

Aria pesante: un problema da risolvere

Gas serra, gas inquinanti e particolato: una minaccia per la vita futura del nostro pianeta

Introduzione

L'aria che respiriamo tutti i giorni ha una composizione adatta alla vita degli organismi che popolano la terra. Tale concentrazione non è troppo bassa da impedire la vita degli organismi aerobi eterotrofi come l'essere umano, e non è troppo alta da produrre una miscela gassosa troppo reattiva (esplosiva) nei confronti del materiale organico. Non considerando il vapore acqueo presente (aria secca) l'aria è costituita da azoto (N_2) al 78% in volume, ossigeno (O_2) al 21%, argon (Ar) al 0.9% e anidride carbonica (CO_2) 0.04%. L'origine del gas argon deriva dal decadimento radioattivo dell'isotopo 40 dell'elemento potassio (^{40}K) che si trasforma nell'isotopo argon 40 (^{40}Ar). Il potassio, come ione, si trova diffusamente nei minerali e nelle rocce della crosta terrestre. Tuttavia, la composizione dell'aria nell'atmosfera della terra ha subito evoluzioni nel tempo. Cinque miliardi di anni fa, essa era priva di ossigeno e non esistevano organismi aerobi. Le prime tracce di

ossigeno comparvero solo 2-1,5 miliardi di anni fa, quando i primi organismi autotrofi furono in grado di produrre O_2 cibandosi della CO_2 prodotta da organismi eterotrofi che vivevano in assenza di ossigeno. Nel periodo che va tra 540 milioni di anni fa ad oggi la concentrazione di ossigeno è aumentata fino a un massimo del 30%, per poi stabilizzarsi all'attuale valore (Holland 2006). La presenza nell'aria di gas come CO_2 e H_2O nella troposfera,¹ garantisce il mantenimento di una temperatura media sulla terra di 15°C, compatibile con la vita, e una limitata escursione termica giorno/notte. Ciò è dovuto al cosiddetto effetto serra. Il 50% dei raggi provenienti dal sole (ultravioletti, visibili e infrarossi) vengono assorbiti dalla crosta terrestre che si scalda. Ogni corpo che si scalda diventa sorgente di radiazioni infrarosse. In questo caso, tali radiazioni vanno dalla crosta terrestre all'atmosfera dove incontrano i due gas CO_2 e H_2O (denominati gas serra), i quali hanno la

1 Lo strato di aria che si estende dalla superficie della terra verso l'atmosfera per circa 18 km.

caratteristica di assorbire tale radiazione emettendo calore, che si traduce nella riemissione di altra radiazione infrarossa. Tale radiazione, in una certa percentuale, raggiunge la crosta terrestre e questo processo di assorbimento ed emissione si ripete varie volte. L'effetto finale è quello di un riscaldamento della troposfera (effetto serra). Un'altra molecola molto importante per la vita sulla terra è l'ozono (O_3) che è presente nei primi strati della stratosfera.² La molecola di ozono che si forma per

reazione fotochimica tra l'atomo e la molecola di ossigeno, è in grado di assorbire praticamente tutta la radiazione ultravioletta (UV-B e C) proveniente dal sole (100-315 nm), lasciando passare le radiazioni con lunghezza d'onda da 315 nm in su, incluse le radiazioni visibili e infrarosse. Le radiazioni ultraviolette che grazie alla molecola di ozono non arrivano sulla terra sarebbero estremamente nocive per la salute degli organismi che popolano la terra, poiché possiedono una elevata energia.

Emissioni gassose e particolato

Sebbene le attività umane siano rivolte allo sviluppo e al progresso della civiltà, inevitabilmente hanno un impatto non sempre positivo sulla salute del pianeta terra e dei suoi abitanti. Tali attività producono sia gas che particolato, che vengono immessi nell'atmosfera. Prendendo come riferimento gli Stati Uniti d'America, settori come il commercio, i trasporti, le attività industriali, il riscaldamento residenziale e la produzione di energia elettrica consumano quantità ingenti di combustibili fossili (a base di idrocarburi o carbone). In particolare, i trasporti consumano principalmente

i derivati del petrolio, per la generazione di elettricità si usa molto il carbone, per le attività industriali in misura paragonabile petrolio e gas naturale (metano CH_4 , ad esempio).³ Quest'ultimo è molto sfruttato nel riscaldamento residenziale. I gas e il particolato che vengono immessi principalmente nell'atmosfera, a seguito delle attività umane sono di seguito passati in rassegna.

Si segnalano le emissioni gassose primarie, secondarie e il particolato primario e secondario. Partiamo dai gas primari, quelli direttamente emessi nell'atmosfera da attività umane.

Emissioni gassose primarie

Metano (CH_4)

A seguito dell'estrazione e della distribuzione del metano per la produzione di energia, si possono avere perdite significative di questo gas nella troposfera. Anche le discariche di rifiuti sono fonti di metano, a seguito di processi fermentativi

anaerobici (in assenza di ossigeno) a opera di batteri, che portano alla formazione del cosiddetto biogas. Anche microorganismi coinvolti nei processi digestivi del bestiame producono metano; conseguentemente il settore agricolo che coinvolge

2 Lo strato di aria che si estende a partire da 18 km dalla superficie della terra fino a circa 50 km.

3 U.S. Environmental Protection Agency. <https://www.epa.gov>.

l'allevamento di bestiame, contribuisce a immettere quantità significative di tale gas nell'atmosfera. Il metano ha un importante effetto serra e la sua immissione nell'atmosfera ha contribuito a incrementare il fenomeno del surriscaldamento globale. Infatti, un accumulo, oltre misure di gas serra nell'atmosfera esaspera il processo di assorbimento e riemissione di radiazione infrarossa, con conseguente sviluppo di calore.

È ben noto che il metano ha un effetto serra più importante dell'anidride carbonica. Infatti, l'indice di impatto sul riscaldamento del pianeta

(Global Warming Potential – GWP) del metano è 23 volte più elevato rispetto alla CO_2 . Tale indice tiene conto dell'efficacia con cui il gas assorbe la radiazione infrarossa, del suo tempo di residenza nell'atmosfera ma non della quantità con cui è presente. Vista la maggiore facilità con cui si può rimuovere il metano dall'atmosfera (esso ha un tempo di residenza nell'atmosfera di 10-15 anni) e il suo significativo effetto serra, gli esperti suggeriscono di concentrare l'attenzione su tale gas per potere avere un significativo miglioramento del problema nei prossimi 25 anni.

Anidride carbonica (CO_2)

Il principale prodotto che si origina dal consumo di combustibili fossili, di cui le attività umane fanno un gran uso, è l'anidride carbonica. Tale gas, pur avendo il più basso indice GWP tra quelli emessi, è talmente

abbondante da preoccupare gli esperti in merito agli sconvolgimenti climatici dovuti al riscaldamento globale. Inoltre, l'anidride carbonica rimane residente nell'atmosfera per migliaia di anni.

Monossido di carbonio (CO)

Tale gas, molto pericoloso per gli organismi che trasportano ossigeno molecolare alle cellule tramite sistemi bioinorganici quali l'emoglobina per esempio, viene prodotto in discreta quantità, a seguito della combustione di materiale fossile in carenza di ossigeno molecolare (O_2). Ciò accade

nei motori a scoppio e nelle stufe a combustione. Nel secondo caso, il pericolo per la salute è molto più rilevante poiché il CO (incolore e inodore) una volta accumulatosi nell'ambiente chiuso di una abitazione si concentra e causa avvelenamento mortale.

Ossidi di azoto (NO_x)

La produzione di energia attraverso l'utilizzo di combustibili fossili necessita di reazioni di combustione che normalmente hanno luogo ad alta temperatura. A questa temperatura, l'azoto dell'aria (N_2) si combina con l'ossigeno (O_2) per produrre gli ossidi di azoto. Nei motori a combustione il 98% di tali ossidi è

costituito da NO (monossido di azoto), la rimanente parte è costituita dal biossido di azoto (NO_2). Quest'ultimo è molto pericoloso per il sistema respiratorio degli umani. Dall'industria dei fertilizzanti, basata sulla produzione di acido nitrico, si ottengono quantità rilevanti di NO e N_2O (ossido di diazoto o protossido di azoto)

come prodotti secondari. N_2O mostra un importante effetto serra con un indice

GWP di circa 300 (contro 23 per metano e 1 per CO_2).

Ossidi di zolfo (SO_x)

I combustibili fossili contengono sempre zolfo, in misura variabile a seconda del giacimento da cui vengono estratti. I combustibili ad alto tenore di zolfo producono discrete quantità di ossidi di zolfo (SO_2 e SO_3).

Questi gas, a parte essere nocivi per l'apparato cardiocircolatorio, sono i precursori di alcune delle sostanze che costituiscono il particolato secondario, trattate di seguito nel testo.

Idrocarburi policiclici aromatici (IPA)

Questa classe di composti il cui capostipite è il benzopirene, assieme al benzene, hanno origine dalle benzine e rappresentano una famiglia di molecole refrattarie alla combustione e perciò più facilmente emessa nell'atmosfera

dai veicoli a combustione. Permangono nell'atmosfera per circa tre anni, hanno caratteristiche lipofile ed è dimostrato un loro accumulo nei tessuti adiposi degli organismi viventi. Sono pericolosi per documentati effetti cancerogeni.

Diossine

Le diossine, in particolare la capostipite 2,3,7,8-tetracloro dibenzo-p-diosina (TCDD) vengono prodotte a seguito dell'incenerimento dei rifiuti organici in presenza di materie plastiche contenenti

cloro, ad esempio il polivinilcloruro (PVC) contenuto nei sacchetti di plastica. Le diossine hanno documentate proprietà cancerogene e la loro pericolosità è analoga a quella degli IPA.

Clorofluorocarburi (CFC)

Sono sostanze perlopiù gassose utilizzate verso la fine del secolo scorso come gas refrigeranti per frigoriferi, condizionatori e come propellenti. I CFC, immessi abbondantemente nell'atmosfera, hanno due effetti principali: i) un importante effetto serra (indice GWP = fino a 10.600) e ii) riducono lo spessore dello strato di ozono della stratosfera. In particolare, queste molecole a contatto con la radiazione UV del sole reagiscono fotochimicamente producendo atomi di cloro. Tali atomi, reagiscono a loro volta con la molecola di ozono, consumandola. La riduzione dello strato

d'ozono (il famoso buco nello strato di ozono) ha avuto importanti effetti sulla salute umana. Infatti, in deficit di tale molecola parte delle radiazioni UV ad alta energia (a lunghezza d'onda minore di 300 nm) arrivano sulla terra ed entrano in contatto con la nostra epidermide, per esempio, procurando a seguito di una prolungata esposizione tumori alla pelle. L'uso dei CFC è stato bandito nel mondo occidentale a partire dal 1996. I CFC sono stati sostituiti dai HFC (il cloro è stato sostituito da idrogeno) che seppur innocui nei confronti dell'ozono, rimangono gas a effetto serra.

Emissioni gassose secondarie

Tali emissioni costituiscono lo smog fotochimico e sono il prodotto di reazione fotochimica tra i gas primari (tipicamente NO_x e i composti organici volatili a base di carbonio e idrogeno emessi dai veicoli di trasporto) e la radiazione solare. I principali costituenti dello smog

fotochimico sono due: la molecola di ozono (O_3) e i perossiacetilnitrati (PAN). Queste sostanze sono particolarmente irritanti per gli occhi e per l'apparato respiratorio umano. L'ozono inoltre ha un impatto negativo anche sull'ecosistema e la vegetazione.

Particolato primario

È costituito dalle polveri che vengono immesse direttamente nell'atmosfera dalle attività umane e naturali. Il particolato primario a seguito di fenomeni naturali è dovuto ad esempio, a eruzioni vulcaniche, a spore batteriche, al polline e alle polveri derivanti da fenomeni erosivi di rocce. Normalmente le polveri emesse da tali attività naturali sono piuttosto grossolane, con una dimensione media di 10 micrometri⁴ (polveri PM10). Per tale motivo, tali polveri non penetrano

in profondità nell'apparato respiratorio umano e vengono ben trattenute a livello di naso e faringe. Il particolato primario derivante dalle attività umane invece ha dimensioni molto più ridotte, inferiori a $0,1 \mu\text{m}$ (PM01). Tale particolato molto fine può raggiungere pure gli alveoli polmonari ed entrare nel sistema circolatorio sanguigno. Processi quali, traffico veicolare, processi produttivi e di riscaldamento immettono quantità non trascurabili di tale particolato.

Particolato secondario

Grazie a fenomeni chimico-fisici che avvengono nell'atmosfera, il particolato primario evolve in particolato secondario. Tra i fenomeni fisici ricordiamo la coagulazione e la condensazione di vapori a dare particelle composite di dimensione maggiore. Tra i fenomeni chimici ricordiamo invece la combinazione dei vapori come NO_x e SO_x con le goccioline di acqua disperse in atmosfera a dare acido nitrico (HNO_3) e solforico (H_2SO_4), rispettivamente. Si forma un particolato secondario che prende il nome di *droplets*, che può crescere di dimensione a seguito di un ulteriore processo coagulativo. Queste goccioline a base acquosa a carattere acido hanno un importante impatto non

solo per le opere umane, quali gli edifici, i monumenti e i materiali metallici, ma hanno importanti conseguenze per l'ecosistema. Ad esempio, le foglie delle piante subiscono un danneggiamento e il suolo, che diventa acido, è così in grado di sciogliere i nutrienti per le piante che quindi non risultano più accessibili alle radici. Inoltre, la produzione in ambiente acido dello ione alluminio libero rappresenta un ulteriore problema per le piante, per le quali questo costituisce una sostanza tossica. Infine, nel caso delle *droplets* a base di acido solforico si deve segnalare il fenomeno della solfatazione dei carbonati contenuti nelle rocce delle nostre montagne (Dolomiti, in particolare). A seguito di

4 1 micrometro (μm) = 10^{-6} m.

tale processo, si verifica il fenomeno di dilavamento delle rocce che si frantumano e con l'ausilio dell'acqua vengono erose.

Sebbene il particolato secondario rappresenti una sorta di evoluzione anche dimensionale del particolato primario, le dimensioni in gioco

rimangono sopra la soglia di pericolo. Il particolato secondario, di dimensione media non superiore a $1\ \mu\text{m}$ (PM1), può infiltrarsi in profondità nell'apparato respiratorio. Il particolato è anche un importante vettore di virus, batteri e di vapori o sostanze tossiche per la salute umana.

Tossicità a confronto ed evoluzione temporale delle emissioni

In una scala relativa in cui il monossido di carbonio ha indice 1 di tossicità, gli idrocarburi volatili rilasciati in atmosfera dal traffico veicolare hanno indice 2, gli ossidi di zolfo indice 28 e quelli di azoto 78. Il pericolo numero uno per la salute umana è comunque il particolato fine, in particolare le polveri sottili con dimensione molto ridotta (PM<1).

Dal Novecento ad oggi, le emissioni di gas a effetto serra sono aumentate in continuazione, anche se la vera impennata in tali emissioni è avvenuta dal 1970 in poi e in particolare riguarda l'emissione di CO_2 . Ciò vuol dire che la quantità di combustibili fossili impiegata per la produzione di energia è aumentata in maniera esponenziale a partire da tale anno.⁵

Dal 1990 ad oggi, tra i gas serra emessi solo l'anidride carbonica ha un trend in deciso aumento.⁶ La composizione media in volume della miscela di gas serra presente in atmosfera è: CO_2 (85%); N_2O (8%); CH_4 (6%); $\text{CFC}+\text{HFC}+\text{SF}_6 + \text{O}_3$ (1%). L'impatto di ogni componente di questa miscela nel determinare un riscaldamento globale è commisurato all'indice GWP sopra discusso. In particolare, la CO_2 impatta per il 52%, il metano per il 17%, l'ozono per il 13%, la miscela $\text{CFC}+\text{HFC}+\text{SF}_6$ per il 13% e N_2O per il 5%.⁷ Gas nocivi come SO_x e NO_x registrano emissioni in netto calo già a partire dagli anni Ottanta dello scorso secolo ma tale diminuzione risulta essere meno decisa negli ultimi anni.⁸

Strategie di controllo e di riduzione delle emissioni

Tra le molteplici strategie di controllo messe in atto, quelle più significative saranno brevemente illustrate in questo paragrafo. Per il trattamento del particolato molte aziende si sono dotate di 'cicloni', che sono macchinari in grado di separare il particolato di un

gas inquinato in entrata, restituendo aria pulita in uscita. Molte aziende si sono munite di questo accessorio a valle dell'apparato di emissione. Per evitare emissioni ricche di SO_x una possibile adeguata soluzione è l'impiego di sistemi di desulfurizzazione del combustibile.

5 Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australian Government. <https://www.csiro.au>.

6 Rhodium group. <https://rhg.com/>.

7 IPCC – Focal Point Italia. <https://www.emcc.it/>.

8 Fonte per SO_x : IIASA (www.iiasa.ac.at); fonte NO_x : NAEI (National Atmospheric Emissions Inventory; <https://naei.beis.gov.uk/overview/index>).

Per gli ossidi di azoto, un'interessante soluzione è rappresentata dalla conversione degli NO_x prodotti durante la combustione in ammoniaca, tramite l'impiego di catalizzatori e idrogeno a una certa temperatura. Il controllo delle emissioni di CO_2 è un problema molto sentito. L'attuale strategia che consente di ridurre le emissioni di tale gas è definita 'cattura e sequestro del diossido di carbonio' (CCS) grazie alla quale la CO_2 prodotta da combustioni non viene rilasciata nell'atmosfera ma viene confinata e stoccata nell'impianto che l'ha prodotta.

Chiaramente, per risolvere questo problema globale riguardante le emissioni antropiche nell'atmosfera è necessario uno sforzo globale. Bisogna che scienziati e politici si mettano insieme, nel tentativo di produrre una soluzione credibile ed efficace a questo problema. Nuove tecnologie e nuovi combustibili devono essere impiegati tenendo conto non solo del rapporto costi/benefici ma anche, e forse principalmente, della salute del nostro pianeta, che include l'intero ecosistema che comprende tutti gli esseri che lo abitano. In tal senso, proposte affascinanti sulle quali riversare le nostre speranze sono rappresentate dalle fonti di energia rinnovabile. Il petrolio, come capostipite dei combustibili fossili, non è una fonte rinnovabile e quindi va sostituito al più presto. Non solo, l'uso del petrolio inquina l'aria, inquina il nostro pianeta. Sono invece promettenti fonti di energia rinnovabile: i) il fotovoltaico, che sfruttando l'energia solare per produrre altra energia, è una fonte che

si esaurirà solo quando la stella sole cesserà di vivere.; ii) la combustione di idrogeno molecolare (H_2) a dare acqua, che non contenendo carbonio non produrrebbe CO_2 , con tutti i vantaggi che questo comporta. Inoltre, potendo potenzialmente essere ottenuto dall'acqua può essere considerato un combustibile rinnovabile. Infatti, l'idrogeno potrebbe essere riottenuto dal prodotto della sua combustione, l'acqua appunto. L'uso di batterie, almeno nell'ambito del trasporto veicolare, sarebbe una buona soluzione al problema ambientale delle emissioni, anche se la gestione e lo smaltimento delle batterie esauste sarebbe un argomento di cui tenere conto. Altre possibili soluzioni potrebbero riguardare il contenimento dei consumi e/o il miglioramento tecnologico per rendere più efficienti i processi di conversione energetica.

Tecnologie quali il fotovoltaico e l'impiego di idrogeno come combustibile sono ancora piuttosto costose, tanto che una loro massiccia industrializzazione non risulta ancora sostenibile. Per arrivare a un abbassamento dei costi di produzione, la ricerca scientifica ha un ruolo cruciale: individuare processi produttivi di idrogeno e di impianti fotovoltaici a costi ridotti. I governi degli stati mondiali dovrebbero avere come priorità il finanziamento della ricerca scientifica. Non solo la ricerca porta progresso e quindi benessere ma può brillantemente risolvere problemi come quello trattato in questo contributo, che minacciano la vita dell'intero pianeta terra e di chi lo abita.

Bibliografia

Holland, H.D. (2006). «The Oxygenation of the Atmosphere and Oceans». *The Philosophical Transaction of the Royal Society B*, 361, 903-15. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1578726/pdf/rstb20061838.pdf>.

