C)

Tendencias (1901-2012)

(IPCC AR5
Chapter 2)

www.Climatica.org.uk

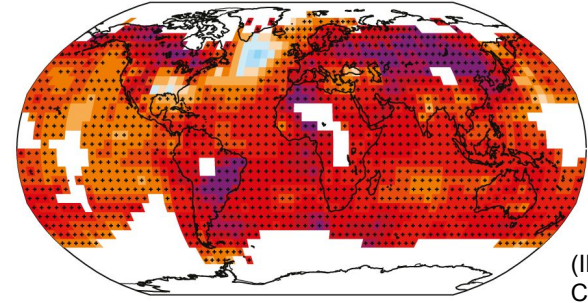
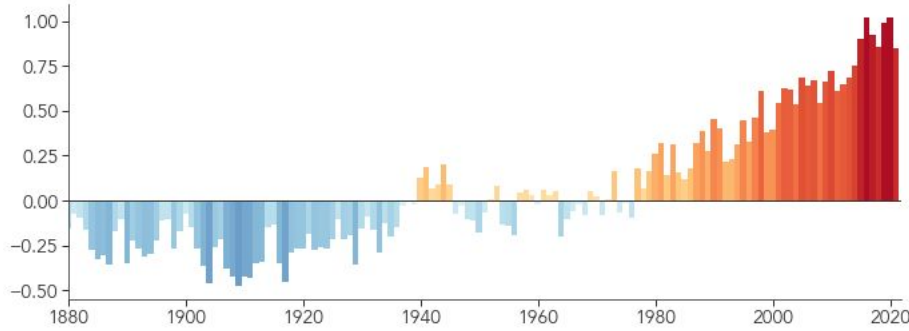


**Barcelona
Supercomputing
Center**

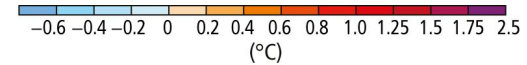
Centro Nacional de Supercomputación

Detectar y atribuir cambios climáticos

Global Temperature Anomaly (°C compared to the 1951-1980 average)



(IPCC AR5
Chapter 2)



Tendencias (1901-2012)

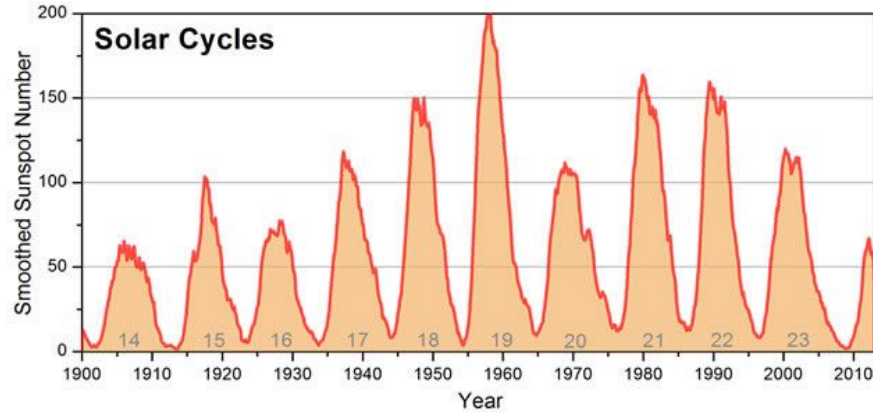
Forzamientos Externos

Origen Natural

Origen Humano

Variabilidad Interna

Detectar y atribuir cambios climáticos



Forzamientos Externos

Origen Natural

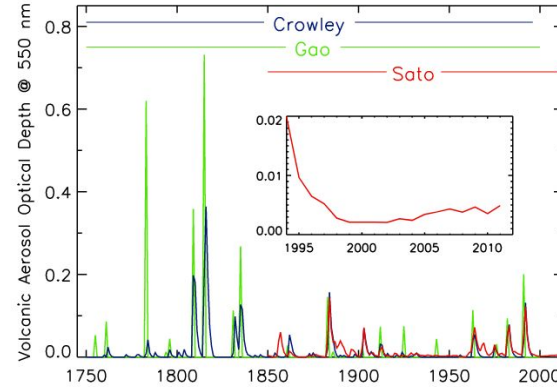
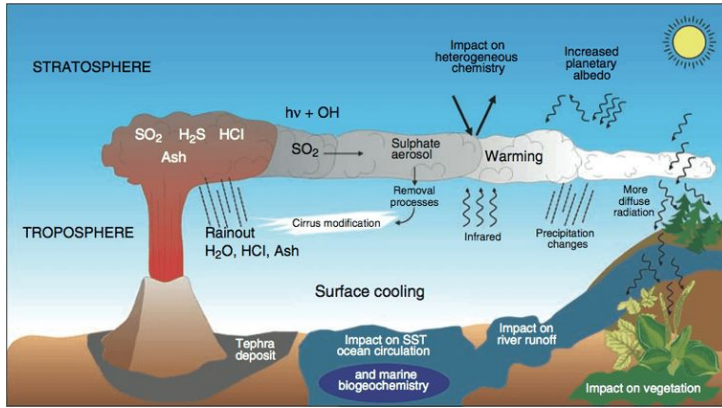


Irradiancia
Solar

Origen Humano

Variabilidad Interna

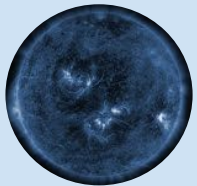
Detectar y atribuir cambios climáticos



IPCC AR5,
Chapter 8

Forzamientos Externos

Origen Natural



Irradiancia Solar

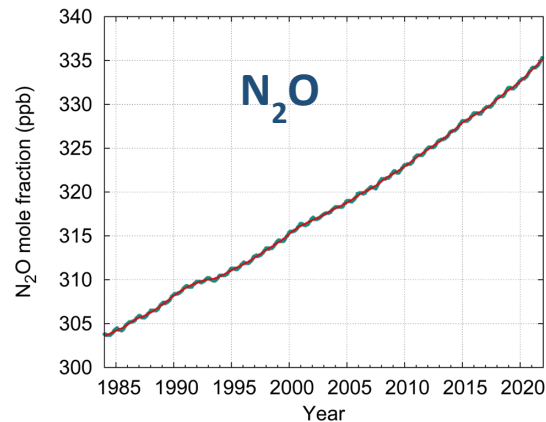
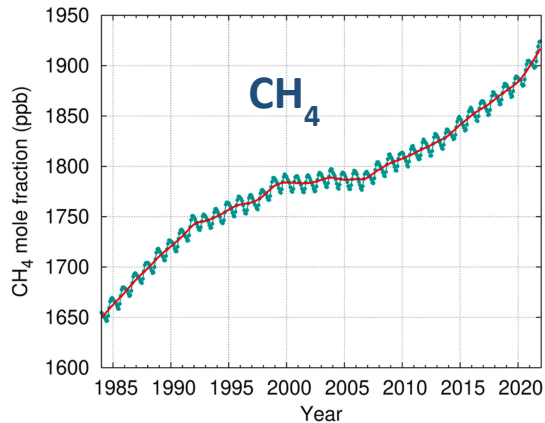
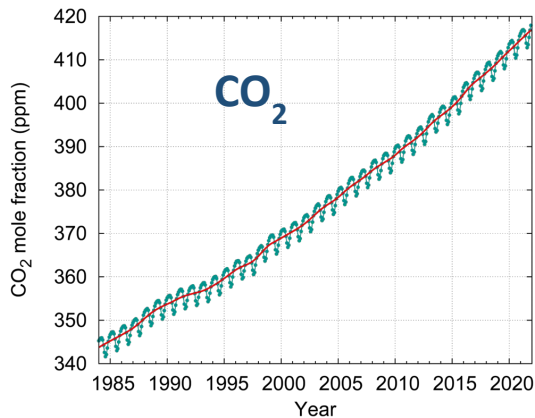


Aerosoles Volcánicos

Origen Humano

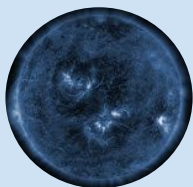
Variabilidad Interna

Detectar y atribuir cambios climáticos



Forzamientos Externos

Origen Natural



Irradiancia Solar



Aerosoles Volcánicos

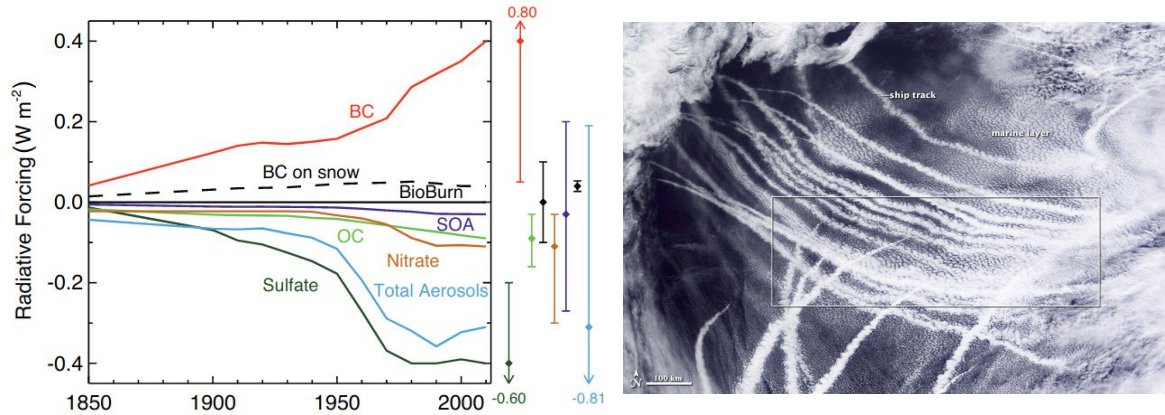
Origen Humano



Gases Efecto Invernadero

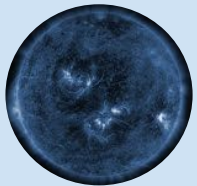
Variabilidad Interna

Detectar y atribuir cambios climáticos



Forzamientos Externos

Origen Natural



Irradiancia Solar



Aerosoles Volcánicos

Origen Humano



Gases Efecto Invernadero

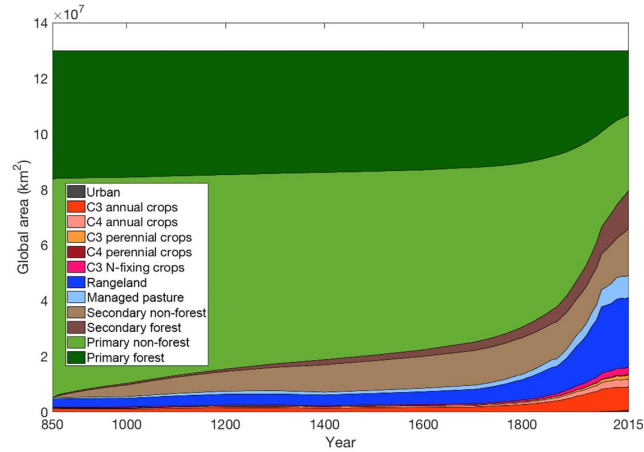


Aerosoles Antropogénicos

Variabilidad Interna



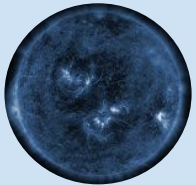
Detectar y atribuir cambios climáticos



Jungclaus et al.,
2017

Forzamientos Externos

Origen Natural



Irradiancia
Solar



Aerosoles
Volcánicos

Origen Humano



Gases Efecto
Invernadero



Aerosoles
Antropogénicos



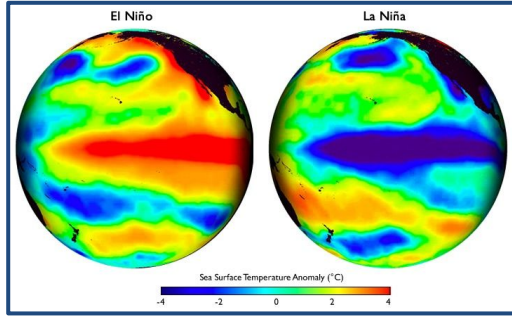
Uso del Suelo

Variabilidad Interna

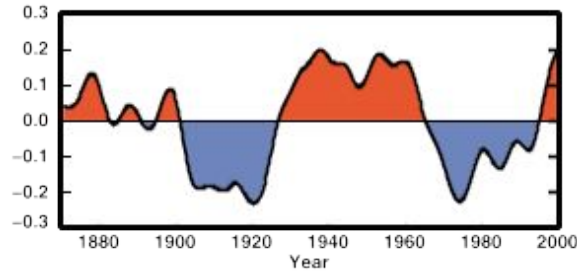


Detectar y atribuir cambios climáticos

El Niño Southern Oscillation

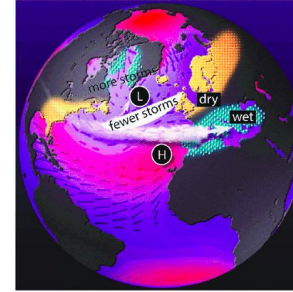


Atlantic Multidecadal Variability

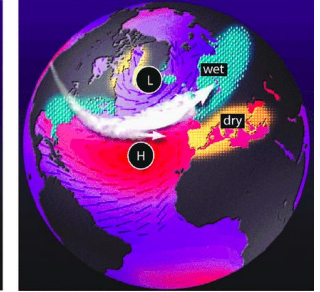


North Atlantic Oscillation

a) NAO negative-mode

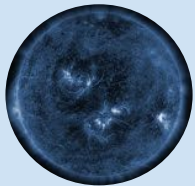


b) NAO positive-mode



Forzamientos Externos

Origen Natural



Irradiancia Solar



Aerosoles Volcánicos

Origen Humano



Gases Efecto Invernadero

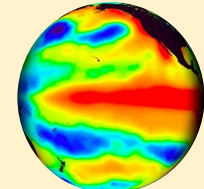


Aerosoles Antropogénicos



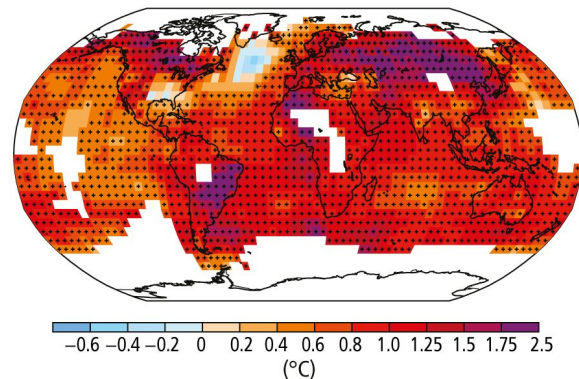
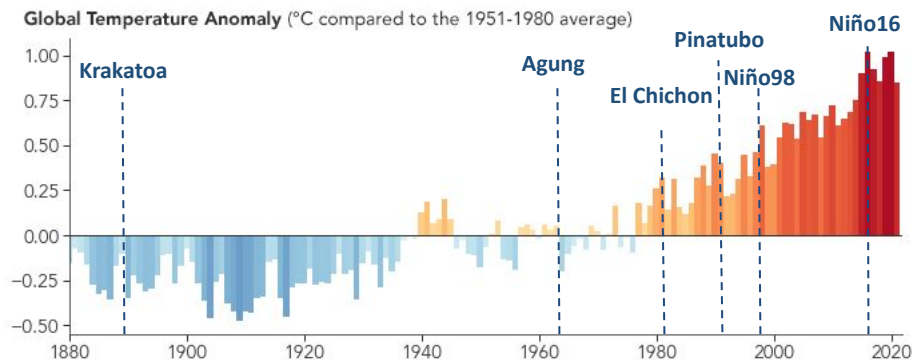
Uso del Suelo

Variabilidad Interna



Modos de variabilidad

Detectar y atribuir cambios climáticos



Forzamientos Externos

Origen Natural



Irradiancia Solar



Aerosoles Volcánicos

Origen Humano



Gases Efecto Invernadero

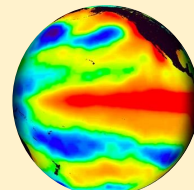


Aerosoles Antropogénicos



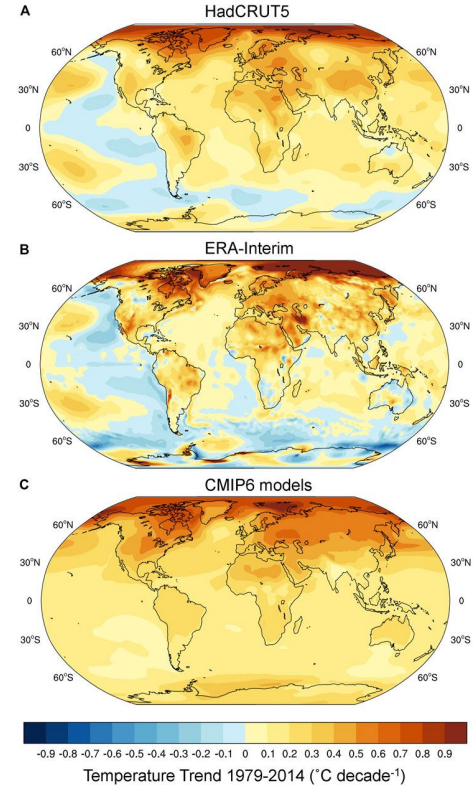
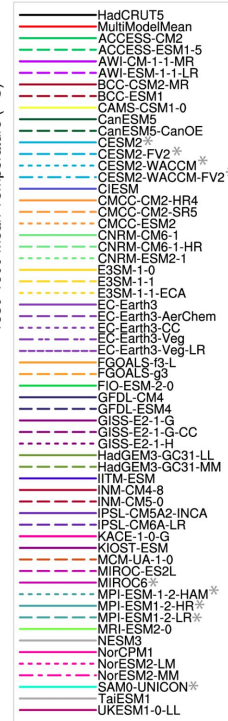
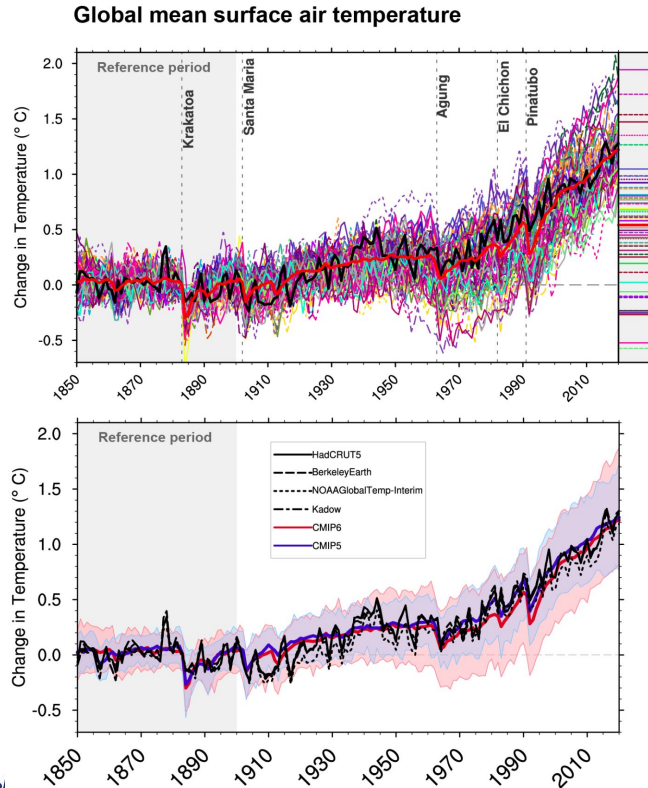
Uso del Suelo

Variabilidad Interna



Modos de variabilidad

Detectar y atribuir cambios climáticos



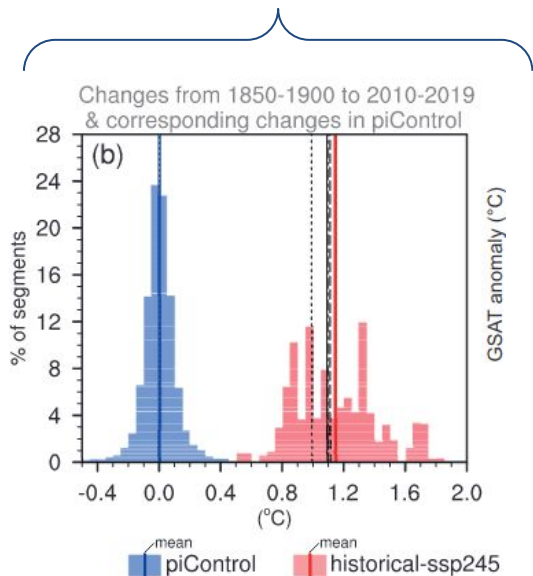
(IPCC AR6 Chp. 3, Eyring et al., 2021)

(Hahn et al., 2021)

Detectar y atribuir cambios climáticos

Los modelos climáticos nos ayudan a comprender cambios en el clima.

Detección

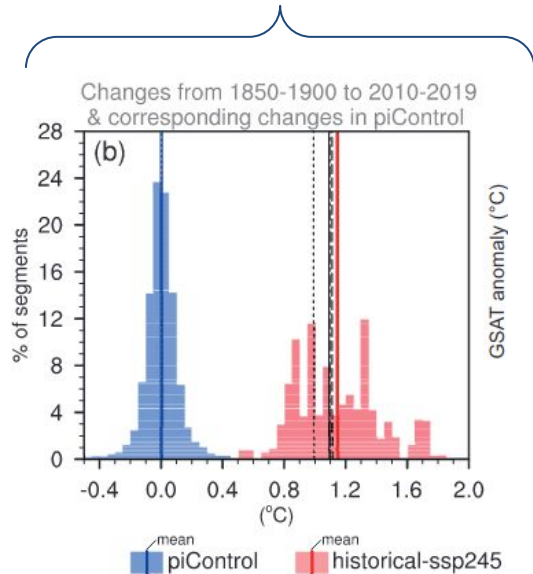


Atribución

Detectar y atribuir cambios climáticos

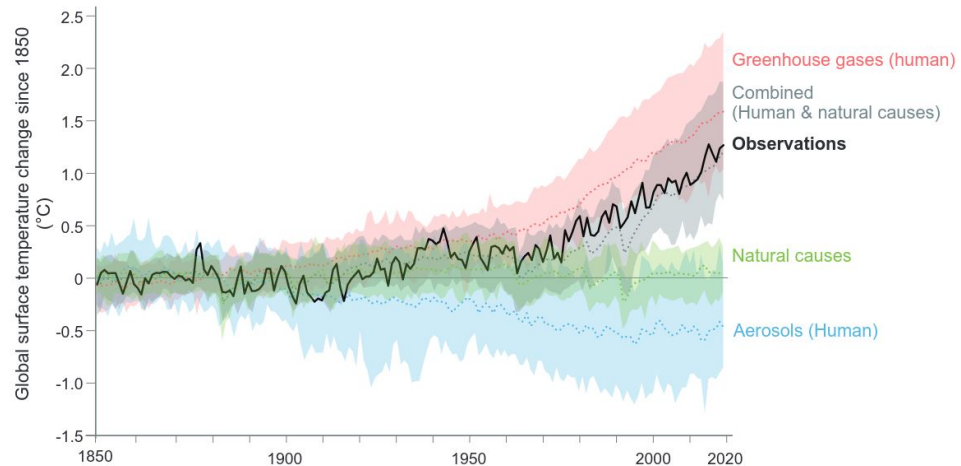
Los modelos climáticos nos ayudan a comprender cambios en el clima.

Detección



Atribución

Observed warming (1850-2019) is only reproduced in simulations including human influence.

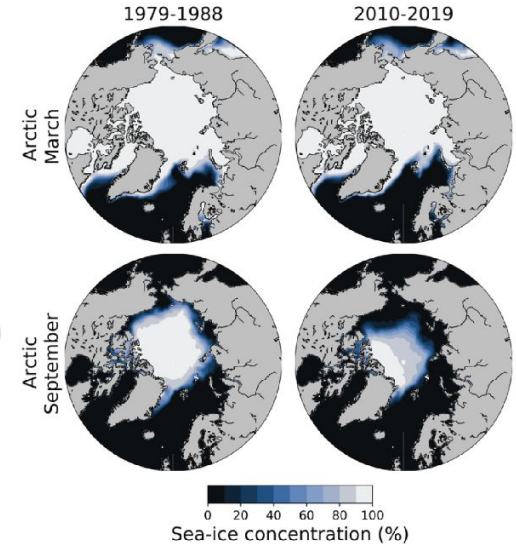
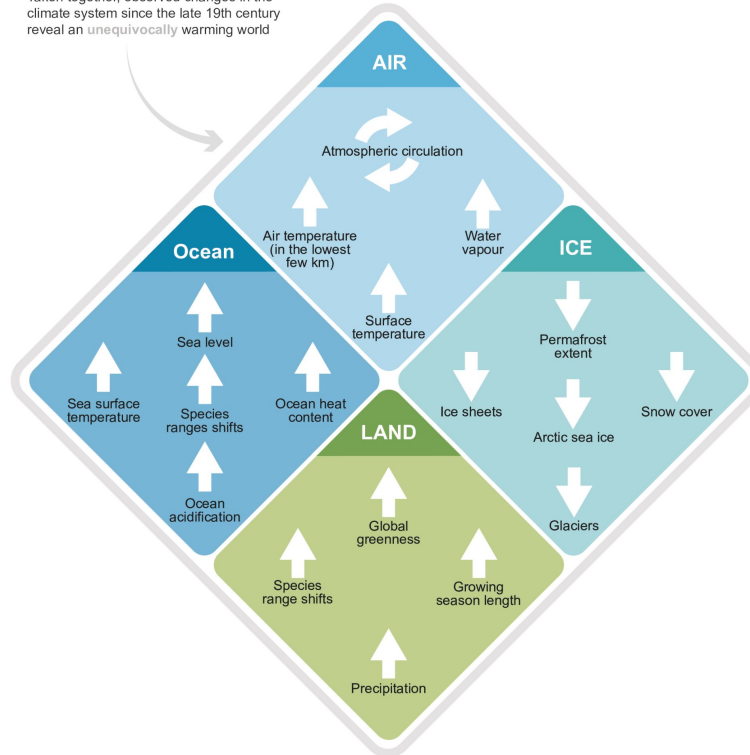
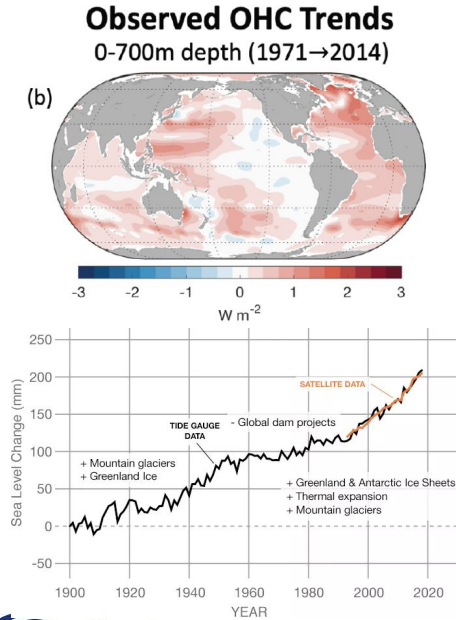


Detectar y atribuir cambios climáticos

Es inequívoco que la influencia del humano ha contribuido a calentar la atmósfera, océano y la superficie terrestre.

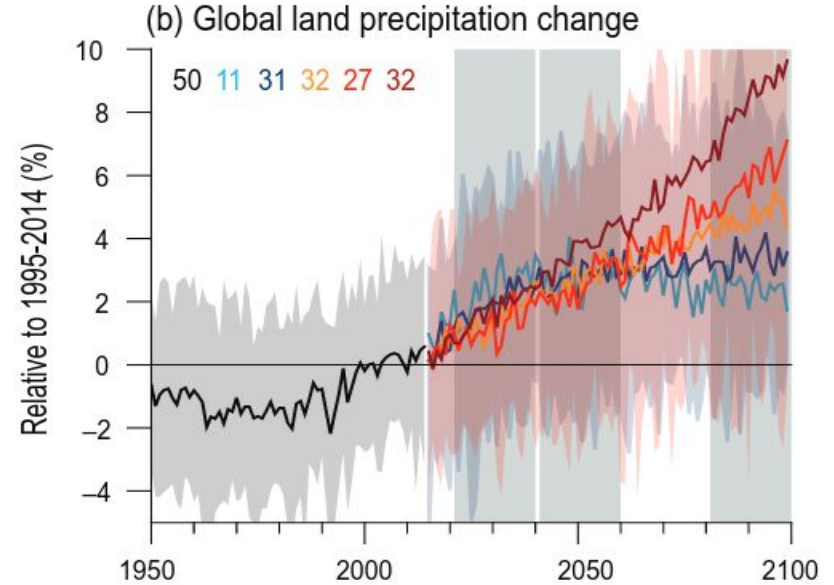
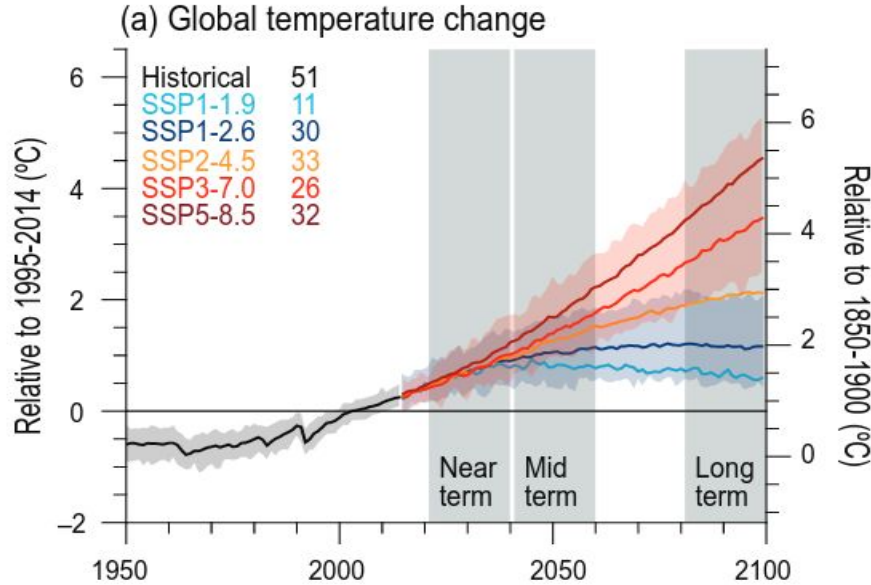
FAQ 2.2: What is the evidence for climate change?

Taken together, observed changes in the climate system since the late 19th century reveal an unequivocally warming world



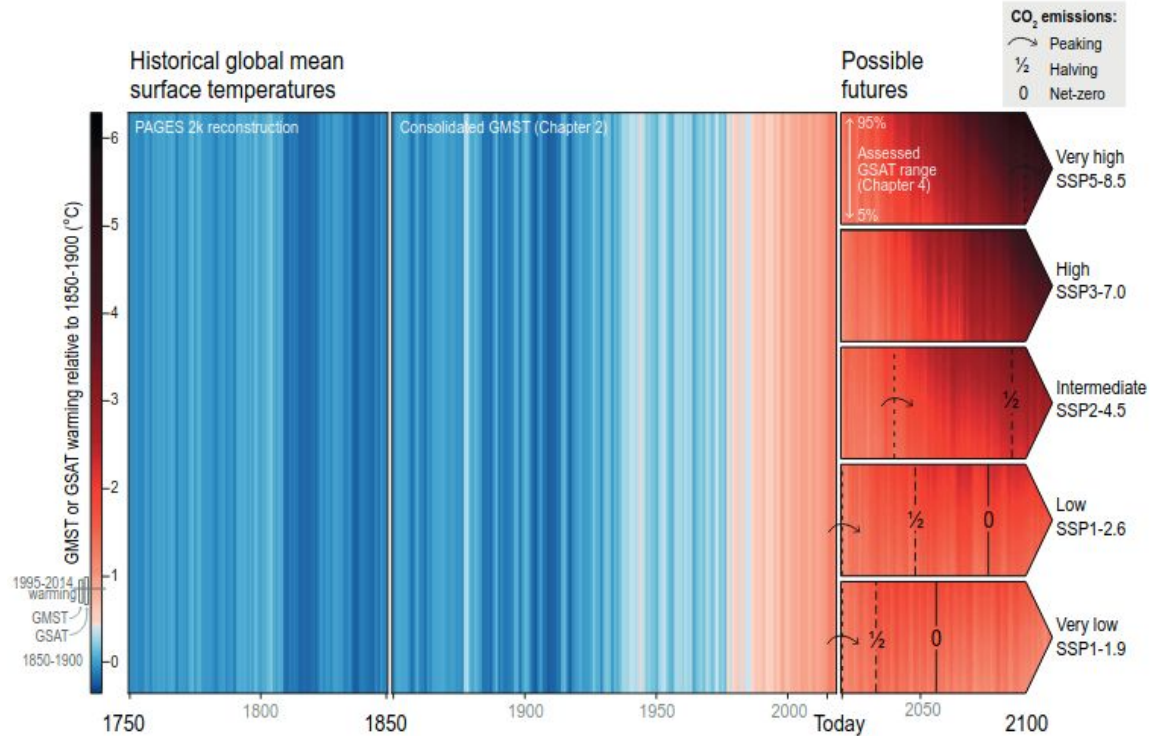
Proyecciones climáticas

Los modelos climáticos nos permiten hacer proyecciones de clima.



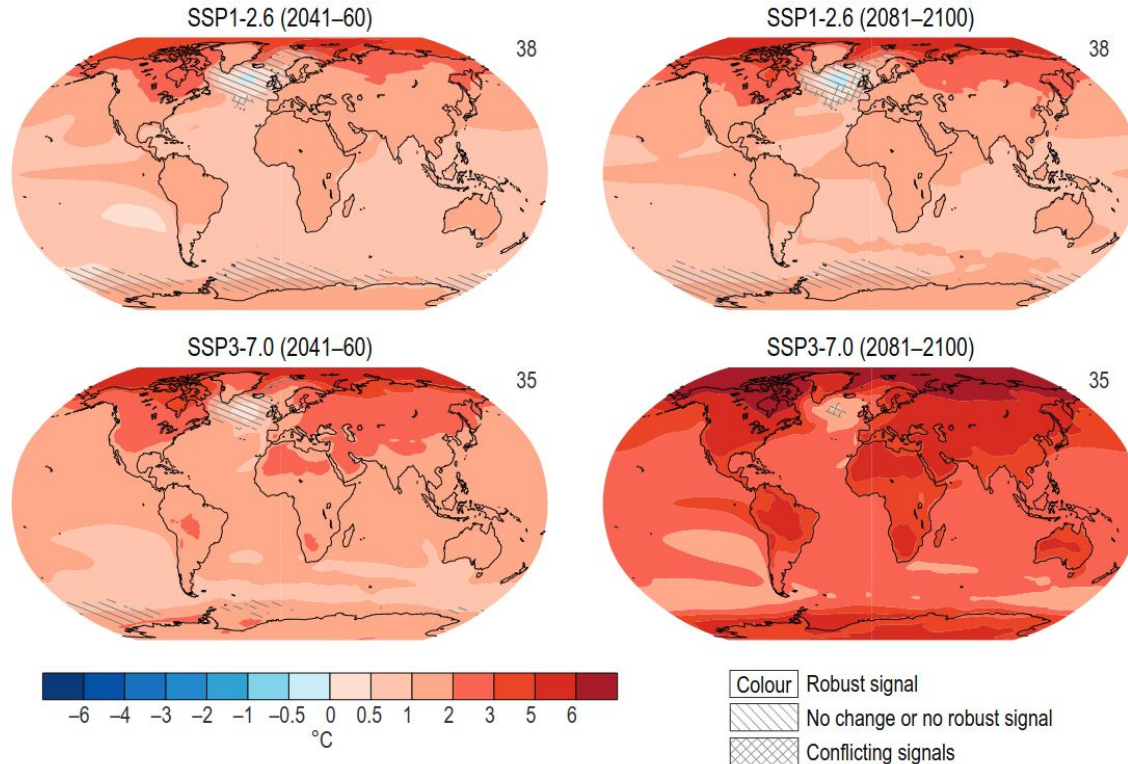
Proyecciones climáticas

Los modelos climáticos nos permiten hacer proyecciones de clima.



Proyecciones climáticas

Annual mean temperature change

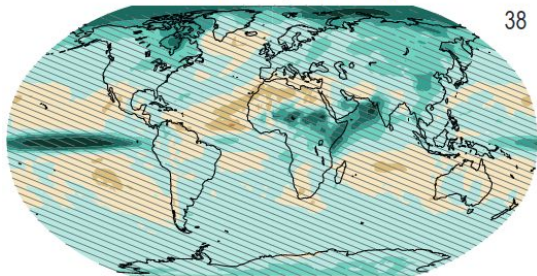


Proyecciones climáticas

Seasonal mean precipitation change

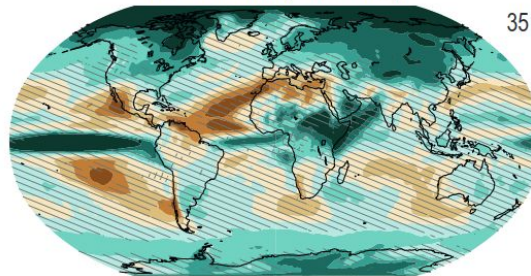
DJF SSP1-2.6 (2081–2100)

38



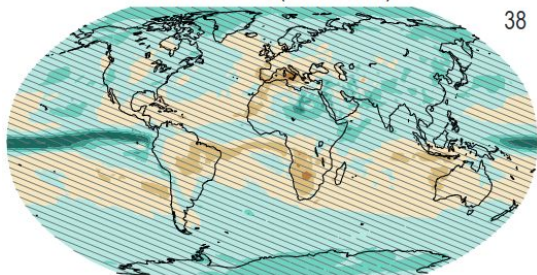
DJF SSP3-7.0 (2081–2100)

35



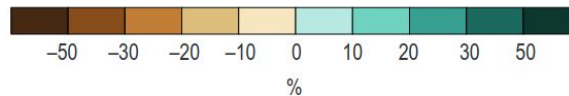
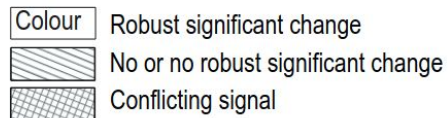
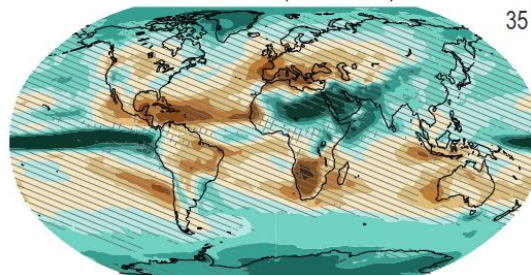
JJA SSP1-2.6 (2081–2100)

38



JJA SSP3-7.0 (2081–2100)

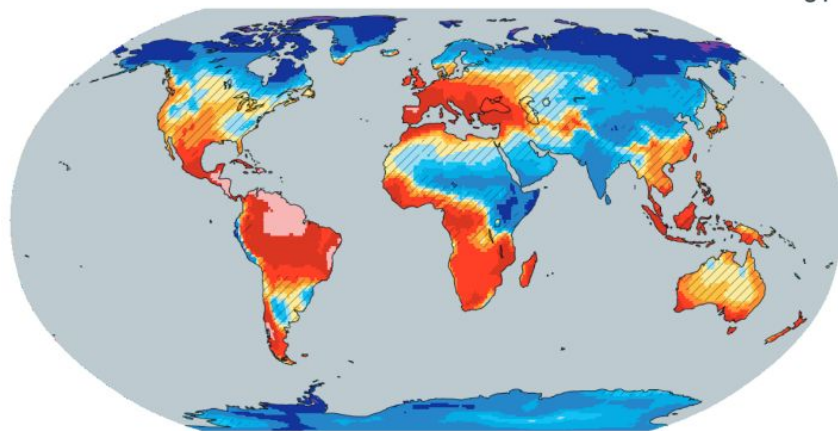
35



Proyecciones climáticas

(e) SSP5-8.5 dry days per year

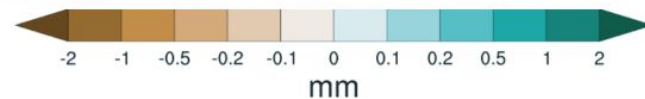
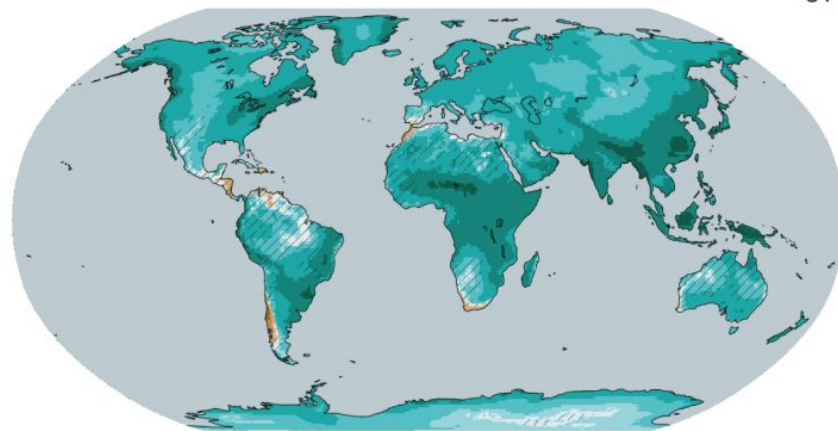
31



Color High model agreement ($\geq 80\%$)
Hatched Low model agreement ($< 80\%$)

(f) SSP5-8.5 daily precipitation intensity

31

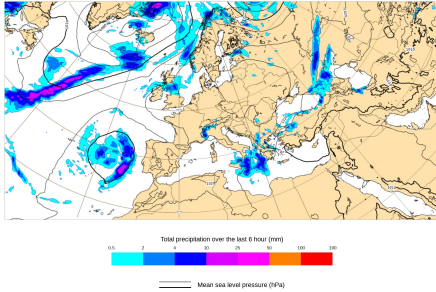


Predicción Climática

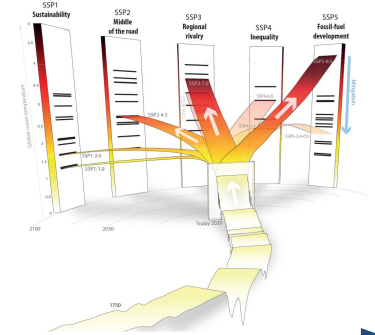
Predicción

Rain and mean sea level pressure

Base time: Mon 05 Sep 2023 00:00 UTC, Valid time: Mon 05 Sep 2023 06:00 UTC, 1 x 6 h, Interval (hr) : 6, Area : Europe



Proyecciones Climáticas



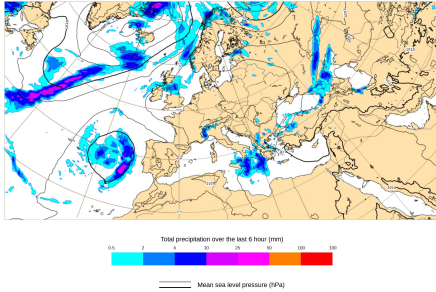
Días Semanas Meses Estaciones Años Décadas Centenarios

Predicción Climática

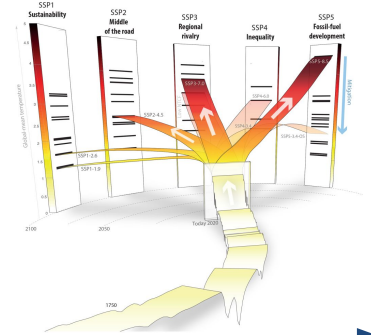
Predicción

Rain and mean sea level pressure

Base time: Mon 05 Sep 2023 00:00 UTC, Valid time: Mon 05 Sep 2023 06:00 UTC, 1 x 6 h, Interval (hr) : 6, Area : Europe



Proyecciones Climáticas



Días Semanas Meses Estaciones Años Décadas Centenarios

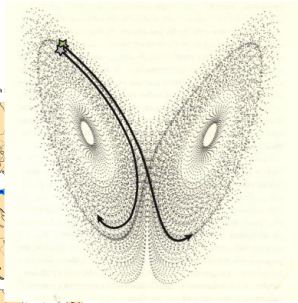
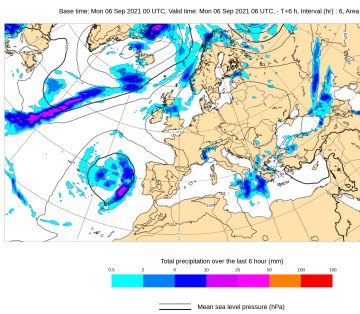


Estimación de los cambios de forzamientos externos.

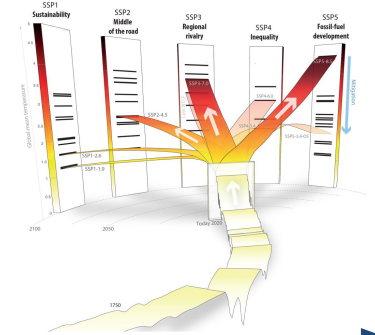
Predicción Climática

Predicción

Rain and mean sea level pressure



Proyecciones Climáticas

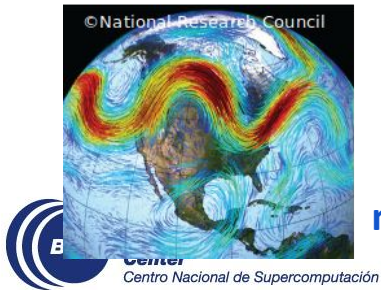


Días Semanas Meses Estaciones Años Décadas Centenarios

Estimación precisa de las condiciones meteorológicas.



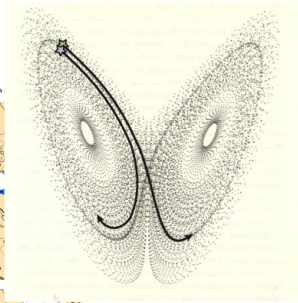
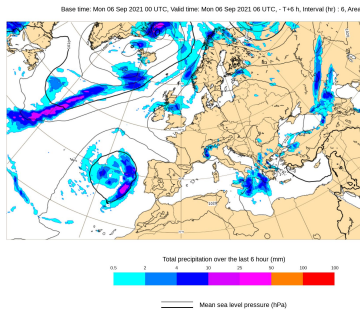
Estimación de los cambios de forzamientos externos.



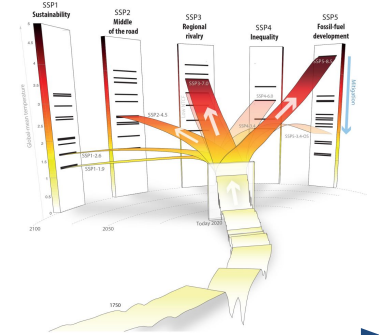
Predicción Climática

Predicción

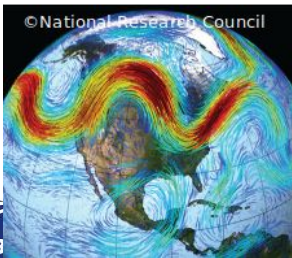
Rain and mean sea level pressure



Proyecciones Climáticas



Días Semanas Meses Estaciones Años Décadas Centenarios



Estimación precisa de las condiciones meteorológicas.

Problema **CONDICIONES INICIALES**

Problema **CONDICIONES De CONTORNO**

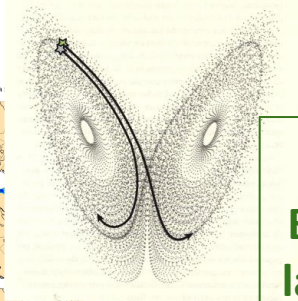
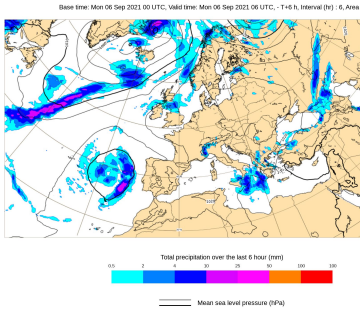


Estimación de los cambios de forzamientos externos.

Predicción Climática

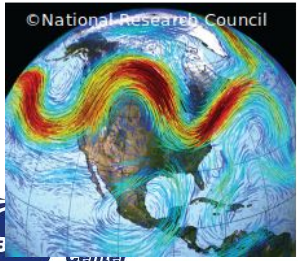
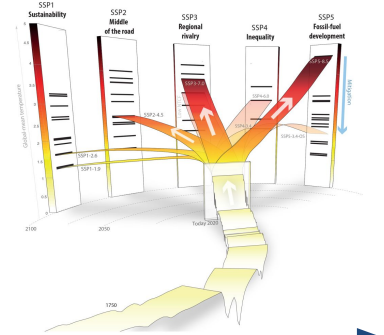
Predicción

Rain and mean sea level pressure



En predicción
ESTACIONAL a DECADAL
las dos son importantes!

Proyecciones Climáticas



Estimación
precisa de las
condiciones
meteorológicas.

Problema **CONDICIONES
INICIALES**

Problema **CONDICIONES
De CONTORNO**



Estimación de los cambios de
forzamientos externos.

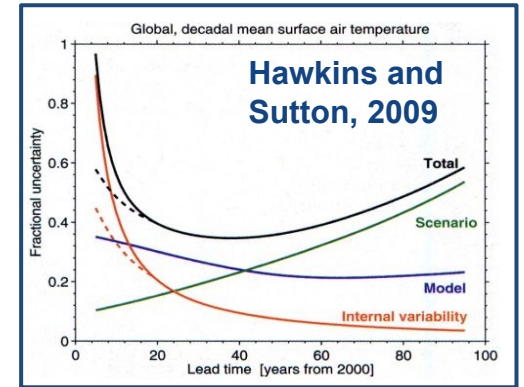
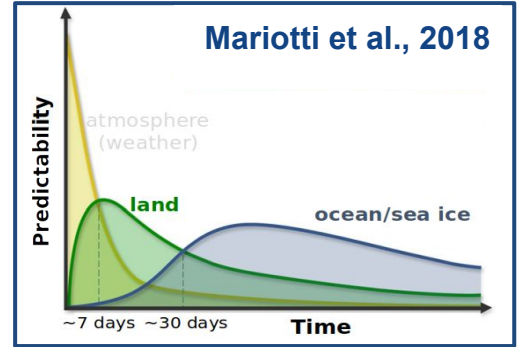
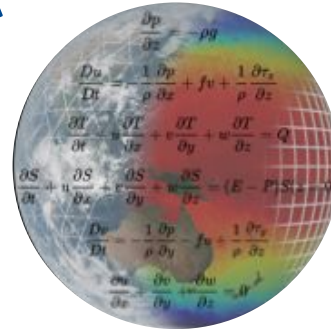
Predicción Climática

Inicialización del modelo con observaciones

Observaciones



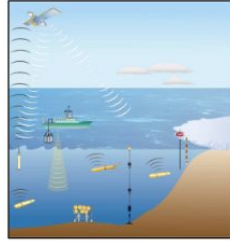
Asimilación de Datos



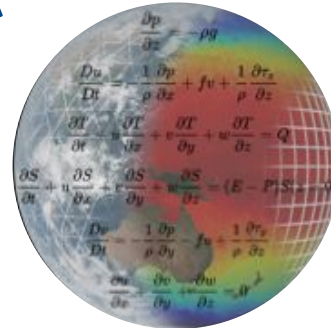
Predicción Climática

Inicialización del modelo con observaciones

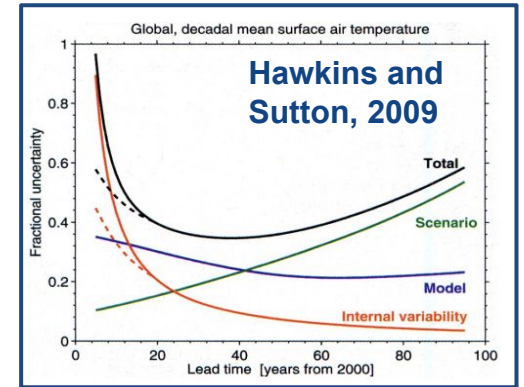
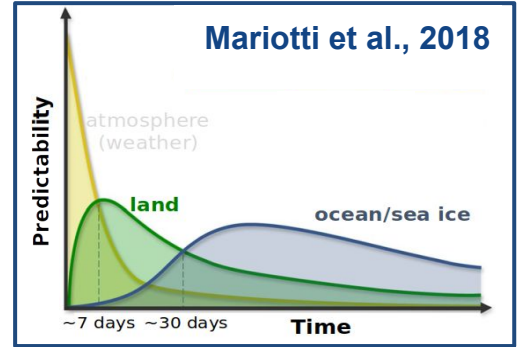
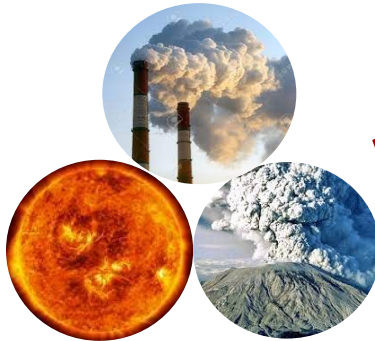
Observaciones



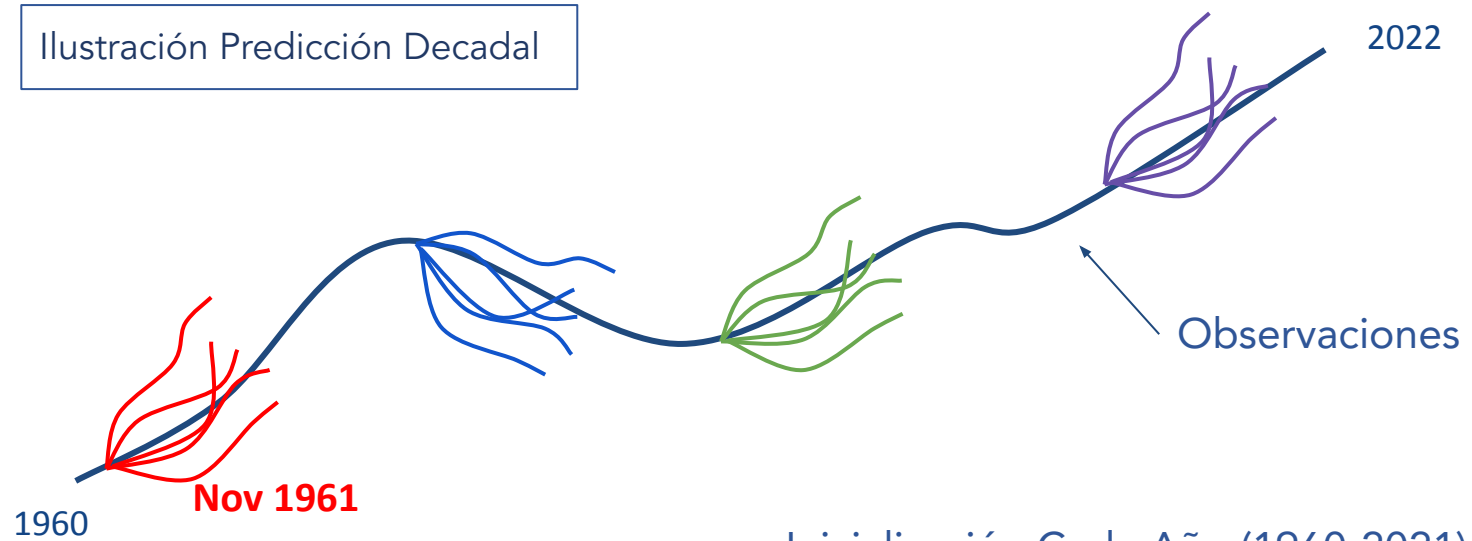
Asimilación de Datos



Forzamientos Externos

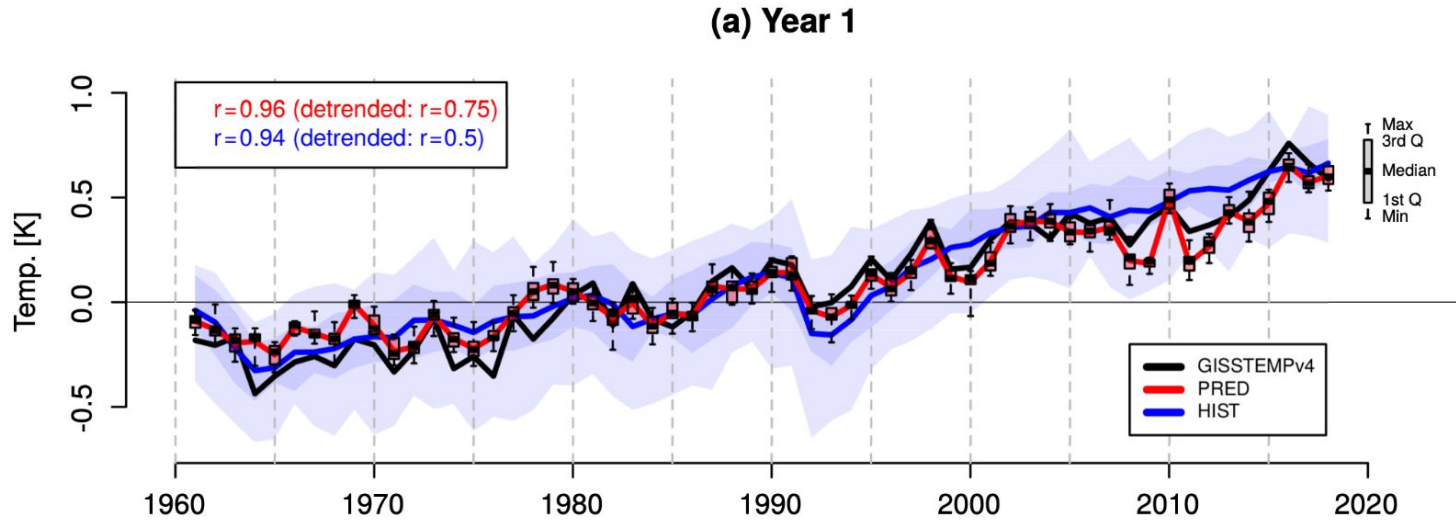


Predicción Climática

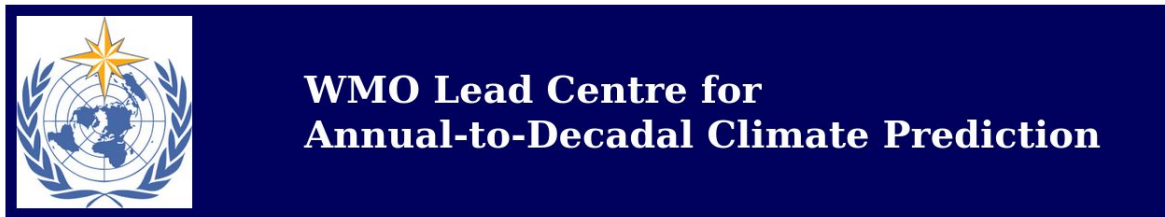


- Inicialización Cada Año (1960-2021)
- 10 miembros
- 10 años

Predicción Climática



Predicción Climática

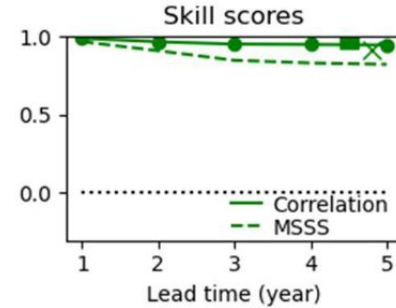
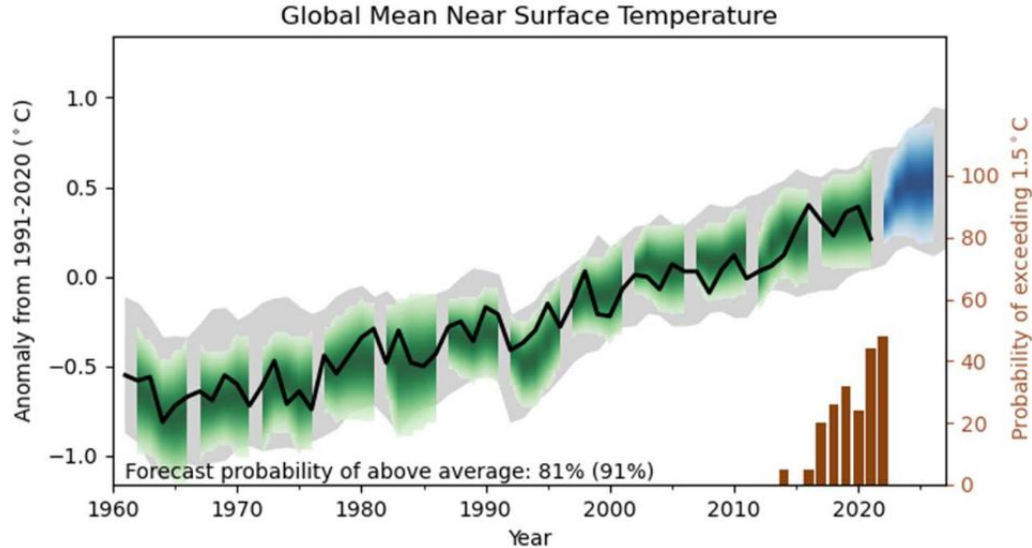


The Lead Centre for Annual-to-Decadal Climate Prediction collects and provides hindcasts, forecasts and verification data from a number of contributing centres worldwide.



Predicción Climática

WMO Global Annual-to-Decadal Climate Update 2022-2026

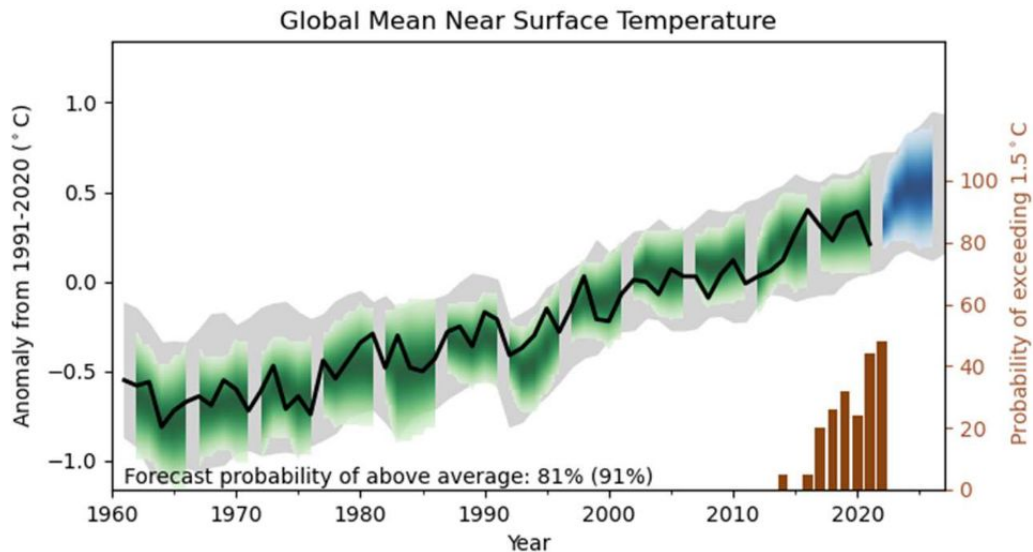


		Observed	
		Yes	No
Forecast	Yes	9 (11)	2 (1)
	No	0 (1)	40 (42)

Hit rate: 100% (91%)
False alarm rate: 18% (8%)

Predicción Climática

WMO Global Annual-to-Decadal Climate Update 2022-2026

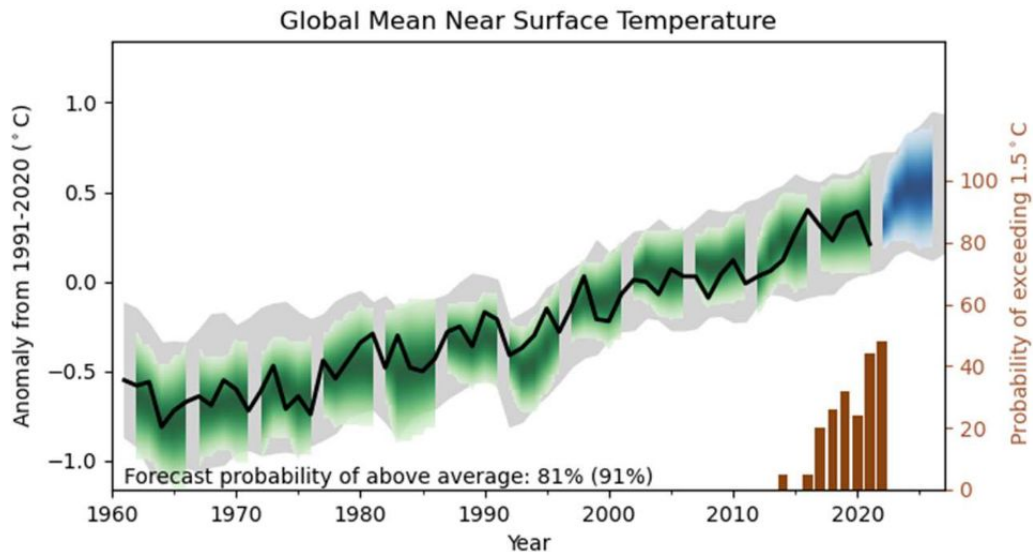


- Media global de entre $1.1\text{-}1.7^{\circ}\text{C}$ con respecto a los niveles pre-industriales (1850-1900).



Predicción Climática

WMO Global Annual-to-Decadal Climate Update 2022-2026

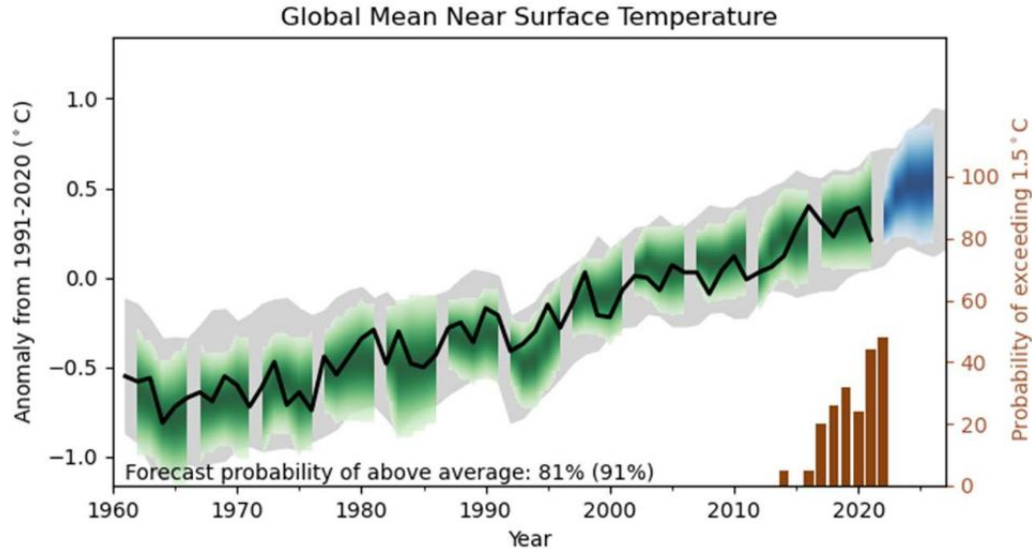


- Media global de entre $1.1\text{-}1.7^{\circ}\text{C}$ con respecto a los niveles pre-industriales (1850-1900).
- La probabilidad de exceder los 1.5°C es de 48%.



Predicción Climática

WMO Global Annual-to-Decadal Climate Update 2022-2026



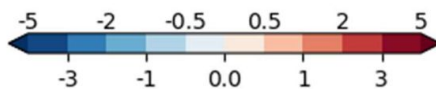
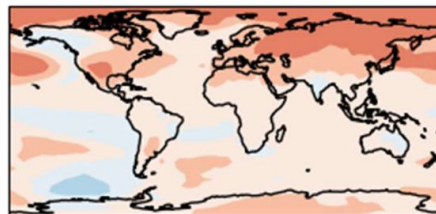
- Media global de entre 1.1 - 1.7°C con respecto a los niveles pre-industriales (1850-1900).
- La probabilidad de exceder los 1.5°C es de 48%.
- La probabilidad que uno de los años supere la del año más cálido (2016) es de 93%.

Predicción Climática

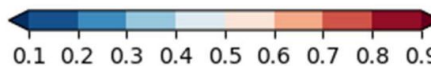
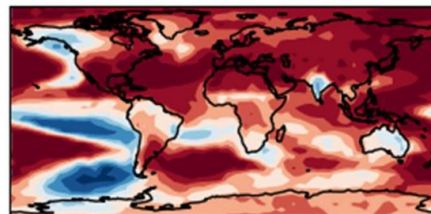
Predicción 2022

Temperatura

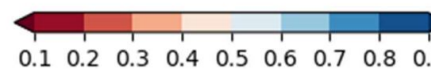
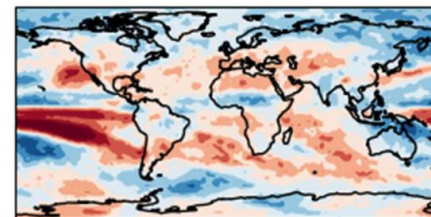
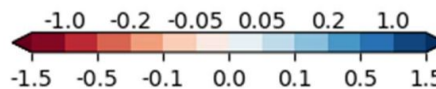
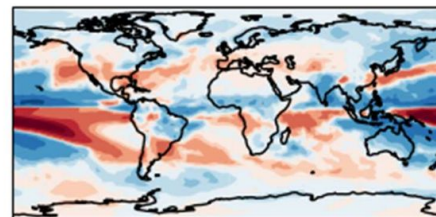
Anomalía
(1991-2020)



Probabilidad de
exceder la media.



Precipitación



Barcelona
Supercomputing
Center

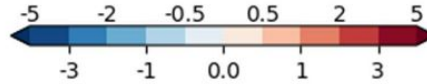
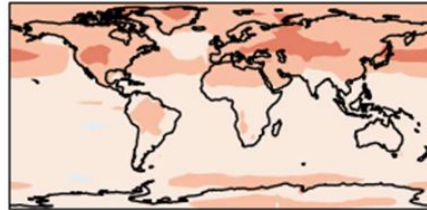
Centro Nacional de Supercomputación

Predicción Climática

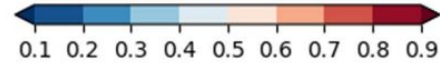
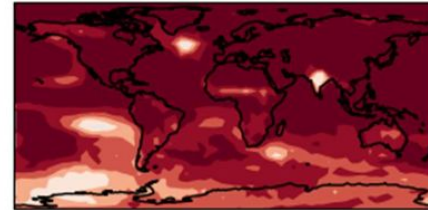
Predicción Temperatura 2022-2026

Verano
(MJJAS)

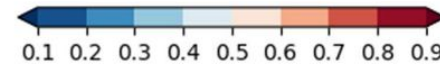
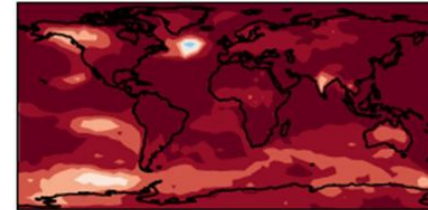
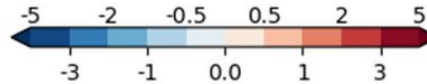
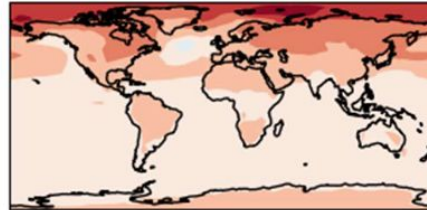
Anomalía
(1991-2020)



Probabilidad de
exceder la media.



Invierno
(NDJFM)

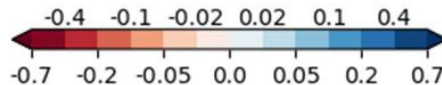
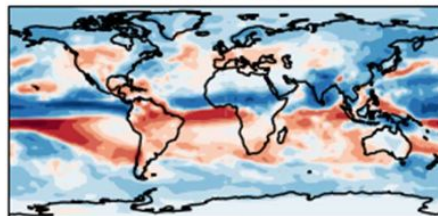


Predicción Climática

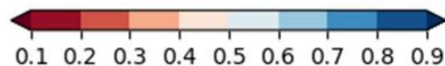
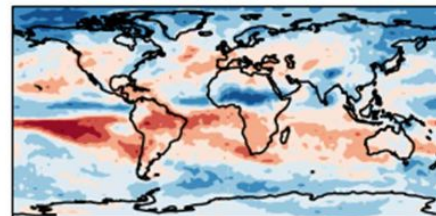
Predicción Precipitación 2022-2026

Verano
(MJJAS)

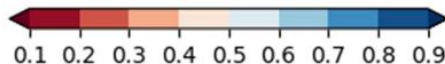
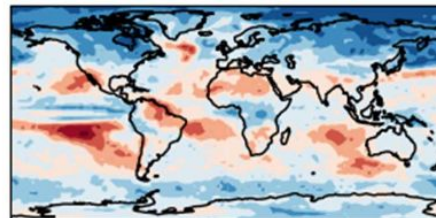
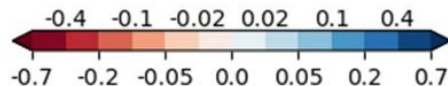
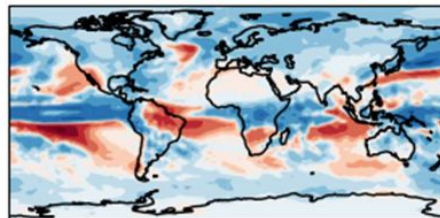
Anomalía
(1991-2020)



Probabilidad de
exceder la media.

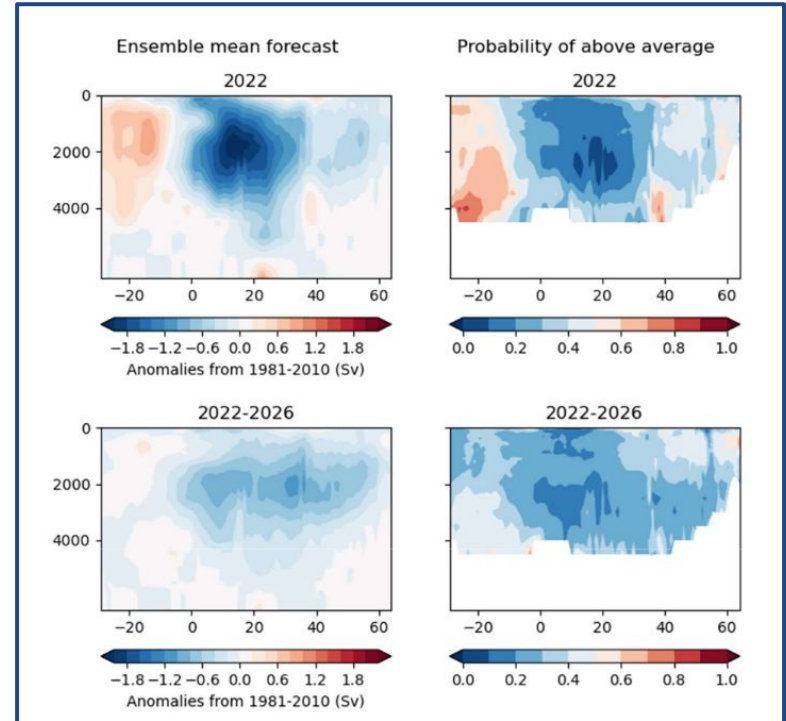
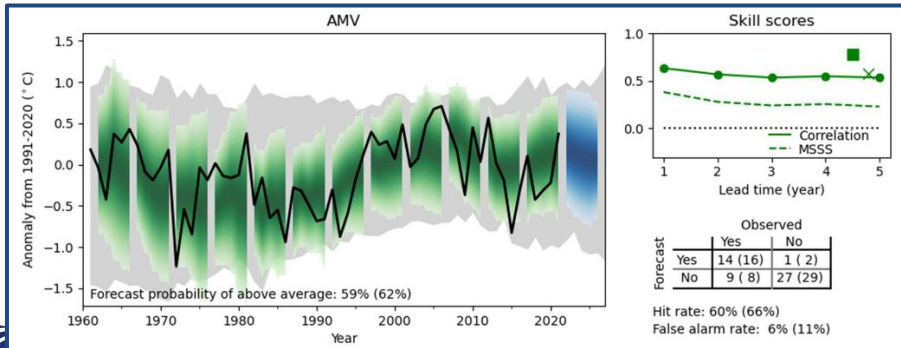
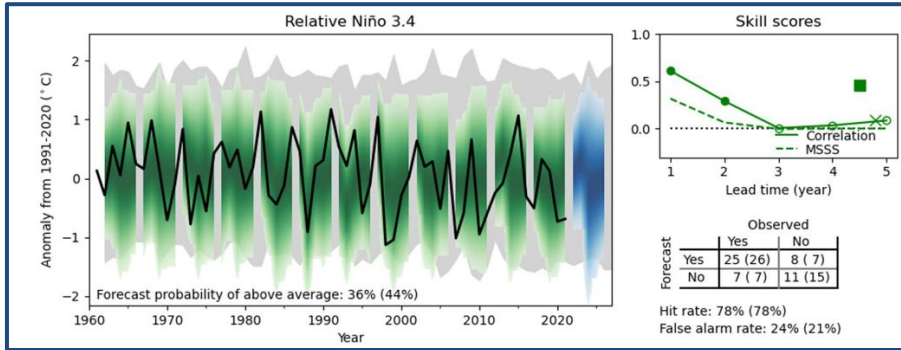


Invierno
(NDJFM)



Predicción Climática

Predicción Precipitación 2022-2026



Predicción Climática

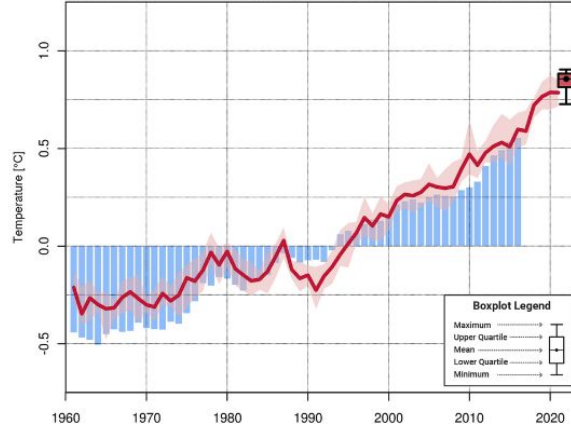
DECADAL CLIMATE PREDICTION

The Barcelona Supercomputing Center has been designated as a Global Producing Center of Near-Term Climate Prediction by the World Meteorological Organization (WMO). It is also involved in research on decadal predictions, including on ways to transfer relevant information present in these forecasts to interested users. To preview our latest forecast, please follow the link below.

[GO TO FORECAST](#)

Global Mean Surface Air Temperature

Initialisation: Nov2021. Forecast Range: Years 1-5. Reference Period: 1981-2010.



Anomaly Correlation Coefficient = 0.96

— HadCRUT5.0

— EC-Earth3.3 Decadal Predictions

Resumen

Los modelos de clima son herramientas indispensables para desarrollar el conocimiento sobre el sistema climático y los cambios. Debido a la gran potencia computacional requerida por modelos de clima, superordenadores (como Marenustrum4) son necesarios para hacer simulaciones.

Las variaciones y cambios en el clima ocurren debido a forzamientos externos naturales y antropogénicos y variabilidad interna. Los diversos tipos de simulaciones climáticas nos permiten:

- Entender el origen del calentamiento global y concluir de manera inequívoca que la actividad humana es la contribución principal.
- Entender e informar de los posibles riesgos futuros.
- Predecir el clima de meses a años (e incluso décadas).