



APAT

Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e dei Servizi Tecnici

**ANALISI METODOLOGICA PER LA VALUTAZIONE DELLA
"COMPONENTE ATMOSFERA" NEGLI STUDI DI IMPATTO
AMBIENTALE**

Relatore: Ing. Simone Di Giosia

**Tutor: Ing. Vincenzo Cammarata
Dr.ssa Caterina D'Anna**

Prefazione

Il presente lavoro è il risultato della interazione dello stagista ing. Di Giosia con alcuni collaboratori del Settore Metodologie del Servizio AMB-VIA di APAT. Tale Settore ha il compito di documentare lo stato dell'arte delle metodologie di studio degli impatti ambientali di opere, e di proporre sviluppi nella materia, anche in collaborazione con il sistema delle Agenzie regionali.

Lo stagista ha avuto modo di introdursi prima alla tematica generale degli Studi di Impatto Ambientale (SIA), e poi di rivolgere l'attenzione alla componente scelta, l'atmosfera, appunto, sviluppandone i vari aspetti, come di seguito riportato.

L'ing. Di Giosia ha avuto modo di prendere visione di un'ampia letteratura inerente l'argomento trattato e ha fatto tesoro dell'esperienza trasmessagli dagli analisti APAT e della letteratura pubblica sulle valutazioni dei SIA.

Dopo alcune considerazioni sugli aspetti storici e normativi riguardanti la tematica della valutazione ambientale in generale e la componente atmosfera in particolare (cap. 1), ha illustrato il quadro normativo della VIA e principali strumenti normativi nell'ambito della VIA applicata alla "componente atmosfera", nonché le fasi concettuali per la redazione del quadro di riferimento ambientale riferito alla componente atmosfera (cap. 2).

Nel capitolo 2 ha illustrato i vari aspetti concernenti la trattazione della componente nei SIA, partendo dalla caratterizzazione della componente allo stato *ante operam* e continuando con la valutazione dell'impatto introdotto dalle sorgenti emissive temporanee legate alla realizzazione dell'opera (tipicamente i cantieri) e da quelle proprie dovute all'esercizio delle stesse. Infine ha preso in considerazione la problematica delle misure di mitigazione e compensazione degli impatti, sia in fase di cantiere che di esercizio di un'opera.

I capitolo 3 e 5 sono dedicati rispettivamente alle conclusioni e alla bibliografia.

Ringraziamenti

L'ing. Di Giosia ringrazia in modo particolare l'**arch. Marilena Flori** per le utilissime e approfondite conversazioni che gli hanno permesso di introdursi alle tematiche e problematiche generali legate alla stesura e valutazione degli studi di impatto ambientale.

Fa lo stesso riguardo alla **d.ssa Caterina D'Anna** sia per il suo preziosissimo supporto nell'inquadramento della componente trattata sia per i suggerimenti nell'uso del materiale raccolto e nel suo ordinamento.

Abstract

L'obiettivo del presente studio è stato quello di strutturare una linea metodologica per la valutazione del quadro di riferimento ambientale - componente atmosfera - negli studi di impatto ambientale relativi ad opere sia lineari che puntuali.

I passi concettuali per effettuare un'analisi appropriata della componente, sono stati i seguenti:

- Descrizione della situazione ambientale (*ante-operam*)
- Definizione *scenari di impatto*
- Previsione ed *individuazione degli impatti (post-operam)*;
- Misure di *mitigazione e compensazione*.

La prima fase comprende un inquadramento del contesto nel quale si andrà ad inserire l'opera da realizzare nonché la descrizione delle condizioni meteoclimatiche e delle caratteristiche di qualità dell'aria nell'ambito spaziale di riferimento. Tali valori dovranno poi essere confrontati con i limiti massimi di concentrazione degli inquinanti (standard di qualità dell'aria).

La seconda fase prevede di costituire degli "scenari di impatto" ovvero quelle combinazioni di emissioni e di interazioni atmosferiche (meteorologia e chimica dell'aria) che producono un impatto sulla qualità dell'aria.

La terza fase prevede l'individuazione (cause ed effetti sull'ambiente atmosferico) e la previsione (simulazioni delle emissioni derivanti dal progetto in scenari futuri di diversa ampiezza temporale) degli impatti.

L'ultima fase consiste nel descrivere dettagliatamente le misure adottate per mitigare gli impatti o, nel caso in cui non fosse possibile, le misure di compensazione.

L'analisi metodologica alla base della valutazione di impatto ambientale della componente atmosfera dovrà prevedere l'integrazione delle informazioni che hanno origine dal monitoraggio, dagli inventari di emissione e dalle simulazioni mediante modelli; operare in tale modo costituisce l'approccio ottimale al problema della valutazione e gestione della qualità dell'aria.

Abstract

The present study was aimed at defining a methodology which is used to characterize air quality within the environmental impact assessment procedure.

The steps followed in order to carry out an appropriate analysis are:

- Description of the “environmental situation” (*ante operam*)
- Construction of “impact scenes”
- Definition of the impacts (*post operam*)
- Mitigations

The first step involves the description of meteorological and climatic conditions and air quality characteristics within the project area. These values will have to be compared with standard features.

The second step consists in evaluating the combination of atmospheric interactions and emissions which can effect air quality.

The third step involves assessment of impact by simulations of future situations.

The final step consists in defining impact mitigation measures.

The methodological analysis underlying the environmental impact assessment of air quality will include the interaction of monitoring data, emission values and simulation outputs; working in accordance to these guidelines represents the optimal approach to dealing with air quality.

INDICE:

PREFAZIONE	2
ABSTRACT	3
INTRODUZIONE	7
METODOLOGIA	8
1 ASPETTI STORICO-GIURIDICI	10
1.1 Quadro Normativo della VIA	10
1.2 Standard di qualità dell'aria	13
2. TRATTAZIONE DELLA COMPONENTE ATMOSFERA NEL QUADRO DI RIFERIMENTO AMBIENTALE	22
2.1 Generalità	22
2.2 Descrizione della situazione ambientale (situazione <i>ante-operam</i>)	23
2.2.1 Descrizione generale e dell'area di progetto	24
2.2.2 Meteorologia	24
2.2.3 Stato attuale della qualità dell'aria	29
2.2.4 Indicatori della qualità dell'aria	30
2.3 Definizione <i>scenari di impatto</i> (emissione, meteorologici e chimica dell'aria)	30
2.4 Previsione ed individuazione degli impatti	35
2.4.1 Modelli di emissione	39
2.4.2 Modelli di dispersione	47
2.5 Misure di mitigazione e compensazione	48
2.5.1 Misure di mitigazione in fase di cantiere	49
2.5.2 Misure di mitigazione in fase di esercizio	50
3. CONCLUSIONI	51
4. APPENDICE: I PRINCIPALI INQUINANTI	52
4.1 Monossido di carbonio	57
4.2 Ossidi di azoto	60
4.3 Ossidi di zolfo	63
4.4 Idrocarburi (HC)	66

4.5 Idrocarburi Policiclici Aromatici	66
4.6 Benzene	70
4.7 Diossina	71
4.8 Particelle sospese	73
4.9 Anidride carbonica	76
4.10 Ozono	78
5. BIBLIOGRAFIA	82
Siti web	82

Introduzione

Nell'ambito della **Valutazione d'Impatto Ambientale con il D.P.C.M. 27 Dicembre 1988** art. 5, comma 3 per la componente atmosfera si prevede come obiettivo della caratterizzazione dello stato di qualità dell'aria e delle condizioni meteorologiche quello di stabilire la compatibilità ambientale sia di eventuali emissioni, anche da sorgenti mobili, con le normative vigenti, sia di eventuali cause di perturbazione meteorologiche con le condizioni naturali. Le analisi concernenti l'atmosfera sono pertanto effettuate attraverso: *a)* i dati meteorologici convenzionali (temperatura, precipitazioni, umidità relativa, vento), riferiti ad un periodo di tempo significativo, nonché eventuali dati supplementari (radiazione solare ecc.) e dati di concentrazione di specie gassose e di materiale particolato; *b)* la caratterizzazione dello stato fisico dell'atmosfera attraverso la definizione di parametri quali: regime anemometrico, regime pluviometrico, condizioni di umidità dell'aria, termini di bilancio radiativo ed energetico; *c)* la caratterizzazione preventiva dello stato di qualità dell'aria (gas e materiale particolato); *d)* la localizzazione e caratterizzazione delle fonti inquinanti; *e)* la previsione degli effetti del trasporto (orizzontale e verticale) degli effluenti mediante modelli di diffusione di atmosfera; *f)* previsioni degli effetti delle trasformazioni fisico- chimiche degli effluenti attraverso modelli atmosferici dei processi di trasformazione (fotochimica od in fase liquida) e di rimozione (umida e secca), applicati alle particolari caratteristiche del territorio. Inoltre, nell'allegato II vengono riportate indicazioni specifiche per alcune categorie d'opera elencate nell'art. 1 del DPCM n. 377/88. In particolare per le Centrali termiche e impianti per la produzione di energia elettrica (impianti di combustione centrali nucleari ed altri reattori nucleari) si dovranno descrivere e stimare gli effetti sull'ambiente con riferimento ai punti precedenti, nonché alle scelte progettuali ed alle misure di attenuazione individuate. Per le Infrastrutture lineari di trasporto (autostrade e vie di rapida comunicazione, tronchi ferroviari per il traffico a grande distanza), si dovranno descrivere e stimare gli effetti connessi alle concentrazioni degli inquinamenti atmosferici dovute alle sorgenti in movimento, in relazione a particolari condizioni meteo-climatiche ed orografiche ed in riferimento alla diversa sensibilità dei ricettori.

La domanda di informazione si estende quindi dalle misure provenienti dalle reti di rilevamento, agli inventari delle emissioni e ai dati, compresi quelli meteorologici, necessari all'impiego dei modelli di trasporto, dispersione e trasformazione chimica degli inquinanti.

Metodologia

Il presente lavoro ha come obiettivo l'analisi della componente atmosfera negli studi di impatto ambientale attraverso l'individuazione e la caratterizzazione delle eventuali fonti di inquinamento atmosferico, la determinazione dello stato di qualità dell'aria, l'individuazione degli interventi e/o delle politiche in atto per il controllo, la prevenzione o il risanamento della qualità dell'aria.

In particolare la caratterizzazione della componente avviene attraverso l'analisi dell'inquinamento atmosferico inteso come "stato dell'aria atmosferica conseguente all'immissione nella stessa di sostanze di qualsiasi natura in misura e condizioni tali da alterare la salubrità dell'aria e da costituire pregiudizio diretto o indiretto per la salute dei cittadini o danno ai beni pubblici e privati".

Nel presente lavoro dopo aver delineato un quadro panoramico dei principali strumenti normativi nell'ambito della VIA applicata alla "componente atmosfera", è stato illustrato l'*obiettivo* concreto di questo lavoro ed i *passi concettuali* che si seguiranno per effettuare un'analisi metodologica appropriata.

Prima di procedere è opportuno individuare degli *step* per mezzo dei quali suddividere l'analisi:

1. Descrizione della situazione ambientale (situazione *ante-operam*);
2. Definizione *scenari di impatto* (ad esempio la meteorologia e l'orografia del territorio);
3. Previsione ed *individuazione degli impatti* (situazione *post-operam*);
4. Misure di *mitigazione e compensazione*.

La prima fase comprende un inquadramento del contesto nel quale si andrà ad inserire l'opera da realizzare nonché la descrizione delle condizioni meteorologiche e delle caratteristiche di qualità dell'aria nell'ambito spaziale di riferimento.

La seconda fase prevede di costituire degli "scenari di impatto" ovvero quelle combinazioni di emissioni e di interazioni atmosferiche (meteorologia e chimica dell'aria) che producono un impatto sulla qualità dell'aria; questa fase non può prescindere da una "disaggregazione" dei dati la quale prende forma da una sorta di "analisi decrescente": a partire dalla *componente* (nel nostro caso l'atmosfera) si passerà ai *fattori* (climatologia e qualità dell'aria) per poi descrivere gli *indicatori* (temperatura, pressione, umidità, venti, stabilità atmosferica, radiazione solare, tipologia di inquinanti).

La terza fase prevede l'individuazione (cause ed effetti sull'ambiente atmosferico) e la previsione (simulazioni delle emissioni derivanti dal progetto in scenari futuri di diversa ampiezza temporale) degli impatti.

L'ultima fase consiste nel descrivere dettagliatamente le misure adottate per mitigare gli impatti o, nel caso in cui non fosse possibile, le misure di compensazione.

1 Aspetti storico-giuridici

Le dimensioni del fenomeno dell'inquinamento atmosferico generato dalle attività umane hanno assunto rilievo planetario (emissione di sostanze lesive dello strato dell'ozono stratosferico, emissioni di gas ad effetto serra), continentale (trasporto transfrontaliero e fenomeni di acidificazione del territorio), nazionale, regionale e locale (inquinamento generalizzato delle aree urbane e smog fotochimico). Le politiche ambientali e le misure applicabili per il controllo di questi fenomeni hanno un obiettivo comune: ridurre le emissioni di inquinanti di origine antropica in atmosfera.

Con un *Regio Decreto del 1934*, la legislazione nazionale ha cominciò ad occuparsi di problemi inerenti l'inquinamento atmosferico. Solo a partire dagli anni '80, però, la legislazione ha affrontato in modo organico la tutela della qualità dell'aria fissando limiti, modalità di controllo e prevedendo piani di risanamento.

Nel decennio passato anche l'Unione Europea ha compiuto passi importanti che si sono tradotti nella riduzione delle emissioni, in aria e nelle acque, di un certo numero di inquinanti quali il *biossido di zolfo* (riduzione del 60% dal 1980), il *piombo* (riduzione del 75% dal 1990), in misura minore gli *ossidi di azoto*, dei *composti organici volatili* (riduzione del 14% dal 1990) e del *fosforo* in molti bacini idrografici (riduzione del 30-60% dagli anni '80).

Il parlamento europeo, da parte sua, ha svolto un ruolo decisivo nella formulazione di una politica di lotta progressista contro l'inquinamento atmosferico.

1.1 Quadro Normativo della VIA

La procedura di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) nasce negli Stati Uniti nel 1969 con il *National Environment Policy Act*.

In Europa, tale procedura è stata introdotta dalla *Direttiva comunitaria 85/337/CEE* concernente la valutazione dell'impatto ambientale di determinati progetti pubblici e privati, successivamente modificata dalla *Direttiva 97/11/CE*, quale strumento fondamentale di politica ambientale.

La Direttiva VIA prevede, nel caso dei progetti sottoposti a valutazione, che gli Stati membri adottino le misure necessarie per garantire che il committente fornisca, nella forma opportuna, le seguenti informazioni:

- una descrizione delle caratteristiche fisiche dell'insieme del progetto, delle esigenze di utilizzazione del suolo durante le fasi di costruzione e di funzionamento e delle principali caratteristiche dei processi produttivi;
- una valutazione del tipo e della quantità dei residui e delle emissioni previsti (inquinamento dell'acqua, dell'aria e del suolo, rumore, vibrazione, luce, calore, radiazione, ecc.), risultanti dall'attività del progetto proposto;
- una descrizione sommaria delle principali alternative prese in esame con indicazione delle principali ragioni della scelta, sotto il profilo dell'impatto ambientale;
- una descrizione delle componenti dell'ambiente potenzialmente soggette ad un impatto importante del progetto proposto, con particolare riferimento alla popolazione, alla fauna e alla flora, al suolo, all'acqua, all'aria, ai fattori climatici, ai beni materiali, compreso il patrimonio architettonico e archeologico, al paesaggio e all'interazione tra questi vari fattori;
- una descrizione dei probabili effetti rilevanti del progetto proposto sull'ambiente, delle misure previste per evitare, ridurre e se possibile compensare tali effetti negativi del progetto sull'ambiente;
- un riassunto non tecnico delle informazioni trasmesse sulla base dei punti precedenti.

Il 26 maggio 2003 il Parlamento Europeo ed il Consiglio hanno approvato la *Direttiva 2003/35/CE* che prevede la partecipazione del pubblico nell'elaborazione di taluni piani e programmi in materia ambientale e modifica le Direttive del consiglio 85/337/CEE e 96/61/CE relativamente alla partecipazione del pubblico e all'accesso alla giustizia.

La procedura di VIA viene applicata in Italia dal 1989 sulla base di norme transitorie che derivano da quanto definito dall'*Articolo 6* della *legge 8 Luglio 1986 n. 349*, istitutiva del Ministero dell'Ambiente. L'originale e principale riferimento normativo è la Direttiva 85/337 CEE, che ha introdotto la procedura di Valutazione di Impatto Ambientale mutandone i principi dell'esperienza statunitense ed è stato un forte segnale di svolta per tutti i paesi della comunità; per la prima volta si è riconosciuto l'obbligo di rendere espliciti gli effetti della realizzazione di infrastrutture e di impianti sull'ambiente inteso in senso lato come ambiente naturale e come ambiente antropizzato.

Le norme transitorie che hanno consentito l'applicazione della VIA in Italia sono:

- DPCM 10 agosto 1988 n. 377 (*Regolamentazione delle pronunce di compatibilità*);

- DPCM 27 dicembre 1988 (*Norme tecniche per la redazione degli studi di impatto ambientale e la formulazione del giudizio di compatibilità*).

Lo *Studio di Impatto Ambientale* è un elaborato tecnico-scientifico, redatto dal proponente dell'opera da realizzare, al fine di documentare ai referenti l'attenzione che il progettista ha dedicato ai vincoli ambientali e di fornire gli elementi basilari per l'assenso generale preventivo sulle scelte compiute. Il S.I.A. è articolato nei seguenti tre quadri di riferimento:

- Quadro di riferimento programmatico
- Quadro di riferimento progettuale
- Quadro di riferimento ambientale

Il quadro di riferimento programmatico fornisce gli elementi conoscitivi sulle relazioni tra l'opera progettata e gli atti di pianificazione e programmazione territoriale e settoriale. Si dovrà, quindi accertare la congruenza dell'opera progettata con gli strumenti pianificatori vigenti, nonché la relazione non conflittuale con il regime vincolistico esistente.

Il quadro di riferimento progettuale descrive il progetto e le soluzioni adottate a seguito degli studi effettuati, nonché l'inquadramento nel territorio, inteso come sito e come "area vasta" interessati. La prima parte del quadro è analitica: descrive la soluzione progettuale adottata e tutte le alternative tecniche prese in considerazione nello sviluppo della decisione. La seconda parte si riferisce alla fase transitoria della realizzazione dell'infrastruttura (metodi e mezzi costruttivi, dimensionamento di aree di cantiere e piste), che riguarda un periodo limitato ma significativo in rapporto alla vita economica dell'opera di progetto.

Il quadro di riferimento ambientale descrive i potenziali effetti sull'ambiente, con riferimento a parametri e standard previsti dalla normativa ambientale, sulle componenti:

- Atmosfera
- Ambiente idrico
- Suolo e sottosuolo
- Vegetazione, flora e fauna
- Ecosistemi
- Paesaggio
- Rumore e vibrazioni
- Salute pubblica

Nel quadro ambientale vengono, inoltre, descritte le misure per eliminare o attenuare gli effetti sfavorevoli sull'ambiente (mitigazioni e/o compensazioni).

Nel corso degli anni il numero delle tipologie progettuali da sottoporre alla procedura è costantemente aumentato. Questo a causa sia di norme successive che nel tempo hanno ampliato il campo di applicazione della normativa sia dell'attività legislativa delle Regioni in ottemperanza del *DPR 12 aprile 1996 – Atto di indirizzo e coordinamento*.

Con l'Atto di indirizzo e coordinamento dell'Aprile 1996 si è completato il recepimento della Direttiva 85/337/CEE e si è di fatto avviata la fase di applicazione della VIA ai progetti di rilevanza regionale. Quasi tutte le regioni hanno recepito nel proprio ordinamento l'Atto di indirizzo e coordinamento, seppur con formule diverse. Esse sono ora in grado di svolgere le procedure di impatto di loro competenza, dando così attuazione alla normativa europea fino ad allora sistematicamente elusa. Dunque la Valutazione di Impatto Ambientale è oggi in fase di rafforzamento tecnico e di evoluzione istituzionale; il quadro normativo è stato notevolmente ampliato a seguito dell'introduzione di ulteriori norme nazionali, tra le quale ricordiamo:

- la “Legge Obiettivo” (*Legge n. 443/01*) ed il relativo decreto di attuazione in materia di infrastrutture e trasporti (*D.Lgs n. 190/02*);
- il Decreto “sblocca centrali” (*legge n. 55/02*);
- la Legge Comunitaria 2003 (*Legge n. 306/03*);
- la *Legge n. 5/04*, “Disposizioni urgenti in tema di composizione delle commissioni per la valutazione di impatto ambientale”;

In definitiva la materia di VIA risulta attualmente regolata da circa 100 dispositivi la cui lettura deve essere coordinata ed integrata.

1.2 Standard di qualità dell'aria

Gli *standard di qualità dell'aria* sono i valori massimi di concentrazione al suolo (o *immissione*) ammessi per i vari inquinanti atmosferici in luoghi aperti. Uno standard di qualità dell'aria impone che “la concentrazione al suolo di un inquinante nell'atmosfera, nel punto di misura, non deve superare una certa quantità stabilita”. Tali standard vengono stabiliti dalle autorità. Gli standard di qualità dell'aria non vanno confusi con gli standard di emissione, i quali si riferiscono alle concentrazioni di inquinanti emessi “al camino” e che derivano esclusivamente da fattori tecnologici relativi agli *impianti di abbattimento*.

La qualità dell'aria è definita oggettivamente confrontando le concentrazioni, misurate o stimate, di alcuni inquinanti in atmosfera con valori di concentrazione riferiti ad un particolare intervallo temporale.

Già dal 1983, con il DPCM 28 Marzo 1983, per quanto riguarda la SO₂ e le particelle sospese, l'Italia ha adottato il principio della tutela igienico-sanitaria delle persone o comunità esposte, fissando i limiti massimi di esposizione relativi a inquinanti dell'aria nell'ambiente esterno concernenti otto importanti inquinanti.

Nelle zone in cui le concentrazioni superino o rischiano di superare i limiti imposti dal suddetto decreto, le regioni provvedono a predisporre appositi “piani di risanamento” per il miglioramento progressivo della *qualità dell'aria*, in modo da consentire il rispetto dei limiti stessi entro e non oltre dieci anni dalla data di entrata in vigore del citato decreto.

Tra i paesi che assumono un effettivo controllo della qualità dell'aria si seguono due diverse metodologie di base: l'adozione del “miglior sistema di depurazione possibile” e la “gestione della qualità dell'aria”.

La “gestione della qualità dell'aria” prevede di adottare gli *standard di qualità dell'aria* all'immissione e quindi, con procedimenti di modello e di calcolo, di determinare i limiti di emissione necessari per il loro raggiungimento.

Il metodo del “miglior sistema di depurazione possibile” prevede, invece, di adottare livelli di emissione ottenibili applicando alle sorgenti i mezzi tecnici di controllo più sofisticati, sperando di ottenere, attraverso questi standard, una qualità dell'aria soddisfacente.

In Italia si adotta un sistema di prevenzione dell'inquinamento dell'aria che combina l'adozione di standard sia della qualità dell'aria che dei livelli di emissione, superando di conseguenza il divario fra le due metodologie di base per il controllo dell'inquinamento dell'aria.

Il DPR n. 203 del 24 Agosto 1988 rappresenta l'attuazione delle direttive CEE nn 80/779, 82/884, 84/360 e 85/203 concernenti norme in materia di qualità dell'aria, relativamente a specifici agenti inquinanti, e di inquinamento prodotto dagli impianti industriali, ai sensi dell'art. 15 della Legge 16/04/87 n. 183. Elenchiamo di seguito alcune definizioni riportate nel DPR n. 203 del 24 Agosto 1988:

- *Valori limite di qualità dell'aria*: limiti massimi di accettabilità delle concentrazioni e limiti massimi di esposizione relativi ad inquinanti nell'ambiente esterno.

- *Valori guida di qualità dell'aria*: limiti delle concentrazioni e limiti di esposizione relativi ad inquinamenti nell'ambiente esterno destinati:

- alla prevenzione a lungo termine in materia di salute e protezione dell'ambiente;
- a costituire parametri di riferimento per l'istituzione di zone specifiche e di protezione ambientale per le quali è necessaria una particolare tutela della qualità dell'aria.

Le seguenti definizioni sono invece riportate nel DM 20 Maggio 1991, il quale fornisce “criteri per l’elaborazione di piani regionali per il risanamento e la tutela della qualità dell’aria” e “criteri per la raccolta dei dati inerenti la qualità dell’aria”:

- *Inquinanti primari*: gli inquinanti direttamente emessi dalle sorgenti di emissione, sia in fase gassosa che particellare (ossido di carbonio, ossido di azoto, biossido di zolfo, idrocarburi volatili, metalli, ecc.).

- *Inquinanti secondari*: le specie chimiche derivanti da reazioni termiche o fitochimiche degli inquinanti primari tra loro o con costituenti di base dell’atmosfera (ozono, biossido di azoto, acido nitrico e nitroso, perossiacetilnitrato, nitrati, nitroderivati, acido solforico e solfati, ecc.).

- *Smog fotochimico*: presenza in atmosfera di inquinanti secondari generati da reazioni radicali, che coinvolgono ossidi di azoto e idrocarburi, e che avvengono in presenza di radiazioni ultraviolette (ozono, acido nitrico, PAN ossia perossiacetilnitrato, ecc.).

- *Deposizione acida*: l’insieme dei processi di trasferimento di specie acide dall’atmosfera alle superfici (suolo, acqua, ecc.) sia per via secca che per via umida (pioggia, nebbia, ecc.).

Il suddetto decreto indica, inoltre, i criteri per la progettazione delle *reti di rilevamento della qualità dell’aria*; le stazioni di monitoraggio sono così suddivise:

- *Tipo A*: stazioni di riferimento in aree non direttamente interessate dall’inquinamento urbano (parchi, aree verdi) per ottenere informazioni sul “livello di fondo”;
- *Tipo B*: stazioni in aree densamente abitate;
- *Tipo C*: stazioni in aree ad alta densità di traffico;
- *Tipo D*: stazioni in aree suburbane per la misura dell’inquinamento fotochimico.

Con il DM 6 Maggio 1992 per la prima volta viene data una “definizione del sistema nazionale finalizzato al controllo ed all’assicurazione della qualità dei dati di inquinamento atmosferico ottenuti dalle *reti di monitoraggio*”.

Il D.Lgs. 351/1999 fornisce le seguenti ulteriori definizioni:

- *Aria ambiente*: l’aria esterna presente nella troposfera, ad esclusione di quella presente nei luoghi di lavoro.

- *Inquinante*: qualsiasi sostanza immessa direttamente o indirettamente dall'uomo nell'aria ambiente che può avere effetti dannosi sulla salute umana o sull'ambiente nel suo complesso.
- *Livello*: concentrazione nell'aria ambiente di un inquinante, o deposito di questo, su una superficie in un dato periodo di tempo.
- *Valutazione*: impiego di metodologie per misurare, calcolare, prevedere o stimare il livello di un inquinante nell'aria ambiente.
- *Valore limite*: livello fissato, in base alle conoscenze scientifiche, al fine di evitare, prevenire o ridurre gli effetti dannosi sulla salute umana o per l'ambiente nel suo complesso; tale valore deve essere raggiunto entro un dato termine ed in seguito non superato.
- *Valore obiettivo*: livello fissato al fine di evitare, a lungo termine, ulteriori effetti dannosi per la salute umana o per l'ambiente nel suo complesso; tale livello deve essere raggiunto, per quanto possibile, nel corso di un dato periodo.
- *Soglia di allarme*: livello oltre il quale vi è un rischio per la salute umana in caso di esposizioni di breve durata e raggiunto il quale si deve immediatamente intervenire a norma del presente decreto.
- *Margine di tolleranza*: la percentuale del valore limite nella cui misura tale valore può essere superato alle condizioni stabilite dal presente decreto.
- *Zona*: parte del territorio nazionale delimitata ai fini del presente decreto.
- *Agglomerato*: zona con una popolazione superiore a 250.000 abitanti o, se la popolazione è inferiore a 250.000 abitanti, con una densità di popolazione per km² tale da rendere necessaria la valutazione e la gestione della qualità dell'aria ambiente a giudizio dell'autorità competente.
- *Soglia di valutazione superiore*: un livello al di sotto del quale le misurazioni possono combinate con le tecniche di modellizzazione al fine di valutare la qualità dell'aria ambiente.
- *Soglia di valutazione inferiore*: un livello al di sotto del quale è consentito ricorrere soltanto alle tecniche di modellizzazione o di stima oggettiva al fine di valutare la qualità dell'aria ambiente.

Per il valore limite, la procedura da seguire, per il confronto tra il valore prescritto dalla normativa e i valori rilevati, viene descritta così di seguito: le concentrazioni vengono misurate in un punto qualsiasi del territorio sulla base di unità di periodi di misura di 24 ore

(ovvero *valori medi giornalieri* basati su misure rilevate durante l'intero arco della giornata). I valori delle concentrazioni così misurate giorno per giorno vanno elaborati con metodi statistici, introducendo i concetti di “mediana” e di “percentile”, al fine di determinare il dato che va confrontato col valore limite.

In statistica, se ordiniamo in senso crescente i valori rilevati di un carattere (ad esempio, la concentrazione media giornaliera di un'inquinante), il valore che divide in due parti uguali questa graduatoria, nel senso che lascia uguale il numero di termini da una parte e dall'altra, dicesi valore mediano o “mediana”. Ad esempio, se i valori rilevati sono r , e sono in numero dispari, la mediana sarà identificata dal valore che avrà il seguente posto nella graduatoria: $(r + 1)/2$. Se ugualmente ordiniamo in senso crescente i valori rilevati di un carattere secondo la loro grandezza, l' n -esimo “percentile” è il valore che si sceglie lasciando, da una parte n misure, e dall'altra $(100-n)$ misure (ad esempio, il 98° percentile è quello che lascia da una parte il 98% dei valori e dall'altra il 2%).

In altre parole, se la normativa stabilisce che il valore limite è rappresentato da due soglie di concentrazione, di cui la prima è il riferimento della mediana e la seconda del percentile, significa che se disponiamo in ordine crescente i valori di concentrazione media giornaliera di un certo inquinante, relativi all'intero anno, con la mediana scegliamo quel valore di concentrazione che lascia ugual numero di valori da una parte e dall'altra (che non coincide necessariamente con la media aritmetica dei valori) controlliamo, così, che non superi la prima soglia; invece con l' n -esimo percentile scegliamo quel valore di concentrazione che è superiore a quello della mediana qualora il percentile (come di solito avviene) sia spostato verso valori alti, come, ad esempio il 98° percentile; così, anche in questo caso, controlliamo che il percentuale non superi la seconda soglia, che è maggiore di quella rappresentata dalla mediana. Ad esempio, se per l'anidride solforosa si stabilisce che il valore limite sia rappresentato da due soglie, per cui la mediana non deve superare 0,031 ppm e il 98° percentile (P_{98}) non deve superare 0,096 ppm, significa che il 98% dei giorni dell'anno deve avere una concentrazione media giornaliera inferiore al valore di 0,096 ppm: ne deriva che, se solo il 2% dei giorni dell'anno si verifica una concentrazione superiore a 0.096 ppm, non dovrebbero sorgere problemi sanitari a lungo termine.

Riportiamo di seguito alcune indicazioni e dei criteri per la valutazione e la gestione della qualità dell'aria (D.Lgs. 351/1999):

1. Inquinanti atmosferici da considerare nel quadro della valutazione e della gestione della qualità dell'aria ambiente:

- Inquinanti che devono essere esaminati allo stadio iniziale, ivi compresi gli inquinanti disciplinati da direttive comunitarie esistenti in materia di qualità dell'aria ambiente: Biossido di azoto/ ossidi di azoto, materiale particolato fine (incluso il PM₁₀), particelle sospese totali, piombo, ozono.
- Altri inquinanti atmosferici: Benzene, monossido di carbonio, idrocarburi policiclici aromatici, cadmio, arsenico, nichel, mercurio.

2. Fattori di cui tener conto nella fissazione dei valori limite e delle soglie di allarme:

- Grado di esposizione di settori della popolazione, in particolare di sottogruppi vulnerabili.
- Condizioni climatiche.
- Vulnerabilità della flora e della fauna e dei loro habitat.
- Patrimonio storico esposto agli inquinanti.
- Fattibilità economica e tecnica.
- Trasporto a lunga distanza degli inquinanti, inclusi quelli secondari, tra cui l'ozono.

3. Criteri in ordine alla selezione degli inquinanti atmosferici da prendere in considerazione per la fissazione di un valore limite e di una soglia di allarme:

- Possibilità, gravità e frequenza degli effetti (relativamente alla salute umana ed all'ambiente nel suo complesso occorre attribuire particolare attenzione agli effetti irreversibili).
- Ubiquità e concentrazione elevata della sostanza inquinante nell'atmosfera.
- Trasformazioni ambientali o alterazioni metaboliche nel caso in cui possano dar luogo alla produzione di sostanze chimiche di maggior tossicità.
- Persistenza nell'ambiente, in particolare se la sostanza non è biodegradabile ed è in grado di accumularsi negli esseri umani, nell'ambiente o nelle catene alimentari.
- Impatto dell'inquinante: dimensione della popolazione, risorse viventi o ecosistemi esposti, esistenza di organismi "bersaglio" particolarmente vulnerabili nella zona interessata.
- Eventuale ricorso a metodi di valutazione del rischio.

4. Ulteriori criteri in ordine alla selezione degli inquinanti atmosferici da prendere in considerazione per la fissazione di un valore obiettivo.

Per un inquinante selezionato secondo i criteri sopra riportati, è opportuno fissare un “valore obiettivo”, anziché un valore limite, allorché:

- Le conoscenze sui meccanismi di formazione e sulle sorgenti di emissione non sono soddisfacenti; i dati relativi ai livelli di concentrazione sono scarsi; il contributo delle emissioni dalle sorgenti naturali è significativo.
- L’influenza dei fattori meteorologici è determinante; il meccanismo di formazione e trasporto, con particolare riferimento alla correlazione spaziale e temporale con le sorgenti emmissive coinvolte, richiedono un’azione coordinata tra i diversi Stati membri per la riduzione dell’inquinante.

5. Informazioni da includere nei programmi locali, regionali o nazionali di miglioramento della qualità dell’aria ambiente:

- Luogo nel quale il superamento del valore limite sia stato rilevato.
- Informazioni generali.
- Amministrazioni competenti.
- Natura e valutazione dell’inquinamento.
- Origine dell’inquinamento.
- Analisi della situazione.
- Informazioni su provvedimenti o progetti di miglioramento esistenti, su quelli adottati allo scopo di ridurre l’inquinamento e su quelli programmati o oggetto di ricerca a lungo termine.
- Elenco delle pubblicazioni, dei documenti e dei lavori.

6. Informazioni da trasmettere al Ministro dell’Ambiente relativamente ai valori limite di qualità dell’aria stabiliti dal Decreto del Presidente della Repubblica 203/1988:

- Risultati delle misurazioni.
- Biossido di zolfo e particelle sospese totali: media annuale, mediana annuale, 95° percentile, 98° percentile, mediana invernale.
- Biossido di azoto: media annuale, mediana annuale, 95° percentile, 98° percentile.
- Piombo: media annuale, mediana annuale.

- Superamento dei valori limite: valori registrati, motivi di ciascun superamento, misure adottate per evitare il ripetersi del superamento.

I provvedimenti normativi più recenti, in materia di inquinamento atmosferico, sono:

- il DM 2 Aprile 2002, n. 60 - recepimento della direttiva 1999/30/CE del Consiglio del 22 aprile 1999 concernente i valori limite di qualità dell'aria ambiente per il biossido di zolfo, il biossido di azoto, gli ossidi di azoto, le particelle e il piombo e della direttiva 2000/69/CE relativa ai valori limite di qualità dell'aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio;
- D.M. 1-10-2002, n. 261 - regolamento recante le direttive tecniche per la valutazione preliminare della qualità dell'aria ambiente, i criteri per l'elaborazione del piano e dei programmi di cui agli articoli 8 e 9 del D.Lgs. 4 agosto 1999, n. 351; dell'aria ambiente per il benzene ed il monossido di carbonio;
- il D.Lgs. 21-5-2004, n. 171, attuazione della direttiva 2001/81/CE relativa ai limiti nazionali di emissione di alcuni inquinanti atmosferici;
- il D.Lgs. 21-5-2004, n. 183, attuazione della direttiva 2002/3/CE relativa all'ozono nell'aria.
- il D.lgs. 3-4-2006 n. 152, Norme in materia ambientale.

<i>INQUINANTE</i>	<i>PERIODO DI RIFERIMENTO</i>	<i>LIMITE ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)</i>	<i>TEMPO DI MEDIAZIONE DEI DATI</i>	<i>COMMENTI</i>
BIOSSIDO DI ZOLFO	anno civile	350 (da non superare più di 24 volte per anno civile)	ora	Valore limite DM 60/2.4.2002
	anno civile	125 (da non superare più di 3 volte per anno civile)	giorno	Valore limite DM 60/2.4.2002
	anno civile e inverno (1° ottobre – 31 marzo)	20	anno e inverno	Valore limite per la protezione degli ecosistemi DM 60/2.4.2002
	3 ore consecutive	500 (allarme)	ora	Soglia di allarme DM 60/2.4.2002
PARTICOLATO PM10	anno civile	50 (da non superare più di 35 volte per anno civile)	giorno	Valore limite DM 60/2.4.2002
	anno civile	40	anno	Valore limite DM 60/2.4.2002
BIOSSIDO DI AZOTO	anno civile	200 (98° percentile)	ora	Valore limite DPR 203/24.5.1988
	anno civile	50 (mediana)	ora	Valore guida DPR 203/24.5.1988
	anno civile	135 (98° percentile)	ora	Valore guida DPR 203/24.5.1988
	3 ore consecutive	400	ora	Soglia di allarme DM 60/2.4.2002
OSSIDI DI AZOTO	anno civile	30	anno	Valore limite per la protezione della vegetazione DM 60/2.4.2002
OZONO	ora	200 ¹	ora	Limite massimo di accettabilità DPCM 28.3.1983
	ora	180 (attenzione) ² 360 (allarme) ²	ora	Livelli di attenzione e di allarme DM 16.5.96
	8 ore	110 (media mobile trascinata)	ora	Livello per la protezione della salute DM 16.5.96
	ora	200	ora	Livello per la protezione della vegetazione DM 16.5.96
	giorno	65	ora	DM 16.5.96
IDROCARBURI NON METANICI	3 ore	200 (media aritm.) ³	ora	Limite massimo di accettabilità DPCM 28.3.1983
MONOSSIDO DI CARBONIO	8 ore	10000	ora	Valore limite DM 60/2.4.2002
FLUORO	giorno	20	giorno	Valore limite DPCM 28.3.1983
	mese	10 (media aritm.)	giorno	Valore limite DPCM 28.3.1983
PIOMBO	anno civile	0,5	anno	Valore limite DM 60/2.4.2002
BENZENE				
IPA con riferimento al BENZO(A)PIRENE	anno	0,0010 (media mobile)	giorno	Obiettivo qualità DM 25.11.94

Tabella 1: Quadro normativo nazionale relativo ai limiti alle concentrazioni di inquinanti dell'aria al 1° gennaio 2005 (Fonte: APAT – Dipartimento stato dell'ambiente e metrologia ambientale)

2. Trattazione della componente atmosfera nel Quadro di riferimento Ambientale

2.1 Generalità

L'atmosfera costituisce l'involucro gassoso che circonda la terra per un'altezza di circa un migliaio di chilometri, ed è suddivisa in strati sovrapposti con densità che si riduce con l'altezza. Si parla solitamente di “aria” per quella parte dell'atmosfera (la bassa troposfera) che interagisce con gli organismi, permettendone la respirazione e gli scambi vitali, garantendo le condizioni di vita per gli esseri viventi quali la fornitura dei gas necessari alla respirazione, la deriva termica contro valori estremi di temperatura e la protezione dalle radiazioni ultraviolette provenienti dall'esterno.

La caratterizzazione della qualità dell'aria a livello del suolo deve essere riferita ai parametri che maggiormente possono provocare problemi alla salute della popolazione e, in determinate circostanze, allo stato di conservazione della vegetazione. Da notare che le emissioni possono comprendere molteplici sostanze inquinanti, non tutte sempre identificabili attraverso le usuali strumentazioni e procedure analitiche.

La totalità dei fenomeni di inquinamento atmosferico avviene nella porzione più bassa dell'atmosfera chiamata “Planetary Boundary Layer” (Strato Limite Planetario), o PBL.

Il PBL è quella porzione di troposfera a diretto contatto con la superficie terrestre prevalentemente interessata dall'inquinamento atmosferico e si estende fino a oltre 1 km di altezza.

Nell'atmosfera, ma soprattutto nella troposfera e negli strati più bassi della stratosfera, si verifica la maggior parte di fenomeni quali:

- L'assorbimento, la trasmissione e la distribuzione dell'energia solare;
- i principali cicli naturali (dell'acqua, del carbonio, dell'ossigeno, dell'energia, dell'erosione e della sedimentazione);
- le grandi modificazioni fisico-chimiche dei gas atmosferici che stanno alla base della circolazione generale e della formazione di perturbazioni;
- la presenza di fenomeni meteorologici;
- la progressiva diminuzione della temperatura (gradiente termico verticale);
- fino ad almeno 3 km dal suolo, l'orografia, e la presenza di oceani, influenzano i venti e il gradiente termico verticale.

2.2 Descrizione della situazione ambientale (situazione *ante-operam*)

Allo scopo di valutare il contributo della nuova opera in termini di inquinamento dell'aria è necessaria la conoscenza della situazione attuale (senza opera).

La descrizione della situazione ambientale può essere fatta prendendo in considerazione:

- Descrizione generale e dell'area di progetto
- Meteorologia
- Stato attuale della qualità dell'aria
- Indicatori della qualità dell'aria

Fase	Metodi e strumenti	Scopo
Analisi della qualità dell'aria	Catasto delle emissioni Reti di rilevamento Modelli di trasporto	Accertamento e stima dell'inquinamento di fondo
Analisi della meteorologia del sito	Dati anemometrici Dati di stabilità atmosferica Altezza dello stato di mescolamento Rose anemometriche Frequenze congiunte	Accertamento della capacità diffusive dell'area ed acquisizione di serie climatologiche di dati da utilizzare come inputs nei modelli di trasporto e diffusione
Analisi orografica e della struttura termica orizzontale del sito	Rilievi altimetrici Rilievi orizzontali di temperatura e individuazione di isole di calore	Identificazione di dinamiche micrometeorologiche
Analisi delle emissioni della fonte	Fattori di emissione Regime di funzionamento	Acquisizione dei dati di ingresso per i modelli predittivi sulle portate degli inquinanti emessi
Analisi dell'impatto	Modelli di trasporto e diffusione Modelli climatologici	Stima delle concentrazioni al suolo per il confronto con gli standard qualitativi
Analisi delle opere di contenimento dell'impatto	Modifiche del ciclo tecnologico Efficienza dei depuratori Altezza del camino e gas di combustione	Rispetto degli standard di qualità con soluzioni economicamente e tecnologicamente accettabili

Tabella 2: *L'ante operam*

Nella tabella sopra riportata sono inserite le fasi principali della caratterizzazione ante-operam con i relativi strumenti e le metodologie per effettuare un'analisi completa; nella colonna a destra viene descritto il fine ultimo di ogni fase.

2.2.1 Descrizione generale e dell'area di progetto

La descrizione dell'ambiente esistente può essere fatta attraverso una opportuna descrizione generale del progetto, per collocare in un corretto ambito le dimensioni, le caratteristiche e lo scopo del progetto stesso.

È necessaria una descrizione dell'area di progetto per identificare le più importanti caratteristiche del sito e dei suoi dintorni. Dovrebbero essere eseguite e rappresentate indagini a alle scale spaziali locali e regionali. Tali scale vengono scelte per identificare adeguatamente:

- Gli esistenti ricettori sensibili (scuole, ospedali ecc.);
- Le sorgenti che si trovano intorno al progetto a livello locale e regionale.

È necessario un esame della normativa statale e regionale e una ricognizione presso gli organi di controllo della qualità dell'aria, per identificare standard e criteri di qualità applicabili al progetto proposto.

2.2.2 Meteorologia

Le misure delle grandezze usate per analizzare l'atmosfera (temperatura, pressione, densità, umidità, composizione, flusso di radiazioni) variano molto con la quota; tuttavia si possono identificare zone nell'atmosfera dove questi valori sono costanti o variano molto lentamente. Così si suddivide l'atmosfera in "sfere" e "pause", ristretti spessori d'aria dove le grandezze subiscono una brusca variazione. Le altezze a cui si trovano le pause sono variabili in ambiti piuttosto costanti, così, a partire dal suolo si succedono la *troposfera* (8-18 km), la *tropopausa* (18-30 km), la *stratosfera* (30-60 km), la *stratopausa* (60-80 km), la *mesosfera* (80-100 km), la *mesopausa* (100-120 km), la *termosfera* (120-1000 km), l'*esosfera* (oltre 1000 km). Intermedie, ma con caratteristiche particolari, sono la *ionosfera* e la *magnetosfera*. La meteorologia si interessa quasi esclusivamente ai fenomeni che si manifestano nella troposfera e nella prima parte della stratosfera fino a circa 30 km sul livello del mare: uno strato pari a poco più di 2 millesimi del diametro della Terra, che contiene circa il 99% della massa atmosferica.

La variazione della *temperatura* non dipende solo dall'apporto energetico dei raggi solari, infatti non cresce con la quota anche se gli strati più alti e vicini al Sole ricevono maggiore energia. L'andamento "reale" medio è dovuto prima di tutto al fatto che la maggior parte delle radiazioni (*raggi infrarossi*) che riscaldano l'aria non proviene dal Sole (la luce solare non è ricca di infrarossi) ma dalla Terra, che riemette a bassa lunghezza d'onda le radiazioni assorbite. Fino a una certa quota l'atmosfera è riscaldata "dal basso". Negli strati

d'aria più bassi (troposfera) i gas che provocano l'effetto serra (anidride carbonica, vapore acqueo) impediscono al calore proveniente dal suolo di propagarsi verso gli strati sovrastanti: la perdita di energia è lenta e corrisponde alla graduale diminuzione di temperatura registrata fino a 10 km circa (stratosfera). Qui l'ozono assorbe gli UV ricchi di energia e la temperatura torna a salire fino a circa 50°C. Nella mesosfera, però, torna a scendere fino a -80°C a circa 80 km di quota: l'ozono non è presente, le radiazioni non sono più assorbite ed il suolo è troppo lontano.

Oltre questa quota (termosfera), la temperatura sale fino a superare i 1000 °C: i raggi con lunghezza d'onda inferiore agli 0,2 mm, pur rappresentando una porzione minima della radiazione solare, sono sufficienti a dare molta energia alle rare molecole di ossigeno e di azoto rimaste. A queste quote si misurano solo temperature "cinetiche" che indicano il livello di energia del moto molecolare: in un gas molto rarefatto la velocità delle molecole può essere molto elevata anche se la quantità di calore totale è molto bassa. A quest'altezza, perciò, la temperatura di un corpo come il termometro sarebbe piuttosto alta grazie ai raggi solari ricchi di energia, ma sempre molto inferiore agli oltre 1000 °C del gas circostante. Come le temperature assolute o di particolari zone del Sole, anche quelle dell'alta atmosfera sono ricavate da calcoli termodinamici.

L'aria è una soluzione di gas e vapori dove si trovano in sospensione particelle di polvere, di sali marini, d'acqua, di pollini, ecc. L'*umidità* è la grandezza che definisce il contenuto di vapor acqueo in un dato volume d'aria. Si misurano:

- L'*umidità assoluta* che indica la quantità di vapor acqueo presente nell'aria di un luogo in un dato momento e si misura in g/m³ d'aria (o g/l);
- L'*umidità relativa* che rappresenta il rapporto tra la quantità di vapor acqueo presente in 1 m³ d'aria e quella che, teoricamente, sarebbe contenuta in quello stesso metro cubo alla stessa temperatura se l'aria fosse satura di vapore. Si esprime con una percentuale (il 100% corrisponde al livello di saturazione dell'aria) ed è il modo più usato in meteorologia per indicare l'umidità.

La *saturazione* è un fenomeno fisico-chimico che si verifica quando 2 fasi di una soluzione in contatto tra loro (in questo caso liquido, cioè vapor acqueo condensato, e gas, cioè aria) raggiungono condizioni di temperatura e pressione tali che i fenomeni di scambio di materia tra una fase e l'altra non sono più possibili. Nell'aria, ad una certa temperatura e pressione, c'è un solo valore di umidità massima possibile rappresentato dal *livello di saturazione*. In queste condizioni, se si aggiunge altro vapore senza variare volume o temperatura, esso diventa subito acqua (si *condensa*).

Il livello di saturazione del vapor acqueo nell'aria varia con la temperatura e la pressione: più la temperatura e/o la pressione sono elevate, maggiore è la quantità di vapore che l'aria può contenere. Se una massa d'aria umida si raffredda, la quantità di vapore acqueo presente può diventare superiore al livello di saturazione e una parte si condensa. Poiché sia la quantità di vapore presente che il livello di saturazione variano continuamente, di solito l'umidità è misurata come *umidità relativa*: un parametro essenziale in climatologia e meteorologia poiché determina la quantità di precipitazioni.

Ogni tipo di *vento*, cioè di flusso d'aria, ha una velocità direttamente proporzionale alla differenza di pressione tra la zona di provenienza e quella di arrivo e inversamente proporzionale alle due superfici in cui si verifica lo spostamento. In altre parole, la velocità di un vento dipende direttamente dal *gradiente barico* e inversamente dallo spazio in cui si sviluppa. Un gradiente barico elevato determina un'alta velocità del vento se si sviluppa su una piccola superficie; se si sviluppa su una grande superficie, invece, un vento inizialmente veloce che poi si smorza progressivamente. Un gradiente barico basso provoca sempre un vento a bassa velocità.

Se il vento è orizzontale e vicino al suolo è importante anche dalla “conformazione del suolo”: essendo irregolare, può far cambiare direzione ed intensità alle raffiche: la conoscenza della direzione e della velocità media dei venti è necessaria per fare previsioni attendibili sullo sviluppo meteorologico. Inoltre la velocità del vento condiziona direttamente la dinamica del mare.

Gli strumenti per misurare e registrare le variazioni della velocità del vento sono:

- L'*anemometro* che misura la velocità istantanea; è costituito da un'elica (o mulinello) collegata ad un asse connesso ad un contagiri o ad un tachimetro. La velocità del vento si misura in m/s o km/h o, a volte, anche in *nodi* (= miglia marine all'ora = 1852 m/h).
- L'*anemografo* è un anemometro registra le variazioni di velocità in un arco di tempo; può registrare anche velocità massime e medie.

La direzione del vento è misurata con strumenti semplicissimi:

- La *banderuola* che di solito è una lamina di metallo che, spinta dal vento, gira intorno all'asta mostrando la direzione del vento; può essere collegata ad un indice che scorre su una *rosa dei venti* indicando l'angolazione in modo preciso.
- La *manica a vento*, diffusa negli aeroporti, permette di individuare a prima vista ma in modo grossolano la direzione e l'intensità del vento; è formata da un tronco di

cono in tessuto leggero, spesso a righe bianche e rosse concentriche, tenuto aperto all'estremità più larga da un cerchio di metallo ancorato con cavi resistenti e mobili a un asta. Il vento entra nella manica, la solleva e la orienta: più è intenso, più la manica si distende nell'aria.

Le *inversioni termiche* sono dei fenomeni atmosferici che impediscono il normale rimescolamento delle masse d'aria: in genere, la temperatura dell'aria decresce man mano che aumenta l'altezza (circa 7°C per Km) e questo fa sì che le masse d'aria più calde, essendo meno dense, salgano e prendano il posto dell'aria più fredda che scende. Dato che quest'aria calda è anche quella più inquinata perché si trova nella zona delle maggiori emissioni inquinanti, ne risulta un rimescolamento dei vari strati della troposfera che porta ad una diminuzione della concentrazione dei contaminanti atmosferici. In alcuni casi, però, si possono formare degli strati d'aria più calda a qualche decina o centinaia di metri d'altezza (inversione termica) per cui lo strato sottostante non sale e ristagna al suolo; il tutto comporta inevitabili processi di accumulo delle sostanze inquinanti. Le inversioni termiche si formano solitamente nelle notti limpide subito dopo il tramonto, a causa del rapido raffreddamento del terreno (che a sua volta provoca un rapido raffreddamento dell'aria con cui è a contatto). Questo fenomeno è detto inversione termica di tipo radiativo e in genere termina col riscaldamento mattutino della superficie terrestre; se questo non avviene gli inquinanti si possono accumulare anche per più giorni consecutivi, con tutti i problemi che ciò comporta.

Di seguito sono elencate i processi e le condizioni che portano alla dispersione degli inquinanti:

TRASPORTO DI SOSTANZE IN ATMOSFERA

- Per convezione atmosferica
- Attraverso il vento
- Attraverso la pioggia
- Ricadute secche al suolo per gravità
- Ricadute umide al suolo attraverso la pioggia

CONDIZIONI NON ORDINARIE NELL'ATMOSFERA

- Frequenti situazioni di inversione termica
- Calme atmosferiche prolungate
- Nebbie frequenti

- Conche con situazioni di ristagno di aria
- Venti prevalenti in direzione di bersagli sensibili
- Aree con elevata ventilazione complessiva
- Piogge eccezionali
- Siccità eccezionali
- Freddi invernali eccezionali
- Gelate precoci
- Caldi estivi eccezionali
- Esistenza di livelli già elevati di inquinamento atmosferico

La *stabilità atmosferica* è un indicatore della turbolenza atmosferica alla quale si devono i mescolamenti dell'aria e quindi il processo di diluizione degli inquinanti.

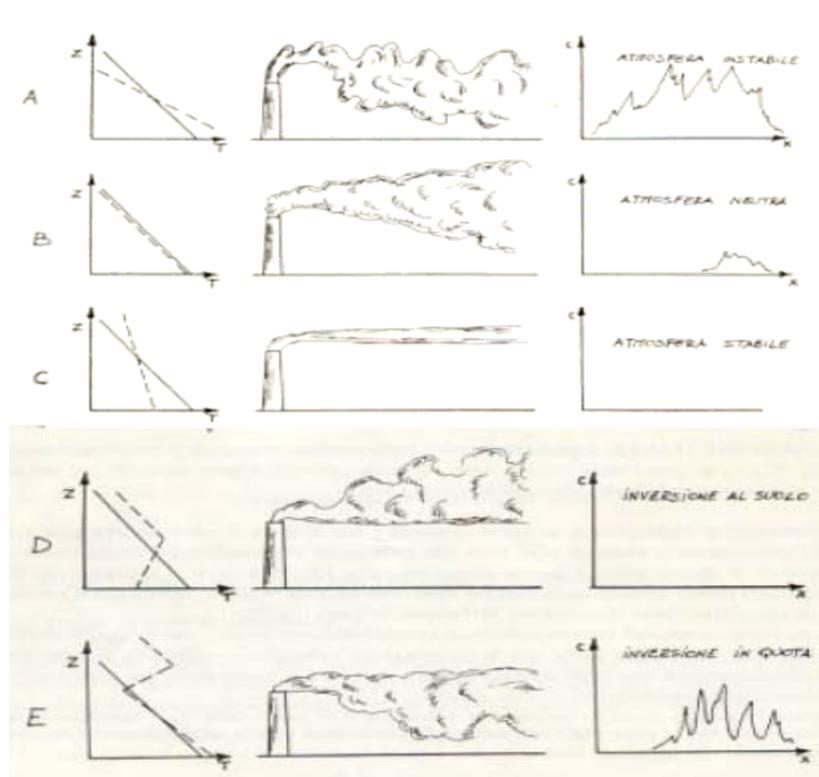


Figura 1 : Condizioni di stabilità atmosferica e dispersione degli effluenti

La figura sopra riportata illustra alcuni casi di condizioni atmosferiche abbinati alle emissioni; nella figura A abbiamo il caso di “atmosfera instabile” che, abbinato a condizioni di vento forte, rappresenta la situazione più favorevole per la dispersione verticale degli inquinanti.

In opposizione, nella figura C possiamo vedere un' "atmosfera stabile" la quale, abbinata a condizioni di vento debole, fornisce la situazione più critica per la dispersione verticale degli effluenti.

Nelle ultime 2 figure viene illustrato il fenomeno dell' *inversione termica* ovvero l'aumento della temperatura dell'atmosfera all'aumentare della quota (in contrasto con quanto avviene generalmente); se questo fenomeno avviene al suolo (figura D) gli inquinanti, contenuti nei fumi caldi uscenti dal camino posto al di sopra del punto di inversione, tendono a salire e ciò rappresenta una condizione favorevole per i recettori sensibili posti al di sotto. Se l'inversione avviene in quota si crea invece una sorta di "cappa" al di sotto della quale gli inquinanti restano intrappolati.

2.2.3 Stato attuale della qualità dell'aria

Lo stato della qualità dell'aria dovrà riguardare la determinazione delle concentrazioni dei principali inquinanti (ossidi di azoto e di zolfo, ossidi di carbonio, polveri, idrocarburi non metanici, ozono, vedi *appendice*) e l'analisi delle relative variazioni nello spazio e nel tempo in diversi periodi del giorno e dell'anno; particolarmente utile, al fine della caratterizzazione spaziale dello stato di qualità dell'aria, sarà il ricorso a sistemi di biomonitoraggio basati sull'impiego di *bioindicatori* (es. licheni); potrà essere anche utile il ricorso a metodi di valutazione indiretti basati sull'analisi dello stato di salute della popolazione o sull'effetto dell'inquinamento sui beni immobili.

Le emissioni inquinanti da sorgenti e le interazioni atmosferiche influiscono sulla qualità dell'aria e gli effetti sui "ricettori" definiscono il livello fino al quale la qualità dell'aria è degradata. Le sorgenti antropogeniche di inquinanti dell'aria si possono dividere in due categorie: "sorgenti mobili" e "sorgenti fisse".

Quelle mobili includono automobili, autocarri, autobus, aerei, navi, treni; quelle fisse includono centrali termoelettriche, centrali termiche civili e commerciali, raffinerie, impianti industriali. Sorgenti che includono una combinazione di quelle mobili e fisse (aeroporti, insediamenti urbani) talvolta vengono chiamate "composte".

Le sorgenti emettono una varietà di inquinanti, particolati e gas. Nell'atmosfera tali inquinanti reagiscono tra loro e con i gas dell'aria, per cui la qualità dell'aria che raggiunge il "ricettore" viene determinata dalla natura e quantità dell'inquinante emesso e dall'entità delle interazioni atmosferiche (dispersione e trasformazione chimica) che si sono verificate durante il trasporto dalla sorgente al "ricettore", dove con questo termine si intende un

qualsiasi oggetto affetto negativamente dalla qualità dell'aria alla quale è esposto; i ricettori includono esseri umani, piante, animali, materiali.

Gli inquinanti atmosferici vengono distinti in due grandi categorie: primari e secondari. Gli *inquinanti primari* sono quelli emessi direttamente dalle sorgenti. Gli *inquinanti secondari* sono quelli che si formano da processi chimici nell'atmosfera. Esempi di inquinanti primari sono il monossido di carbonio, gli ossidi di azoto; esempi di inquinanti secondari sono gli ossidi fotochimici.

Per il controllo e la tutela della componente atmosfera dovranno essere localizzati tutti i punti di monitoraggio della qualità dell'aria (rete di rilevamento, punti oggetto di campionamento periodico) esistenti prima della realizzazione del progetto, o previsti per il monitoraggio degli effetti del progetto; ogni punto di monitoraggio dovrà essere caratterizzato in base alla tipologia di inquinanti rilevati e alla di rilevamento.

2.2.4 Indicatori della qualità dell'aria

Nello studio di impatto ambientale per la componente atmosfera si scelgono opportuni indicatori ambientali selezionati sulla base della tipologia del progetto e dell'ambiente ospite. Ad esempio gli indicatori ambientali dell'aria sono gli inquinanti atmosferici (ossidi di azoto, ossidi di zolfo, particelle sospese, etc.), il censimento delle sorgenti inquinanti dell'aria (inventari di emissione), il censimento dei ricettori, gli indicatori biologici.

Nel caso in cui non si abbiano dati sulla qualità dell'aria né sia possibile impiantare stazioni di rilevamento della qualità dell'aria (ad esempio per scarsità di tempo a disposizione), si può ottenere un quadro della qualità dell'aria attraverso la valutazione del tipo di risposta che la vegetazione può avere nei confronti dei diversi contaminanti, ossia col cosiddetto monitoraggio biologico; per fare ciò si ricorre a *indicatori biologici*, rappresentati da campioni di vegetali presenti nell'area di studio.

2.3 Definizione scenari di impatto (emissione, meteorologici e chimica dell'aria)

Un'analisi della qualità dell'aria esistente è indispensabile per stabilire il livello di riferimento col quale può essere confrontato il potenziale di impatto del progetto. Una completa caratterizzazione richiede che l'analisi sia condotta a scala regionale e locale attraverso idonee reti di rilevamento fisse ed eventualmente mobili.

La descrizione della qualità dell'aria a livello regionale è ottenuta dai dati raccolti dalle stazioni di monitoraggio dell'aria situate nelle vicinanze dell'attività progettata.

Esempi di fattori che influenzano la qualità dell'aria a livello regionale includono la distribuzione spaziale delle sorgenti di inquinanti e la concentrazione degli inquinanti all'emissione (*inventario delle emissioni*), la topografia e la meteorologia.

Se non sono disponibili i dati di monitoraggio atmosferico o la stazione di monitoraggio atmosferico più vicina al sito di progetto:

- è troppo distante per essere rappresentativa della qualità dell'aria regionale;
- è relativamente nuova (quindi è provvista di scarsi dati);
- non è completamente equipaggiata per il monitoraggio di tutti gli inquinanti che interessano;
- allora potrebbe essere necessario modellizzare, monitorare espressamente o entrambe le cose.

Uno degli approcci che si possono utilizzare è quello di stabilire gli *scenari di impatto*; si definisce scenario d'impatto quella combinazione di emissioni e di interazioni atmosferiche (meteorologia e chimica dell'aria) che si presentano simultaneamente per produrre un impatto sulla qualità dell'aria. Una volta costruiti, gli scenari di impatto forniscono le informazioni richieste per identificare gli appropriati dati di ingresso richiesti per i modelli di qualità dell'aria.

Gli scenari di impatto vengono costruiti per un minimo di due casi per ciascuna analisi ambientale:

- *impatto più probabile (o condizione prevalente)*: combinazione di emissioni e di interazioni atmosferiche che produce il più frequentemente incontrato effetto sulla qualità dell'aria.
- *Impatto caso peggiore (o condizione peggiore)*: combinazione di emissioni e di interazioni atmosferiche che produce il peggiore effetto sulla qualità dell'aria.

Il “caso più probabile” fornisce una base per stimare se uno standard di qualità dell'aria verrà superato ed il livello al quale lo standard viene generalmente superato.

Come risultato, il “caso più probabile” fornisce la base per confrontare l'effetto del progetto con limiti di accettabilità della normativa contro l'inquinamento atmosferico.

Il “caso peggiore” è utile per identificare l'effetto più grave che si presenterà in un determinato anno.

Il primo passo verso la costruzione dei due scenari di impatto è quello di caratterizzare separatamente le emissioni, la meteorologia e la chimica dell'aria, e di determinare separatamente le emissioni e la meteorologia del caso più probabile e del caso peggiore.

Il secondo passo consiste nel valutare emissioni, meteorologia e chimica dell'aria in combinazione, per stabilire gli scenari di impatto relativi al caso più probabile ed al caso peggiore. Le sorgenti nel sito di progetto e le sorgenti esogene al sito di progetto possono essere sufficientemente differenti per assicurare scenari separati.

SCENARI DI EMISSIONE

Uno *scenario di emissione* identifica la distribuzione spaziale delle sorgenti, la natura dei contaminanti emessi, le entità delle emissioni e la variazione temporale delle emissioni. Degli scenari di emissioni, possono essere determinate le condizioni delle emissioni del caso più probabile e del caso peggiore. La condizione più probabile corrisponderà generalmente ad un picco nelle emissioni; la condizione del “peggior caso” corrisponderà ad un'entità delle emissioni insolitamente elevata, dovuta a periodi particolari di funzionamento “transitori”.

La costruzione di tale scenario si basa sui seguenti quattro “fattori di controllo”: tipo di sorgente, entità dell'attività, tipi di scenario e distribuzione spaziale delle sorgenti.

Tipo di sorgente: se sono presenti sia sorgenti fisse che mobili, l'inventario delle emissioni verrà preparato per entrambe.

Entità dell'attività: l'entità dell'attività delle sorgenti è una delle maggiori cause determinanti dell'emissione totale di inquinanti. Maggiore è l'entità dell'attività, maggiore è l'impatto della sorgente. Per alcune opere, l'entità dell'attività varia con la stagione, il mese, la settimana o secondo il giorno della settimana.

Tipi di scenario: per un'analisi degli effetti sulla qualità dell'aria è richiesto un minimo di quattro tipi di scenari, ovvero “esistente”, “non edificato”, “costruzione”, “edificato”.

Lo scenario “esistente” fornisce i dati delle emissioni per sorgenti esistenti nel sito di progetto e sorgenti esterne al sito di progetto. Lo scenario “costruzione” fornisce i dati di emissioni per sorgenti associate con la fase di costruzione del progetto. Lo scenario “non edificato” fornisce dati di emissioni assumendo che il progetto non sia ancora funzionante (in esercizio). Lo scenario “edificato” fornisce dati di emissioni per il funzionamento del progetto così come programmato.

Distribuzione spaziale: l'identificazione della distribuzione spaziale delle sorgenti può variare secondo il grado di sofisticazione richiesto. Ad esempio, le sorgenti “locali” per il progetto (le quali possono avere effetti sui livelli degli inquinanti primari all'interno e intorno al sito di progetto) possono essere separate dalle sorgenti “non locali” per il progetto (che possono avere effetti sui livelli degli inquinanti secondari all'interno e

intorno al sito di progetto). Un approccio più formale è quello di suddividere il progetto e le aree circostanti in *celle* e sviluppare uno scenario individuale di emissioni per ciascuna cella.

SCENARI DI METEOROLOGICI

Il successo dei modelli di qualità dell'aria dipende molto dai parametri meteorologici selezionati per i “dati di ingresso” (*inputs*) e dai valori assegnati a ciascun parametro. I suddetti valori vengono assegnati prendendo in considerazione un'analisi sistematica dei dati meteorologici locali e regionali, come anche le influenze locali e regionali aerodinamiche e topografiche. Le analisi includono la costruzione di traiettorie, la valutazione di effetti di aerodinamici derivanti dagli ostacoli al flusso di vento, la distorsione del flusso del vento nei pressi delle irregolarità naturali del terreno, e una valutazione di questi fattori (ad esempio brezze di mare o di lago, brezze di valle, brezze di terra, canalizzazione dei venti) che influenzano i parametri in input (direzione e velocità del vento, stabilità atmosferica, altezza dello strato di rimescolamento, radiazione solare).

Per identificare quelle condizioni meteorologiche da usare come *inputs* per i modelli di qualità dell'aria, è necessario stabilire gli scenari meteorologici che provocano gli impatti sulla qualità dell'aria tipo “caso più probabile” e “caso peggiore”, dapprima per gli inquinanti primari e poi per quelli secondari.

Uno “scenario meteorologico” per gli inquinanti primari identifica quelle condizioni meteorologiche che più influenzano la qualità dell'aria locale e il tempo in cui si manifesta l'evento.

Per quanto riguarda i cosiddetti “fattori di controllo” l'attenzione è rivolta soprattutto alle interazioni atmosferiche nelle vicinanze della sorgente. Le variabili atmosferiche che controllano la dispersione degli inquinanti atmosferici primari vicino alla sorgente includono *velocità e direzione del vento, altezza dello strato di rimescolamento e stabilità atmosferica*.

La velocità del vento influenza la velocità con la quale un inquinante viene trasportato orizzontalmente lontano dalla sorgente, come anche la quantità dell'aria diluente mescolata (minore è la velocità del vento, minore è la diluizione e più elevato è l'impatto ambientale). La direzione del vento influenza l'area ricettrice interessata dall'inquinamento relativa alla sorgente (una direzione del vento persistente con variazione minima massimizza l'impatto, specialmente se diretta verso un *ricettore sensibile*).

L'altezza dello strato di rimescolamento influenza il volume entro il quale l'inquinante viene disperso (minore è l'altezza maggiore è l'impatto).

La stabilità atmosferica influenza l'entità con la quale l'inquinante viene trasportato verticalmente lontano dalla sorgente (più l'atmosfera è stabile, minore è l'entità del trasporto verticale). Se una più bassa entità del trasporto verticale fa aumentare l'impatto, ciò dipende dall'altezza della sorgente sopra la superficie del suolo.

Per una sorgente situata al livello del suolo, un'atmosfera stabile produce il massimo impatto. Per riassumere le condizioni atmosferiche che causano un più elevato impatto sulla qualità dell'aria da una sorgente al livello del suolo sono:

- velocità del vento da calma a bassa (circa 1 m/s);
- direzione del vento persistente e verso zone ad elevata densità di popolazione e/o ricettori sensibili;
- altezza dello strato di rimescolamento bassa e persistente;
- stabilità atmosferica “molto stabile” (Classe di Pasquill = F).

Anche per una sorgente elevata sul suolo un'atmosfera stabile limita il trasporto verticale; in questo caso la massa di inquinante rimane concentrata e stratificata in uno strato elevato e l'impatto a livello del suolo è minimo. Il massimo impatto si verifica quando l'atmosfera è instabile e la risalita verticale del pennacchio è limitata (caso del “pennacchio intrappolato”). Come risultato, le condizioni atmosferiche che causano il maggior impatto sulla qualità dell'aria per una sorgente elevata sono:

- velocità del vento da leggera a forte (da 2 a 15 m/s);
- direzione del vento persistente e verso zone densamente popolate e/o ricettori sensibili;
- altezza dello strato di rimescolamento bassa, persistente e sufficientemente elevata da “intrappolare” le emissioni da una sorgente elevata.

Sia per una sorgente a livello del suolo che per una sorgente elevata, se queste condizioni producano o meno impatti sulla qualità dell'aria dipende dalla concomitanza con eventuali emissioni ovvero bisogna costruire uno *scenario di impatto*.

SCENARIO DELLA CHIMICA DELL'ARIA

Uno “scenario della chimica dell'aria” è una descrizione chimica della formazione di inquinanti secondari. Le descrizioni chimiche della formazione di inquinanti secondari sono basate su simulazioni in laboratorio delle condizioni atmosferiche; è necessario

mantenere accuratamente le atmosfere controllate e monitorare i cambiamenti delle concentrazioni delle sostanze chimiche. Le informazioni ottenute da questi esperimenti sono poi usati per costruire le descrizioni chimiche.

La caratterizzazione delle proprietà chimiche e fisiche richiede costosi programmi di monitoraggio.

2.4 Previsione ed individuazione degli impatti

Nella previsione degli impatti bisogna innanzitutto riconoscere le probabili cause (intese sia come fonti che come effetti di “ordine inferiore”) e determinare i possibili effetti (cambiamenti ambientali); chiaramente lo studio di situazioni già esistenti dovrebbe fornire un valido supporto alla determinazione delle sorgenti inquinanti, siano esse l’origine di cambiamenti dell’atmosfera o che avvengono attraverso l’atmosfera. Stiamo parlando di variazioni della morfologia superficiale (disboscamenti, accumuli d’acqua), rilascio di calore, rilascio di sostanze da sorgenti, da polveri o da altre sostanze. I tipi di cambiamenti possono essere “gerarchizzati” con un *network* che permetta di evidenziare una priorità, nella considerazione degli effetti, anche diversa da quella che imporrebbe l’associazione di una maggiore importanza agli effetti immediati al rilascio.

In realtà gli effetti a mesoscala, sulla biosfera e sulla sicurezza, il cambiamento della visibilità, la variazione dello standard qualitativo della vita o gli impatti di tipo psicologico vengono presi sempre in scarsa considerazione rispetto all’emissione inquinante, vista come principale effetto da mitigare, e su ciò andrà indirizzato anche il nostro maggior interesse. Le informazioni fondamentali sul rilascio delle emissioni includeranno:

- natura delle emissioni;
- variazione ed ubicazione;
- quantità.

Sulla entità del rilascio possiamo far riferimento ai dati di progetto o ad i calcoli con i fattori di emissione suggeriti dall’EPA (Environment Protection Agency), o al monitoraggio di emissioni simili con esperimenti o con lo studio di realtà esistenti.

Il tipo di previsione da realizzare dipenderà dal livello di precisione richiesto: in uno screening dovremo cercare di raggiungere il massimo dettaglio per ciascuna componente affinché questi dati possano essere l’input per lo studio degli effetti secondari.

Nella realtà, l’emissione inquinante segue un percorso lungo, con l’interazione continua ed imprevedibile di tutte le variabili atmosferiche, fisiche e chimiche; nella determinazione

dello scenario è invece necessario ricorrere alla modellazione ed alla effettuazione di una serie di assunzioni.

Nella modellazione dell'impatto si costituiscono invece dei sottoscenari (scenario di emissione, scenario meteorologico, scenario di chimica dell'aria) che vengono contemporaneamente inseriti nel modello con il risultato di una ipotesi di qualità dell'aria.

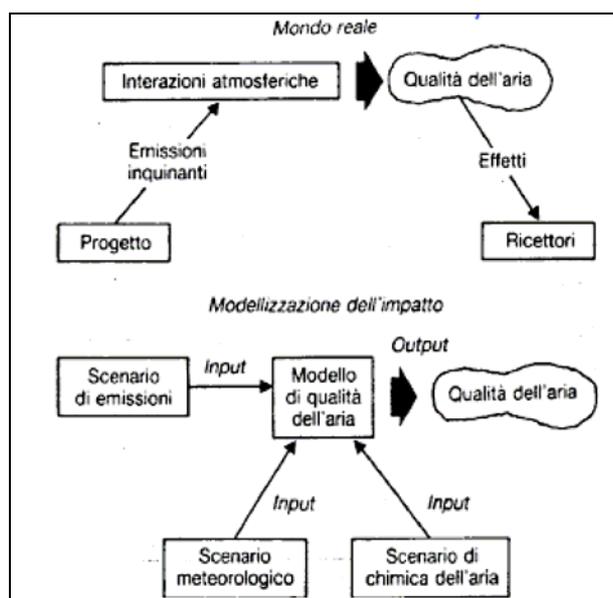


Figura 2: Schema concettuale per la “modellizzazione degli impatti”.

Si vede quindi come la fase della creazione dello scenario di impatto, cioè della modellazione di tutte le componenti esogene che possono intervenire nel processo inquinante, della loro interazione, e della calibrazione dei loro pesi ponderali, sia fondamentale nella corretta valutazione di un impatto. La complessità e la variabilità intrinseca della componente atmosfera ci impone di studiare comunque in maniera separata ciascuno di questi sottoscenari.

Sulla base dei fattori causali di impatto e delle azioni di progetto individuate, si possono costruire delle “matrici”, ossia delle tabelle in cui queste voci compaiono rispettivamente come righe e colonne al fine di identificare in seguito a quale singola attività si generano i fattori che causano gli impatti sull'ambiente.

Le matrici creano una correlazione fra attività di progetto, effetti potenziali, impatti indotti, e ricettori, divisi per ogni componente. La prima parte (o fase di base) riunisce sulle colonne le attività di progetto e sulle righe i fattori causali di impatto facendo riferimento alla sola presenza del fattore rispetto all'attività incrociata: all'incrocio riga/colonna della matrice viene indicata la presenza (con una X) o assenza (nessun simbolo) di fattori causali

di impatto. La seconda parte (o fase di giudizio) correla gli impatti con i possibili ricettori indicandone le caratteristiche qualitative: all'incrocio riga/colonna, ed in corrispondenza delle X della prima fase, viene indicata una tripletta di lettere, che rappresenta le caratteristiche di entità, durata nel tempo e reversibilità di ogni impatto secondo la simbologia qui di seguito riportata.

A = impatto alto

M = impatto medio

B = impatto basso

I = impatto irreversibile

R = impatto reversibile

T = impatto temporaneo

P = impatto permanente

					ATMOSFERA					
ATTIVITA' DI PROGETTO					LEGENDA			RICETTORI		
Scavi e movimenti terra	Trasporto materiale estratto	Lavorazione del materiale con mezzi meccanici	Presenza della cava sul sito	Approvvigionamento acqua per lavorazioni	X = presenza dell'impatto	A = impatto alto M = impatto medio B = impatto basso I = impatto irreversibile R = impatto reversibile				
X	X	X			Emissioni di polveri	L'impatto dei fattori inquinanti sull'atmosfera è quasi ovunque trascurabile e comunque sempre contenuto nei limiti della normativa vigente	MRT	BRT	MRT	
	X	X			Emissioni di microinquinanti		BRT	BRT	MRT	

Figura 3 : Matrice di quantificazione degli impatti

Tipicamente le sorgenti di impatto derivano dalle attività di cantiere e dall'esercizio delle seguenti tipologie di opere:

- Centrali termoelettriche e cementifici;
- Impianti le cui emissioni possono contenere sostanze ad elevata pericolosità; intrinseca, anche se in quantità relativamente modeste;
- Inceneritori per lo smaltimento dei rifiuti;
- Alcune categorie di impianti industriali;

- Interventi che comportano sbancamenti ingenti e prolungati in grado di produrre grandi volumi di polveri;
- Cave;
- Cantieri di grandi opere;
- Infrastrutture inducenti grandi volumi di traffico e quindi grandi volumi di gas di scarico: in primo luogo autostrade ed altre strade a elevata percorrenza.

I processi e le condizioni ambientali condizionanti la criticità degli impatti possono essere riassunti come segue:

- Processi chimico-fisici nell'atmosfera;
- Reazioni di equilibrio tra diverse forme di ossidi di zolfo;
- Reazioni di equilibrio tra diverse forme di ossidi di azoto;
- Formazione di ozono troposferico in determinate condizioni dell'aria;
- Formazione di smog fotochimici;
- Acidificazione delle piogge;
- Riduzione dell'ozono stratosferico in presenza di cloro attivo e altre sostanze reattive.

Di seguito si riportano tutti quegli effetti che possono essere visti come “potenziali impatti negativi”:

- Contributi potenzialmente significativi all'inquinamento atmosferico a livello locale da parte di emissioni in atmosfera di sorgenti puntuali;
- Aumento dell'inquinamento atmosferico locale da parte dei mezzi di trasporto indotti;
- Diffusione di sostanze pericolose da sorgenti fisse inquinanti a livello del suolo;
- Produzioni significative di polvere da movimentazioni del terreno;
- Danni a coltivazioni prodotti da ricadute al suolo di inquinanti;
- Produzione di cattivi odori e conseguenti disagi alla popolazione;
- Contributi potenzialmente significativi alla produzione di piogge acide anche a lunga distanza;
- Immissioni di gas pericolosi per l'ozono stratosferico;
- Rischi di incidenti implicanti aerosol e nubi di sostanze pericolose sul territorio.

Ancora di seguito vi è un elenco degli effetti che possono essere visti come “potenziali impatti positivi”:

- Potenziale riduzione dell'inquinamento atmosferico locale attuale conseguente a riduzioni di traffico su strade attuali;
- Risparmi nell'utilizzo complessivo di combustibili fossili;
- Riduzione del traffico e dei relativi impatti atmosferici nell'area di riferimento.

2.4.1 Modelli di emissione

La caratterizzazione della componente atmosfera dovrà riguardare, nel caso di emissioni di origine *industriale*, la localizzazione sia delle fonti di emissioni esistenti nella zona indipendentemente dalla realizzazione del progetto sia delle nuove emissioni prodotte dal progetto; ogni emissione dovrà essere caratterizzata, individuando la fonte di emissione (processo produttivo, processo di combustione, ecc.), la tipologia di inquinanti emessi in atmosfera (ossidi di zolfo e di azoto, polveri, metalli pesanti, idrocarburi policiclici aromatici, ossidi di carbonio, inquinanti specifici di determinate attività industriali, etc. Vedi *appendice*), la quantità di inquinanti emessi in atmosfera, le caratteristiche del punto di emissione.

Nel caso di emissioni da *mezzi di trasporto* dovranno essere localizzate le principali sorgenti di emissione (strade di intenso traffico); dovranno essere caratterizzate le emissioni individuando le quantità di inquinanti emessi in atmosfera, indicativamente per i parametri: ossidi di azoto e di zolfo, ossidi di carbonio, polveri, idrocarburi non metanici, ozono, anidride carbonica; la determinazione delle quantità emesse potrà essere effettuata ricorrendo a stime (utilizzando ad esempio come dati di base i consumi di combustibili, per tipologia di combustibile impiegato, oppure i dati relativi ai flussi di traffico, per tipologia di veicolo, e applicando il metodo di stima CORINAIR.

Un *fattore di emissione* rappresenta la quantità di sostanza inquinante emessa riferita ad un determinato processo produttivo, espressa in termini di massa inquinante emessa rapportata alla massa di prodotto o di materia prima impiegata o ad altri parametri idonei a rappresentare il settore produttivo in esame (gCO/km, gCO/kgcombustibile, gCO/kWh, gCO/Nm³).

Lo studio dei fattori di emissione per il trasporto è iniziato negli anni '70. I metodi che sin da allora sono stati sviluppati dipendono dalla quantità e dal tipo di dati disponibili sulle emissioni. Le misure per la stima dei fattori di emissione sono eseguite riproducendo su un

banco a rulli un ciclo di guida reale, mentre le emissioni del veicolo sono raccolte ed analizzate. Per ogni inquinante, per ogni situazione di traffico e per ogni veicolo è possibile stimare i fattori di emissione.

Per la valutazione del contributo emissivo dei veicoli circolanti sono necessari, quindi, dei fattori di emissione valutati durante *l'utilizzo reale del veicolo* e non quelli ottenuti durante le prove di omologazione. Infatti i comportamenti di guida su strada differiscono da quelli seguiti durante l'effettuazione di cicli "studiati" per l'omologazione del veicolo.

FONTI DI EMISSIONE DA VEICOLO: EMISSIONI EVAPORATIVE

Emissioni giornaliere, associate con la variazione giornaliera della temperatura ambiente che comporta l'espansione dei vapori di benzina nel serbatoio via che la temperatura esterna aumenta. Senza un sistema di controllo, parte del vapore viene ventilato in atmosfera. Durante la notte, quando la temperatura ambiente diminuisce, i vapori si comprimono ed aria fresca viene richiamata dall'esterno attraverso la valvola di ventilazione. Quindi si abbassa la concentrazione degli idrocarburi nella fase vapore sopra la benzina liquida e ciò comporta una addizionale evaporazione.

Emissioni allo spegnimento, causate dal calore latente del motore (al momento dello spegnimento) e del sistema di scarico che a loro volta causano l'evaporazione del carburante rimasto nel sistema di alimentazione.

Emissioni in marcia, sono le normali perdite evaporative che si verificano durante la marcia del veicolo.

Tutti e tre i tipi di emissioni evaporative dipendono essenzialmente dalla temperatura esterna, dalle sue variazioni, dalla volatilità della benzina e dalle caratteristiche del veicolo.



Figura 4 : Emissioni da traffico veicolare (Fonte: Istituto motori – CNR)

Nella figura 4.4 vengono illustrati altri tre contributi alle emissioni che si aggiungono a quelle evaporative: il più consistente è, senza dubbio, quello del particolato in sospensione nell'aria dovuto alle *emissioni allo scarico* (a caldo e a freddo); gli altri due sono le *perdite al rifornimento* (composti organici volatili) ed il materiale particolato generato dall'*attrito* tra manto stradale, pneumatici e dispositivi frenanti.

Le emissioni per ogni inquinante sono un valore totale, somma delle emissioni a caldo, a freddo e del contributo evaporativo:

$$\mathbf{E\ totale = E\ a\ caldo + E\ a\ freddo + E\ evaporative}$$

Da uno studio effettuato dall' Istituto motori del CNR si evidenzia che il contributo della partenza a freddo (quindi, nella formula riportata sopra, il termine **E a freddo**) è rilevante, in ambito urbano, per percorsi medi di 12 km o inferiori.

	Emissioni a caldo	emissioni a freddo	emissioni evaporative (solo COVNM)
Autovetture a benzina	SI	SI	SI
autovetture diesel	SI	SI	NO
veicoli commerciali leggeri benzina	SI	SI	SI
veicoli commerciali leggeri diesel	SI	SI	NO
bus e veicoli commerciali pesanti (solo diesel)	SI	NO	NO
ciclomotori (<50 cc)	SI	NO	SI
motocicli (>50 cc)	SI	NO	SI

Tabella 3: Relazione tra categorie veicolari ed emissioni

In questa tabella viene indicata la presenza o meno di ognuno dei 3 termini evaporativi della formula di cui sopra, in relazione alle principali tipologie di veicolo; si nota, ad esempio, che per i veicoli a motore diesel sono trascurabili le emissioni evaporative mentre per i veicoli a due ruote si può trascurare il contributo delle emissioni a freddo.



Figura 5: Metodologie e processi per la riduzione delle emissioni

La figura sopra riportata illustra i principali metodi e processi che potrebbero far parte di una strategia da adottare per ridurre il contributo all'inquinamento atmosferico dovuto alle emissioni di sostanze indotte dal traffico veicolare. Tali processi sono sostanzialmente l'utilizzo di *combustibili di migliore qualità e a basso impatto ambientale* (basso tenore di zolfo, biocarburanti, metano, gpl, etc.), le *specifiche costruttive dei motori innovative* e la

completa copertura del parco veicolare esistente con i *dispositivi post-trattamento* (filtri, catalizzatori, etc.).

Per la quantificazione degli impatti, sia in fase di cantiere che di esercizio, vengono utilizzati dei *modelli matematici di simulazione* i quali possono essere divisi in due grandi categorie: i modelli di emissione per la stima delle sostanze inquinanti emesse e i modelli di dispersione per la stima della concentrazione degli inquinanti immessi e diffusi in atmosfera e/o ricaduti al suolo.

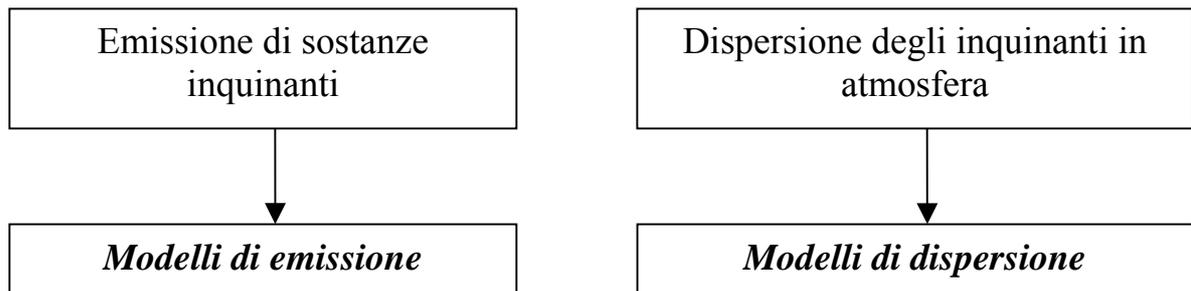


Figura 6: I modelli di simulazione

Modelli di emissione: formulazione matematica delle relazioni esistenti tra le emissioni inquinanti dei veicoli a motore e alcune delle variabili che influenzano le emissioni stesse; tra i parametri che influenzano le emissioni è necessario individuare quelli di cui tenere conto.

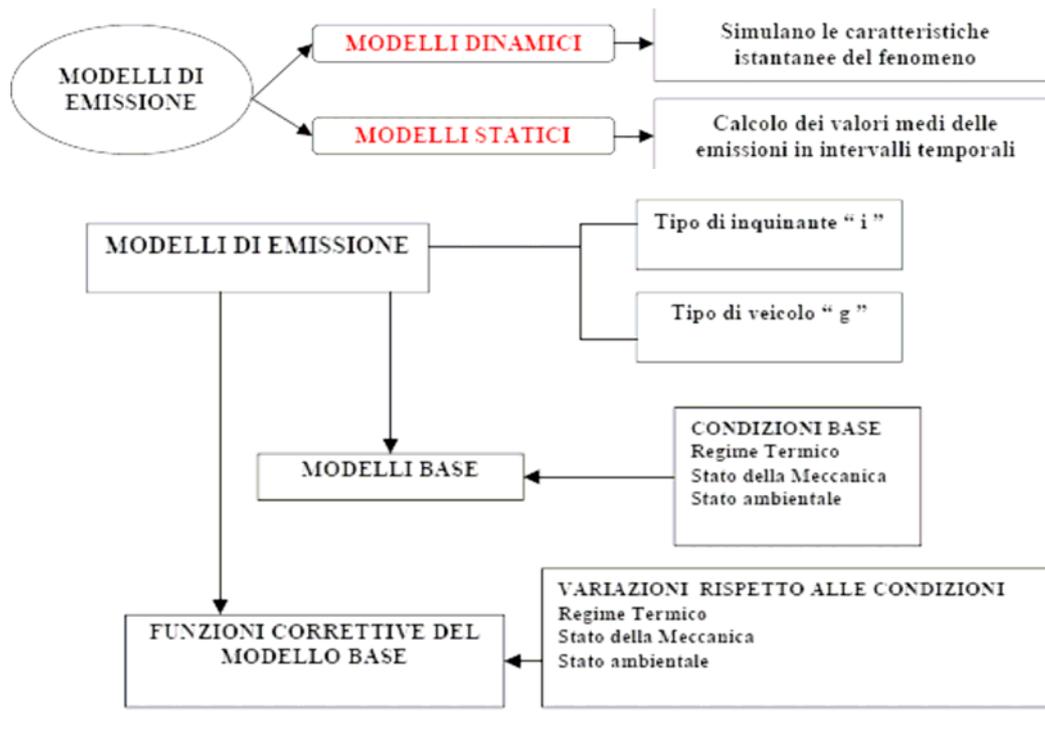


Figura 7: I modelli di emissione

I *modelli di emissione dinamici* calcolano i valori di emissione (in g/veicolo), per ogni inquinante (“*i*”), per ogni categoria veicolare (“*g*”) e per ogni *modo cinematico* (profilo di velocità e accelerazione) per poi effettuare una sommatoria a seconda del numero totale di veicoli e dare come risultato il valore di emissione in *g di inquinante/ora* (profili istantanei di emissione e proprietà puntuali dei cicli di guida). I *modelli di emissione statici*, a differenza dei precedenti, non simulano le caratteristiche istantanee del fenomeno ma si basano sulla *velocità media del moto*.

Per inserire i valori di input ai suddetti modelli è necessario, quindi, valutare e reperire informazioni sui seguenti parametri, per poter valutare l’anno rispetto al quale effettuare la stima:

- A. il parco veicolare e la sua distribuzione;
- B. le percorrenze annue nell’ambito urbano (inventario);
- C. le condizioni di guida (*v* media);
- D. il consumo totale di carburante (inventario);
- E. le temperature medie mensili;
- F. i fattori di emissione per ogni tipologia di veicolo;
- G. altri parametri (i.e. fattore di carico, ecc).

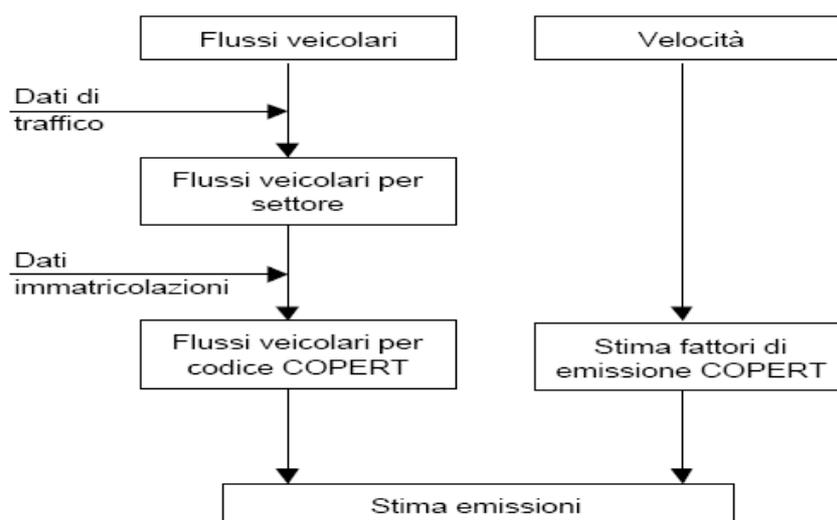


Figura 8: I modelli di emissione – schema concettuale della metodologia COPERT

Nella valutazione delle emissioni da traffico veicolare risulta inoltre di fondamentale importanza considerare, oltre al numero di veicoli totali in transito su ogni arco della rete stradale, la tipologia dei veicoli stessi, ossia la distribuzione percentuale dei veicoli nei diversi settori (autoveicoli, veicoli leggeri e veicoli pesanti), e nelle categorie previste dalla metodologia COPERT (Computer Programme to Calculate Emission from Road Transport) per la stima delle emissioni da traffico. La metodologia COPERT considera le informazioni relative al parco circolante suddiviso per tipologia di veicolo (autovetture passeggeri, veicoli commerciali leggeri, veicoli commerciali pesanti, ciclomotori e motoveicoli), tipo di combustibile utilizzato (benzina, gasolio, G.P.L.), classe di anzianità, in relazione alle normative europee di introduzione di dispositivi per la riduzione delle emissioni, classe di cilindrata (per le autovetture) o di peso complessivo (per i veicoli commerciali); a ciascuna classe dei veicoli così ripartiti sono associate altre informazioni relative alle condizioni di guida quali le percorrenze medie annue e le velocità medie distinte in base al ciclo di guida ovvero alla tipologia di percorso effettuato (urbano, extraurbano, autostradale). Ad ogni classe e per ciascun inquinante sono associati fattori di emissione, ricavati da misure sperimentali su veicoli rappresentativi delle diverse tecnologie motoristiche e in funzione della velocità di marcia dei veicoli, su cicli di guida standardizzati.

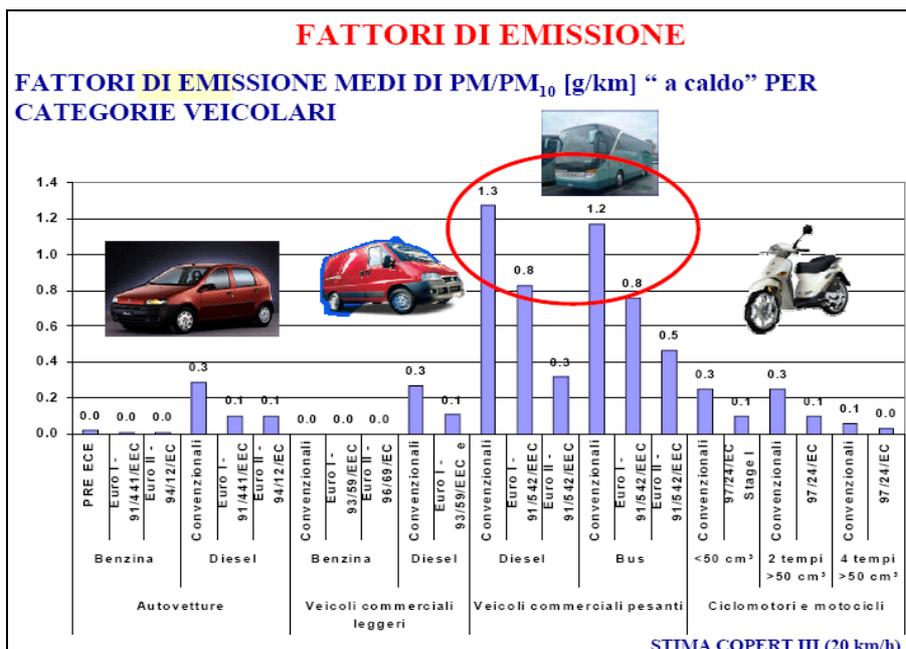


Figura 9: Fattori di emissione per il CO da varie categorie veicolari (Fonte: Istituto motori – CNR).

L'istogramma riportato sopra illustra i valori del fattore di emissione medio del particolato fine per diverse categorie di veicoli; si possono notare i “picchi” in corrispondenza della categoria “veicoli commerciali pesanti” in particolare quelli più datati (non conformi alle categorie Euro I e II).

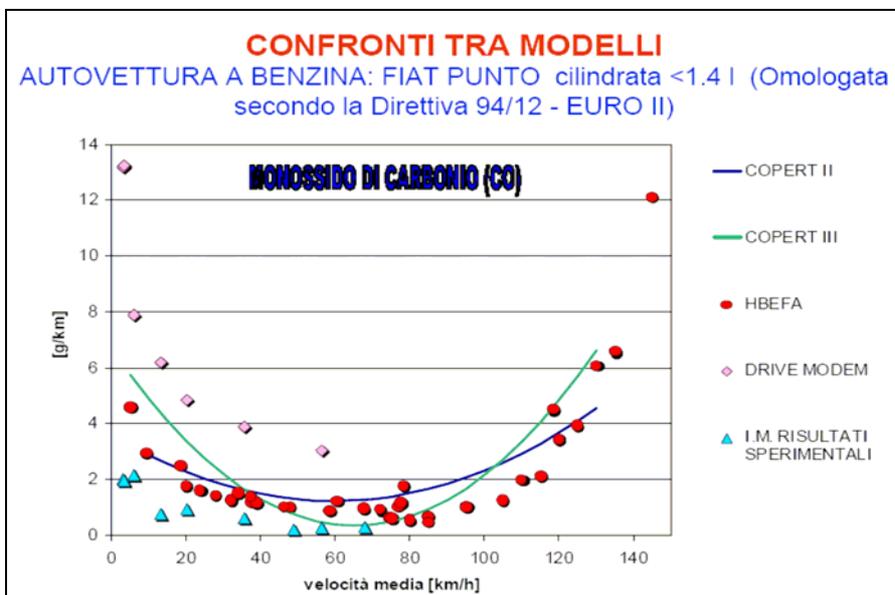


Figura 10: Fattori di emissione per il CO da vari modelli in funzione della velocità media (Fonte: Istituto motori – CNR)

Nel grafico in figura 4.11 viene riportato l'andamento del valore del fattore di emissione del monossido di carbonio in funzione della velocità media di percorrenza (per un particolare tipo di autoveicolo omologato Euro II e a benzina); la comparazione è effettuata

tra i 4 modelli di emissione più utilizzati nella pratica e i risultati sperimentali degli studi effettuati dall'istituto motori del CNR. Possiamo osservare il minimo di emissione per valori di velocità media intorno ai 60-70 km/h.

2.4.2 Modelli di dispersione

Lo studio dei processi di dispersione delle sostanze inquinanti è in parte basato sulla conoscenza dei fenomeni meteorologici, in particolare di quelli che avvengono in regime turbolento nei bassi strati dell'atmosfera. Per questo motivo i modelli per la simulazione delle dispersioni contengono frequenti riferimenti a *metodi matematici o empirici* (atti a descrivere il comportamento delle principali variabili meteorologiche) e calcolano i profili di concentrazione delle sostanze inquinanti. I dati in ingresso al modello riguardano:

- *Orografia* (matrice delle quote altimetriche) e *Cartografia* (GIS);
- *Dati meteorologici* (velocità e direzione del vento al suolo ed in quota, temperatura, umidità, pressione, radiazione solare al suolo, gradiente termico verticale, carte);
- *Dati di emissione* (Localizzazione e caratteristiche geometriche delle sorgenti, portata e natura degli inquinanti, velocità di decadimento o di produzione per gli inquinanti secondari).

I modelli di dispersione si distinguono in 2 grandi categorie: *modelli euleriani* e *modelli lagrangiani*. I primi operano in uno spazio tridimensionale a maglia, in una scala temporale dipendente dal fenomeno e considerano le variazioni delle concentrazioni dovute sia a reazioni chimiche che alla localizzazione delle sorgenti di immissione. I secondi, a differenza dei modelli euleriani, operano in una scala temporale qualsiasi, considerano anche un'orografia complessa del territorio e ricostruiscono le traiettorie singole particelle in moto (sono detti anche *modelli a particelle*).

Applicando a questi modelli delle ipotesi semplificative si giunge alla formulazione dei *modelli gaussiani*, i quali calcolano la concentrazione degli inquinanti utilizzando l'*equazione della dispersione gaussiana*:

$$\langle c_i(x, y, z) \rangle = \frac{Q_p}{2 \cdot \pi \cdot v \cdot \sigma_y \sigma_z} \exp\left[-\left(\frac{y}{\sqrt{2}\sigma_y}\right)^2\right] \cdot \exp\left[-\left(\frac{z-H}{\sqrt{2}\sigma_z}\right)^2\right]$$

Il valore di concentrazione in uscita risulta essere direttamente proporzionale alla portata di inquinante (Q_p) e all'altezza della sorgente di emissione (H) ma inversamente proporzionale alla velocità del vento (v) e ai valori di deviazione standard (σ_y e σ_z) i quali dipendono, a loro volta, dal tempo di trasporto ($t = x/v$).

Le ipotesi semplificative menzionate inizialmente sono le seguenti:

- stazionarietà e omogeneità dell'atmosfera;
- superficie del suolo piana (non influenzi la stazionarietà e omogeneità dell'atmosfera e la velocità e la direzione del vento);
- assenza di moti verticali (vettore della velocità del vento sia contenuto nel piano orizzontale);
- asse x diretto come la velocità media del vento;
- nella direzione della velocità media del vento gli effetti della turbolenza sulla dispersione siano trascurabili rispetto a quelli dovuti al vento stesso (ipotesi del *pennacchio ristretto*);
- si considera che l'emissione avvenga in un punto ad altezza $H=hs+ \Delta h$ (*innalzamento pennacchio*).

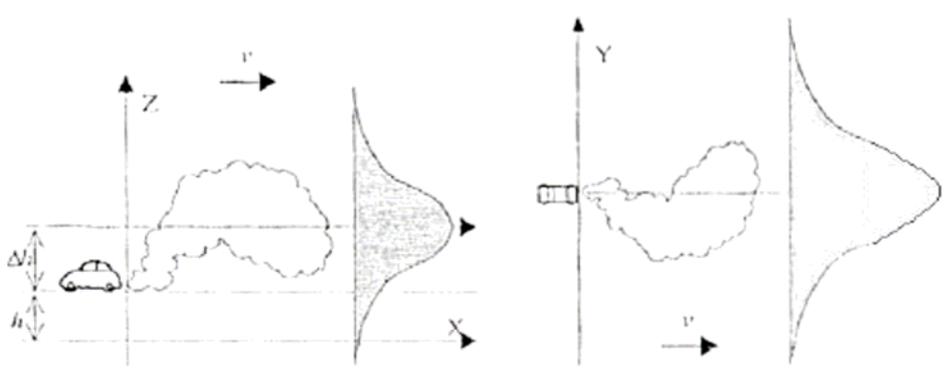


Figura 11: Concentrazione degli inquinanti da traffico veicolare secondo distribuzione gaussiana: ipotesi distribuzione della concentrazione “a campana” con il massimo valore al centro

2.5 Misure di mitigazione e compensazione

Le *misure di mitigazione* sono definibili come “misure intese a ridurre al minimo o addirittura a sopprimere l’impatto negativo di un piano o progetto durante o dopo la sua realizzazione”; sono soluzioni che possono essere adottate per ridurre il degrado della qualità dell’ambiente derivante dall’insieme delle opere proposte; si può intervenire a diversi livelli del processo di produzione della sostanza inquinante e si caratterizzano, dunque, in funzione della sorgente. Sono riconosciute come misure per diminuire gli impatti, con riferimento ai processi di combustione, l’utilizzo di combustibili con basso tenore di impurità, il miglioramento dell’efficienza di combustione, l’immissione dei fumi di scarico ad alte quote, l’introduzione di sistemi di abbattimento dei fumi.

Si identificano come *misure di compensazione* quelle opere di valenza ambientale non strettamente collegate con gli impatti indotti dal progetto stesso, ma realizzate a parziale compensazione del danno prodotto, specie se non completamente mitigabile.

2.5.1 Misure di mitigazione in fase di cantiere

Lo svolgimento di attività di cantiere comporta l'occupazione temporanea di una certa porzione di territorio, la cui estensione dipende dalle scelte di dimensionamento dei cantieri, che dovrà essere attrezzata con una serie di servizi e impianti funzionali allo svolgimento delle attività stesse (magazzini, officine, impianti di betonaggio, ecc.) le principali operazioni che dovranno essere svolte nell'esercizio del cantiere sono così individuabili:

- sbancamenti
- movimento di terra
- attività estrattiva
- attività di cantiere edile
- elevazioni e recinzioni
- uso di strade per accesso al cantiere
- uso di acqua
- uso di energia
- produzione di rifiuti
- occupazione di personale

I principali problemi di impatto ambientale che potrà essere necessario affrontare per lo svolgimento delle attività di cantiere relativamente alla componente atmosfera riguarda le emissioni di polveri determinate dallo svolgimento delle attività e dal trasporto di mezzi pesanti che richiede la valutazione degli effetti sulla qualità dell'aria e l'individuazione di misure di mitigazione, soprattutto legate alla gestione delle attività di cantiere.

Le principali misure di mitigazione da adottare nella fase di cantiere sono le seguenti:

- Stabilizzazione chimica delle piste di cantiere
- Bagnare i fondi stradali periodicamente
- Copertura dei mezzi di trasporto
- Lavaggio pneumatici
- Uso di mezzi di trasporto a norma

2.5.2 Misure di mitigazione in fase di esercizio

CONTROLLO DEL TRAFFICO

I provvedimenti di controllo del traffico possono seguire tre strategie, da adottare con opportuna gradualità, ed essere estese a fasce orarie determinate, all'intero arco giornaliero, oppure a più giornate successive:

- Divieto di transito per i veicoli che non rispettano limiti stringenti alle emissioni unitarie;
- Riduzione del carico veicolare;
- Chiusura generalizzata del traffico veicolare, estesa all'intera giornata o ad orari determinati.

BARRIERE VERDI

L'efficacia delle barriere verdi (alberi d'alto fusto) per la riduzione dei livelli di inquinamento, è dovuta a due differenti fenomeni fisici:

- l'*incremento della turbolenza atmosferica* ossia la formazione di un vortice che accentua i processi di diluizione degli inquinanti e riduzione della concentrazione degli stessi;
- l'*adsorbimento* per opera del fogliame: le barriere sono dotate di un certo potere filtrante, maggiore per le particelle solide e per gli idrocarburi mentre è basso per gli inquinanti gassosi).

Solitamente si preferisce impiantare *specie autoctone* e con un *elevato rapporto superficie/volume*.

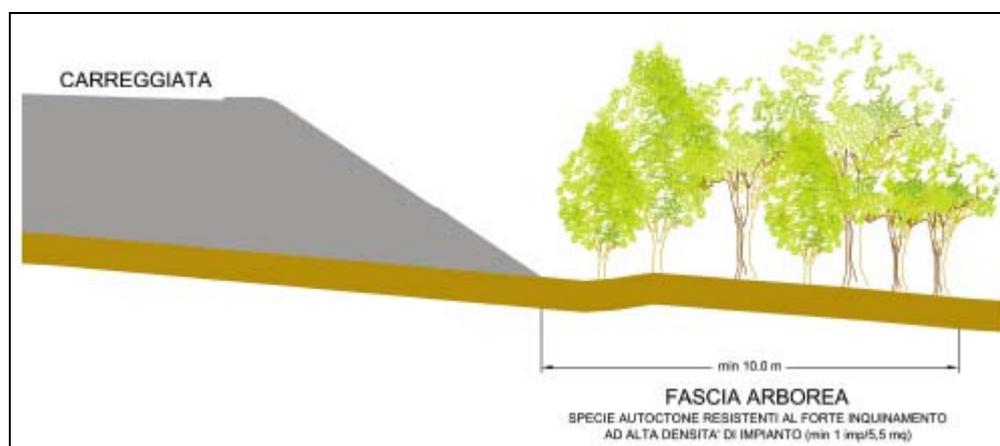


Figura 12: Mitigazioni in fase di esercizio: barriere verdi

3. Conclusioni

In conclusione la valutazione degli impatti sulla qualità dell'aria, dipendentemente dalla tipologia di opera, deve prendere in considerazione:

- la situazione attuale (senza infrastruttura o impianti, etc.)
- la stima della entità delle emissioni degli inquinanti;
- la modellizzazione dei fenomeni di dispersione e trasporto degli stessi;
- lo studio delle interazioni tra inquinanti primari e componenti dell'atmosfera, che conducono alla formazione degli inquinanti secondari e dello smog fotochimico.

Ossia l'analisi metodologica alla base della valutazione di impatto ambientale della componente atmosfera deve prevedere l'integrazione delle informazioni che hanno origine dal monitoraggio, dagli inventari di emissione e dai modelli, che costituisce l'approccio ottimale al problema della valutazione e gestione della qualità dell'aria.

I tre elementi concorrono alla valutazione in maniera integrata, ma differenziata a seconda del livello di inquinamento della zona o agglomerato su cui viene effettuata la valutazione.

4. Appendice: I principali inquinanti

Si può definire l'*inquinamento atmosferico* come la presenza nell'atmosfera di sostanze che causano un effetto misurabile sull'essere umano, sugli animali, sulla vegetazione o sui diversi materiali; queste sostanze di solito non sono presenti nella normale composizione dell'aria, oppure lo sono ad un livello di concentrazione inferiore.

Gli inquinanti vengono solitamente distinti in due gruppi principali: quelli di origine antropica, cioè prodotti dall'uomo, e quelli naturali.

L'inquinamento causato da queste sostanze negli ambienti aperti viene definito *esterno* (o *outdoor*) mentre l'inquinamento nei luoghi confinati, come gli edifici, viene indicato come inquinamento *interno* (o *indoor*); la qualità dell'aria negli ambienti confinati viene infatti spesso indicata come *Indoor Air Quality*.

Le modalità di produzione e di liberazione dei vari inquinanti sono estremamente varie, allo stesso modo sono moltissime le variabili che possono intervenire nella loro diffusione in atmosfera.

A prescindere dalla loro origine, gli inquinanti vengono distinti in *primari* e *secondari*: primari sono gli inquinanti (come ad esempio il biossido di zolfo ed il monossido di azoto) che vengono immessi direttamente nell'ambiente in seguito al processo che li ha prodotti; gli inquinanti secondari (come l'ozono) sono invece quelle sostanze che si formano dagli inquinanti primari (sia antropogenici che naturali) a seguito di modificazioni di varia natura causate da reazioni che, spesso, coinvolgono l'ossigeno atmosferico e la luce. I principali inquinanti primari sono quelli emessi nel corso dei processi di combustione di qualunque natura, cioè il monossido di carbonio, il biossido di carbonio, gli ossidi di azoto (principalmente sottoforma di monossido di azoto), le polveri e gli idrocarburi incombusti. Nel caso in cui i combustibili contengano anche zolfo, si ha inoltre emissione di anidride solforosa. In seguito alla loro emissione in atmosfera, gli inquinanti primari sono soggetti a processi di *diffusione*, *trasporto* e *deposizione*. Subiscono inoltre dei processi di trasformazione chimico-fisica che possono portare alla formazione degli inquinanti secondari, nuove specie chimiche che spesso risultano più tossiche e di più vasto raggio d'azione dei composti originari.

Fra i processi di formazione degli inquinanti secondari, particolare importanza è assunta dalla serie di reazioni che avvengono fra gli ossidi di azoto e gli idrocarburi in presenza di luce solare. Questa catena di reazioni porta all'ossidazione del monossido di azoto (NO) a biossido di azoto (NO₂), alla produzione di ozono (O₃) ed all'ossidazione degli idrocarburi; vi è formazione di aldeidi, perossidi, di acidi nitriloperacetici (PAN), acido

nitrico, nitrati e nitroderivati in fase particellare e centinaia di altre specie chimiche minori. L'insieme dei prodotti di queste reazioni viene definito *smog fotochimico*, il quale rappresenta una delle forme di inquinamento più dannose per l'ecosistema. L'uso del termine smog è dovuto alla forte riduzione della visibilità che si determina nel corso degli episodi di inquinamento fotochimico, dovuta alla formazione di un grande numero di particelle di notevoli dimensioni.

La dispersione dei contaminanti in atmosfera è determinata dai fenomeni di *diffusione turbolenta* e di *trasporto* delle masse d'aria. La rimozione degli inquinanti è determinata dai vari processi di *deposizione*. Sia la dispersione che la rimozione sono strettamente dipendenti dai vari processi meteorologici che regolano il comportamento delle masse d'aria nella troposfera (lo strato più basso dell'atmosfera). Per lo studio del comportamento degli inquinanti primari è così necessario non solo conoscere il profilo qualitativo, quantitativo e temporale delle emissioni ma anche possedere delle informazioni sui processi meteorologici che interessano le aree soggette alla presenza dei vari inquinanti

GLI INQUINANTI NATURALI

Anche se è l'inquinamento originato dall'uomo quello che risulta più imputato nel peggioramento della qualità dell'aria, non bisogna dimenticare l'importanza dell'inquinamento di origine naturale; ci sono, infatti, molte fonti di inquinanti naturali che spesso assumono più rilevanza delle loro controparti di origine antropogenica.

Gli inquinanti naturali dell'aria sono sempre stati parte della storia dell'uomo. Le polveri e i vari gas emessi dai vulcani, dagli incendi delle foreste e dalla decomposizione dei composti organici entrano in atmosfera ad intervalli più o meno regolari e in qualche caso a livelli che possono causare degli effetti drammatici a carico del clima. In ogni caso bisogna sottolineare che gli inquinanti naturali non rappresentano necessariamente un serio problema come possono esserlo gli inquinanti generati dalle attività umane perché risultano spesso notevolmente meno pericolosi dei composti prodotti dall'uomo e non si concentrano mai sulle grandi città.

Le sorgenti naturali di biossido di zolfo comprendono i vulcani, la decomposizioni organiche e gli incendi delle foreste; quelle di ossidi di azoto includono i vulcani, gli oceani, le decomposizioni organiche e l'azione dei fulmini.

L'ozono è un inquinante secondario che si forma in prossimità del livello del suolo come risultato di una serie di reazioni chimiche catalizzate dalla luce. In ogni caso, circa il 10-

15% dell'ozono troposferico proviene dagli alti strati dell'atmosfera (stratosfera) dove si forma per azione dei raggi UV a partire dall'ossigeno molecolare.

L'importanza delle sorgenti naturali di particolato è invece minore di quelle antropogeniche dato che originano particelle di dimensioni tali da non poter arrecare danni rilevanti all'apparato respiratorio; esse includono i vulcani e le tempeste di sabbia. Queste sorgenti solitamente non provocano degli episodi di inquinamento particolarmente acuto in quanto l'inquinamento in genere avviene su scala temporale relativamente ridotta. Esistono comunque le eccezioni: l'esplosione del vulcano Saint Helens nel maggio del 1980, per esempio, ha causato un peggioramento della qualità dell'aria negli Stati Uniti ed in tutto il Pacifico nord-orientale per mesi dopo la sua eruzione, con ripercussioni anche sul clima a livello mondiale. Le polveri provenienti dal Sahara possono viaggiare nell'aria per migliaia di Km per poi giungere non solo in paesi relativamente vicini come l'Italia e la Grecia, ma anche in zone più remote come il Regno Unito.

Molti composti organici volatili (VOC) vengono prodotti in natura dalle piante. L'*isoprene* è un comune VOC prodotto dalla vegetazione; alcuni ricercatori ritengono che la sua importanza nello scatenare l'asma ed altre reazioni allergiche sia molto più significativa di altri composti di origine antropogenica. Le piante inoltre producono i *pollini* (considerati componenti del particolato atmosferico) i quali causano effetti allergici nei soggetti predisposti.

Le radiazioni ionizzanti sono in grado di produrre, direttamente o indirettamente, la ionizzazione degli atomi e delle molecole. Questa proprietà ha importanti conseguenze in termini sanitari, in quanto i danni indotti da queste radiazioni sulle macromolecole biologiche possono dare origine a processi di *cancerogenesi*. Tra le principali sorgenti naturali di esposizione vi sono la radiazione cosmica e la radiazione terrestre (radionuclidi presenti nella crosta terrestre). Tra le sorgenti naturali il radon (Rn) rappresenta la principale fonte di esposizione a radiazioni ionizzanti nell'uomo, soprattutto negli ambienti interni. Altri inquinanti naturali di notevole importanza negli ambienti confinati (indoor) sono le spore delle muffe e le polveri generiche.

La maggior parte dei composti gassosi dell'aria costituisce parte dei cicli naturali, per questo gli ecosistemi sono in grado di mantenere l'equilibrio tra le varie parti del sistema. Comunque, l'introduzione di grandi quantità di composti addizionali può compromettere anche definitivamente i naturali cicli biochimici preesistenti; visto che molto poco può essere fatto dall'uomo nei riguardi dell'inquinamento naturale, la maggior preoccupazione deve essere quella di ridurre le emissioni inquinanti prodotte dalle attività antropiche.

L'inquinamento dell'aria di origine antropogenica si sprigiona dalle grandi sorgenti fisse (industrie, impianti per la produzione di energia elettrica ed inceneritori), da piccole sorgenti fisse (impianti per il riscaldamento domestico) e da sorgenti mobili (il traffico veicolare). Molte di queste sorgenti sono strettamente legate alla produzione ed al consumo di energia, specialmente combustibili fossili.

L'uso di combustibili fossili per il riscaldamento domestico, in particolare di oli combustibili pesanti, di biomassa e di carbone è una fonte significativa di inquinamento ambientale di particolati e di biossido di zolfo, specialmente nelle regioni temperate (soprattutto in Cina ed Europa dell'Est). Anche il traffico contribuisce in gran parte alle emissioni di questi inquinanti nelle città caratterizzate da una grande congestione veicolare, e questo a causa della presenza di una sterminata serie di autoveicoli che utilizzano benzine ad alto tenore di zolfo (soprattutto in Asia). Nelle città dove viene ancora utilizzata la benzina col piombo (l'ex benzina rossa), il traffico può contribuire per l'80-90% alla concentrazione atmosferica di questo pericoloso inquinante.

Per quanto riguarda gli altri inquinanti principali è da sottolineare che, nell'emissione di ozono e di composti organici volatili, le sorgenti antropogeniche hanno un ruolo fondamentale tanto quanto quelle naturali. Le combustioni in genere rappresentano la causa principale delle emissioni di ossido di azoto mentre i motori dei mezzi di trasporto rappresentano tipicamente la causa principale delle emissioni di monossido di carbonio.

Oltre alle sostanze che vengono prodotte a seguito dei vari processi di combustione, sono da segnalare tutti quegli inquinanti che vengono prodotti nel corso di particolari cicli tecnologici. Questi composti vengono liberati in quantità notevolmente inferiori e per questo risultano poco rilevanti come impatto globale a livello planetario; in ogni caso, sono spesso dotati di elevata tossicità, e la loro presenza è particolarmente importante a livello locale. La strategia di approccio è chiaramente diversa: gli specifici inquinanti di origine industriale sono infatti da ricercare non dopo la loro diffusione nell'ambiente (immissioni atmosferiche) ma al momento del loro rilascio (emissioni atmosferiche).

L'impatto degli inquinanti sull'uomo dipende dalla zona di produzione degli inquinanti e dalla loro dispersione. Le grandi sorgenti fisse, spesso localizzate lontano dai più grandi centri abitati, disperdono nell'aria a grandi altezze, mentre il riscaldamento domestico ed il traffico producono inquinanti che si liberano a livello del suolo in aree densamente abitate. Come conseguenza, le sorgenti mobili e quelle fisse di piccole dimensioni contribuiscono in modo maggiore all'inquinamento dell'aria nelle aree urbane e, di conseguenza, attentano

alla salute pubblica molto di più di quanto non si potrebbe supporre facendo un semplice confronto quantitativo fra i vari tipi di emissioni.

La concentrazione degli inquinanti nell'aria è determinata da diversi fattori:

- dalla quantità dei contaminanti presenti nelle emissioni;
- dal numero e dalla densità delle sorgenti inquinanti;
- dalla distanza dai punti di emissione;
- dalle trasformazioni chimico-fisiche alle quali sono sottoposte le sostanze emesse;
- dalla eventuale velocità di ricaduta al suolo;
- dalla situazione morfologica delle aree interessate all'inquinamento;
- dalle condizioni meteorologiche locali e su grande scala.

Da sottolineare la massima importanza delle condizioni meteorologiche nella comprensione della nascita, della gravità e dello sviluppo nel tempo di un fenomeno di inquinamento atmosferico. Su scala locale il fattore che più influenza il trasporto e la diffusione atmosferica degli inquinanti è l'intensità del vento; inoltre un ruolo notevole è svolto dalle precipitazioni atmosferiche che contribuiscono letteralmente a dilavare l'aria dai contaminanti presenti. Di solito le zone più soggette ai fenomeni di inquinamento sono le zone urbane ed industriali, soprattutto se si trovano in aree dove sono presenti dei naturali impedimenti alla circolazione dell'aria: ad esempio le valli chiuse da montagne, che presentano sempre problemi di ristagno per la ridotta ventilazione atmosferica; oppure allo stesso modo le aree localizzate in avvallamenti o depressioni del terreno.

Altri fattori che rivestono una notevole importanza negli episodi di inquinamento acuto sono l'intensità della luce solare e l'alta temperatura, in determinate condizioni possono portare al manifestarsi dello smog fotochimico. In genere le concentrazioni dei contaminanti dell'aria sono minori quando il vento è almeno moderato e l'atmosfera è instabile nei bassi strati. Al contrario, le concentrazioni degli inquinanti sono elevate in presenza di nebbia persistente oppure in assenza di vento o quando si è in presenza di inversioni termiche (fenomeno che verrà descritto nei prossimi paragrafi).

L'inquinamento atmosferico comporta spesso numerose conseguenze a carico della salute, soprattutto nei casi in cui si verifichi un brusco innalzamento delle concentrazioni dei comuni contaminanti dell'aria (*inquinamento acuto*). In questi casi, l'aumentata esposizione a vari irritanti atmosferici provoca la riduzione della funzionalità polmonare, l'aumento delle malattie respiratorie nei bambini, gli attacchi acuti di bronchite e l'aggravamento dei quadri di asma; il tutto comporta un forte incremento nel numero dei

decessi fra le persone più sensibili a determinati inquinanti, come gli anziani o le persone affette da malattie respiratorie e cardiovascolari.

L'effetto dell'inquinamento a bassi livelli e per lungo tempo risulta invece più subdolo e difficile da individuare. Si presume che provochi a breve termine disagio, irritazione, tossicità specifica, affezioni respiratorie acute e, in rari casi, mortalità, soprattutto fra gli anziani affetti da patologie croniche cardiovascolari o respiratorie. Gli effetti a lungo termine causati da una esposizione ad inquinanti presenti a concentrazioni relativamente basse non sono ancora completamente chiari; in ogni caso si ritiene che fra i vari effetti vi sia la comparsa di malattie polmonari croniche aspecifiche (come la bronchite cronica, l'asma e l'enfisema), la formazione di varie neoplasie maligne (cancro polmonare, leucemie) ed un aumento della mortalità per malattie cardiovascolari e respiratorie.

L'aria inquinata delle grandi aree urbane ed industriali è ricca di contaminanti che possono spiegare la loro azione sia singolarmente che sinergicamente. L'inquinamento atmosferico può effettivamente causare uno stato di ansietà e paura. La percezione di una minaccia che non è ben chiara o che non viene adeguatamente spiegata pubblicamente può determinare alcune malattie psicosomatiche e forme maniacali. Queste malattie, tra l'altro, si riscontrano con frequenza maggiore dove, soprattutto per scelta politica od economica, si tende a nascondere un eventuale pericolo o addirittura dei dati di fatto, al fine di tutelare più la propria posizione che l'intera comunità.

4.1 Monossido di carbonio

L'ossido di carbonio o monossido di carbonio (CO) è un gas tossico, incolore e inodore, che si forma dalla combustione incompleta, in difetto di ossigeno, di sostanze organiche; esso deriva, infatti, dall'ossidazione con ossigeno atmosferico del carbonio il quale rappresenta il principale costituente dei combustibili organici ed il suo contenuto può variare dal 40-50% nella legna, al 95-97% nei carboni fossili o nei coke di qualità. Il CO rappresenta uno tra i più diffusi e pericolosi inquinanti atmosferici, si trova in tracce nell'aria pulita (non inquinata) con una concentrazione di fondo minore di 0.1 ppm ed è uno dei componenti volatili dei magmi pertanto si trova fra i gas emessi durante le attività vulcaniche. La principale sorgente di emissione del CO immesso in atmosfera è costituita dagli autoveicoli, seguita, in misura inferiore, dalle centrali termoelettriche, dagli impianti di riscaldamento domestico, dagli inceneritori e da alcuni processi industriali.

Tra i motori a “ciclo Otto” (alimentati a benzina) e i motori a “ciclo Diesel” (alimentati a gasolio), i primi emettono quantitativi di ossido di carbonio molto superiori a quelli emessi dai secondi. La diversità di composizione dei gas di scarico nei due tipi di motori dipende dalle caratteristiche del combustibile (solo in parte) e dalle modalità di alimentazione e combustione. Un motore a gasolio, in buone condizioni di manutenzione, emette gas nocivi (in particolare CO) in quantità minime, minori di quelle emesse da un motore a benzina (eccezion fatta per gli ossidi di azoto), perché il motore “Diesel” funziona con miscele aria-combustibile più povere di quelle utilizzate nei motori a benzina, ovvero realizza la combustione con un eccesso d’aria.

Negli effluenti degli impianti termici e delle centrali termoelettriche l’ossido di carbonio è presente in percentuali bassissime quando la combustione avviene con l’eccesso d’aria richiesto per il tipo di combustibile e le modalità di combustione adottati. Elevati quantitativi di ossido di carbonio possono formarsi quando la combustione avviene in difetto d’aria, ossia con disponibilità di ossigeno insufficiente per conseguire l’ossidazione completa delle molecole di carbonio: in tal caso, se i prodotti della combustione non sono evacuati regolarmente nell’atmosfera (dove l’ossido di carbonio diffonde rapidamente), si possono raggiungere, nell’ambiente dove ha luogo la combustione, concentrazioni ad effetto letale. Anche in questo caso la concentrazione di ossido di carbonio emesso con i gas della combustione dipende dal tipo di combustibile impiegato (oltre che, naturalmente, dal tipo di conduzione dell’impianto): il metano, ad esempio, determina, di solito, l’emissione di soli *ossidi di azoto* mentre i combustibili derivati dal petrolio ed il carbone provocano l’emissione anche di CO. Va anche detto che l’ossido di carbonio, essendo il prodotto di un’ossidazione incompleta, è a sua volta un combustibile (con potere calorifico di 2,415 kcal/kg) e che espellerlo con i fumi costituisce, quindi, uno spreco di energia.

Le principali sorgenti industriali di ossido di carbonio sono gli impianti siderurgici, le raffinerie di petrolio e gli impianti per la produzione dei “gas di sintesi” (miscela di CO e idrogeno). Nelle fonderie, per ottenere acciaio, la ghisa fusa viene trattata con ossigeno, il quale reagisce col carbonio presente nella ghisa stessa per dare origine, date le elevate temperature in gioco, a CO; nelle raffinerie l’ossido di carbonio trae origine dai processi di rigenerazione dei catalizzatori e dai forni di incenerimento.

TOSSICOLOGIA ED EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

Il monossido di carbonio, essendo un gas incolore e inodore, è molto insidioso, specialmente negli ambienti chiusi, nei quali un’elevata concentrazione di tale gas può

provocare gravi danni all'uomo e agli animali (fino al decesso) a causa di cattivo funzionamento di stufe, di insufficiente tiraggio dei camini, ecc. Non sono infrequenti morti accidentali o volontarie determinate da un motore di automobile in funzione in un locale chiuso. In molte strade trafficate delle città la concentrazione di CO può superare i 50 ppm. Il CO, se respirato, entra nella circolazione sanguigna, impedisce una buona ossigenazione del sangue danneggiando i sistemi cardiovascolare e nervoso: l'effetto più noto dell'ossido di carbonio è, infatti, quello di legarsi all'emoglobina del sangue con un'affinità di molto superiore (circa 210 volte) a quella dell'ossigeno; l'emoglobina così combinata (*carbossiemoglobina*) non è più in grado di svolgere il suo compito di ossigenare i tessuti, in particolare quelli del cervello e del cuore, per cui, nei casi estremi, sopraggiunge la morte per asfissia. Gli effetti nocivi del CO sembrano derivare anche da una zona *citotossica* (tossica per le cellule) diretta. Letale risulta l'inalazione di CO in concentrazione dell'ordine di 2000 ppm (0,2%) in 15 minuti; va da sé che una concentrazione così elevata è quella che si potrebbe verificare solo in un ambiente chiuso. Ma l'interesse per il monossido di carbonio come inquinante atmosferico è legato, più che ad avvenimenti rapidi e letali, all'effetto prolungato di questo gas sulla popolazione esposta e quindi all' "ossicarbonismo", forma morbosa di intossicazione da CO che si manifesta con sintomi nervosi e respiratori. La concentrazione di carbossiemoglobina nel sangue dipende da quella dell'ossido di carbonio nell'aria ma anche dalla durata dell'esposizione (7-8 ore per raggiungere l'equilibrio in presenza di 50-100 ppm di CO atmosferico); il legame CO-emoglobina è lentamente reversibile in modo spontaneo se scompare (o si abbassa) il CO nell'aria inspirata, e il tempo di dimezzamento della carbossiemoglobina risulta pari a 3-4 ore. Livelli ematici di carbossiemoglobina fino all'1% rientrano nei limiti fisiologici. I primi segni patologici (disturbi psicomotori, allungamento dei tempi di reazione) si avvertono quando l'emoglobina trasformata arriva al 2-5% che corrisponde all'equilibrio con 12-31 ppm di CO; sintomi ulteriori sono vertigine, cefalea, indebolimento generale attorno a 100 ppm. In altre parole, l'esposizione prolungata, anche a concentrazioni di poche decine di ppm, risulta più dannosa di un'esposizione breve a concentrazioni più elevate (a parte elevatissime concentrazioni che determinano la morte).

Il contenimento dell'inquinamento atmosferico dovuto all'ossido di carbonio negli agglomerati urbani si può ottenere riducendo l'emissione di questo gas anzitutto dalle principali fonti, che sono gli autoveicoli. Essendo il CO il prodotto di una combustione incompleta, si cerca di migliorare l'efficienza di tale processo nei motori, principalmente quelli funzionanti a benzina, attraverso metodi di controllo dei gas di combustione che si

possono dividere in due categorie: quelli che riguardano propriamente il motore e quelli che riguardano il sistema di scarico dei gas combusti. Si è constatato che l'uso di miscele povere porta a combustioni complete, riduzioni del tenore di incombusti e monossido di carbonio ma aumento di quello degli ossidi di azoto (NO_x); inoltre, con l'impiego di miscele povere, le prestazioni dei motori tendono a diventare meno buone. La presenza contemporanea di inquinanti eliminabili con processi di ossidazione (CO ed idrocarburi incombusti) e di altri inquinanti (ossidi di azoto) che richiedono, per essere eliminati, processi di riduzione, complica ovviamente la soluzione complessiva del problema.

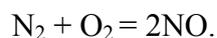
Nell'industria siderurgica, per l'abbattimento del CO si può ricorrere al lavaggio del gas in acqua mediante *Scrubbers*. L'ossido di carbonio emesso da alcune industrie viene convertito in anidride carbonica mediante combustione (*Combustori*).

4.2 Ossidi di azoto

Gli ossidi di azoto sono composti ossigenati dell'azoto allo stato gassoso: il monossido (NO) è un gas incolore, il biossido (NO_2) è un gas rosso-bruno, dall'odore pungente, altamente tossico. Oltre a questi, vi sono altri ossidi di azoto (N_2O , N_2O_3 , N_2O_4 , N_2O_5), ma l' NO_2 rappresenta comunemente il gruppo degli ossidi di azoto, in quanto gli altri tendono a trasformarsi in NO_2 per reazioni chimiche che avvengono in atmosfera. Essendo spesso presenti contemporaneamente nell'aria, NO ed NO_2 vengono indicati insieme con la forma NO_x . Gli ossidi di azoto possono agire sinergicamente con altri gas e partecipano, come "precursori", alla formazione degli *ossidanti fotochimici*. Gli ossidi di azoto sono, dopo l'anidride solforosa, i più diffusi e aggressivi inquinanti atmosferici e con questa danno luogo alle cosiddette *piogge acide*.

Fonti naturali ed antropogeniche sono responsabili dell'immissione degli ossidi di azoto nell'atmosfera. Tra le prime emerge l'attività microbica, in particolare la *denitrificazione*; le scariche elettriche possono operare la sintesi degli ossidi di azoto a partire dall'ossigeno e dall'azoto presenti nell'aria. La produzione globale di ossidi di azoto da fonti naturali è elevata e superiore a quella di origine antropica, ma, anche in questo caso, gioca un ruolo determinante la localizzazione in aree ristrette delle emissioni prodotte dall'uomo che portano a concentrazioni di ossidi di azoto di gran lunga superiore a quelle che sarebbero presenti in assenza di attività umane. Si può dire che la formazione di ossidi di azoto sia una reazione collaterale di tutti i processi di combustione. Inoltre ossidi di azoto si formano a seguito dell'ossidazione di eventuali composti azotati presenti, come impurezze, nei combustibili (ma questa fonte produce quantità di ossidi di azoto trascurabili).

La reazione tra azoto (N₂) e ossigeno (O₂) avviene solo a temperature elevate, superiore a 1000 °C, secondo la formula:



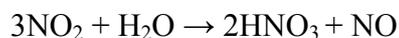
L'ossido di azoto può avere origine per ossidazione dell'azoto atmosferico alle alte temperature che possono verificarsi durante alcuni processi o lavorazioni industriali, ma principalmente in seguito alla combustione dei combustibili: questo fenomeno permette che l'azoto e l'ossigeno presenti nell'aria si combinino direttamente fra loro. A bassa temperatura la suddetta reazione è completamente spostata sinistra; quindi nei prodotti della combustione, se il raffreddamento è lento, l'ossido di azoto formato può ritrasformarsi in N₂ ed O₂; se questo raffreddamento invece è brusco, la velocità di decomposizione dell'NO viene rallentata o addirittura resa praticamente nulla, mentre comincia a diventare sensibile la trasformazione di NO a NO₂, secondo la reazione



assai favorita alle basse temperature. In altre parole, quando il monossido si raffredda rapidamente, tende a dar luogo al biossido.

Per quanto riguarda le sorgenti antropogeniche, i processi di combustione sono tra i principali responsabili dell'emissione di ossidi di azoto: quantità rilevanti ne vengono prodotte dai motori degli autoveicoli ed in particolare, dal traffico urbano. Agli ossidi di azoto va addebitato il colore giallo-bruno che contraddistingue, in particolari situazioni meteorologiche (*inversione termica*), l'atmosfera delle metropoli ad alta densità di traffico. I motori a gasolio, rispetto a quelli a benzina, emettono maggiori quantità di ossidi di azoto e tende anche a produrre un inquinamento più palese, cioè "fumi neri" e cattivi odori; emette, però (come detto nel paragrafo precedente), minori quantità di ossido di carbonio (con valori decine di volte inferiori). Anche gli impianti termici e le centrali termoelettriche producono ingenti quantità di ossidi di azoto; il contributo degli impianti termici all'emissioni di ossidi di azoto è, in città, di entità molto minore di quello dato dal traffico. Gli ossidi di azoto emessi dalle industrie derivano soprattutto dagli impianti che lavorano con composti azotati: ad esempio nella produzione di acido nitrico (HNO₃) è inevitabile l'emissione di una miscela gassosa contenente ossidi di azoto poiché il biossido d'azoto

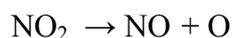
(formatosi per ossidazione dell'ammoniaca ad ossido di azoto e successiva ossidazione di quest'ultimo), in presenza di umidità, da luogo alla seguente reazione di assorbimento



Emissioni di questi ossidi avvengono anche da parte di impianti in cui l'acido nitrico viene usato come agente ossidante. Altra fonte è rappresentata dagli impianti per la produzione di fertilizzanti azotati e di alcuni esplosivi.

Si ritiene, comunque, che il contributo del settore trasporto stradale rimane predominante rispetto a quello relativo alle fonti fisse.

Il biossido d'azoto presenta, inoltre, forti proprietà ossidanti secondo la reazione



che evolve in presenza di radiazioni luminose; l'ossigeno atomico che si forma è particolarmente reattivo. Per queste proprietà ossidanti gli ossidi di azoto sono "precursori", insieme agli idrocarburi, dello *smog fotochimico*. Gli ossidi di azoto possono permanere in atmosfera per periodi che vanno da alcune ore a qualche giorno.

TOSSICOLOGIA ED EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

Gli ossidi di azoto penetrano nell'apparato respiratorio e possono arrivare fino ai polmoni; a contatto con le mucose possono formare acido nitrico il quale attacca le mucose stesse. Le prime conseguenze della presenza di ossidi di azoto nell'aria sono la percezione dell'odore (alla concentrazione di 1-3 ppm), irritazione oculare e delle mucose nasali (a 10-13 ppm); dosi più massicce possono provocare gravi conseguenze: 150 ppm una bronchite mentre se arrivassimo a 500 ppm, anche per pochi minuti, potremmo riscontrare edema polmonare e morte. Come effetto cronico sono descritte fibrosi polmonari ed enfisema, conseguenti ad esposizioni prolungate a 10-40 ppm. L'importanza degli ossidi di azoto nell'inquinamento atmosferico risiede principalmente nel che giocano nella produzione di ossidanti fotochimici, più che nella loro tossicità. Un altro effetto può essere quello della riduzione di visibilità, dovuta al loro colore, nei casi di elevate concentrazioni atmosferiche.

Per quel che riguarda i rimedi, circa gli effluenti industriali, sono stati proposti e, in alcuni casi utilizzati, numerosi procedimenti per l'eliminazione degli ossidi di azoto: essi si basano sull'*adsorbimento* su carbone attivo, sull'assorbimento degli ossidi in soluzioni particolari e sulla riduzione catalitica (conversione mediante opportuni reattivi, come il metano, a composti innocui quali N_2 , CO_2 , ecc.). Con quest'ultimo procedimento è possibile ottenere un'efficienza di abbattimento di circa il 90%. La lotta agli NO_x è possibile anche tramite tecniche di combustione le quali utilizzino una temperatura più bassa di quelle convenzionali ed un esatto dosaggio dell'apporto d'aria. Infine si può operare, in alcuni casi, anche con opportune scelte di combustibile con qualità tali da ridurre la percentuale di emissione di NO_x . Potrebbe apparire superfluo, ma non lo è, affermare che interventi mirati sul traffico veicolare e sulle emissioni delle auto, potrebbero ridurre l'impatto, dato da questo inquinante, sulla popolazione.

4.3 Ossidi di zolfo

L'*anidride solforosa* o *biossido di zolfo* (SO_2) è un gas incolore dall'odore pungente. Essendo piuttosto pesante, tende generalmente ad accumularsi nei più bassi strati dell'atmosfera ma, in determinate situazioni, può diffondersi su grandi distanze nell'atmosfera stessa. L'anidride solforosa è il più diffuso inquinante atmosferico, in quanto è sempre presente nelle zone urbane e industriali, spesso in concentrazioni elevate ed è uno dei più aggressivi: infatti essa è stata definita tra le principali cause di danni all'uomo e all'ambiente nella comunità europea. In particolare l' SO_2 è al primo posto come inquinante di origine industriale e dalle combustioni da impianti fissi. Per tali motivi, e per essere facilmente misurabile, l'anidride solforosa è considerata un parametro rappresentativo dell'inquinamento e la stessa OMS (Organizzazione Mondiale della Sanità) l'ha scelta come indice generale di inquinamento atmosferico.

L'altro composto ossigenato dello zolfo allo stato gassoso è l'*anidride solforica* (SO_3), che accompagna spesso l'anidride solforosa ma è presente in concentrazioni molto minori nell'atmosfera; entrambi i composti vengono chiamati *ossidi di zolfo* (SO_x).

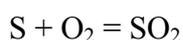
La concentrazione di fondo (misurata, cioè, in luoghi molto lontani da sorgenti inquinanti) della SO_2 varia da 1 a 10 mg/m^3 (0,0004-0,004 ppm in volume). La principale sorgente naturale di SO_2 sono i vulcani ma la sua formazione avviene anche nei processi di combustione di combustibili fossili, solidi o liquidi; questi contengono, come impurità, una percentuale di zolfo diversa a seconda del tipo di combustibile il quale, durante la combustione, viene ossidato ad anidride solforosa e, in misura minore, ad anidride

solforica. Il carbon fossile ha contenuti di zolfo che variano da 0,1% (in peso) fino a poco oltre il 7%; i carboni fossili che possono essere usati in Italia per gli impianti di combustione non devono avere un contenuto di zolfo superiore all'1%. I petroli grezzi hanno contenuti di zolfo in genere inferiori a quelli del carbon fossile, fra 0,05% e 5%.

Generalmente tutto lo zolfo presente nei combustibili viene ossidato: solo nel caso degli oli combustibili residui (molto pesanti ed impuri) e del carbone, una parte dello zolfo rimane conglobata nelle ceneri. L'anidride solforosa viene prodotta dalle centrali termoelettriche le quali costituiscono la maggior fonte di emissione di questo gas, dagli impianti di riscaldamento domestico, da alcune lavorazioni industriali (raffinerie di petrolio, fonderie, cementifici, alcune industrie chimiche, ecc.). Non esiste, in pratica, un problema di anidride solforosa associato al traffico autoveicolare, a causa del basso tenore di zolfo nella benzina e nel gasolio.

L'anidride solforosa, in particolari condizioni meteorologiche e di emissione (ad esempio alti camini), può diffondersi su grandi distanze nell'atmosfera portando, ad esempio, al fenomeno delle *piogge acide* il quale verrà approfondito in seguito.

Per avere dati sull'emissione di SO₂ da parte dei processi di combustione, un metodo di calcolo molto semplice parte dall'ipotesi teorica che tutto lo zolfo contenuto nel combustibile si trasformi in anidride solforosa secondo la reazione:



nella quale da 1 kg di zolfo derivano 2 kg di anidride solforosa. Essendo noto il consumo di un combustibile in ton/anno (C), il suo tenore di zolfo in percentuale (P), la corrispondente emissione di SO₂ in ton/anno (E) si ottiene dalla formula seguente:

$$E = 2/100 \times P \times C$$

Da notare che la conversione degli impianti per il riscaldamento domestico da olio combustibile a *gas naturale*, in prevalenza *metano* (con percentuali di zolfo pressoché nulle) ha contribuito, sebbene in piccola parte, alla diminuzione di emissione di SO₂ riscontrata in Italia dal 1987 al 1997.

L'anidride solforosa è riconosciuta fra i gas tossici (DM 9.2.1935). Una parte dell'anidride solforosa immessa in atmosfera, in seguito a processi fotolitici o fotochimici, si ossida ad

anidride solforica, la quale, con l'umidità atmosferica, si idrata ad acido solforico (“*nebbie acide*”), secondo le reazioni:



La pioggia esercita azione di lavaggio su questi composti dello zolfo, ma loro rimozione dall'atmosfera è accompagnata dalla formazione di *pioggia acida*. L'anidride solforosa permane in atmosfera per periodi che vanno da 8 ore a 2 giorni (in relazione alle caratteristiche chimiche dell'aria) e presenta differenti concentrazioni nell'aria nei vari momenti della giornata; infatti esistono cicli giornalieri tipici per ciascun contaminante o gruppo di contaminante: così l'anidride solforosa, derivando da processi di combustione, presenta nelle città punte massime giornaliere in corrispondenza dell'ora di accensione e di quella di rinforzo del riscaldamento.

TOSSICOLOGIA ED EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

Al di sotto della concentrazione nell'aria di 25 ppm, gli effetti irritanti dell'anidride solforosa sono limitati alle congiuntive ed al tratto superiore dell'apparato respiratorio, con aumento delle secrezioni di questo, poiché, trattandosi di un gas altamente solubile, esso viene assorbito dalle mucose delle prime vie aeree e raggiunge solo in parte i polmoni: 0,3 ppm vengono avvertiti come un sapore sgradevole; 0,5 ppm sono avvertiti come odore; a 1 ppm il polso si accelera, così come il respiro, mentre a 1,6 ppm sono stati descritti fenomeni transitori di bronco-restrizione negli individui più sensibili; 10 ppm causano irritazione ad occhi, naso e gola dei soggetti alla loro prima esposizione. Esposizioni prolungate a questo gas (conseguenze a lungo termine), in concentrazioni di 2 ppm, possono provocare irritazioni alle mucose nasali, bronchiti, malattie polmonari e l'aggravamento di malattie cardio-vascolari. Gli *aerosoli* di acido solforico (*nebbie acide*) sono altamente irritanti, ed il loro effetto sulle vie respiratorie è legato alle dimensioni delle goccioline di nebbia: quando sono particolarmente piccole, queste possono raggiungere in profondità l'albero respiratorio, causando una brusca bronco-costrizione, irritazione bronchiale e bronchite acuta.

L'anidride solforosa presenta un'azione sinergica con altri inquinanti, come il biossido di azoto, ma in particolare con le *particelle sospese*.

4.4 Idrocarburi (HC)

Composti organici costituiti da atomi di carbonio e idrogeno (classificati in base alla composizione ponderale dei componenti). I principali problemi derivanti dalla presenza di idrocarburi sono i seguenti:

- Partecipano ai processi di formazione dello *smog fotochimico* (prendono parte solo gli idrocarburi reattivi RHC, difficili da individuare, e vengono considerati tali tutti tranne il metano).
- Gli idrocarburi aromatici (C_nH_{2n-6}) agiscono direttamente e negativamente su varie componenti dell'ecosistema (p.e. sono cancerogeni per l'uomo).

NOME	Formula Bruta	Peso Molecolare
Benzene	C_6H_6	78.11
Toulene	C_7H_8	92.13
Orto-xilene	C_8H_{10}	106.16
Meta-xilene	C_8H_{10}	106.16
Para-xilene	C_8H_{10}	106.16
Etilbenzene	C_8H_{11}	106.16
Para-cimene	$C_{10}H_{16}$	134.21
Difenile	$C_{12}H_{12}$	154.2
Difenilmetano	$C_{13}H_{14}$	168.2
Stirene	$C_{14}H_{15}$	104.14

Tabella 4: Principali idrocarburi aromatici o “ad anello”

4.5 Idrocarburi Policiclici Aromatici

Il termine IPA è l'acronimo di *Idrocarburi Policiclici Aromatici*, una classe numerosa di composti organici tutti caratterizzati strutturalmente dalla presenza di due o più anelli aromatici condensati fra loro.

L'IPA più semplice dal punto di vista strutturale è il *naftalene*, un composto a due anelli che come inquinante aerodisperso si trova più che altro in forma gassosa a temperatura ambiente. Gli IPA costituiti da tre a cinque anelli possono essere presenti sia come gas che come particolato, mentre quelli caratterizzati da cinque o più anelli tendono a presentarsi per lo più in forma solida. All'aumentare del peso molecolare decresce la volatilità e la già bassa solubilità in acqua, mentre cresce il punto di ebollizione e di fusione. Nella forma più pura gli IPA si presentano solidi e trasparenti, oppure bianchi o di un colore che va dal giallo chiaro al verde pallido.

I vari IPA variano fra loro sia per le diverse fonti ambientali che per le caratteristiche chimiche. Si formano nel corso delle combustioni incomplete di prodotti organici come il

carbone, il petrolio, il gas o i rifiuti; molti vengono utilizzati per condurre delle ricerche e alcuni vengono sintetizzati artificialmente; in alcuni casi si impiegano nella produzione di coloranti, plastiche, pesticidi e medicinali.

Anche se esistono più di cento diversi IPA, quelli più imputati nel causare dei danni alla salute di uomini e animali sono: l'acenaftene, l'acenaftilene, l'antracene, il benzo(a)antracene, il dibenzo(a,h)antracene, il crisene, il pirene, il benzo(a)pirene, l'indeno(1,2,3-c,d)pirene, il fenantrene, il fluorantene, il benzo(b)fluoroantene, il benzo(k)fluoroantene, il benzo(g,h,i)perilene e il fluorene.

Solitamente nell'aria non si ritrovano mai come composti singoli, ma all'interno di miscele dove sono presenti molte decine di IPA diversi e in proporzioni che in alcuni casi possono anche variare di molto. Il fatto che l'esposizione avvenga ad una miscela di composti, di composizione non costante, rende difficile l'attribuzione delle conseguenze sulla salute alla presenza di uno specifico idrocarburo policiclico aromatico.

Pur essendo lo studio di queste miscele particolarmente complicato, è stato comunque dimostrato che l'esposizione alle miscele IPA comporta un aumento dell'insorgenza del cancro, soprattutto in presenza di benzo(a)pirene (peraltro l'unico IPA che finora è stato studiato approfonditamente).

Le sorgenti inquinanti naturali possono essere particolarmente importanti: gli Idrocarburi Policiclici Aromatici vengono rilasciati nell'aria nel corso delle eruzioni vulcaniche e a causa degli incendi boschivi; in piccola parte vengono prodotti da alcune specie di batteri e funghi.

Sorgenti molto significative sono anche le attività umane dato che gli IPA si formano in tutti i processi che vedono una combustione incompleta dei materiali a base di carbonio come il carbone, il petrolio, il legno e il gas. In linea indicativa si può affermare che tanto più è il fumo prodotto nella combustione, tanti più IPA vengono liberati nell'aria. Anche l'utilizzo dei vari carburanti produce una notevole quantità di inquinanti. Le emissioni dovute al traffico stradale sono una componente dominante nella emissione di IPA e di B(a)P nelle aree urbane.

Delle quantità relativamente alte di IPA si possono trovare nel cibo come conseguenza di vari metodi di cucina, soprattutto quella alla brace o per affumicatura; oppure possono essere presenti in seguito alla deposizione atmosferica su frutta e ortaggi presenti in aree agricole inquinate.

Anche i fumi rilasciati dall'asfalto delle strade ne presentano delle quantità notevoli, come pure i vapori liberati dal catrame. Il fumo di tabacco rappresenta una sorgente

particolarmente importante per quanto riguarda l'inquinamento indoor, allo stesso modo lo è il riscaldamento domestico che prevede l'utilizzo di legna o carbone.

Le principali sorgenti industriali di IPA comprendono le aziende che lavorano i metalli grezzi, le raffinerie di petrolio, gli impianti per la produzione di carbon coke, le industrie che realizzano la carta, le industrie chimiche e quelle plastiche. Per la grande quantità di combustibile fossile utilizzato possono risultare delle fonti rilevanti anche le centrali energetiche. Anche gli inceneritori di rifiuti e i depositi di sostanze tossiche possono rappresentare delle sorgenti di importanza primaria.

Da notare che la maggior parte degli IPA non ha un uso conosciuto e viene liberata nel corso dei vari processi come sostanza di scarto o sottoprodotto, alcuni IPA vengono però sintetizzati di proposito ed utilizzati in medicina o per fare coloranti, plastiche e pesticidi.

In genere gli idrocarburi policiclici aromatici presenti nell'aria possono degradarsi reagendo con la luce del sole e con altri composti chimici nel giro di qualche giorno o settimana. Quelli di massa maggiore aderiscono al particolato aerodisperso e, prima o poi, vanno a depositarsi al suolo. Per questa loro relativa stabilità gli IPA si possono riscontrare anche a grandi distanze in località remote e molto lontane dalle zone di produzione.

Gli IPA sono comunque presenti nell'atmosfera a concentrazioni relativamente basse se paragonate a quelle di molti altri inquinanti, tra l'altro le loro proprietà chimiche e fisiche fanno sì che la loro misura sia soggetta a grande incertezza. Premesso questo, è da sottolineare che la concentrazione nell'aria di queste sostanze si è notevolmente ridotta nel corso di questi ultimi trent'anni. Il declino è stato attribuito all'utilizzo dei convertitori catalitici negli autoveicoli ed alla riduzione dell'utilizzo del legno e del carbone a favore del petrolio e del gas naturale come fonti energetiche. Inoltre si è ridotta di molto la pratica delle combustioni all'aria aperta, soprattutto di tipo agricolo, e vi è stato un miglioramento della tecnologia della combustione, anche in seguito agli sforzi per controllare le emissioni fumose.

In molte città europee negli anni '60 la concentrazione media annuale del solo B(a)P era più alta di 100 ng/mc. Ora la media annuale nelle aree urbane si aggira intorno a 0,5-1 ng/mc; nelle aree semi-rurali è minore di 0,2 ng/mc. Elevate concentrazioni si possono rilevare solo nel corso di episodi di inquinamento acuto per lo più nel periodo invernale, quando risulta maggiore l'impiego di combustibili fossili di bassa qualità per il riscaldamento in ambito civile, e nei periodi in cui si verificano le inversioni termiche.

In genere le concentrazioni di idrocarburi policiclici aromatici sono più alte lungo le arterie stradali, a causa delle emissioni generate dagli autoveicoli. La concentrazione di B(a)P in

una stanza estremamente inquinata da fumo di tabacco può raggiungere spesso valori superiori a 20 ng/mc. L'inquinamento indoor è comunque particolarmente variabile, in funzione sia del tipo di riscaldamento utilizzato che del combustibile impiegato per la cottura del cibo.

Le concentrazioni inquinanti più elevate si ritrovano, come sempre, nei paesi in via di sviluppo. In Cina, in edifici che utilizzano carbone fumoso come riscaldamento, sono state rilevate concentrazioni superiori a 14 µg/mc; in India l'utilizzo di biomassa come combustibile in cucina porta spesso al superamento di 4 µg/mc. Concentrazioni molto alte di B(a)P possono essere presenti anche nei luoghi di lavoro. Le misure effettuate utilizzando campionatori fissi o campionatori personali nel corso di un periodo di 8 ore hanno dimostrato una concentrazione di B(a)P media variabile fra 22 e 37 µg/mc nei pressi dei più vecchi forni per la produzione di carbon coke e altre fra 1 e 5 µg/mc in molte altre zone di lavoro all'interno dello stesso impianto. Nell'industria dell'alluminio sono state trovate nei luoghi di lavoro concentrazioni più alte di 19 µg/mc.

TOSSICOLOGIA ED EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

L'esposizione agli idrocarburi policiclici aromatici può avvenire per inalazione, per ingestione di cibo o di bevande contaminate, oppure per via cutanea toccando del terreno contaminato o prodotti come gli oli pesanti, il catrame o di carbone. Una volta nel corpo gli IPA si diffondono rapidamente per la loro liposolubilità che li rende in grado di attraversare le membrane cellulari e di penetrare e depositarsi nei tessuti adiposi. Gli organi bersaglio includono i reni, il fegato ed il grasso. La metabolizzazione è, però, abbastanza rapida e, nel giro di pochi giorni, gli IPA vengono eliminati tramite le urine e le feci. La maggior parte dei dati sulla pericolosità degli IPA derivano dai numerosi studi di laboratorio condotti in vitro o su animali in quanto non possono essere condotti studi sugli esseri umani per individuare gli effetti causati dall'esposizione ad IPA a vari livelli di concentrazione; sembra comunque che l'esposizione a queste sostanze comporti vari danni a livello ematico, una immunosoppressione e vari danni al sistema polmonare. L'effetto principale sulla salute associato all'esposizione è certamente il cancro. Alcuni IPA hanno dimostrato in test di laboratorio di essere in grado di causare il cancro per inalazione (ai polmoni), per ingestione (allo stomaco) e per contatto dermico (alla pelle). Secondo l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) sono probabili cancerogeni per l'uomo il benzo(a)pirene, il benzo(a)antracene e il dibenzo(a,h)antracene; mentre sono possibili cancerogeni il benzo(b)fluorantene, il benzo(k)fluorantene e l'indeno(1,2,3,-c,d)pirene.

Anche vari studi epidemiologici condotti sulle attività lavorative hanno dimostrato la pericolosità degli IPA. In seguito ad esposizioni occupazionali si sono verificati casi di cancro ai polmoni, alla pelle ed al tratto genito-urinario; i livelli di esposizione erano comunque più elevati di quelli a cui è soggetta di norma la popolazione generale.

La frazione di IPA più implicata nello sviluppo del tumore è quella caratterizzata da 3 a 7 anelli aromatici. Sembra che gli IPA, di per sé, non siano tossici; una volta nel corpo vengono però attivati in vari processi mediati da alcuni sistemi enzimatici presenti nei tessuti bersaglio. Questa biotrasformazione comporta la formazione di intermedi reattivi (carcinogeni genotossici) in grado di legarsi covalentemente a macromolecole come il DNA e l'RNA. Il materiale genetico viene così danneggiato e questo comporterebbe l'insorgenza dei tumori. In ogni caso, non vi è praticamente niente di certo sull'azione tumorigenica dei singoli IPA presenti all'interno di miscele complesse. Gli studi inerenti hanno dimostrato che gli idrocarburi policiclici aromatici interagiscono metabolicamente in un'enormità di modi determinando di volta in volta effetti sinergici, additivi o addirittura antagonistici.

4.6 Benzene

Il benzene è un idrocarburo di formula C_6H_6 , a struttura esagonale, e rappresenta il composto base della classe di idrocarburi aromatici dal caratteristico odore pungente; si trova nell'ambiente sia naturalmente che per le attività antropiche. Le fonti naturali forniscono soltanto una piccola parte del benzene presente nell'ambiente, mentre le emissioni dei veicoli a motore (benzine) e dei processi industriali sono le principali fonti responsabili del benzene disperso nell'ambiente.

Il benzene è un liquido incolore, caratterizzato da un punto di ebollizione pari a circa $80^\circ C$, un punto di fusione pari a circa $5,5^\circ C$, un punto di infiammabilità di $11,1^\circ C$ ed una pressione di vapore di $74,6 \text{ mmHg}$ a $20^\circ C$ e di 166 mmHg a $37,7^\circ C$.

Il benzene si forma anche durante il ciclo di produzione delle benzine come sottoprodotto rilasciato in atmosfera e durante alcuni processi evaporativi nella combustione incontrollata di piante e/o residui in agricoltura; quest'ultimo caso rappresenta la sorgente naturale di emissione benzenica più rappresentativa.

Il benzene presente in atmosfera deriva in gran parte dal settore dei trasporti. Il traffico veicolare contribuisce per oltre l'80% mentre la parte rimanente deriva dalla raffinazione del greggio, dalla movimentazione della benzina, dall'industria chimica e da altre attività antropiche. La riduzione del piombo nei carburanti ha comportato un aumento della

percentuale di idrocarburi aromatici totali e di benzene delle “benzine verdi”. A partire dal 1990, la percentuale di benzene è progressivamente diminuita nelle benzine ed è passata da l 3% circa all’1%.

Il benzene è, tra i composti organici volatili (VOC) non metanici, quello misurato con continuità solo da pochi mesi nelle aree urbane ed è fonte di preoccupazione per le alte concentrazioni registrate in prossimità di arterie fortemente congestionate e di ampi parcheggi.

L’esposizione acuta ad alte concentrazioni di benzene può causare: nausea, stordimento, cefalea ed effetto narcotico se ingerito, inalato o assorbito attraverso la cute; irrita le mucose e le vie respiratorie superiori; provoca irritazione cutanea e grave irritazione oculare. Per quanto riguarda gli effetti cronici, il benzene è cancerogeno e può provocare alterazioni genetiche ed effetti ematici. Gli organi colpiti sono il sangue, il midollo osseo, gli occhi, l’apparato riproduttivo femminile.

L’assunzione di benzene con l’acqua potabile è minima rispetto a quella che viene assunta tramite l’aria.

4.7 Diossina

Tra i derivati degli idrocarburi aromatici esistono molti composti “eterociclici” (nel cui anello esagonale compaiono, cioè, anche atomi diversi dal carbonio), fra cui le *paradiossine*, costituite da due atomi di ossigeno in posizione “para”, cioè ai vertici opposti dell’esagono. L’anello para-diossinico può collegare due anelli benzenici per costituire composti chiamati *dibenzo-para-diossine*. I loro derivati contenenti atomi di cloro sono le *policlorodibenzodiossine* (o PCDD), alcune delle quali molto tossici. In particolare, estremamente tossico anche a dosi molto basse è il composto 2, 3, 7, 8 tetraclorodibenzo-p-diossina (o TCDD), contenente 4 atomi di cloro nelle posizioni 2, 3, 7, 8 della catena di atomi che formano la molecola, comunemente nota come *diossina*, che è quindi un organoclorurato (organoalogenato).

I *benzofurani policlorurati* (PCDF) sono composti aromatici con proprietà chimiche e fisiche simili alle dibenzo-p-diossine policlorurate (PCDD).

Normalmente il TCDD è presente in modeste quantità, dell’ordine di pochi ppm, come impurezza nel triclorofenolo, sostanza utilizzata per produrre defolianti e diserbanti. Qualora la temperatura con cui viene sintetizzato il triclorofenolo superi i 160-180 °C, si possono tuttavia innescare reazioni che provocano la formazione di diossina in quantità anche notevoli: è quello che avvenne nel luglio 1976 a Seveso, dove, in uno stabilimento

chimico, l'esplosione della valvola di sicurezza del reattore usato per la fabbricazione del triclorofenolo provocò l'emissione in atmosfera di una sensibile quantità di diossina allo stato di nube gassosa.

TOSSICOLOGIA ED EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

La pericolosità di questo microinquinante organoalogenato risiede nella sua elevatissima tossicità (non esiste una "soglia di sicurezza", cioè una dose ritenuta innocua) e nella stabilità della sua molecola: infatti essa è molto resistente alla distruzione e può, quindi, accumularsi negli organismi, poiché resiste a temperature fino a 800-1000 °C, non è apprezzabilmente solubile, non è biodegradabile, è chimicamente resistente (cioè non si trasforma facilmente in altre sostanze meno nocive).

Gli effetti a lungo termine della diossina sull'uomo non sono ancora del tutto note.

Studi epidemiologici suggeriscono un'associazione tra esposizione prolungata a TCDD e indebolimento dell'immunità cellulo-mediata.

Per quanto riguarda gli effetti cancerogeni, sono stati osservati tumori in animali da laboratorio ed in alcuni studi epidemiologici è stato mostrato un aumento dell'incidenza di vari tumori in soggetti esposti ad una mistura di PCDD, PCDF ed altri agenti chimici specifici; il numero limitato di casi esaminati, però, non ha consentito di ottenere risultati significativi. Diversi casi di cancro sono stati osservati in lavoratori esposti a TCDD, ma non esistono studi epidemiologici in proposito.

La diossina provoca anche una riduzione delle difese dell'organismo, lasciandolo più facilmente esposto alle malattie; produce seri danni al fegato, ai reni ed al cuore e causa una malattia della pelle, la "cloracne", di per se non pericolosa, anche se a volte molto persistente. La cloracne, frequente anche nei lavoratori esposti a vari composti organici clorurati, può indicare l'avvenuta contaminazione dell'organismo da parte della diossina o di altri organoclorurato nocivi.

La diossina, oltre ai luoghi di lavoro, può contaminare l'aria, l'acqua, il suolo, risultando tossica anche per piante e animali; fenomeni di inquinamento da diossina possono derivare anche dall'impiego di diserbanti, erbicidi e defolianti ottenuti dal triclorofenolo, sia per il contenuto diretto di diossina, sia per perché questo veleno può prodursi in apprezzabili quantità dalla combustione della vegetazione irrorata con tali composti.

Le principali fonti di emissioni di PCDD e PCDF comprendono gli inceneritori, l'industria della cellulosa e della carta e la produzione di insetticidi.

4.8 Particelle sospese

Le particelle sospese (o *materiale particolato*) sono elementi o composti chimici allo stato solido oppure liquido (sottoforma di goccioline da condensazione di vapore) che, a causa delle loro piccole dimensioni, restano in sospensione nell'aria. La dispersione di tali particelle, solide o liquide, nell'atmosfera costituisce un *aerosol atmosferico*. Per queste particelle (elettricamente cariche per lo più) sono fondamentali i fenomeni di superficie (*adsorbimento*) e le reazioni fitochimiche; esse costituiscono un'importante categoria di inquinanti atmosferici, o perché sono formate da sostanze di per sé nocive la cui reattività chimica aumenta a causa dell'estrema suddivisione della materia, oppure semplicemente per la loro concentrazione troppo elevata. Nei paesi di lingua inglese, per indicare le particelle sospese viene spesso utilizzata la sigla SPM (*Suspended Particulate Matter*).

Esiste un'ampia gamma di particolato, il cui diametro va da 0,0002 a circa 600 μm ; le particelle al di sopra di 10 μm di diametro non vengono trasportate lontano dalla loro fonte di emissione a meno che non vi siano forti venti. In generale le particelle sospese immesse in atmosfera sono il risultato della disgregazione della materia. Elenchiamo le principali categorie di particelle sospese, suddivise secondo l'origine, la dimensione ed il loro stato fisico.

- *Ceneri volanti (Fly ash)*: La cenere rappresenta la componente solida minerale di una sostanza che rimane in seguito ad una combustione di quest'ultima. Il quantitativo di ceneri è generalmente elevato nei combustibili solidi (oscillando intorno al 10% in peso per l'antracite e il coke e dal 20 al 30% per le ligniti e le torbe), mentre è praticamente trascurabile in quelli liquidi (intorno allo 0,1%). Le particelle più fini della cenere, quando vengono trascinate dai gas di combustione (principalmente ossidi di zolfo, di azoto e di carbonio), formano le "ceneri volanti"; all'interno di queste sostanze possiamo distinguere, ulteriormente, le *ceneri propriamente dette dalle particelle incombuste di natura varia*: le prime sono presenti in varie forme nei combustibili e trascinate nei gas di combustione, spesso come particelle fuse e poi solidificatesi con il raffreddamento; la composizione chimica è assai varia, a seconda del combustibile, e le ceneri sono costituite, principalmente, da ossidi di silicio, di alluminio, di ferro, di calcio, nonché di arsenico, di berillio, di cadmio, di cromo, di manganese, di mercurio, di nichel, di piombo, di selenio, di vanadio, da cloruri di sodio, cloruri di magnesio e da silice (SiO_2); come si nota nelle ceneri volanti sono contenuti arsenico e "metalli pesanti", pericolosi per la salute umana e di accertata o sospetta attività cancerogena. Le

particelle incombuste di natura varia, come polvere di carbone, carta carbonizzata, prodotti solidi di combustione, più o meno incompleta, come la “fuliggine”. Le ceneri volanti si trovano in particolare negli effluenti delle centrali termiche e degli inceneritori di rifiuti e le dimensioni variano da 1 A 600 μm .

- *Fuliggine (Soot)*: si trova nelle ceneri volanti e nei fumi ed è costituita da un aggregato di particelle solide carboniose nere, formatesi durante la combustione incompleta (di carbon fossile e non, di olio combustibile, ecc).
- *Nerofumo (Carbon Black)*: è un prodotto industriale, costituito da particelle di carbone finemente suddivise e nere che si ottengono dalla voluta combustione incompleta, o decomposizione termica, di un gas naturale (ad esempio metano) o di idrocarburi liquidi. Il nero fumo è utilizzato nella fabbricazione dei pneumatici, degli inchiostri, del lucido da scarpe, ecc.; le lavorazioni industriali suddette possono emettere queste particelle solide nell’atmosfera.
- *Polvere (Dust)*: particelle solide proiettate nell’aria da processi di disintegrazione della materia, sia naturali (erosione eolica, emissione di ceneri vulcaniche, terremoti), sia dovuti all’uomo (frantumazione, smerigliatura, macinazione, perforazione, demolizione, escavazione, trasporto, imballaggio, spazzatura). Le polveri vengono emesse da numerose industrie, tra le quali i cementifici, gli impianti siderurgici e quelli metallurgici, le raffinerie di petrolio, le industrie minerarie e le attività estrattive. Anche i mezzi di trasporto emettono polveri: l’usura dei pneumatici e degli organi di frenatura produce minuscole particelle di gomma e altri materiali. Le polveri non hanno la tendenza a “flocculare” (a meno che non siano soggette a forze elettrostatiche) ne a fenomeni di diffusione ma si depositano sotto l’influenza della forza di gravità. Generalmente le particelle di polvere hanno diametro che va da 1 a 100 μm .
- *Fumo (Smoke)*: I fumi sono costituiti da particelle solide o liquide con diametro generalmente inferiore a 1 μm (di norma tra 0,001 e 1 μm), che restano in sospensione nell’aria o in effluenti gassosi, finché non vengono rimosse per gravità. Queste particelle sono trascinate dai gas e risultano dalla combustione incompleta: sono essenzialmente da carbone e da altro materiale combustibile, come, ad esempio, idrocarburi parzialmente combusti o goccioline di catrame, e sono presenti in quantità sufficiente per essere osservabili indipendentemente dalla presenza di altri solidi. Oltre che dalla combustione , i fumi possono essere prodotti da altre

reazioni chimiche. Altre particelle solide nei fumi sono silicati, composti del fluoro, alluminio e piombo, nonché composti organici come i fenoli. Le particelle solide presenti nei gas di scarico degli autoveicoli sono costituite da particelle carboniose incombuste (specialmente nei fumi emessi dai motori “Diesel”) e da parte di ossidi e sali (cloruri, bromuri, solfati) di piombo; è presente anche cadmio. Dal punto di vista chimico-fisico il fumo è un aerosol, costituito da tutte le particelle, suscettibili di dispersione, risultanti dalla combustione incompleta di materiali carboniose; esse sono trascinate dai gas di combustione che costituiscono la fase disperdente. Se inglobato nella nebbia, il fumo forma lo *smog*. I fumi vengono emessi dagli impianti termici, dalle centrali termoelettriche, dagli autoveicoli, dagli inceneritori di rifiuti.

- *Esalazioni (Fume)*: sono particelle solide o liquide con diametro minore di 1 μm , generate di solito dalla condensazione di vapori, sono generalmente rilasciate da certe lavorazioni di metalli o da processi chimici (ad esempio esalazioni formatesi dal riscaldamento di manganese e zinco e dalla manifattura delle plastiche, in particolare cloruro di vinile). Buona parte delle particelle sospese immerse nell’atmosfera provengono da processi di combustione in quantità variabili a seconda del tipo di combustibile, delle modalità di combustione, delle caratteristiche del generatore e delle modalità di conduzione dell’impianto nonché delle sue caratteristiche generali. Si può valutare, mediamente, che un generatore di calore emetta, a seconda del combustibile impiegato e della fase di funzionamento (avviamento, regime normale, regime ridotto e/o regime di modulazione) polveri in concentrazioni comprese tra 0,1 e 1 g/Nm^3 . Nella frazione organica del materiale particolato sono stati identificati più di 20 elementi metallici, mentre quella organica, più complessa, contiene un gran numero di idrocarburi alifatici e aromatici, nonché acidi, basi, fenoli ed altri composti. Vi si possono trovare, adsorbiti alle particelle minerali carboniose anche *idrocarburi policiclici aromatici* (che saranno descritti nei prossimi paragrafi). Inoltre, nuovi prodotti si formano con la reazione tra i diversi inquinanti dopo il loro scarico nell’atmosfera.
- *Polveri sospese o Materiale Particolato (PM)*: questa definizione si applica ad un’ampia classe di sostanze, diverse dal punto di vista chimico-fisico, che esistono sottoforma di particelle liquide o solide con diverse dimensioni; PM è sinonimo, quindi, di eterogeneità chimica. Le emissioni di PM originano da suolo, aerosol marino, incendi, pollini, eruzioni vulcaniche e dalle attività dell’uomo. Possono

essere emesse direttamente dalla sorgente o formarsi in atmosfera per trasformazione di emissioni gassose di ossidi di zolfo, ossidi di azoto e composti organici volatici (VOC). Secondo alcune indicazioni dell'ente americano EPA (Environment Protection Agency), la concentrazione delle particelle di diametro inferiore a 10 μm (PM_{10}) risulta essere uno dei migliori indici della contaminazione ambientale a causa della capacità, da parte delle particelle più fini, di essere facilmente inalabili e di avere maggiore probabilità di penetrare nell'apparato respiratorio.

TOSSICOLOGIA ED EFFETTI SULLA SALUTE UMANA

Dal punto di vista ecotossicologico si osserva che le particelle sospese presentano differenti concentrazioni nell'aria nei vari momenti della giornata: il ciclo giornaliero di questi inquinanti, che nelle città derivano maggiormente da processi di combustione (in particolare il riscaldamento domestico), presenta punte massime in corrispondenza dell'ora di accensione e di quella di rinforzo del riscaldamento.

Il riversamento di particelle sospese nell'atmosfera ha riflessi diretti e indiretti sulla salute umana: esse sono causa di irritazioni delle mucose esposte, in particolare, particelle più fini con granulometria tra 0,3 e 0,06 μm , risultano molto insidiose poiché, in seguito ad inalazione, possono penetrare in profondità e depositarsi nei polmoni fino agli alveoli, provocando ed accentuando malattie dell'apparato respiratorio. Inoltre alcune particelle, come l'amianto, risultano cancerogene.

4.9 Anidride carbonica

L'anidride carbonica o biossido di carbonio (CO_2) è un gas incolore e inodore, più pesante dell'aria, che si forma di processi di combustione da combustibili a base di carbonio; è innocuo, tranne nel caso in cui si sostituisca all'aria al punto da rendere irrespirabile l'atmosfera (asfissia). L'anidride carbonica determina anche una sorta di inquinamento, poiché la variazione del suo contenuto in atmosfera può provocare modificazioni nella temperatura di quest'ultima, con probabili ripercussioni sul clima. Tuttavia la CO_2 risulta indispensabile per la vita vegetale (in particolare per la fotosintesi clorofilliana) e per il mantenimento di importanti equilibri fisiologici.

L'anidride carbonica è presente in tracce nell'aria non inquinata con una concentrazione che si aggira intorno allo 0,3 % in volume. I processi naturali che danno luogo all'emissione di anidride carbonica sono la respirazione delle piante e degli animali, la

decomposizione degli organismi, la fermentazione, l'azione degli acidi sulle rocce carbonatiche, gli incendi della vegetazione e le attività vulcaniche (la CO_2 è uno dei componenti volatili presenti nei magmi).

I processi artificiali di emissione di CO_2 sono essenzialmente dovuti al consumo di combustibili fossili e ad alcune attività industriali. Il tenore di CO_2 presente nei prodotti della combustione dipende dalla composizione chimica del combustibile e dall'andamento della combustione stessa: i valori teorici vanno, a seconda del combustibile, dall' 11% al 20% circa in volume. Il contenuto di CO_2 viene, quindi, comunemente assunto come indice della qualità di combustione; ad esempio, una combustione di gasolio, ben regolata, che avvenga in un generatore di calore con camera di combustione pressurizzata, deve dar luogo a tenori di CO_2 dell'ordine di 12-13% in volume (teorico 15,5%). La combustione in difetto d'aria produce anche ossido di carbonio (CO).

I processi che portano alla rimozione di questo gas dall'atmosfera sono i seguenti:

- La fotosintesi clorofilliana mediante la quale la CO_2 viene fissata dalle piante;
- L'assorbimento negli oceani e in generale nell'idrosfera;
- Le reazioni con le rocce, con la formazione di depositi inorganici (prevalentemente carbonati) e organici (scisti bituminosi, petrolio e carbone) e in genere i processi nei quali il carbonio viene immagazzinato nella litosfera.

I processi che invece portano all'aumento della concentrazione di CO_2 nell'atmosfera sono i seguenti:

- La combustione;
- La respirazione delle piante e degli animali ovvero il processo inverso della fotosintesi clorofilliana;
- La decomposizione delle sostanze organiche;
- Le emissioni vulcaniche;
- Le emissioni industriali;
- I trasporti.

Gli ultimi due processi, insieme alla combustione, sono dovuti essenzialmente alle attività antropiche, specialmente negli ultimi 100-150 anni: poiché il contenuto di CO_2 nell'atmosfera è andato progressivamente aumentando nello stesso periodo, si ritiene che le attività umane abbiano alterato l'equilibrio naturale di questo gas.

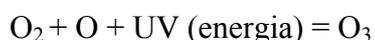
L'anidride carbonica, tra i cosiddetti "gas serra", pur se presente solo in tracce nell'atmosfera, esercita certamente un importante ruolo sul controllo del clima terrestre:

infatti assorbe e riemette energia radiante alle lunghezze d'onda dell'infrarosso (radiazione termica terrestre), mentre risulta "trasparente" alla radiazione solare incidente di breve lunghezza d'onda. Ciò significa che questo gas lascia pervenire sulla terra le radiazioni solari ad onda corta (alta frequenza) che ne riscaldano la superficie ma non fa passare le radiazioni ad onda lunga riflesse dalla stessa, assorbendo così una parte del calore irradiato dalla Terra e impedendogli di sfuggire nello spazio cosmico: quindi si forma, a contatto con la superficie terrestre, uno strato di aria calda; questo fenomeno viene chiamato "effetto serra" (anche il vapore acqueo atmosferico è responsabile di tale fenomeno ma il suo ruolo, sebbene più importante rispetto a quello svolto dalla CO₂, è molto difficile da prevedere). Il calore che in questo modo viene intrappolato è potenzialmente in grado di alterare profondamente il clima terrestre attraverso l'aumento di temperatura dell'atmosfera: questo fenomeno rientra nell'ambito di quello che alcuni definiscono "inquinamento termico del globo". Preoccupata attenzione, pur tra controversie riguardo la velocità dell'aumento delle temperature (1,5-4,5°C in 50-100 anni), è rivolta ai mutamenti indotti sul clima (piogge e siccità), le foreste, l'agricoltura, il livello dei mari e degli altri corpi idrici.

4.10 Ozono

L'ozono è una forma allotropica dell'ossigeno scoperta nel XIX secolo da William Hartley che, irradiando un volume di ossigeno biatomico (O₂), si accorse che si formavano numerose molecole composte da 3 atomi di ossigeno (O₃). Di colore azzurro e dall'acuto odore d'aglio, l'ozono è un gas irritante, velenoso e molto instabile: l'energia che lega i 3 atomi, infatti, è facilmente restituita all'ambiente e la molecola si divide di nuovo nei suoi componenti (1 molecola di ossigeno e 1 atomo di ossigeno libero). In natura, l'energia necessaria a legare 3 atomi di ossigeno è disponibile solo negli strati intermedi dell'atmosfera (*stratosfera*) o vicino al suolo (*troposfera*) durante i temporali ad opera delle scariche elettriche dei fulmini.

L'ozono può formarsi in atmosfera attraverso la *fotosintesi* e la *fotodissociazione*; durante il primo processo l'ossigeno molecolare (O₂), fotodissociato dagli UV, dà origine a 2 atomi di ossigeno libero (O) ciascuno dei quali si può combinare con una nuova molecola di ossigeno producendo una molecola di ozono secondo la reazione:



Il processo di fotodissociazione può invece seguire due percorsi:

1. L'ozono si combina con un altro atomo di ossigeno dando una molecola ancora più instabile (O_4) che si scinde subito in 2 molecole di ossigeno



2. L'ozono è dissociato direttamente dagli UV liberando un atomo di ossigeno (O) e ossigeno molecolare (O_2) secondo un processo inverso rispetto a quello della fotosintesi

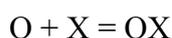


Proprio perché si forma e si scinde assorbendo energia, l'ozono mostra un picco di assorbimento nell'ultravioletto della radiazione solare; è un fenomeno molto importante per la vita poiché la radiazione UV non schermata dall'ozono risulta essere estremamente dannosa. Una prolungata esposizione ad essa, infatti, favorirebbe alterazioni genetiche, modifica delle cellule e della produzione di vitamina D, interferenze con la fotosintesi di piante e plancton. Se la concentrazione globale di ozono si riducesse del 10%, la quantità di radiazioni ultraviolette di tipo B (UV-B) in arrivo a terra aumenterebbe del 20%: ciò provocherebbe l'aumento dell'incidenza di tumori della pelle e l'alterazione delle principali funzioni vitali e la morte di organismi più sensibili (batteri, plancton, piante).

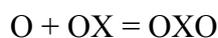
Pur non raggiungendo mai concentrazioni notevoli, il 97% in volume dell'ozono si trova nella stratosfera, fra 30 e 60 km di quota, dove il flusso di radiazioni UV ad alta energia e la concentrazione di ossigeno ne permettono la continua formazione e lo stabilirsi di un equilibrio tra fotodissociazione e fotosintesi. Si è così formata l'*ozonosfera* o "strato di ozono": il processo di formazione sarebbe iniziato circa 2 miliardi di anni fa man mano che l'ossigeno atmosferico aumentava. Forse anche in epoche precedenti esisteva un sottile strato di ozono derivato dalla fotodissociazione delle molecole di vapor d'acqua: gli UV le scindevano in idrogeno (che sfuggiva alla forza di gravità) e ossigeno il quale, rimanendo nell'alta atmosfera, poteva trasformarsi in ozono. L'equilibrio, però, doveva essere molto instabile: la stessa presenza di ozono, infatti, avrebbe ridotto la quantità di UV utili alla dissociazione, frenando la produzione di ossigeno. L'ozono scompariva rapidamente finché

il processo di fotodissociazione dell'acqua non riprendeva: diversamente da ciò che accade oggi è probabile che la formazione di ozono si autolimitasse per una *retroazione negativa*. Quali siano le cause che l'hanno formata e i processi che ne regolano l'esistenza, però, è ancora in gran parte da scoprire. Ad esempio, nel 1986, si è scoperto che l'ozonosfera era sempre più rarefatta soprattutto al di sopra dell'Antartide: il "buco dell'ozono" è stato monitorato con grande accuratezza, ma le interpretazioni sulle cause che lo hanno prodotto e sulla dinamica che lo determina sono ancora molte. I dati sono controversi: in Antartide la diminuzione di ozono non è costante anche se l'area del "buco" è aumentata, nel giro di 7 anni, di 11 milioni di km², e lo strato si è ridotto del 40%, con un aumento della radiazione al suolo pari all'80%. Il "buco" poi è in espansione nei cieli di numerose altre zone della Terra: alle alte latitudini terrestri, dove non ostacola più a sufficienza il passaggio degli UV, si è già notato un significativo aumento nella diffusione dei tumori della pelle (soprattutto fra le popolazioni del Nord Europa). D'altra parte, interpretare un fenomeno basato su quantità assolute così basse è molto difficile.

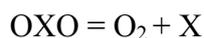
La formazione dell'ozono può essere ostacolata dalla presenza di ioni di idrogeno, di azoto, di cloro o di altre sostanze indicate con X e chiamate *catalizzatori* perché, dopo una catena di reazioni, si riformano in quantità inalterate. Queste sostanze possono legarsi all'ossigeno atomico formando una molecola piuttosto stabile:



Che reagisce più facilmente con un altro ossigeno atomico dando un complesso con 2 atomi di ossigeno:



Esso si stacca facilmente dal catalizzatore dando ossigeno molecolare, più stabile



Così il catalizzatore torna libero e può reagire di nuovo con l'ossigeno atomico: anche una quantità piccola di catalizzatore può ostacolare significativamente la formazione di grandi quantità di ozono.

Eventi naturali e attività umane possono variare la concentrazione stratosferica dei catalizzatori. Negli ultimi tempi si pensa che i più importanti siano prodotti dall'uomo:

l'uso di fertilizzanti azotati trasformati dai microrganismi in ossidi d'azoto da parte di aerei supersonici direttamente nella stratosfera, la diffusione di *cloro-fluorometani* (CFM), più noti col nome generico di *freon* e ampiamente usati fino a pochi anni fa come propellente negli spray e come fluido refrigerante, sarebbero le fonti principali di catalizzatori. Il freon è il più incriminato: oltre a contribuire all'effetto serra, raggiunta la stratosfera questi gas sono scissi dagli UV ($\lambda=200$ nm circa) liberando, tra l'altro, ioni cloro (Cl), estremamente reattivi che si ossidano istantaneamente demolendo l'ozono nella reazione:

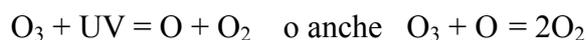


Inoltre l'ossido di cloro (ClO) può reagire con l'ossigeno atomico come qualsiasi catalizzatore, formando una molecola instabile che dà, rapidamente, ossigeno molecolare e libera di nuovo lo ione cloro:



Poichè lo ione cloro è più reattivo dell'ossigeno molecolare, quando è presente il cloro è molto difficile che si formi l'ozono.

A bassa quota l'ozono, detto "smog fotochimico" perché indotto dalla luce solare, è altamente tossico e dannoso per gli esseri viventi. Esso, infatti, tende a decomporsi:



liberando ossigeno dal notevole potere ossidante che si combina con quasi tutte le sostanze. Negli strati atmosferici più bassi, soprattutto nelle grandi città, gli ossidi di azoto prodotti dai motori e dalle grandi centrali termoelettriche fanno aumentare la concentrazione di ozono: 2 molecole di NO scompongono una molecola di O_2 innescando una reazione a catena che termina con la sintesi di 2 molecole di O_3 . Per questo motivo, negli ultimi trent'anni, l'ozono al suolo in Europa è raddoppiato.

5. Bibliografia

- [1]. G.Gisotti, S.Bruschi - “*Valutare l’ambiente*” – ed. La Nuova Italia Scientifica.
- [2]. G.Celli, G.Corrao, E.Scursatone – “*Inquinamento atmosferico e salute*” – ed. Franco Angeli.
- [3]. “*Meteorologia*” – ed. Giunti.
- [4]. M.Floccia, M.Sanna – “*Dizionario dell’inquinamento atmosferico*” – ed. Carocci-Faber.
- [5]. L.Bruzzi – “*Valutazione di impatto ambientale*” – Maggioli editore.
- [6]. V.Bettini, L.W.Canter, L.Ortolano – “*Ecologia dell’impatto ambientale*” – ed. UTET.
- [7]. B.Galletta, M.A. Gandolfo, U.Iannazzi, G. Pieri Buti – “*Un metodo per la valutazione di impatto ambientale: la strada difficile*” – Ed. dei Roma – Tipografia del genio civile.
- [8]. “*Valutazione di impatto ambientale: un approccio generale*” - collana della Regione Toscana Giunta Regionale Ufficio Programmazione e Controlli
- [9]. Schmidt, Friedberg, Malcevschi – “*Guida agli studi di impatto ambientale. Metodologie per la realizzazione degli studi, schemi operativi semplificati, riferimenti procedurali*”
- [10]. Maria Belvisi, Mario Cirillo, Marina Colaiezzi, Caterina D’Anna, Giuseppe Marfoli "Criteri generali per l'utilizzo dei modelli atmosferici nell'ambito della procedura di VIA" in fase di pubblicazione.

Siti web

- [1]. http://www.formeducambiente.apat.it/site/it-IT/Formazione_ambientale_a_distanza/Corsi_disponibili/Cultura_ambientale_e_sviluppo_sostenibile/
- [2]. www.apat.gov.it/site/_Files/TabelleStandardQualitàAria.pdf
- [3]. <http://www.im.cnr.it>
- [4]. <http://www.inrets.fr>
- [5]. <http://www.infras.ch>
- [6]. www.sinanet.anpa.it/aree/Default.asp
- [7]. www.epa.gov