

# JORNADA

*Gestión de riesgos y adaptación al cambio climático a nivel municipal: Vulnerabilidad hídrica*

*Modelos climáticos: entendiendo las proyecciones climáticas a futuro*



Salon de actos de EUDEL  
Calle de Ercilla 13, Bilbao



11 y 12 de noviembre de 2025



ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva



*Santos J. González-Rojí*  
*Dept. Física, EHU*





# Esquema



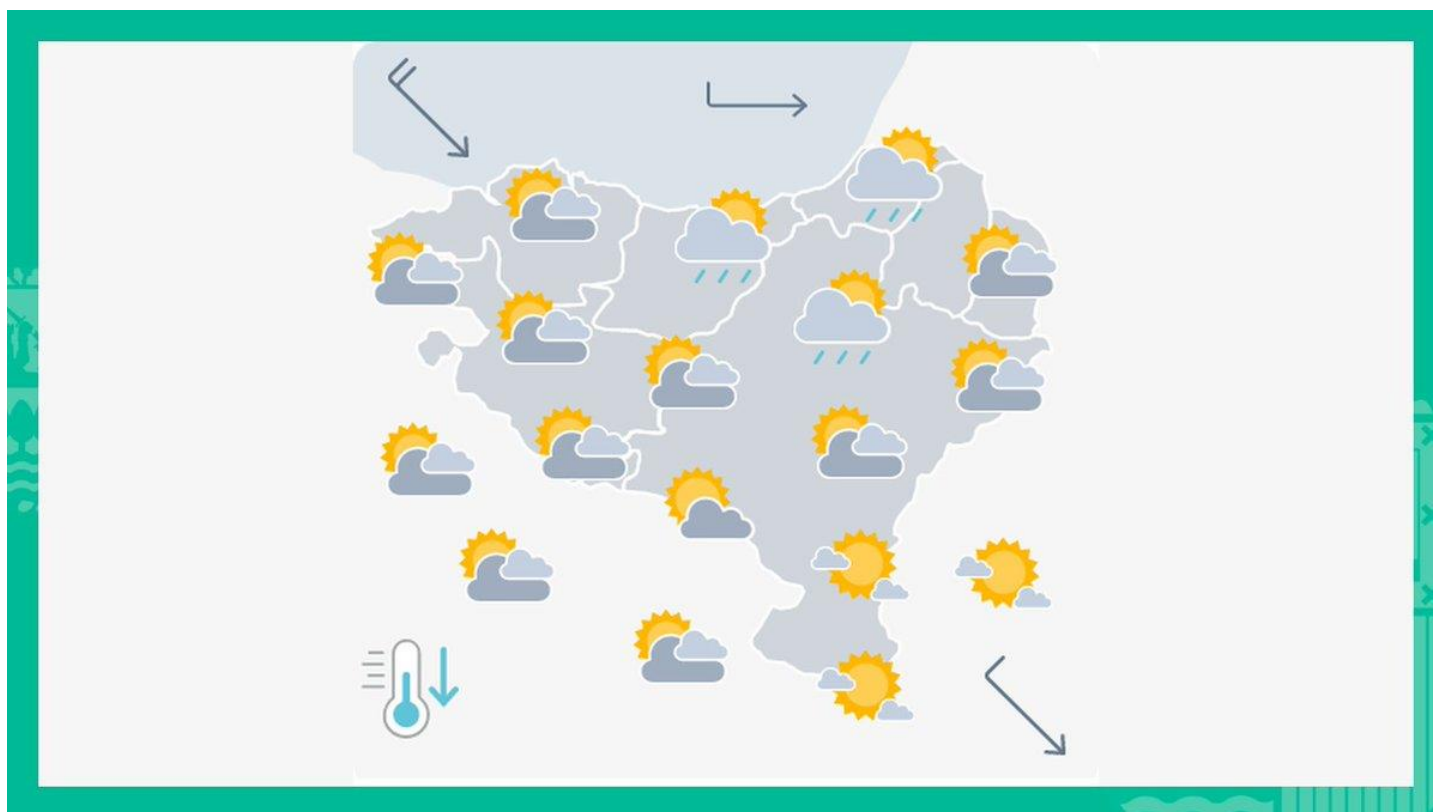
- Conceptos básicos
- Modelos
- Cambio climático: Proyecciones climáticas
- Obtención de datos

# Conceptos básicos



## Tiempo

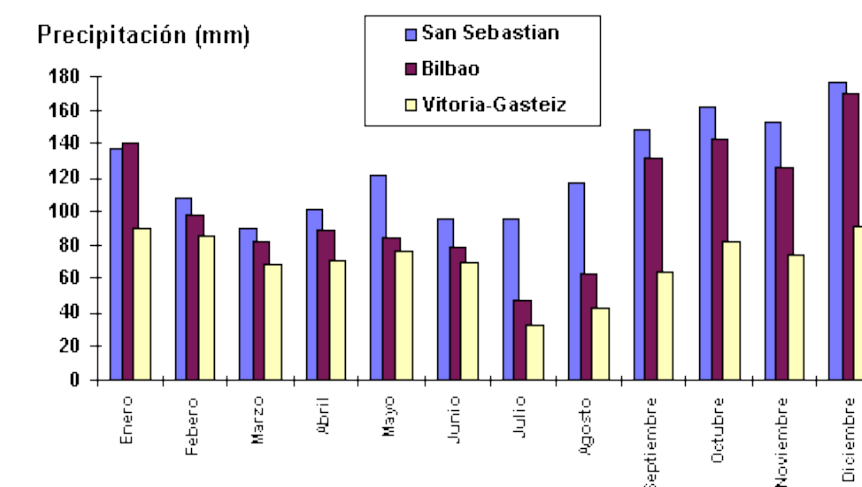
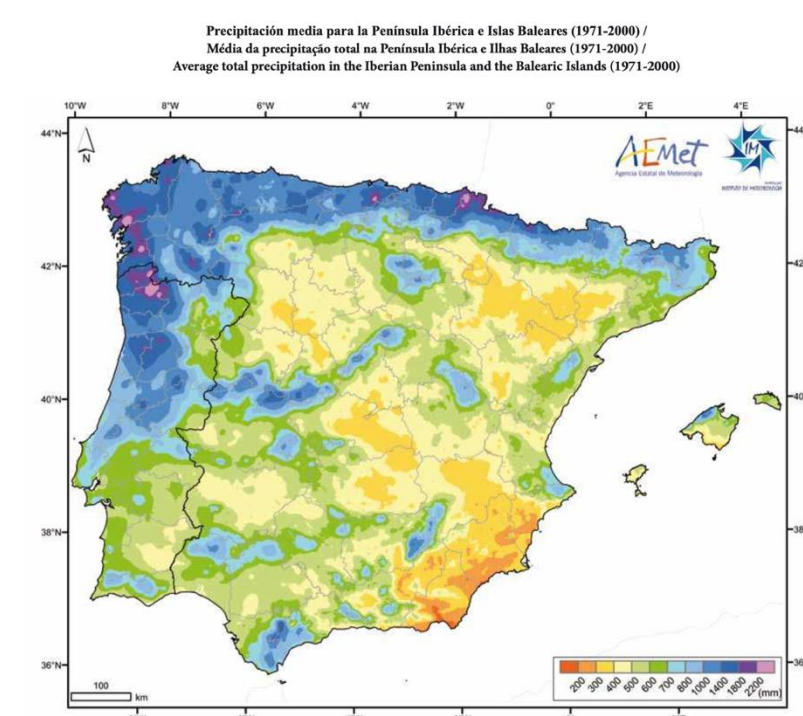
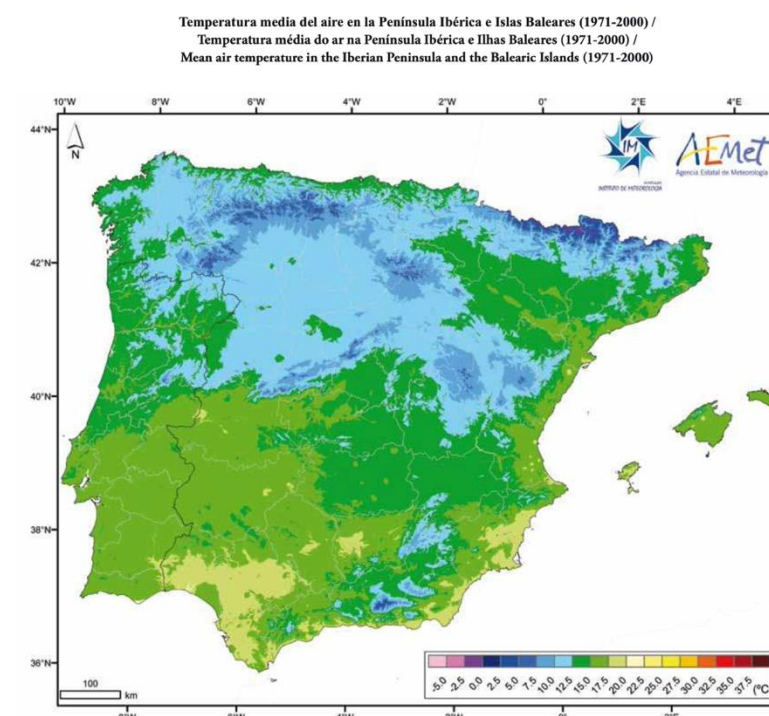
El **tiempo** se refiere al estado de la atmósfera en un momento determinado.



#EguraldiaHoy ☁ Nubes altas por la mañana, con ratos soleados. ☁ A partir del mediodía entrarán nubes más compactas, que pueden dejar algo de lluvia, sobre todo en el nordeste. ➡ Viento del oeste, predominando el noroeste por la tarde. 🌡 Tmax entre 15-19 °C <https://t.co/xeVvCrd0mY>

## Clima

El **clima** se refiere a la distribución estadística de los estados del tiempo en un lugar durante un periodo prolongado. En general, se toman 30 años.

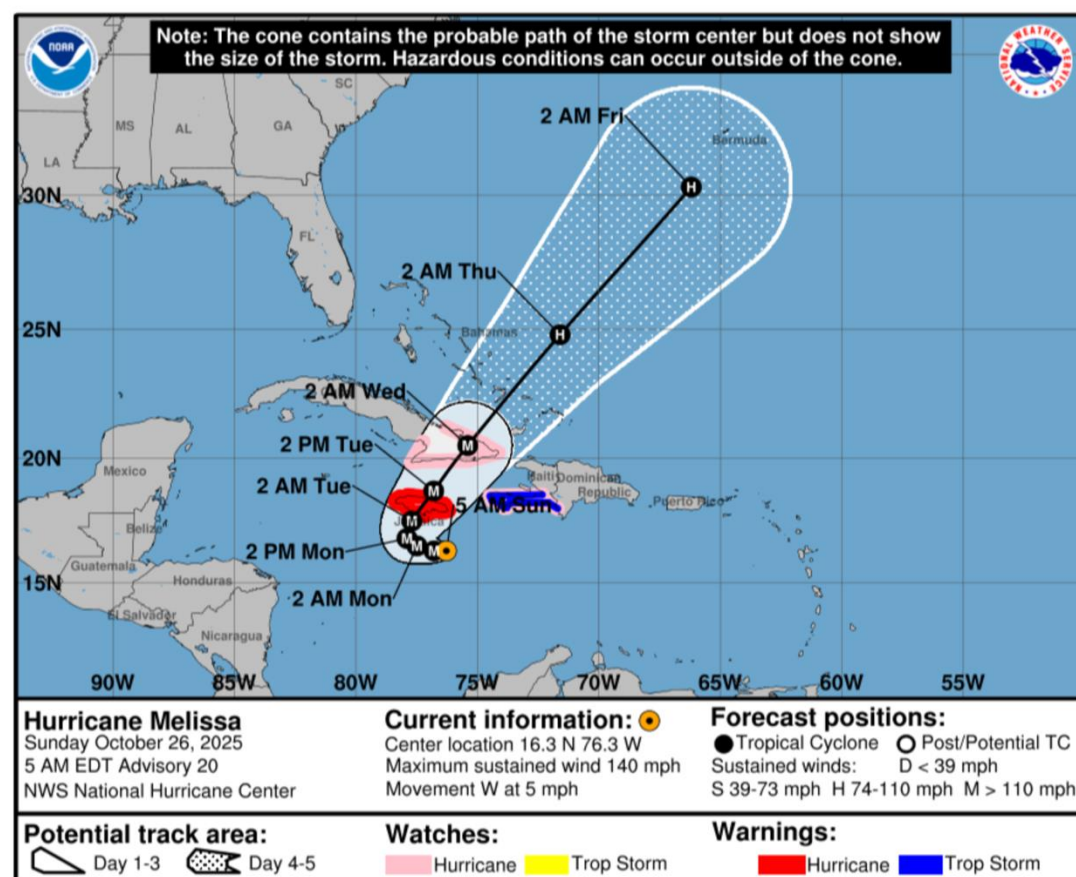


# Conceptos básicos



## Predicción del tiempo

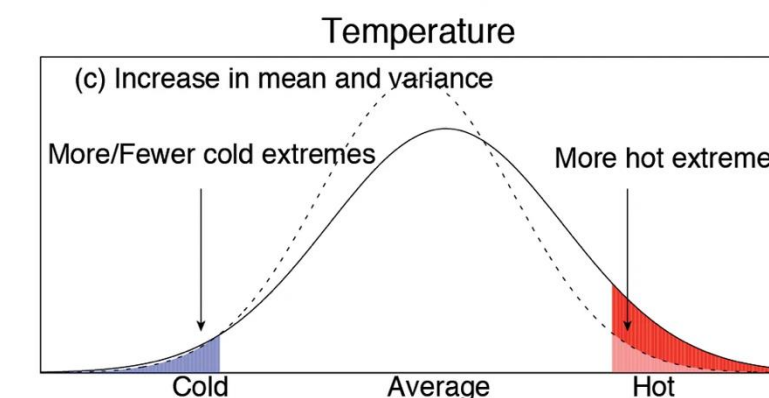
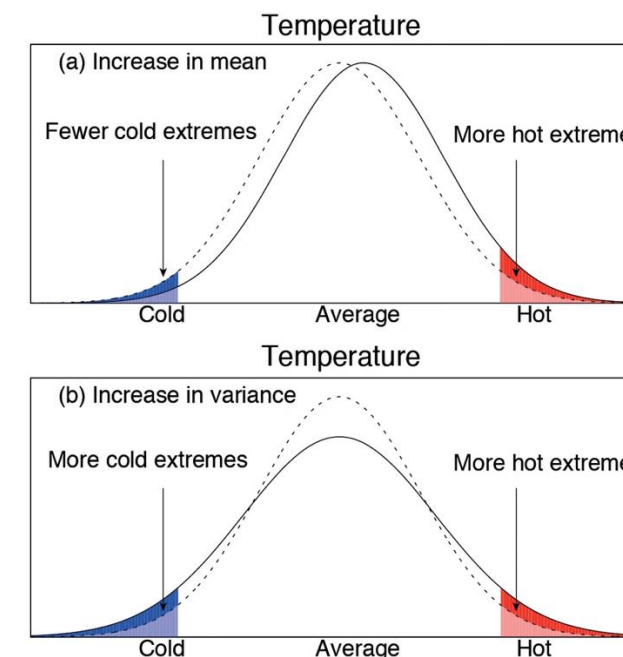
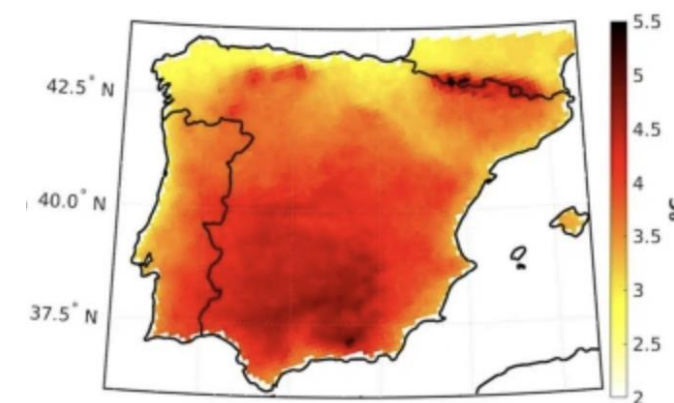
La predicción es un problema de valores iniciales.



## Proyección climática

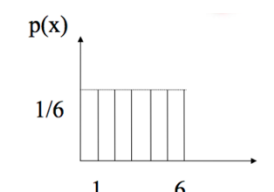
La proyección es un problema de condiciones de contorno. Estamos más interesados en ver cómo cambia la estadística.

Cambio en la temperatura media diaria entre 2081–2100 y el periodo histórico en CORDEX (Carvalho *et al.* 2020)



⚠ ¿Por qué no podemos fiarnos de las predicciones a largo plazo, pero si de las simulaciones climáticas?

- En la predicción buscamos una única trayectoria frente a muchísimas disponibles que dependen de los valores iniciales
- En la proyección buscamos un cambio en la estadística. No una información concreta





# Conceptos básicos

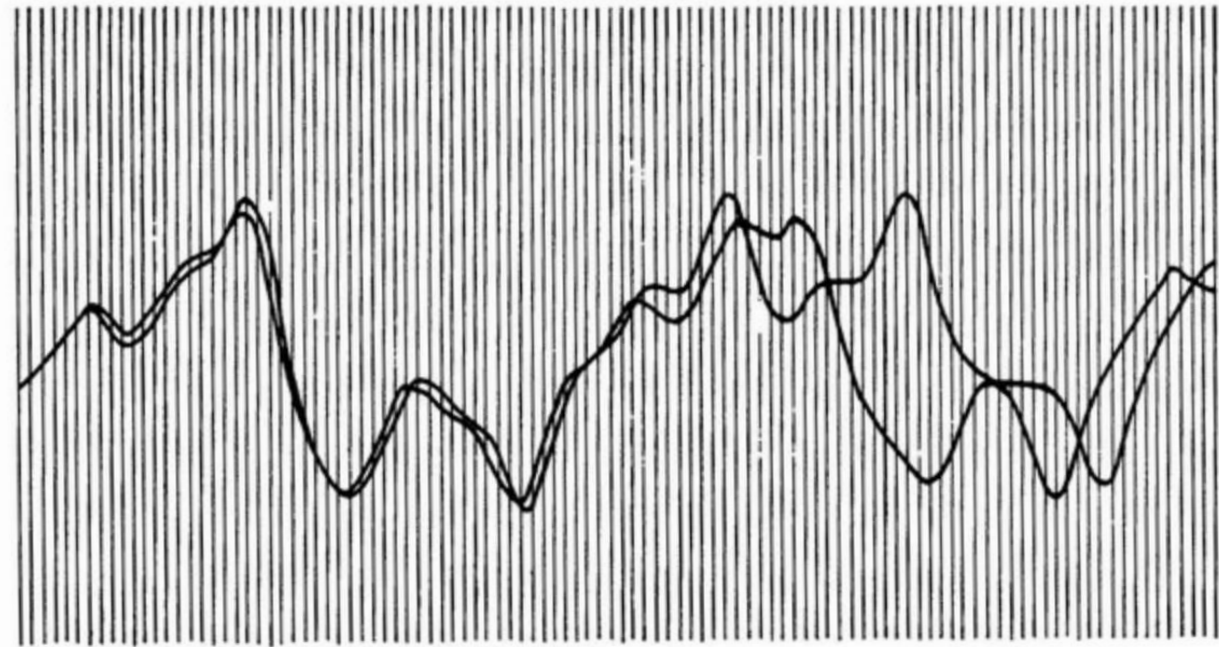


ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva

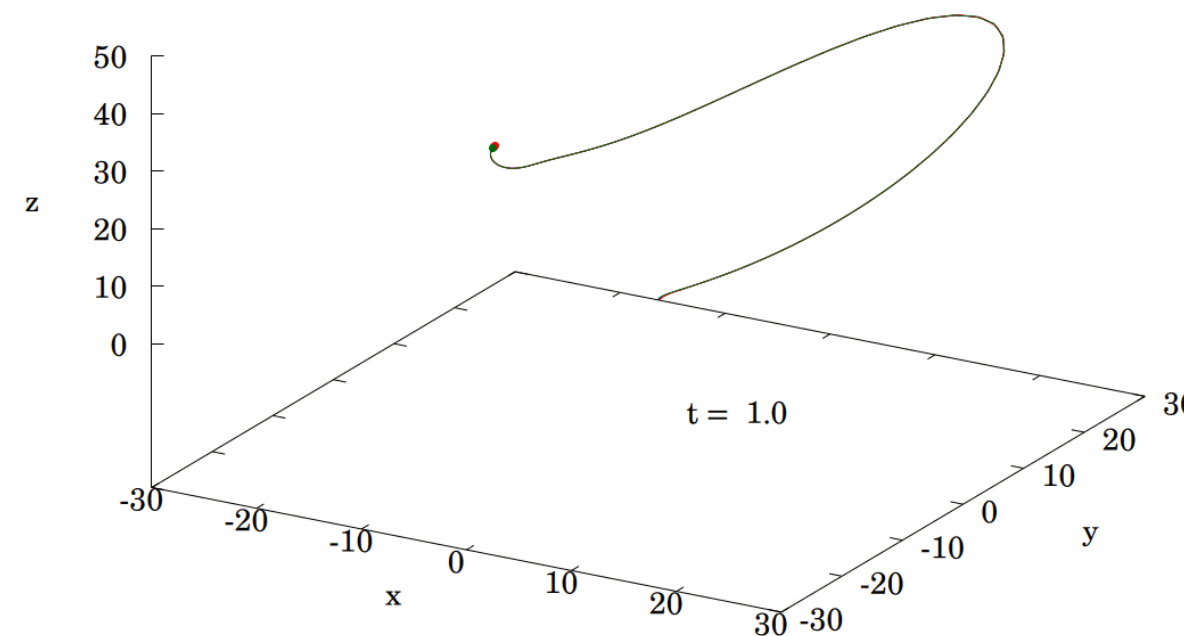
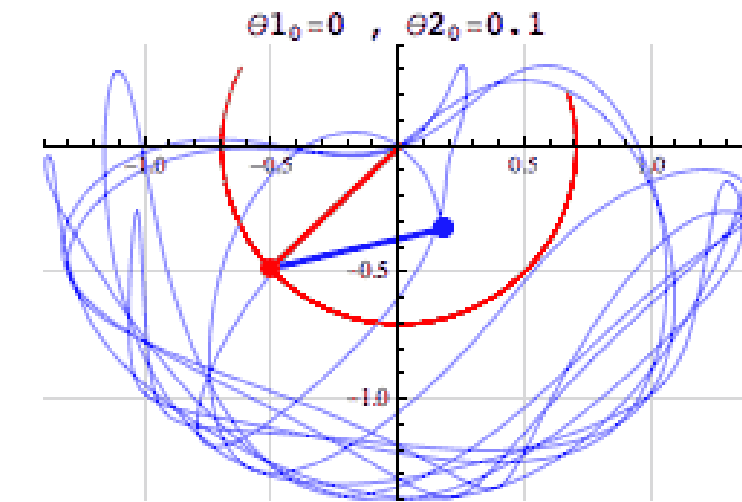
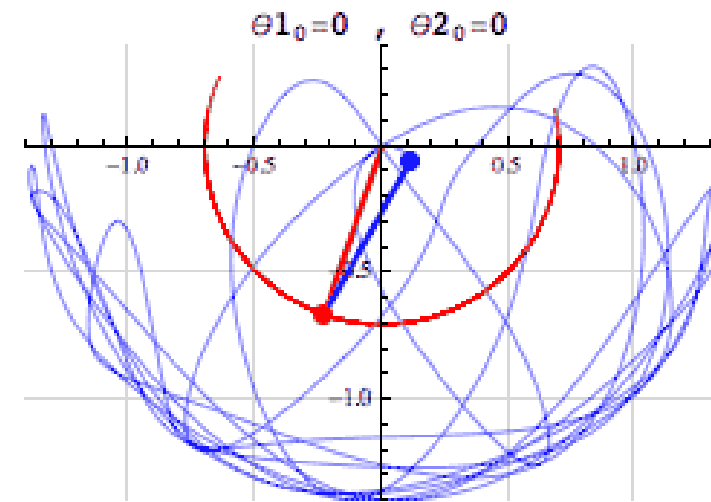
## Incertidumbre

La atmósfera es un sistema caótico.



**HOW TWO WEATHER PATTERNS DIVERGE.** From nearly the same starting point, Edward Lorenz saw his computer weather produce patterns that grew farther and farther apart until all resemblance disappeared. (From Lorenz's 1961 printouts.)

Ejemplo del péndulo doble:



De aquí viene el nombre de “efecto mariposa”...



# Conceptos básicos

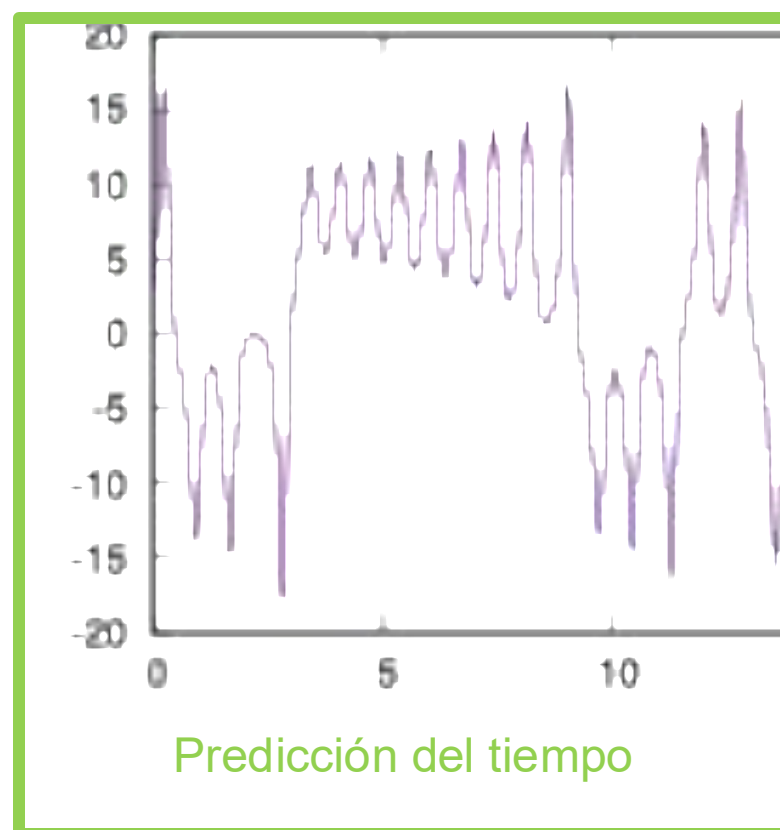
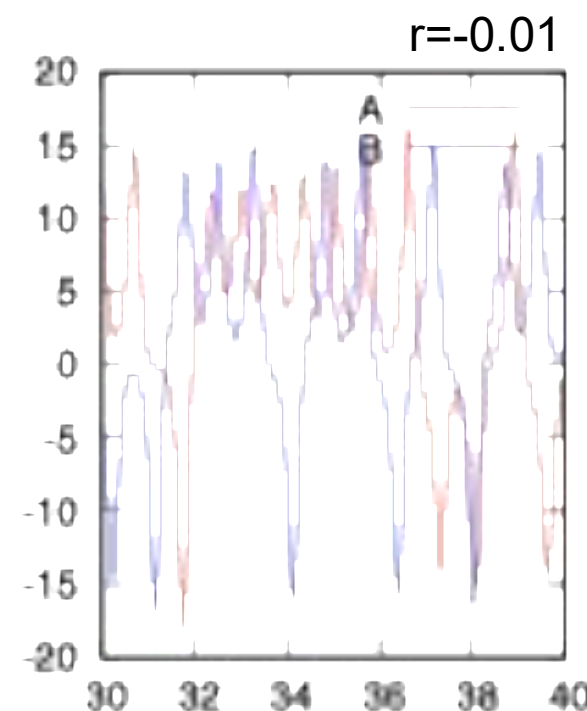
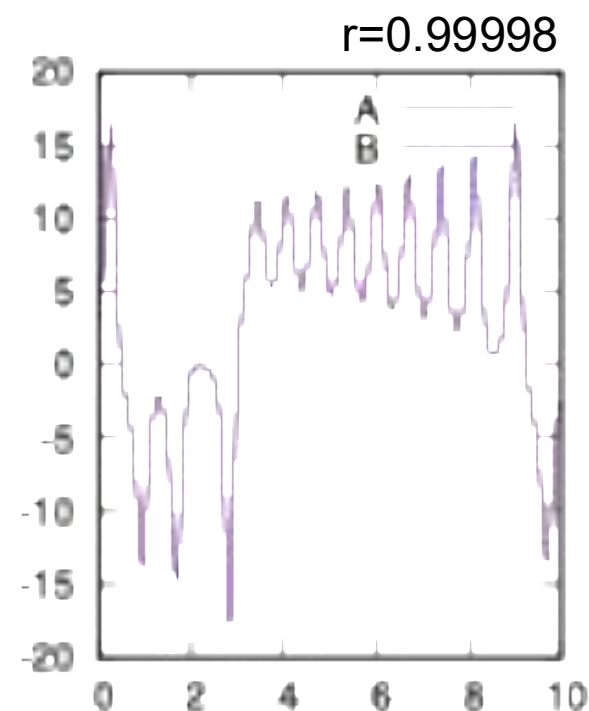


ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

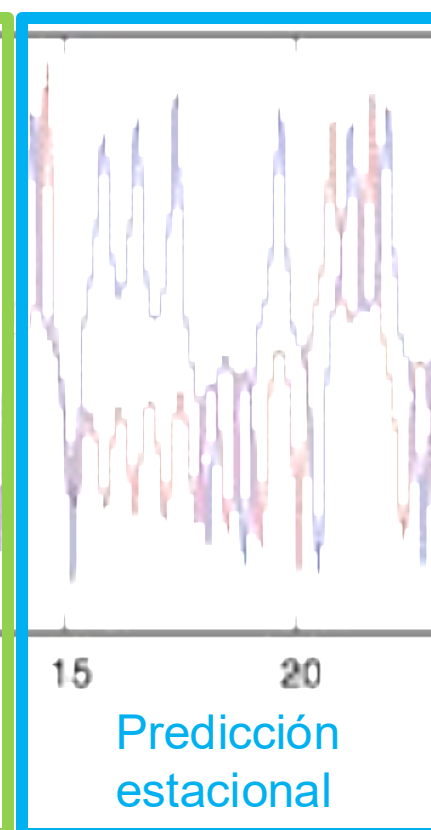
50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva

## Incertidumbre

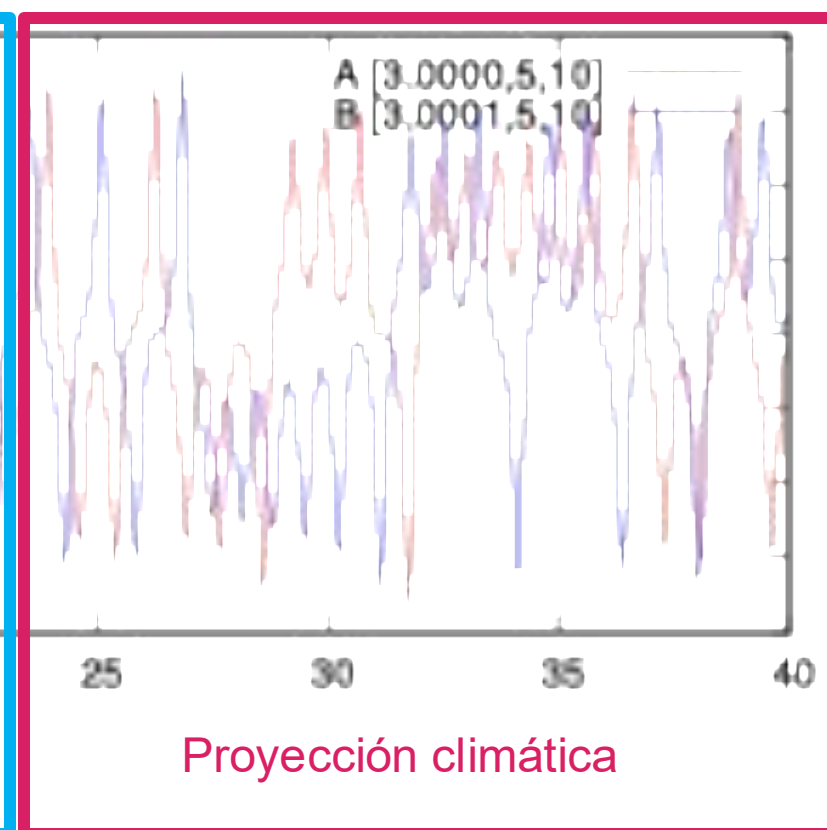
⚠ ¿Por qué no podemos fiarnos de las predicciones a largo plazo, pero si de las simulaciones climáticas?



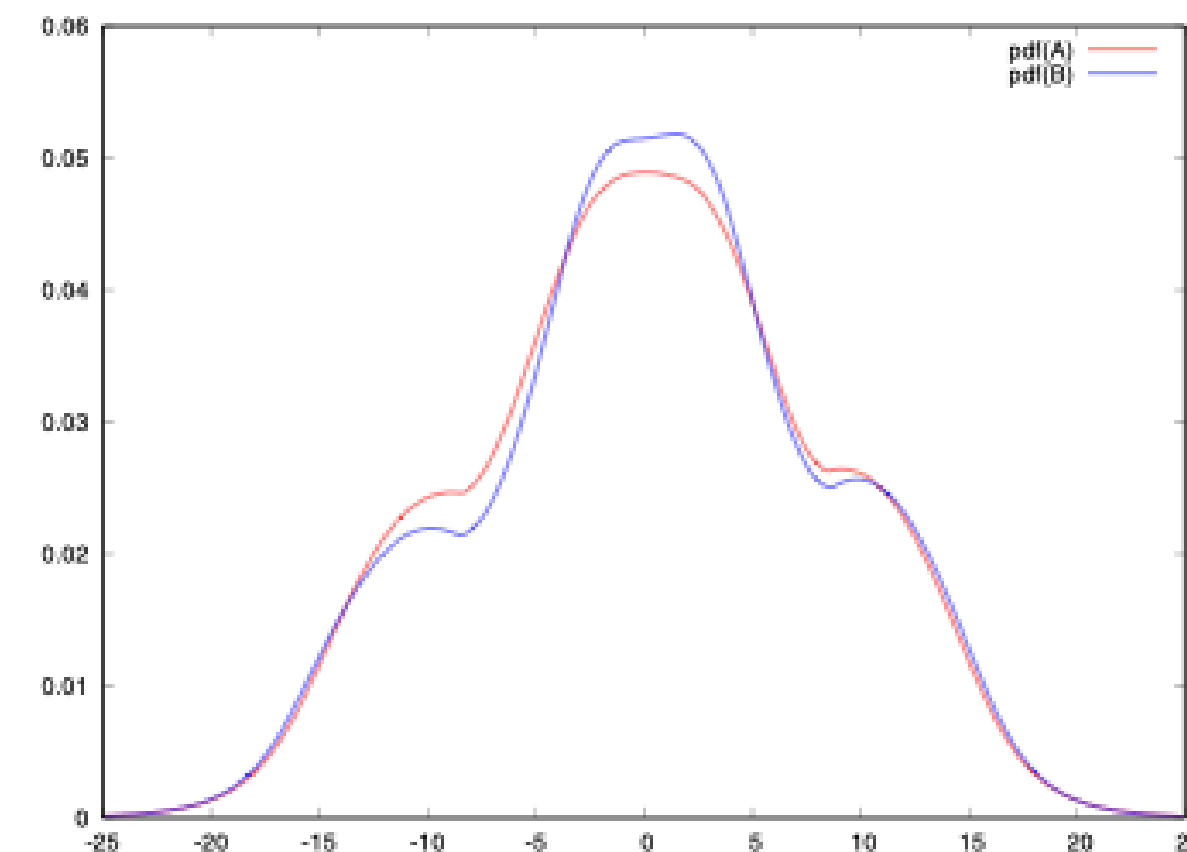
Predicción del tiempo



Predicción  
estacional



Proyección climática



Aunque no estén correlacionadas, la distribución de probabilidad es muy parecida



# Conceptos básicos

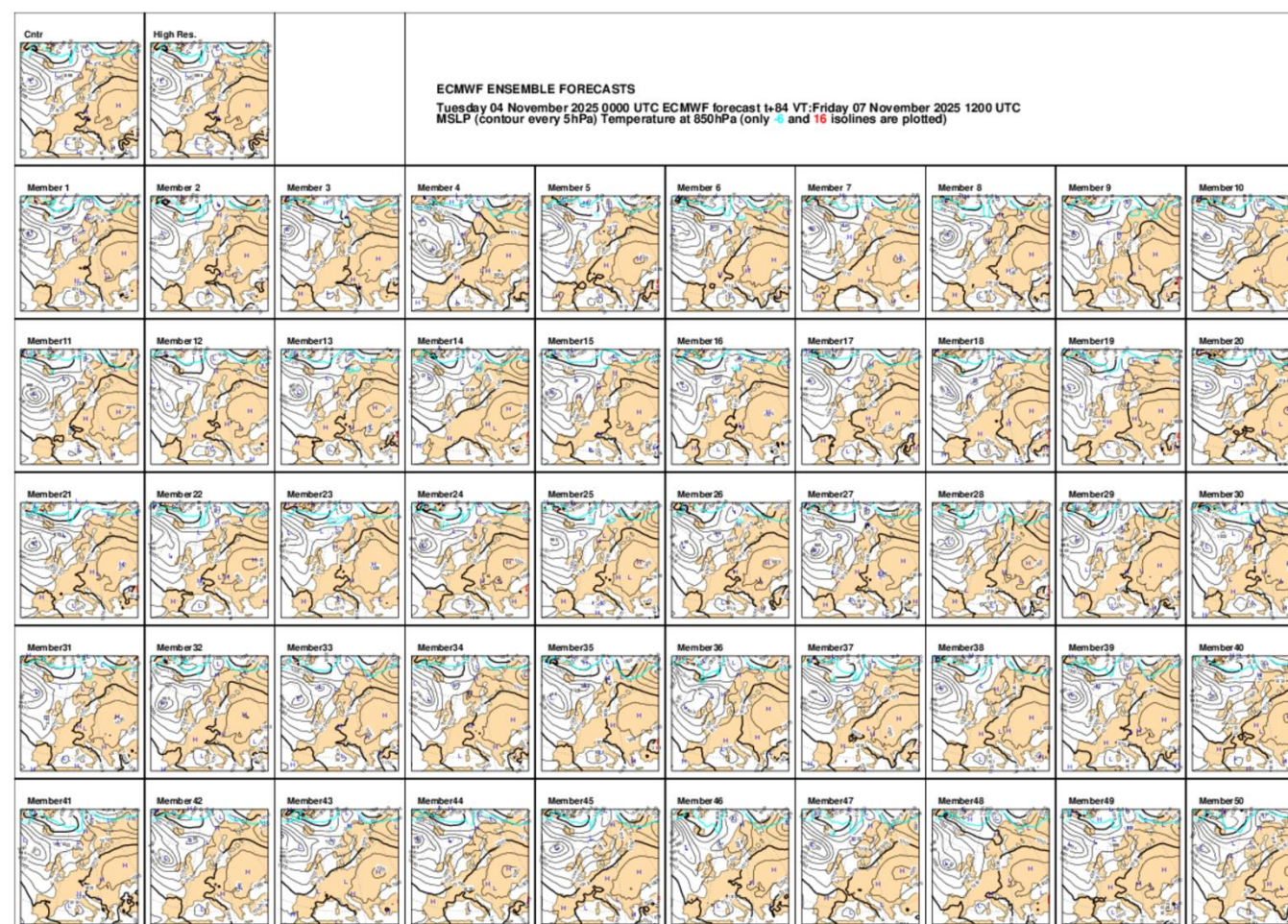
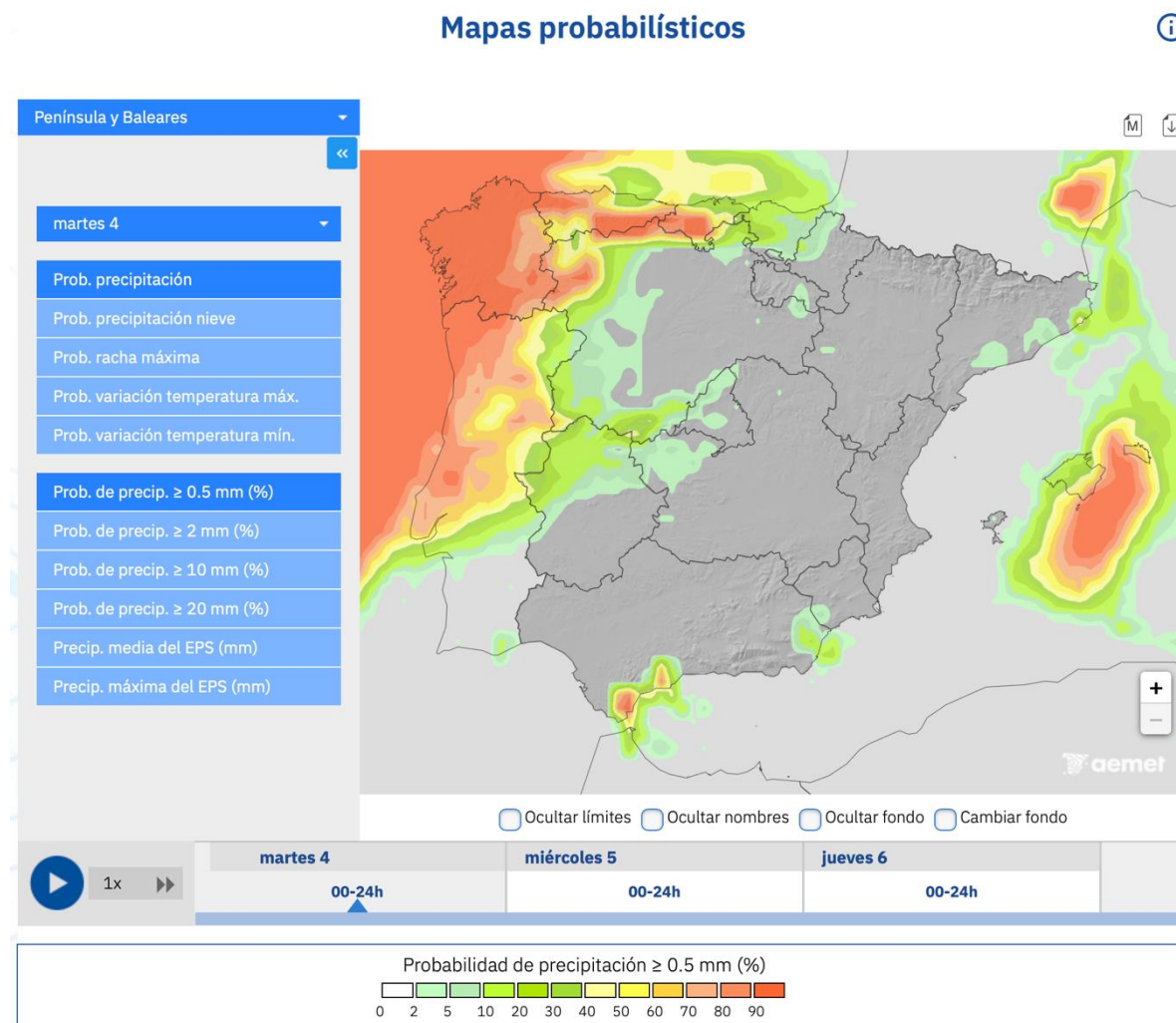


ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

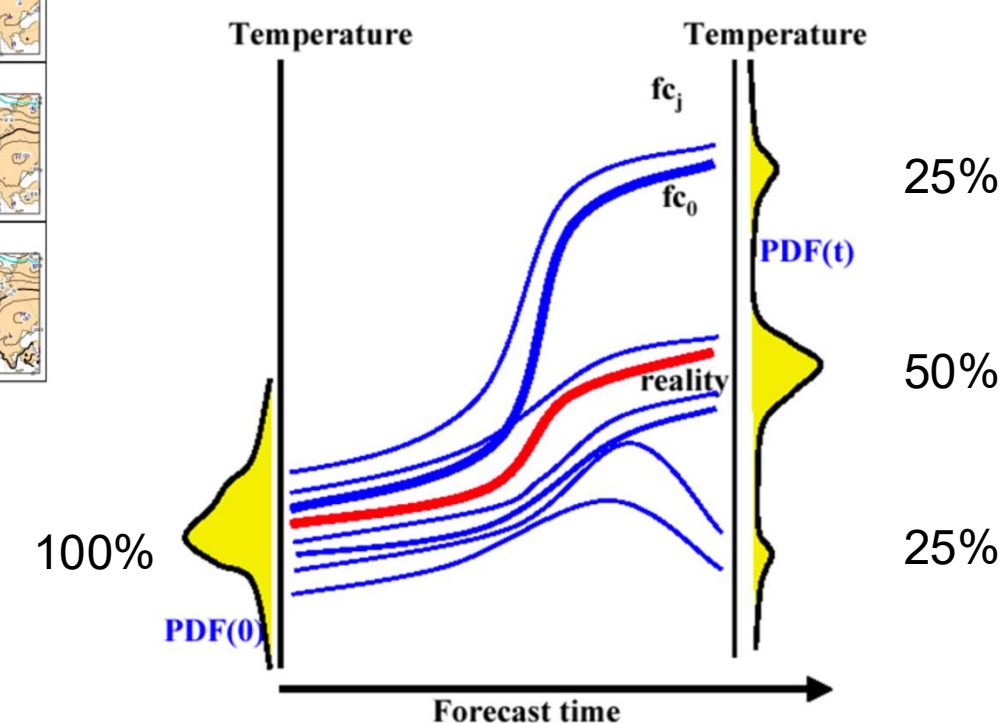
**50** URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
**Biba Zientzia!**  
Ciencia Viva

## Probabilidad

¿Cómo se estima la probabilidad de lluvia? Predicción por conjuntos



Se generan 51 predicciones diferentes, basadas en 51 análisis iniciales, uno de ellos sin perturbar y 50 ligeramente perturbados.

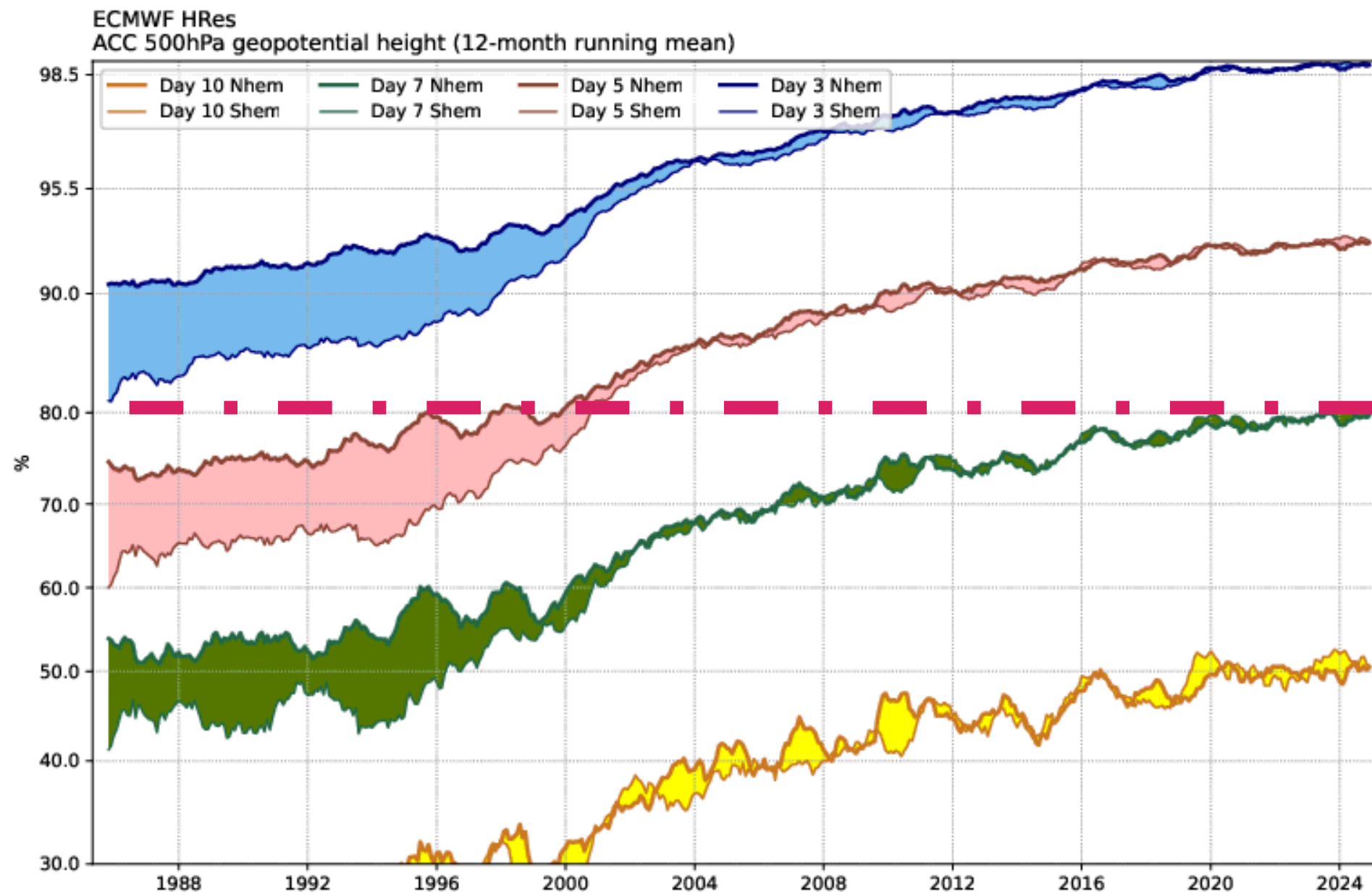




# Conceptos básicos



## Probabilidad e incertidumbre



- Las predicciones cada vez son mejores.
- La predicción mejoró a partir de la incorporación de datos de satélites, sobre todo en el hemisferio sur.
- Actualmente, la predicción a 7 días es comparable a la predicción a 3 días que teníamos hace 40 años para el hemisferio sur.



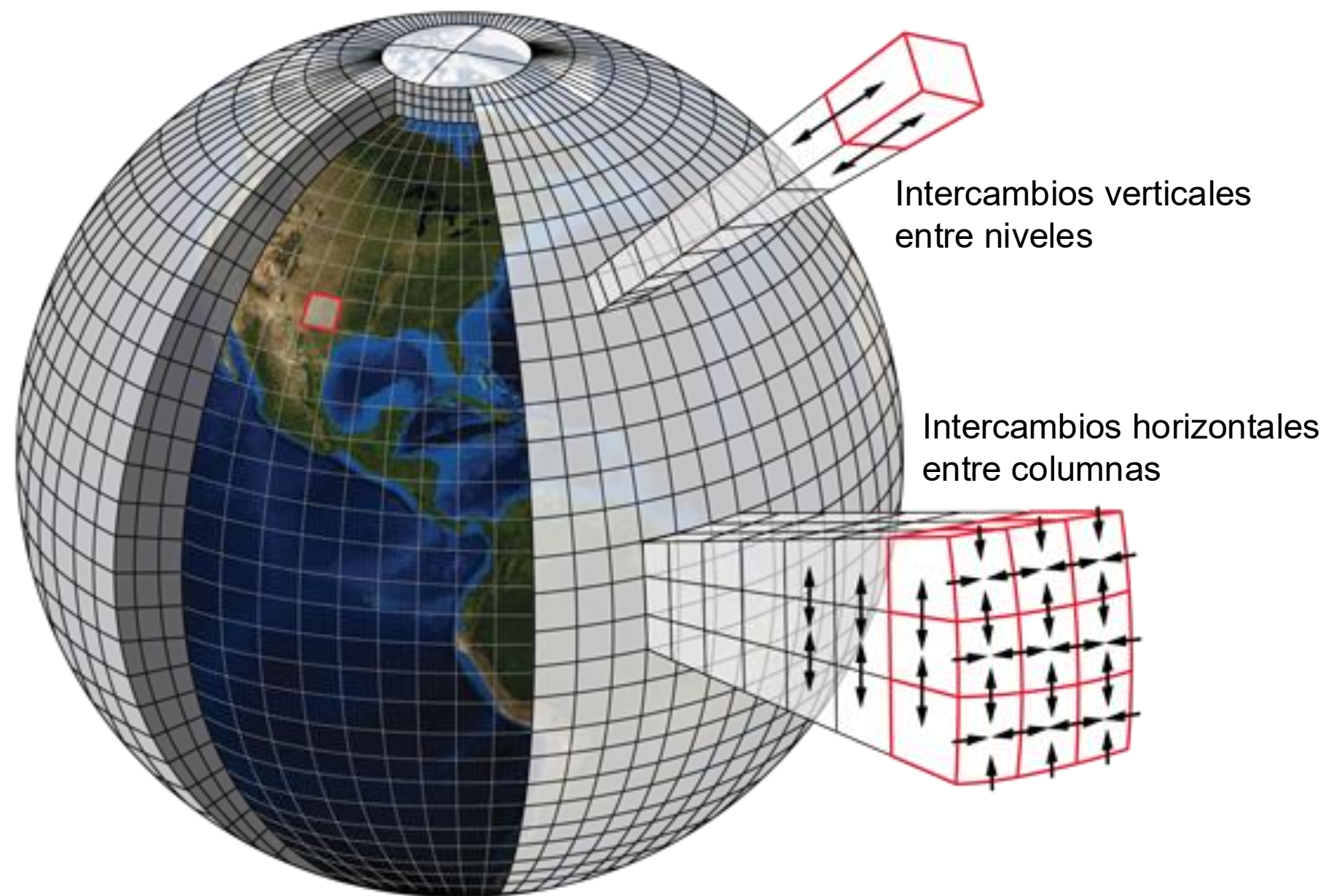
# Modelos numéricos



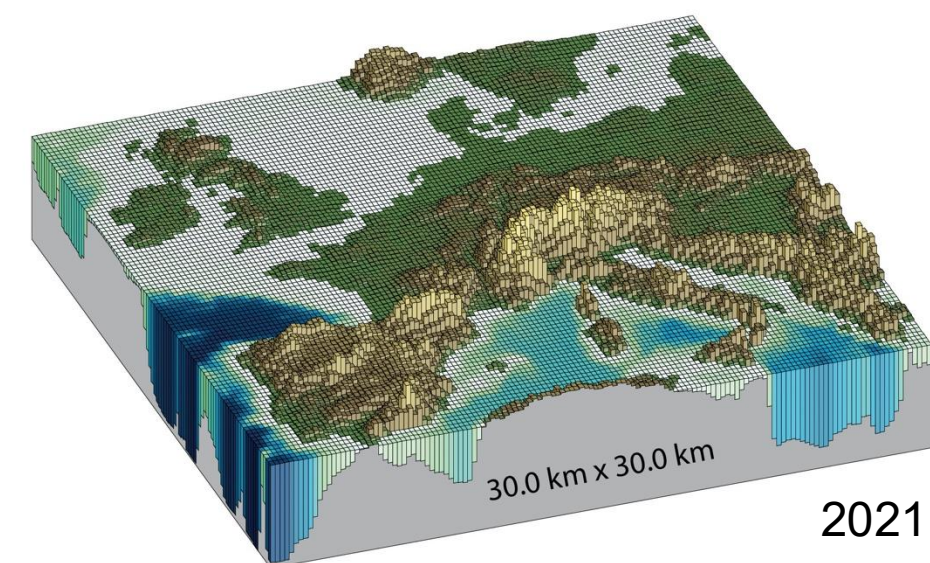
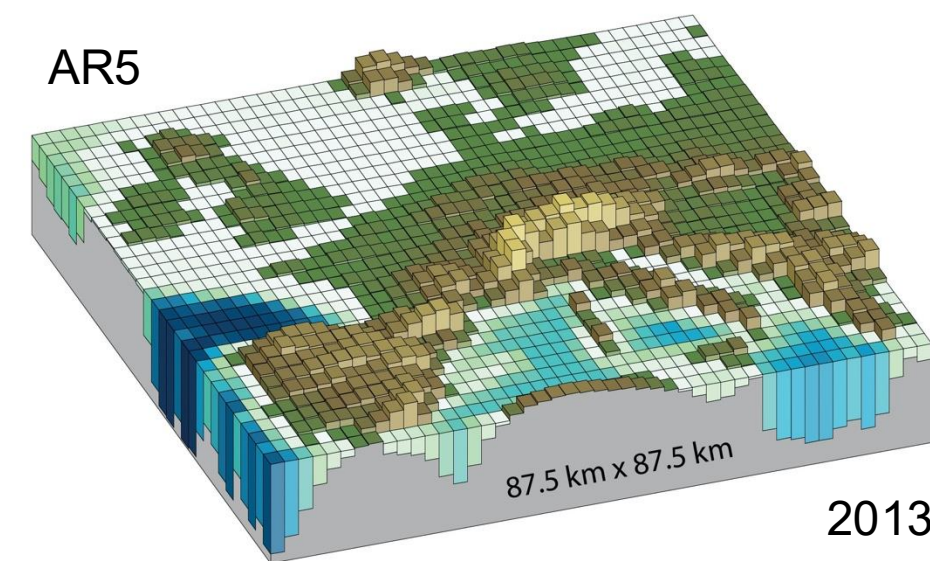
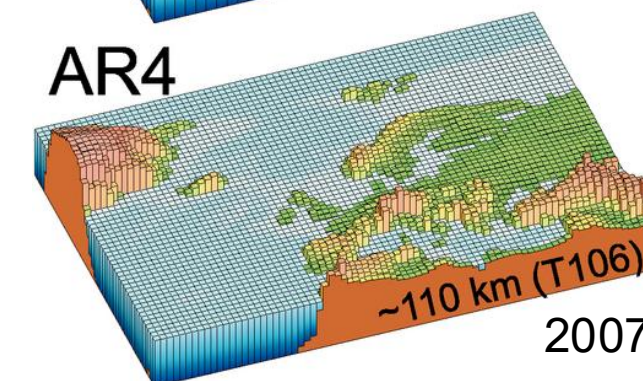
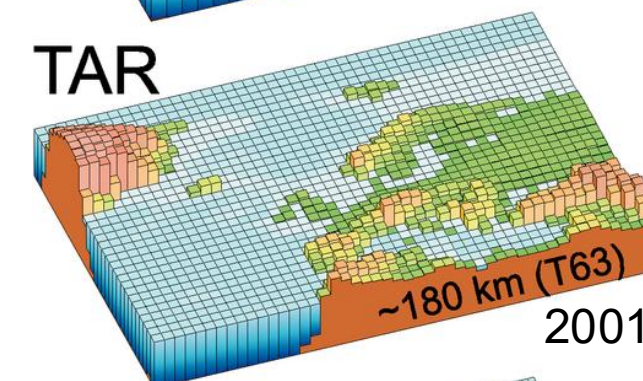
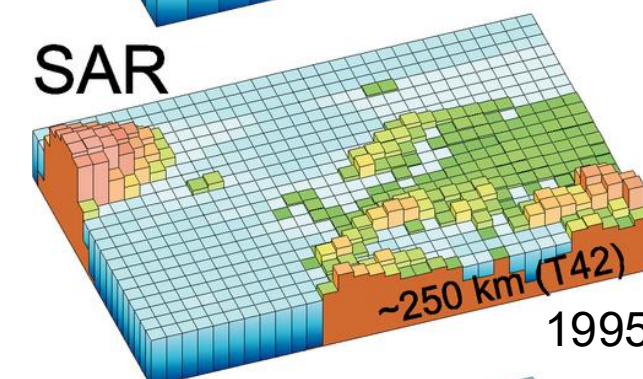
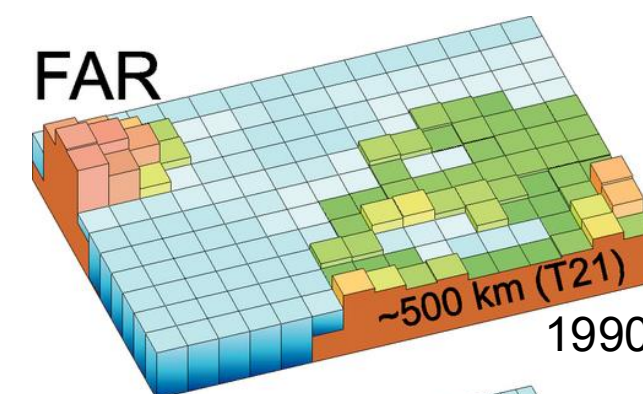
ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva

La resolución espacial y temporal ha ido aumentando con los años:



Modelo global





# Modelos numéricos

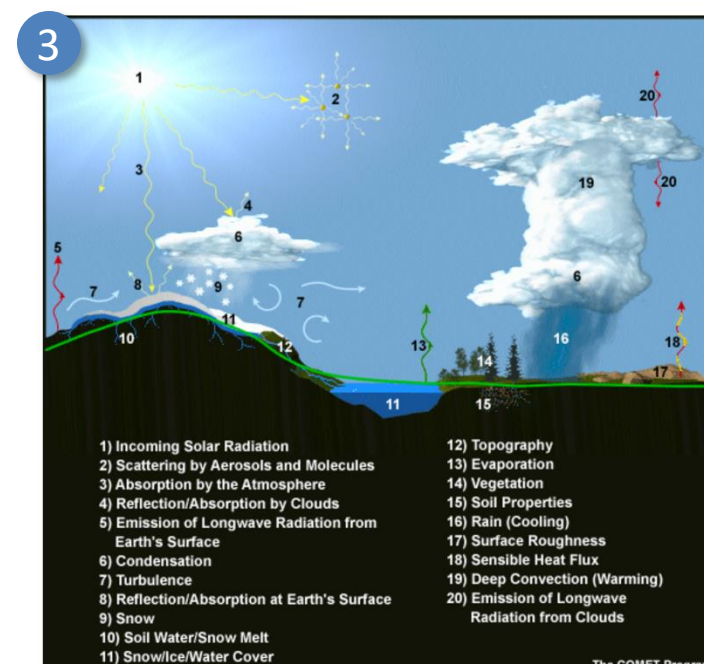
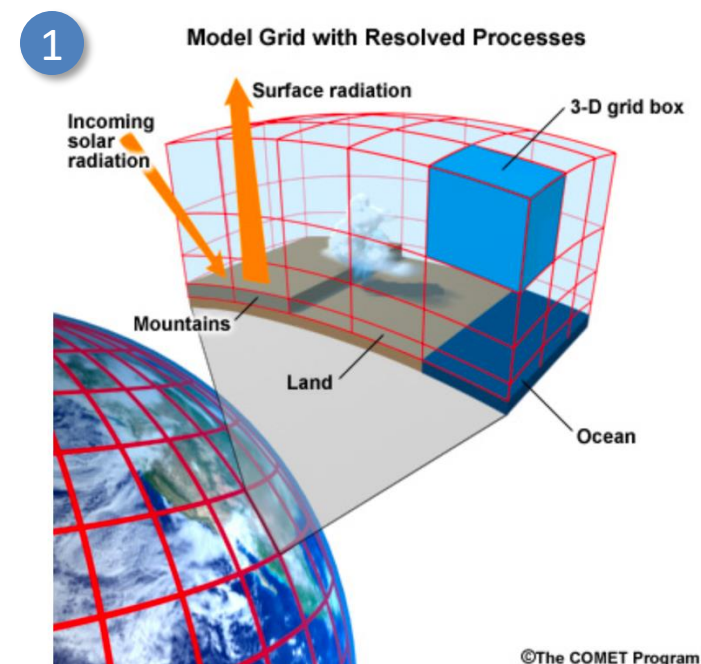


ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

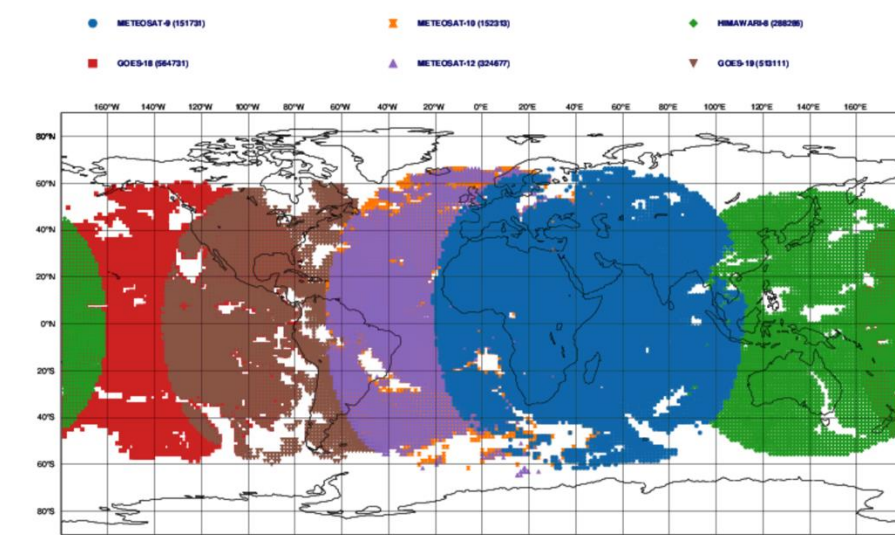
50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva

Aspectos fundamentales a tener en cuenta:

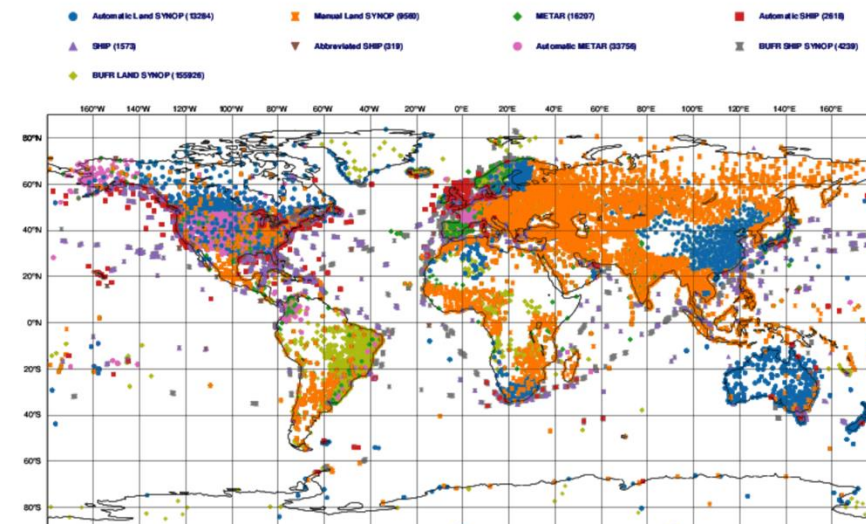
1. Para cada punto de malla, se resuelven numéricamente las ecuaciones primitivas: conservación del momento, masa y energía, y la ecuación de estado.
2. Las ecuaciones se discretizan en tiempo y espacio.
3. Los procesos de sub-escala física no resueltos se parametrizan en función de las variables resueltas.
4. Condiciones iniciales: Observaciones.
5. Límite de predictibilidad debido a naturaleza caótica de la atmosfera.



ECMWF data coverage (all observations) - GEOSTATIONARY RADIANCES  
2025110303 to 2025110309  
Total number of obs = 1994849

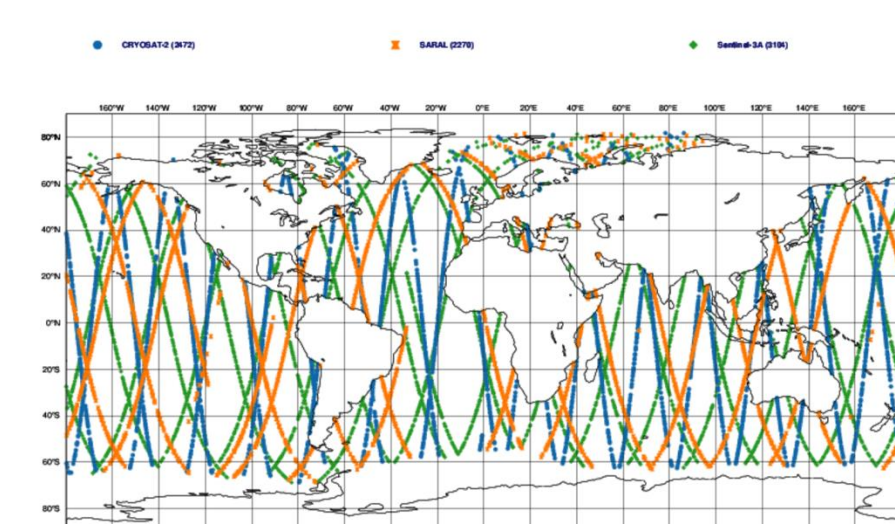


ECMWF data coverage (all observations) - SYNOP-SHIP-METAR  
2025110303 to 2025110309  
Total number of obs = 237482



4

ECMWF data coverage (all observations) - SEA LEVEL ANOMALY  
20251101 00  
Total number of obs = 7846





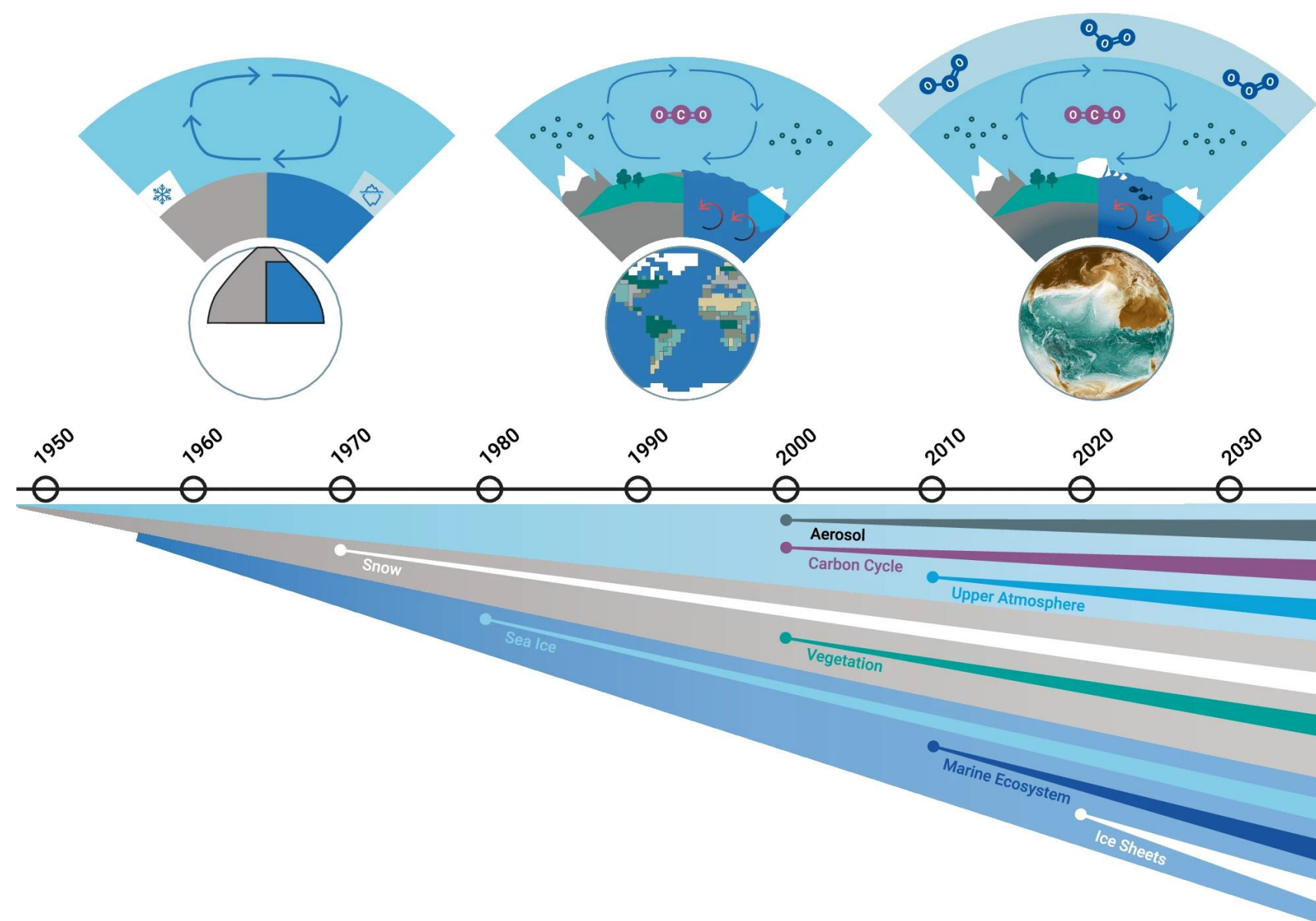
# Modelos numéricos



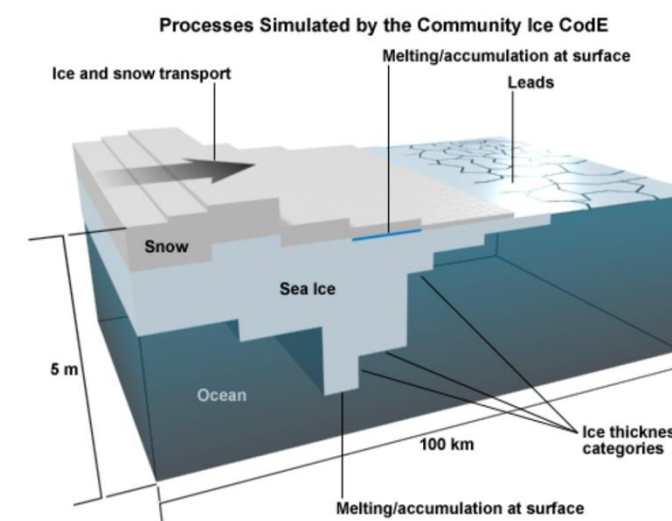
ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva

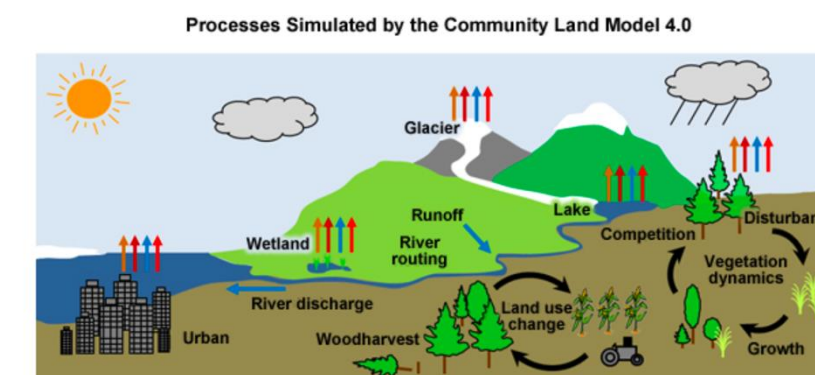
Además, son sistemas acoplados:



(Bordoni *et al.* 2025)

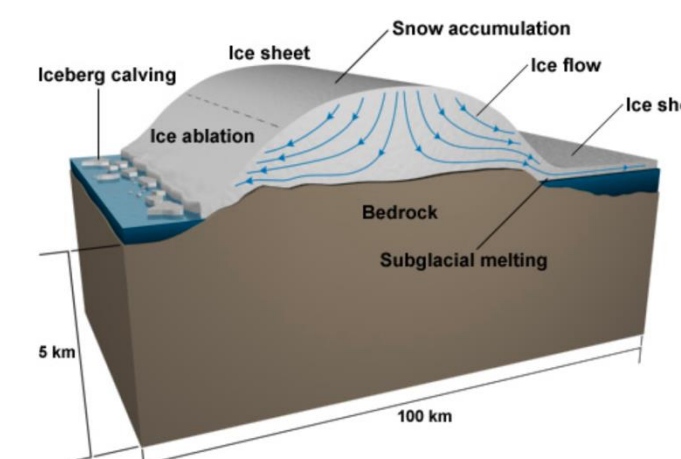


©The COMET Program



Lawrence et al. 2011

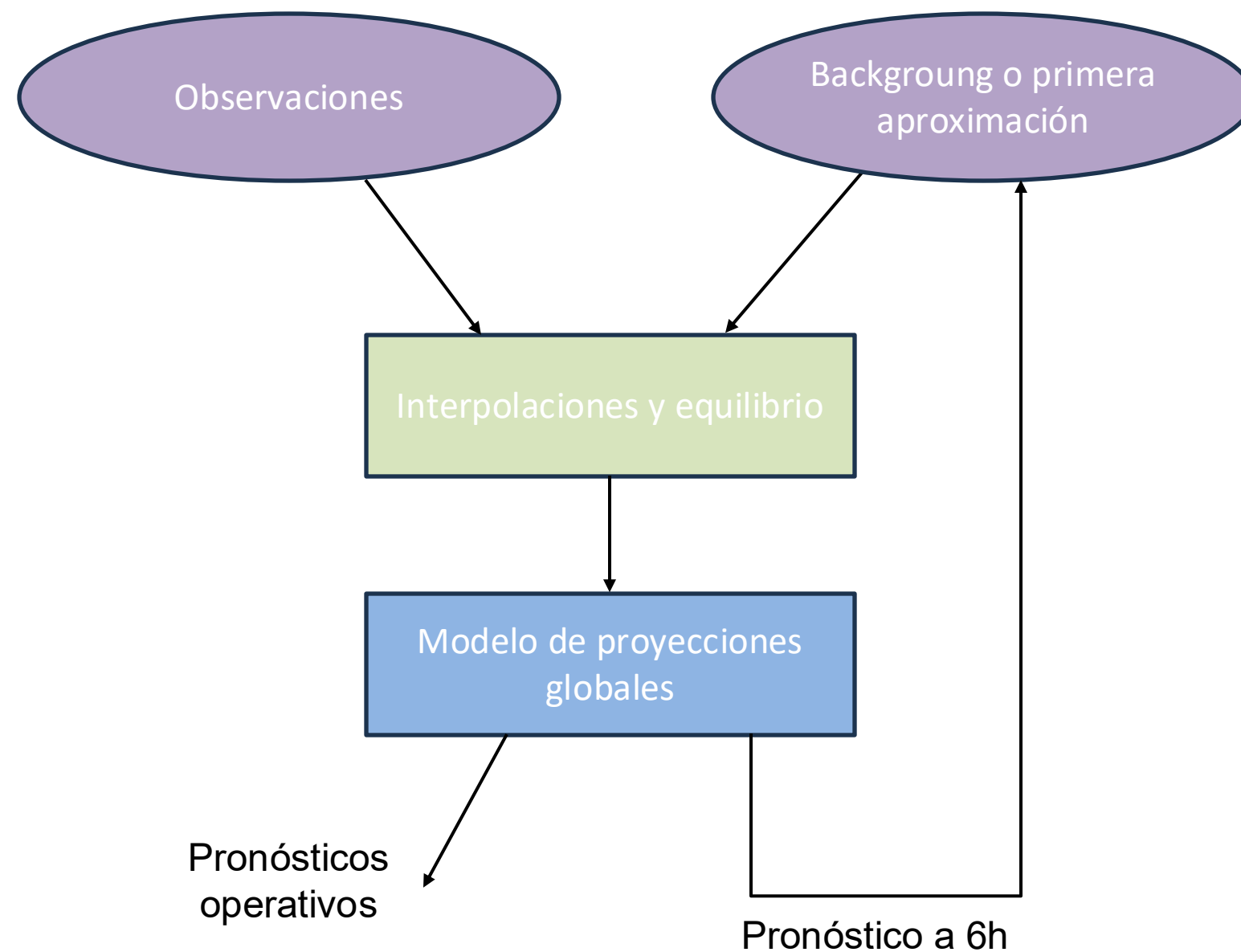
Processes Simulated by the Community Ice Sheet Model



# Modelos numéricos

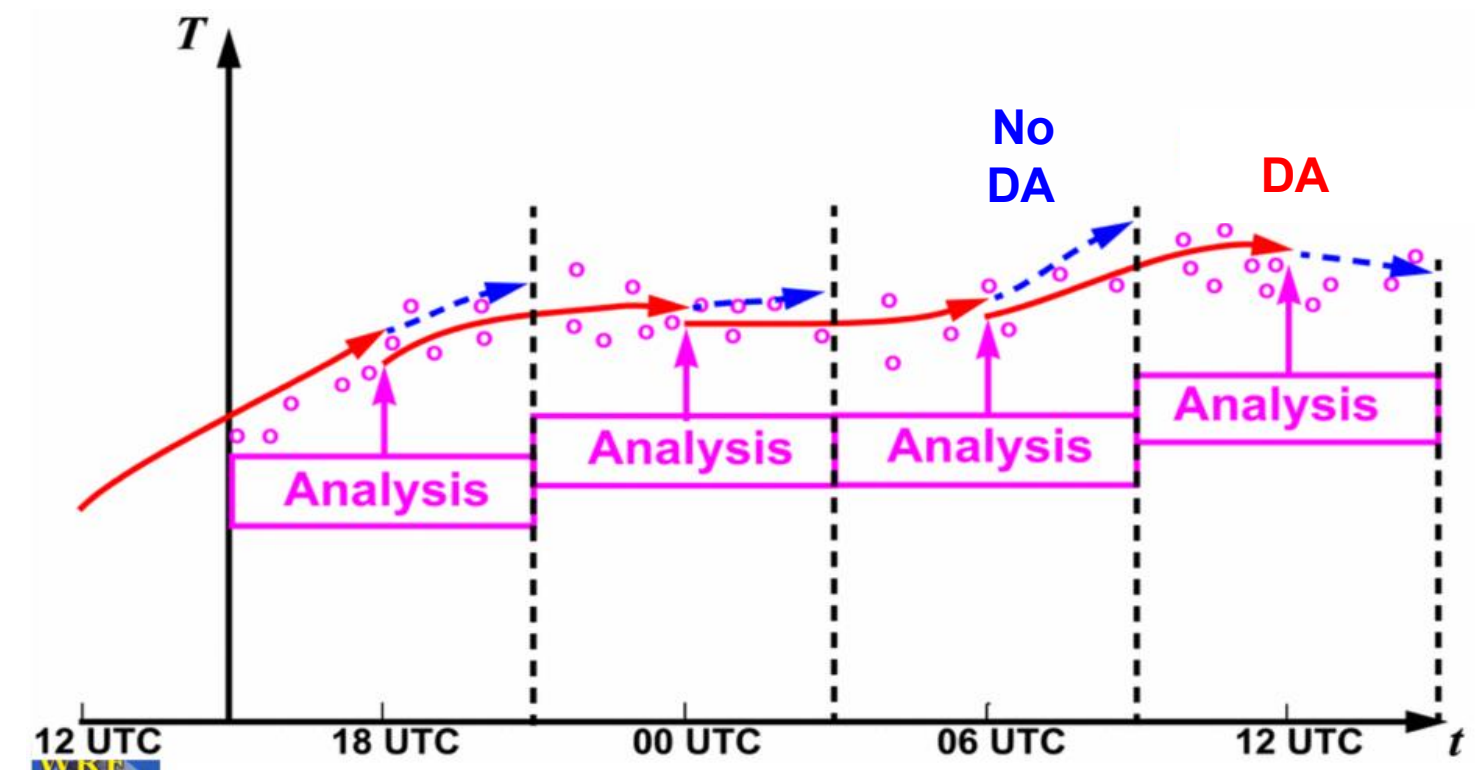


¿Cómo funcionan?



Pasos de tiempo de segundos, limitados por la resolución espacial para mantener la estabilidad del modelo.

Además, puede haber **asimilación de datos** observacionales:



¡En las proyecciones climáticas no puede haber asimilación de datos puesto que no hay observaciones para el futuro!



# Pasado y presente: Reanálisis

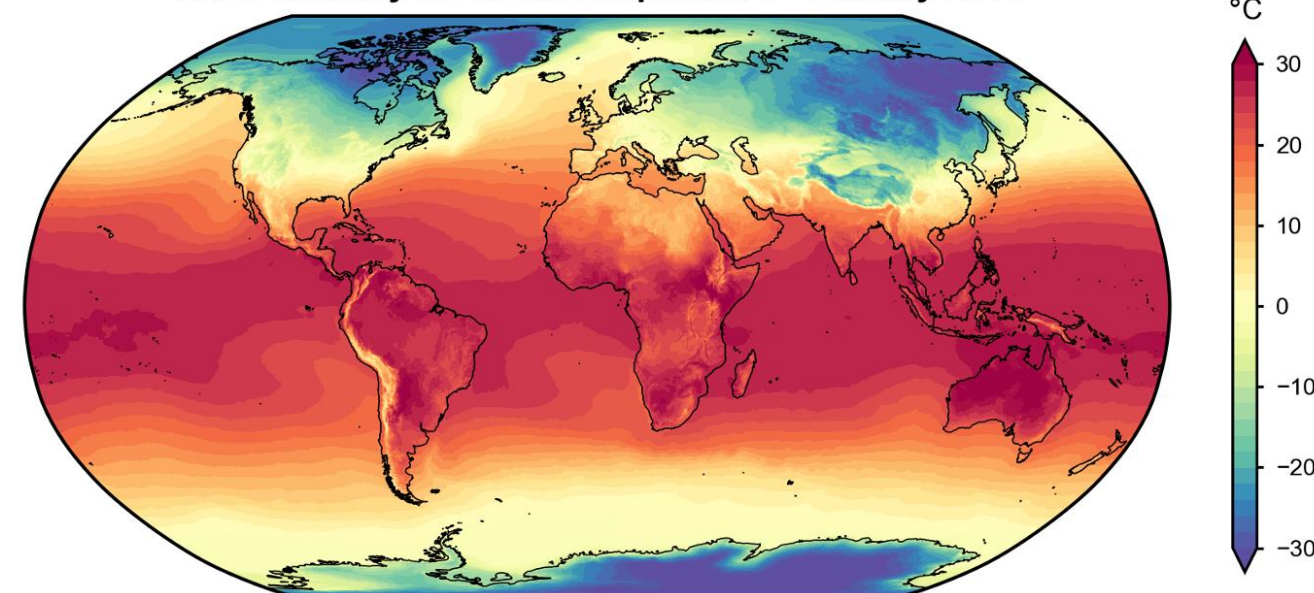


- Los datos de **reanálisis** proporcionan un registro de variables atmosféricas equiespaciado que es representativo de la circulación atmosférica global en un momento determinado.
- Se producen también con modelos climáticos, en los cuales se han aplicado técnicas de asimilación de datos observacionales.

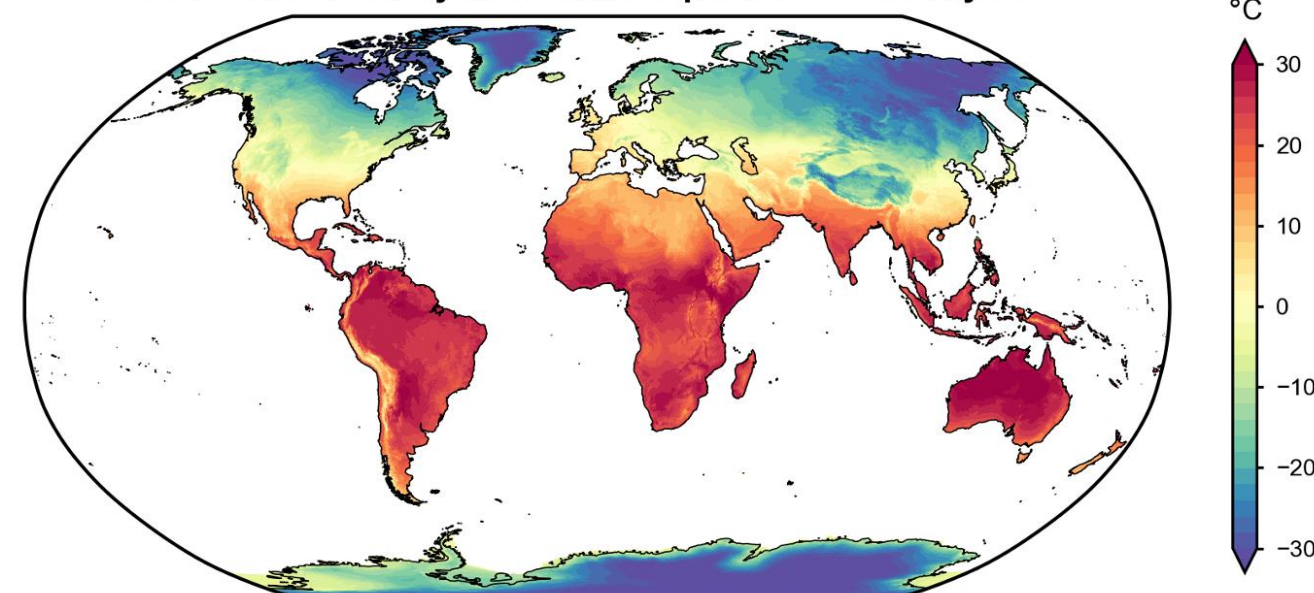
## Los mejores reanálisis actualmente:

- **ERA5:** Global, 1940-presente,  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$  (~30 km) y datos horarios.
- **ERA5-Land:** Global solo tierra, 1950-presente,  $0.1^\circ \times 0.1^\circ$  (~9 km) y datos horarios.

ERA5 monthly mean 2m temperature - January 2016



ERA5-Land monthly mean 2m temperature - January 2016



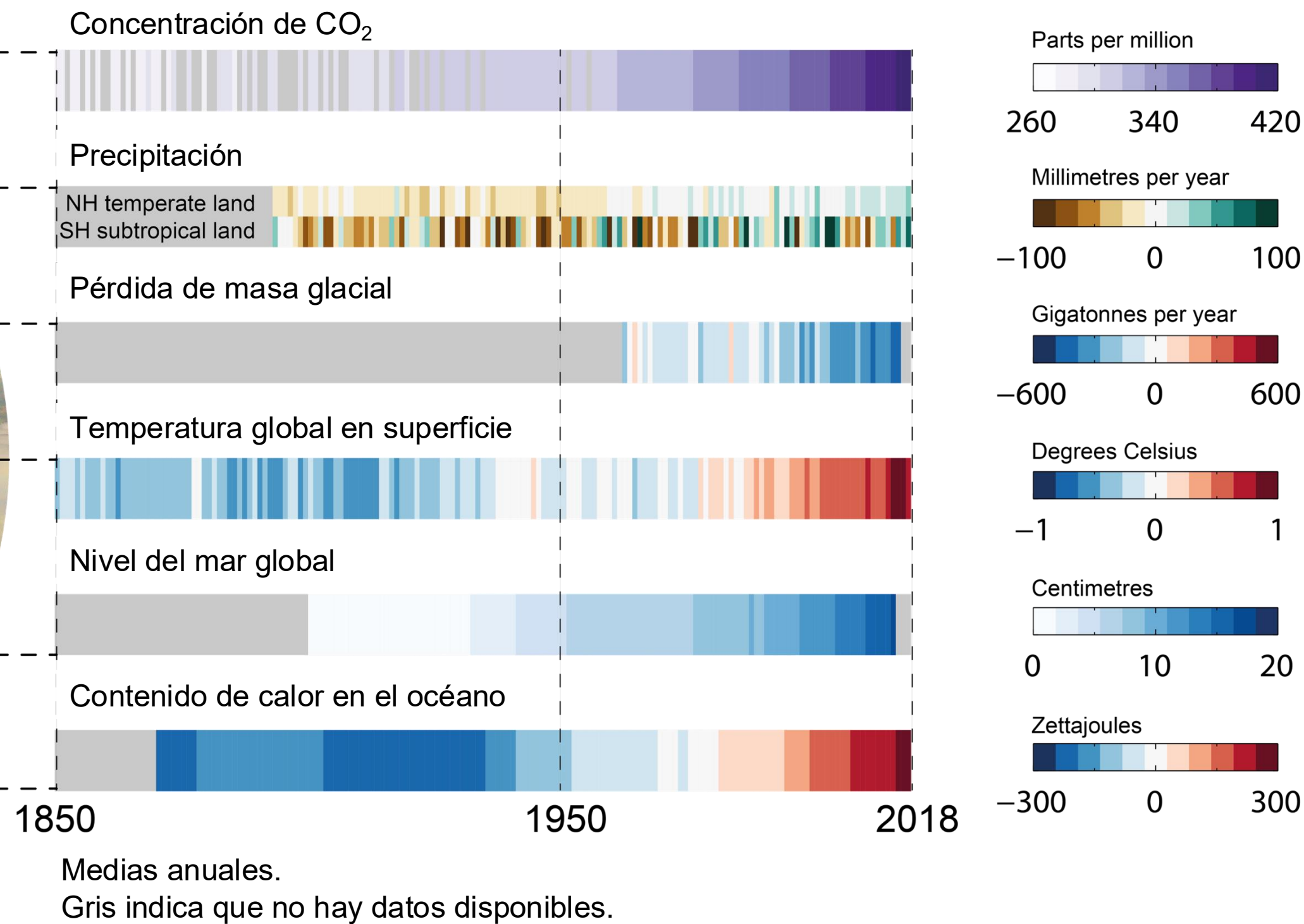
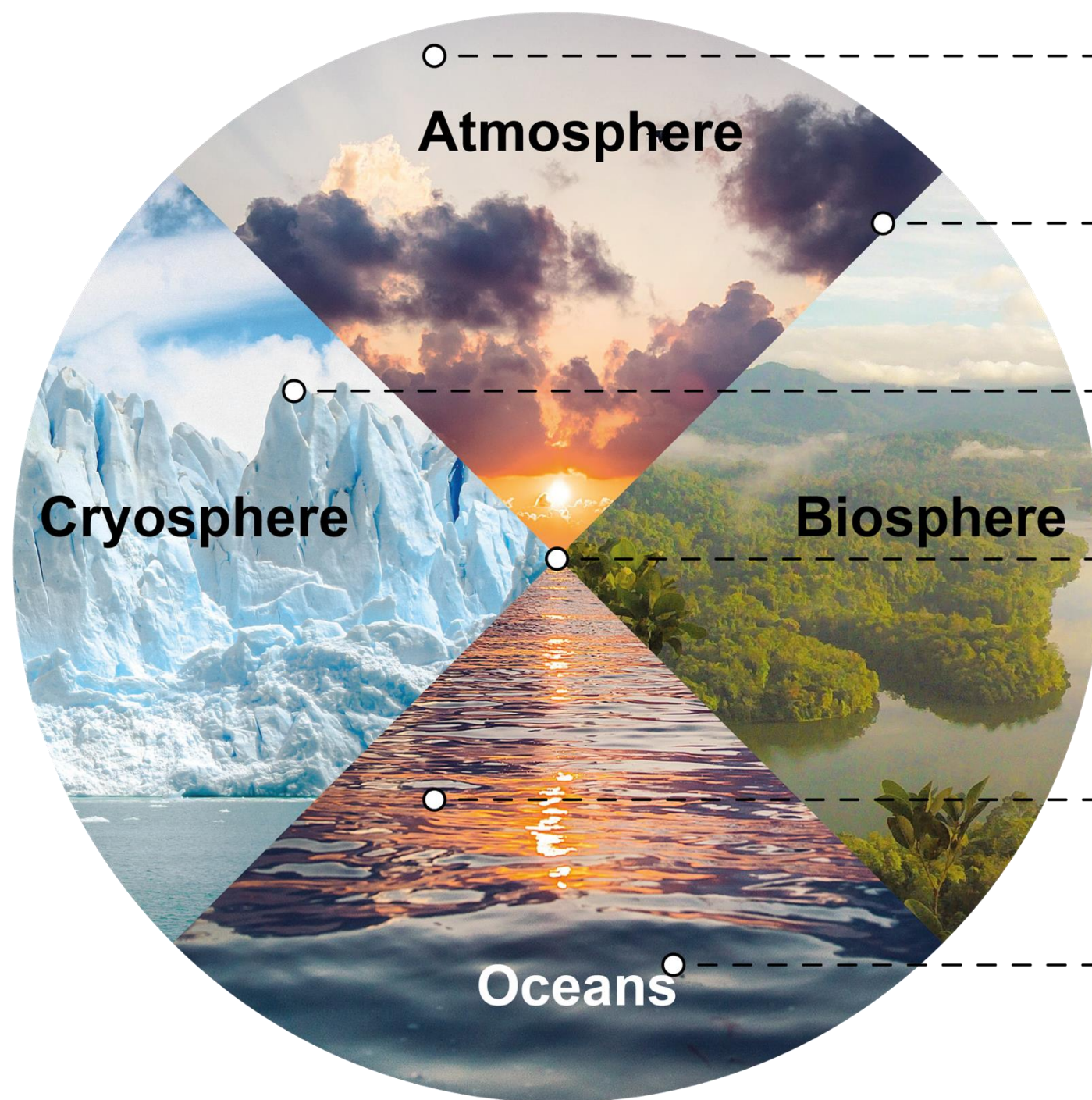


# Futuro: Cambio climático



ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva





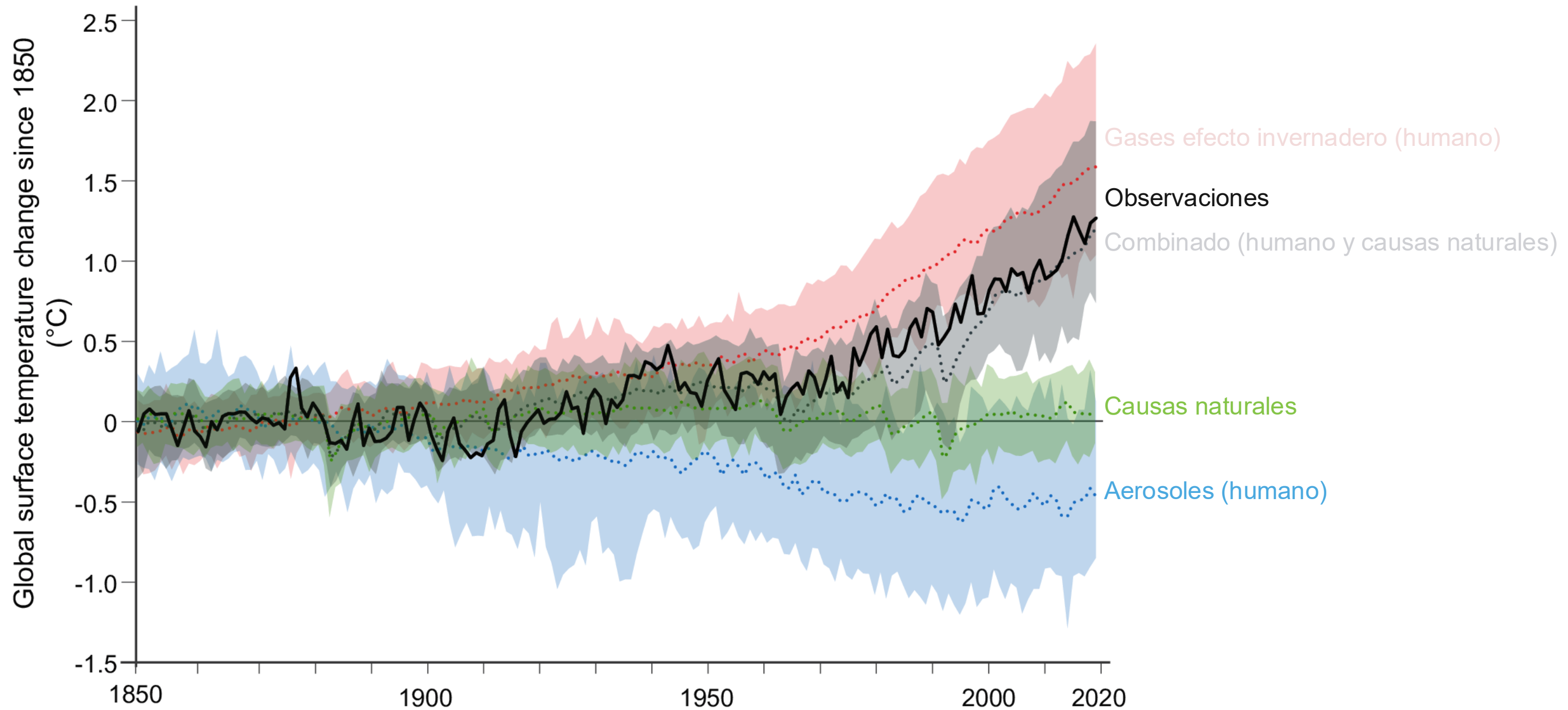
# Futuro: Cambio climático



ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva

El calentamiento observado (1850-2019) solo se reproduce en simulaciones en las que se incluye la influencia humana



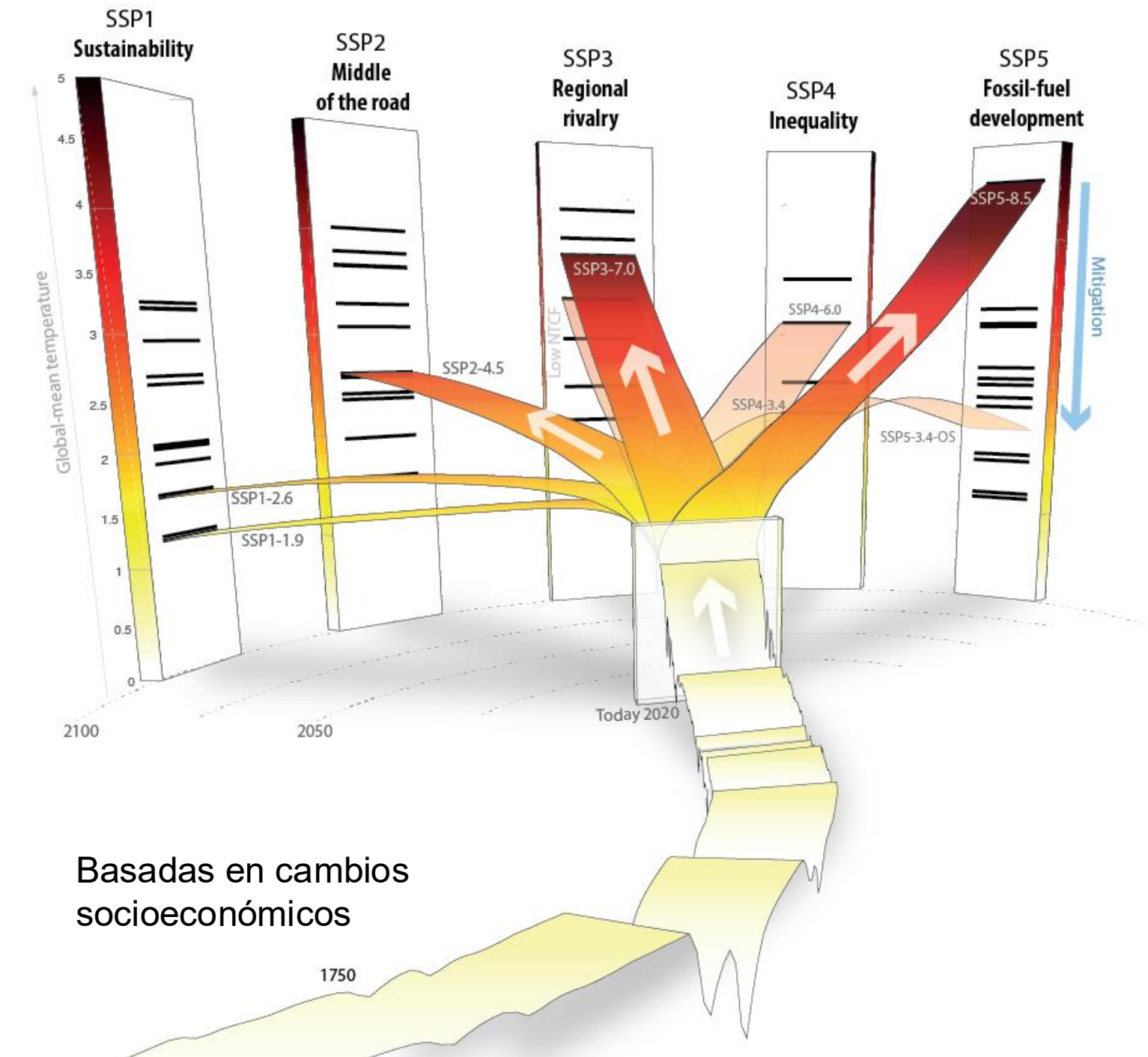
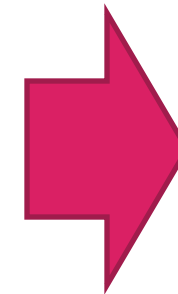
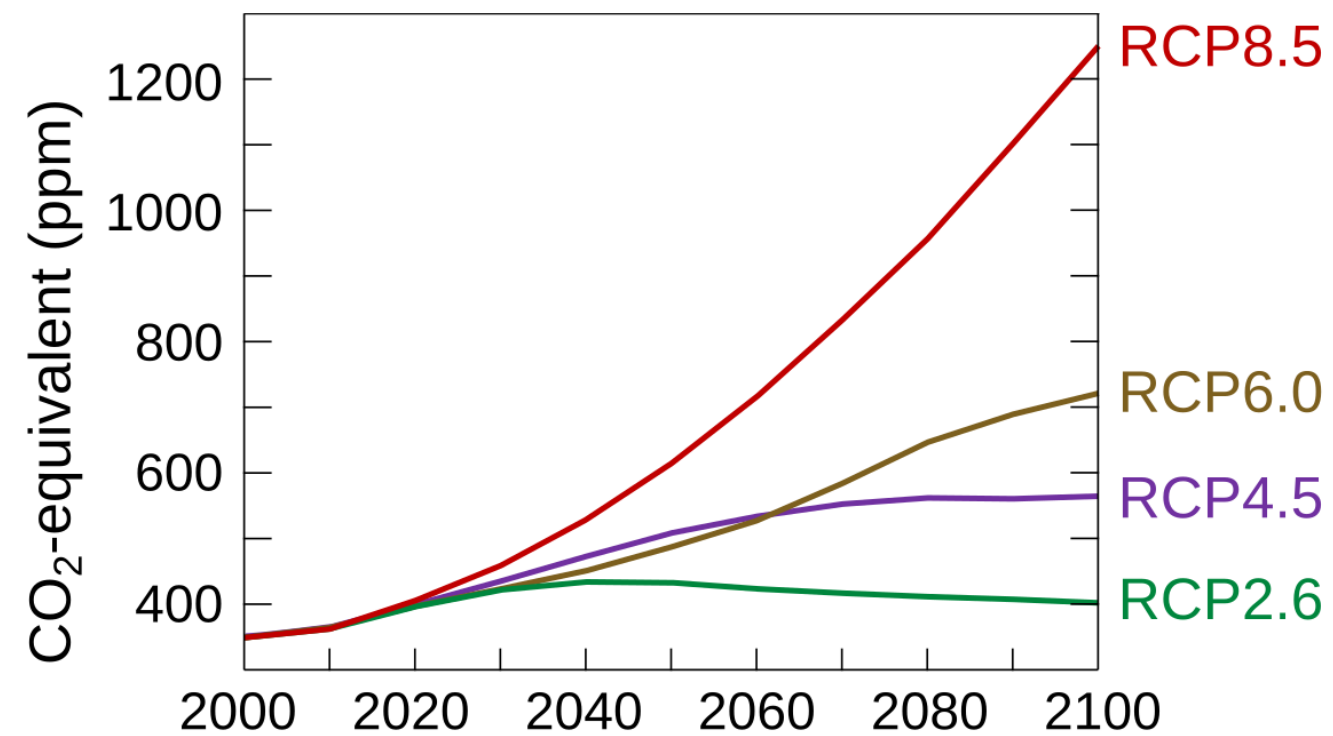
# Escenarios climáticos



ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva

Hemos pasado de **Trayectorias de concentración representativa (RCP)** a **Trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP)**



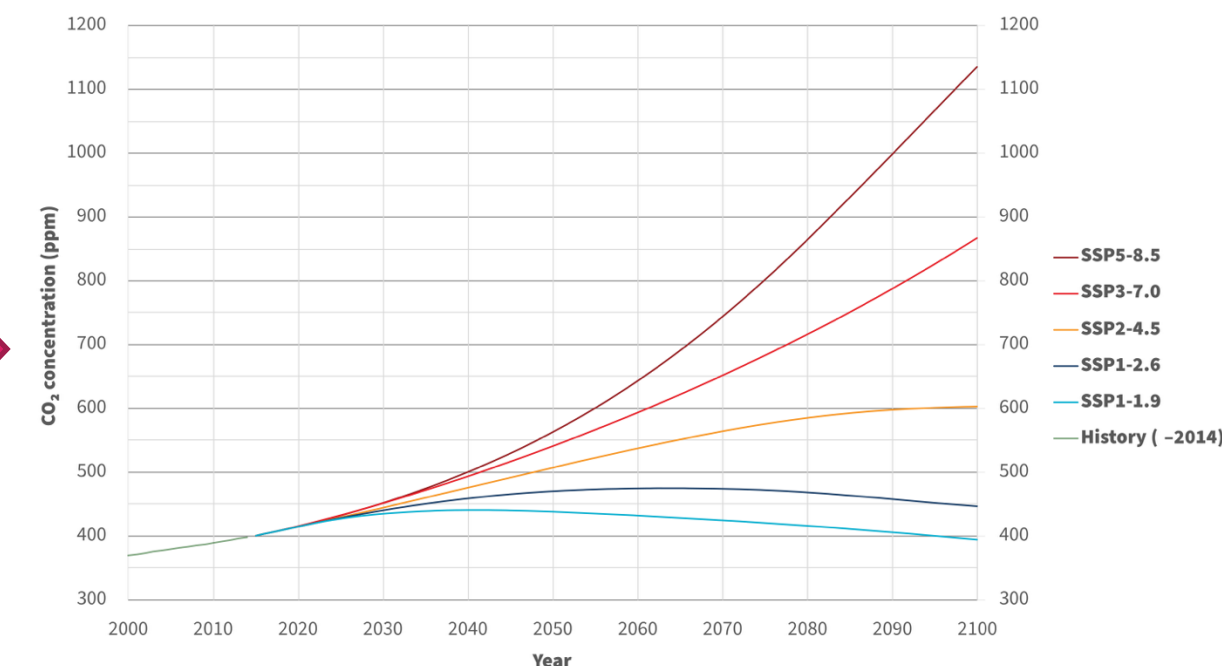
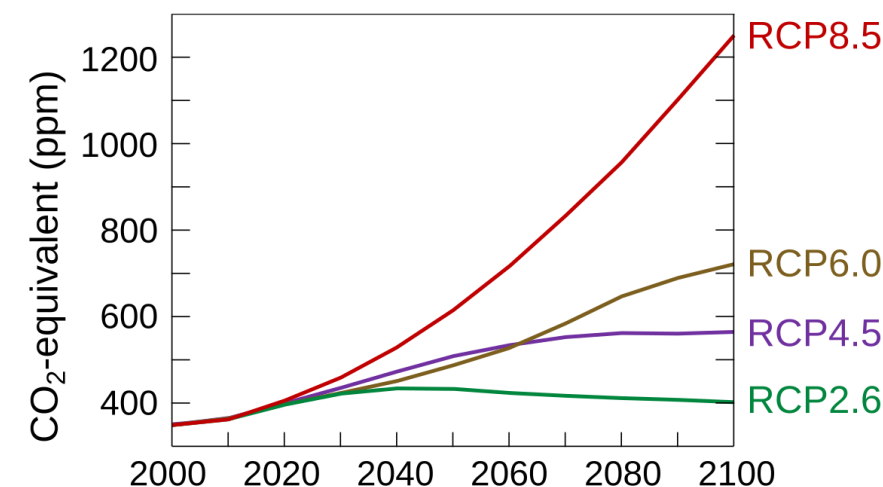
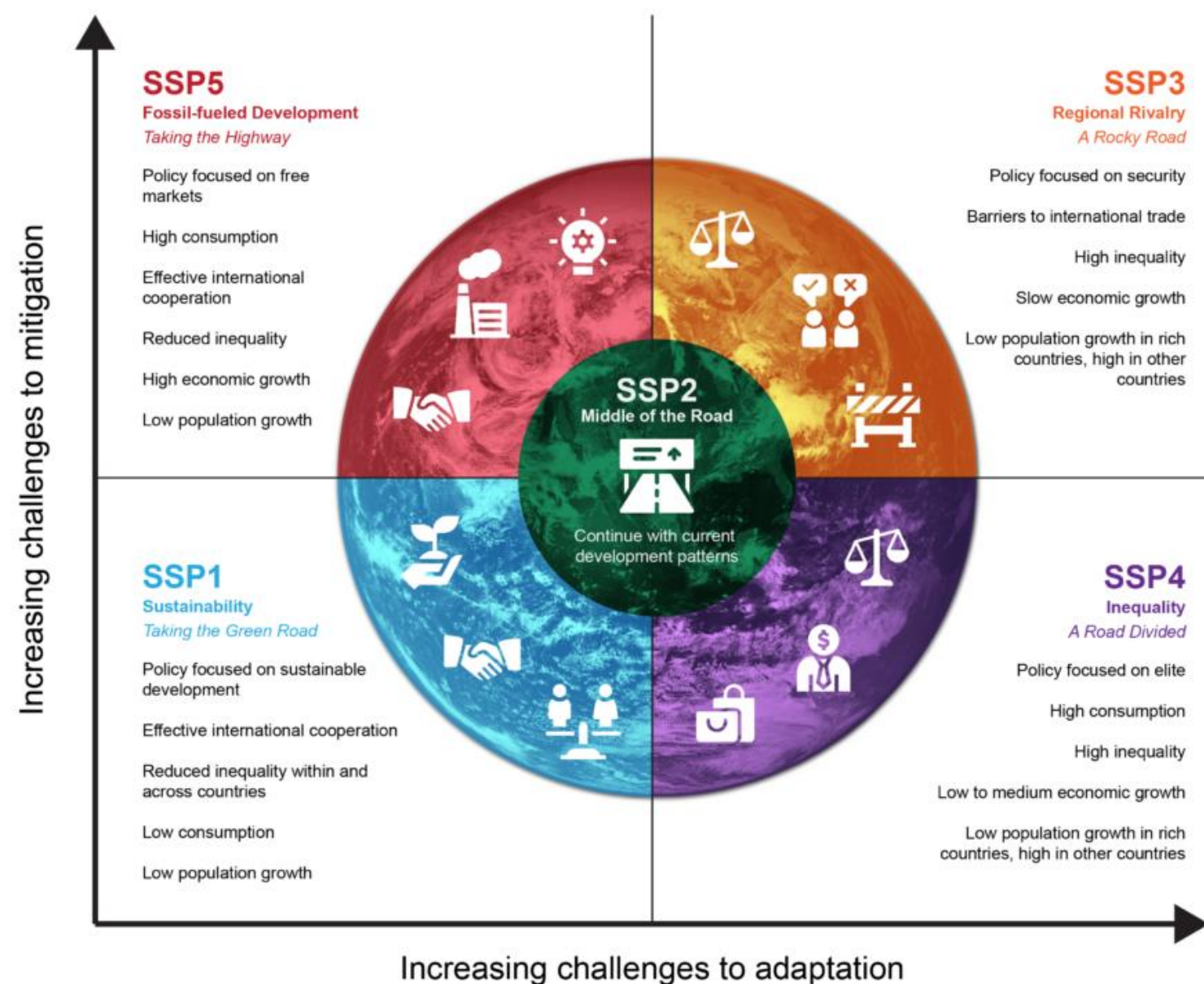
Basadas en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera

Basadas en cambios socioeconómicos

En ambos casos, el forzamiento radiativo en W/m<sup>2</sup> estimado en 2100 (entre 1.9 y 8.5 W/m<sup>2</sup>) se representa mediante el número del final.



# Escenarios climáticos



**Cross-Section Box TS.1, Table 1 | Assessment results for 20-year averaged change in global surface temperature based on multiple lines of evidence.** The change is displayed in °C relative to the 1850–1900 reference period for selected time periods (first three rows), and as the first 20-year period during which the average global surface temperature change exceeds the specified level relative to the period 1850–1900 (last four rows). The entries give both the central estimate and, in parentheses, the *very likely* (5–95%) range. An entry n.c. means that the global warming level is not crossed during the period 2021–2100.

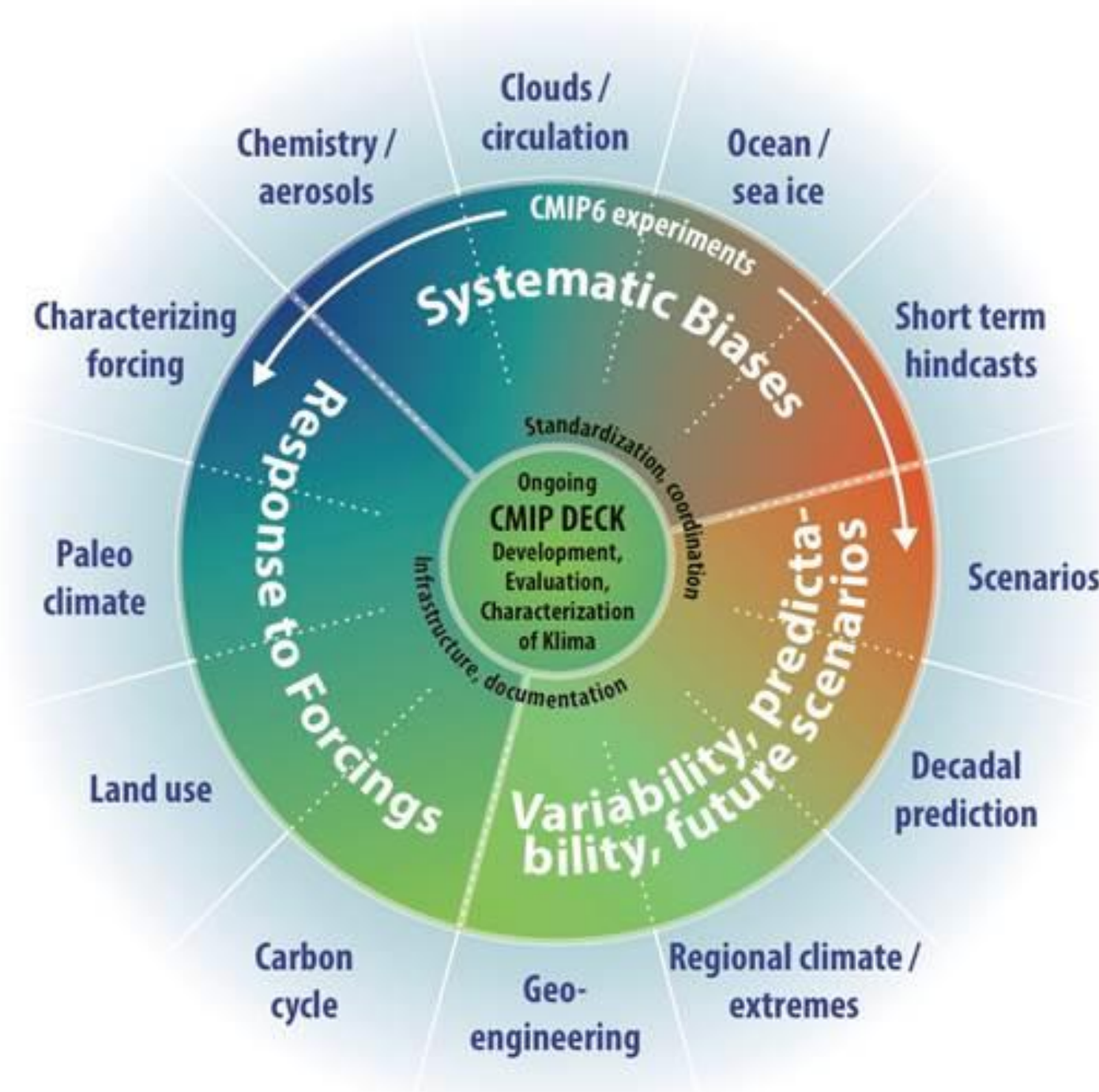
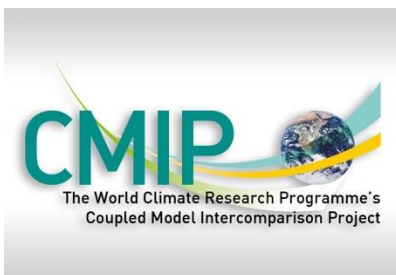
	SSP1-1.9	SSP1-2.6	SSP2-4.5	SSP3-7.0	SSP5-8.5
<b>Near term, 2021–2040</b>	1.5 [1.2 to 1.7]	1.5 [1.2 to 1.8]	1.5 [1.2 to 1.8]	1.5 [1.2 to 1.8]	1.6 [1.3 to 1.9]
<b>Mid-term, 2041–2060</b>	1.6 [1.2 to 2.0]	1.7 [1.3 to 2.2]	2.0 [1.6 to 2.5]	2.1 [1.7 to 2.6]	2.4 [1.9 to 3.0]
<b>Long term, 2081–2100</b>	1.4 [1.0 to 1.8]	1.8 [1.3 to 2.4]	2.7 [2.1 to 3.5]	3.6 [2.8 to 4.6]	4.4 [3.3 to 5.7]

↑  
Más probable

↑  
Más interesante científicamente



# Simulaciones cambio climático



## Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP)

Preguntas científicas del CMIP6:

- ¿Cómo responde el sistema terrestre al forzamiento?
- ¿Cuáles son los orígenes y las consecuencias de los sesgos sistemáticos de los modelos?
- ¿Cómo podemos evaluar los cambios climáticos futuros, dada la variabilidad, la previsibilidad y las incertidumbres del clima en los distintos escenarios?

### Instituciones

Beijing Climate Center (China)  
BNU (China)  
Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (Canada)  
CNRM-Cerfacs (France)  
CSIRO-BOM (Australia)  
EC-Earth Consortium  
Euro-Mediterranean Center on Climate Change (Italy)  
First Institute of Oceanography (China)  
Institut Pierre Simon Laplace (France)  
Institute for Numerical Mathematics (Russia)  
Institute of Atmospheric Physics (China)  
JAMSTEC, NIES, CCSR, U. of Tokyo (Japan)  
Max Planck Institute (Germany)  
Met Office Hadley Center (UK)  
Meteorological Research Institute (Japan)  
NASA GISS (USA)  
National Center for Atmospheric Research (USA)  
NOAA-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (USA)  
Norwegian Climate Center (Norway)

### Modelos

BCC-CSM1-1; BCC-CSM1-1-M  
BNU-ESM  
CanESM2  
CNRM-CM5  
ACCESS1-0; ACCESS1-3; CSIRO-Mk3-6-0  
EC-Earth  
CMCC-CM; CMCC-CMS  
FIO-ESM  
IPSL-CM5A-LR; IPSL-CM5A-MR; IPSL-CM5B-LR  
INM-CM4  
FGOALS-g2  
MIROC-ESM; MIROC-ESM-CHEM; MIROC5  
MPI-ESM-LR; MPI-ESM-HR  
HadGEM2-AO; HadGEM2-CC; HadGEM2-ES  
MRI-CGCM3  
GISS-E2-R; GISS-E2-R-CC; GISS-E2-H; GISS-E2-H-CC  
CCSM4; CESM1-BGC; CESM1-CAM5; CESM1-WACCM  
GFDL-CM3; GFDL-ESM2G; GFDL-ESM2M  
NorESM1-ME; NorESM1-M

Tebaldi *et al.* (2021)



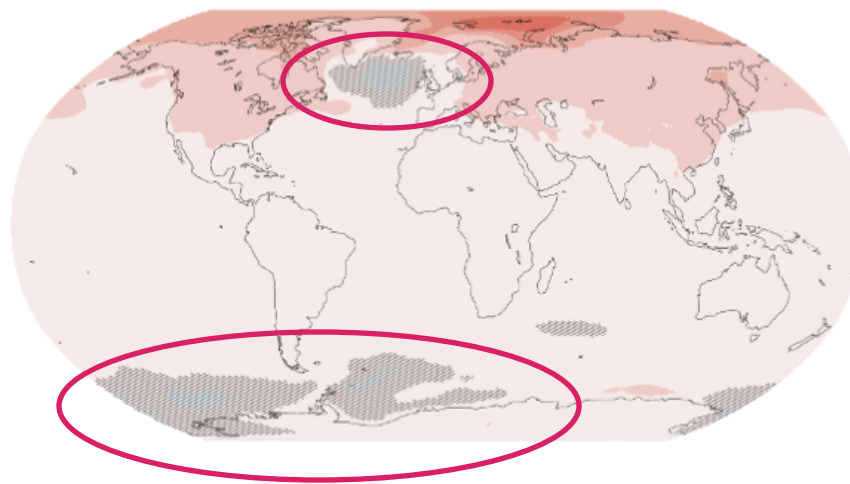
# Simulaciones cambio climático



¿Qué va a pasar con la temperatura?

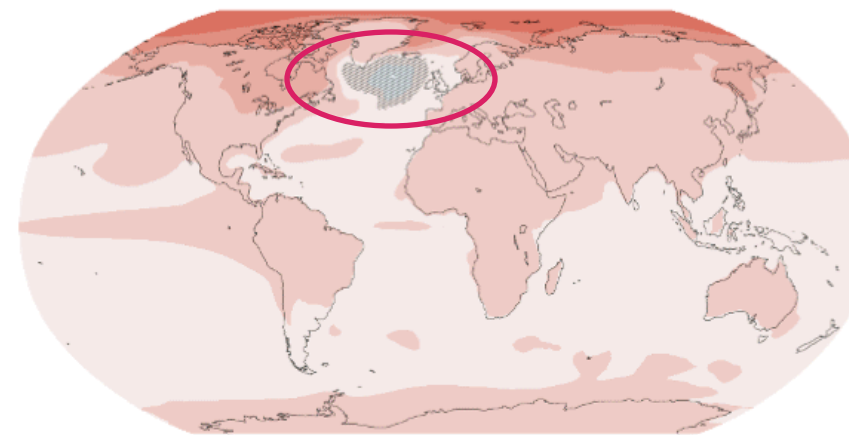
Temperature change for SSP1-1.9

2081-2100 relative to 1995-2014



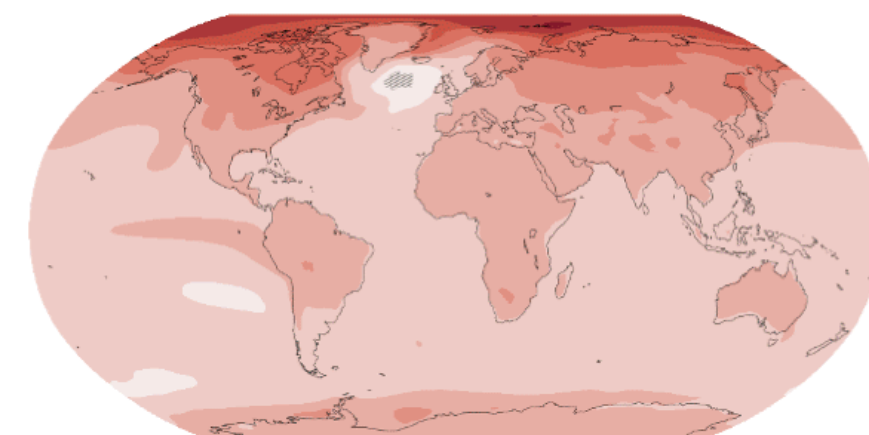
Temperature change for SSP1-2.6

2081-2100 relative to 1995-2014



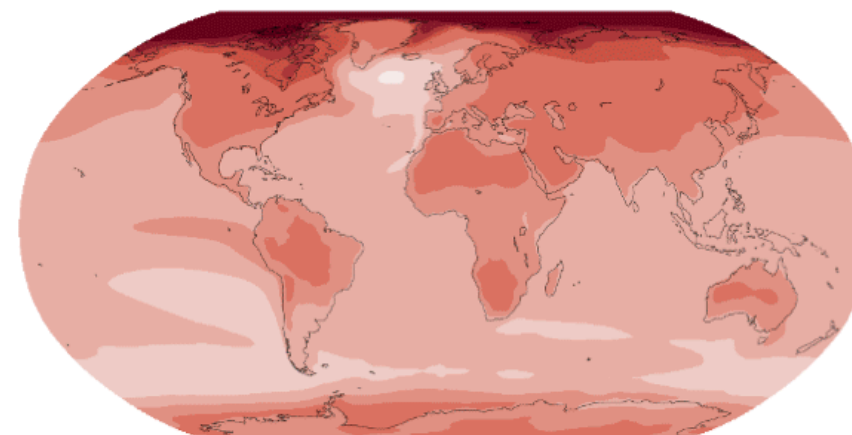
Temperature change for SSP2-4.5

2081-2100 relative to 1995-2014



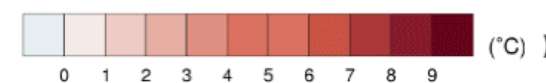
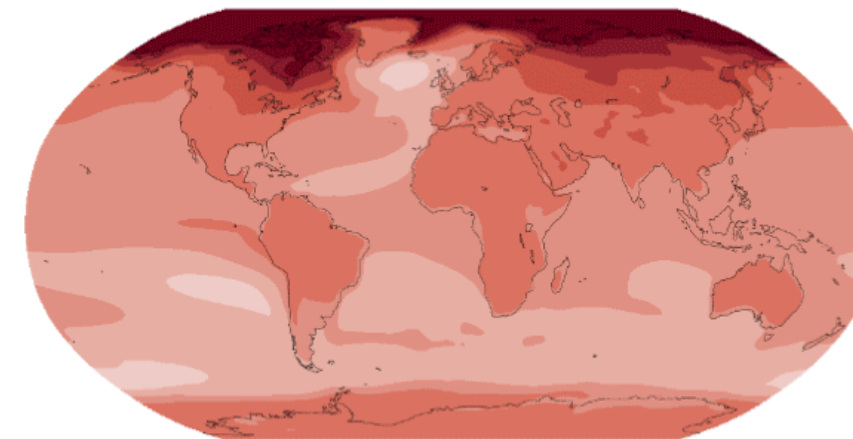
Temperature change for SSP3-7.0

2081-2100 relative to 1995-2014



Temperature change for SSP5-8.5

2081-2100 relative to 1995-2014



Tebaldi *et al.* (2021)

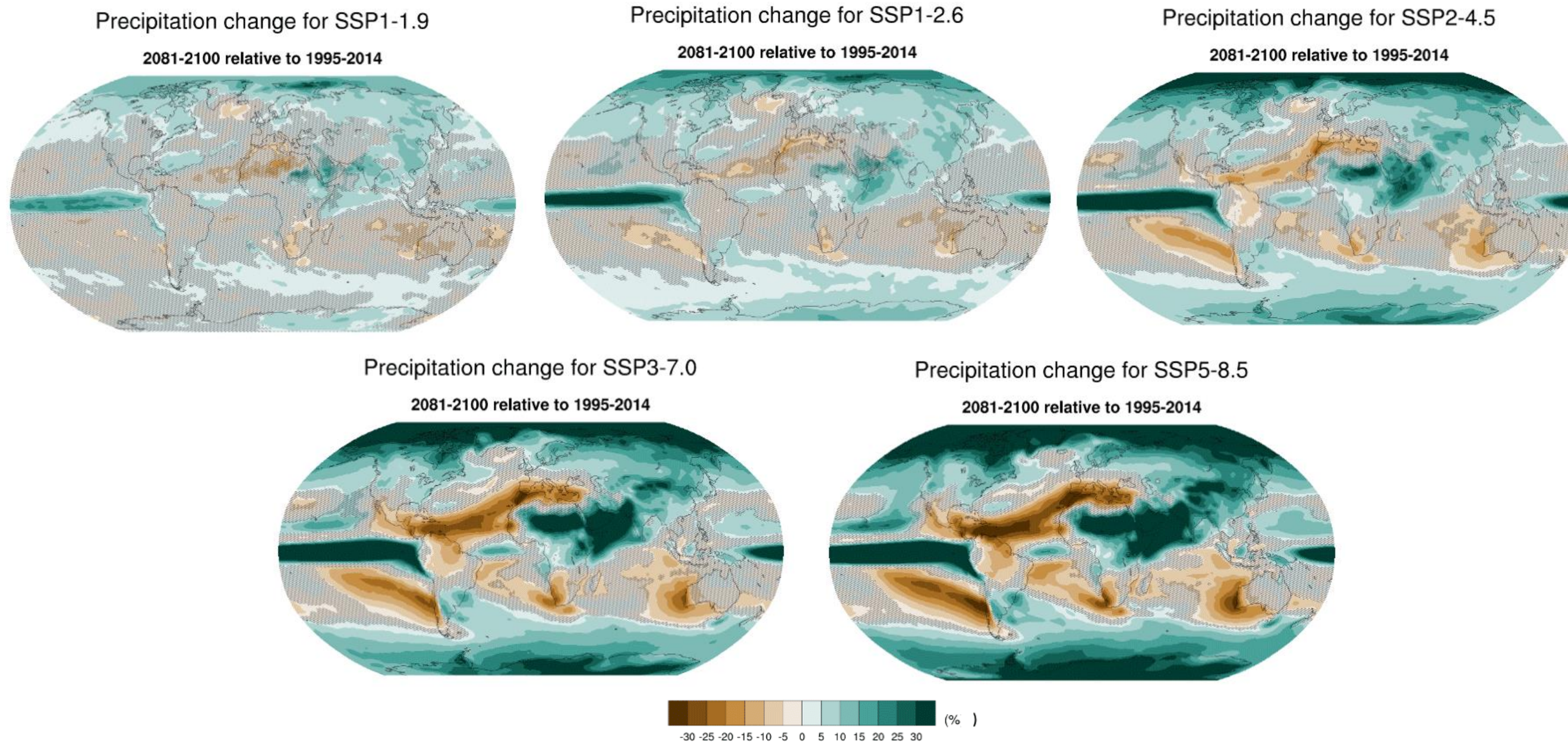
- Representamos normalmente la media de todos los modelos.
- Las áreas punteadas no son significativas, es decir, la magnitud del cambio no excede la desviación estándar de los modelos.



# Simulaciones cambio climático



¿y con la precipitación?



Tebaldi *et al.* (2021)

- Representamos normalmente la media de todos los modelos.
- Las áreas punteadas no son significativas, es decir, la magnitud del cambio no excede la desviación estándar de los modelos.



# Simulaciones cambio climático



ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

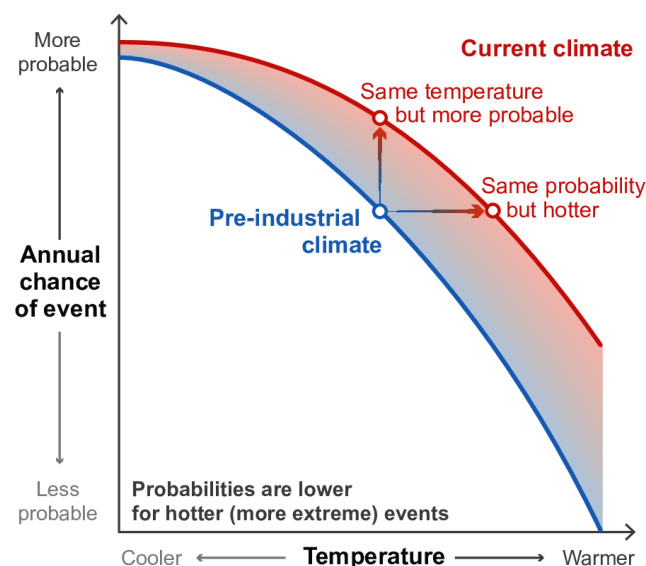
**50** URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
**Biba Zientzia!**  
Ciencia Viva



¿y con los eventos extremos?

## FAQ 11.3: Climate change and extreme events

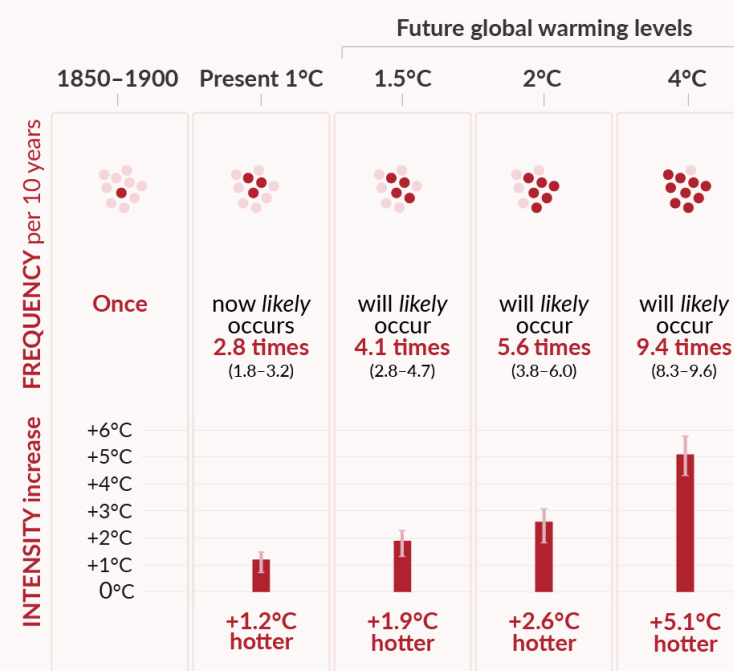
Extreme events have become more probable and more intense. Many of these changes can be attributed to human influence on the climate.



## Hot temperature extremes over land

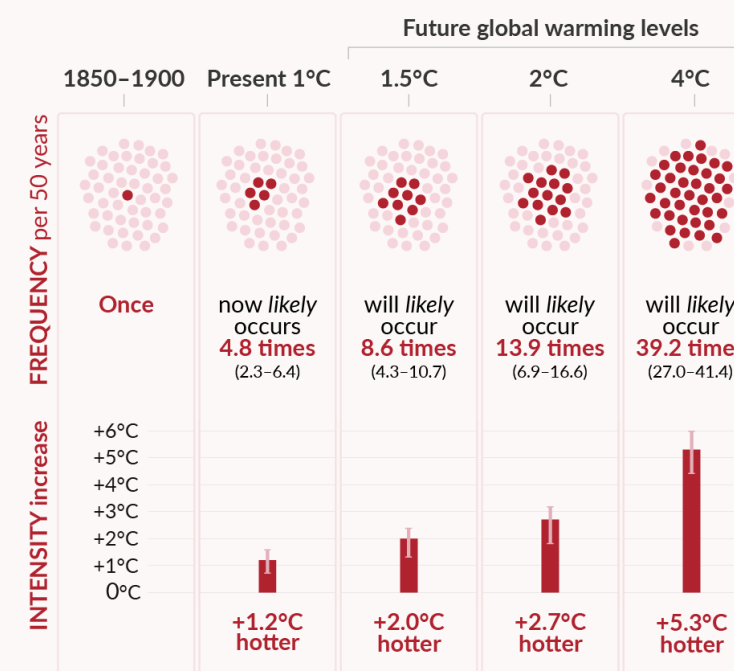
### 10-year event

Frequency and increase in intensity of extreme temperature event that occurred **once in 10 years** on average in a climate without human influence



### 50-year event

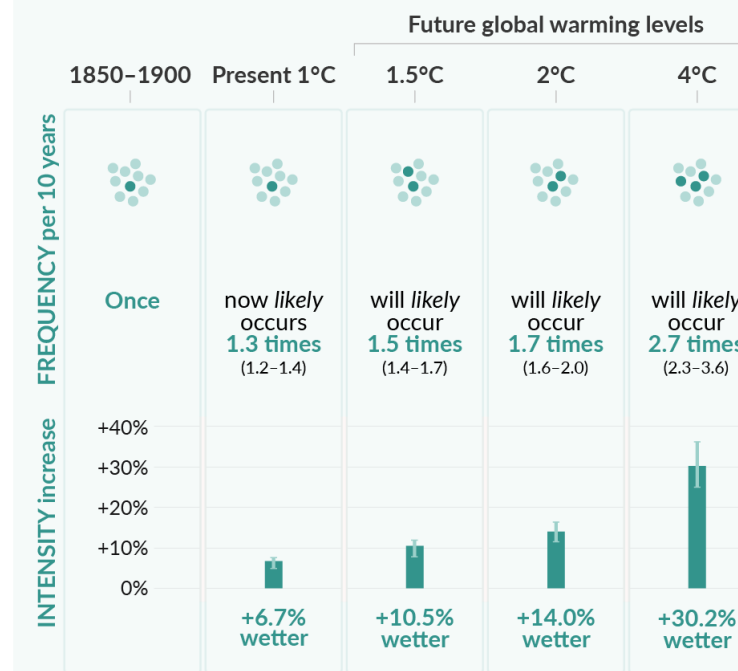
Frequency and increase in intensity of extreme temperature event that occurred **once in 50 years** on average in a climate without human influence



## Heavy precipitation over land

### 10-year event

Frequency and increase in intensity of heavy 1-day precipitation event that occurred **once in 10 years** on average in a climate without human influence

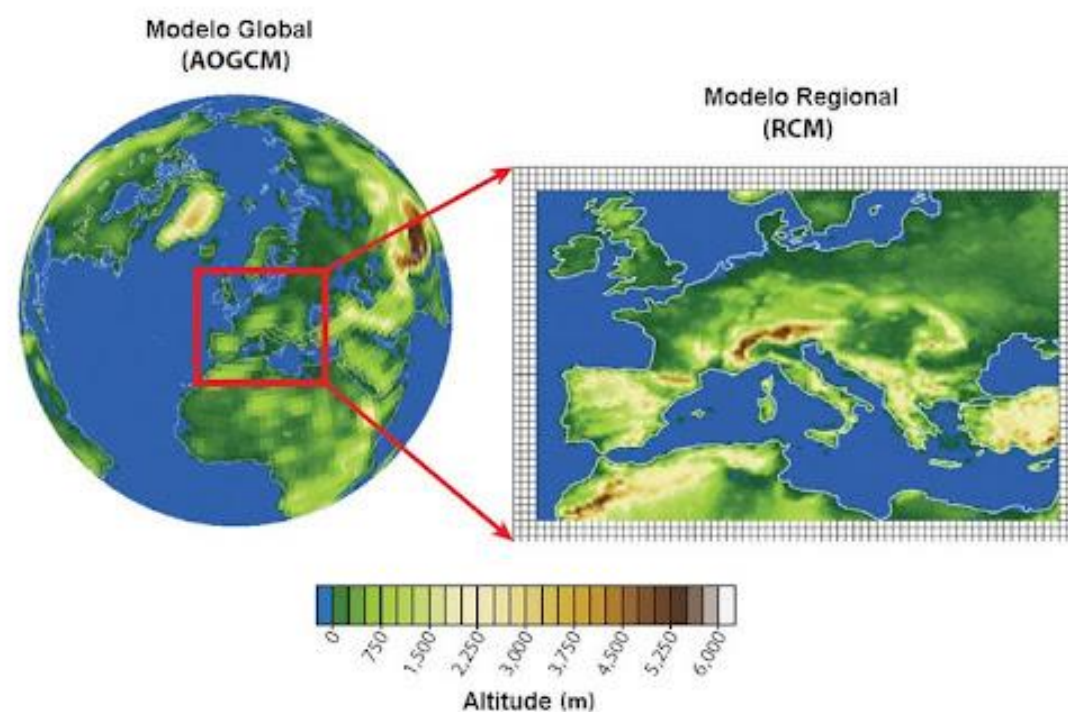


# Downscaling



Los GCM se ejecutan con una resolución espacial baja y esto no es suficiente para análisis regionales u otras aplicaciones. Para resolver este problema, se han desarrollado diferentes técnicas de downscaling (*reducir la escala espacial*):

## Downscaling dinámico



- GCM usados como condiciones iniciales y de contorno.
- Físicamente consistente, puesto que integran las ecuaciones primitivas.
- Gran coste computacional, por lo que para algunas regiones solo se dispone de datos limitados.

## Downscaling estadístico



Resolución: 30 segundos ( $\sim 1 \text{ km}^2$ )  
a 10 minutos ( $\sim 340 \text{ km}^2$ )

BIO1 = Annual Mean Temperature  
BIO2 = Mean Diurnal Range (Mean of monthly (max temp - min temp))  
BIO3 = Isothermality (BIO2/BIO7) ( $\times 100$ )  
BIO4 = Temperature Seasonality (standard deviation  $\times 100$ )  
BIO5 = Max Temperature of Warmest Month  
BIO6 = Min Temperature of Coldest Month  
BIO7 = Temperature Annual Range (BIO5-BIO6)  
BIO8 = Mean Temperature of Wettest Quarter  
BIO9 = Mean Temperature of Driest Quarter  
BIO10 = Mean Temperature of Warmest Quarter  
BIO11 = Mean Temperature of Coldest Quarter  
BIO12 = Annual Precipitation  
BIO13 = Precipitation of Wettest Month  
BIO14 = Precipitation of Driest Month  
BIO15 = Precipitation Seasonality (Coefficient of Variation)  
BIO16 = Precipitation of Wettest Quarter  
BIO17 = Precipitation of Driest Quarter  
BIO18 = Precipitation of Warmest Quarter  
BIO19 = Precipitation of Coldest Quarter

- Muchos métodos estadísticos disponibles.
- Necesario disponer de datos meteorológicos locales. Los resultados son mejores cuanto mayor es la calidad y la duración de las observaciones.
- Se determina una relación estadística entre los datos climáticos históricos observados y los resultados del modelo climático para el mismo período histórico. La relación se utiliza para desarrollar los datos climáticos futuros.
- Poco coste computacional, pero su calidad depende de la disponibilidad de datos. Además, no pueden ocurrir eventos extremos mayores que los conocidos.



# Simulaciones cambio climático



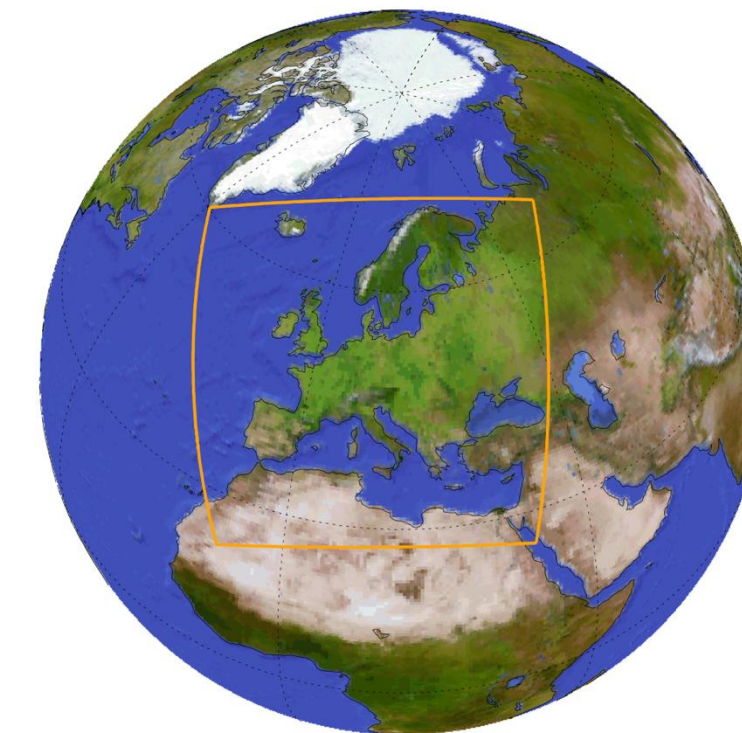
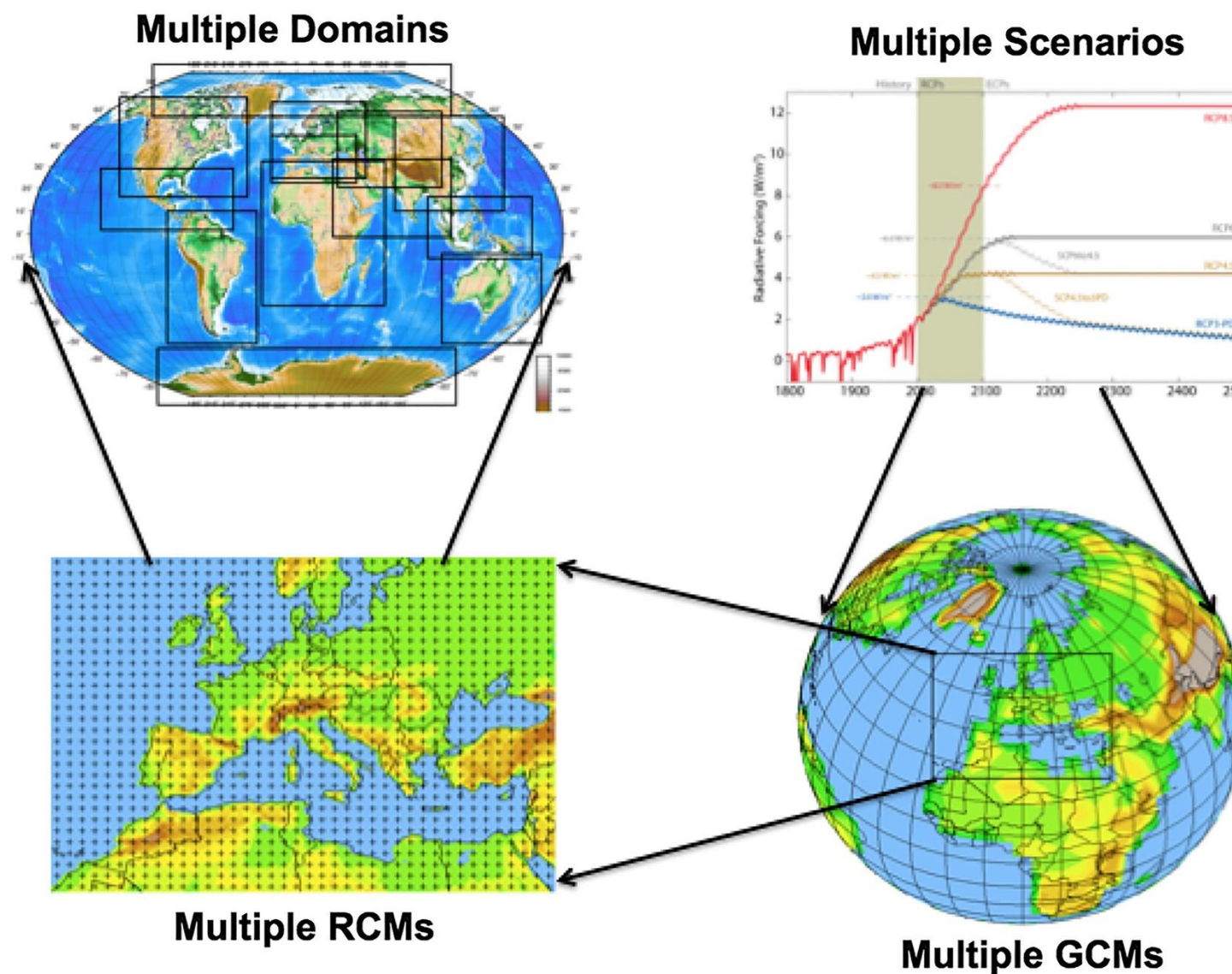
ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

50 URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
Biba Zientzia!  
Ciencia Viva

**CORDEX**

Coordinated Regional Climate  
Downscaling Experiment

## CORDEX Framework



### EURO-CORDEX

- Res. espacial:  $0.11^\circ$  (~12.5 km).
- Res. temporal: desde 1 h a mensual.
- Hist: 1951-2005.
- Future RCP2.6, RCP4.5 & RCP8.5: 2006-2095.

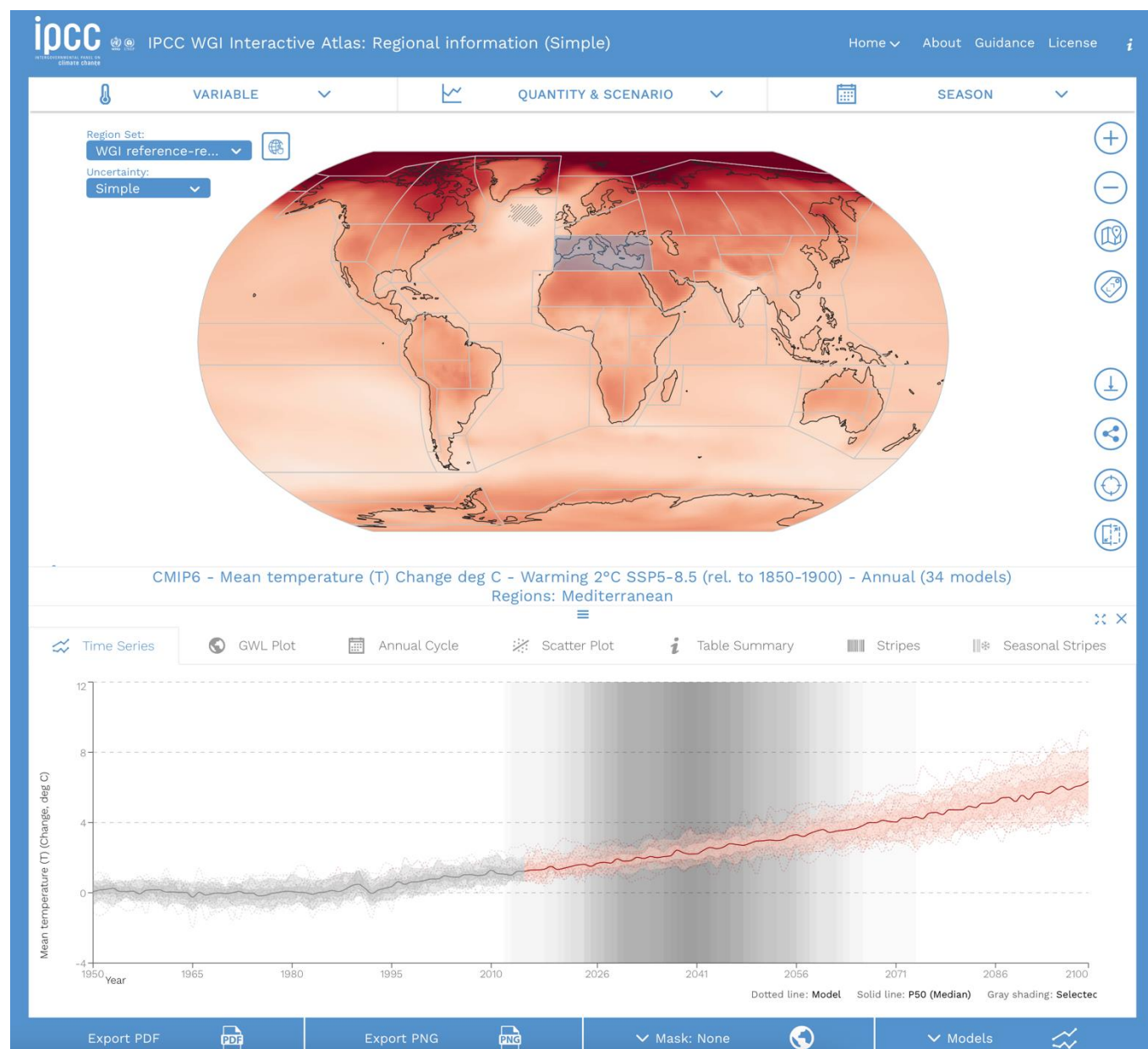


# Dónde obtener datos

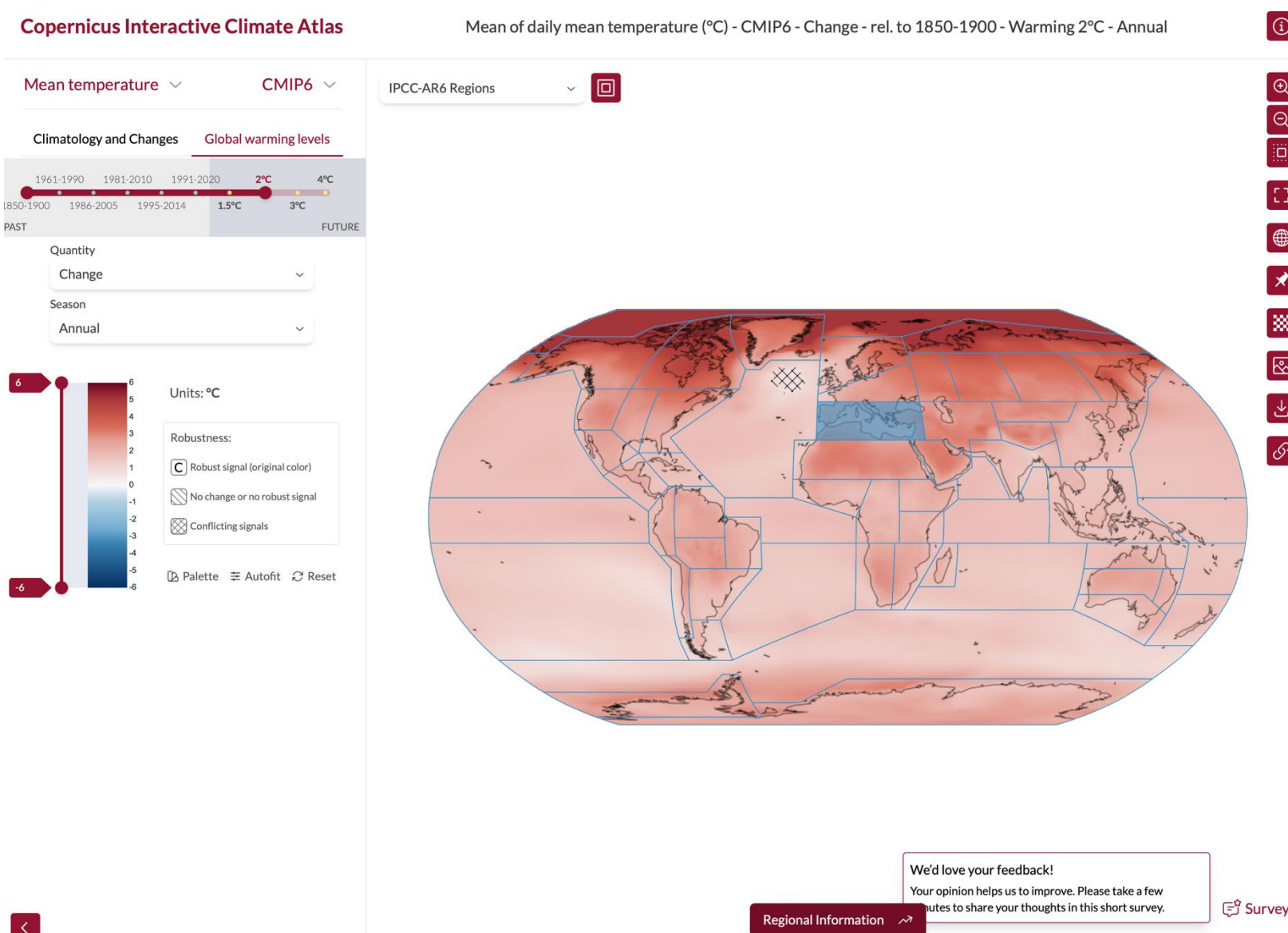


## Visores:

### IPCC WGI Interactive Atlas:



### Copernicus Interactive Climate Atlas:





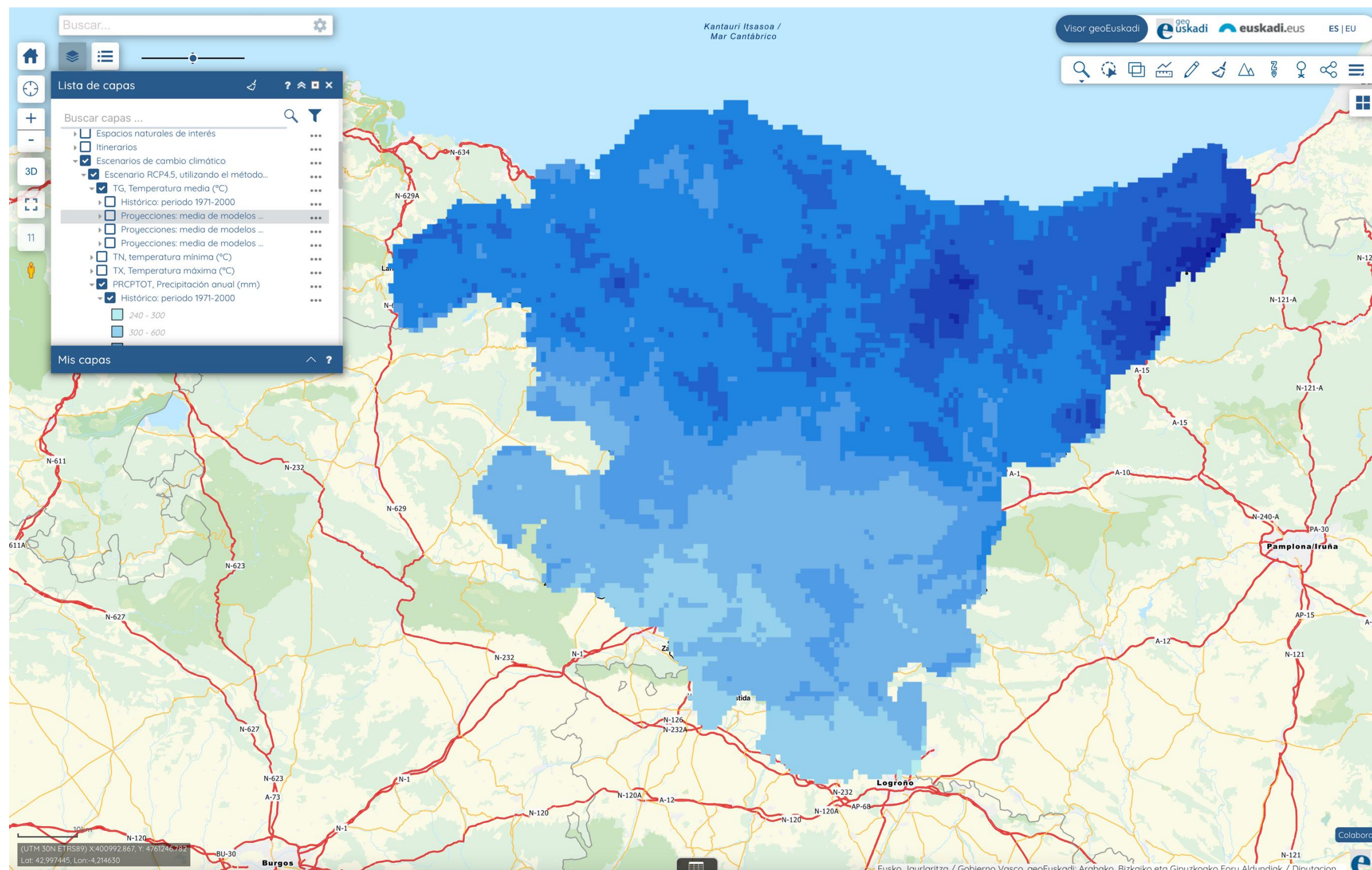
# Dónde obtener datos



ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

**50** URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
**Biba Zientzia!**  
Ciencia Viva

Visores:





- Bordoni *et al.* (2025): The futures of climate modeling. *npj Clim Atmos Sci* **8**, 99. <https://doi.org/10.1038/s41612-025-00955-8>
- Carvalho *et al.* (2021): Future surface temperature changes for the Iberian Peninsula according to EURO-CORDEX climate projections. *Clim Dyn* **56**, 123–138. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05472-3>
- Giorgi (2019). Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where are we going next? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124, 5696–5723. <https://doi.org/10.1029/2018JD030094>
- Tebaldi *et al.* (2021): Climate model projections from the Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) of CMIP6, *Earth Syst. Dynam.*, 12, 253–293, <https://doi.org/10.5194/esd-12-253-2021>
- IPCC (2021): *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, [10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896).
- IPCC AR6 (2023): *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, [10.59327/IPCC/AR6-9789291691647](https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647).



## *Gestión de riesgos y adaptación al cambio climático a nivel municipal: Vulnerabilidad hídrica*

***Modelos climáticos: entendiendo las proyecciones climáticas a futuro***

*¡Muchas gracias!*

***Santos J. González-Rojí***  
***Dept. Física, EHU***



Salon de actos de EUDEL  
Calle de Ercilla 13, Bilbao



11 y 12 de noviembre de 2025



ZIENTZIA  
ETA TEKNOLOGIA  
FAKULTATEA  
FACULTAD  
DE CIENCIA  
Y TECNOLOGÍA

**50** URTE  
AÑOS  
1968 - 2018  
**Biba Zientzia!**  
Ciencia Viva

