

# Modelos climáticos simples

---

MC 2024-II  
JLGF

# ¿Qué es un modelo climático simple?

---

- Son modelos que calculan promedios globales de forzamientos, concentraciones, retroalimentaciones y temperatura.
- La simpleza es algo relativo, incluso un modelo que sólo resuelva un par de ecuaciones diferenciales puede requerir muchos parámetros y se puede volver técnicamente complicado de utilizar.
- Son los modelos de menor complejidad, por lo general sólo tienen la dimensión del tiempo, y calculan todo como promedios globales.
- Recaen fuertemente en parametrizaciones, la cuáles tienen que ser tuneadas para diferentes propósitos.

# Un modelo simple tiene ventajas

---

- Es más fácil de interpretar.
  - Los modelos complejos son más difíciles de entender porque tienen tantos procesos que no sabemos qué causa un resultado con mucha precisión.
  - Un modelo simple puede tener entre 100 y 1000 líneas de código pero un modelo complejo puede tener millones de líneas de código.
- Son más rápidos y menos costosos
  - Correr un modelo complejo toma mucho tiempo y ese tiempo computacional cuesta dinero. A veces.
  - Un modelo simple se puede resolver en cuestión de segundos y obtener un resultado.
- Se pueden hacer más experimentos
  - Por las dos razones anteriores un modelo simple permite hacer más experimentos y entender mejor los parámetros del modelo

# Modelos simples de cubeta

---

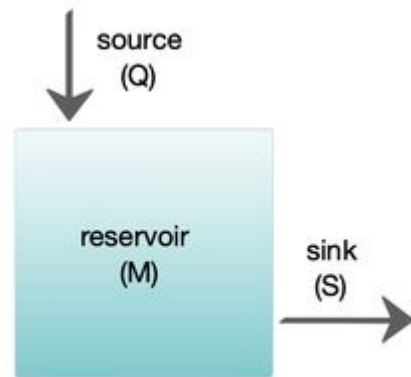
Modelos de cubeta de concentraciones de gases.

La emisión (fuente) aumenta la concentración de gases y luego los sumideros (sink) se deshacen de esa concentración.

Algunos sumideros pueden ser simplemente el intercambio de gases entre la atmósfera y el océano o el decaimiento de la concentración por algunos procesos químicos en la atmósfera.

Las fuentes también pueden ser naturales o antropogénicas.

Al final, lo más importante es calcular el forzamiento radiativo a partir de la concentración de gases, insolación, etc.



# Forzamientos climáticos y la sensibilidad del clima

# Forzamientos

---

- Forzamiento radiativo: cambio en el balance energético atmosférico. Es la diferencia entre la energía entrante y la energía saliente del sistema climático.
- El forzamiento perturba el sistema climático.
- Conlleva un cambio en la temperatura hasta que el sistema logra cancelar el forzamiento.
- Las retroalimentaciones son el mecanismo de equilibrio del sistema climático.

# El sistema ya no está en balance

La Tierra se encuentra fuera de balance radiativo desde hace décadas.

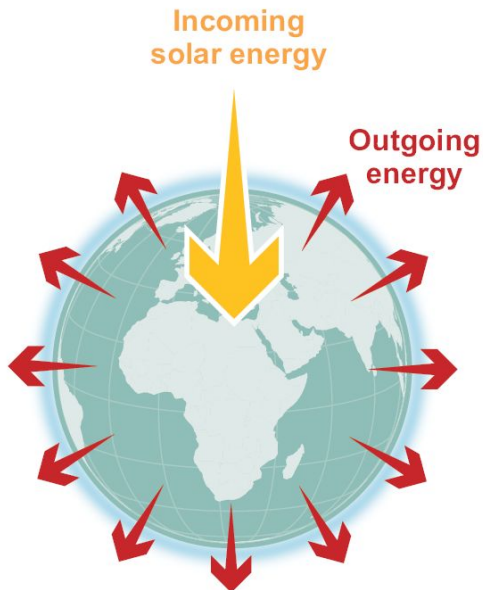
Entra más energía de la que sale.

¿A dónde va esa energía?

## FAQ 7.1: The Earth's energy budget and climate change

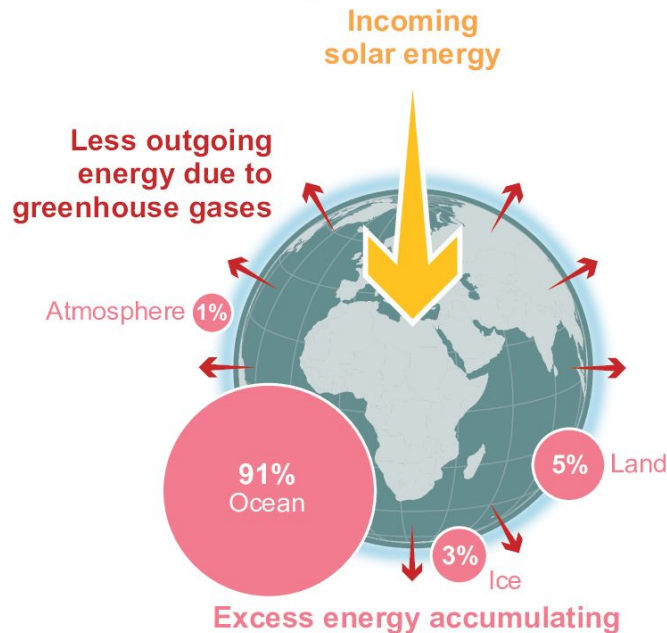
Since at least 1970, there has been a persistent imbalance in the energy flows that has led to **excess energy being absorbed by different components of the climate system**.

### Stable climate: in balance



IPCC, AR6.

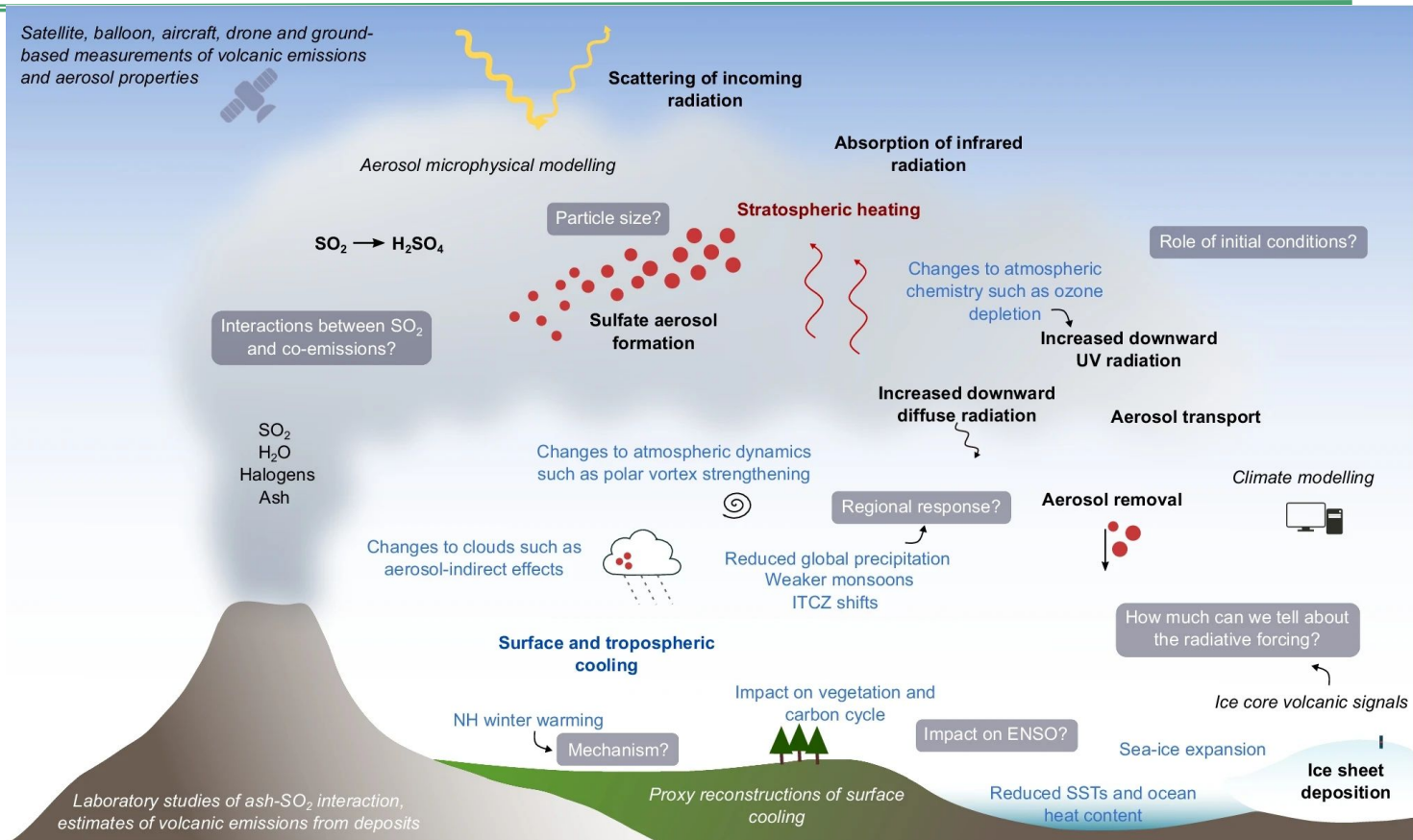
### Today: imbalanced



# Ejemplos de forzamiento

## Volcanismo

- Forzamiento negativo.
- Calienta la estratosfera
- Enfría la superficie y la troposfera
- Reduce la precipitación global.



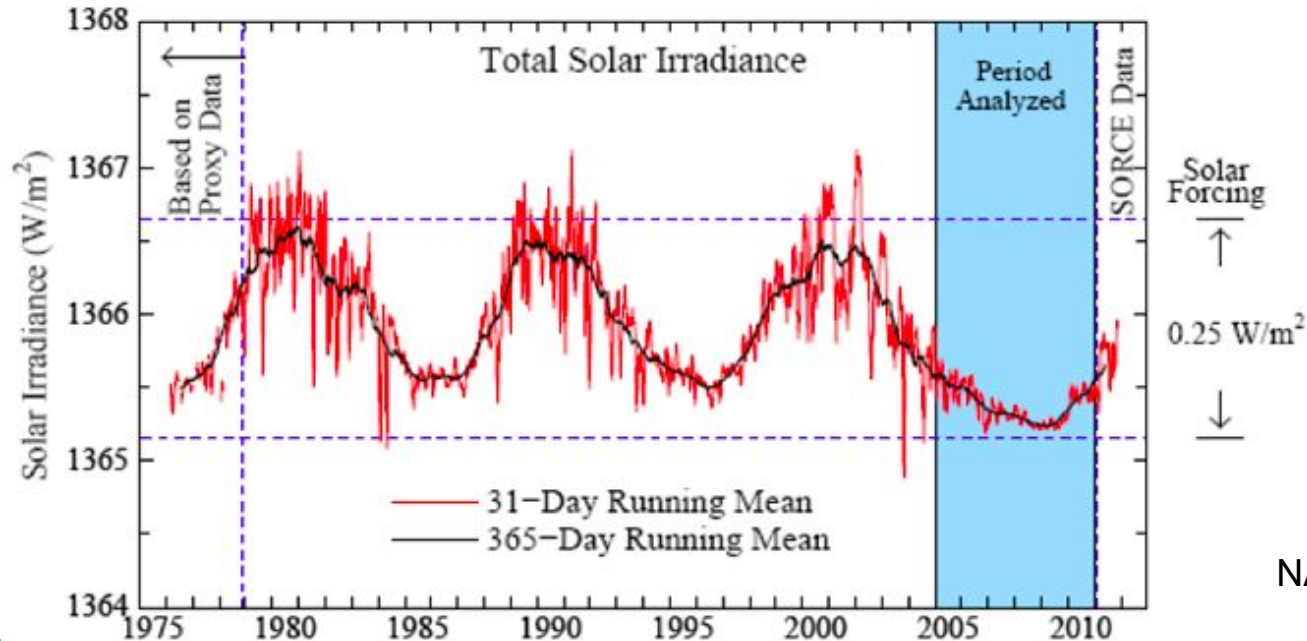


# Ejemplos de forzamiento

- Solar.

- Ciclo de 11 años del Sol
- Manchas solares.

El ciclo de 11 años del Sol tiene un forzamiento de  $0.25 \text{ W/m}^2$



NASA GISS

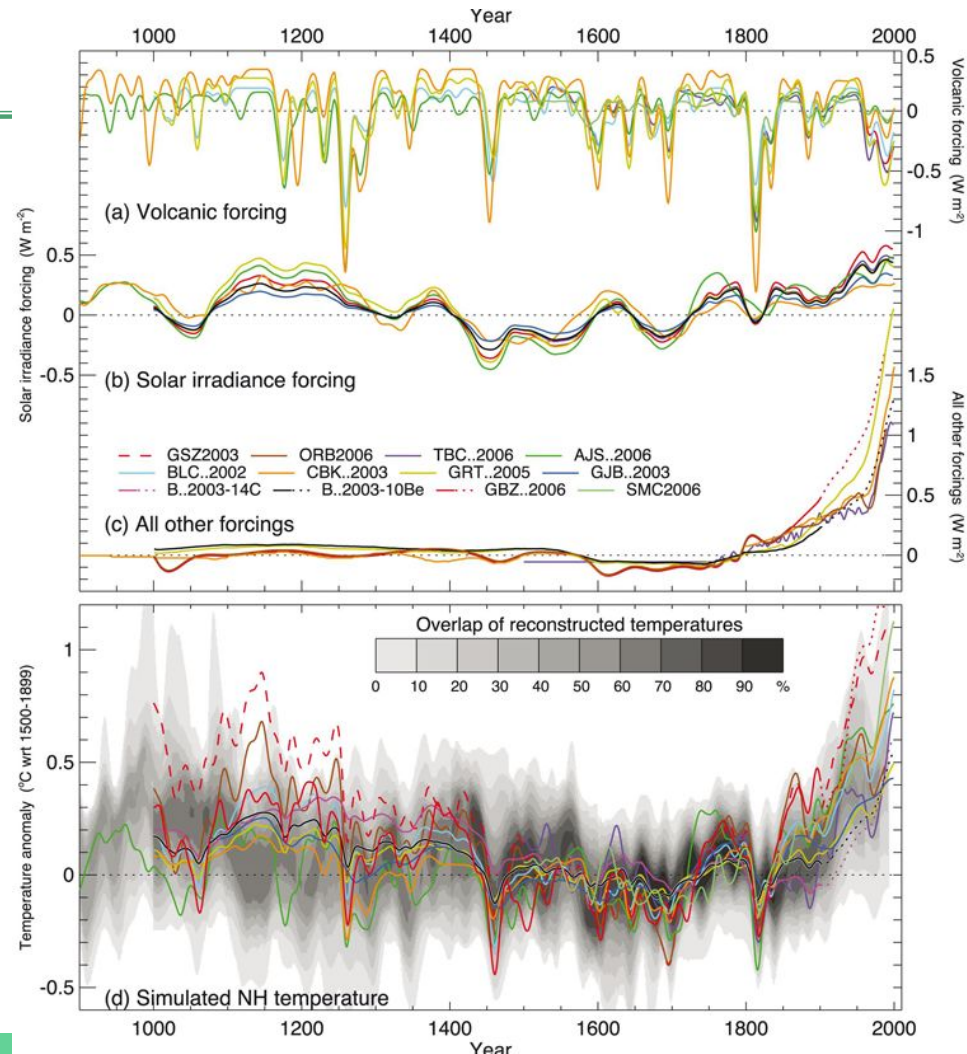
# Forzamiento solar y volcánico

El forzamiento solar y volcánico causaron los cambios relativamente lentos y pequeños del clima de los últimos miles de años.

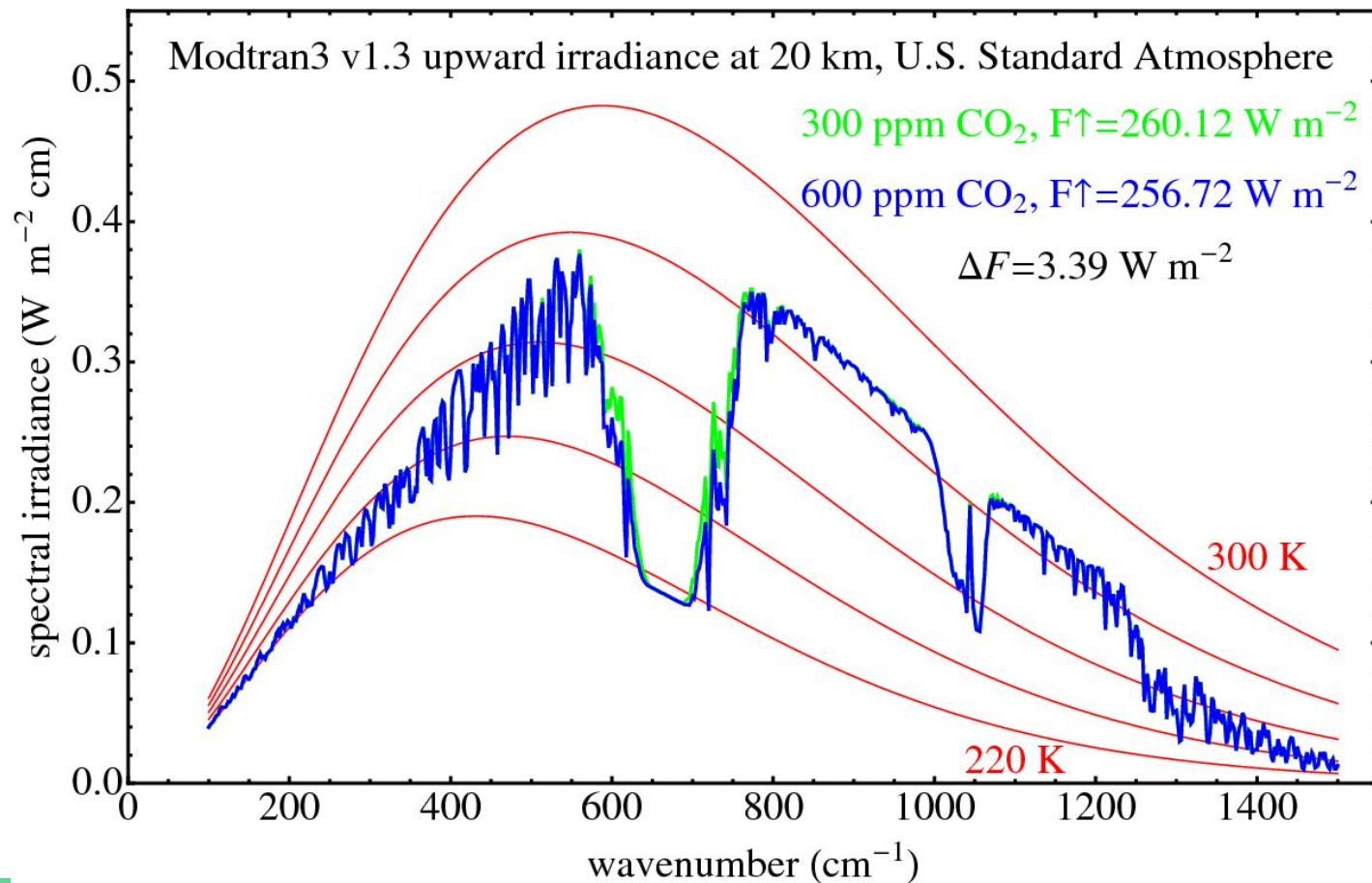
El sol enfría o calienta dependiendo su variación pero el volcanismo enfría la superficie.

Una erupción fuerte puede llegar a tener un forzamiento de  $-1.2 \text{ W m}^{-2}$

*Jansen et al., 2007*



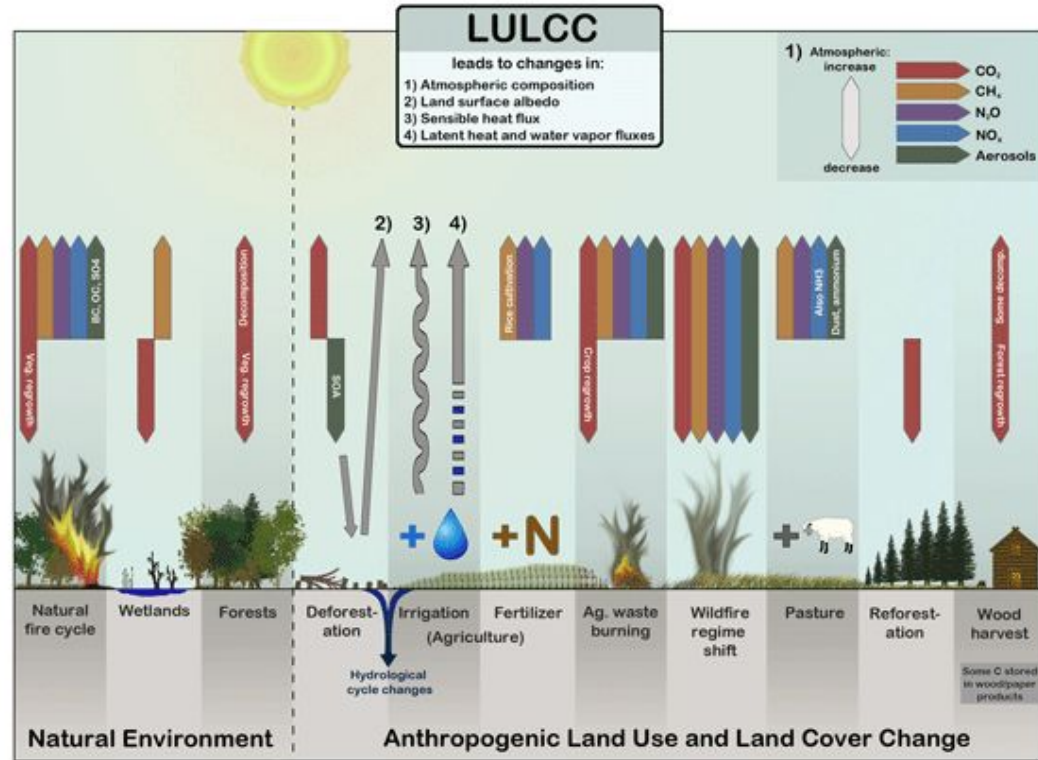
# Forzamientos por CO<sub>2</sub>



La densidad de radiación saliente a 20 km de altura disminuye cuando se duplica la concentración de dióxido de carbono y el flujo total de energía disminuye  $4 \text{ W m}^{-2}$

# Cambio de uso de suelo

- Modifica el albedo
- Modifica el balance energético en superficie.
- Modifica la composición atmosférica.
  - Deforestación.
  - Incendios.
  - Capacidad de captura de  $\text{CO}_2$
- Forzamiento entre 1 y 2  $\text{W/m}^2$  para fines de siglo

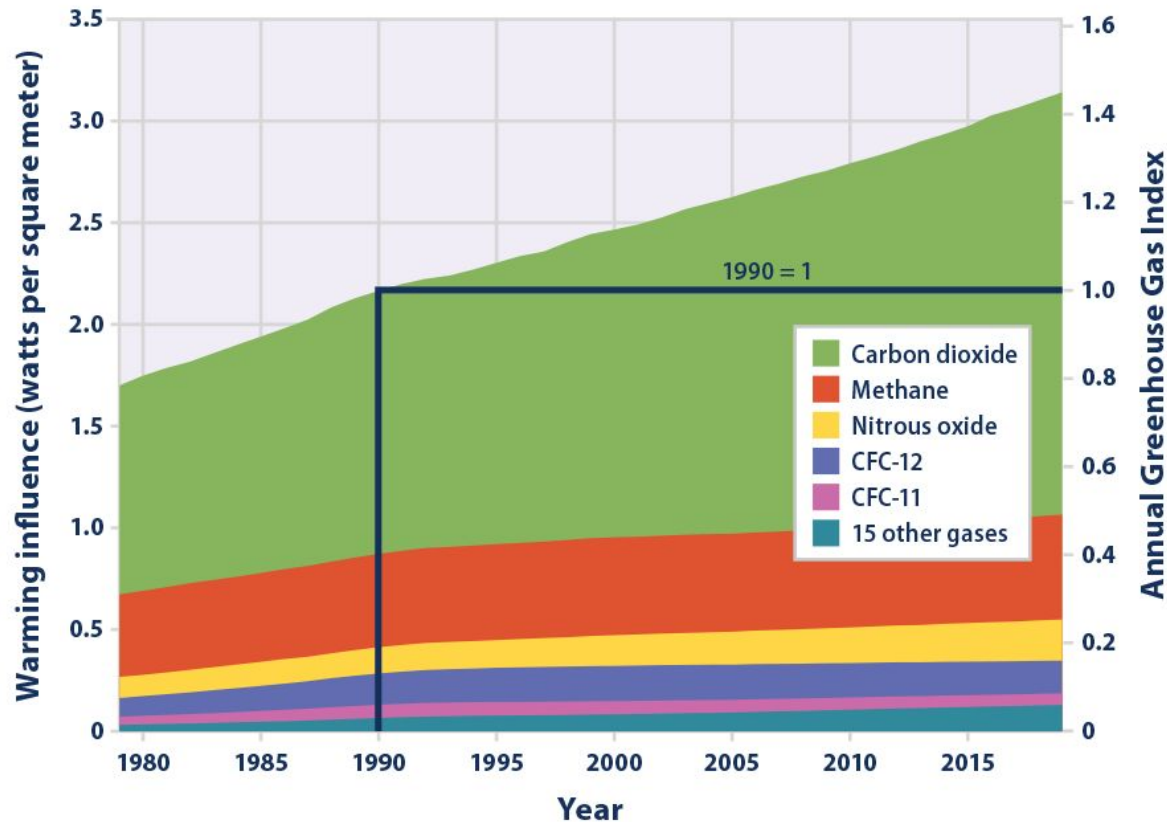


# Forzamiento radiativo por GEI

Forzamiento radiativo  
acumulado para cada gas

Índice anual de GEI.

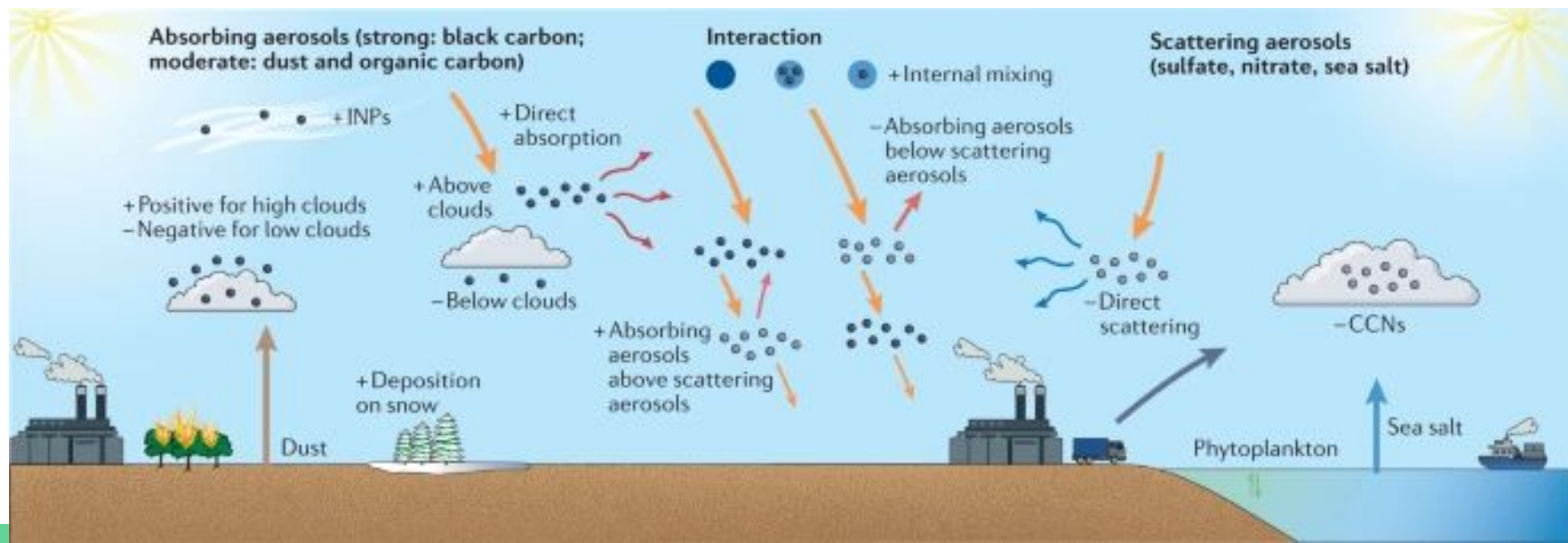
El forzamiento por CO<sub>2</sub> sigue  
aumentando.





# Forzamiento por aerosoles

La emisión de aerosoles, natural y antropogénica tiene efectos directos e indirectos sobre los flujos radiativos, el perfil vertical de temperatura y además, interactúa con otros procesos como las nubes y la precipitación. La actividad humana ha modificado las características de los aerosoles, y por lo tanto, ha tenido un efecto climático antropogénico.

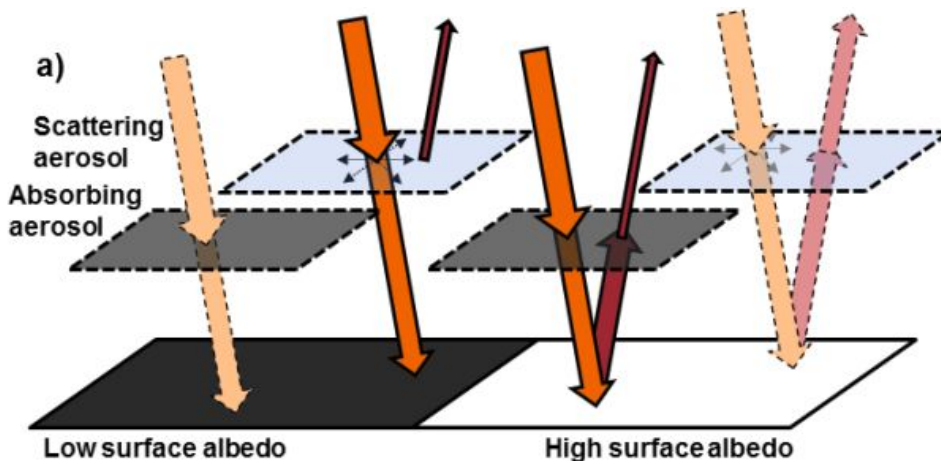


# El efecto directo de los aerosoles

En condiciones libres de nubes, la absorción y esparcimiento de luz solar por parte de los aerosoles es un factor adicional al del albedo superficial.

En una superficie con alto albedo, el impacto total de los aerosoles es menor que para una superficie con bajo albedo.

Por lo tanto, no sólo importa que haya aerosoles **sino dónde**.



# El tipo de aerosoles también importa

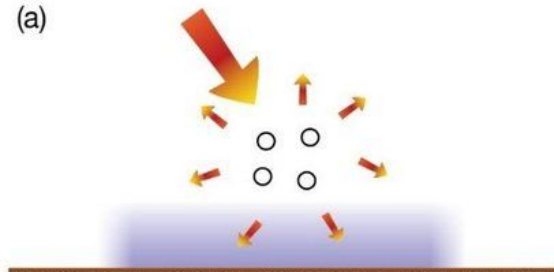
La mayoría de los aerosoles tiene un fuerte efecto de dispersión, cambio en la dirección, en onda corta.

Pero algunos otros, como el carbono negro, también absorbe la radiación calentando la capa para después distribuir el calor al resto de la atmósfera.

## Aerosol-radiation interactions

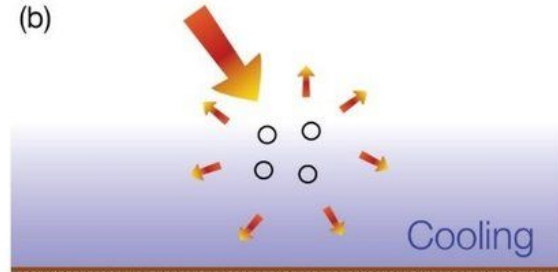
### Scattering aerosols

(a)



Aerosols scatter solar radiation. Less solar radiation reaches the surface, which leads to a localised cooling.

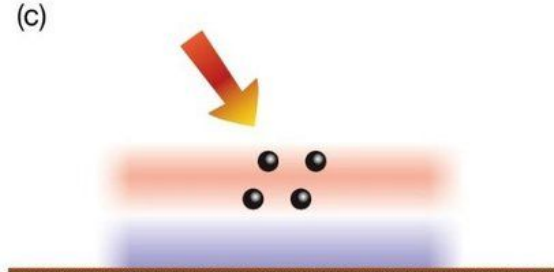
(b)



The atmospheric circulation and mixing processes spread the cooling regionally and in the vertical.

### Absorbing aerosols

(c)



Aerosols absorb solar radiation. This heats the aerosol layer but the surface, which receives less solar radiation, can cool locally.

(d)



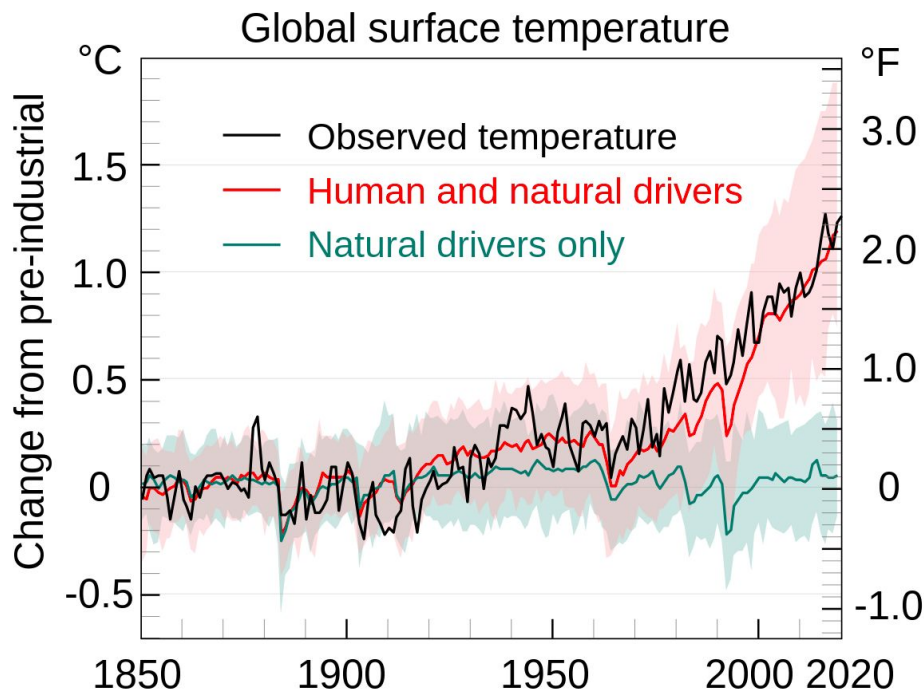
At the larger scale there is a net warming of the surface and atmosphere because the atmospheric circulation and mixing processes redistribute the thermal energy.



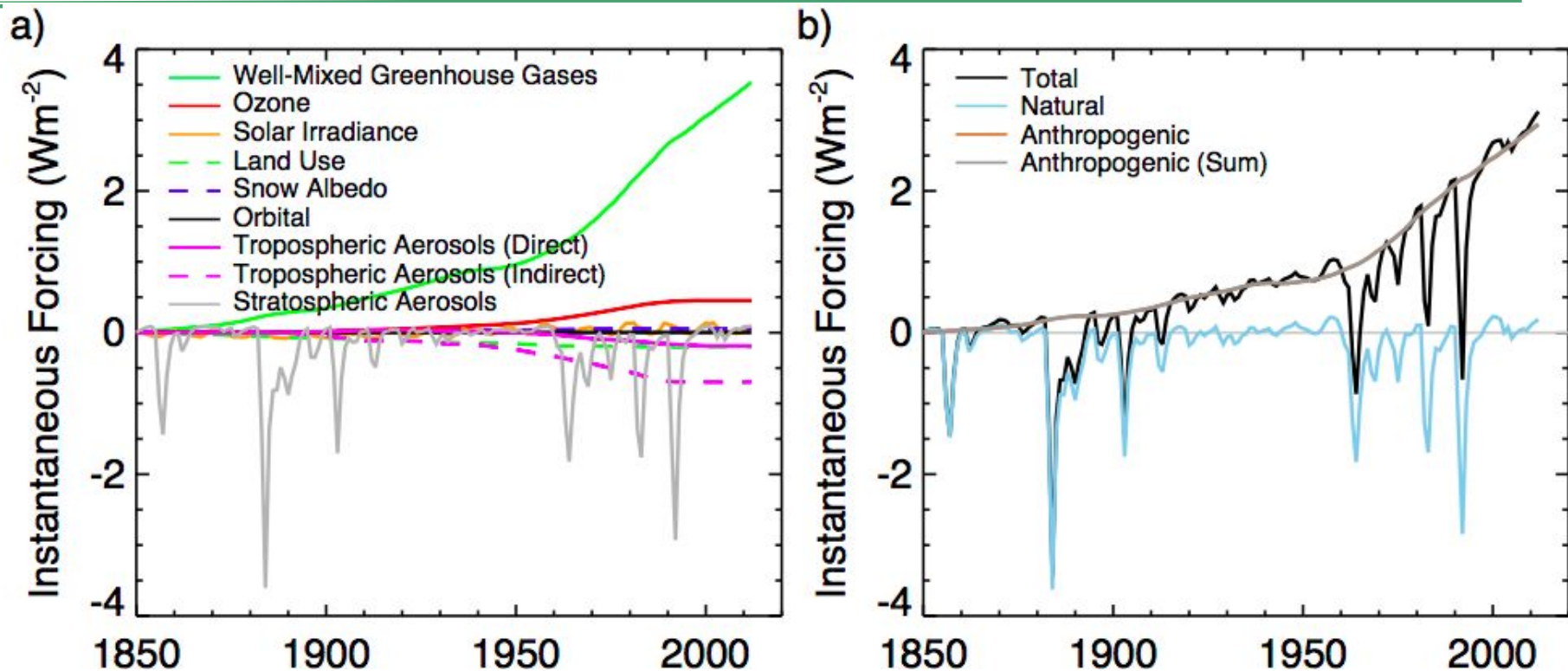
# Forzamientos antropogénicos

- Emisión de GEI -> forzamiento positivo
- Emisión de aerosoles -> forzamiento negativo
- Cambio de uso de suelo -?

Serie de tiempo de la temperatura promedio global. La tendencia se debe a causantes antropogénicos mientras que los forzamientos naturales explican la variabilidad alrededor de la tendencia.

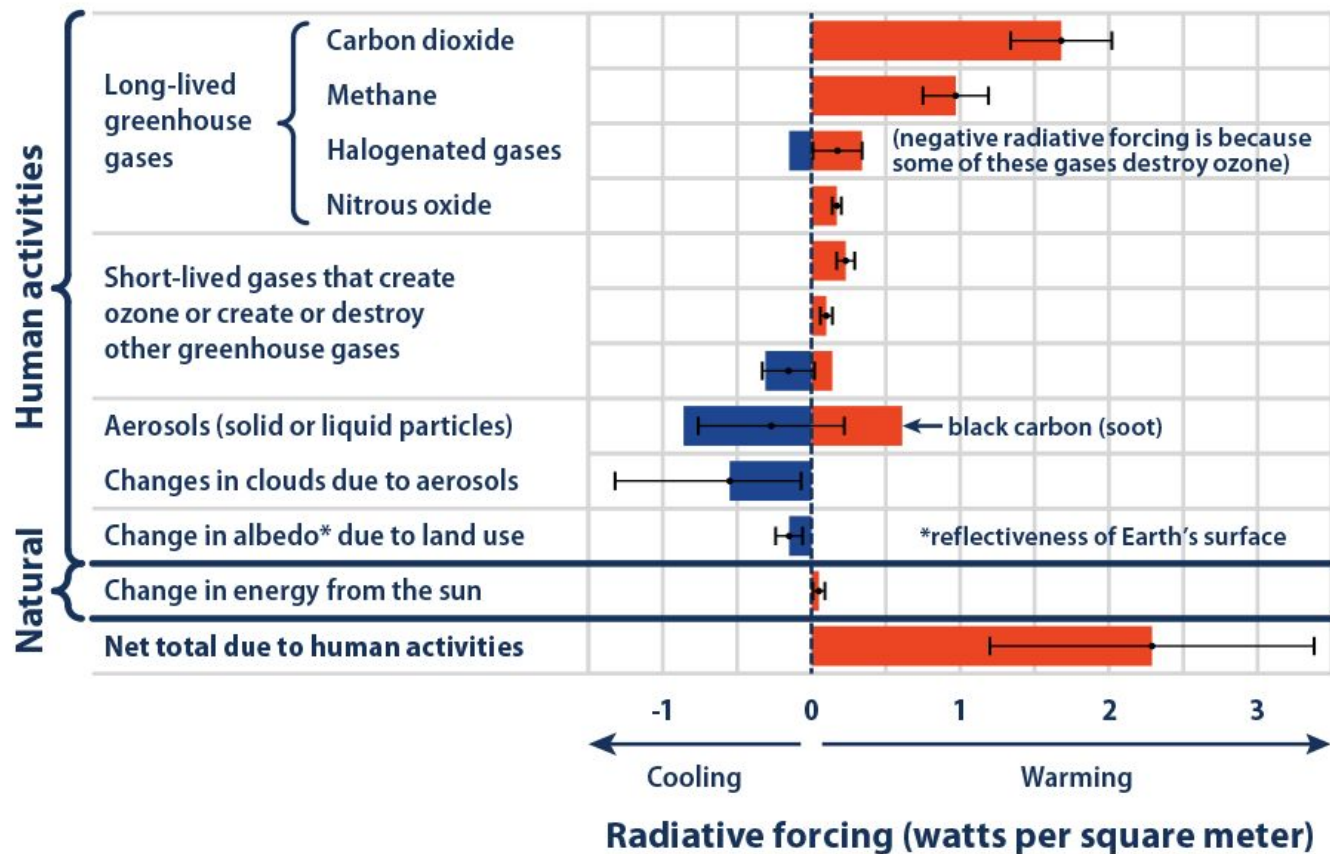


# Forzamientos utilizados por un modelo climático



La serie de tiempo de forzamiento radiativo que es incluida en los modelos de clima actuales. Indica la importancia relativa de factores naturales y antropogénicos en el desbalance radiativo en el tope de la atmósfera.

# Total de forzamiento radiativo



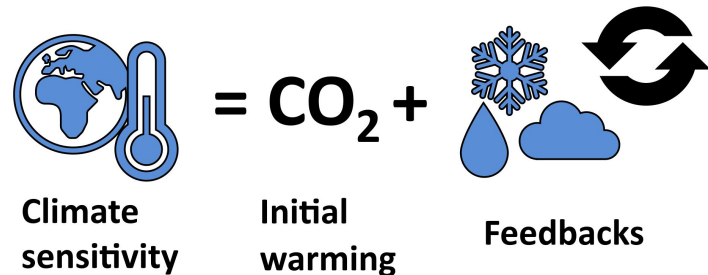
EPA

De 1750 a 2020,  
el forzamiento  
radiativo  
acumulado es de  
 $F=2.17 \text{ W m}^{-2}$

# La sensibilidad del clima

- Dado un forzamiento climático, ¿cuánto cambia la temperatura?
- Un proceso que cambia la sensibilidad del clima es un proceso de retroalimentación.
- Si conocemos la sensibilidad del clima, entonces podemos estimar el cambio de la temperatura media (T) global esperado dado un forzamiento (F).

$$\lambda \equiv \frac{\partial T^*}{\partial F},$$



# Equilibrium climate sensitivity (ECS)

---

Aumento de temperatura del planeta si *duplicamos la concentración de  $\text{CO}_2$*

Si duplicamos la concentración en este momento, el planeta se calentaría por cientos de años hasta que llegaría a una nueva temperatura de equilibrio.

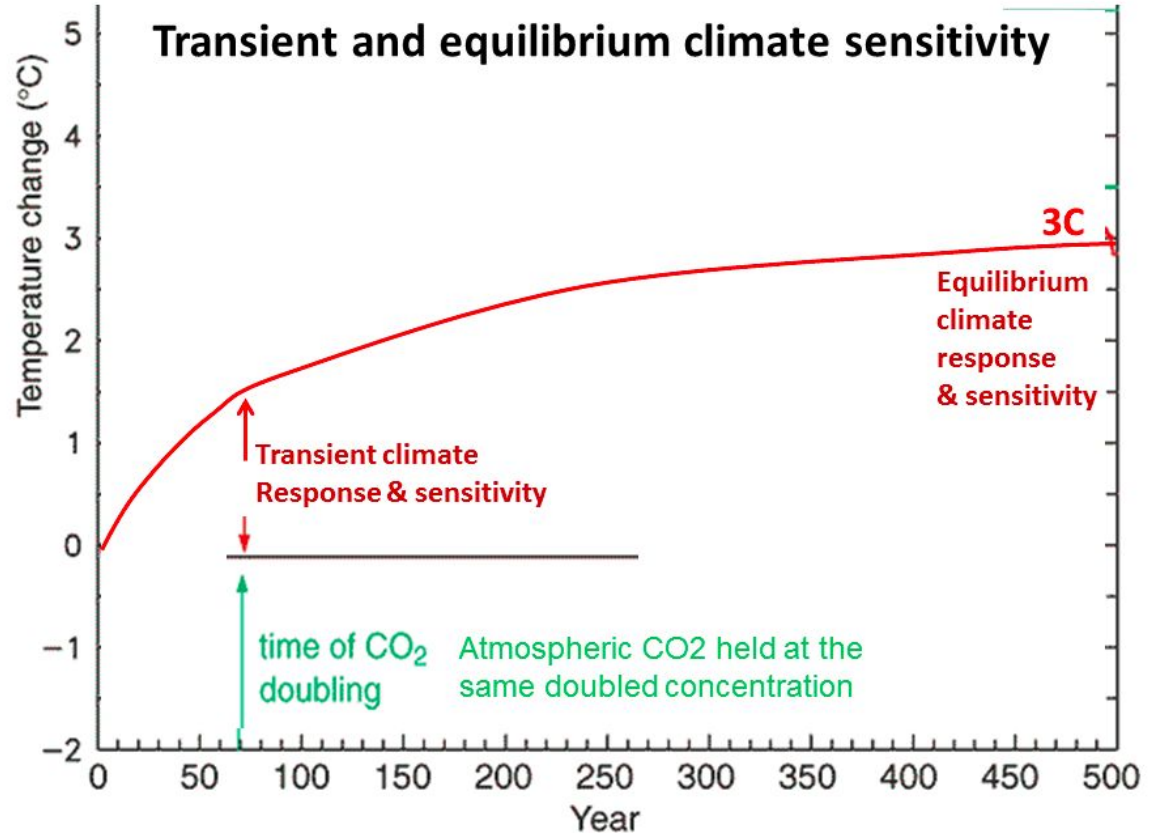
Esta temperatura en el *nuevo equilibrio* es la definición más utilizada de sensibilidad del clima.

Dada esta definición ¿una sensibilidad del clima alta es buena noticia?

# Esta sensibilidad se mide utilizando modelos de clima

Es la respuesta una vez que el sistema vuelve a estar en equilibrio.

El cambio de temperatura mientras el sistema sigue en desbalance radiativo, es la **respuesta climática transitoria**.



# ERF (Forzamiento radiativo efectivo)

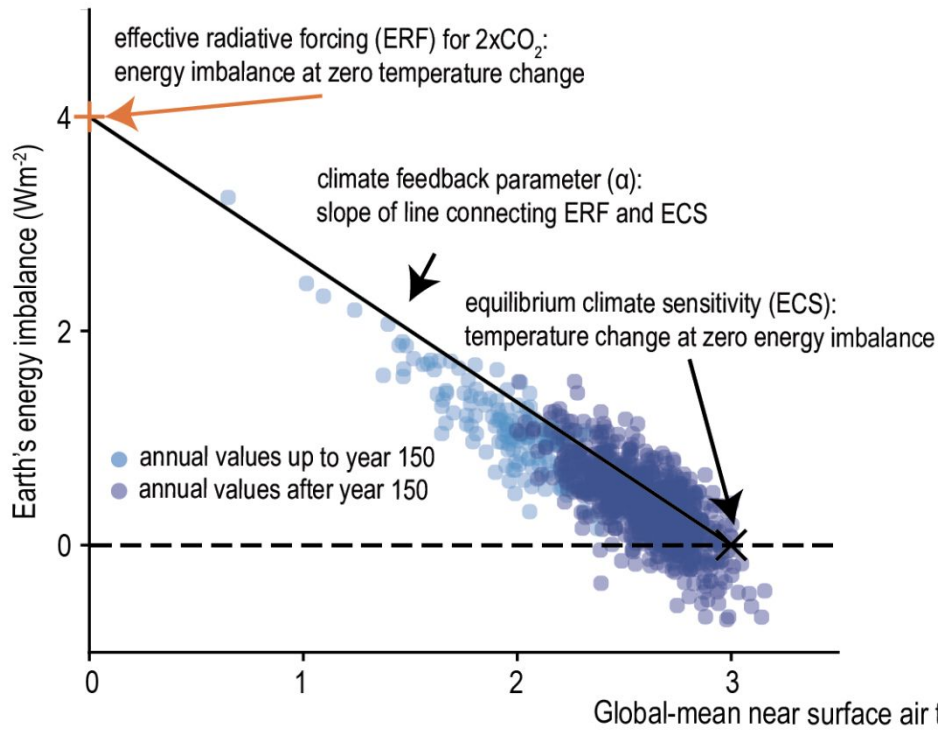
---

El forzamiento radiativo efectivo mide el cambio en el balance de energía total en el tope de la atmósfera (TOA) como resultado del cambio en el flujo energético del sistema terrestre debido a una **perturbación**.

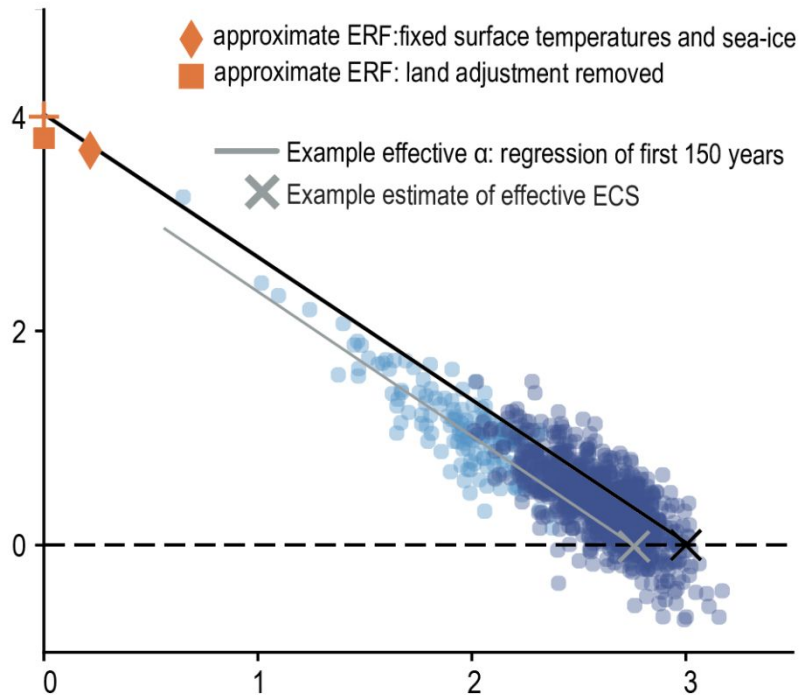
El ERF se expresa como un cambio en el flujo radiativo neto (hacia abajo) en el tope de la atmósfera después de los ajustes rápidos en los componentes climáticos como las nubes y el albedo. Es el forzamiento cuando todavía no cambia la temperatura como resultado de la perturbación.

# Definiciones importantes

(a) Definitions based on idealised  $2\times\text{CO}_2$  response



(b) Approximate estimates based on models or other analyses





# Escenarios SSP

# Escenarios

---

Líneas temporales plausibles que podrían suceder en el futuro dado una narrativa de política y economía ambiental establecida. No son predicciones del futuro.

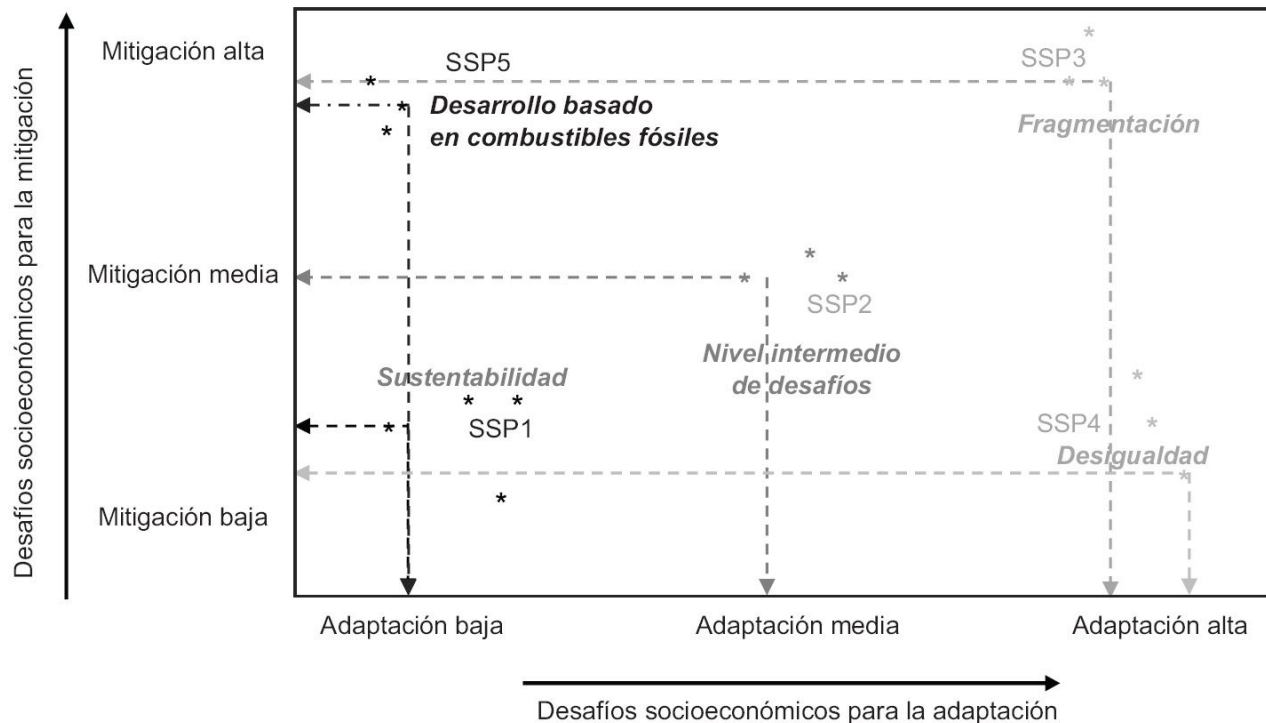
Descripciones consistentes y coherentes de caminos (pathways) en términos de emisiones, captura de carbono, y economía general.

Las trayectorias socioeconómicas compartidas (SSPs, por sus siglas en inglés son la versión más reciente de estos escenarios). Las cinco narrativas se establecen en función de la mitigación y emisión de GEIs y aerosoles.

[Explainer: How 'Shared Socioeconomic Pathways' explore future climate change - Carbon Brief](#)

# SSPs

- Educación
- Desarrollo Tecnológico
- Comercio
- Cambio de uso de suelo
- Política ambiental global



Escoto-Castillo y colaboradores (2017):

[https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0186-72102017000300669](https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0186-72102017000300669)

# El modelo FAIR

# Modelo Fair

---

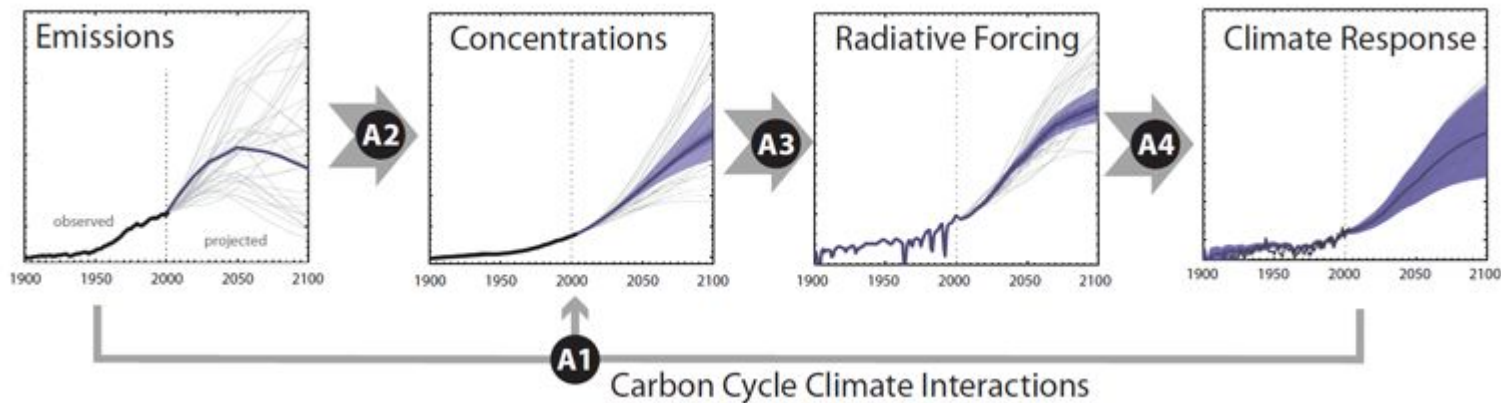
- Modelo de impulso respuesta de amplitud finita (Finite amplitude Impulse Response= FaIR).
- Modelo de complejidad mínima.
- Consta de 6 ecuaciones. Todas son **parametrizaciones** del ciclo del gas, y cómo las concentraciones afectan al forzamiento radiativo.
- Puede replicar la temperatura observada en los últimos años si le damos los forzamientos correctos.
- El ciclo de carbono es función del clima promedio para cada paso de tiempo.
- Fácil de correr y amigable para cualquier usuario.

[FaIR](#) descripción completa

# Los 4 pasos del modelo

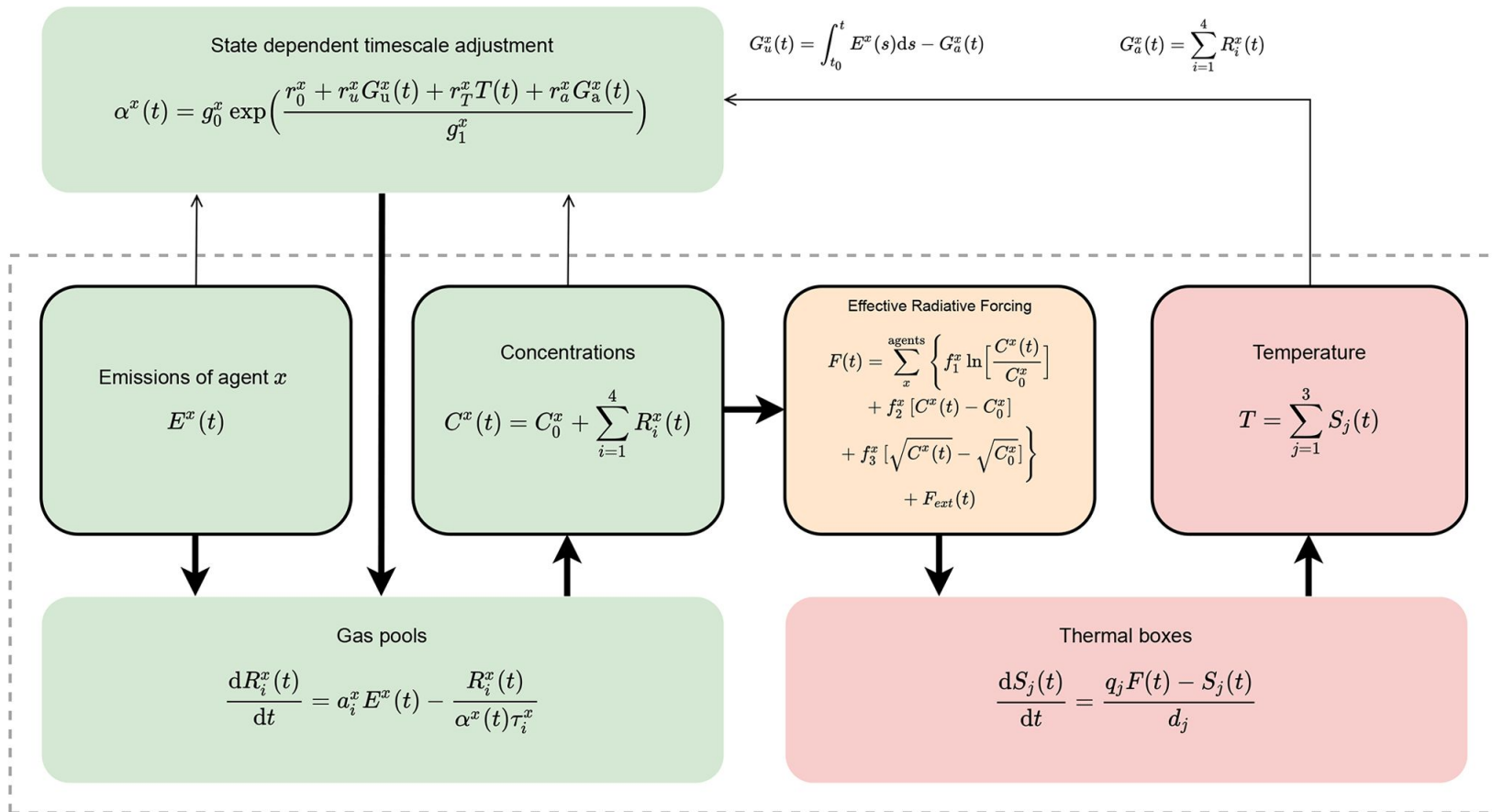
Las emisiones modifican las concentraciones según una serie de parametrizaciones que simulan la físico-química de los gases y partículas.

Luego los cambios en las concentraciones generan un forzamiento que a su vez generará una respuesta climática.



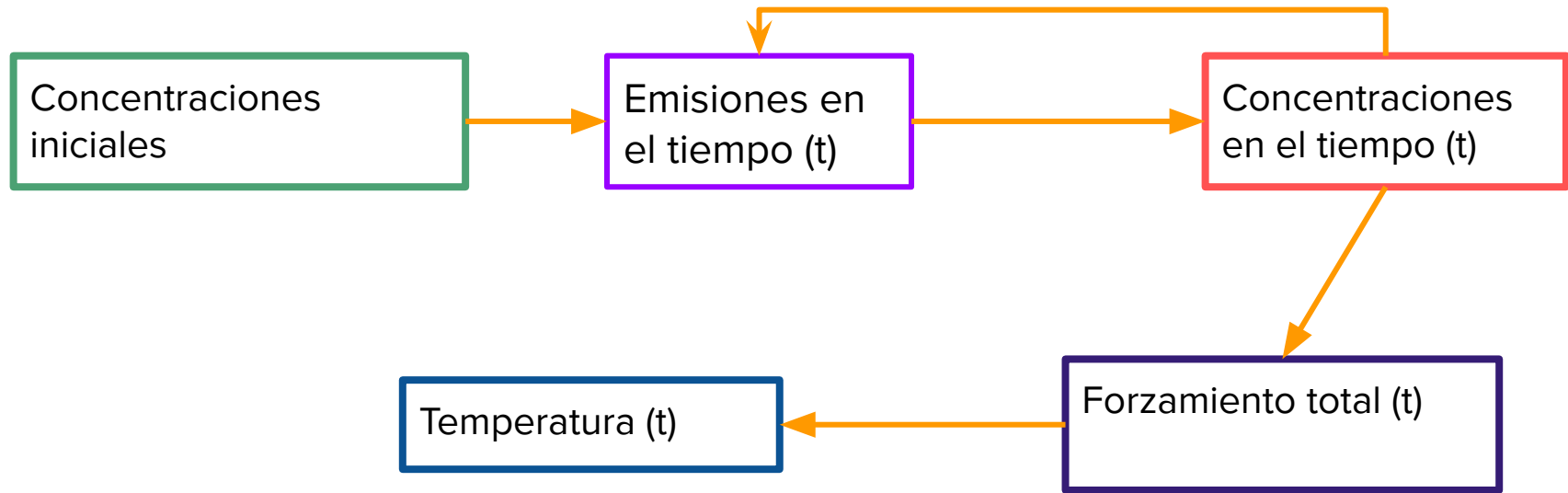
# ¿Cómo funciona el modelo?

Gas  
Forzamiento  
Temperatura



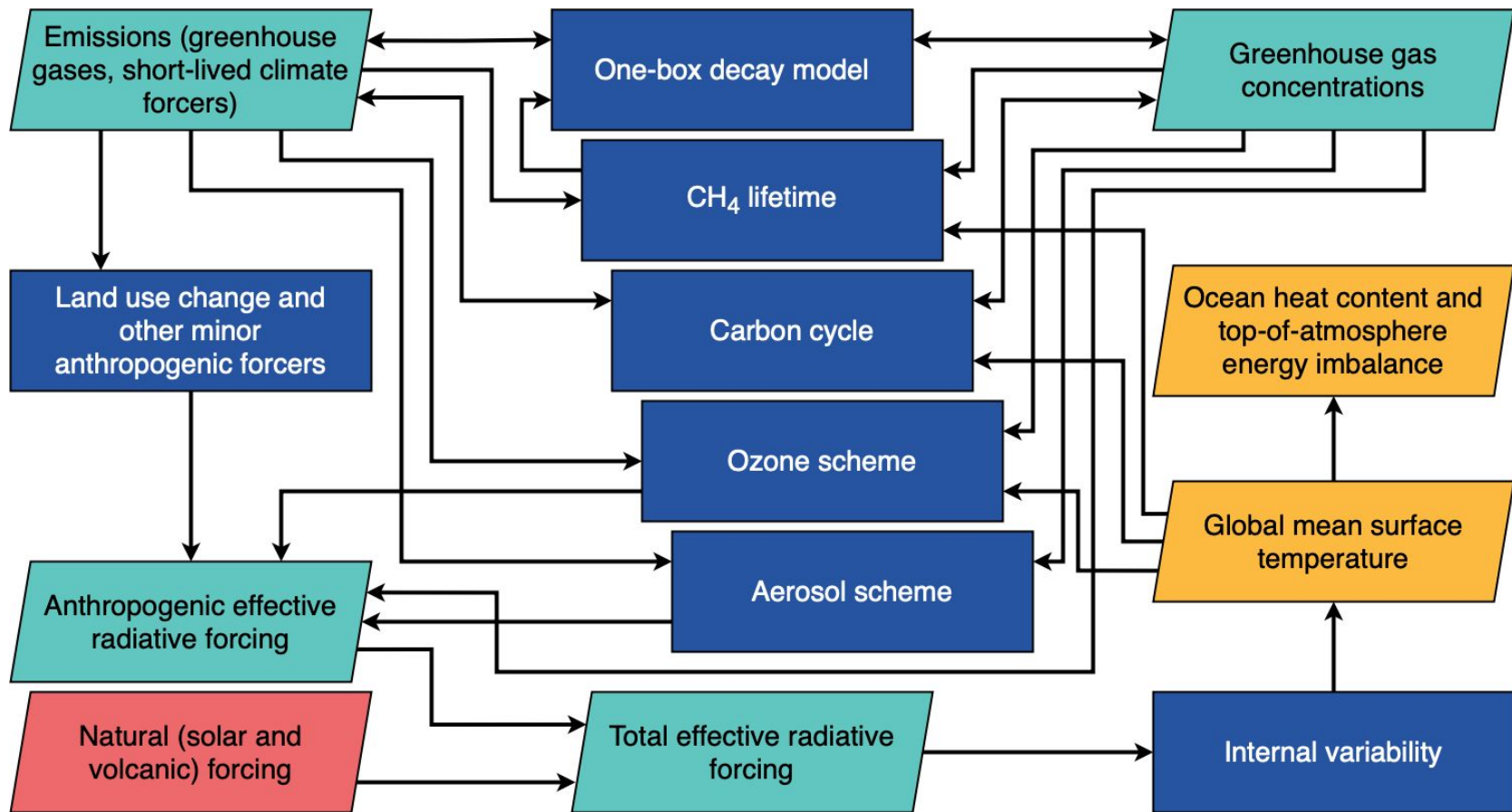
# ¿Y en español?

---





# Versión más completa



# Ecuaciones platicadas ¿qué hace el modelo?

---

Simula la existencia de reservorios y procesos de sumidero para diferentes gases.

Calcula una función de sumideros para cada gas que depende del estado del sistema (T, concentración) para cada gas.

Calcula las concentraciones como una suma de la nueva carga (emisión-sumidero) más la concentración pre-industrial

La parametrización más compleja es para el CO<sub>2</sub>, ya que sus sumideros tienen varias interacciones no-lineales (4 reservorios). Otros gases sólo tienen 1 reservorio.

Fórmula que relaciona las concentraciones con el forzamiento radiativo.

El forzamiento radiativo lleva a la temperatura superficial y la temperatura a otras variables de salida.

# Elementos del modelo (elementos de entrada)

---

## Concentraciones y/o emisiones de:

- Aerosoles
- Gases halogenados
- Metano
- Dióxido de carbono
- Ozono
- Vapor de agua estratosférico
- Carbono negro
- Cambio de uso de suelo

# Forzamientos

---

## Natural

- Solar
- Volcánico

## Antropogénico

- GEIs (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>)
- Aerosoles
- Cambio de uso de suelo
- Ozono
- Interacción aerosol-nube

# Elementos del modelo (elementos de salida)

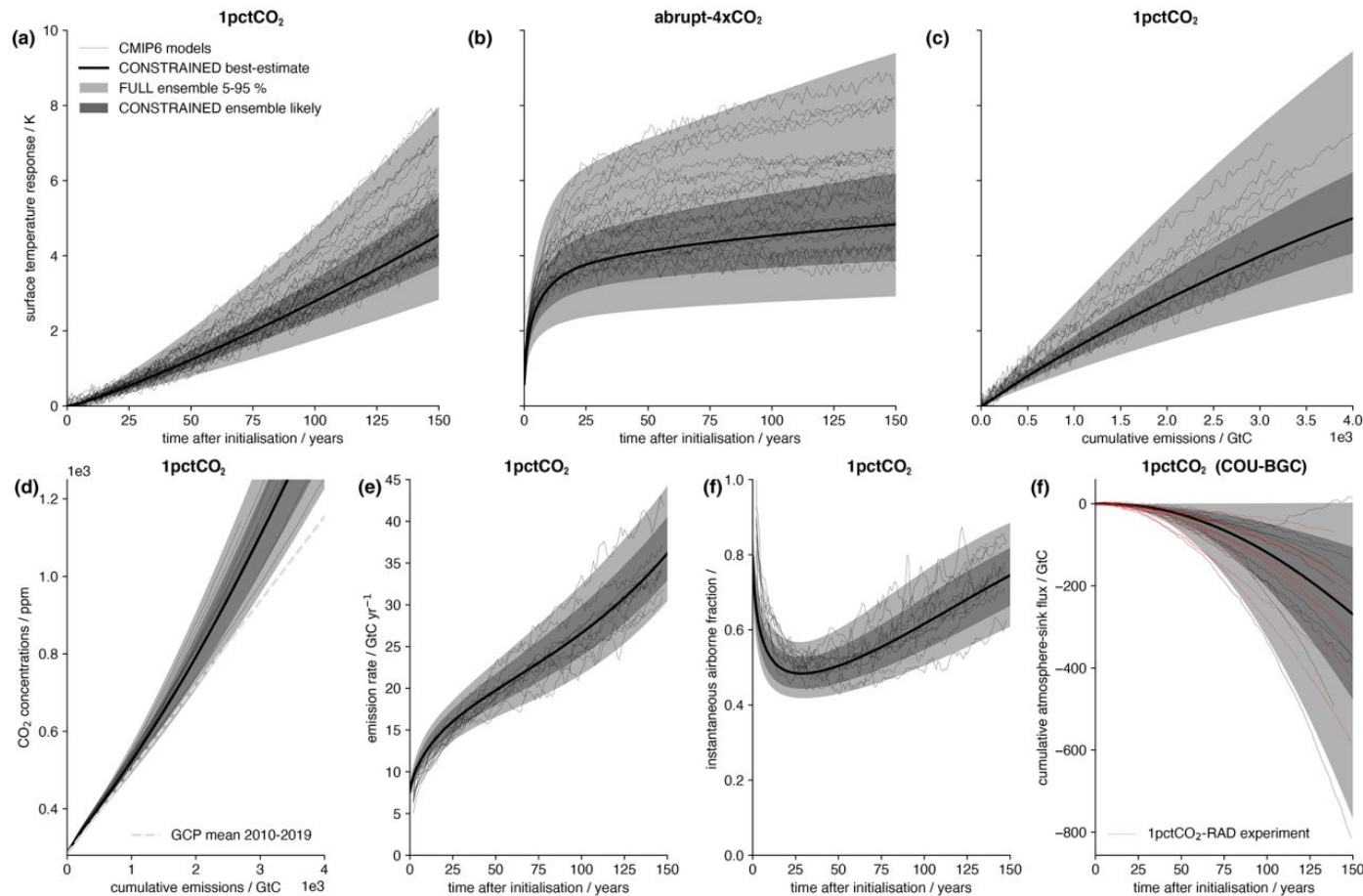
---

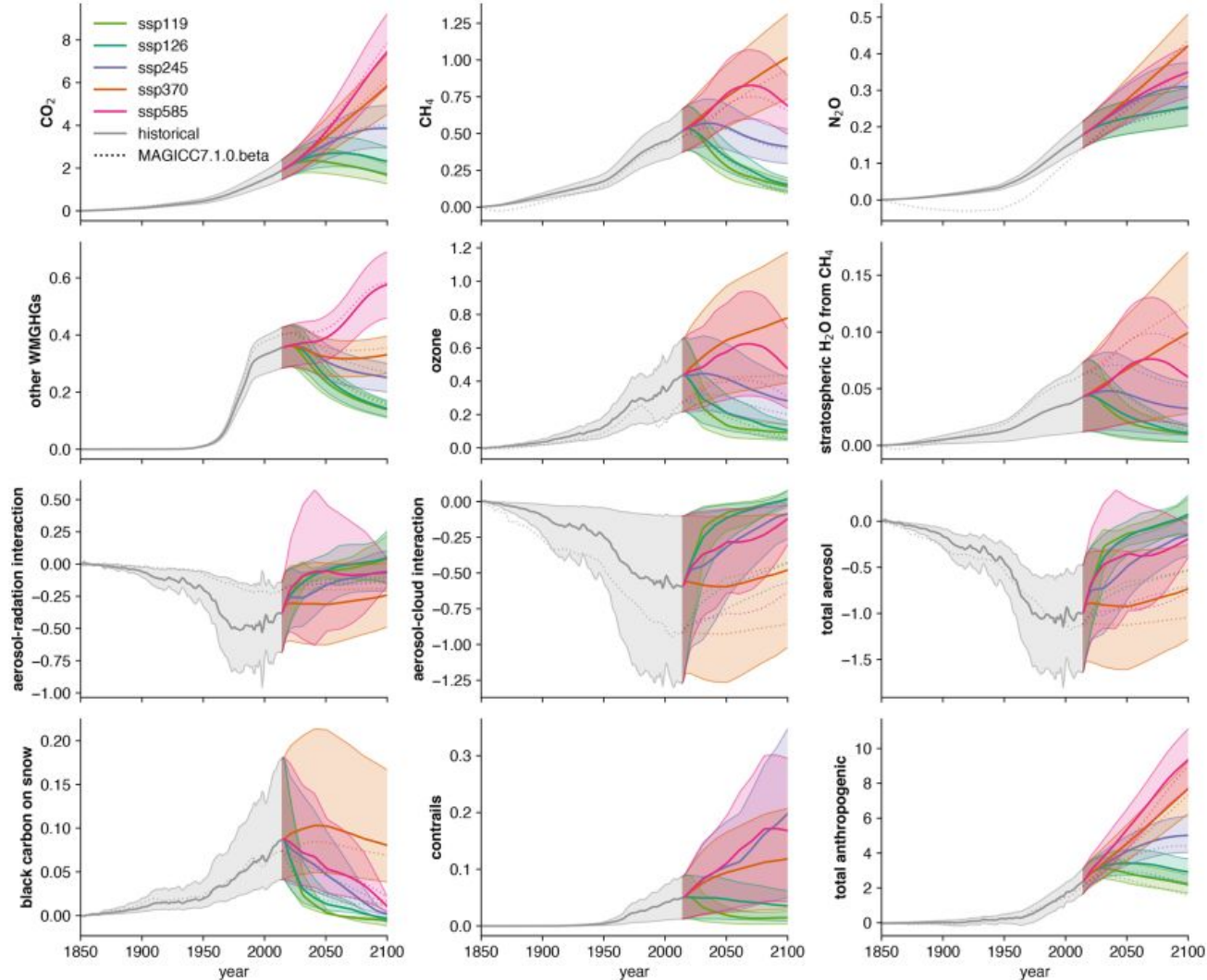
- Forzamiento radiativo
- Temperatura
- Calor en el océano.

Cantidades que se pueden estimar a partir los resultados principales

- Sensibilidad del clima en equilibrio
- Año en que se supera la barrera de 1.5 y 2C
- Aumento del nivel del mar al final de siglo

# Resultados de diferentes experimentos





Forzamientos  
radiativos de todos  
los forzamientos  
naturales y  
antropogénicos  
para el período  
histórico y los  
escenarios de  
emisión

# Flujo del programa

---

1. Genera primero una clase de Python que tendrá los atributos del modelo.
2. Establecer los nombres de tus escenarios a correr.
3. Rellenas las especies y propiedades de cada especie de tu escenario.
4. Generas tus arrays de entrada y salida (formato xarray). Muchos están vacíos.
5. Utilizamos la información de escenarios y especies para rellenar tus datos de entrada.
6. Corres el modelo y los arrays de salida cambian, ahora tienen los resultados de tu simulación!



# Resumen

---

- Modelo simple, sólo considera el tiempo como dimensión.
- Necesita series de tiempo de especies (gases, partículas) para calcular la serie de tiempo de forzamiento y luego de temperatura.
- En cada salto de tiempo, calcula
  - El ciclo de los gases
  - Sumideros y la tasa de captura para cada gas
  - Concentraciones
  - Forzamiento total
  - Respuesta de la temperatura y otros parámetros de salida.
- Es un modelo que esencialmente relaciona la serie de tiempo de concentraciones y emisiones (un escenario), que a través de ecuaciones simples representa procesos físico-químicos de adición y remoción de gases-partículas, para luego calcular el forzamiento global total y la temperatura promedio.

# Bibliografía

- Leach, Nicholas J., et al. "FaIRv2. 0.0: a generalized impulse response model for climate uncertainty and future scenario exploration." *Geoscientific Model Development* 14.5 (2021): 3007-3036.
  - Edwards, Paul N. "History of climate modeling." *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 2.1 (2011): 128-139.
  - Forster, P., T. Storelvmo, K. et al, 2021: The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* doi: [10.1017/9781009157896.009](https://doi.org/10.1017/9781009157896.009).
  - Schwarber, Adria K., et al. "Evaluating climate emulation: fundamental impulse testing of simple climate models." *Earth System Dynamics* 10.4 (2019): 729-739.
  - Escoto Castillo, Ana, Landy Sánchez Peña, and Sheila Gachuz Delgado. "Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social." *Estudios demográficos y urbanos* 32.3 (2017): 669-693.
-