
Crisi climatica e inquinamento atmosferico

Se pensate veramente che l'economia sia più importante dell'ambiente, provate a trattenere il fiato mentre contate i soldi.

Guy McPherson

Cristina Mangia

Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Lecce

Pierina Ielpo

Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Lecce

Rita Cesari

Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Lecce

Maria Cristina Facchini

Istituto di Scienze dell' Atmosfera e del Clima (CNR-ISAC), Bologna

Inquinamento atmosferico e cambiamenti climatici sono due fenomeni strettamente interconnessi ed interagenti. Innanzitutto, sorgenti di sostanze inquinanti sono allo stesso tempo anche sorgenti di sostanze climalteranti. Inoltre, molti inquinanti sono in grado di influenzare il bilancio radiativo del pianeta, con implicazioni climalteranti sia raffreddanti che riscaldanti. Infine, i cambiamenti climatici influenzano la qualità dell'aria sia da un punto di vista dell'incremento o diminuzione di emissioni naturali e/o antropogeniche, sia dal punto di vista delle condizioni meteorologiche che influenzano dispersione e accumulo di inquinanti. Sebbene le due criticità si sviluppino su differenti ordini di grandezza spazio-temporali, entrambe pongono questioni di giustizia ambientale e

la necessità di ripensare un modello economico che riduca l'utilizzo dei combustibili fossili e tenga insieme questioni ambientali ed equità sociali.

Introduzione

L'inquinamento atmosferico e la crisi climatica rappresentano due emergenze ambientali. Si stima che l'inquinamento atmosferico causi 6.5 milioni di morti all'anno attraverso l'esposizione a particolato fine (PM_{2.5}) e ozono (O₃) e che, senza azioni di contenimento, tale esposizione possa diventare nel 2050 la prima causa ambientale di morte [1, 2]. Sul piano climatico, si stima che le attività umane abbiano causato un riscaldamento globale di circa 1 °C rispetto ai livelli preindustriali. Se continuerà l'attuale tasso annuale di emissioni è probabile che tale riscaldamento raggiungerà 1.5 °C tra il 2030 e il 2052 con il rischio

di impatti sempre più pesanti su sistemi naturali ed umani [3]. Sebbene gli ordini di grandezza spazio-temporali sui quali si sviluppano le due criticità siano differenti, esse sono strettamente interconnesse [4, 5]. Le sorgenti di inquinanti atmosferici legate all'utilizzo di combustibili fossili possono essere allo stesso tempo anche sorgenti di sostanze climalteranti. Il tempo di permanenza in atmosfera di tali sostanze è variabile, alcune di esse vengono rimosse per deposizione o tramite reazioni chimiche. Se il tempo di permanenza varia da poche ore ad alcune settimane, sono definite come sostanze a vita breve. Molti degli inquinanti modificano le proprietà delle nubi, interagiscono con la radiazione solare e terrestre assorbendola o riflettendola, perturbando il bilancio energetico planetario con implicazioni sul clima, sia con *forcing* positivo (riscaldamento del clima), che con *forcing* negativo (raffreddamento del clima). Con *forcing* radiativo si intende la capacità della singola sostanza/composto di agire sul bilancio della radiazione entrante o uscente nel sistema atmosfera [6]. Ma se da una parte l'inquinamento atmosferico può incidere sul sistema climatico, dall'altra il clima e le sue variazioni influenzano la qualità dell'aria. I cambiamenti climatici possono sia incrementare o ridurre le emissioni naturali e/o antropiche, sia influenzare la meteorologia che guida i fenomeni di trasporto, diffusione e rimozione degli inquinanti. La crisi climatica e l'inquinamento atmosferico, figli dello stesso modello produttivo, pongono una serie di problematiche di giustizia ambientale e necessitano di uno sguardo sistemico sul piano delle cause e quello degli interventi.

Influenza degli inquinanti atmosferici sul clima

Il sistema produttivo attuale, basato essenzialmente sull'utilizzo di combustibili fossili nelle sue molteplici espressioni (produzione di energia, processi industriali, agricoltura, allevamento, gestione dei rifiuti), è responsabile delle emissioni di sostanze gassose e particellari che modificano la composizione chimica dell'atmosfera con impatti diretti ed indiretti sulla salute e sul sistema climatico. Questo vuol dire che una stessa sorgente può emettere

contemporaneamente sostanze inquinanti e sostanze climalteranti, e che a loro volta alcuni inquinanti possono avere un impatto sul sistema climatico o essere precursori di specie climalteranti.

Di seguito analizzeremo i principali composti che hanno effetti sia sulla salute umana e sugli ecosistemi che sul sistema climatico.

Ozono troposferico e suoi precursori

Ozono

L'ozono (O_3) è un inquinante secondario, cioè non viene immesso direttamente in atmosfera, ma si forma attraverso reazioni chimiche tra ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili non metanici (NMVOC), monossido di carbonio (CO) e metano (CH_4) in presenza di radiazione solare. Queste ultime sostanze sono dette precursori. Il biossido di azoto (NO_2), in presenza di radiazione solare, innesca una serie di reazioni che portano dapprima a produzione di ozono, e successivamente ad una situazione di equilibrio tra le diverse specie (ozono ed ossidi di azoto). Tale equilibrio è alterato dalla presenza di composti organici volatili, che a loro volta, in presenza di radiazione solare, innescano altri processi di ossidazione che portano a produzione di ozono. Il potenziale di formazione dell'ozono dei differenti VOC dipende dalla loro reattività, che è diversa da specie a specie. Inoltre le reazioni chimiche tra NO_x , VOC ed O_3 sono non lineari [7], dipendendo dal rapporto tra la concentrazione di NO_x e di VOC. Così, ad es., una diminuzione di NO_x può portare ad un aumento di O_3 in situazioni in cui il rapporto VOC/ NO_x è basso, come nei centri urbani. In tali regimi, detti *VOC-limited*, agire sulle emissioni di VOC è più efficiente per ridurre localmente i valori di picco di O_3 . Allontanandosi dai centri urbani, la concentrazione di NO_x inizia a diminuire più velocemente di quella dei VOC, a causa delle reazioni chimiche, della meteorologia e delle ulteriori sorgenti di precursori. Si raggiunge quindi un regime, detto *NO_x-limited*, in cui il rapporto VOC/ NO_x aumenta. In tali situazioni una riduzione degli NO_x è più efficace per ridurre le concentrazioni di O_3 .

Come inquinante atmosferico, l'ozono ha una serie di effetti negativi sulla salute umana. Può

indurre ridotta funzionalità polmonare, disturbi respiratori, aggravamento di malattie preesistenti come l'asma, con conseguenti aumenti di ricoveri ospedalieri e mortalità prematura. L'attuale valore limite raccomandato dall'OMS per l'ozono è di $100\mu\text{g}\text{m}^{-3}$ (media 8 h), sebbene effetti avversi all'esposizione di ozono si registrino al di sotto della soglia. L'esposizione a lungo termine all'ozono può anche avere effetti cronici. Studi recenti attribuiscono all'inquinamento da ozono circa 0,3 milioni di decessi prematuri a livello globale ogni anno [1]. L'ozono è anche una sostanza fitotossica con effetti avversi sulla vegetazione e sugli ecosistemi in generale. Come forte ossidante penetra nelle piante attraverso gli stomi delle foglie ed avvia una catena di reazioni che degradano le piante, riducendo i tassi di fotosintesi e influenzandone negativamente la crescita.

Ma oltre ad essere un inquinante atmosferico l'ozono è anche un gas serra attivo. Si stima che il suo forcing radiativo dal 1750 al 2011 sia dell'ordine $+0.35\text{W}\text{m}^{-2}$, di cui $+0.40\text{W}\text{m}^{-2}$ è attribuito all'ozono troposferico e $-0.05\text{W}\text{m}^{-2}$ all'ozono stratosferico [6]. L'ozono ha poi un effetto indiretto sul sistema climatico: limitando la crescita e la fisiologia delle piante riduce l'efficienza di rimozione di CO_2 da parte della vegetazione [8].

Ossidi di azoto

Precursori dell'ozono ed inquinanti atmosferici di per sé, gli ossidi di azoto NO_x (NO , NO_2 , etc) sono generati prevalentemente dai processi di combustione per reazione diretta ad alta temperatura ($>1.200\text{ }^\circ\text{C}$) tra l'azoto (N_2) e l'ossigeno (O_2) presenti nell'aria. Fonti principali sono i trasporti, le attività industriali ed il riscaldamento domestico. Il biossido di azoto (NO_2) può essere originato anche da processi produttivi senza combustione, come ad esempio la produzione di acido nitrico, fertilizzanti azotati, e da sorgenti naturali (attività batterica, eruzioni vulcaniche, incendi).

Da un punto di vista di impatto sulla salute il biossido di azoto è tra gli ossidi di azoto il più pericoloso, con una tossicità fino a quattro volte maggiore di quella del monossido di azoto. Forte ossidante ed irritante, esercita il suo effetto tossico principalmente sugli occhi, sulle muco-

se e sui polmoni. In particolare è responsabile di specifiche patologie a carico dell'apparato respiratorio (bronchiti, allergie, irritazioni, edemi polmonari che possono portare anche al decesso) [9, 10]. Inoltre, trasformandosi in presenza di umidità in acido nitrico, esso è una delle cause della formazione delle cosiddette "piogge acide", che provocano ingenti danni alle piante e più in generale alterazioni negli equilibri ecologici ambientali. La permanenza in atmosfera degli ossidi di azoto può variare da ore a giorni ed è strettamente legata, oltre che alle emissioni, alle reazioni chimiche in cui essi sono coinvolti. Come detto, la non linearità delle reazioni fotochimiche porta ad una difficile gestione di tale inquinante. Riduzioni di emissioni di ossidi di azoto a livello locale possono portare ad incrementi locali di concentrazioni di ozono e viceversa. Un esempio di come un aumento di ossidi di azoto in un'area portuale dia origine ad una diminuzione locale della concentrazione di ozono è studiato in [11]. In aree urbane ad elevato traffico si può osservare il cosiddetto "effetto settimana": a riduzioni di emissioni di ossidi di azoto associate ad una riduzione del traffico domenicale si registrano concentrazioni più elevate di ozono. Analogamente concentrazioni elevate di ozono spesso non si verificano nelle aree ad elevate concentrazioni di ossidi di azoto, ma in aree rurali (per alcuni casi di studio in Puglia si veda [12, 13]).

La non linearità dei processi chimici che portano alla formazione di ozono si ripercuote sull'impatto che gli ossidi di azoto hanno sul sistema climatico. Esistono infatti alcune incertezze sulla direzione del forcing radiativo associato a tali sostanze. Alcuni studi sembrano indicare un forcing radiativo positivo a breve termine (< 1 anno) ed un effetto negativo a lungo termine (circa 10 anni o più) [4].

Composti organici volatili non metanici

I Composti Organici Volatili non Metanici (NM-VOC) sono composti di natura organica caratterizzati da basse pressioni di vapore a temperatura ambiente, che si trovano quindi in atmosfera principalmente in fase gassosa. Il numero di tali composti è estremamente alto e comprende oltre agli idrocarburi volatili semplici anche specie

ossigenate quali chetoni, aldeidi, alcoli, acidi ed esteri. I VOC rivestono un ruolo fondamentale nella formazione di inquinanti secondari, come l'ozono ed il particolato. I singoli NMVOC non giocano il medesimo ruolo nella formazione degli ossidanti fotochimici poiché, a causa della diversa reattività, hanno tempi di permanenza in atmosfera diversi.

Le emissioni naturali degli NMVOC provengono dalla degradazione del materiale organico e dalla vegetazione. Il flusso di emissione dei biogenici dipende dalla radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) e/o dalla temperatura. Le emissioni antropiche, invece, sono principalmente legate alla combustione incompleta degli idrocarburi ed all'evaporazione di solventi e carburanti. Sorgenti antropiche rilevanti sono quindi trasporto su strada, fonti industriali, uso di solventi e combustione di biomassa.

Gli effetti negativi degli NMVOC sulla salute derivano dal loro contributo all'ozono ed al particolato atmosferico, ma anche dalla intrinseca tossicità di alcuni di loro. Alcuni composti NMVOC, come formaldeide, benzene o stirene, sono potenzialmente mutageni o cancerogeni. L'etilene esercita anche un effetto dannoso sulle piante rallentandone la crescita.

Monossido di Carbonio

Il monossido di carbonio (CO) è emesso direttamente da tutti i processi di combustione incompleta dei composti carboniosi. Le sorgenti possono essere sia antropiche (traffico veicolare, riscaldamento, attività industriali come la produzione di ghisa e acciaio, raffinazione del petrolio, lavorazione del legno e della carta, etc.) che naturali (incendi, vulcani, emissioni da oceani, etc.).

Da un punto di vista della salute, alte concentrazioni (> 1000 ppmv) di CO possono essere letali, con morte risultante da asfissia. Concentrazioni inferiori possono causare mal di testa, affaticamento, nausea e vomito. Recenti studi epidemiologici hanno infine dimostrato l'associazione causale tra aumento delle concentrazioni di CO ed incremento della mortalità giornaliera totale, di quella specifica per malattie cardiovascolari e respiratorie a breve termine.

Prendendo parte alle diverse reazioni fotochimiche e contribuendo alla formazione di CO₂, anche l'ossido di carbonio ha un effetto indiretto sul clima con forcing radiativo positivo.

Metano

Il metano (CH₄) è tra i precursori dell'ozono, oltre ad essere un gas serra con un elevato forcing radiativo positivo, circa 30 volte maggiore rispetto a quello della CO₂. La maggior parte (le stime vanno dal 60% all'80%) delle emissioni mondiali di CH₄ sono di origine antropica e derivano principalmente dall'estrazione dei combustibili fossili, dalla decomposizione dei rifiuti solidi nelle discariche, da varie attività agricole e di allevamento (processo di digestione del bestiame).

Concludendo, sebbene alcuni inquinanti come gli NO_x, gli NMVOC ed il CO abbiano un piccolo o quasi nullo forcing radiativo, è possibile associare anche a loro un effetto climalterante, seppur indiretto, per il loro essere precursori dell'ozono.

Particolato

Il materiale particolato (aerosol) presente in atmosfera è costituito da una miscela di particelle solide e liquide, che possono rimanere sospese anche per lunghi periodi. Le particelle sono costituite da una miscela di elementi quali carbonio organico, black carbon, solfati, nitrati, sabbia, polveri minerali, spray marino, ecc.[14, 15]. Il particolato può essere di tipo primario se immesso in atmosfera direttamente dalla sorgente o secondario se si forma successivamente, in seguito a trasformazioni chimico-fisiche di altre sostanze [7]. Il particolato viene generalmente distinto in classi dimensionali, che tengono conto della capacità di penetrazione nelle vie respiratorie da cui dipende l'intensità dei suoi effetti nocivi.

Numerosi studi hanno mostrato che all'inquinamento da PM₁₀ (Particulate Matter di dimensione aerodinamica < 10 μm in diametro) e PM_{2.5} (Particulate Matter di dimensione aerodinamica < 2.5 μm in diametro) sono associati effetti dannosi per la salute umana, sia a breve (effetti acuti) che a lungo (effetti cronici) termine.

Tra i principali effetti acuti documentati vi sono aumento della mortalità giornaliera per tutte le cause, e in particolare per cause cardiovascolari, aumento dei ricoveri per asma e malattia polmonare ostruttiva cronica (BPCO), aumento dei ricoveri per malattie cardiovascolari, diminuzione della funzionalità polmonare e aumento dei sintomi respiratori acuti in bambini e adulti. Tra gli effetti a lungo termine vi sono una riduzione dell'aspettativa di vita stimata di 1-2 anni, ed effetti quali diminuzione della funzionalità polmonare e aumento dei sintomi di bronchite sia negli adulti che nei bambini. La tossicità del particolato, e quindi la sua capacità di generare danni alla salute, può essere amplificata dalla capacità di assorbire sostanze gassose come gli IPA (Idrocarburi Policiclici Aromatici) e metalli pesanti, alcuni dei quali sono potenti agenti cancerogeni (c.d. effetti sinergici).

Gli aerosol, a seconda della loro composizione, hanno effetti diretti sul clima assorbendo o disperdendo le radiazioni e quindi contribuendo al riscaldamento o al raffreddamento. Possono anche avere effetti indiretti sul clima quando agiscono come nuclei di condensazione per le nubi (CCN), o si depositano su neve o ghiaccio. Da una prospettiva climatica gli aerosol vengono suddivisi in base al loro *forcing* radiativo positivo (black carbon) o negativo (principalmente solfati e carbonio organico).

Black Carbon

Il black carbon (BC) è l'insieme di particelle carboniose in grado di assorbire luce con lunghezza d'onda caratteristica nello spettro del visibile (380 – 760nm). Le particelle di BC sono emesse da combustione incompleta di materia carboniosa e combustibili a base di carbonio. Fonti importanti includono la combustione di combustibili fossili, combustione di biomassa, processi industriali, biocarburanti, motori diesel, vecchi fornelli domestici largamente utilizzati in molti paesi in via di sviluppo [16, 17]. È contenuto principalmente nella frazione fine del particolato (PM_{2.5}) e può per questo essere inalato facilmente veicolando anche molecole organiche e particelle metalliche con effetti negativi sulla salute. Diversi studi hanno associato all'esposizione a breve e lungo termine di black carbon

un aumento di disturbi respiratori, asma, BPCO, un aumento di morbilità e mortalità respiratoria e cardiovascolare, cancro al polmone. Altre ricerche suggeriscono che l'esposizione a lungo termine di PM_{2.5} con una elevata frazione BC può avere effetti di mortalità maggiori rispetto ad altre miscele di PM_{2.5} [9, 1].

Da un punto di vista climatico, il BC è un potente climalterante a causa del suo efficiente assorbimento della radiazione solare e conseguente capacità di riscaldamento dell'area circostante [18]. Oltre ad assorbire la radiazione solare quando è in sospensione in atmosfera, il BC può ridurre la quantità di luce solare riflessa quando si deposita su superfici caratterizzate da elevato albedo come neve e ghiaccio, accelerandone lo scioglimento. Interagendo con la formazione delle nubi, inoltre, il BC influisce sulla circolazione regionale e sui regimi di precipitazione. La complessità degli effetti sui quali incide e dei fattori che ne influenzano formazione e trasporto rende alquanto difficile la determinazione del forcing radiativo che viene stimato intorno 1.1 W m^{-2} , al secondo posto dopo la CO₂.

Ridurre le emissioni di BC potrebbe quindi non essere solo una possibile strategia per mitigare il riscaldamento globale, ma gioverebbe anche direttamente alla salute umana.

Solfati

Un'altra componente chiave del particolato fine (PM_{2.5}) è costituita dai solfati [19]. I solfati si originano in atmosfera dall'ossidazione di SO₂. Le emissioni naturali sono associate ad eruzioni vulcaniche ed agli oceani, essendo questi ultimi una rilevante sorgente naturale di Dimetilsolfuro DMS. Il fitoplancton che ricopre le superfici oceaniche è costituito da Dimetil solfoniopropionato (DMSP) il quale, per azione batterica, viene degradato in Dimetilsolfuro che è volatile e viene quindi emesso in atmosfera. Attraverso processi di ossidazione il DMS si trasforma in solfati. Le emissioni antropiche più rilevanti di SO₂ sono originate dalla combustione di carbone fossile e petrolio. Le fonti principali sono la produzione industriale e quella di energia da parte delle centrali termoelettriche. Altre fonti sono la lavorazione di materie plastiche, la desolfurazione dei gas naturali, l'incenerimento dei rifiuti

ed il trasporto, terrestre e marittimo. Inoltre la diffusione del metano per il riscaldamento ha ridotto l'emissione degli ossidi di zolfo dovuti al riscaldamento. Dato il suo breve tempo di permanenza, dell'ordine di pochi giorni, la sua distribuzione a scala globale ricalca quella delle emissioni.

Da un punto di vista della salute, l'esposizione prolungata ai solfati e al biossido di zolfo determina effetti a carico dell'apparato respiratorio come tracheiti, bronchiti, polmoniti. In atmosfera l' SO_2 contribuisce all'acidificazione delle precipitazioni, con effetti tossici sui vegetali, acidificazione dei corpi idrici e impatto sulla vita acquatica. Proprio a causa degli effetti sulla salute e sugli ecosistemi, nel tempo le emissioni di SO_2 sono state ridotte.

Da un punto di vista climatico, i solfati sono la categoria di aerosol più significativa con effetto raffreddante. Agiscono con forcing radiativo negativo sia mediante una maggiore dispersione della radiazione solare, sia attraverso effetti indiretti derivanti dalla loro capacità di fungere da nuclei di condensazione delle nubi. Un aumento di nuclei di condensazione nelle nubi può portare ad aumentare la riflettività delle nuvole rendendole più dense e dando loro un contenuto più elevato di acqua liquida.

Una riduzione della SO_2 antropogenica di circa il 50% in tutto il mondo nel corso del prossimo secolo avrebbe un notevole impatto positivo sulla qualità dell'aria e sulla salute. Tuttavia comporterebbe, secondo l'IPCC, un significativo effetto di riscaldamento sul clima globale di circa 0.36°C , anche se un tale effetto potrebbe essere parzialmente compensato da una riduzione di altre specie con forcing radiativo di segno opposto come il BC.

Aerosol organico

Con aerosol organico (OA) si intende la frazione di particolato carbonioso differente dal black carbon. In genere è una frazione significativa di PM sia negli ambienti inquinati che incontaminati. Può essere sia di origine primaria che secondaria. La frazione primaria (POA) si forma durante i processi di combustione ed è emessa principalmente come particelle submicroniche. Il particolato organico di origine secondaria può

aver origine in atmosfera dalla conversione gas-particella di composti organici volatili, dalla condensazione di composti volatili a bassa tensione di vapore e dall'assorbimento fisico o chimico di specie gassose sulla superficie di particelle [20, 21].

Su scala globale, la fonte principale di POA è rappresentata dalla combustione della biomassa ed è caratterizzata da forte stagionalità e significativa variabilità interannuale. In ambienti urbani è in genere associata alle emissioni da traffico con particelle di dimensioni iniziali che raggiungono un picco inferiore a 100 nm. Altre fonti di POA comprendono i biocarburanti, cottura dei cibi, bioparticelle come polline, batteri e detriti vegetali, spray marino, erosione del suolo.

Dalla prospettiva della qualità dell'aria e della salute umana, l'OA è una delle maggiori frazioni di $\text{PM}_{2.5}$, pertanto riduzioni dell'OA sarebbero utili in termini di mortalità prematura e morbilità.

L' aerosol organico può sia disperdere che assorbire la radiazione solare (a seconda sulla sua composizione e dalle percentuali di Brown carbon di cui è costituito), il che complica la valutazione del suo impatto climatico. Nel complesso, secondo l'IPCC, il forcing radiativo associato alle due componenti è dell'ordine di $0,12$ [da -0.4 a $+0.1$] Wm^{-2} . Le emissioni di OA e dei suoi precursori sono spesso associate ad emissioni di altre specie che possono subire processi atmosferici paralleli. La forma primaria è spesso co-emessa con il black carbon durante la combustione di combustibili fossili e di biomassa, e ciò complica le stime del forzante radiativo degli aerosol a livello di singola specie e complessivamente. Quindi da un punto di vista climatico una riduzione delle emissioni dell'OA avrebbe un impatto scarsamente limitato sul clima.

Tab.1 sintetizza il ruolo delle varie sostanze sulla salute, sugli ecosistemi e sul clima. Fig.1 illustra in modo schematico come un miglioramento della qualità dell'aria possa impattare sul *forcing* radiativo e quindi sul clima [6].

Tabella 1: Principali inquinanti atmosferici: tempo di permanenza in atmosfera, effetti sulla salute ed ecosistemi, effetti sul clima.

Composto	Tempo di permanenza in atmosfera	Effetti sulla salute e sugli ecosistemi	Effetti sul clima
Biossido di carbonio (CO ₂)	Secoli	Acidificazione dell'oceano, fotosintesi	Riscaldamento
Metano (CH ₄)	8 anni	Precursore di O ₃	Riscaldamento
Ozono (O ₃)	1 mese	Danni alla salute e alla vegetazione	Riscaldamento
Biossido di zolfo (SO ₂)	1 settimana	Danni alla salute, acidificazione degli ecosistemi	Raffreddamento, precursore di PM
Ossidi di azoto (NO _x)	1 settimana	Danni alla salute, effetti sugli ecosistemi, precursore di O ₃	Raffreddamento, precursore di PM
Black carbon Black Carbon (BC)	1 settimana	Danni alla salute	Riscaldamento
Composti organici volatili (VOC)	Variabile	Danni alla salute, precursori di O ₃	Precursori di O ₃ , Precursori di PM

Influenza del clima sull'inquinamento atmosferico

La qualità dell'aria è influenzata dalle emissioni e dalla meteorologia. Agendo sulle circolazioni atmosferiche e i regimi idrogeologici, i cambiamenti climatici possono alterare le condizioni meteorologiche ed emissive che influenzano la qualità dell'aria. Questo effetto è stato chiamato in inglese *climate penalty*. In generale, i fenomeni che guidano la dispersione e la diluizione di inquinanti sono legati alle caratteristiche dello strato limite atmosferico, il cui sviluppo è strettamente dipendente anche dalle condizioni di vento, temperatura, pressione e umidità a scala sinottica. Venti più intensi e strati di rimescolamento più profondi tendono a disperdere e diluire maggiormente gli inquinanti. Mentre strati di rimescolamento poco profondi e basse velocità del vento limitano il movimento verticale, intrappolando l'aria vicino la superficie con conseguente innalzamento delle concentrazioni di inquinanti [22, 23]. Questo è ad es. il caso della Pianura Padana, che è una delle aree più inquinate d'Europa, sia a causa delle sorgenti emissive presenti sul territorio, sia a causa dei fenomeni di stagnazione dell'aria [24]. Un incremento di fenomeni di stagnazione, come previsto da alcuni modelli climatici [25], potrebbe quindi portare ad un incremento di fenomeni di accumulo di inquinanti. Inoltre, variazioni climatiche come

aumenti di temperatura, persistente alta pressione, aria stagnante, favoriscono, in generale, la reattività fotochimica e la concentrazione di inquinanti secondari, tra cui ozono e particolato fine. Le stesse condizioni meteorologiche possono, inoltre, avere un effetto sulle emissioni di precursori dell'ozono e particolato, come ad esempio un aumento di emissioni di NO_x, legato all'utilizzo massiccio di impianti di condizionamento nei periodi estivi o di emissioni biogeniche di NMVOC, favorite da alti valori di temperatura e radiazione solare. A questo si aggiunge che modifiche anche a livello locale dei regimi di precipitazione possono influire sulla rimozione o meno in atmosfera del particolato. Infine, un aspetto rilevante riguarda l'influenza del cambiamento climatico sul rischio incendi, già molto frequenti in Area Mediterranea nei periodi estivi [26], che potrebbero quindi aumentare a causa dell'aridità atmosferica che accelererebbe l'essiccamento della biomassa infiammabile. I composti emessi direttamente dalla combustione e di biomassa, o prodotti come inquinanti secondari, possono essere trasportati per lunghe distanze, con conseguente aumento della loro concentrazione in atmosfera.

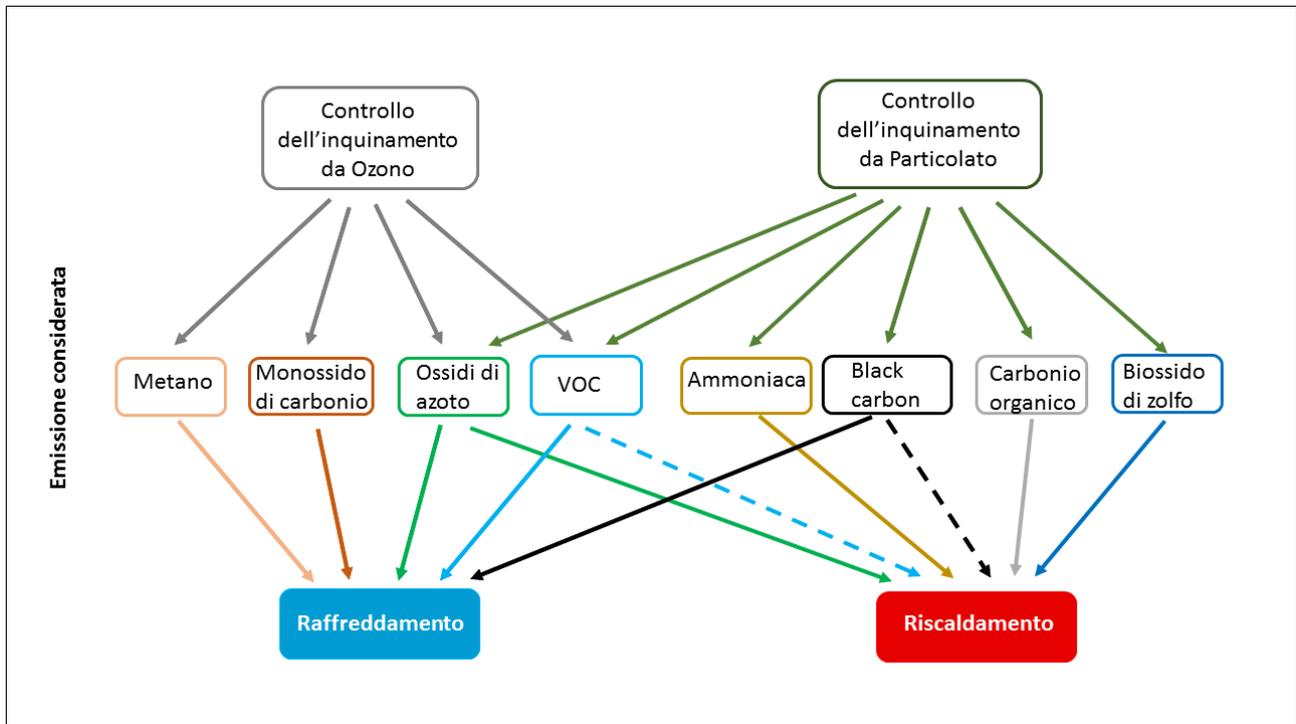


Figura 1: Diagramma schematico dell'azione di controllo su specifiche emissioni e impatto sul clima. Le linee solide rappresentano l'impatto noto, quelle tratteggiate indicano impatto incerto. Rielaborata da [6].

Inquinamento atmosferico, crisi climatica ed impatti sociali

Numerose ricerche internazionali hanno evidenziato come i fattori di rischio legati all'esposizione all'inquinamento atmosferico si distribuiscono in modo differente all'interno di una stessa comunità e tra varie comunità, e questa distribuzione dipende da caratteristiche sociali come il reddito, lo stato sociale, l'occupazione, il genere, e l'età [27]. I meccanismi per cui una condizione sociale di deprivazione amplifichi l'effetto dell'altra possono essere differenti. Come messo in evidenza da recenti studi epidemiologici e dal movimento per la giustizia ambientale, le comunità a basso livello di stato socio economico sono più concentrate laddove maggiore è l'inquinamento atmosferico e le persone maggiormente vulnerabili agli insulti ambientali sono quelle con minori risorse e con uno stato di salute più compromesso [28, 29, 30, 31, 32]. Ma lo stesso livello di esposizione ambientale può comportare un rischio maggiore sulla salute in alcuni gruppi di popolazione più deprivati [33]. Ciò potrebbe essere dovuto ad una minore capacità di rispondere allo stress ambientale che agisce in sinergia con altre pressioni sulla salute. In questo caso di-

suguaglianze socio economiche potrebbero agire come modificatori di effetto influenzando la relazione esposizione all'inquinamento atmosferico - effetto sanitario. Spostandosi dall'inquinamento ambientale ai cambiamenti climatici si ritrova il tema della giustizia ambientale o più specificamente giustizia climatica. Mentre le maggiori emissioni antropogeniche di gas climalteranti provengono dai paesi più industrializzati, gli effetti delle variazioni climatiche sono distribuiti diversamente tra le varie regioni del mondo con differenti impatti socio-economici che dipendono dalla vulnerabilità delle varie regioni e che tenderanno ad aumentare le disuguaglianze già esistenti [34, 35]. Come indicato nel rapporto dell'IPCC Riscaldamento globale 1.5 °C [3] "le popolazioni soggette ad un rischio sproporzionatamente maggiore di conseguenze avverse con un riscaldamento globale di 1,5 °C e oltre includono popolazioni svantaggiate e vulnerabili, alcune popolazioni indigene, e comunità locali che dipendono da mezzi di sostentamento agricoli o costieri (confidenza alta). Le regioni a rischio sproporzionatamente maggiore comprendono gli ecosistemi dell'Artico, le regioni aride, i Paesi in via di sviluppo delle piccole isole e i paesi meno sviluppati (confidenza alta)". Sempre se-

condo l'IPCC è necessario tenere insieme l'etica e l'equità per poter affrontare la distribuzione diseguale degli impatti negativi associati a un riscaldamento globale di 1,5 °C o più.

Strategie di riduzioni

La riduzione delle concentrazioni atmosferiche di ozono troposferico e black carbon rappresenta una opportunità concreta per migliorare la qualità dell'aria e rallentare il cambiamento climatico a breve termine. Ma, essendo sostanze a vita breve la loro riduzione può essere considerata come una strategia a breve termine che integra, senza sostituire, la riduzione delle emissioni di CO₂ e di altri gas climalteranti. Inoltre, considerando la bassa permanenza in atmosfera di tali sostanze, i benefici della riduzione delle loro emissioni riguarderanno prevalentemente le regioni che attuano misure di riduzione, che quindi variano in base alla regione e all'interno della stessa regione. Accanto a strategie di riduzione dell'utilizzo dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas) da attuare in tutto il mondo, è anche necessario considerare le peculiarità di ciascuna regione. In Africa, ad esempio, è necessario ridurre le emissioni di black carbon derivanti dalla biomassa utilizzata nella cottura dei cibi e migliorare la qualità dell'aria indoor. In Asia è necessaria una riduzione delle emissioni di black carbon dalle attività di estrazione e combustione del carbone, dai veicoli diesel e dalle cucine a biomassa. In America latina e nei Caraibi è fondamentale la salvaguardia della foresta amazzonica e la riduzione del black carbon da incendi. Nel Nord America e in Europa è invece particolarmente rilevante una riduzione delle emissioni di metano derivanti dalle attività agricole e dalla distribuzione del gas naturale a lunga distanza [36] ed una riduzione di black carbon derivante dal riscaldamento a biomassa residenziale. La traduzione in politiche concrete ed efficaci nel ridurre contemporaneamente gli inquinanti atmosferici dannosi per la salute e capaci di alterare il clima, si scontra sovente con le interconnessioni fra gli elementi del sistema ambientale, che a loro volta condizionano i risultati delle scelte socioeconomiche. Emblematico può essere l'esempio della ricerca della sorgente energetica ottimale per riscaldare gli edifici residenziali. La scelta varia

tra fonte solare diretta (pannelli solari termici con accumulo di calore) e indiretta (fotovoltaico e pompa di calore), biomasse (vegetali o di sintesi) e combustibili fossili. La complessità prima richiamata richiede una conoscenza specifica del territorio e la ricerca della soluzione che minimizzi i danni. In questo caso, nell'individuazione della soluzione dovrebbe giocare un ruolo preminente la riduzione drastica del fabbisogno di energia utile per ottenere il comfort termico voluto. La soluzione vincente sia per il clima che per la salute, ad esempio in Italia, sarebbe ristrutturare o eliminare gli edifici colabrodo che dissipano all'esterno il calore generato dagli impianti. Un altro aspetto rilevante nell'individuare strategie di riduzione di sostanze climalteranti è quello degli impatti sociali che tali strategie comportano e dei possibili feedback che possono innescare. Un esempio è costituito da alcune strategie di contenimento delle emissioni CO₂ che riguardano la forestazione su ampie zone del pianeta [37]. Sebbene questa attività avrebbe effetti positivi sia sul clima che sull'ambiente, un recente studio delle Accademie delle Scienze USA [38] individua in questa attività una serie di criticità socio-economiche, tra cui il suolo sottratto ad altre pratiche di utilizzo locale (produzione di cibo o fibre) con perdita di biodiversità, la gestione della biomassa legnosa accumulata, necessaria per esempio per impedire che il carbonio vada in fumo un po' alla volta (legna utilizzata come combustibile) o tutto insieme (incendi naturali o dolosi).

In un quadro estremamente complesso di strette interconnessioni tra qualità dell'aria, crisi climatica ed impatti sociali, le strategie di mitigazione dovrebbero maggiormente favorire politiche win-win rispetto alle win-lose, ovvero favorire opzioni che tengano nel dovuto conto sia il miglioramento della qualità dell'aria che la mitigazione del riscaldamento climatico che gli impatti sociali, piuttosto che favorire opzioni che tengano in conto uno degli aspetti a scapito degli altri [39, 5, 31].

Conclusioni

Il clima e la qualità dell'aria sono fenomeni strettamente interconnessi sia sul piano strettamente ambientale che sociale. Molte delle policies e del-

le strategie di riduzione delle emissioni possono avere effetti opposti sulla qualità dell'aria e sul clima ma il considerarli insieme aumenterebbe i benefici per la salute pubblica e l'ambiente, riducendo al contempo gli impatti negativi non previsti. Alla luce dei danni alla salute in tutto il mondo derivanti dalle esposizioni a SO₂, BC, O₃ e suoi precursori è necessario agire ad una loro riduzione indipendentemente dalla politica climatica. La riduzione delle emissioni di queste sostanze può inoltre contribuire a modificare i tassi di riscaldamento a breve termine, agire sul regime di precipitazioni e circolazioni regionali che vanno ad incidere sull'accumulo di inquinamento. I programmi di riduzione di CO₂ possono anche apportare benefici alla qualità dell'aria considerando la riduzione degli inquinanti atmosferici co-emessi alla CO₂.

Le connessioni ai vari livelli richiedono un approccio sistemico nel considerare l'intero pianeta nelle sue dimensioni ambientali e sociali come un sistema unico. Su tutti i livelli domina l'evidenza dell'urgenza di una riduzione dell'utilizzo dei combustibili fossili.



[1] P. J. Landrigan *et al.*: "The Lancet Commission on pollution and health", *The lancet* **391** (2017) 462.

[2] OECD: *OECD Environmental Outlook to 2050*. OECD Publishing, Paris (2012).

[3] IPCC: *Summary for policymakers. Global warming of 1.5 °C. An IPCC special report on the impacts of global warming of 1.5 °C above preindustrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. V. Masson Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, et al. (Eds.), Geneva (2018).

[4] E. Von Schneidemesser *et al.*: "Chemistry and the linkages between air quality and climate change", *Chem. Rev.* **115** (2015) 3856.

[5] M. C. Facchini, S. Fuzzi: "Qualità dell'aria e cambiamenti climatici: due facce della stessa medaglia", *Ingegneria dell'ambiente* **4** (2017) 344.

[6] IPCC: *Climate change 2013: the physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom (2013).

[7] J. H. Seinfeld, S. N. Pandis: *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*. Wiley-Interscience, New York (2006).

[8] S. Sitch *et al.*: "Indirect radiative forcing of climate change through ozone effects on the land-carbon sink", *Nature* **448** (2007) 791.

[9] B. Brunekreef, S. T. Holgate: "Air pollution and health", *The lancet* **360** (2002) 1233.

[10] E. A. L. Gianicolo *et al.*: "Acute effects of urban and industrial pollution in a government-designated Environmental risk area: the case of Brindisi, Italy", *International journal of environmental health research* **23** (2013) 446.

[11] R. Cesari *et al.*: "Influence of Ship Emissions on Ozone Concentration in a Mediterranean Area: A modelling approach", *Air Pollution Modeling and its Application XXV, Springer Proceedings in Complexity* (2018) 317.

[12] I. Schipa, A. Tanzarella, C. Mangia: "Differences between weekend and weekday ozone levels over rural and urban sites in Southern Italy", *Environmental monitoring and assessment* **156** (2009) 509.

[13] C. Mangia *et al.*: "A numerical study of the effect of sea breeze circulation on photochemical pollution over a highly industrialized peninsula.", *Meteorological Applications* **17** (2010) 19.

[14] M. Amodio *et al.*: "Chemical characterization of fine particulate matter during peak PM10 episodes in Apulia (South Italy)", *Atmospheric Research* **90** (2008) 313.

[15] M. Amodio *et al.*: "Characterization of particulate matter in the Apulia Region (South of Italy): features and critical episodes.", *J. Atmos. Chem.* **63** (2009) 203.

[16] T. C. Bond *et al.*: "Bounding the Role of Black Carbon in the Climate System: A Scientific Assessment", *J. Geophys. Res. Atmos.* **118** n.11 (2013) 5380.

[17] P. Ielpo *et al.*: "Chemical characterization of biomass fuel particulate deposits and ashes in households of Mt. Everest region (NEPAL)", *Science of the Total Environment* **573** (2016) 751.

[18] V. Ramanathan, G. Carmichael: "Global and Regional Climate Changes Due to Black Carbon", *Nature Geosci.* **4** (2008) 221.

[19] V. Ramanathan, Y. Feng: "Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives", *Atmospheric environment* **43**(1) (2009) 37.

[20] M. C. Facchini *et al.*: "Important Source of Marine Secondary Organic Aerosol from Biogenic Amines", *Environ. Sci. Technol.* **42** n. 24 (2008) 9116.

[21] C. D. O'Dowd *et al.*: "Biogenically driven organic contribution to marine aerosol", *Nature* **431** n. 7009 (2004) 676.

[22] R. B. Stull: *An introduction to boundary layer meteorology*. Springer Science & Business Media, Germany (2012).

[23] G. A. Degrazia *et al.*: "Turbulence parameterisation for PBL dispersion models in all stability conditions", *Atmos. Env.* **34** (2000) 3575.

[24] R. Cesari, C. T. Landi, A. Maurizi: "The coupled chemistry-meteorology model BOLCHEM: an application to air pollution in the Po Valley (Italy) hot spot", *Int. J. Environment and Pollution* **65** (2019) 1.

- [25] D. E. Horton, N. S. Diffenbaugh: "Response of air stagnation frequency to anthropogenically enhanced radiative forcing", *Environmental Research Letters* 7 (2012) 044034.
- [26] R. Cesari *et al.*: "Modelling dispersion of smoke from wildfires in a Mediterranean area", *Int. J. Environment and Pollution* 55 n.1-2-3-4 (2014) 219.
- [27] WHO: *Environmental health inequalities in Europe: Assessment report*. WHO, Ginevra (2012).
- [28] M. Armiero: *Introduzione in Ecologia dei poveri, di Joan Martinez Alier*. Jaca Book, Milano (2009).
- [29] A. Hajat, C. Hsia, M. S. O'Neill: "Socioeconomic disparities and air pollution exposure: a global review", *Current Environ Health reports* 2 (2014) 440.
- [30] R. Pasetto *et al.*: "Environmental justice in the epidemiological surveillance system of residents in Italian National Priority Contaminated Sites (SENTIERI Project)", *Epid. Prev.* 41(2) (2017) 134.
- [31] C. Mangia, M. Cervino, M. Portaluri, E.A.L. Gianicolo: "Ridurre l'inquinamento e le disuguaglianze sociali migliora la salute globale", *Riflessioni Sistemiche* 17 (2017) 207.
- [32] EEA: *Unequal exposure and unequal impacts: social vulnerability to air pollution, noise and extreme temperatures in Europe*. EEA Report, Lussemburgo (2019).
- [33] F. Forastiere *et al.*: "Socioeconomic status, particulate air pollution, and daily mortality: differential exposure or differential susceptibility", *Am. J. Ind. Med.* 50(3) (2017) 208.
- [34] D. Schlosberg, L.B. Collins: "From environmental to climate justice: climate change and the discourse of environmental justice", *WIREs Clim Change* 5 (2014) 359.
- [35] C. Mangia: *Genere e cambiamenti climatici*. Scienza, genere e società. Prospettive di genere in una società che si evolve a cura di S. Avveduto, M.L. Paciello, T. Arrigoni, C. Mangia, IRPPS-CNR Monografie, 2015 (217).
- [36] S. Kirschke *et al.*: "Three decades of global methane sources and sink", *Nature* 6 (2013) 813.
- [37] J. F. Bastin *et al.*: "The global tree restoration potential", *Science* 365 (2019) 76.
- [38] O. S. Board: *Negative emissions technologies and reliable sequestration: A research agenda*. National Academies Press, Washington D. C. (2019).
- [39] M. Williams: "Tackling climate change: what is the impact on air pollution?", *Carbon Management* 3:5 (2012) 511.

competenza nei processi di dinamica atmosferica. L'attività di ricerca negli anni si è intersecata con l'interesse più ampio verso il rapporto scienza e società, con particolare riferimento alle tematiche ambientali e di genere.

Pierina Ielpo: laureata in chimica e Ph.D. in Scienze Ambientali, è ricercatrice presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR nell'ambito della chimica ambientale rivolta principalmente allo studio di aerosol e qualità dell'aria, dei processi chimico fisici che avvengono in atmosfera e del *source apportionment* in ambiente urbano, suburbano e remoto.

Rita Cesari: è laureata in fisica ed attualmente è ricercatrice CNR, presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima. La sua attività di ricerca riguarda lo studio della turbolenza nello strato limite planetario e la dispersione e trasformazione di inquinanti atmosferici mediante modelli euleriani e lagrangiani.

Cristina Facchini: è direttrice dell'Istituto di Scienze Atmosferiche e Clima, CNR. La sua attività scientifica generale rientra nel campo del cambiamento globale, con una competenza specifica nei processi fisici e chimici di aerosol e nubi e loro effetti sul cambiamento della composizione atmosferica, sulla qualità dell'aria e sul clima.

Cristina Mangia: laureata in fisica, è ricercatrice presso l'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima del CNR. La sua attività scientifica è incentrata sullo studio dell'inquinamento atmosferico e il suo impatto sulla salute, con una specifica

