

M3

MODELLI

Cambiamenti climatici

M1	Crescita e forma 1	Volume 3
M2	Ottimizzazione	
▶ M3	Climate change (Cambiamenti climatici)	
M4	Crescita e forma 2	Volume 4
M5	Economia 1	
M6	Democracy (Democrazia)	
M7	Decidere in condizioni di incertezza	Volume 5
M8	Economia 2	
M9	War and Peace (Guerra e pace)	



INTRODUZIONE DELL'AUTORE

In questo capitolo proponiamo l'analisi di dati e grafici sui cambiamenti climatici tratti dai rapporti dell'*Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*, il principale organismo internazionale per la valutazione dei cambiamenti climatici.

Questo organo intergovernativo è stato fondato nel 1988 con l'obiettivo di fornire al mondo una visione chiara e scientificamente corretta di ciò che si conosce sui cambiamenti climatici e sul loro impatto ambientale e socio-economico. È aperto a tutti i Paesi membri delle Nazioni Unite e dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale e contribuiscono al suo lavoro migliaia di ricercatori.

Gli esercizi che proponiamo fanno ragionare sulle possibili risposte a queste domande:

In base a quali osservazioni parliamo di cambiamenti climatici? Da che cosa sono causati? Quali sono le previsioni per il clima del futuro?

Oltre a mettere in gioco i concetti di statistica studiati, come la retta di regressione e diversi tipi di grafici, sottolineiamo come in questo tipo di analisi sia importante valutare l'incertezza delle conclusioni che si traggono e soprattutto delle previsioni che si fanno estrapolando i dati per tempi futuri.

PROBLEMI GUIDATI

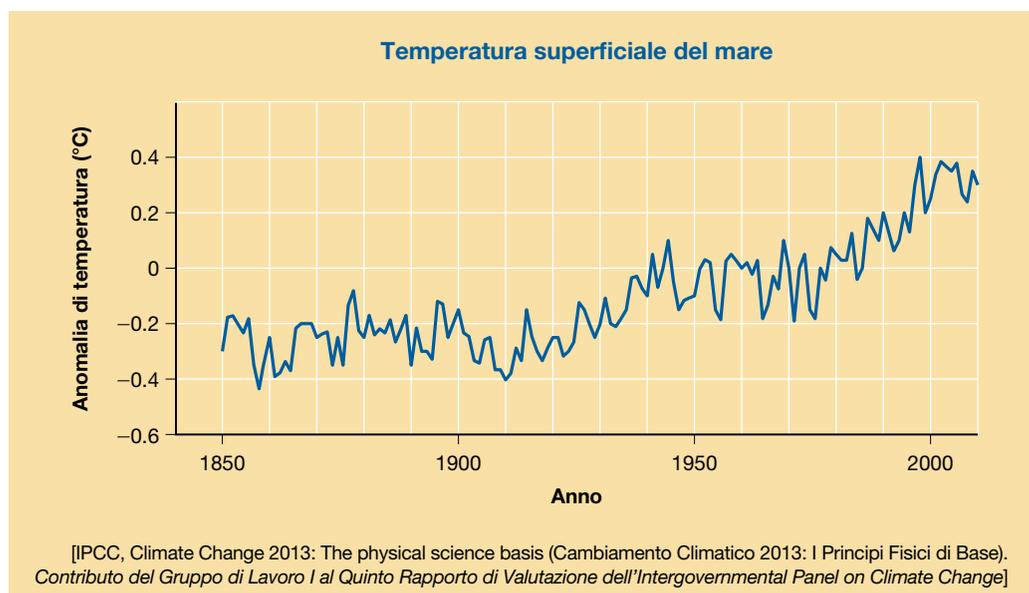
Problema 1

Variazioni osservate nel sistema climatico: la temperatura superficiale del mare

«Le osservazioni del sistema climatico si basano sulle misurazioni dirette e sul telerilevamento da satelliti e altre piattaforme. Le osservazioni su scala globale di temperatura e di altre variabili sono iniziate dalla metà del XIX secolo, con set di osservazioni disponibili più completi ed esaustivi per il periodo che va dal 1950 in poi. Le ricostruzioni paleoclimatiche permettono di ricostruire dati climatici fino a centinaia di milioni di anni fa. Presi nel loro complesso, questi dati forniscono una panoramica completa ed esauriente della variabilità e dei cambiamenti a lungo termine in atmosfera, oceano, criosfera e superficie terrestre.»

[IPCC, Climate Change 2013: The physical science basis (Cambiamento Climatico 2013: I Principi Fisici di Base). Contributo del Gruppo di Lavoro I al Quinto Rapporto di Valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change]

Abbiamo già visto che la temperatura media della Terra è in crescita, e che il fenomeno è iniziato nell'Ottocento. Il grafico qui sotto mostra le variazioni della temperatura superficiale del mare dal 1850 in poi.



Il livello dello zero corrisponde alla temperatura media nell'intervallo temporale considerato (1850-2012), mentre l'etichetta *anomalia di temperatura* sull'asse *y* si riferisce alla differenza tra questa temperatura media e quella realmente misurata in un certo anno.

- ▶ Per semplificare l'analisi dei dati, ricava dal grafico il valore di *y* a intervalli decennali (per il 1850, il 1860 e così via) e riporta queste informazioni in una tabella.
- ▶ Usa i punti della tabella per disegnare un grafico e trovare la retta di regressione; spiega che significato ha il suo coefficiente angolare.
- ▶ Poiché nel 1910 sembra iniziare un aumento marcato della temperatura, determina la retta di regressione usando soltanto i dati a partire dal 1910. Confronta il coefficiente angolare ottenuto con quello del caso precedente. Usa l'equazione di questa seconda retta per stimare l'anomalia di temperatura nel 2100 in base all'andamento attuale.

Come si fa

Stiliamo una tabella

Possiamo leggere sul grafico le coordinate dei punti corrispondenti agli anni iniziali dei vari decenni e stilare una tabella come questa:

Anno	1850	1860	1870	1880	1890	1900	1910	1920	1930
Anomalia di temperatura (°C)	-0.3	-0.25	-0.25	-0.25	-0.35	-0.15	-0.4	-0.25	-0.2
Anno	1940	1950	1960	1970	1980	1990	2000	2010	
Anomalia di temperatura (°C)	-0.1	-0.1	0	0	0.05	0.2	0.25	0.35	

Tracciamo un grafico

Se abbiamo due insiemi di dati corrispondenti, $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ e $\{y_1, y_2, \dots, y_n\}$, la **retta di regressione** è quella che meglio approssima i punti dei dati. Possiamo scriverne l'equazione in questa forma:

$$y = mx + q$$

dove $m = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ e $q = \bar{y} - m\bar{x}$ (vedi il Capitolo 8).

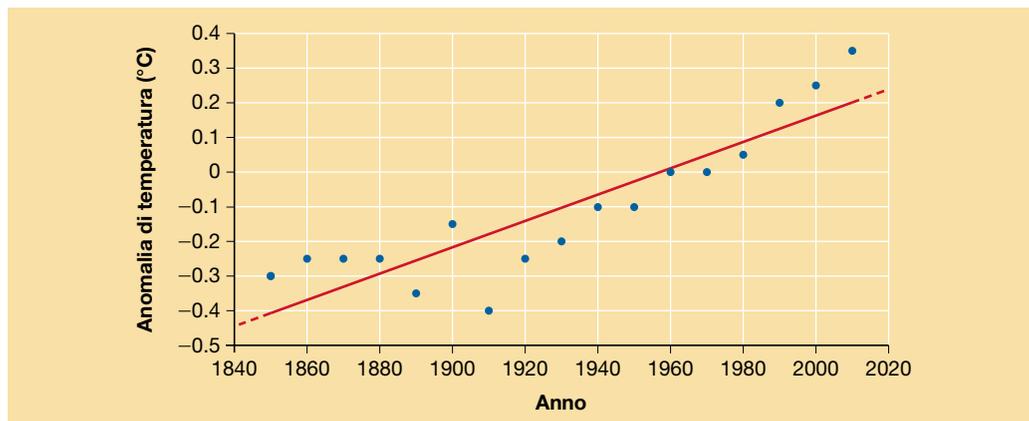
Possiamo determinare i parametri usando una calcolatrice o un foglio di calcolo:

$$\bar{x} = 1930; \bar{y} = -0.103$$

$$\sigma_x = 49.0; \sigma_y = 0.210; \sigma_{xy} = 9.12; r = 0.886$$

$$m = 0.00380; q = -7.44$$

e tracciamo la retta $y = 0.00380x - 7.44$ insieme ai punti dei dati.

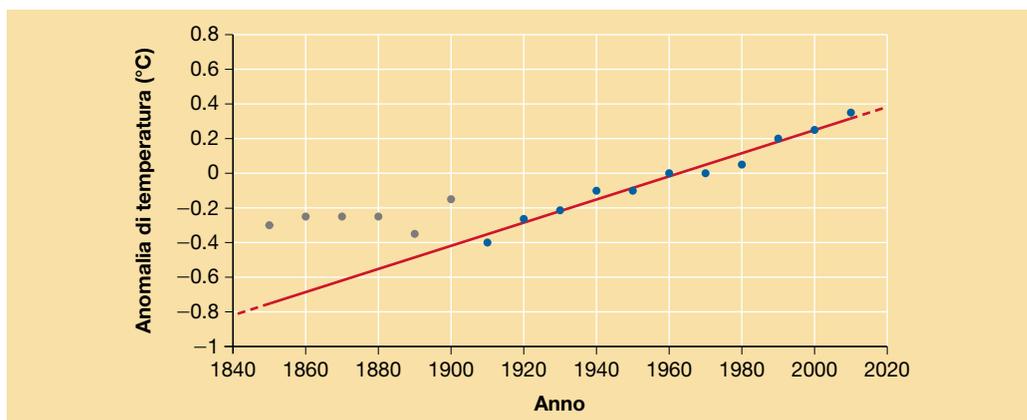


Il coefficiente angolare, $m = 0.00380 \text{ °C/anno}$, rappresenta l'aumento annuale medio della temperatura secondo il modello lineare.



Stimiamo l'anomalia di temperatura nel 2100

Se ci limitiamo a considerare i dati dal 1910 in poi, otteniamo $y = 0.00669x - 13.1$.



In questo caso, la retta approssima molto bene i dati dal 1910 in poi. Il suo coefficiente angolare è $m = 0,00669 \text{ °C/anno}$; è quasi raddoppiato rispetto alla retta precedente. Possiamo stimare l'anomalia di temperatura nel 2100:

$$T(2100) = 0.00669 \cdot 2100 - 13.1 = 0.949 \text{ °C.}$$

Problema 2

I driver del cambiamento climatico

«Le sostanze e i processi naturali e antropogenici che alterano il bilancio energetico della Terra sono i driver del cambiamento climatico. Il forzante radiativo (radiative forcing - RF) misura la variazione dei flussi di energia causata dai cambiamenti di questi driver nel 2011, rispetto al 1750 [...]. RF positivi portano a un riscaldamento della superficie terrestre, RF negativi portano invece a un suo raffreddamento.»

[IPCC, Climate Change 2013: The physical science basis (Cambiamento Climatico 2013: I Principi Fisici di Base). Contributo del Gruppo di Lavoro I al Quinto Rapporto di Valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change]



I driver principali del cambiamento climatico sono certe sostanze chimiche la cui presenza nell'atmosfera provoca il cosiddetto *effetto serra*: impediscono al calore solare riflesso di disperdersi nello spazio. I gas serra più importanti sono il metano e l'anidride carbonica.

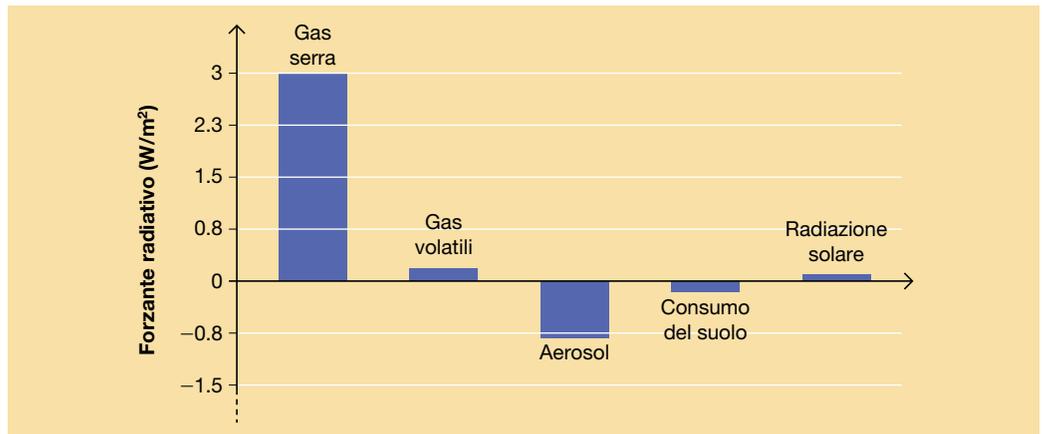
La tabella seguente riporta il forzante radiativo dei principali *driver* antropogenici e naturali.

Driver	Antropogenici				Naturali
	Gas serra	Gas volatili	Aerosol	Consumo del suolo	Radiazione solare
RF (W/m^2)	3.0	0.18	-0.82	-0.15	0.1

► Traccia un grafico a barre per confrontare i vari *driver*, tenendo conto del segno di ciascuno.

Come si fa

Associamo a ogni driver il valore del forzante radiativo, mantenendo l'altezza di ciascuna barra proporzionale al valore di quel parametro. I valori negativi sono rappresentati da barre orientate all'ingiù.



È evidentissima l'importanza dei gas serra, e anche la prevalenza dei fattori antropogenici rispetto all'unico fattore naturale.

Problema 3

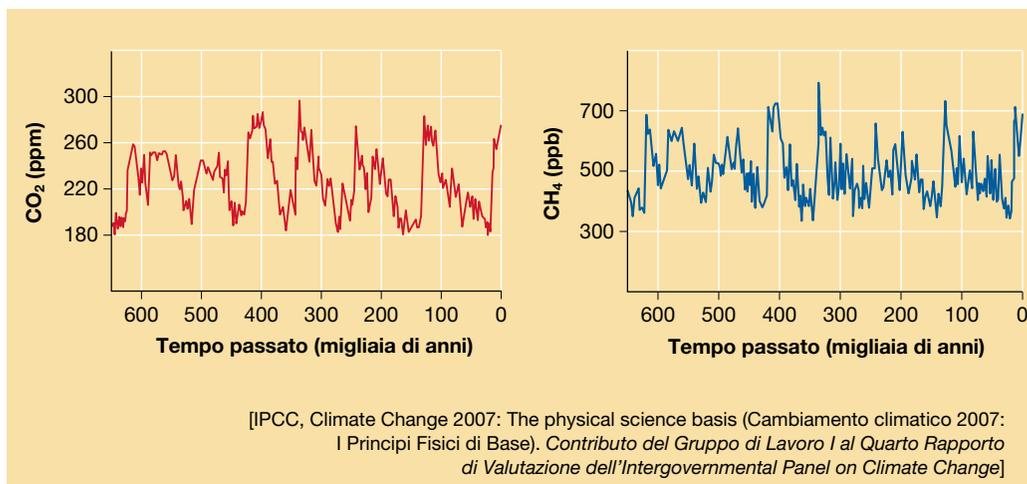
Una prospettiva paleoclimatica dai campioni di ghiaccio

I cambiamenti climatici cui stiamo assistendo sono davvero un problema, o sono forse parte di un ciclo naturale? Come possiamo valutarlo, visto che le prime misure affidabili risalgono appena a due secoli fa?

Possiamo trovare informazioni sul clima delle epoche più antiche in campioni di ghiaccio situati in profondità: negli strati più bassi del ghiaccio antartico sono rimaste intrappolate



bollicine d'aria, provenienti dall'atmosfera contemporanea alla formazione del ghiaccio; possiamo così misurare quanto valeva all'epoca la concentrazione di vari gas. I grafici qui sotto riportano la concentrazione di anidride carbonica (CO_2) in parti per milione (ppm) e metano (CH_4) in parti per miliardo (ppb), in funzione del tempo, misurato in migliaia di anni prima di oggi.



- ▶ Quali sono i valori massimo, minimo e medio della concentrazione dei due gas?
- ▶ Valuta in percentuale lo scarto massimo delle concentrazioni dai valori medi.
- ▶ Dato che oggi le concentrazioni atmosferiche di CO_2 e CH_4 valgono rispettivamente 379 ppm e 1774 ppb, valuta lo scarto attuale dalle medie storiche e confrontalo con le fluttuazioni passate.

Come si fa

Leggiamo i grafici e facciamo i calcoli

Se avessimo gli insiemi completi dei valori delle concentrazioni dei gas, potremmo valutarne la dispersione con la deviazione standard; i due grafici sono però la nostra unica fonte di informazioni, dobbiamo quindi basarci sui dati che vi figurano per qualsiasi deduzione. Possiamo valutare i valori medi come la media tra i valori di minimo e di massimo.

La concentrazione massima dell'anidride carbonica è circa 300 ppm e il minimo è 180 ppm, quindi per il valore medio abbiamo:

$$\bar{c}_{\text{CO}_2} = \frac{300 + 180}{2} = 240 \text{ ppm.}$$

Svolgendo la stessa analisi per il metano troviamo una concentrazione minima di circa 330 ppb e una massima di 780 ppb, perciò:

$$\bar{c}_{\text{CH}_4} = \frac{330 + 780}{2} = 555 \text{ ppb.}$$

Lo scarto massimo della media è pari alla metà dell'intervallo di variazione:

$$\Delta c_{\text{CO}_2} = \frac{300 - 180}{2} = 60 \text{ ppm;}$$

$$\Delta c_{\text{CH}_4} = \frac{780 - 330}{2} = 225 \text{ ppb.}$$

Possiamo esprimere questi valori come percentuali delle medie:

$$\frac{\Delta c_{\text{CO}_2}}{\bar{c}_{\text{CO}_2}} = \frac{60}{240} \cdot 100\% = 25\%;$$

$$\frac{\Delta c_{\text{CH}_4}}{\bar{c}_{\text{CH}_4}} = \frac{225}{555} \cdot 100\% \approx 41\%.$$

Confrontiamo le differenze delle medie con i valori attuali

A oggi la concentrazione di anidride carbonica è 379 ppm, valore che differisce di 139 ppm dalla media storica. Lo scarto attuale è quindi $\frac{139}{240} \cdot 100\% = 58\%$, più del doppio di qualsiasi scarto storico.

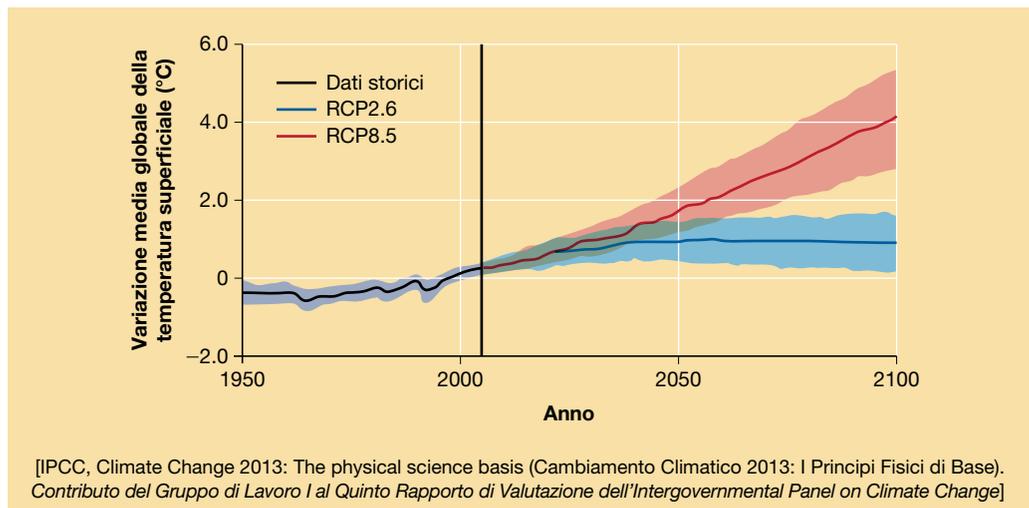
La concentrazione di metano è 1774 ppb, valore che differisce di 1219 ppb dalla media storica. Lo scarto attuale è quindi $\frac{1219}{555} \cdot 100\% = 220\%$, oltre il quintuplo di qualsiasi scarto storico.

Problema 4

Che cosa succederà ai nostri nipoti?

Che cosa succederà al clima nel corso dei prossimi cento anni? Naturalmente dipende dal nostro comportamento attuale e futuro. Si sono elaborati vari modelli per predire le variazioni di alcuni parametri climatici (la temperatura, il livello del mare, l'estensione del ghiaccio, le precipitazioni, ecc.), secondo scenari che corrispondono a varie possibilità per il comportamento umano e che si ripercuotono soprattutto sull'entità delle emissioni di anidride carbonica.

Il grafico qui sotto mostra l'anomalia di temperatura superficiale della Terra, secondo due scenari estremi. La curva nera e la sua fascia corrispondono ai dati misurati fino al 2005. La curva azzurra e la sua fascia rappresentano lo scenario migliore, detto RCP2.6, corrispondente all'ipotesi che inizi subito un calo significativo delle emissioni di gas serra. La curva rossa e la sua fascia rappresentano uno scenario detto RCP8.5, secondo cui le emissioni continuano ad aumentare fino alla fine del secolo.



- ▶ Se le emissioni iniziano a calare subito, quanto tempo passerà prima che la temperatura smetta di salire?
- ▶ Secondo lo scenario RCP8.5, quali saranno nel 2100 il massimo e il minimo più probabili per l'anomalia di temperatura?
E quali saranno nel XXI secolo il massimo e il minimo più probabili per il tasso di crescita della temperatura?
- ▶ Secondo lo scenario RCP2.6, quali saranno nel 2100 il massimo e il minimo più probabili per l'anomalia di temperatura?
E quali saranno nel XXI secolo il massimo e il minimo più probabili per il tasso di crescita della temperatura?

Come si fa

Vista l'incertezza su molte condizioni, questi modelli non forniscono come risultato finale una singola cifra o curva, ma un'intera gamma di esiti possibili, associandovi probabilità diverse. Per ciascun modello e ciascun parametro il grafico risultante non è soltanto una curva: la curva (che rappresenta l'esito più probabile) è inserita in una fascia colorata (detta anche *intervallo di previsione* che rappresenta gli altri esiti possibili nell'ambito dello stesso scenario).

Dalla figura possiamo vedere che anche nello scenario migliore (curva e fascia azzurre), secondo cui dovrebbe iniziare subito un calo delle emissioni, la temperatura continuerebbe a salire fino al 2050 circa, poi si manterrebbe costante fino alla fine del secolo.

Scenario peggiore

Secondo lo scenario RCP8.5 (curva e fascia rosse), nel 2100, l'anomalia di temperatura più probabile sarebbe di 4.1 °C. In questo scenario l'anomalia minima di temperatura è 2.8 °C e quella massima vale 5.4 °C, corrispondenti ai bordi inferiore e superiore della fascia rossa. Per calcolare il tasso di variazione nello scenario RCP8.5, cominciamo osservando che all'inizio del secolo l'anomalia di temperatura è di 0,3 °C. In questo scenario il tasso di variazione più probabile sarebbe quindi:

$$r_{pp} = \frac{4.1 - 0.3}{100} = 0.038 \text{ °C/anno}$$

e i valori di minimo e massimo:

$$r_{min} = \frac{2.8 - 0.3}{100} = 0.025 \text{ °C/anno}; \quad r_{max} = \frac{5.4 - 0.3}{100} = 0.051 \text{ °C/anno}.$$

Scenario migliore

Secondo lo scenario RCP2.6 (curva e fascia azzurre), nel 2100, l'anomalia di temperatura più probabile sarebbe di 1.0 °C. In questo scenario l'anomalia minima di temperatura è 0.2 °C e quella massima vale 1.8 °C, corrispondenti ai bordi inferiore e superiore della fascia azzurra.

Nello scenario RCP2.6, perciò, il tasso di variazione più probabile sarebbe:

$$r_{pp} = \frac{1.0 - 0.3}{100} = 0.007 \text{ °C/anno}$$

e i valori di minimo e massimo:

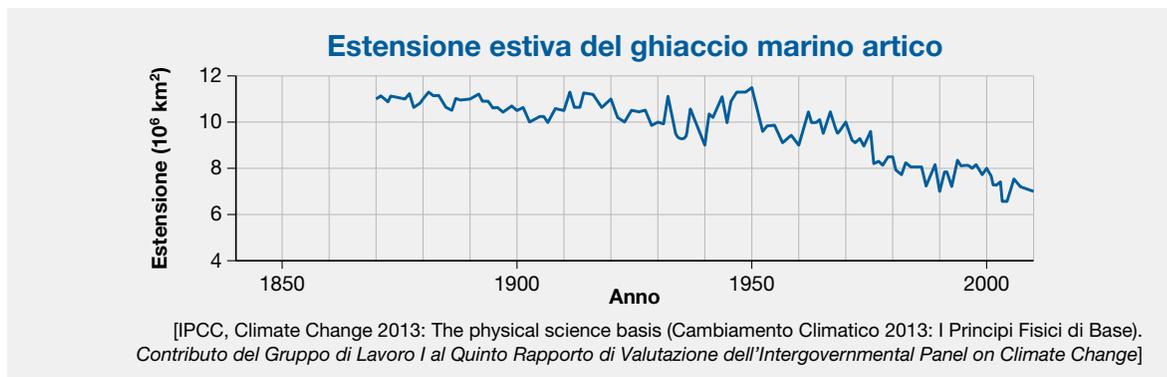
$$r_{min} = \frac{1.8 - 0.3}{100} = 0.015 \text{ °C/anno}; \quad r_{max} = \frac{0.2 - 0.3}{100} = -0.001 \text{ °C/anno}.$$

In quest'ultimo caso, l'anomalia di temperatura diminuirebbe leggermente nel corso del secolo, così che il tasso di variazione sarebbe negativo.



ESERCIZI PROPOSTI

- 1** **Variazioni osservate nel sistema climatico: scioglimento dei ghiacci** Il grafico riporta l'estensione estiva del ghiaccio marino artico in funzione del tempo, a partire da fine Ottocento; l'estensione è misurata in milioni di chilometri quadrati.



- Per semplificare l'analisi dei dati, ricava dal grafico il valore di y a intervalli decennali (per il 1880, il 1890 e così via) e riporta queste informazioni in una tabella.
- Stima, in percentuale, l'estensione di ghiaccio scomparsa tra il 1950 e il 2000.
- Riporta in un grafico i punti della tabella e determina la retta di regressione; spiega cosa significa il suo coefficiente angolare.
- Usa la formula della retta di regressione per stimare l'estensione del ghiaccio nel 2100 in base all'andamento attuale.

- 2** **Esiste il riscaldamento globale?** La temperatura cambia nel corso della giornata, per via dello spostamento apparente del Sole (cioè la rotazione terrestre); cambia nel corso dell'anno, a seconda della posizione della Terra nell'orbita attorno al Sole; cambia nel corso di un'era geologica, e a volte anche su tempi più brevi, per varie cause naturali, come le variazioni della radiazione solare. Ma allora, dobbiamo preoccuparci per un aumento della temperatura media?

Per rispondere a questa domanda, possiamo confrontare le variazioni attuali della temperatura con quelle naturali, che si verificano a lungo termine. La tabella qui sotto ricostruisce le anomalie di temperatura sulla Terra nel corso degli ultimi 1300 anni, ottenute in base a vari parametri indicativi, come lo spessore degli anelli di crescita degli alberi o l'analisi delle carote di ghiaccio.

Il livello zero è stato fissato alla media delle temperature tra il 1961 e il 1990.

- Riporta in un grafico la temperatura in funzione del tempo.
- Calcola la temperatura media e la sua deviazione standard nell'era preindustriale (cioè fino al 1850).
- Calcola lo scarto attuale dalla media preindustriale, e confrontalo con la deviazione standard preindustriale.

Anno	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100	1150	1200	1250	1300	1350
Anomalia di temperatura (°C)	-0.4	-0.4	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.2	-0.4	-0.3	-0.4	-0.5	-0.4
Anno	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700	1750	1800	1850	1900	1950	2000	
Anomalia di temperatura (°C)	-0.3	-0.5	-0.4	-0.4	-0.6	-0.6	-0.5	-0.4	-0.3	-0.4	-0.3	0	0.5	

[IPCC, Climate Change 2007: The physical science basis (Cambiamento climatico 2007: I Principi Fisici di Base). Contributo del Gruppo di Lavoro I al Quarto Rapporto di Valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change]

3 Evoluzione dei *driver* del cambiamento climatico

La tabella riporta il forzante radiativo totale (RF) dei *driver* antropogenici e naturali a partire dal 1950.

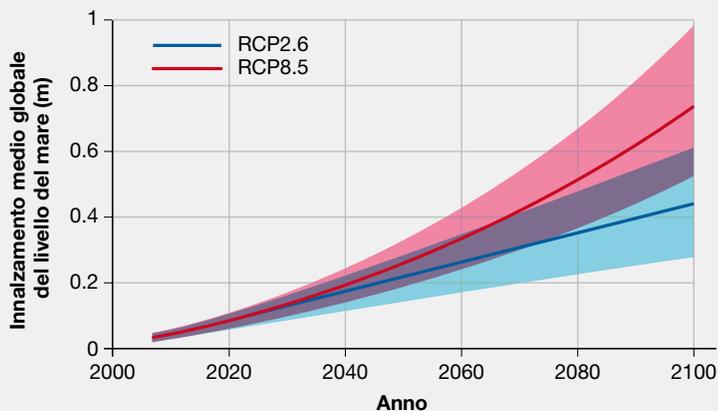
- Traccia un insieme di grafici a torta per mostrare come è cambiato nel corso del tempo il peso della componente antropogenica.
- Riporta in un grafico il RF totale in funzione del tempo, e stima il valore che avrà nel 2050 adottando un modello lineare.

	RF antropogenico (W/m ²)	RF naturale (W/m ²)
1950	0.6	0.1
1980	1.2	0.1
2005	1.6	0.1
2011	2.2	0.1

4 Il livello del mare in prospettiva

Uno degli effetti del cambiamento climatico è l'innalzamento del livello del mare.

Il grafico qui sotto mostra l'innalzamento medio del livello del mare, rispetto al 2005, secondo le previsioni di due scenari estremi. La curva e la fascia azzurre rappresentano lo scenario migliore, detto RCP2.6, dove si ipotizza che inizi subito un calo rilevante delle emissioni di gas serra. La curva e la fascia rosse rappresentano uno scenario detto RCP8.5, secondo cui le emissioni continueranno ad aumentare fino alla fine del secolo.



[IPCC, Climate Change 2013: The physical science basis (Cambiamento Climatico 2013: I Principi Fisici di Base). Contributo del Gruppo di Lavoro I al Quinto Rapporto di Valutazione dell'Intergovernmental Panel on Climate Change]

- Se le emissioni iniziano subito a calare, il livello del mare smetterà di salire?
- Secondo lo scenario RCP8.5, quali saranno nel 2100 il massimo e minimo più probabili per il livello del mare?
- Secondo lo scenario RCP8.5, quali saranno nel XXI secolo il massimo e il minimo più probabili per il tasso di variazione del livello del mare?
- Secondo lo scenario RCP2.6, quali saranno nel 2100 il massimo e minimo più probabili per il livello del mare?
- Secondo lo scenario RCP2.6, quali saranno nel XXI secolo il massimo e il minimo più probabili per il tasso di variazione del livello del mare?

