

Física atmosférica - Capítulo 9. Dinámica del clima

Alberto Carramiñana

INAOE, Tonantzintla, 18 de abril de 2023

Dinámica del clima

1. Clima actual
2. Variabilidad climática
3. Equilibrio climático
4. Efecto invernadero
5. Monitoreo climático y predicciones. [TBD]

1. Clima actual

- ▶ Definición de clima (dle.rae.es):
Conjunto de condiciones meteorológicas que caracterizan una región.
- ▶ El clima presenta variabilidad:
inter-estaciones, inter-anual, largo plazo (décadas, siglos)...

1. Clima actual

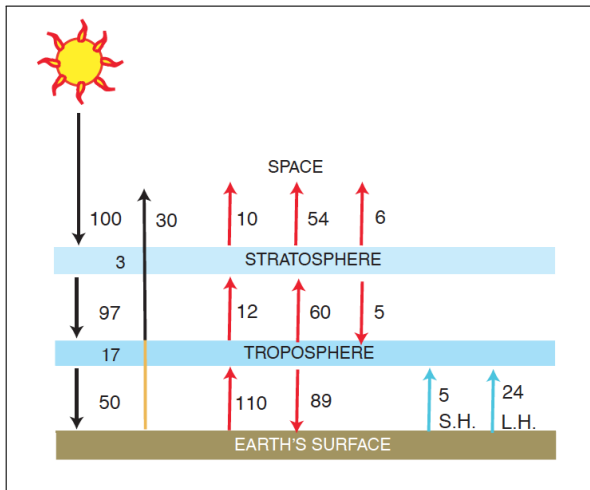
1.1. Condiciones promedio.

1.2. Dependencia con el transcurso del día.

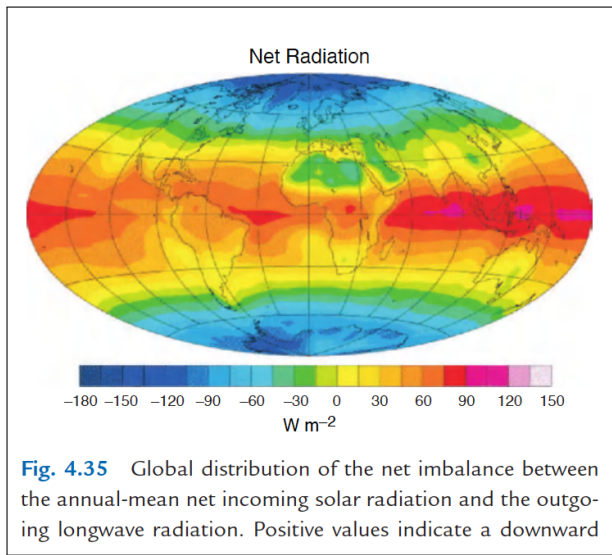
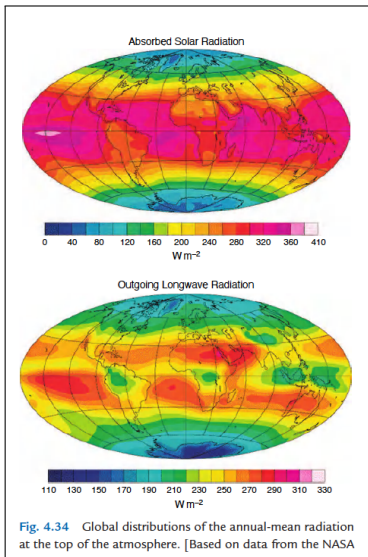
1.3. Dependencia estacionaria.

1. Clima actual - condiciones promedio

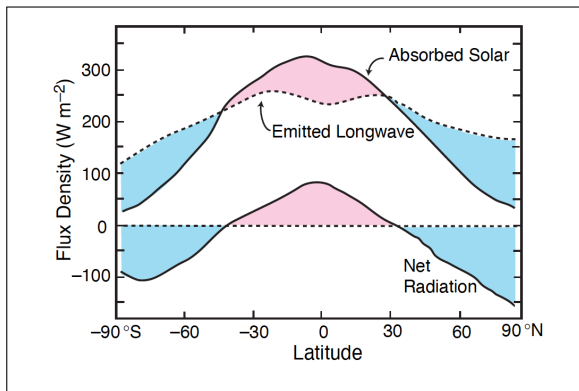
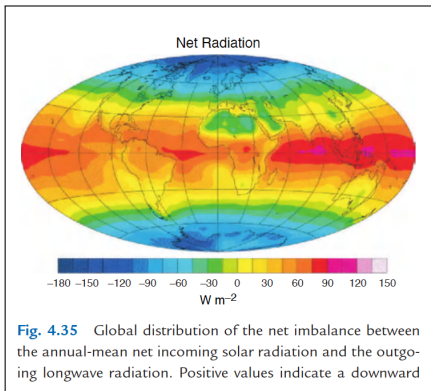
- ▶ La temperatura de equilibrio para la Tierra, en ausencia de atmósfera: $T_{eq} = 255 \text{ K}$.
- ▶ La temperatura media de la superficie terrestre: $T_s = 288 \text{ K} = 15^\circ\text{C}$.
- ▶ La temperatura media de la atmósfera terrestre: $T_a = 245 \text{ K} = -28^\circ\text{C}$.
- ▶ Valores de equilibrio dados por los flujos radiativos (visible + IR) en la atmósfera y la superficie (incluida liberación de calor).



1. Clima actual - condiciones promedio



1. Clima actual - condiciones promedio



- ▶ Flujo neto entrante en zona ecuatorial ($\pm 30^\circ$) y emergente en altas latitudes.
- ▶ Existe también un contraste entre suelo y mar.
- ▶ Y entre suelo con vegetación y desierto.

1. Clima actual - condiciones promedio

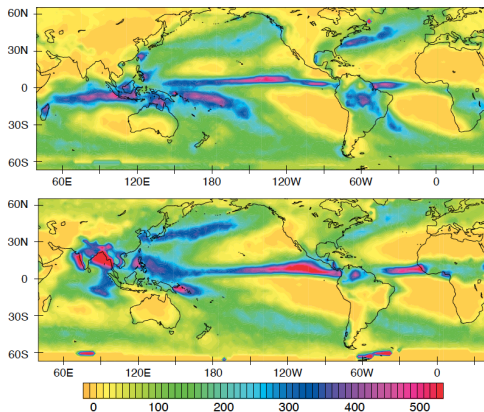


Fig. 1.25 January and July climatological-mean precipitation. [Based on infrared and microwave satellite imagery over the

Precipitación media en enero y julio.

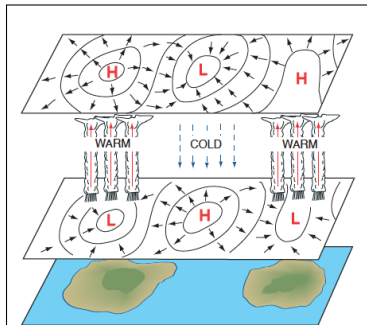
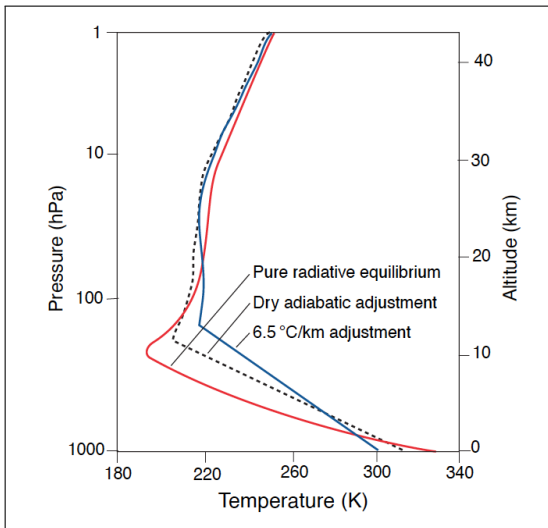


Fig. 10.9 Idealized representation of the monsoon circulations. The islands represent the subtropical continents in the summer hemisphere. Solid lines represent isobars or height contours near sea level (lower plane) and near 14 km or 150 hPa (upper plane). Short solid arrows indicate the sense of the cross-isobar flow. Vertical arrows indicate the sense of the vertical motions in the middle troposphere. Regions that experience of summer monsoon rainfall are also indicated.

1. Clima actual - condiciones promedio



- ▶ La tropósfera alcanza hasta una profundidad óptica $\tau \sim 1$ para radiación IR emergente.
- ▶ Tropósfera calentada mayormente por convección y liberación de calor latente, proceso dominante sobre absorción - emisión IR
 $\Rightarrow \Gamma < \Gamma_{ad}$, y que Γ en equilibrio radiativo.
- ▶ La estratósfera está en equilibrio radiativo: la emisión térmica IR de CO_2 , H_2O , O_3 balancea el calentamiento de O_3 .

1. Clima actual - dependencia diurna

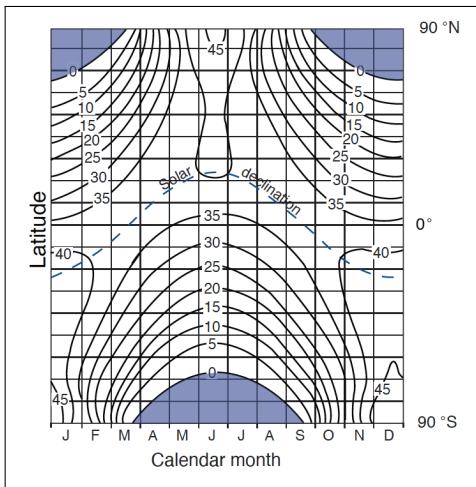
Un problema...

1. Suponiendo que durante la noche la atmósfera se enfría por la emisión de radiación térmica a una temperatura fija, mostrar que la tasa de enfriamiento está dada aproximadamente por,

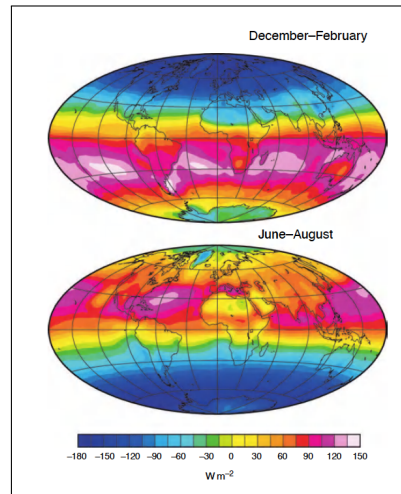
$$\frac{dT}{dt} = -\frac{\sigma T^4}{c_p(p/g)}.$$

Calcular a que tasa se enfría la atmósfera, con $T_a = 245$ K, y el descenso de temperatura después de una noche (12h).

1. Clima actual - dependencia con las estaciones



Insolación media en función de latitud y época del año (en MJ/m²/dia \Rightarrow 11.57 W/m²).



Flujo neto de radiación IR, verano e invierno (azul = emergente).

1. Clima actual - dependencia con estaciones

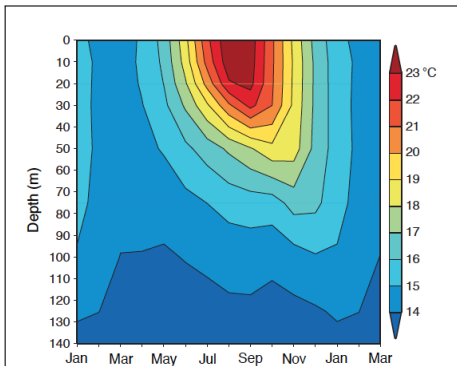
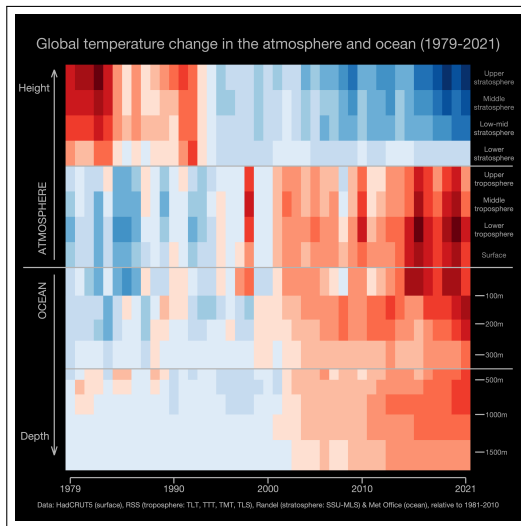


Fig. 10.7 Temperature (in °C) averaged over a region in the central North Pacific (28°–42°N, 180°–160°W) as a function of calendar month and depth showing the climatological-mean annual cycle. [Based on data from *World Ocean*

Temperatura del mar a distintas profundidades.



2. Variabilidad climática

2. Variabilidad climática

2.1. Generada internamente;

2.2. Variabilidad acoplada:

(a) oceano; (b) biósfera; (c) criósfera; (d) corteza

2.3. Forzamiento externo:

(a) variabilidad solar; (b) vulcanismo.

2. Variabilidad climática

- ▶ Difícil de cuantificar, en particular por la impredecibilidad del clima.
- ▶ Variabilidad interna medida por fluctuaciones año a año.
- ▶ Medición estadística de la variabilidad mediante anomalías (x^*) y correlaciones (r),

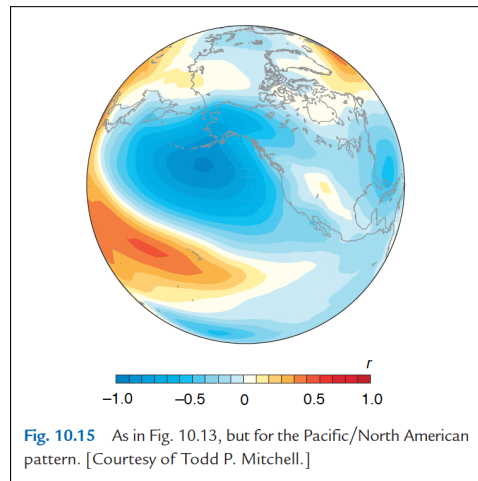
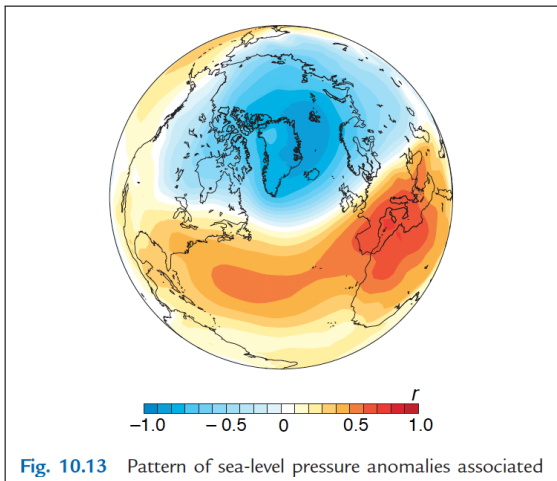
$$x^* = \frac{x - \langle x \rangle}{\sigma(x)}, \quad r = \langle x^* y^* \rangle, \quad (1)$$

donde x^* con comportamiento normal (Gaussiano) en procesos aleatorios; y $r \in (-1, +1)$.

2. Variabilidad climática - generada internamente

- ▶ Tres regiones anómalas distinguibles:
 - (1) North Atlantic Anomaly (NAO; AO; NAM);
 - (2) Pacific North American Pattern (PNA);
 - (3) Southern Annular Mode (SAM).
- ▶ El proceso de formación de estas anomalías naturales no está bien comprendido.

2. Variabilidad climática - generada internamente



Anomalía de Atlántico Norte (NAO) y del Pacífico (PNA) en términos de la presión atmosférica a nivel del mar.

2. Variabilidad climática - acoplamientos

La atmósfera está acoplada a otras componentes del planeta:

- (a) oceano:
modo principal es ENSO (El Niño Southern Oscillations): anomalías positivas en la temperatura superficial del mar en el Pacífico ecuatorial.
- (b) biósfera:
dust bowls. Tormentas de arena del Sahara. Desertificación.
- (c) criósfera:
Retroalimentación negativa en la temperatura del aire:
mayor temperatura del aire \Rightarrow decrecimiento de capa de hielo \Rightarrow menor albedo \Rightarrow mayor absorción de radiación solar \Rightarrow aumento de temperatura del aire.
- (d) corteza terrestre:
Por ejemplo, el ciclo de carbonatos y silicatos (“carbonate-silicate cycle”), potencialmente regulador de la temperatura del aire.

2. Variabilidad climática - acoplamiento con el océano

El Niño es una anomalía en la temperatura del mar del Pacífico Este ecuatorial, que se correlaciona con una anomalía en la presión a nivel del mar en Darwin, Australia.

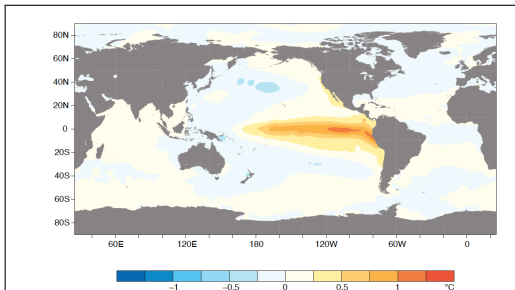


Fig. 10.18 Global pattern of sea surface temperature anomalies observed during El Niño years (in °C).¹³ [Based on data the U. K. Meteorological Office HadISST. Courtesy of Todd P. Mitchell.]

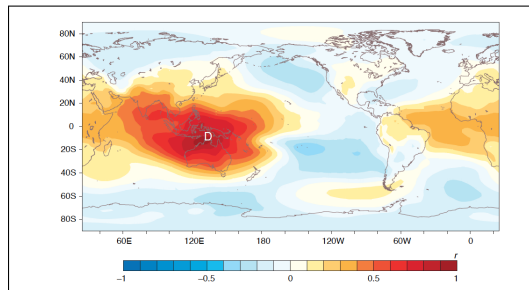


Fig. 10.19 Global pattern of sea-level pressure anomalies observed during El Niño years. This pattern was formed by linearly correlating monthly-mean sea-level pressure at each grid point with sea-level pressure at Darwin, Australia, indicated by the D on the map. The Darwin sea-level pressure time series appears on the lower time axis in Fig. 10.20 as an index of the status of

2. Variabilidad climática - acoplamiento con el océano

El Niño es una anomalía en la temperatura del mar del Pacífico Este ecuatorial, que se correlaciona con una anomalía en la presión a nivel del mar en Darwin, Australia.

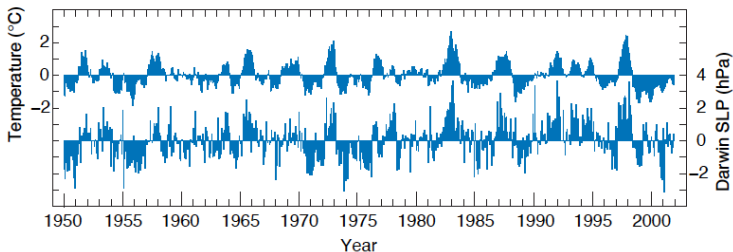


Fig. 10.20 Time series of indices of El Niño (top) and the Southern Oscillation (bottom). Minus the global-mean sea surface temperature anomaly. The Southern Oscillation is represented by Darwin sea-level pressure anomalies. The location of Darwin is indicated by the **D** in Fig. 10.19. Prominent warm episodes of the ENSO cycle occurred during 1957–1958, 1965–1966, 1972–1973, 1982–1983, 1986–1988, and 1997–1998. [Courtesy of Todd P. Mitchell.]

2. Variabilidad climática - acoplamiento con el océano

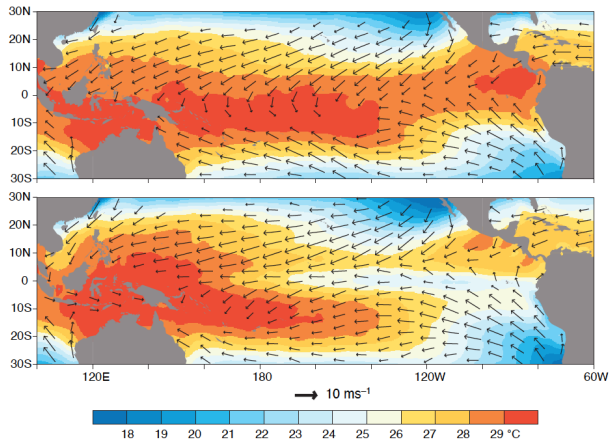
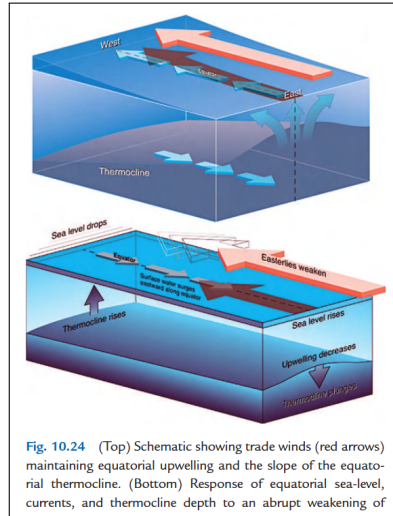
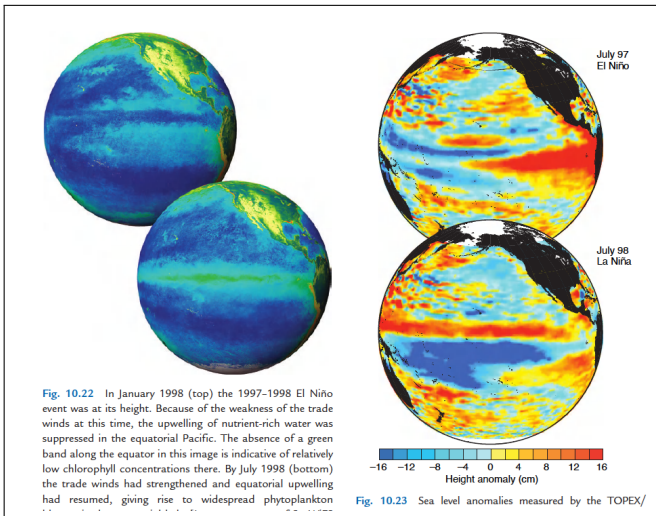


Fig. 10.21 Sea-surface temperature (SST) and surface winds over the tropical Pacific averaged from November–April of a warm year of the ENSO cycle (1997–1998, top) and November–April of a cold year (1998–1999, bottom). During both years the sur-

Debilitamiento del gradiente de presión EW
⇒ debilitamiento de vientos EW.

2. Variabilidad climática - acoplamiento con el océano



2. Variabilidad climática - acoplamiento con el océano

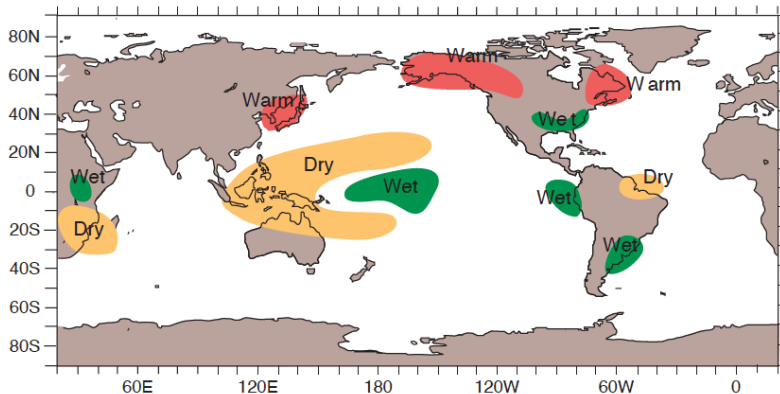


Fig. 10.27 Regional impacts of El Niño on weather and climate during the boreal winter. [Adapted from *Monthly Weather Review*, 115, p. 1625 (1987) by the NOAA PACS program.]

2. Variabilidad climática - variabilidad por forzamiento externo

- (a) variabilidad solar
- (b) vulcanismo
- (c) Antropogénico → §4.

2. Variabilidad climática - variabilidad solar

- ▶ La estabilidad del Sol es fundamental para mantener las condiciones en la Tierra:
 $S_{\odot} = L_{\odot}/4\pi d^2$ con $L_{\odot} = 4\pi R_{\odot}^2 \sigma T_e^4$.
- ▶ La emisión del Sol, mayormente constante, contiene un ciclo de actividad definido y conocido desde los 1600s a través del conteo de manchas solares.
- ▶ El ciclo está relacionado con la actividad magnética de la estrella, que cambia de polaridad cada 11 años, aproximadamente.

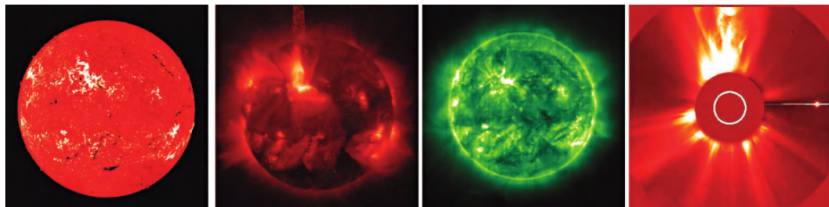


Fig. 10.29 An intense flare in the upper left quadrant of the solar disk that occurred June 6, 2000. The image on the left was

2. Variabilidad climática - variabilidad solar

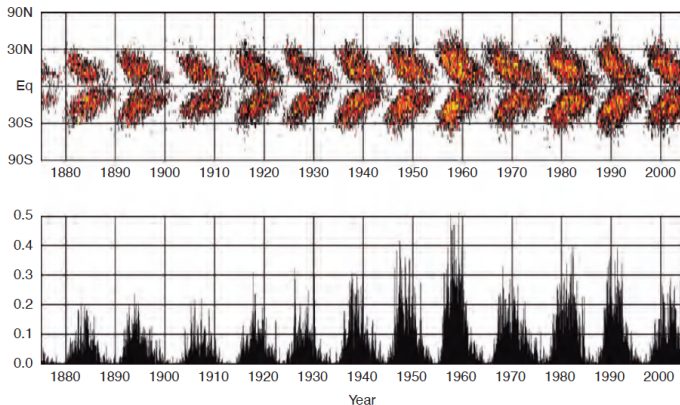


Fig. 10.30 (Top) Fractional area of the photosphere that is covered by sunspots as a function of latitude and time. Yellow shading indicates areal coverage in excess of 1%, red between 0.1 and 1%, and unshaded less than 0.1%. (Bottom) The fractional area of the surface of the entire solar photosphere (in %) covered by sunspots as a function of time. [Courtesy of David Hathaway, NASA Marshall Space Flight Center.]

2. Variabilidad climática - variabilidad solar

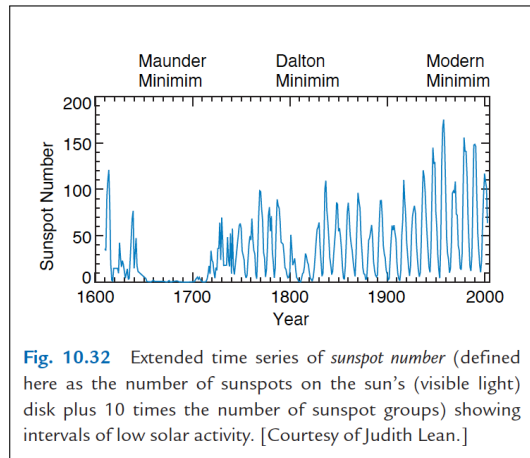
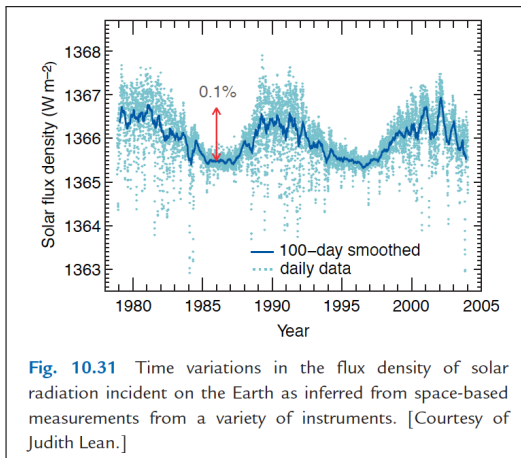


Figura 1: Izq: Flujo de radiación solar de 1980 a 2005. Los máximos de actividad solar se dieron en 1979, 1989 y 2001; mínimos en 1986 y 1996. Der: registros de manchas solares desde 1600.

2. Variabilidad climática - vulcanismo

Las erupciones volcánicas mayores pueden alcanzar la estrósfera alta, teniendo un impacto discernible en el clima. La emisión de SO_2 favorece la formación de aerosoles.

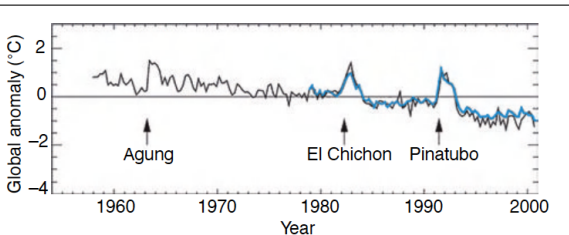
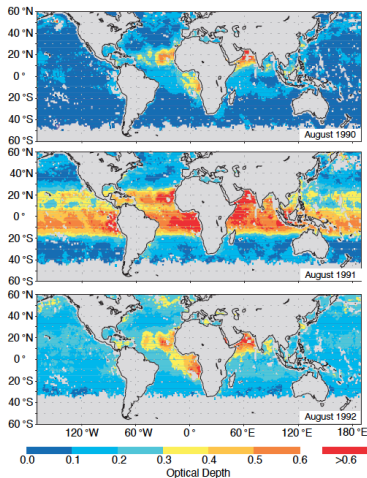


Fig. 10.36 Time series of the globally-averaged temperature in the lower stratosphere. The blue curve is based on the lower stratospheric channel of the microwave sounding unit, which is representative of the layer 15–20 km above the Earth's surface and the black curve is based on radiosonde data for the same layer. [Adapted from Intergovernmental panel on climate change, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge University Press, p. 121 (2001).]

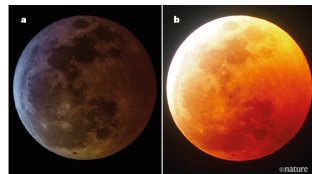
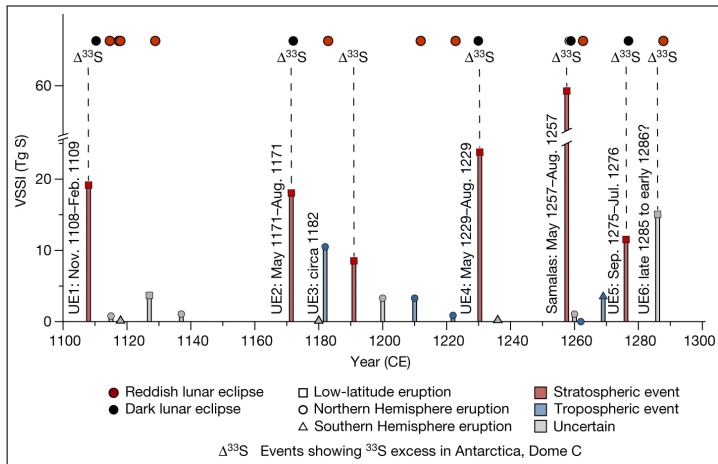
2. Variabilidad climática - vulcanismo



Pinatubo, 15 de junio de 1991.

Fig. 10.34 Total concentrations of atmospheric aerosols based on NOAA/AVHRR satellite imagery. The colors represent the monthly averages of optical depth at wavelength of $0.63 \mu\text{m}$ for cloud-free pixels over the oceans, as inferred from the monochromatic intensity of the reflected radiation at that wavelength. [Data from *J. Geophys. Res.*, **102**(D14), 16923-16934, 1997. Copyright 1997 American Geophysical Union. Reproduced/modified by permission of American Geophysical Union. Courtesy of Alan Robock.]

2. Variabilidad climática - vulcanismo



Guillet et al., Nature 616, 90 (2023). Sobre eclipses y volcanes.

3. Equilibrio climático

3. Equilibrio climático

3.1. Equilibrio y forzamiento;

3.2. Retroalimentación:

- (a) vapor de agua;
- (b) nubes;
- (c) hielo;
- (d) dióxido de carbono.

3. Equilibrio climático - equilibrio y forzamiento

- ▶ Una variable climática (por ejemplo T_s) puede variar por factores directos (radiación solar, albedo, efecto invernadero...), o indirectos, debidos a acoplamiento entre factores.
- ▶ El forzamiento radiativo, F , representa el cambio en el flujo de radiación en el borde externo de la atmósfera inducido por la variación de la variable.
- ▶ La sensibilidad de la variable T_s al forzamiento F (W m^{-2}) se define como

$$\lambda \equiv \frac{dT_s}{dF} = \frac{\partial T_s}{\partial F} + \sum_i \frac{\partial T_s}{\partial y_i} \frac{dy_i}{dF}, \quad (2)$$

definiendo $\lambda_0 = \partial T_s / \partial F$ a la sensibilidad por variación directa. La sumatoria contiene las retro-alimentaciones.

- ▶ El forzamiento radiativo se da principalmente en la tropósfera, de mayor inercia térmica, y en escalas de tiempo de décadas.
 - La estratósfera mantiene un mejor equilibrio radiativo por su adaptación más rápida (meses).

3. Equilibrio climático - equilibrio y forzamiento

- ▶ Un ejemplo: forzamiento de la temperatura del aire,

$$\frac{\partial T_s}{\partial F} \approx \frac{dT_{eq}}{dF} = \frac{1}{4} \frac{T_{eq}}{F_s} = 0.266 \text{ K } (\text{W m}^{-2})^{-1},$$

equivalente a 3.76 W m^{-2} por 1°C .

- ▶ La relación (2) permite definir los factores de retroalimentación (feedback factors),

$$\frac{dT_s}{dF} = \lambda_0 + \frac{dT_s}{dF} \sum_i f_i \Rightarrow \frac{dT_s}{dF} = \frac{\lambda_0}{1-f} \quad \text{con} \quad f_i = \frac{\partial T_s}{\partial y_i} \frac{dy_i}{dT_s}, \quad (3)$$

con $\lambda_0 = \partial T_s / \partial F$, $f = \sum_i f_i$.

- Se define también $g = 1/(1-f)$.

3. Equilibrio climático - respuesta atmosférica

- ▶ La atmósfera tiene tiempos de respuesta distintos para distintos forzamientos, que a su vez tienen una duración intrínseca.
- ▶ La respuesta de la atmósfera depende de su capacidad calorífica.
- ▶ La temperatura $T = T_0 + T'$ que alcanza el sistema partiendo de una temperatura de equilibrio T_0 , debido a una perturbación térmica $Q(t)$, puede modelarse como

$$c \frac{dT'}{dt} = -\frac{T'}{\lambda} + Q, \quad (4)$$

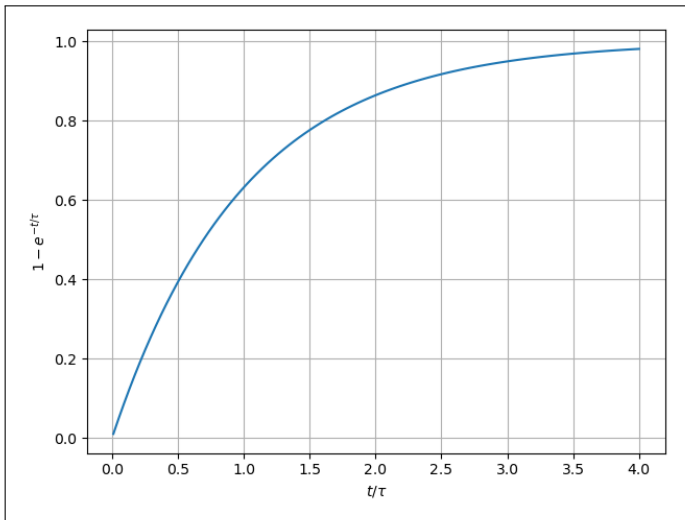
con c la capacidad calorífica, λ la sensibilidad climática. La solución es,

$$T'(t) = e^{-t/\tau} \int_0^t \lambda Q(t') e^{t'/\tau} dt',$$

con $\tau = c\lambda$, y $T'(0) = 0$.

- ▶ Ejemplo: la capacidad calorífica océano es ~ 50 veces la de la capa mixta oceánica, con el tiempo característico de circulación termohalina (miles de años).

3. Equilibrio climático - respuesta atmosférica



- ▶ $Q = \text{constante} \Rightarrow T'(t) = \lambda Q (1 - e^{-t/\tau})$, mostrada en la gráfica.
- ▶ τ depende de la capacidad calorífica del reservorio térmico involucrado (atmósfera, mar, ...).
- ▶ Puede haber un imbalance radiativo durante un periodo de ajuste.

3. Equilibrio climático - retroalimentación

Sensitividad climática y retro-alimentación a:

(a) vapor de agua; (b) nubes; (c) hielo y nieve; (d) dióxido de carbono.

(a) vapor de agua:

- ▶ Principal gas de invernadero.
- ▶ Alta concentración \Rightarrow alta temperatura \Rightarrow alta evaporación \Rightarrow alta concentración de vapor de agua.
- ▶ Condiciones actuales: aumento de concentración atmosférica 7% por 1 K $\Rightarrow f = 0.5$.
- ▶ A $T_s \gtrsim 60^\circ\text{C}$: retro-alimentación desbocada $\Rightarrow T_s \rightarrow 1000\text{ K}$.
- ▶ Respuesta rápida (\sim instantánea).

(b) nubes:

- ▶ Difícil de evaluar: efectos de albedo ($f < 0$) e invernadero ($f > 0$) en competencia.
- ▶ Nubes en tropósfera tropical $f \sim 0$.
- ▶ Nubes altas: incierto si la cobertura crece ($f < 0$) o decrece ($f > 0$) con la temperatura.
- ▶ Se considera $f \lesssim 0.1$.

3. Equilibrio climático - retroalimentación y forzamiento - nubes

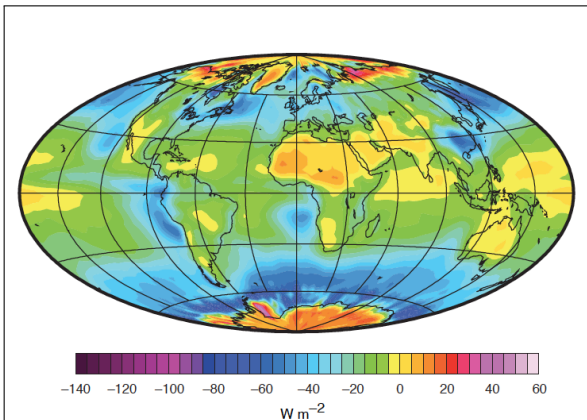


Fig. 10.37 Annual mean net cloud radiative forcing, which is estimated by comparing reflected solar radiation and outgoing solar radiation, as in Fig. 4.35, but computing averages for all

3. Equilibrio climático - retroalimentación

Sensitividad climática y retro-alimentación a:

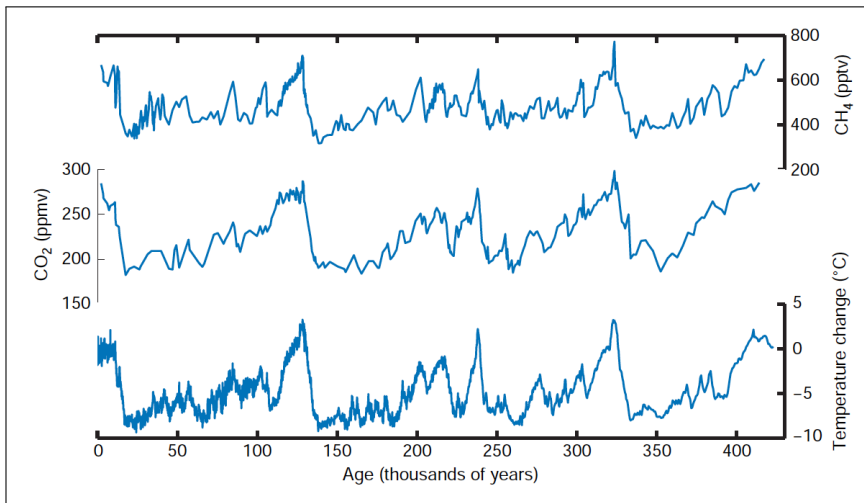
(c) hielo y nieve:

- ▶ Relevante por su contribución al albedo.
- ▶ Retro-alimentación negativa desbocada en el pasado (“snowball Earth”).
- ▶ Retro-alimentación positiva al aumentar la temperatura.
- ▶ En la actualidad $f > 0$, pero contribución modesta dada la baja cobertura relativa de hielo y nieve.
- ▶ Difícil de evaluar por su acoplamiento con nubes, hidrología y vegetación.

(d) dióxido de carbono

- ▶ Forzamiento radiativo dominante.
- ▶ Retro-alimentación positiva del ciclo del carbono en épocas de glaciación (± 80 ppm).
- ▶ Atribuida potencialmente a la circulación termohalina.

3. Equilibrio climático - retroalimentación y forzamiento - CO₂, CH₄

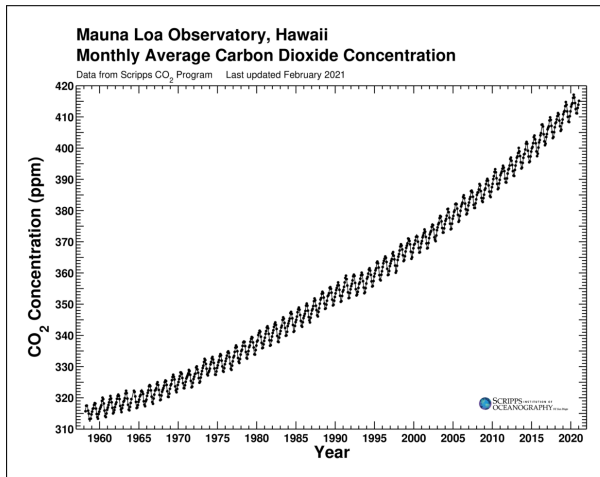


4. Efecto invernadero

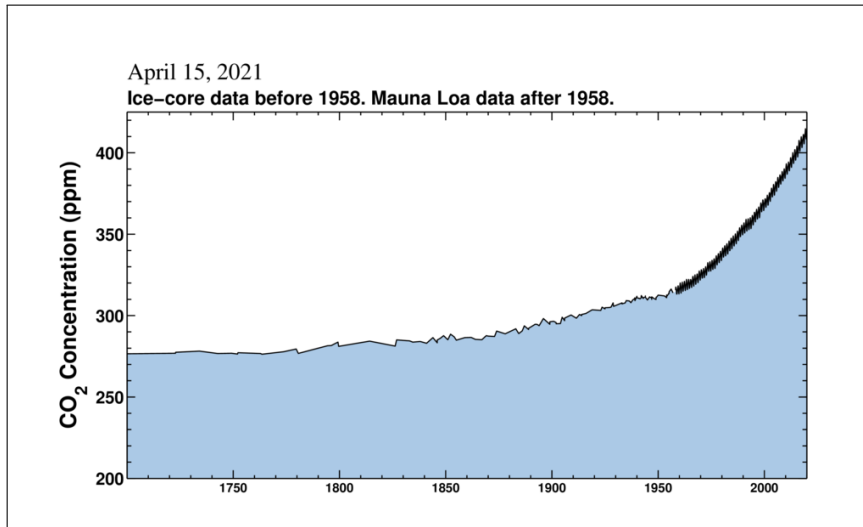
- 4.1. Acumulación de gases de invernadero;
- 4.2. Efecto antropogénico;
- 4.3. Proyecciones.

4. Efecto invernadero - acumulación de gases de invernadero

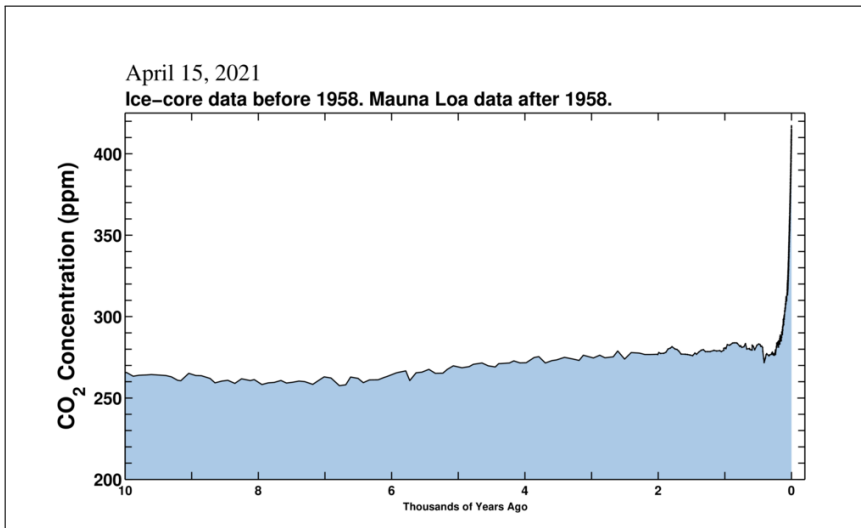
- ▶ La acumulación de CO_2 en la atmósfera y su efecto de calentamiento fueron anticipados por Arrhenius, y otros, desde finales del siglo XIX.
- ▶ Evidencia clara del problema en los 1970s: curva de CO_2 (keelingcurve.ucsd.edu).
- ▶ Aumento de gases de invernadero coincidente con la era industrial (muestra de hielo).
- ▶ Problema ambiental y político.



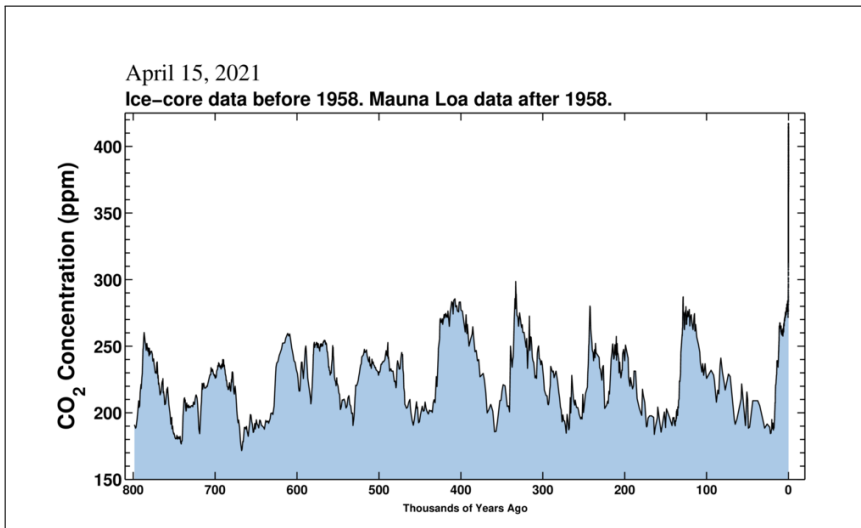
4. Efecto invernadero - acumulación de gases de invernadero



4. Efecto invernadero - acumulación de gases de invernadero



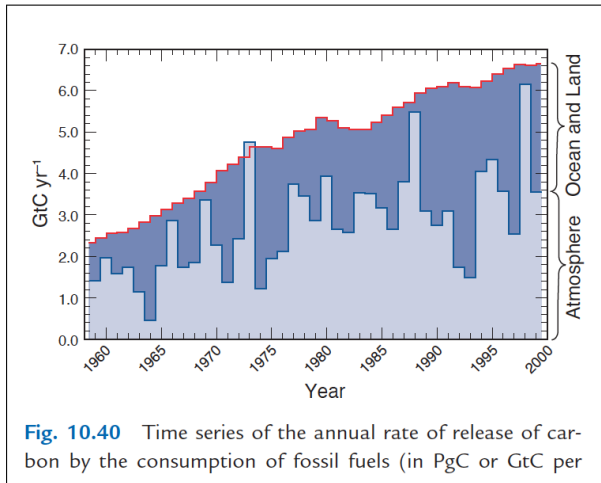
4. Efecto invernadero - acumulación de gases de invernadero



4. Efecto invernadero - acumulación de gases de invernadero

Evidencias de fuente antropogénica

- ▶ Mayor en el hemisferio Norte.
- ▶ Decrecimiento paralelo de la concentración de oxígeno (-3 ppm/año).
- ▶ Abundancia relativa decreciente de isótopos ^{13}C y ^{14}C , los cuales están ausentes en combustibles fósiles.



4. Efecto invernadero - acumulación de gases de invernadero

Gas	Eficiencia radiativa	Vida media (años)	GWP ₂₀	GWP ₁₀₀	GWP ₅₀₀
CO ₂	0.0155	–	1	1	1
CH ₄	0.37	12	62	23	7
N ₂ O	3.1	114	275	296	156
CFC-12	320	100	10 200	10 600	5 200
HCFC-21	170	2	700	210	65

Cuadro 1: Potencial de algunos gases de invernadero. La eficiencia radiativa se expresa en $W m^{-2} ppm^{-1}$. GWP = Greenhouse Warming Potential referido al efecto del CO₂; combina la eficiencia radiativa y el tiempo de residencia (Wallace & Hobbs - Tabla 10.1).

4. Efecto invernadero - cambio climático

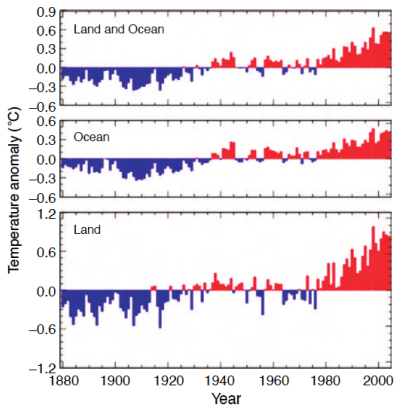
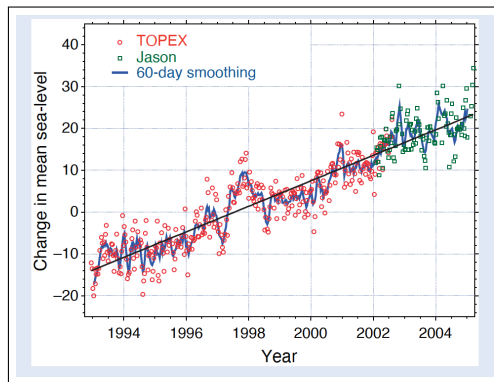
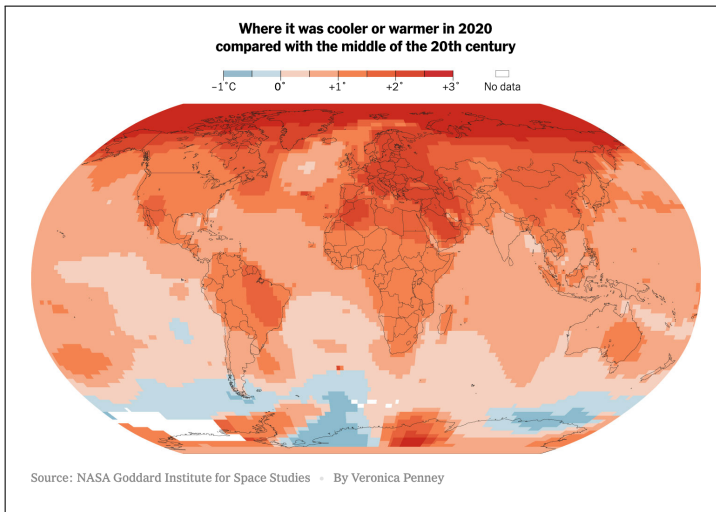


Fig. 10.44 Time series of global-, ocean-, and land-averaged surface temperature anomalies, defined as departures from the 1880–2003 mean. The data are updated through December of 2004. [Courtesy of NOAA's National Climatic Data Center.]



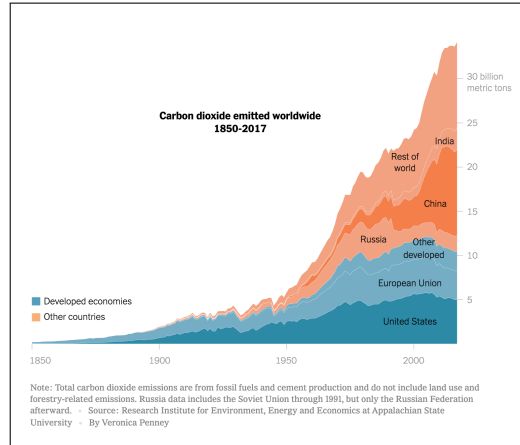
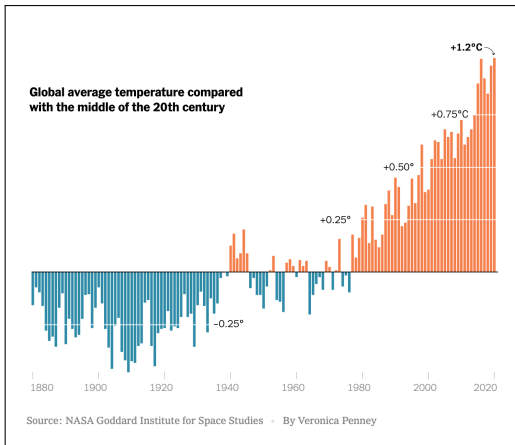
4. Efecto invernadero - cambio climático



NY Times, 19 de abril 2021

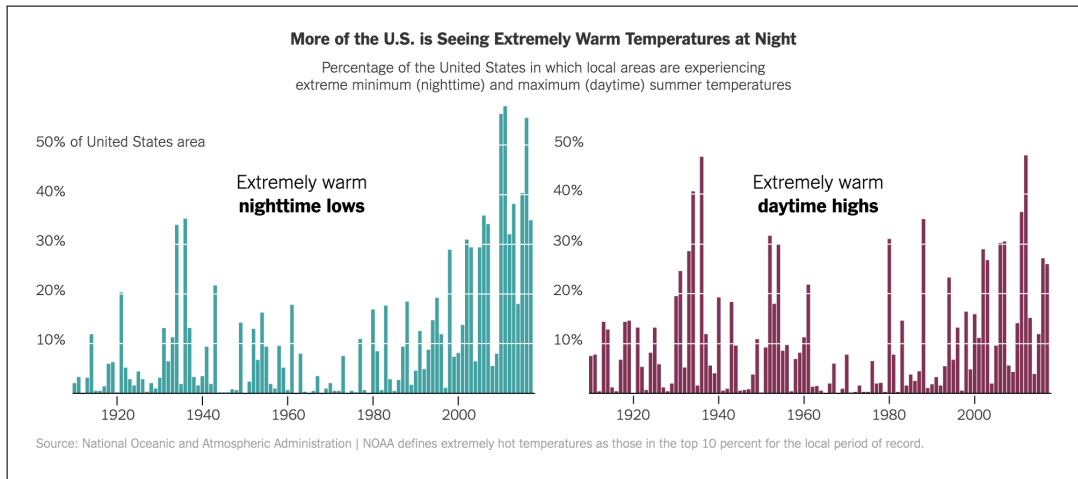
<https://www.nytimes.com/2021/04/19/climate/climate-change-global-warming-faq.html>

4. Efecto invernadero - cambio climático



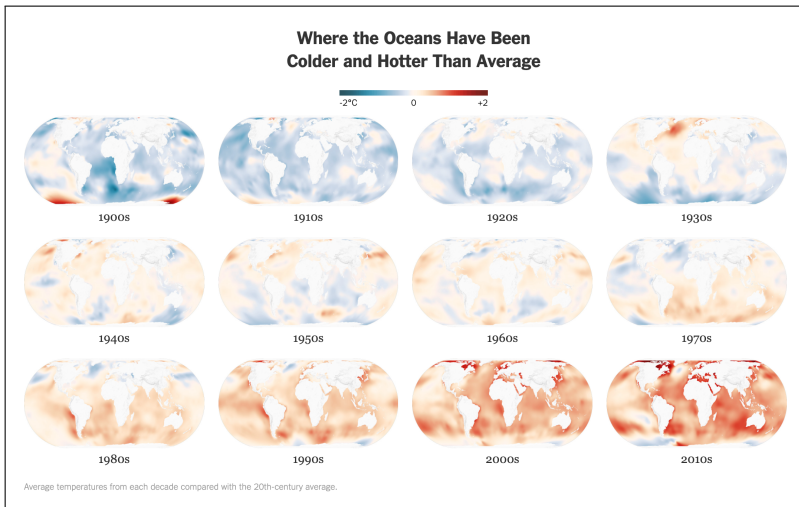
NY Times, 19 de abril 2021

4. Efecto invernadero - cambio climático



NY Times, 11 de julio 2018

4. Efecto invernadero - Cambio climático



NY Times, 12 de septiembre 2016

4. Efecto invernadero - proyecciones

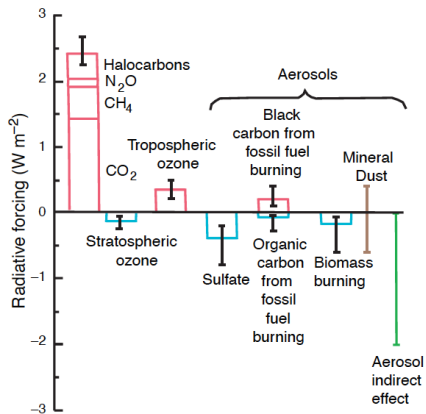


Fig. 10.42 Radiative forcing at the top of the atmosphere

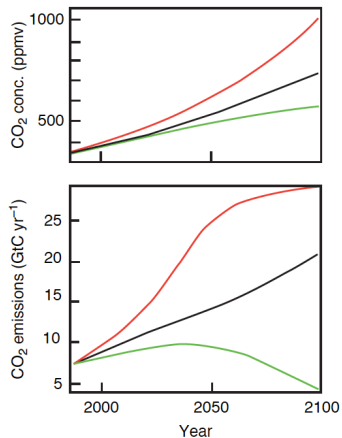


Fig. 10.41 (Top) Projections of future CO_2 concentrations