

AEROSOL, NUBI E CLIMA

Gianni Comini

CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente

Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine

gianni.comini@cism.it

26 giugno 2024

1 Effetto “serra”

A partire dagli anni '70 del secolo scorso sono cresciute considerevolmente le emissioni di gas serra nell'atmosfera e, di pari passo, è aumentata la temperatura media globale. Il processo, ben illustrato nel post “Gas serra e cambiamento climatico”, è legato al fatto che la radiazione infrarossa “di ritorno” dai limiti dell'atmosfera aumenta al crescere della concentrazione di gas serra. Come si vede dal bilancio energetico della Terra riportato nella Figura 1, per compensare tale radiazione la superficie terrestre deve emettere un flusso radiativo molto superiore a quello ricevuto dal Sole e, per farlo, deve aumentare la sua temperatura media globale.

D'altra parte, in assenza di atmosfera, la temperatura media terrestre sarebbe pari a circa $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ e quindi, se la temperatura media attuale è troppo alta, anche i $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ non sarebbero troppo confortevoli. Pertanto, appare ragionevole considerare “naturale” l'effetto serra che si aveva durante il periodo preindustriale (1850-1900), e misurare da quel livello l'anomalia termica, ovvero l'aumento della temperatura media globale.

Nelle statistiche “ufficiali” (si veda, ad esempio, il già citato post “Gas serra e cambiamento climatico”), i principali gas serra sono, in ordine di importanza:

- anidride carbonica,
- metano,
- biossido di azoto e
- gas fluorurati.

Nell'elenco non compare il vapore d'acqua che è il più importante dei gas serra, responsabile per 2/3 dell'aumento della temperatura media globale rispetto all'epoca preindustriale, e la spiegazione sta nel fatto che il vapore d'acqua presente nell'atmosfera non è la causa ma una conseguenza del cambiamento climatico. Infatti, i gas serra sopraelencati innescano un aumento della temperatura, e tale aumento intensifica i processi di evaporazione immettendo nell'aria più vapore acqueo che, essendo a sua volta un gas serra molto

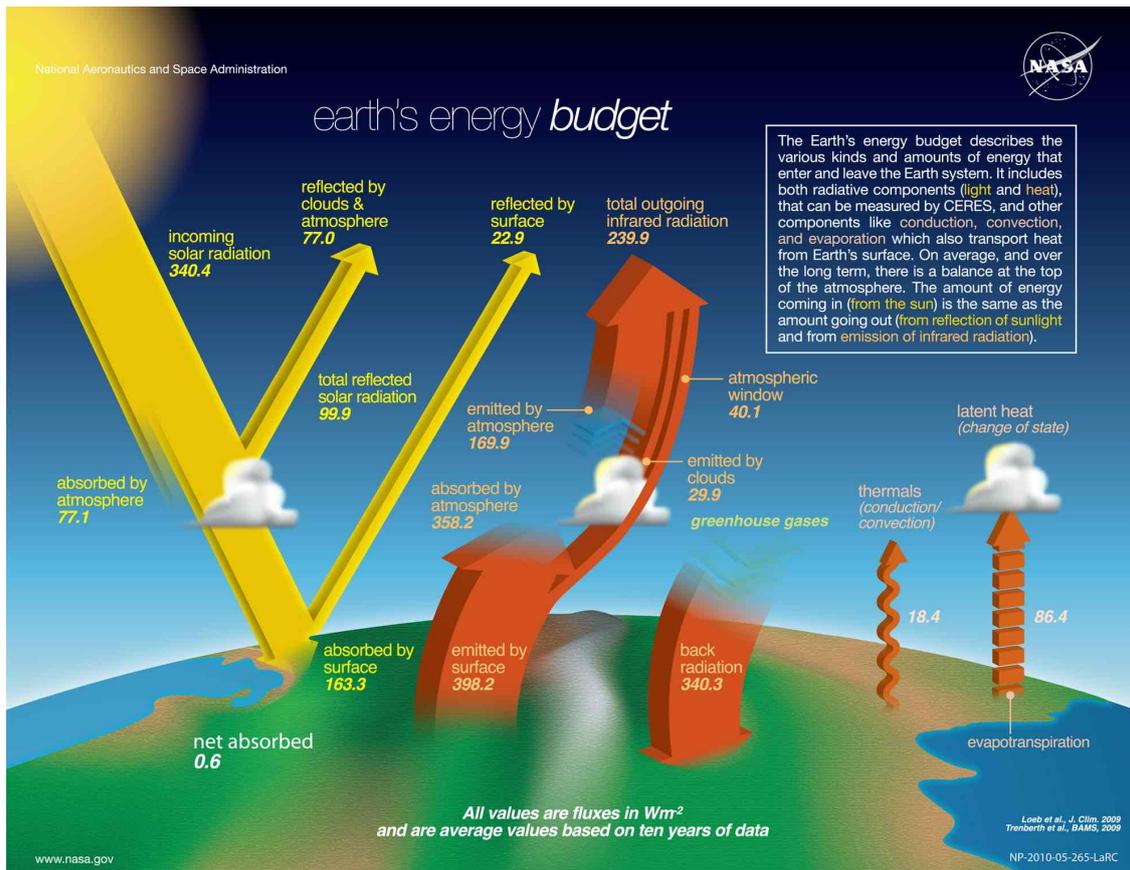


Figura 1: Bilancio energetico della Terra con evidenziati i flussi di energia che entrano ed escono dai limiti dell'atmosfera (in alto) e dalla superficie terrestre (in basso), insieme con gli scambi termici che hanno luogo all'interno dell'atmosfera [NASA].

potente, amplifica ulteriormente l'aumento di temperatura che ci sarebbe stato anche in sua assenza. Siamo, quindi, in presenza di quello che, in teoria dei sistemi, viene definito un processo a feedback (in italiano "retroazione") positivo.

D'altra parte, un esame anche sommario del bilancio energetico della Terra riportato nella Figura 1, mostra che il sistema climatico del nostro Pianeta non è condizionato soltanto dalla concentrazione di gas climalteranti, ma dipende anche da un insieme complesso di influenze tra le quali spiccano quelle esercitate da nubi ed aerosol atmosferici. Capire queste influenze è quindi di vitale importanza per prevedere l'evoluzione del clima e mettere in atto misure efficaci di mitigazione e adattamento.

Evidentemente, spetta ai climatologi formulare previsioni quantitative accurate sull'evoluzione del clima ma, ad esempio, interessa tutti noi scoprire se, in futuro, nubi e aerosol contribuiranno a mitigare o ad aggravare il riscaldamento globale indotto dai gas serra (ovvero se innescheranno processi a "feedback" negativo o positivo). A queste domande si cercherà di rispondere nel seguito di questo studio restando, tuttavia, nei limiti propri di una trattazione non specialistica.

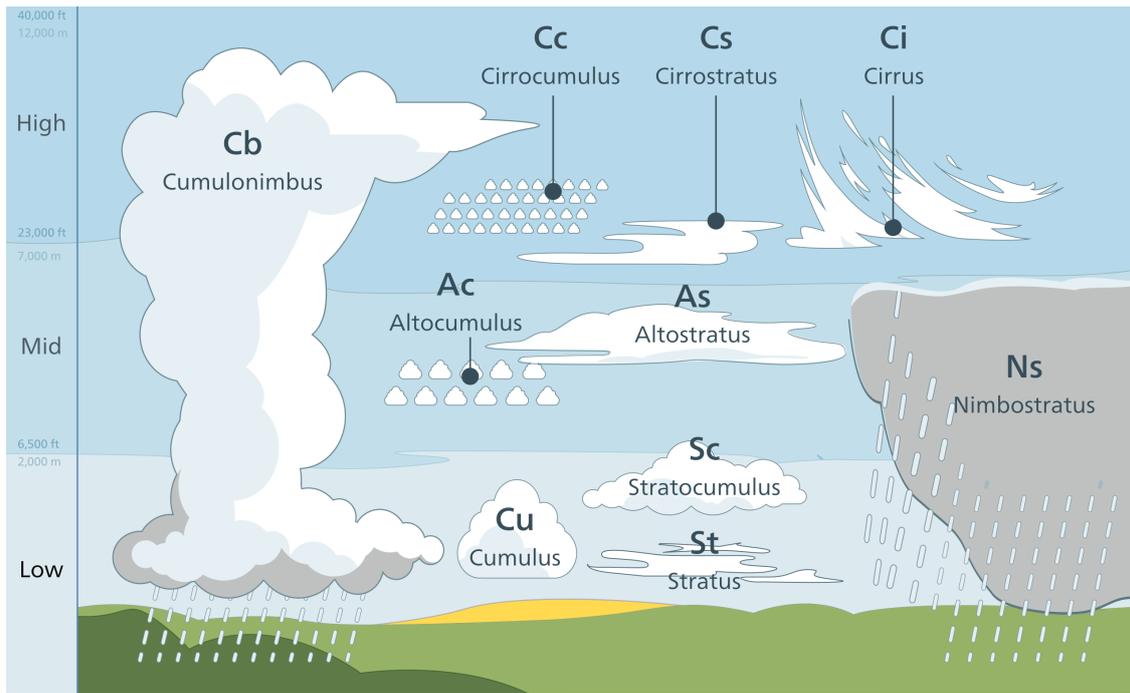


Figura 2: Principali tipi di nubi, raggruppati per altezza e forma, identificati dai nomi latini e dalle sigle internazionali a due lettere [Wikipedia].

2 Le nubi

È esperienza comune che le nubi interferiscano non solo con la radiazione solare in entrata ma anche con le radiazioni infrarosse in uscita, dal momento che, ad esempio, sia le temperature massime estive sia le temperature minime invernali vengono raggiunte quando il cielo è sereno. Generalizzando, si può dire che le nubi sono in grado di esercitare sia un effetto raffreddante (feedback negativo), riflettendo parte della radiazione solare in arrivo, sia un effetto riscaldante (feedback positivo), assorbendo parte della radiazione infrarossa proveniente dalla superficie terrestre.

L'effetto raffreddante aumenta con la copertura nuvolosa, ovvero con la percentuale di superficie sovrastata dalle nubi, e con la riflettanza, o "albedo" delle nubi stesse. A sua volta, l'albedo aumenta al crescere del numero di goccioline d'acqua incontrate nel loro percorso dai raggi solari, ovvero con il prodotto della densità di goccioline presenti nelle nubi per lo spessore delle nubi stesse.

L'effetto riscaldante aumenta con la differenza tra i flussi infrarossi in arrivo e in partenza dalle nubi. Infatti, le nubi assorbono parte della radiazione infrarossa proveniente dalla superficie terrestre e la irradiano di nuovo in tutte le direzioni (ovvero, complessivamente, in parti uguali verso lo spazio libero in alto e verso la superficie terrestre in basso). In una situazione di questo tipo, però, le nubi si trovano a temperatura minore della superficie terrestre e ricevono un flusso radiativo maggiore (perché proveniente da una sorgente a temperatura più alta) di quello che poi riemettono a temperatura più bassa. Infatti, è la differenza positiva tra i due flussi ad esercitare l'effetto riscaldante sull'atmosfera e, quin-

di, si capisce perché l'effetto riscaldante cresca all'aumentare dell'altezza delle nubi in quanto, con l'altezza, diminuisce la temperatura delle nubi.

Come illustrato anche nella Figura 2, con l'esclusione dei cumulonembi e dei nembostrati che hanno un forte sviluppo verticale, le nubi rientrano in una delle tre categorie sottocitate:

- nubi alte come i cirri, i cirrostrati e i cirrocumuli;
- nubi medie come gli altocumuli e gli altostrati e
- nubi basse come i cumuli, gli stratocumuli e gli strati.

(In questa classificazione, i cumulonembi, associati ai temporali, e i nembostrati, associati alle precipitazioni sotto forma di pioggia o neve, rientrerebbero in una quarta categoria, che non interessa questo studio).

Dalla stessa Figura 2, si vede che le nubi basse sono caratterizzate da spessori considerevoli e, quindi, riflettono una frazione significativa della radiazione solare in arrivo. Inoltre, stazionando ad altezze limitate, si trovano a temperature prossime a quelle della superficie terrestre e, di conseguenza, non esercitano sull'atmosfera un effetto riscaldante significativo. Complessivamente, la riflessione di gran parte dell'energia solare e l'effetto riscaldante ridotto fanno sì che le nubi basse agiscano come moderatrici del clima (feedback negativo).

Per contro, dalla Figura 2 si vede che le nubi alte sono caratterizzate da spessori ridotti e, quindi, lasciano passare la maggior parte della radiazione solare in arrivo. Inoltre, stazionando a grandi altezze si trovano a temperature molto inferiori a quella della superficie terrestre e, di conseguenza, esercitano sull'atmosfera un effetto riscaldante significativo. Complessivamente, la trasparenza all'energia solare e l'effetto riscaldante significativo fanno sì che le nubi alte contribuiscano al riscaldamento ambientale (feedback positivo).

Per completezza, si può dire anche che le nubi medie hanno un comportamento neutro (feedback trascurabile) ovvero, come era da aspettarsi, intermedio tra quelli delle nubi basse e delle nubi alte.

Attualmente (2024), prevalgono le nubi basse e quindi, complessivamente, il sistema delle nubi contribuisce a moderare l'aumento della temperatura media globale. D'altra parte, tra i climatologi vi è consenso sul fatto che le nubi siano, a loro volta, condizionate dal riscaldamento ambientale, al punto da invertire il contributo al clima e far sì che, in futuro, il sistema delle nubi anziché moderare finirà per accentuare il riscaldamento ambientale. Per giustificare questa inversione di tendenza collegata all'aumento della temperatura media globale, nella letteratura vengono citati tre processi che saranno discussi nel seguito.

2.1 Il futuro delle nubi

I climatologi si aspettano che, in futuro, il sistema delle nubi contribuirà, complessivamente, ad accentuare il riscaldamento ambientale, a causa di tre processi legati all'aumento della temperatura media globale:

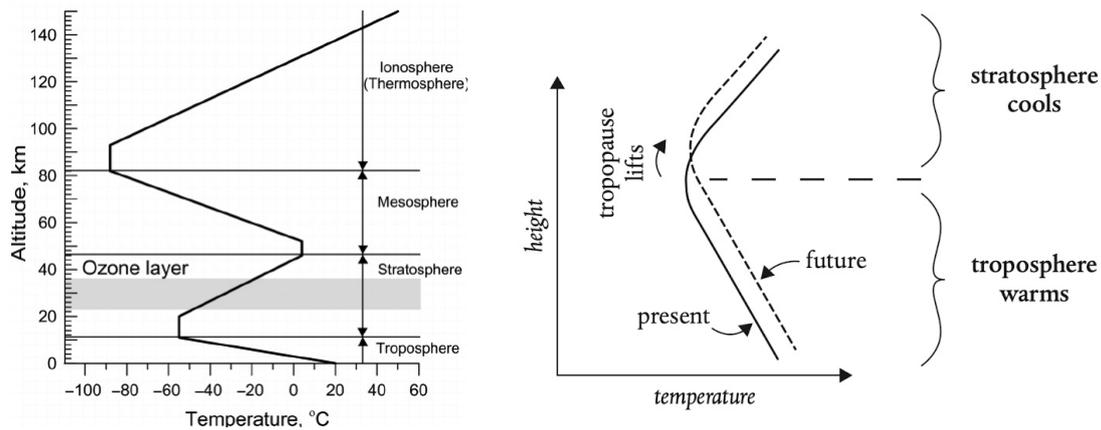


Figura 3: Attuale andamento della temperatura nei diversi strati dell'atmosfera a sinistra [T. Kalitita], e confronto tra andamento attuale e futuro della temperatura nella troposfera e nella stratosfera a destra [T. Woolings].

- aumento di quota della tropopausa (la zona che segna il confine tra troposfera e stratosfera) e conseguente dilatazione della troposfera con spostamento verso l'alto delle nubi;
- diradamento delle nubi basse;
- diminuzione del numero di goccioline mediamente contenute, per unità di volume, nelle nubi e conseguente diminuzione della riflettenza delle nubi stesse.

I primi due processi saranno illustrati in questo paragrafo mentre il terzo, legato all'interazione tra nubi ed aerosol, sarà discusso nel paragrafo successivo.

2.1.1 Aumento di quota della tropopausa

Per spiegare questo effetto, conviene partire dall'esame dell'attuale andamento verticale delle temperature nei diversi strati dell'atmosfera, schematizzato nella Figura 3 a sinistra. Come si vede, nella tropopausa si ha una inversione termica che blocca ogni possibilità di ulteriore risalita delle nubi. Tale inversione è il risultato della diminuzione della temperatura con la quota nella troposfera, a causa del graduale ridursi della pressione atmosferica, e del contemporaneo aumento di temperatura con la quota nella stratosfera, a causa del riscaldamento dovuto all'assorbimento delle radiazioni solari ultraviolette da parte dell'ozono.

In questo quadro, il continuo aumento nella concentrazione atmosferica di anidride carbonica, ha conseguenze termiche diverse nella troposfera e nella stratosfera, con gli effetti schematizzati nella Figura 3 a destra. Nella troposfera si ha il ben noto aumento di temperatura (a parità di quota) con il risultante spostamento a destra della curva delle temperature in funzione dell'altezza. Nella stratosfera, invece, si ha una apparentemente paradossale diminuzione di temperatura (sempre a parità di quota) con il risultante spostamento a sinistra della curva delle temperature in funzione dell'altezza.

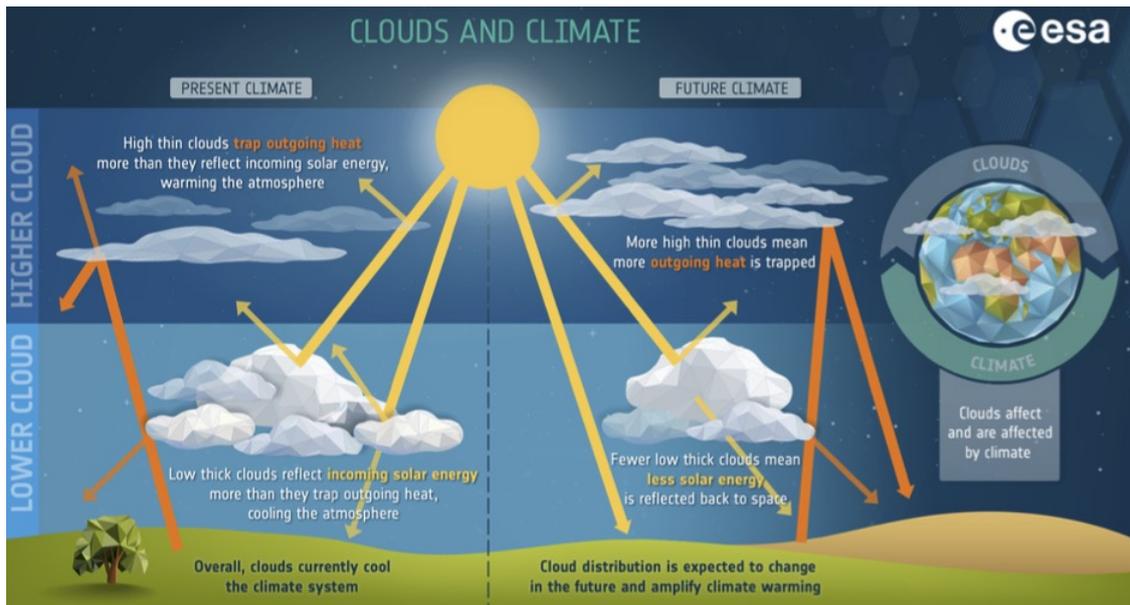


Figura 4: L'attuale prevalenza di nubi basse (a sinistra) ha un effetto raffreddante, mentre la futura prevalenza di nubi alte (a destra) avrà un effetto riscaldante [ESA].

In realtà nella stratosfera, come nella troposfera, l'anidride carbonica fa lo stesso "me-stiere" che è quello di assorbire e rimettere prontamente le radiazioni infrarosse. Nella stratosfera, però, l'anidride carbonica assorbe le radiazioni infrarosse emesse dall'ozono e le reirradia prontamente ma, a causa della bassissima densità dei gas circostanti, tali radiazioni non incontrano altre molecole in grado di riassorbirle e, di conseguenza, finiscono con il disperdersi nello spazio, raffreddando così la stratosfera.

Pertanto, il futuro riscaldamento della troposfera, dovuto all'effetto serra, combinato con il futuro raffreddamento della stratosfera, descritto più sopra, farà salire di quota la tropopausa inducendo una dilatazione nella troposfera e tale dilatazione, a sua volta, farà salire di quota le nubi. In ultima analisi si avrà un aumento nella percentuale di nubi alte e ciò farà sì che, complessivamente, l'effetto esercitato dalle nubi passi da raffreddante a riscaldante come illustrato nella Figura 4.

2.1.2 Diradamento delle nubi basse

Negli ultimi anni le osservazioni satellitari, interpretate con metodologie statistiche, hanno dimostrato che l'aumento della temperatura media globale è associato anche ad una riduzione della copertura nuvolosa bassa (particolarmente accentuata nell'oceano subtropicale). La spiegazione fornita per giustificare questo diradamento si basa sulla constatazione che, all'aumentare della temperatura, l'aria può contenere più vapore senza arrivare alla saturazione e, quindi, senza arrivare alla formazione di goccioline e nubi.

Si tratta di una spiegazione non del tutto convincente e, ad esempio, l'IPCC non la riporta nella sua analisi sui futuri contributi delle nubi al riscaldamento ambientale. D'altra parte, la tendenza al diradamento delle nubi basse all'aumentare della temperatura me-

dia globale è certa, come è certo che le nubi basse riflettano una frazione significativa della radiazione solare in arrivo. Pertanto, ci si deve aspettare un effetto riscaldante dal diradamento della copertura nuvolosa bassa, qualunque sia la causa della riduzione nella copertura nuvolosa.

2.1.3 Diminuzione delle goccioline nelle nubi

Come si vedrà meglio nel paragrafo che segue, il numero di goccioline mediamente contenute per unità di volume nelle nubi, dipende dalla concentrazione di aerosol nell'atmosfera ovvero dal numero, per unità di volume, delle particelle in sospensione nell'atmosfera. Infatti, sono tali particelle che, agendo da nuclei di condensazione, consentono la formazione delle goccioline nelle nubi. Poiché, la riflettenza di una nube diminuisce al diminuire del numero di goccioline incontrate dai raggi solari nell'attraversare la nube stessa, si può affermare che la riflettenza delle nubi diminuirebbe al diminuire della concentrazione di aerosol nell'atmosfera, ovvero diminuirebbe al ridursi dell'inquinamento atmosferico (che è l'obiettivo ecologico a cui si dovrà necessariamente tendere in futuro).

3 Aerosol e nubi

Con il nome di "aerosol atmosferici" si intendono gli insiemi di piccole particelle, solide o liquide, in sospensione nell'atmosfera. Le dimensioni delle particelle variano tra quelle di una molecola di DNA (qualche nanometro), fino a quelle di un capello umano (qualche millesimo di millimetro). Le dimensioni sono molto importanti perché condizionano il tempo in cui le particelle possono rimanere in sospensione e, come è ben noto, le goccioline/particelle più piccole restano in sospensione più a lungo.

Esistono aerosol di origine naturale e aerosol di origine antropica. Gli aerosol di origine naturale comprendono, ad esempio, i pollini, le polveri minerali, gli spray marini e le ceneri vulcaniche, mentre gli aerosol di origine antropica comprendono, ad esempio, le polveri prodotte dal traffico (usura di freni, pneumatici ed asfalto), i particolati prodotti dalle combustioni e quelli derivanti da attività industriali (con, in prima linea, la metallurgia e la produzione di cemento).

Come schematizzato nella Figura 5, gli aerosol esercitano effetti importanti sul clima sia direttamente, riflettendo parzialmente la radiazione solare entrante, sia indirettamente agendo come nuclei di condensazione durante il processo di formazione delle nubi. Va subito precisato che gli effetti indiretti sono i più importanti in quanto all'aumentare della concentrazione di aerosol nell'atmosfera cresce il numero di goccioline contenute per unità di volume nelle nubi e con esso cresce la riflettenza della nubi stesse.

Ovviamente sia l'effetto diretto sia quello indiretto contribuiscono a moderare l'aumento della temperatura media globale. Infatti, fino agli anni '70 del secolo scorso ci si chiedeva se la temperatura media globale fosse destinata a diminuire a causa dell'aumento della concentrazione di aerosol legata all'inquinamento, o a crescere a causa dell'aumento nella concentrazione atmosferica di gas serra.

L'aumento, continuo della temperatura media globale negli ultimi 50 anni ha dissipato i dubbi di questo tipo. Per contro sono sorti dubbi sul possibile andamento della concentrazione di aerosol nell'atmosfera e, quindi, sull'importanza del loro effetto raffreddante.

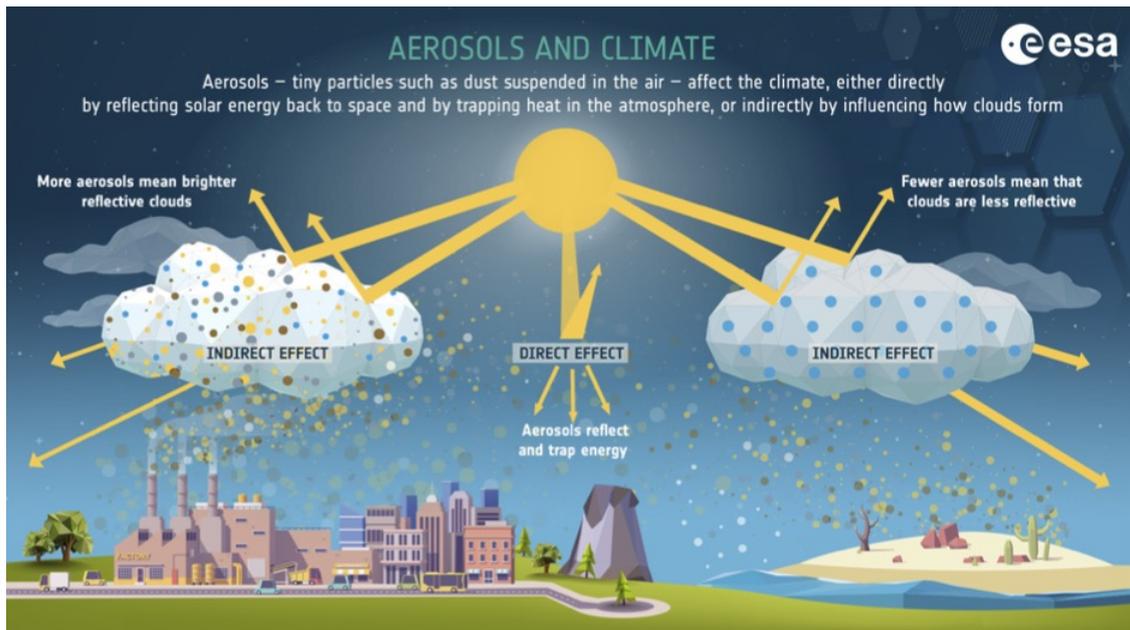


Figura 5: Effetti indiretti e diretto degli aerosol sul clima. A sinistra effetto indiretto attuale, al centro effetto diretto attuale e futuro e a destra effetto indiretto futuro [ESA].

È vero che un aumento della concentrazione di inquinanti contribuirebbe a moderare il riscaldamento globale, ma è vero anche che un tale effetto benefico sarebbe pagato a caro prezzo con i danni che l'inquinamento atmosferico crescente provocherebbe alla salute umana.

Di conseguenza, è ragionevole pensare che la situazione schematizzata a sinistra della Figura 5 riguardi il passato e che, in futuro, si tenda a realizzare la situazione schematizzata a destra della Figura 5. In tale situazione si ridurrebbe l'effetto diretto di riflessione da parte degli aerosol, ma si ridurrebbe ancor più l'effetto di indiretto di riflessione da parte delle nubi. Ciò avrebbe enormi vantaggi per la salute ma accentuerebbe il riscaldamento globale al quale, comunque, si potrebbe, auspicabilmente, far fronte riducendo le emissioni di gas serra.

Bibliografia

C.D. Ahrens e R. Henson, *Meteorology Today - An Introduction to Weather, Climate and the Environment - 13^a ed.*, Cengage, Boston, Ma., 2022.

M. Allen, *Clouds in the sky provide new clues to predicting climate change*, Horizon - The EU Research and Innovation Magazine, 8 marzo 2023.

C. Cassardo e altri, *Temporali e Tornado*, Alpha Test, Milano, 2020.

P. Ceppi e P. Nowack, *Observational evidence that cloud feedback amplifies global warming*, Proceedings National Academy of Science - USA, 19 luglio 2021.

G. Comini, *Gas Serra e Cambiamento Climatico*, CISM, 2023.

G. Comini, *Temporal Fulmini e Grandine*, CISM, 2023.

G. Comini, *Il Bilancio "Sbilanciato" dell'Energia sulla Terra*, CISM, 2024.

G. Comini e M. Libralato, *Il Cambiamento Climatico - Il Punto di Vista Fisico-Tecnico*, Nuova Edizione, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

G. Comini e G. Cortella, *Fondamenti di Trasmissione del Calore*, Ristampa della Quarta Edizione, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

G. Comini e S. Savino, *Fondamenti Termodinamici dell'Energetica*, Terza Edizione Rivista e Aggiornata, libreriauniversitaria.it edizioni, Padova, 2022.

Copernicus, *Aerosols: are SO2 emission reductions contributing to global warming?*, Atmosphere Monitoring Service, Visto il 23 giugno 2024.

EPA - United States Environmental Protection Agency, *Basics of Climate Change*, Climate Change Science, Visto il 23 giugno, 2024.

ESA - Agenzia Spaziale Europea, *Clouds and aerosols in the climate system*, Applications, Visto il 23 giugno, 2024.

IPCC, *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis*, Capitolo 7, Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report, 2021.

A. Frankling-Cheung, *If global warming increases rainfall, could the extra clouds block sunlight and help cool the Earth?*, BBC - Science Focus, Visto il 23 giugno 2024.

ESPERE Climate Encyclopaedia, *Upper Atmosphere*, Max Planck Research School on Atmospheric Chemistry and Physics, visto il 23 giugno 2024.

Meteo Expert, *Manuale di Meteorologia*, Alpha Test, Milano, 2019.

Meteo Swiss, *Aerosols and climate*, Visto il 23 giugno 2024.

NASA, *The Study of Earth as an Integrated System*, Earth System Science, Visto il 23 giugno 2024.

National Geographic, *Cloud cover*, Education, Visto il 23 giugno 2024.

F. Pearce, *Why clouds are the key to new troubling projections on warming*, Yale Environment 360, 5 febbraio 2020.

Royal Belgian Institute for Space Aeronomy, *Rising CO2 levels also cause cooling in the upper layers of the atmosphere*, BIRA-IASB, Amsterdam, 25 maggio 2021.

K.V. von Schuckmann e al., *Heat stored in the Earth system 1960–2020: where does the energy go?*, Earth System Science Data, Copernicus Publications, vol. 15, pp. 1675–1709, 2023.

K.E. Trenberth, *The Changing Flow of Energy Through the Climate System*, Cambridge University Press, 2022.

Wikipedia, *Earth's energy budget*, Visto 1 luglio 2023.

Wikipedia, *List of Cloud Types*, Visto 9 ottobre 2023.

T. Woollings, *Jet Stream - A Journey Through our Changing Climate*, Oxford University Press, Oxford, 2020.

WMO - World Meteorological Organization, *International Cloud Atlas - Manual on the Observation of Clouds and Other Meteors*, WMO - No. 407, 1975 e aggiornamenti successivi visti il 9 ottobre 2023.