

MASTER UNIVERSITARIO DI I LIVELLO IN
TECNOLOGIE E CONTROLLO AMBIENTALE NEL CICLO
DEI RIFIUTI

*organizzato da Alma Mater Studiorum Università di Bologna – Facoltà di
Chimica Industriale in convenzione con Assoform Rimini*

**APPLICAZIONE DI MODELLI DI SIMULAZIONE DELLA
QUALITA' DELL'ARIA NELL'AMBITO DI UNO STUDIO
AMBIENTALE E TERRITORIALE DELL'AREA INDUSTRIALE-
URBANA DI "CORIANO" DEL COMUNE DI FORLI'**

Tesi di master di:
Marco Dell'Erba

**Direttore del Master
Prof. Luciano Morselli
Tutor Aziendale
Dott.ssa Cristina Regazzi
ARPA-IA Bologna**

APPLICAZIONE DI MODELLI DI SIMULAZIONE DELLA QUALITA' DELL'ARIA NELL'AMBITO DI UNO STUDIO AMBIENTALE E TERRITORIALE DELL'AREA INDUSTRIALE-URBANA DI "CORIANO" DEL COMUNE DI FORLÌ

1	SOMMARIO	5
2	INTRODUZIONE	6
PARTE GENERALE		
3	L'AZIENDA	6
3.1	Il sistema di agenzie per la protezione dell'ambiente	6
3.2	Struttura organizzativa di ARPA Emilia-Romagna	7
3.3	Arpa Emilia-Romagna Struttura Tematica Ingegneria Ambientale	8
4	L'INQUINAMENTO ATMOSFERICO	10
4.1	L'atmosfera	10
4.2	Gli inquinanti atmosferici	12
4.2.1	Inquinanti primari	13
4.2.2	Inquinanti secondari	18
4.3	Diffusione degli inquinanti	22
5	NORMATIVA SULL'INQUINAMENTO ATMOSFERICO	26
5.1	Normativa comunitaria	27
5.2	Normativa nazionale	27
5.3	Normativa regionale	28
5.4	Accordi Regione Emilia-Romagna	28
6	STUDIO AMBIENTALE E TERRITORIALE DELL'AREA INDUSTRIALE- URBANA "CORIANO" DEL COMUNE DI FORLÌ	30
6.1	Stato avanzamento lavori	33
6.2	Gli impianti di termovalorizzazione rifiuti	33
6.2.1	Impianto Mengozzi	33
6.2.2	Emissioni impianto HERA	35
PARTE SPERIMENTALE		
7	I MODELLI DI SIMULAZIONE DI DISPERSIONE DEGLI INQUINANTI IN ATMOSFERA	37

7.1	Il modello ADMS-Urban	39
7.2	Teoria della dispersione atmosferica	40
7.2.1	L'approccio tradizionale	40
7.2.2	L'approccio utilizzato in ADMS-Urban	41
8	RISULTATI E CONCLUSIONI	43
	BIBLIOGRAFIA	51

1 Sommario

Il presente lavoro è un resoconto dell'attività svolta durante il periodo di stage presso ARPA Emilia-Romagna - Struttura Tematica di Ingegneria Ambientale.

Il campo di interesse del gruppo di lavoro di cui ho preso parte riguarda l'inquinamento atmosferico ed acustico (Area Progetti complessi Aria Rumore). Nello specifico, la mia attività è stata incentrata sull'applicazione di un modello di simulazione di dispersione di inquinanti in atmosfera, nell'ambito di uno studio territoriale-ambientale di un'area urbana-industriale del Comune di Forlì.

L'inquinamento dell'aria è stato, negli ultimi anni, uno degli argomenti ambientali più discussi, in particolar modo dall'inizio degli anni 80, quando si è affermata una nuova conoscenza ecologica sulla materia.

Un primo importante e corretto approccio per valutare il problema consiste nell'individuare le possibili sorgenti di inquinamento, gli inquinanti emessi, i meccanismi di produzione e trasformazione dei vari composti ed infine la loro diffusione nell'atmosfera alla quale concorrono in modo determinante le condizioni meteo-climatiche.

L'applicazione di modelli di dispersione e trasformazione chimica degli inquinanti permette di integrare i dati sperimentali con le conoscenze relative ai processi fisico - chimici (dispersione, trasporto, trasformazione chimica, rimozione e deposizione degli inquinanti primari o secondari), alla distribuzione delle sorgenti di emissione e alle caratteristiche orografiche e geometriche dell'area. La combinazione delle informazioni ottenute dall'esecuzione di misure sperimentali e dall'applicazione di modelli costituisce il metodo ottimale per la costruzione di mappe di inquinamento.

Il modello utilizzato da ARPA Emilia-Romagna per lo studio dell'area in esame è il modello ADMS-URBAN. Questo modello viene utilizzato per la valutazione della concentrazione media di inquinanti primari (CO, benzene, SO₂, la frazione primaria di PM) e del biossido di azoto (NO₂) a supporto della valutazione della qualità dell'aria in aree urbane di dimensioni non molto estese, in porzioni di aree metropolitane od in aree industriali, dove la qualità dell'aria risulta determinata principalmente dalle fonti di emissione vicine.

Vengono qui presentati i primi risultati ottenuti dall'applicazione del modello all'area di studio. Al momento della stesura di questo lavoro non sono ancora disponibili tutti i dati di emissione richiesti dal modello; sono infatti in corso le attività di raccolta dati per la stima delle emissioni da traffico e da fonti civili. Le mappe di inquinamento prodotte sono relative alle emissioni in atmosfera dei due impianti di incenerimento rifiuti presenti nell'area.

Nella prosecuzione del lavoro, è previsto il completamento della valutazione delle pressioni in atto, includendovi le emissioni da fonti civili, traffico ed attività produttive.

Nell'area di studio, inoltre, sono previste alcune sostanziali modifiche alla situazione emissiva in atto; infatti, è prevista la costruzione di un nuovo centro commerciale, di uno scalo di interscambio merci e la realizzazione di una tangenziale. Pertanto l'applicazione del modello matematico potrà dare interessanti valutazioni sull'impatto ambientale che queste opere porteranno alla zona di interesse.

2 Introduzione

Il presente lavoro è un resoconto dell'attività svolta durante il periodo di stage presso la Struttura Tematica ARPA-Ingegneria Ambientale di Bologna.

Il campo di interesse del gruppo di lavoro di cui ho preso parte riguarda l'inquinamento atmosferico. Nello specifico, la mia attività è stata incentrata sull'applicazione di un modello di simulazione di dispersione di inquinanti in atmosfera, nell'ambito di uno studio territoriale-ambientale di un'area urbana-industriale del comune di Forlì.

L'inquinamento dell'aria è stato, negli ultimi anni, uno degli argomenti ambientali più discussi, in particolar modo dall'inizio degli anni 80, quando si è affermata una nuova conoscenza ecologica sulla materia.

Un primo importante e corretto approccio per valutare il problema consiste nell'individuare le possibili sorgenti di inquinamento, gli inquinanti prodotti, i meccanismi di produzione e trasformazione dei vari composti ed infine la loro diffusione nell'atmosfera alla quale concorrono in modo determinante le condizioni meteo-climatiche.

La valutazione della qualità dell'aria richiede che venga ricostruita la distribuzione spaziale degli inquinanti in tutte le zone ed agglomerati del territorio (mappe di inquinamento).

Le tecniche di modellazione sono uno strumento per la valutazione della qualità dell'aria e rappresentano uno strumento fondamentale per la realizzazione di piani e programmi di miglioramento e mantenimento della qualità dell'aria.

L'applicazione di modelli di dispersione e trasformazione chimica degli inquinanti permette di integrare i dati sperimentali con le conoscenze relative ai processi fisico - chimici (dispersione, trasporto, trasformazione chimica, rimozione e deposizione degli inquinanti primari o secondari), alla distribuzione delle sorgenti di emissione e alle caratteristiche orografiche e geometriche dell'area. La combinazione delle informazioni ottenute dall'esecuzione di misure sperimentali e dall'applicazione di modelli costituisce il metodo ottimale per la costruzione di mappe di inquinamento.

PARTE GENERALE

3 L'azienda

3.1 Il sistema di agenzie per la protezione dell'ambiente

La rete delle Agenzie è composta dall'Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i Servizi Tecnici (APAT) e da 22 Agenzie regionali (ARPA) e provinciali (APPA).

L'APAT, divenuta operativa a partire dal 6 ottobre 2002, svolge compiti ed attività prima attribuiti all'ANPA, al Dipartimento per i servizi tecnici nazionali e ai relativi servizi tecnici, agli Uffici di biblioteca e documentazione dell'Ufficio per il Sistema Informativo Unico (SIU), ad eccezione di quelle del servizio dighe, del Servizio sismico e dei rimanenti Uffici per il sistema informativo unico (SIU) dello stesso Dipartimento.

La rete delle Agenzie costituisce un esempio di sistema federativo che coniuga conoscenza diretta del territorio e dei problemi ambientali locali con le politiche nazionali di prevenzione e protezione dell'ambiente.

Il Sistema delle Agenzie Ambientali, unitamente ad una rete di altri soggetti, tra cui il Ministero dell'Ambiente, le Regioni, Istat e Unioncamere, alimentano la base informativa di SINAnet (Sistema Nazionale Conoscitivo e dei Controlli Ambientali).

Nel 1999, a seguito di un accordo tra ANPA e le Agenzie Ambientali Regionali e Provinciali, è nato l'Osservatorio Nazionale sull'Organizzazione e sulla gestione delle ARPA/APPA, strumento di ricerca e consulenza per le Agenzie Ambientali.

3.2 Struttura organizzativa di ARPA Emilia-Romagna

L'Agenzia regionale per la prevenzione e l'ambiente dell'Emilia-Romagna (Arpa) è operativa da maggio 1996.

I principali compiti attribuiti dalla legge istitutiva (L.R. n° 44 del 1995, e successive modifiche) sono relativi a monitoraggio delle diverse componenti ambientali, controllo e vigilanza del territorio e delle attività antropiche, attività di supporto nella valutazione dell'impatto ambientale di piani e progetti, realizzazione e gestione del Sistema informativo regionale sull'ambiente. Consistente è anche l'attività su progetto svolta da Arpa per conto di committenze locali: piani di risanamento, analisi territoriali complesse, studio e caratterizzazione di ecosistemi, ricerche su tematiche attinenti lo sviluppo della prevenzione ambientale nei cicli produttivi (Life Cycle Assessment, Best Available Technique, ecc.). Le attività dell'Agenzia sono rivolte sia a referenti istituzionali locali, regionali e nazionali, sia al mondo dell'economia ed a privati cittadini.

Arpa Emilia-Romagna presenta una struttura a rete distribuita sul territorio, costituita da "nodi" operativi autonomi (nove Sezioni provinciali e quattro Strutture tematiche), coordinati dalla Direzione generale dove operano nodi integratori e di supporto.

DIREZIONE GENERALE

Presidia gli obiettivi strategici e guida lo sviluppo complessivo dell'Agenzia, individuando le politiche gestionali appropriate ai processi di integrazione della rete organizzativa. Gestisce le politiche di bilancio e delle risorse umane, finalizzandole al costante miglioramento dei dati economici, allo sviluppo delle competenze, alla qualità dei servizi ed alla realizzazione di sinergie di rete. Il Direttore generale definisce le politiche di indirizzo e sviluppo dell'Agenzia coadiuvato dal Direttore tecnico e dal Direttore amministrativo.

SEZIONI PROVINCIALI

Assicurano il presidio del territorio di competenza per le attività di prevenzione dei rischi per l'ambiente e la salute e di crescita delle attività di conoscenza ed intervento sulle tematiche del rischio ambientale e del relativo controllo e monitoraggio.

Sono articolate in Direzione, servizi di staff e strutture operative: Dipartimento tecnico, Servizio territoriale, Servizio Sistemi ambientali.

Il Dipartimento tecnico, garantisce l'attività di laboratorio per l'analisi delle matrici ambientali, operando sia con riferimento alla "domanda esterna" (supporto alle Ausl, per funzioni di sanità pubblica, servizi diretti a privati e soggetti produttivi), sia ad integrazione delle attività del Servizio territoriale e del Servizio Sistemi ambientali.

Il Servizio territoriale, articolato in distretti subprovinciali, svolge funzioni di controllo e vigilanza sulle fonti di pressione ambientale e territoriale, sia attraverso interventi di ispezione, sia esprimendo pareri su insediamenti produttivi, civili e piani urbanistici. Gli sono assegnati anche compiti di polizia giudiziaria ed amministrativa.

Il Servizio Sistemi ambientali gestisce le reti di monitoraggio e sviluppa conoscenza ed analisi degli ecosistemi, con approcci progettuali integrati e di sistema, promovendo metodologie e modelli di lettura dei fenomeni causali tra fattori di pressione ed effetti incidenti sulle matrici ambientali e territoriali.

STRUTTURE TEMATICHE

Rispondono a propri stakeholder e clienti, perseguendo obiettivi convergenti con quelli strategici di rete. Collaborano inoltre con le Sezioni su iniziative specifiche.

Servizio Idrometeorologico. Fondato nel 1985, gestisce la raccolta e l'elaborazione dei dati meteorologici fornendo previsioni a breve ed a medio termine sul territorio regionale, con proiezioni orarie su area locale. Diffonde informazioni di interesse agrometeorologico. Svolge inoltre ricerche nei settori della meteoroclimatologia, dell'agrometeorologia e della meteorologia ambientale; garantisce la gestione unitaria della rete idro-meteo-pluviometrica, della rete informativa regionale sulla qualità dell'aria e fornisce supporto previsionale alla Protezione civile. Ha recentemente acquisito personale e compiti a livello regionale del Servizio Idrografico di Stato,

Struttura oceanografica Daphne. Nata come unità operativa nel 1977 rappresenta l'unità tematica per il monitoraggio marino-costiero. Opera con una motonave oceanografica attrezzata per il controllo e lo studio dei fenomeni evolutivi dell'ecosistema dell'Alto Adriatico. Obiettivo comune alle diverse attività della Struttura è la produzione di informazioni e conoscenze per la tutela delle risorse naturali marine, dello stato qualitativo delle acque, delle caratteristiche idonee allo sviluppo delle attività ittiche e, più in generale, per un equilibrato rapporto tra pressioni e sostenibilità dell'ambiente marino. Gestisce le attività inerenti il controllo integrato della zona costiera (GIZC) in connessione con le sezioni provinciali Arpa della costa.

Ingegneria ambientale. E' la struttura tematica dell'Agenzia che fornisce supporto agli Enti Locali nei settori della pianificazione ambientale, territoriale e di settore per l'attuazione di politiche di sviluppo sostenibile mediante progettazione complessa.

Rappresenta punto di riferimento ed eccellenza nell'engineering ambientale e nella cartografia territoriale ed è sede della sezione regionale del Catasto rifiuti.

Epidemiologia ambientale. Studia gli effetti dei fattori ambientali sulla salute umana e attiva programmi e iniziative per una effettiva integrazione tra tematiche e servizi della prevenzione ambientale e sanitaria. In questo ambito collabora con le sezioni provinciali e le altre strutture tematiche di ARPA e con enti ed istituzioni locali, nazionali ed internazionali per attività di studio, formazione, educazione e comunicazione (del rischio ambientale e sanitario).

ECCELLENZE

La rete dei centri di eccellenza si è sviluppata a partire dalla necessità di razionalizzare le competenze interne ad Arpa, con l'obiettivo di differenziare ed integrare le attività, in una logica tesa all'aumento dell'efficienza del sistema a rete. Per eccellenza si intende un alto livello di prestazioni nell'ambito della ricerca e sviluppo dei sistemi di prevenzione e controllo della qualità ambientale di specifici ecosistemi. Come tale ha una particolare vocazione ad offrire conoscenze e informazioni verso l'esterno di Arpa.

3.3 Arpa Emilia-Romagna Struttura Tematica Ingegneria Ambientale

E' la struttura tematica dell'Agenzia che fornisce supporto ai clienti istituzionali nei settori della programmazione, pianificazione ambientale e territoriale ed attuazione di politiche di sviluppo sostenibile mediante progettazione complessa.

Rappresenta pertanto punto di riferimento ed eccellenza nell'engineering ambientale e nella cartografia territoriale.

E' sede della sezione regionale del Catasto rifiuti.

Sviluppa le metodologie di analisi dei sistemi ambientali garantendo l'adeguata coerenza dei processi di progettazione e la qualità tecnico-scientifica dei risultati avvalendosi anche di contributi provenienti dal sistema a rete Arpa e da organismi titolati esterni.

Utilizza metodiche di elaborazione basate principalmente su informazioni georeferenziate provenienti dai sistemi informativi di rete, acquisizione ed analisi di dati, modellistica di simulazione.

L'attività di pianificazione si traduce quindi in valutazioni di carattere ambientale ed analisi economico-ambientali (valutazione costi-benefici) di supporto alle politiche degli Enti decisori.

La modalità di lavoro prevalente di Ingegneria Ambientale è l'attività su progetto, riferita in particolare alle 5 aree tematiche Ecosistemi idrici, Sistema Mare/Costa, Suolo/Rifiuti, VIA-VAS/ecosistemi naturali, Aria/Rumore.

Ogni area presidia le tematiche specifiche di seguito indicate e, sia attraverso l'analisi della domanda legata alle esigenze del mercato esterno e all'aggiornamento del quadro legislativo regionale e nazionale, sia attraverso il continuo sviluppo di processi di innovazione di metodiche e strumenti di analisi, orienta ed adegua il proprio settore di intervento per rispondere con competenze adeguate alle richieste dei clienti interni ed istituzionali.

Le competenze specialistiche presenti all'interno delle aree vengono utilizzate per rispondere alle esigenze di progetti che fanno capo anche alle altre aree di Ingegneria Ambientale e/o alla rete Arpa.

L'Area ECOSISTEMI IDRICI supporta le scelte dei clienti istituzionali mediante progetti riguardanti la matrice acque interne superficiali e sotterranee, affrontando gli aspetti quali-quantitativi e presidiando i tematismi di ingegneria, modellistica e pianificazione. Supporta la Regione nella gestione di alcuni flussi informativi verso il Ministero Ambiente.

L'Area SISTEMA MARE-COSTA svolge attività di studio, monitoraggio e analisi evolutiva del sistema ambientale litoraneo. In particolare predispone studi e progetti per la difesa delle spiagge dall'erosione e la protezione degli abitati e del territorio retrostante dalle ingressioni marine.

L'Area SUOLO - RIFIUTI svolge attività connesse alla matrice suolo con particolare riferimento alle problematiche legate alla subsidenza ed alla difesa del suolo. Gestisce la Rete Regionale di controllo della subsidenza e la banca dati ad essa collegata.

Per il settore rifiuti, come Sezione regionale del Catasto, raccoglie, organizza ed elabora i dati relativi ai rifiuti urbani e speciali, utili alla definizione del quadro conoscitivo a scala regionale, producendo report per la Regione e per APAT.

L'Area VIA, VAS, ECOSISTEMI NATURALI svolge attività che riguardano i processi di VIA, VAS e Valutazione di incidenza ambientale. Fornisce supporto per la redazione della VALSAT di numerosi piani in corso di predisposizione e per l'istruttoria tecnica nell'ambito delle procedure di valutazione ambientale dei progetti.

Elabora rapporti ambientali o modelli nei campi della valutazione ambientale e dell'ecologia del paesaggio.

L'Area ARIA - RUMORE supporta i clienti istituzionali mediante lo sviluppo di studi e progetti che interessano la tutela della qualità dell'aria e del clima acustico del territorio in particolare nell'ambito della predisposizione di piani di tutela e risanamento ambientale.

In collaborazione con la rete ARPA/eccellenza valutazione e gestione qualità dell'aria, svolge attività finalizzate a costituire gli inventari delle emissioni in atmosfera.

4 L'inquinamento atmosferico

4.1 L'atmosfera

L'atmosfera è una miscela di gas e materiale particellare che avvolge la Terra e ne preserva le condizioni adatte alla vita.

L'atmosfera è composta quasi interamente da molecole di ossigeno e di azoto. L'azoto biatomico rappresenta approssimativamente il 78% delle molecole totali dell'atmosfera, e l'ossigeno biatomico rappresenta circa il 21%. L'argon costituisce circa lo 0,9 per cento, e il rimanente 0,1 per cento è composto di tracce di molti gas. L'acqua, sotto forma di vapore e il biossido di carbonio rappresentano una piccolissima percentuale, ma la loro importanza è molto superiore alla limitata quantità percentuale.

Un altro importante gas presente in tracce è l'ossigeno triatomico, l'ozono, che è concentrato in uno strato a circa 25 km sopra la superficie. Benché presente in piccolissime concentrazioni, al massimo 12 parti per milioni, l'ozono funge da filtro ai raggi ultravioletti che così giungono in misura tollerabile sulla superficie del globo proteggendo in questo modo la vita sulla Terra.

COMPOSIZIONE DELL'ATMOSFERA AL SUOLO		
<i>Gas</i>	<i>Formula o simbolo</i>	<i>% in volume</i>
<i>Azoto</i>	<i>N₂</i>	<i>78,884</i>
<i>Ossigeno</i>	<i>O₂</i>	<i>20,947</i>
<i>Argon</i>	<i>Ar</i>	<i>0,934</i>
<i>Vapore acque</i>	<i>H₂O</i>	<i>0,33</i>
<i>Biossido do carbonio</i>	<i>CO₂</i>	<i>0,032</i>
<i>Neon</i>	<i>Ne</i>	<i>0,00181</i>
<i>Elio</i>	<i>He</i>	<i>0,0005</i>
<i>Metano</i>	<i>CH₄</i>	<i>0,0002</i>
<i>Idrogeno</i>	<i>H₂</i>	<i>0,00005</i>
<i>Kripton</i>	<i>Kr</i>	<i>0,000011</i>
<i>Xenon</i>	<i>Xe</i>	<i>0,000008</i>
<i>Ozono</i>	<i>O₃</i>	<i>0,000004</i>
<i>Ossidi di Azoto</i>	<i>NO_x</i>	<i>tracce</i>
<i>Monossido di carbonio</i>	<i>CO</i>	<i>tracce</i>
<i>Ammoniaca</i>	<i>NH₃</i>	<i>tracce</i>
<i>Biossido di zolfo</i>	<i>SO₂</i>	<i>tracce</i>
<i>Solfuro di idrogeno</i>	<i>H₂S</i>	<i>tracce</i>

figura 1. composizione dell'atmosfera

Solitamente l'atmosfera viene divisa in cinque strati caratterizzati da proprietà chimico-fisiche differenti: troposfera, stratosfera, mesosfera, termosfera ed esosfera. I vari strati sono separati da zone di transizione che prendono rispettivamente il nome di tropopausa, stratopausa, mesopausa. Le caratteristiche fisiche dell'atmosfera variano decisamente con la quota: se la quota aumenta diminuisce sia la densità sia la pressione, mentre la temperatura mostra andamenti diversi.

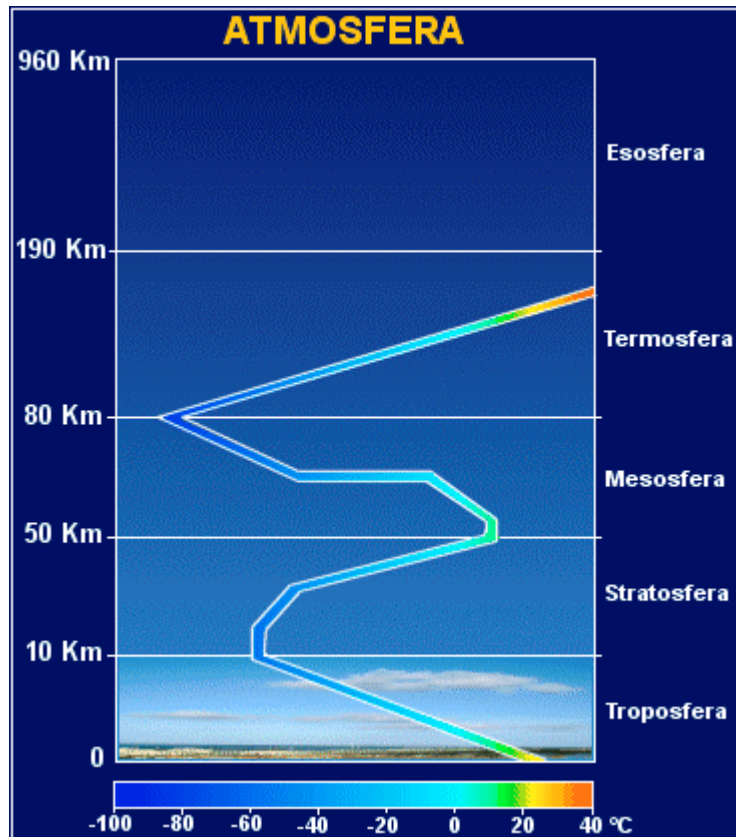


figura 2. profilo verticale della temperatura

TROPOSFERA

La troposfera è lo strato dell'atmosfera a diretto contatto con il pianeta e contiene l'80% di tutta la massa e il 99% di tutto il vapore acqueo presenti nell'atmosfera. Il vapore acqueo gioca un ruolo notevole nella regolazione della temperatura dell'aria perché assorbe l'energia solare e la radiazione termica dalla superficie del pianeta. La temperatura e la quantità di vapore acqueo decrescono rapidamente con l'altitudine.

Tutti i fenomeni atmosferici avvengono all'interno della troposfera, tuttavia le turbolenze possono estendersi fino alla porzione inferiore della stratosfera. Troposfera vuol dire "regione di mescolamento" ed è così chiamata a causa delle vigorose correnti d'aria convettive che si verificano al suo interno.

STRATOSFERA

La stratosfera si estende dai 10 ai 50 km sopra la superficie del pianeta. In questa fascia vi è uno strato di ozono, localizzato ad una altitudine compresa tra i 20 e i 30 km. Essa svolge un importante ruolo nella regolazione del regime termico. Infatti le molecole di ozono assorbono la radiazione solare ultravioletta di lunghezza d'onda compresa tra 290 nm e 320 nm, risultandone così un riscaldamento della stratosfera.

Approssimativamente il 90 % dell'ozono dell'atmosfera si trova nella stratosfera. La concentrazione di ozono in questa regione è circa 10 parti per milione in volume, mentre nella troposfera è approssimativamente 0,04 parti per milione.

MESOSFERA

La mesosfera si estende approssimativamente da 50 a 80 km, è caratterizzato dalla diminuzione della temperatura che raggiunge 190-180 gradi Kelvin all'altitudine di 80 km. In questa regione, le concentrazioni di ozono e vapore acqueo sono trascurabili, pertanto la temperatura è più bassa rispetto alla troposfera e alla stratosfera. Con l'aumentare della

distanza dalla superficie della Terra, la composizione chimica dell'aria diventa fortemente dipendente dall'altitudine e l'atmosfera si arricchisce di gas leggeri. A grandi altitudini, i gas residui cominciano a stratificarsi in base alla loro massa molecolare, sotto l'azione della forza gravitazionale.

TERMOSFERA

La temperatura nella termosfera generalmente aumenta con l'altitudine fino a 1200 gradi. Questo incremento della temperatura è dovuto all'assorbimento della intensa radiazione solare da parte delle rimanenti molecole di ossigeno. Ad una altitudine di 100-200 km, i principali componenti dell'atmosfera sono ancora azoto e ossigeno.

La termosfera e la porzione più esterna della mesosfera costituiscono la ionosfera. In questa zona i gas si trovano allo stato di ioni.

ESOSFERA

L'esosfera è la regione più distante dalla superficie della Terra. Il confine superiore dello strato è relativamente indefinito. L'esosfera è la zona di transizione tra l'atmosfera terrestre e lo spazio interplanetario. La termosfera e l'esosfera insieme costituiscono l'alta atmosfera. L'alta atmosfera contiene anche la magnetosfera.

Dalla parte del lato illuminato della Terra la magnetosfera arriva ad un'altezza di 64.000 km circa, mentre dalla parte opposta si estende a distanze considerevoli. All'interno della magnetosfera si trovano le fasce di Van Allen, che si interrompono in corrispondenza delle zone polari. La magnetosfera intercetta e devia le radiazioni ionizzanti che sarebbero dannose per gli esseri viventi.

4.2 Gli inquinanti atmosferici

Si parla di inquinamento atmosferico quando lo stato della qualità dell'aria subisce dei mutamenti, a causa dell'immissione nella stessa di sostanze di qualsiasi natura e in misura e condizioni tali da alterarne la salubrità e da costituire pregiudizio diretto o indiretto per la salute delle persone o danno dei beni pubblici e/o privati. L'inquinamento atmosferico, nella sua natura complessa, può essere definito in base all'origine dei fenomeni che lo determinano. Si possono quindi riscontrare cause naturali oppure cause antropiche.

Le cause di tipo naturale sono rilevabili in concomitanza di particolari condizioni meteorologiche che provocano il trasporto delle sabbie sahariane nei paesi europei oppure le esalazioni vulcaniche che riversano in atmosfera, oltre al vapor d'acqua, diversi gas tra i quali CO₂, HCl, H₂, H₂S, ecc. Un altro fenomeno, le scariche elettriche in atmosfera che hanno origine in concomitanza di temporali, provocano la reazione fra ossigeno e azoto dell'aria con formazione di ossidi di azoto e di ozono.

Le cause di tipo antropico sono le emissioni da attività produttive e da infrastrutture di servizio, quelle civili (riscaldamento) e quelle derivanti dal sistema dei trasporti (traffico veicolare, navale ed aereo).

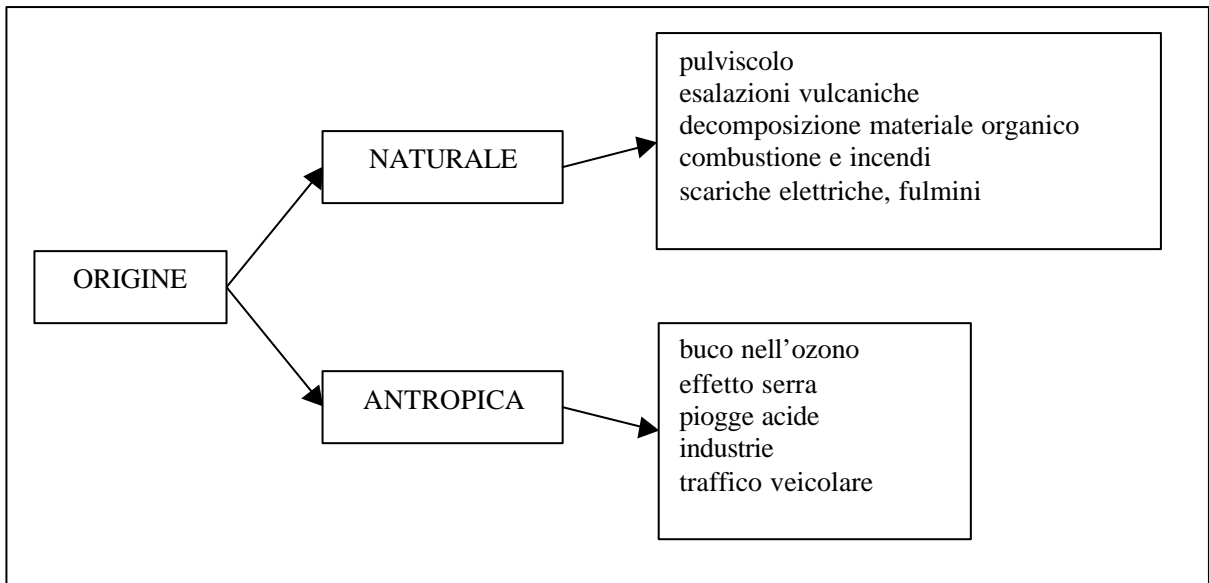


figura 3. origine inquinamento atmosferico

Per una valutazione della qualità dell'ambiente è fondamentale il controllo della qualità dell'aria e della sua influenza diretta ed indiretta sulla salute umana. L'uomo, infatti, è continuamente sottoposto all'azione di sostanze presenti nell'atmosfera che possono costituire anche un rischio per la salute.

L'aria, ma anche l'ambiente stesso modificato dall'inquinamento atmosferico (piogge acide, effetto serra,..), può provocare effetti biologici ancora più pericolosi mediante un processo di scambio diretto con gli organismi animali e vegetali (ad es. attraverso il contatto con la cute, le mucose, l'apparato respiratorio).

Ogni composto emesso in atmosfera, per effetto di reazioni fisiche, chimiche, biologiche (prodotte dalla respirazione delle piante e dei batteri) può essere trasformato, distrutto, disperso, accumulato e trasportato. Il tempo di permanenza in atmosfera di un inquinante varia da sostanza a sostanza ed è in funzione di fattori ambientali, meteorologici, climatici, geografici, ecc...

I principali meccanismi di rimozione degli inquinanti atmosferici sono: l'assorbimento in sistemi idrici, l'adsorbimento su solidi o nel terreno, il dilavamento dell'atmosfera a seguito delle piogge e le reazioni chimiche, anche se bisogna ricordare che queste ultime non sempre comportano una riduzione del potere inquinante di una certa sostanza, ma possono talvolta generare composti ancora più nocivi di quelli di partenza.

Una possibile classificazione degli inquinanti atmosferici, in base alla loro origine, li distingue in due categorie: inquinanti primari e inquinanti secondari.

4.2.1 Inquinanti primari

Vengono definiti primari gli inquinanti direttamente emessi dalle sorgenti.

I principali inquinanti primari sono quelli emessi dai processi di combustione di qualunque natura, ovvero gli idrocarburi incombusti, il monossido di carbonio, gli ossidi di azoto (principalmente sotto forma di monossido) ed il materiale particolato. Nel caso in cui i combustibili contengano zolfo, si ha inoltre anche emissione di anidride solforosa.

A seguito dell'emissione in atmosfera, gli inquinanti primari sono soggetti a processi di diffusione, trasporto e deposizione, nonché a processi di trasformazione chimico-fisica che possono portare alla formazione di nuove specie inquinanti, che spesso risultano più tossici e di più vasto raggio d'azione degli inquinanti originari.

La dispersione degli inquinanti in atmosfera, determinata dai fenomeni di diffusione turbolenta e di trasporto delle masse d'aria, come pure la loro rimozione, determinata dai processi di deposizione, sono strettamente dipendenti dal comportamento dinamico dei bassi strati dell'atmosfera. Ne consegue che per lo studio del comportamento degli inquinanti primari è necessario sia conoscere il profilo qualitativo, quantitativo e temporale delle emissioni, sia avere informazioni sui processi meteorologici che regolano il comportamento dinamico della bassa troposfera (classi di stabilità, direzione ed intensità del vento).

CO (Monossido di carbonio)	
Sorgenti	Il monossido di carbonio, CO, si forma durante la combustione delle sostanze organiche, quando questa è incompleta per difetto di ossigeno. La quantità maggiore di questa specie è prodotta dagli autoveicoli e dall'industria (impianti siderurgici e raffinerie di petrolio). Nettamente minore è l'emissione di CO dalle centrali termoelettriche e degli impianti di riscaldamento, perché la combustione è meglio controllata. Tra i motori degli autoveicoli, quelli a ciclo Diesel ne emettono in minima quantità, perché la combustione del gasolio avviene in eccesso di aria. Le emissioni naturali del monossido di carbonio comprendono l'ossidazione del metano e degli altri idrocarburi naturalmente emessi nell'atmosfera, l'emissione diretta dalle piante e l'attività microbica negli oceani. Le emissioni naturali ed antropogeniche di questa specie sono globalmente dello stesso ordine di grandezza.
Effetti sulla salute	Il monossido di carbonio è un gas incolore, inodore e fortemente tossico: esplica la sua azione sull'uomo formando con l'emoglobina un complesso irreversibile che inibisce il trasporto di ossigeno nel sangue, causando problemi al sistema respiratorio e, ad elevate concentrazioni, la morte per asfissia. L'affinità del CO per l'emoglobina è di oltre 200 volte superiore a quella dell'ossigeno: la carbossiemoglobina che si forma impedisce l'ossigenazione dei tessuti: i primi sintomi dell'avvelenamento sono cefalea e vertigine. Forti concentrazioni di CO in ambienti chiusi, provocate dal cattivo funzionamento di stufe e scaldabagni (generalmente per cattiva installazione o per otturazione dei camini) o dal funzionamento di motori, provocano la morte in breve tempo: 90 minuti in presenza di 1000 ppm di CO. Concentrazioni inferiori danno esito letale dopo alcune ore: ma il fatto che il monossido di carbonio sia inodore impedisce alle vittime, colpite inoltre da sonnolenza, di avvertire il pericolo e di aerare il locale. L'esposizione prolungata a concentrazioni di 50 ppm (valore che viene spesso superato nelle vie a forte traffico) è notevolmente dannosa. La quantità di CO emessa dagli scarichi degli autoveicoli è negli ultimi anni diminuita a causa della migliorata efficienza dei motori, del controllo delle emissioni autoveicolari e dell'utilizzo di marmitte catalitiche. Attualmente, la concentrazione atmosferica localizzata di questo inquinante risulta in genere in diminuzione.
Ruolo in Atmosfera	La concentrazione atmosferica di CO è di circa 120 ppb nella troposfera non inquinata e di 1-10 ppm nell'aria inquinata di aree intensamente urbanizzate. Il ruolo del monossido di carbonio nella chimica troposferica delle aree industrializzate è di trascurabile importanza, data la scarsa reattività di questa molecola. Il tempo

	medio di residenza del CO in atmosfera è di circa quattro mesi, e quindi il monossido di carbonio può essere utilizzato come tracciante dell'andamento temporale degli inquinanti primari al livello del suolo.
--	---

SO ₂ (Anidride solforosa)	
Sorgenti	L'emissione di anidride solforosa deriva dal riscaldamento domestico dai motori alimentati a gasolio, dagli impianti per la produzione di energia, ed in generale dalla combustione di carbone, gasolio ed oli combustibili contenenti piccole percentuali di zolfo, dalla produzione dell'acido solforico, dalla lavorazione di molte materie plastiche, dall'arrostimento delle piriti, dalla desolforazione dei gas naturali. L'emissione naturale di anidride solforosa proviene principalmente dai vulcani. Le emissioni naturali ed antropogeniche di questa specie sono all'incirca dello stesso ordine di grandezza.
Effetti sulla salute	L'anidride solforosa è un gas fortemente irritante e già a 3 ppm se ne apprezza l'odore pungente. Gli effetti nocivi conseguenti alla sua inalazione interessano le mucose delle prime vie respiratorie e può causare costrizione dei bronchi in soggetti predisposti, anche a concentrazioni dell'ordine delle centinaia di ppb.
Ruolo in Atmosfera	Per ossidazione radicalica, il biossido di zolfo forma acido solforico, ed è quindi coinvolto nei processi di acidificazione dell'atmosfera, che hanno effetti negativi sia sull'ecosistema che sui monumenti e manufatti umani. Negli ultimi anni, in seguito agli interventi operati sulla qualità dei combustibili, l'emissione di biossido di zolfo nelle aree urbane è stata drasticamente ridotta, e quindi la sua importanza come inquinante è notevolmente diminuita. I livelli tipici di concentrazione attualmente non superano le poche decine di ppb.

NO (Monossido di azoto)	
Sorgenti	Gli ossidi di azoto, monossido (NO) e biossido (NO ₂), che, essendo presenti contemporaneamente nell'aria, sono comunemente indicati come NO _x e si formano da tutti i processi di combustione che avvengono ad alta temperatura. Il monossido di azoto si forma per reazione dell'ossigeno con l'azoto, nel corso di qualsiasi processo di combustione che avvenga in aria e ad elevata temperatura (T>2000°C); l'ulteriore ossidazione del monossido di azoto produce anche tracce di biossido di azoto, che in genere non supera il 5% degli NO _x totali emessi. Le emissioni naturali di NO comprendono i fulmini, gli incendi e le emissioni vulcaniche e dal suolo. Le emissioni antropogeniche sono principalmente dovute ai trasporti, all'uso di combustibili per la produzione di elettricità e di calore ed, in misura minore, alle attività industriali. Forti quantità sono prodotte dai motori delle automobili, dagli impianti termici e dalle industrie che producono composti azotati. Si calcola che in Italia siano immessi nell'aria, a opera dell'uomo, 1.9 milioni di tonnellate l'anno di ossidi di azoto, metà dei quali prodotti dagli autoveicoli. Negli ultimi anni le emissioni antropogeniche di ossidi

	di azoto sono aumentate notevolmente e questa è la causa principale dell'incremento della concentrazione atmosferica delle specie ossidanti. Su scala globale, le emissioni naturali ed antropogeniche di NO _x sono dello stesso ordine di grandezza.
Effetti sulla salute	Il monossido di azoto non è causa di danni diretti all'uomo e all'ambiente in generale.
Ruolo in Atmosfera	La concentrazione atmosferica del monossido di azoto è di 10-50 ppt nella troposfera non inquinata e di 50-750 ppb nell'aria inquinata. L'importanza del ruolo del monossido d'azoto in atmosfera è legata alla reazione di ossidazione che produce biossido d'azoto (NO ₂), intermedio fondamentale nei processi di inquinamento secondario ed in particolare di smog fotochimico.

COV - C ₆ H ₆ (Benzene)	
Sorgenti	<p>Per composti organici volatili (COV) si intende un insieme di classi di specie di natura organica caratterizzate da basse pressioni di vapore a temperatura ambiente che si trovano quindi in atmosfera principalmente in fase gassosa. Il numero dei composti organici volatili osservati in atmosfera, sia in aree urbane sia remote, è estremamente alto e comprende oltre agli idrocarburi (composti contenenti soltanto carbonio e ossigeno) anche specie ossigenate quali chetoni, aldeidi, alcoli, acidi ed esteri.</p> <p>Le emissioni naturali dei COV comprendono l'emissione diretta dalla vegetazione e la degradazione del materiale organico; le emissioni antropogeniche sono principalmente dovute alla combustione incompleta degli idrocarburi, all'evaporazione di solventi e carburanti, e alle industrie di trasformazione. Su scala globale, le emissioni naturali ed antropogeniche dei COV sono dello stesso ordine di grandezza. L'emissione di benzene nell'atmosfera è principalmente dovuta ai processi combustivi per la produzione di energia (inclusi i veicoli a motore) e per il riscaldamento domestico. Il benzene, prodotto commercialmente da petrolio, gas naturale e carbone, viene utilizzato come solvente e come intermedio nella produzione di composti chimici; tuttavia, da quando è stata riconosciuta la sua potenziale cancerogenicità, l'utilizzo di questa specie è stato notevolmente ridotto.</p>
Effetti sulla salute	Per gli effetti diretti sulla salute umana, particolare attenzione viene rivolta ai composti organici aromatici, che rientrano nella classe dei COV; tra gli aromatici volatili, la specie di maggiore interesse per l'inquinamento urbano è il benzene, relativamente stabile (tempo di vita medio di circa quattro giorni) e dotato di accertate proprietà cancerogene.
Ruolo in Atmosfera	Il principale ruolo atmosferico dei composti organici volatili è connesso alla formazione di inquinanti secondari. In particolare, di maggiore interesse in campo atmosferico, a causa del loro importante ruolo nella formazione di specie ossidanti, è la classe degli alcheni, fra cui l'isoprene e i monoterpeni, composti particolarmente reattivi emessi naturalmente dalle piante. Il benzene è invece una molecola stabile e relativamente inerte e non

	ha un ruolo significativo nei processi di inquinamento secondario. Proprio per la sua stabilità e per la prevalente antropicità delle sue sorgenti questa specie può essere utilizzata come tracciante dell'andamento temporale degli inquinanti primari al livello del suolo. La concentrazione di benzene nelle aree urbane varia fra le poche unità e le poche decine di ppb.
--	--

IPA: C ₂₀ H ₁₂ (Benzo(a)pirene)	
Sorgenti	Gli idrocarburi policiclici aromatici (IPA) sono composti organici la cui struttura è caratterizzata dalla fusione di due o più anelli aromatici. Gli idrocarburi policiclici aromatici possono derivare da sorgenti naturali (alghe, microrganismi, piante, incendi) ma la principale sorgente atmosferica è di origine antropica ed è la combustione incompleta degli idrocarburi. Nelle aree urbane la fonte principale di idrocarburi policiclici aromatici è rappresentata dagli scarichi autoveicolari.
Effetti sulla salute	Gli idrocarburi policiclici aromatici si sono rivelati potenti cancerogeni, favorendo tra l'altro l'insorgere di tumori polmonari. Inoltre, assieme all'ossido di carbonio e al piombo tetraetile, gli idrocarburi, concorrono, a livello cellulare, al blocco enzimatico della catena respiratoria. In particolare il benzopirene, è dotato di forte azione cancerogena, soprattutto sulla cute e sulle strutture dell'apparato respiratorio. Gli IPA sono stati i primi inquinanti atmosferici classificati come cancerogeni e tra questi, quelli costituiti da quattro o più anelli aromatici sono ritenuti i più pericolosi. La legislazione italiana prescrive che nelle principali aree urbane siano determinate la concentrazione delle "polveri respirabili" (particelle con diametro aerodinamico inferiore a 10 µm) e la concentrazione in aria del solo Benz(a)Pirene (BaPy), che è il più potente cancerogeno tra gli idrocarburi policiclici aromatici non sostituiti, quantunque le specie appartenenti alla classe degli IPA classificate come possibili cancerogeni siano ben sette.
Ruolo in Atmosfera	Data la stabilità della loro struttura, gli idrocarburi policiclici aromatici risultano piuttosto inerti. In atmosfera questi composti si trovano principalmente nel materiale particolato: benché essi vengano emessi in fase vapore, infatti, a causa della loro bassa tensione di vapore, condensano rapidamente e si adsorbono sulle particelle carboniose.

ALTRI INQUINANTI PRIMARI

- Il solfuro di idrogeno, H₂S, dovuto ai processi di desolforazione dei petroli in genere e delle benzine in particolare e dei gas naturali.
- Tiofene e mercaptani emessi da raffinerie e cokerie, facilmente individuabili a causa del loro sgradevole odore.
- Il piombo, in varie forme volatili, diffuso dai gas di scarico degli autoveicoli alimentati con benzine etilate, contenenti cioè piombo tetraetile come additivo antidetonante;

- Acidi inorganici e organici (solforico, cloridrico, fluoridrico, bromidrico, acetico, fumarico, tannico, ecc.) liberati nelle combustioni o in cicli industriali diversi.
- Prodotti radioattivi artificiali dovuti, oltre che alle esplosioni atomiche, a lavorazione di sostanze radioattive per l'utilizzazione pacifica dell'energia nucleare, all'impiego di nuclidi radioattivi nella ricerca scientifica, nell'industria, in campo medico e in agricoltura;
- Cloro, acido cloridrico e microinquinanti organoclorurati liberati dalla decomposizione di materie plastiche clorurate per incenerimento.

4.2.2 Inquinanti secondari

Vengono definiti inquinanti secondari quelle specie inquinanti che si formano a seguito di trasformazioni chimico-fisiche degli inquinanti primari, ovvero delle specie chimiche direttamente emesse in atmosfera dalle sorgenti.

Fra i processi di formazione di 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, con formazione di perossiacetilnitrato (PAN), formaldeide, acido nitrico, nitrati e nitroderivati in fase particellare, e centinaia di altre specie chimiche minori. L'insieme dei prodotti di queste reazioni viene definito come smog fotochimico, che 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 dimensioni non trascurabili.

O ₃ (Ozono)	
	<p>La quasi totalità della riserva planetaria di ozono si trova localizzata fra i 15 e i 50 Km di altezza, in una zona chiamata stratosfera, e in particolare nella fascia compresa fra i 20 e i 30 Km, detta appunto ozonosfera. La quantità di ozono presente nella stratosfera viene mantenuta costante mediante un equilibrio dinamico fra la reazione di formazione e quella di fotolisi. La formazione predomina ad un'altitudine superiore ai 30 Km, dove la radiazione UV avente lunghezza d'onda inferiore ai 242 nm dissocia l'ossigeno molecolare, largamente presente, in ossigeno atomico; questo si combina rapidamente con un'altra molecola di ossigeno a formare la molecola triatomica dell'ozono. L'effetto netto della reazione è la conversione di tre molecole di ossigeno in due molecole di ozono. Le molecole di ozono formate assorbono a loro volta la radiazione solare di lunghezza d'onda compresa fra 240 e 320 nm, subendo fotolisi e dando luogo ad una molecola ed un atomo di ossigeno. Questo assorbimento della radiazione solare ha l'importantissimo effetto di schermare la terra da più del 90% delle radiazioni UV dannose per la vita sul nostro pianeta.</p> <p>Nella troposfera, ed in particolare in vicinanza del suolo, le radiazioni ultraviolette ad elevata energia necessarie per la formazione di ozono dalla fotolisi dell'ossigeno sono quasi totalmente schermate, e quindi questo meccanismo di formazione</p>

	<p>non è attivo. I livelli troposferici naturali di ozono sarebbero dunque molto bassi e legati al minimo scambio esistente fra la stratosfera e la troposfera e all'attività fotochimica associata ai processi emissivi naturali. In condizioni naturali, cioè, l'ozono sarebbe quasi del tutto confinato in una zona non a diretto contatto con la vita.</p> <p>L'alterazione dell'equilibrio naturale avvenuta nel corso degli ultimi decenni ha provocato l'attivazione di fenomeni fotochimici di notevole entità in prossimità del suolo, con produzione di quantità rimarchevoli di ozono; la concentrazione di fondo di O₃ è infatti più che raddoppiata nell'ultimo secolo e, nelle aree urbanizzate ed industrializzate è aumentata dell'1-2% annuo nel corso dell'ultimo decennio. In particolare, in condizioni di smog fotochimico i livelli di ozono possono raggiungere concentrazioni molto elevate (150-200 ppb) e quindi questa specie deve essere considerata non solo un inquinante della troposfera, ma anche un pericolo per la salute e per l'ambiente.</p>
Sorgenti	<p>L'ozono, è uno degli inquinanti secondari dell'atmosfera che hanno origine dagli inquinanti primari per effetto di complesse reazioni fotochimiche causate dalla radiazione solare. Nella troposfera la sorgente principale di ozono è rappresentata dall'ossigeno atomico messo a disposizione dalla fotolisi del biossido d'azoto:</p> $\text{NO}_2 + h\nu \rightarrow \text{NO} + \text{O}$ $\text{O} + \text{O}_2 \rightarrow \text{O}_3$ <p>I processi che determinano la produzione di biossido d'azoto, e quindi di ozono, vanno sotto il nome di processi radicalici fotochimici, nell'ambito dei quali l'ozono rappresenta la specie fotochimica più importante. L'ozono viene rimosso per fotolisi e per reazione con composti organici volatili e con ossidi di azoto.</p>
Effetti sulla salute e sull'ecosistema	<p>Lo smog fotochimico, oltre a effetti irritanti e tossici sull'uomo (occhi e vie respiratorie) provoca danni particolarmente gravi alla vegetazione. La concentrazione dell'ozono nell'atmosfera è rilevata come indice della presenza di smog fotochimico: l'OMS ha stabilito un massimo di 0,1 ppm. La concentrazione di ozono di origine naturale varia tra 0,01 e 0,04 ppm; in alcune città della California sono state raggiunte punte di 0,9 ppm, mentre nelle grandi città italiane difficilmente sono stati superati gli 0,3 ppm. Gli effetti irritanti dell'ozono (bruciore agli occhi e irritazione alla gola) si manifestano già alla concentrazione di 0,1 ppm. Gli effetti biologici nocivi dell'ozono sono legati alle sue proprietà ossidanti. Per quanto riguarda la salute umana, l'ozono in concentrazione superiore agli 80 ppb ha effetti acuti sui polmoni, le cavità nasali e la gola (ma i soggetti sensibili, ad es. gli asmatici, risentono degli effetti dell'ozono anche a concentrazioni più basse). Per quanto riguarda la vegetazione, l'effetto ossidante della molecola si esplica nell'inibizione della fotosintesi e del trasporto delle sostanze nutrienti dalle radici alle foglie e nell'accelerazione dell'invecchiamento. L'ozono provoca inoltre danni ai materiali ed ai monumenti, causando un depauperamento del patrimonio culturale ed artistico, nonché ingenti perdite economiche. Tra gli</p>

	effetti dell'ozono troposferico sull'ecosistema bisogna anche annoverare il suo contributo all'effetto serra, dovuto alla capacità di questa molecola di assorbire nell'infrarosso (l'effetto di una molecola di ozono è pari a circa 2000 volte quello di una molecola di anidride carbonica).
Ruolo in Atmosfera	Oltre ad essere un prodotto dell'inquinamento fotochimico, l'ozono è anche un precursore di radicali OH, e quindi un iniziatore di processi fotochimici: $O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$ $O + H_2O \rightarrow 2OH$ Il ruolo di questa specie nei processi di inquinamento fotochimico ossidativo è quindi di primaria importanza. La concentrazione di ozono in atmosfere inquinate può variare da qualche ppb a 200-250 ppb. La concentrazione di fondo di questo inquinante varia invece, alle nostre latitudini, fra i 30 ed i 70 ppb, a seconda del periodo dell'anno.

NO ₂ (Biossido di azoto)	
Sorgenti	Il biossido d'azoto (NO ₂) emesso direttamente nei processi di combustione costituisce non più del 5% degli ossidi di azoto totali. La presenza in atmosfera di quantità elevate di biossido di azoto è dovuta alla rapida ossidazione del monossido d'azoto da parte di ossidanti quali l'ozono e i radicali perossido generati durante i processi di ossidazione dei composti organici volatili.
Effetti sulla salute e sull'ecosistema	Concentrazioni atmosferiche elevate di biossido di azoto possono causare all'uomo irritazione delle vie respiratorie e diminuzione delle funzioni polmonari. Sono stati anche ipotizzati effetti negativi sulla crescita delle piante. Il colore giallo-bruno di questa molecola causa inoltre riduzione della visibilità.
Ruolo in Atmosfera	Il biossido d'azoto gioca un ruolo centrale nei fenomeni di inquinamento fotochimico in quanto è l'intermedio fondamentale per la produzione di ozono, acido nitrico, perossiacetilnitrate, acido nitroso e di tutta una serie di nitrocomposti tra cui gli idrocarburi policiclici aromatici nitrati. La concentrazione atmosferica di biossido di azoto varia tra alcune decine e circa 200 ppb.

CH ₃ (CO)-O-ONO ₂ (PerossiacetilNitrate)	
Sorgenti	Il perossiacetilnitrate (PAN) è un nitrocomposto organico che si forma in atmosfera in periodi di intensa attività ossidativa. Il perossiacetilnitrate si forma dalla reazione tra biossido di azoto e radicale perossiacetile, derivante a sua volta dall'ossidazione fotochimica di idrocarburi, aldeidi e chetoni, ovvero a partire da specie che a loro volta sono inquinanti secondari. La reazione di dissociazione del PAN a riformare NO ₂ e radicale perossiacetile è fortemente dipendente dalla temperatura: ad esempio, il suo tempo di vita medio, che alla temperatura di 27°C è di circa 30 minuti, sale a circa tre giorni alla temperatura di 17°C.
Effetti sulla salute e sull'ecosistema	L'effetto del PAN sulla salute umana consiste essenzialmente nell'irritazione degli occhi; questa specie è inoltre responsabile di effetti fitotossici. Il perossiacetilnitrate è responsabile del blocco enzimatico della fotosintesi e insieme all'ozono, esaltando la

	respirazione dei vegetali, provoca un abnorme depauperamento delle loro sostanze nutritive.
Ruolo in Atmosfera	A causa della sua via di formazione esclusivamente fotochimica, è possibile osservare concentrazioni atmosferiche elevate di PAN se e solo se sono attivi ed intensi in atmosfera i processi ossidativi. Per questa ragione il PAN viene considerato come un efficace indicatore di attività fotochimica. Il suo ridotto tempo di vita medio lo rende inoltre un utile indicatore di fenomeni di trasporto a breve distanza.

HNO₃ (Acido Nitrico)	
Sorgenti	La principale sorgente dell'acido nitrico in atmosfera è la reazione del biossido d'azoto con i radicali ossidrilici (OH) durante gli eventi di smog fotochimico.
Effetti sull'Ecosistema	Gli effetti diretti dell'acido nitrico sono legati al carattere fortemente acido della molecola. La molecola di acido nitrico è molto stabile ma in atmosfera viene velocemente rimossa sia per reazione con ammoniaca (con formazione di particelle di nitrato d'ammonio, che causano diminuzione della visibilità) che per deposizione diretta sulle superfici e adsorbimento sulle gocce d'acqua; mediante quest'ultima via l'acido nitrico contribuisce ai processi di deposizione acida.
Ruolo in Atmosfera	L'acido nitrico rappresenta uno dei composti terminali della catena fotochimica, nonché una importante via di rimozione del biossido di azoto. La presenza di acido nitrico in atmosfera costituisce un indice di attività fotochimica. La concentrazione atmosferica dell'acido nitrico varia da poche unità a 20-30 ppb.

HNO₂ (Acido Nitroso)	
Sorgenti	L'acido nitroso ha origine principalmente dalla reazione tra biossido d'azoto e acqua, che ha carattere eterogeneo (avviene sulle superfici).
Effetti sulla salute	Gli effetti sulla salute dell'acido nitroso sono attualmente poco noti; sembra accertato che l'acido nitroso sia uno dei precursori delle nitrosoammine cancerogene ed abbia effetti mutagenici.
Ruolo in Atmosfera	L'acido nitroso è un composto chiave per il realizzarsi di fenomeni di smog fotochimico, in quanto la sua fotolisi costituisce la principale sorgente di radicali ossidrilici (OH) in periodi di bassa intensità della radiazione solare (prime ore del mattino, periodi invernali), ovvero nei periodi nei quali la fotolisi delle altre specie che danno luogo a radicali OH (ozono e formaldeide) è ancora scarsamente efficace. La concentrazione atmosferica dell'acido nitroso varia da poche unità a 10-20 ppb.

HCHO (Formaldeide)	
Sorgenti	Le sorgenti atmosferiche di formaldeide, composto organico ossigenato volatile, sono costituite principalmente dall'ossidazione degli idrocarburi. Nelle aree urbane, ed in particolare nelle aree mediterranee, dove l'attività ossidativa dell'atmosfera è intensa, si riscontrano concentrazioni elevate di formaldeide che sono essenzialmente da attribuire a processi fotochimici.

Effetti sulla salute	La formaldeide è stata recentemente indicata come potenziale composto mutagenico.
Ruolo in Atmosfera	La formaldeide in presenza di radiazione UV si dissocia a formare radicali OH, che innescano la catena fotochimica. Insieme all'ozono e all'acido nitroso la formaldeide è quindi un precursore dello smog fotochimico, oltre ad essere un prodotto di tali processi. La concentrazione atmosferica della formaldeide varia da poche unità a qualche decina di ppb.

Composti inorganici in fase particellare: NO ₃ ⁻ (Nitrati)	
Sorgenti	In condizioni di inquinamento fotochimico si osserva in atmosfera la formazione di un gran numero di particelle di dimensioni tali da determinare una forte riduzione della visibilità (per questo motivo i processi fotochimici vengono spesso indicati come "smog"). In condizioni di smog fotochimico, le specie inorganiche più abbondanti in fase particellare sono i nitrati, formati a partire dall'acido nitrico (uno dei prodotti terminali della catena ossidativa) sia per reazione veloce con l'ammoniaca (formazione di nitrato d'ammonio) che per deposizione sul materiale particellare.
Effetti sulla salute	Concentrazioni elevate di composti inorganici in fase particellare possono causare all'uomo irritazione delle vie respiratorie.
Ruolo in Atmosfera	I nitrati in fase particellare rappresentano uno dei composti terminali della catena fotochimica, nonché una delle specie coinvolte nei processi di deposizione acida.

Nitro-IPA: C ₁₆ H ₉ NO ₂ (2-Nitrofluorantene)	
Sorgenti	Gli idrocarburi policiclici aromatici nitrati (Nitro-IPA) sono composti organici caratterizzati dalla presenza di uno o più gruppi nitro (NO ₂) che sostituiscono gli idrogeni presenti nelle strutture degli idrocarburi policiclici aromatici. Le sorgenti atmosferiche dei Nitro-IPA sono le reazioni di combustione in presenza di ossidi di azoto e le reazioni radicaliche tra gli IPA e gli agenti nitranti prodotti durante i fenomeni di smog fotochimico.
Effetti sull'Ecosistema	I Nitro-IPA sono da tempo oggetto di studio per il loro impatto sulla salute dell'uomo. Fra i Nitro-IPA uno dei composti dotati di maggior potere mutageno è il 2-Nitrofluorantene, che si forma essenzialmente durante gli eventi di smog fotochimico.
Ruolo in Atmosfera	La presenza in atmosfera dei Nitro-IPA costituisce un indice dei fenomeni di inquinamento fotochimico.

4.3 Diffusione degli inquinanti

CONDIZIONI METEOROLOGICHE

La concentrazione degli inquinanti nell'atmosfera è determinata non solo dal numero e dall'intensità delle sorgenti di inquinamento, dalla distanza da tali sorgenti e dalle trasformazioni chimico-fisiche cui vengono sottoposti, ma soprattutto dalle condizioni meteorologiche locali e a grande scala, che spesso costituiscono il parametro chiave per la comprensione della genesi, dell'entità e dello sviluppo nel tempo di un evento di inquinamento atmosferico.

Per i fenomeni di inquinamento a scala locale l'influenza maggiore sul trasporto e la diffusione atmosferica degli inquinanti è dovuta all'intensità del vento, alle condizioni di turbolenza (meccanica e termodinamica) dei bassi strati atmosferici ed ad effetti meteorologici particolari quali le brezze (di mare o di monte), all'incanalamento del vento in valli strette, o nelle strade delle zone urbane, ecc. Per i fenomeni di inquinamento a grande scala, l'influenza maggiore sul trasporto e sulla diffusione degli inquinanti è dovuta alle variazioni del vento con la quota (*shear* del vento) e alla turbolenza determinata dalle aree cicloniche e anticicloniche.

In genere, a parità di emissione di inquinanti dalle sorgenti, le concentrazioni in aria a piccola scala (zone urbane, zone industriali, ecc.) sono minori quando il vento è moderato o forte e l'atmosfera è instabile nei bassi strati, oppure quando il vento è debole o assente ma vi è forte insolazione con cielo sereno e sole alto sull'orizzonte. Viceversa, le concentrazioni diventano elevate quando vi è inversione del gradiente termico verticale o in condizioni di alta pressione di notte e con vento debole, oppure in condizioni di nebbia persistente che provoca processi di accumulo. La nebbia assorbe le particelle pulviscolari e solubilizza molti inquinanti; in presenza di basse temperature rende più duratura la vita dei microrganismi inquinanti; stabilisce un più intimo contatto fra l'organismo umano e l'ambiente diminuendo le difese del primo agli attacchi del secondo; e costituisce un filtro impenetrabile ai raggi ultravioletti. Al contrario le piogge favoriscono la diminuzione delle concentrazioni degli inquinanti che determinano l'inquinamento.

INVERSIONE TERMICA

Nei 10 km inferiori dell'atmosfera (troposfera) la temperatura dell'aria generalmente decresce con l'altezza di circa 7 °C per Km; le masse d'aria più calde, vicine alla superficie terrestre, a causa della loro minore densità tendono a salire verso l'alto e vengono sostituite da masse d'aria più fredde provenienti dall'alto. La conseguenza di questo processo è il rimescolamento degli strati inferiori della troposfera.

In alcuni casi, tuttavia, la temperatura dell'aria ad una certa altezza e per alcune decine o centinaia di metri, può avere un andamento crescente con l'altitudine, per poi cominciare a decrescere di nuovo. Questa zona, nota come strato di inversione, agisce come un ostacolo sugli strati inferiori di aria più freddi che, a causa della loro maggiore densità, non possono attraversarla. In queste condizioni, gli inquinanti prodotti al suolo non vengono rapidamente miscelati con l'intera troposfera, ma restano confinati nel volume di aria al di sotto dello strato di inversione, con conseguente aumento della loro concentrazione.

Gli elementi che caratterizzano un'inversione sono: la dimensione geometrica (spessore), la posizione nello spazio e l'intensità del gradiente di temperatura. Lo spessore dell'inversione è definito dalla distanza verticale che intercorre fra la base e la sommità dell'inversione (per base e sommità si intende il luogo dei punti in cui la temperatura comincia, rispettivamente, ad aumentare e a diminuire con l'altezza). Per quanto riguarda la posizione nello spazio, l'inversione termica può essere al suolo, se la base coincide con la superficie terrestre, o in quota se la base è posizionata ad una certa altezza dal suolo (vedi Figura 3). Questi due casi possono verificarsi su terreni liberi da costruzioni: negli agglomerati urbani infatti le inversioni solo raramente possono avere inizio dal suolo a causa del fenomeno della cosiddetta "isola di calore urbana". Questo determina nei primi strati un continuo mescolamento, ragione per cui la base dell'inversione viene ad essere spostata al di sopra dei tetti. Tale situazione porta all'accumulo degli inquinanti e ad una loro diffusione in area urbana in quanto i gas emessi al di sotto dell'inversione (soprattutto scarichi domestici e degli autoveicoli) rimangono "intrappolati" dalla base dell'inversione stessa.

L'inversione termica è un fenomeno tipico soprattutto dei mesi autunnali ed invernali, nei quali condizioni di cielo sereno e di alta pressione favoriscono l'irradiazione notturna. Lo

strato d'aria a contatto del suolo si raffredda fortemente; mentre a terra si forma un cuscinetto d'aria fredda pesante, spesso con formazione di nebbia, al di sopra si trova aria calda più leggera. Tale stratificazione è sorprendentemente stabile (può durare anche alcune decine di ore) e impedisce qualsiasi circolazione verticale dell'aria fredda più in basso e quindi la dispersione degli inquinanti immessi in questi strati dell'atmosfera.

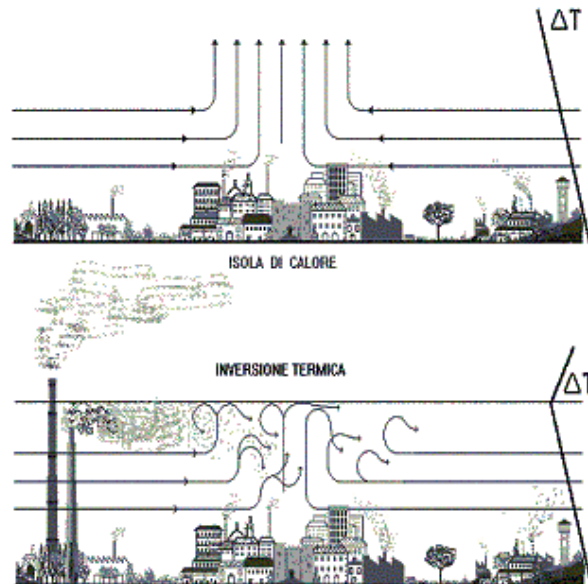


figura 4. inversione termica in un centro urbano

Naturalmente il verificarsi del fenomeno di inversione termica può non essere sufficiente a provocare episodi critici. Il vento gioca un ruolo fondamentale, e quando è debole può consentire aumenti delle concentrazioni. La temperatura è a sua volta importante, in quanto le emissioni da traffico e da impianti di riscaldamento sono più elevate quando l'aria è più fredda (moltissimi impianti possiedono una regolazione automatica in relazione alla temperatura interna o esterna).

Un primo tipo di inversione termica che è spesso causa di eventi di inquinamento nei siti urbani è l'inversione di tipo radiativo. L'inversione radiativa è generata dal rapido raffreddamento sia della superficie terrestre che dello strato di aria immediatamente al di sopra di questa, dovuto all'emissione di radiazione infrarossa subito dopo il tramonto. Durante le notti limpide, in condizione di alta pressione, questo raffreddamento può essere così rapido che lo strato d'aria adiacente alla superficie terrestre diviene più freddo dello strato immediatamente superiore, con formazione di uno strato di inversione in genere a quote piuttosto basse (50 metri). Questa condizione persiste fino a che il riscaldamento mattutino della superficie e dell'aria al di sopra di essa risulta sufficiente a "rompere" lo strato di inversione.

Un altro tipo di inversione termica è quella generata dalla brezza di mare, ovvero dallo spostamento orizzontale delle masse d'aria che si trovano al di sopra di una superficie più calda, quale il mare nelle ore notturne, verso una massa d'aria o una superficie più fredda, quale la terra. Questo tipo di inversione ha in genere un'altezza maggiore di quella di tipo radiativo (poche centinaia di metri) e la sua intensità e persistenza è spesso la causa dell'insorgere nell'area romana di fenomeni di inquinamento fotochimico di notevole intensità. L'inversione ha termine quando il riscaldamento mattutino della superficie terrestre è sufficientemente intenso per generare una efficace spinta verso l'alto delle masse d'aria sovrastanti; in caso contrario, l'inversione può persistere in quota anche per diversi giorni, innescando un fenomeno di smog fotochimico, che si prolunga, con intensità crescente, per più giorni consecutivi (multi-day smog episode).

Altri parametri meteorologici che rivestono un'importanza notevole per i fenomeni di inquinamento urbano sono i campi di vento, che favoriscono il trasporto orizzontale degli inquinanti, e la temperatura ed intensità della radiazione solare, che hanno una importanza fondamentale nella genesi degli episodi di inquinamento fotochimico.

GLI EFFETTI SUL CLIMA

L'aumento del tenore di anidride carbonica, CO₂, nella troposfera, in conseguenza dell'incremento del consumo di combustibili e del disboscamento attuato per far posto a nuovi spazi agricoli, non è insignificante, essendo passato, nell'arco di un secolo, da 290 a 320 ppm (parti per milione) e prevedendosi per il 2005 valori tra 375 e 400 ppm.

Dato che è soprattutto la presenza, seppur nel complesso modesta, di anidride carbonica e di vapore acqueo nella troposfera che, trattenendo la maggior parte del flusso di energia termica irradiata dal suolo in conseguenza del fenomeno noto come effetto serra, regola la temperatura del globo, una variazione sensibile della percentuale di anidride carbonica non può non avere ripercussioni climatiche: infatti, da più parti si è messo in relazione l'aumento dell'anidride carbonica nell'atmosfera con l'aumento della temperatura media mondiale accertato durante i cento anni precedenti il 1940. Da allora però, nonostante l'anidride carbonica continui a essere immessa nell'atmosfera in quantità sempre maggiori, la temperatura media mondiale ha mostrato una leggera diminuzione che è interpretata come conseguenza dell'aumentato potere riflettente, o albedo, della Terra, dovuto all'intensificarsi dell'intorbidamento atmosferico da parte dei fumi e delle polveri prodotti da attività industriali e agricole e da eruzioni vulcaniche particolarmente ricche di polveri (p. es. quella del Pinatubo, nelle Filippine, del 1991). Va ricordato che le particelle di fumi e polveri, agendo da nuclei di condensazione per il vapore acqueo, favoriscono la formazione di nubi che aumentano ulteriormente l'albedo.

Gli effetti della torbidità atmosferica si manifestano soprattutto negli strati più bassi e in specie nelle aree altamente industrializzate con notevole riduzione della visibilità e aumento di foschie, nebbie, nuvolosità e precipitazioni, al punto che le città industriali hanno un numero di giornate nuvolose e piovose superiore a quello delle campagne circostanti.

A causa dei contrastanti effetti dovuti all'aumento del tenore di anidride carbonica da una parte e alla nuvolosità e torbidità atmosferica dall'altra e inoltre delle attuali incomplete conoscenze del ruolo dei numerosi fenomeni geofisici che intervengono nel bilancio di radiazione della Terra, è impossibile stabilire con sicurezza quali siano le conseguenze a lunga scadenza di questi mutamenti indotti dall'uomo sull'atmosfera. Un'altra conseguenza dell'inquinamento, con riflessi sul clima valutati dagli scienziati in modo controverso, è l'accumulo di calore di scarto liberato nell'atmosfera dalle varie attività produttrici di calore: per alcuni la quantità di calore somministrata all'ambiente è già superiore a quella smaltibile per irradiazione nello spazio e quindi la temperatura è destinata a salire con profonda alterazione del clima nell'arco di qualche decennio, per altri l'aumento di calore può essere compensato da attività che elevino l'albedo come l'espandersi delle superfici di cemento e di asfalto delle aree urbane o l'estendersi dei deserti. In definitiva non si sa molto né sul complesso meccanismo di interazioni che regola l'ambiente fisico, né sulla portata delle interferenze climatiche prodotte dagli inquinamenti atmosferici. Solo il controllo sistematico della dispersione e delle modalità di trasporto degli inquinanti, delle variazioni dei valori di torbidità atmosferica, anidride carbonica e vapore acqueo, e in definitiva di tutto ciò che ha effetti sull'albedo, condotto su scala mondiale con l'aiuto di adatti satelliti meteorologici, potranno fornire più precise indicazioni sull'effettiva portata dell'alterazione dell'ambiente fisico.

5 Normativa sull'inquinamento atmosferico

La fissazione di norme di qualità dell'aria è una delle componenti di una strategia globale, tesa a ridurre e prevenire gradualmente l'inquinamento atmosferico, insieme ai limiti di emissione, all'adeguamento tecnologico e alla sensibilizzazione dell'opinione pubblica sulle problematiche ambientali.

Gli strumenti normativi in materia di qualità dell'aria e di inquinamento atmosferico sono complessi e articolati e sono strutturati su diversi livelli che vanno dalle direttive comunitarie, alle norme nazionali per arrivare agli strumenti di governo locale.

Per schematizzare il quadro delle disposizioni vigenti in materia di qualità dell'aria e di inquinamento atmosferico le norme possono essere suddivise in due ambiti principali: le disposizioni relative alla tutela della qualità dell'aria e le disposizioni relative alle emissioni inquinanti in atmosfera.

Relativamente alla qualità dell'aria, il recepimento in Italia delle direttive comunitarie 96/62/CE e 99/30/CE, rispettivamente con il D.Lgs. n. 351/99 e il DM 60/02, ha comportato notevoli modifiche al quadro normativo nazionale. Vengono modificati i principi di base per la valutazione delle qualità dell'aria, i limiti di riferimento, le modalità e le tempistiche per raggiungere questi limiti attraverso piani o programmi, le modalità di informazione al pubblico.

Sempre in attuazione del D.Lgs. n. 351/99, è stato successivamente emanato il DM 261/02 che fornisce le direttive tecniche per la valutazione preliminare della qualità dell'aria, i criteri per l'elaborazione dei piani o programmi per il raggiungimento dei valori limite nelle zone e negli agglomerati e le direttive sulla cui base vengono adottati i piani di mantenimento.

La predisposizione di questi interventi, così come la suddivisione del territorio in zone e agglomerati in base al rischio di superamento dei valori limite e delle soglie di allarme viene affidata alle regioni. In Emilia Romagna, a seguito della L.R. 3 del 21/4/99 che riforma il sistema regionale e locale, questo compito viene demandato alle Province, mentre la Regione mantiene il proprio ruolo in termini di indirizzi, obiettivi ed omogeneità degli strumenti tecnici.

Resta invece in capo ai comuni l'attuazione delle misure previste dal decreto "criteri ambientali e sanitari in base ai quali i sindaci adottano misure di limitazione della circolazione (DM 21-04-1999 n.163)" che, anche se modificato in numerose parti dal DM 60/02, risulta attualmente in vigore.

Fino all'entrata in vigore dei nuovi limiti, restano altresì in vigore gli standard di qualità definiti dal DPR 203/88 e tutti i limiti sull'ozono, in attesa del recepimento da parte dello stato italiano della direttiva figlia relativa a questo inquinante.

Relativamente alle emissioni di inquinanti in atmosfera, in particolare nel settore industriale, oltre al DPR 203/88 e al DM 12-07-1990, che rappresentano un riferimento ormai consolidato, assume grande rilevanza la direttiva IPCC 96/61, recepita recentemente, che prevede misure intese a evitare o ridurre le emissioni delle attività industriali nell'aria, nell'acqua e nel terreno, nonché la produzione di rifiuti, al fine di conseguire un elevato livello complessivo di protezione ambientale, anche in relazione alle caratteristiche del sito. Questa direttiva, recepita in Italia con il D.Lgs. 372/99, avrà grandi riflessi sulle emissioni in atmosfera in quanto buona parte delle aziende dovrà dotarsi di un'autorizzazione integrata ambientale in cui verranno autorizzate tutte le forme di scarico in ambiente e in cui i limiti verranno stabiliti in base alle migliori tecnologie disponibili (MTD o BAT) da adottare per ridurre l'inquinamento.

Anche nel campo delle emissioni veicolari, il quadro è sostanzialmente costituito da provvedimenti per la riduzione del contenuto di inquinanti nei carburanti e combustibili (piombo, zolfo...) e da provvedimenti per l'introduzione di tecnologie di abbattimento delle emissioni che nella maggior parte dei casi discendono da direttive o proposte emanate a livello europeo (direttive EURO III, EURO VI, Autoil II).

Pur trattandosi di disposizioni di natura prevalentemente tecnica, le norme relative alle emissioni da traffico veicolare hanno evidentemente una rilevanza diretta per la fase conoscitiva e per la fase propositiva del piano di risanamento.

Per le emissioni inquinanti determinate dal riscaldamento civile, invece, oltre alla sostituzione dei combustibili tradizionali con il metano, gli orientamenti ormai consolidati a livello internazionale sono rivolti all'incremento dell'efficienza energetica (grazie allo sviluppo di tecnologie innovative), al risparmio energetico e all'impiego di fonti energetiche alternative ("pulite").

In questo contesto, oltre alla L. 615/66 e al DPR 1391/70, che regolano gli aspetti tecnico costruttivi e autorizzativi concernenti l'installazione, la conduzione e la vigilanza degli impianti termici, e al DPCM 02-10-1995, relativo alle caratteristiche tecniche degli impianti e alle caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico, rivestono particolare importanza, la L. 10/91, relativa al piano energetico nazionale, all'uso razionale dell'energia, al risparmio energetico e all'impiego di fonti rinnovabili di energia, e il DPR 412/93, sul contenimento dei consumi di energia per gli impianti termici degli edifici.

Di seguito si riporta l'elenco dei principali provvedimenti emanati a livello comunitario, statale e regionale.

5.1 Normativa comunitaria

- Direttiva 96/61/CE – Prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento
- Direttiva 96/62/CE – Valutazione e gestione della qualità dell'aria ambiente
- Direttiva 98/69/CE – Inquinamento atmosferico da veicoli a motore
- Direttiva 99/30/CE – Valori limite di qualità dell'aria per il biossido di zolfo, biossido d'azoto, gli ossidi di azoto, le particelle sospese ed il piombo
- Direttiva 01/81/CE – Limiti nazionali di emissione di alcuni inquinanti atmosferici.
- Direttiva 02/03/CE - Direttiva del Parlamento europeo e del Consiglio del 12 febbraio 2002 relativa all'ozono nell'aria

5.2 Normativa nazionale

- DPR 203/88 (DM 20-05-91 / DM 15-04-94 / DM 25-11-1996), D.Lgs 112/98, D.Lgs 96/99 - Quadro vigente delle attività e della competenze in materia di qualità dell'aria.
- L. 10/91 - Piano Energetico Nazionale, uso razionale dell'energia, risparmio energetico e fonti rinnovabili di energia
- DPR 412/93 Contenimento dei consumi di energia per gli impianti termici negli edifici
- DM 27-03-1998 - Mobilità sostenibile nelle aree urbane
- DM 20-01-1999 n.76 – Regolamento recante norme per l'installazione dei dispositivi di recupero dei vapori di benzina presso i distributori

- DM 13-05-1999 – Recepimento della direttiva CE 98/77 che adegua al progresso tecnico la direttiva 70/220 relativa all'inquinamento atmosferico da emissioni dei veicoli a motore
- DM 28-05-1999 - Finanziamento agli enti locali per il rinnovo del parco automezzi.
- DM 21-04-1999 n.163 Criteri ambientali e sanitari in base ai quali i sindaci adottano misure di limitazione della circolazione.
- D.Lgs. 04-08-1999 n.351 – Attuazione della direttiva 96/62 in materia di valutazione e gestione della qualità dell'aria ambiente.
- D.Lgs. 04.08.1999 n.372 – Recepimento della direttiva 96/61 sulla prevenzione e riduzione integrate dell'inquinamento.
- Dpcm 8 marzo 2002, recante “Disciplina delle caratteristiche merceologiche dei combustibili aventi rilevanza ai fini dell'inquinamento atmosferico, nonché delle caratteristiche tecnologiche degli impianti di combustione”.
- DM 2 aprile 2002, n. 60 recante "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.
- DM 1 ottobre 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 decreto legislativo 4 agosto 1999, n. 351.
- DM 16 gennaio 2004, n. 44, che ha recepito la direttiva 1999/13/CE, relativa alla limitazione delle emissioni di composti organici volatili di talune attività industriali.
- DLgs 21 maggio 2004, n.171, che ha attuato la direttiva 2001/81/CE relativa ai limiti di emissione di alcuni inquinanti atmosferici.
- DLgs 21 maggio 2004, n. 183, che ha attuato la direttiva 2002/3/CE relativa all'ozono nell'aria.

5.3 Normativa regionale

- L.R. 21 aprile 1999 n. 3 "Riforma del sistema regionale e locale" Capo III Sezione IV "Inquinamento acustico e atmosferico" Artt. 121 – 123
- DGR n° 960 del 16 giugno 1999 e succ. integrazioni (autorizzazioni).
- DGR 15 maggio 2001 n. 804 "Approvazione linee di indirizzo per l'espletamento delle funzioni degli enti locali in materia di inquinamento atmosferico di cui agli artt. 121 e 122 della L.R.21 aprile 1999 n. 3 'Riforma del sistema regionale e locale'
- Delibera del Consiglio regionale n° 2615/2002 recante "Norme regionali di indirizzo programmatico per la razionalizzazione e l'ammodernamento della rete distributiva carburanti"
- Delibera della Giunta regionale n° 387/2002 recante "Prime disposizioni concernenti il coordinamento dei compiti attribuiti agli Enti locali in materia di contenimento dei consumi di energia negli edifici ai sensi del comma 5 art. 30 del D.Lgs. 112/98"

5.4 Accordi Regione Emilia-Romagna

- 1° Accordo di programma sulla qualità dell'aria, "per la gestione dell'emergenza da pm10 e per il progressivo allineamento ai valori fissati dalla Unione Europea al 2005

- di cui al DM 02/04/2002, n. 60" tra Regione Emilia-Romagna, Province, Comuni capoluogo e Comuni superiori a 50.000 abitanti. 15 LUGLIO 2002
- 2° Accordo di programma sulla qualità dell'aria, "per la gestione dell'emergenza da pm10 e per il progressivo allineamento ai valori fissati dalla Unione Europea al 2005 di cui al DM 02/04/2002, n. 60" tra Regione Emilia-Romagna, Province, Comuni capoluogo e Comuni superiori a 50.000 abitanti. 14 LUGLIO 2003
 - 3° Accordo di programma sulla qualità dell'aria, "per la gestione dell'emergenza da pm10 e per il progressivo allineamento ai valori fissati dalla UE al 2005 di cui al DM 02/04/2002, n° 60" tra Regione Emilia-Romagna, Province, Comuni capoluogo e Comuni superiori a 50.000 abitanti. 28 SETTEMBRE 2004

6 Studio Ambientale e Territoriale dell'area industriale-urbana "Coriano" del Comune di Forlì

Lo studio è stato effettuato da Arpa (Ingegneria Ambientale e Sezione di Forlì-Cesena), con la collaborazione dell'Università di Bologna, del CNR e dell'Istituto Superiore di Sanità.

I principali obiettivi dello studio sono stati:

- valutare il livello di pressione esercitato sull'ambiente dall'attività degli impianti di termovalorizzazione dei rifiuti (ospedalieri non pericolosi e urbani ed assimilati) e delle altre attività antropiche, produttive e non, presenti nell'area;
- stabilire, attraverso l'utilizzo delle tecniche di monitoraggio ambientale più avanzate, lo stato di qualità ambientale nella zona;
- mettere a punto strumenti di simulazione dei fenomeni di diffusione degli inquinanti in atmosfera per l'individuazione delle zone di maggiore criticità, per la scelta di traccianti e di punti per il loro monitoraggio e per la valutazione degli effetti relativi a diversi scenari di emissione;
- valutare il livello di esposizione delle popolazioni che risiedono all'interno dell'area di ricaduta degli inquinanti.

La metodologia seguita si basa sull'implementazione di un Sistema di Monitoraggio Integrato con l'obiettivo di correlare i dati acquisiti mediante l'analisi delle matrici ambientali coinvolte nel percorso di diffusione di una sostanza inquinante (scelta come indicatore) con le determinazioni effettuate sulle fonti di contaminazione e di trovare le correlazioni qualitative e quantitative che esprimono un rapporto di causa-effetto.

Le fasi previste in questo tipo di approccio sono state:

- Caratterizzazione e georeferenziazione delle fonti inquinanti e stima delle emissioni in atmosfera da attività produttive (DPR 203/88), impianti di termovalorizzazione dei rifiuti (DPR 503/97), insediamenti civili (metodologia Corinair), fonti mobili (metodologia Corinair), con realizzazione di mappe delle emissioni. Relativamente agli impianti di termovalorizzazione dei rifiuti è stata effettuata un'analisi dettagliata dell'impatto ambientale attraverso la realizzazione di bilanci di massa ed energia e calcolo dei fattori di emissione.
- Caratterizzazione dei comparti ambientali attraverso tre campagne di monitoraggio (14/2/00 – 13/3/00, 7/6/00-6/7/00, 2/2/01-4/3/01): le analisi ambientali hanno riguardato la valutazione delle concentrazioni in aria, nel particolato atmosferico, nelle deposizioni secche ed umide, nel suolo e nei vegetali dei principali inquinanti emessi dalle attività presenti nell'area: ossidi di zolfo (SO_x), ossidi d'azoto (NO, NO₂, NO_x), monossido di carbonio (CO), polveri totali sospese (PTS), Benzene, Toluene, Xileni (BTX), metalli pesanti -piombo (Pb), cadmio (Cd), nichel (Ni) e mercurio (Hg)- Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA), Policlorodibenzodiossine (PCDD) e Policlorodibenzofurani (PCDF).
- Applicazione del modello di diffusione degli inquinanti in atmosfera ISC (INDUSTRIAL SOURCE COMPLEX – EPA) per la simulazione delle concentrazioni al suolo dei principali inquinanti (SO_x, NO_x, CO, Polveri, COV, HCl, Benzene) e di alcuni metalli pesanti (Pb, Cd, Cr, Hg, Ni), dovute alle emissioni delle sorgenti presenti nell'area e realizzazione di mappe di rappresentazione. Gli scenari riprodotti sono relativi alla diffusibilità in atmosfera riferita al lungo periodo (medie annuali) con disaggregazione delle fonti di emissione (emissioni totali, emissioni da traffico, emissioni degli inceneritori) e su scala stagionale (estate – inverno), considerando in quest'ultimo caso le emissioni totali derivanti da tutte le sorgenti.

- Applicazione di modelli di ripartizione all'equilibrio (modelli del tipo MacKay, accettati recentemente in sede UE per la valutazione di rischio tossicologico delle sostanze esistenti) per un'analisi di predizione del destino ambientale di inquinanti organici quali benzene, PCDD e PCDF ed inorganici (metalli pesanti). Tali modelli permettono di stimare la concentrazione media all'equilibrio degli inquinanti nei differenti comparti ambientali: aria, acqua, suolo, sedimento, biota acquatico.

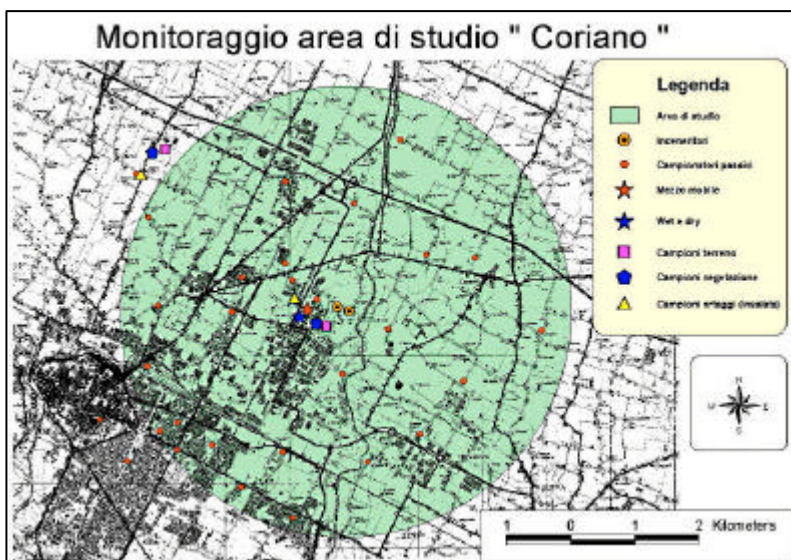


figura 5. area di studio "Coriano"

Sulla base delle considerazioni riguardo la dislocazione delle principali fonti di inquinamento presenti nella zona è stata individuata un'area di studio circolare di raggio 3,5 km con centro gli inceneritori.

L'area oggetto di studio comprende una vasta zona destinata ad attività prevalentemente di tipo agricolo, alcune aree industriali quali Coriano, Villa Selva e Pieve Acquedotto e un quartiere urbano della città di Forlì (quartiere Ronco).

Le principali fonti di inquinamento atmosferico che si possono individuare nella zona sono i due inceneritori, le attività produttive ubicate nelle sopraccitate aree industriali ed il traffico veicolare che interessa l'area urbana e che percorre il tratto di Via Emilia e di autostrada A14 compresi nell'area di studio.

Dall'esame della carta dell'uso del suolo si evince che la maggior parte del territorio compreso nell'area di studio è destinato a un uso agricolo con coltivazioni di tipo seminativo e colture specializzate quali frutteto e vigneto; il restante territorio concentrato nella zona sud-ovest, ai confini della zona urbana, è occupato da aree industriali e urbane.

Dall'elaborazione dei dati contenuti nel catasto delle aziende presenti nella zona che hanno richiesto l'autorizzazione alle emissioni in atmosfera secondo il D.P.R. 203/88 sono stati evidenziati i settori d'attività maggiormente sviluppati.

Le attività produttive che maggiormente si sono sviluppate nell'area industriale di Forlì sono l'industria metalmeccanica (occupa il 46% del mercato), l'industria del legno (18.8%) e delle materie plastiche (12.9%). Altri settori di notevole rilevanza presenti nell'area sono l'alimentare, il tessile ed il terziario.

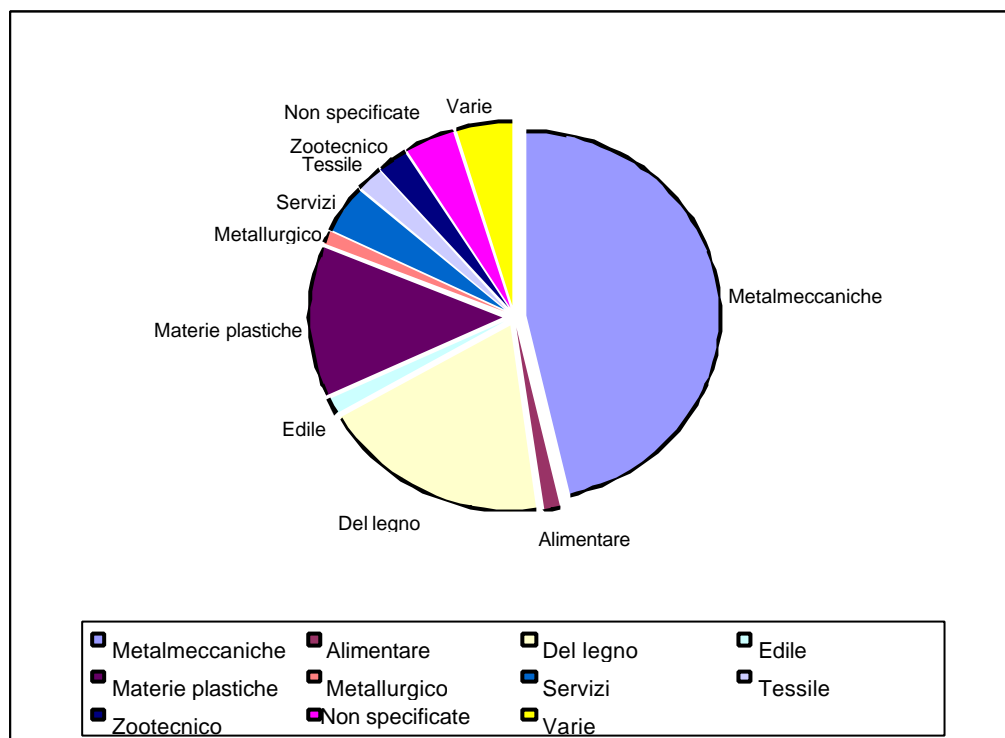


figura 6. attività produttive di Forlì

Per favorire lo sviluppo economico-industriale del Comune di Forlì, il PRG ha destinato un'altra area ad uso industriale: si tratta dell'area denominata Villa Selva, localizzata ad Est del fiume Ronco. In questa area troveranno sede attività produttive già esistenti con sede a Coriano che hanno necessità di espandere la propria attività e nuove attività industriali.

Per favorire il movimento delle merci è prevista la realizzazione di uno scalo ferroviario che consenta l'interscambio delle merci da gomma a rotaia.

Lo sviluppo di nuovi poli industriali comporta un notevole incremento di traffico pesante su gomma; attualmente l'unica struttura viaria esistente che possa essere utilizzata come via di transito delle merci dalla zona di Villa Selva è la Via Emilia che risulta sottodimensionata rispetto al carico veicolare che la interessa quotidianamente. Per sopportare il carico di traffico veicolare che attualmente gravita sulla Via Emilia e il conseguente incremento dovuto allo sviluppo dell'area industriale di Villa Selva è prevista, come indicato da PRG, la realizzazione di un nuovo asse viario che scorra parallelamente alla Via Emilia fino alle porte della città per poi discostarsi da esso all'interno dell'area urbana al fine di assolvere alla funzione di circonvallazione della città di Forlì.

Il PRG prevede la realizzazione di un asse viario a sostegno della Via Ravegnana denominata Nuova Via Ravegnana che attraversi la città in direzione Sud-Nord ad Est del centro storico costeggiando l'asta fluviale del fiume Ronco in più punti. La funzione della Nuova Via Ravegnana è di sopportare il traffico pendolare tra Forlì e Ravenna e il traffico pesante della zona industriale di Coriano e della futura zona industriale di Villa Selva da e per lo svincolo autostradale.

Nei pressi dello svincolo autostradale si trova un'area, S. Giorgio, identificata dal PRG come industriale, ma a vocazione prevalente commerciale.

Il PRG destina un'area nei pressi di Podere Buffalini sulla direttrice per Ravenna a sviluppo commerciale; è attualmente in fase di discussione in apposita sede la proposta di realizzare un centro commerciale generale di notevoli dimensioni il quale attirerebbe acquirenti da tutta la Provincia di Forlì, in quanto unico nel suo genere, e da un'ampia zona della Provincia di Ravenna incrementando in modo considerevole il traffico veicolare che gravita sull'area.

Da quanto esposto riguardo ai progetti che interessano l'area di studio si evince che essa sarà sottoposta a cambiamenti di notevole entità i quali comporteranno un aumento dei livelli di pressione complessivi esercitati sulla zona .

6.1 Stato avanzamento lavori

La ricerca effettuata nel biennio 1999-2001 sull'area di Coriano in Comune di Forlì ha portato alla definizione dei parametri significativi per la descrizione della specifica situazione ambientale di quest'area, caratterizzata dalla presenza di diverse tipologie di impianti produttivi e di due impianti di termodistruzione dei rifiuti.

Le risultanze dei rilevamenti hanno consentito di stimare i livelli ambientali dei contaminanti dovuti alle ricadute delle varie sorgenti, di misurare le concentrazioni di selezionati inquinanti in alcune matrici ambientali e di verificare l'idoneità di metodiche di prelievo e di analisi.

Alla luce delle campagne già effettuate e degli attuali orientamenti normativi è stata elaborato un programma di prosecuzione di studio e monitoraggio ambientale dell'area. Le attività di II fase, che sono iniziate nel mese di febbraio 2003, si sviluppano nel corso di due anni e sei mesi e riguardano i seguenti temi:

- LCA (Life Cycle Analysis) LCI (Life Cycle Inventory) applicati agli impianti di incenerimento e nuove tecnologie e sistemi di depurazione;
- Attività di monitoraggio strumentale, in particolare per la determinazione di polveri fini, metalli pesanti e microinquinanti organici (PCDD E PCDF, IPA);
- Attività di biomonitoraggio mediante api e licheni;
- Applicazioni modellistiche per la simulazione della qualità dell'aria in diversi scenari di intervento

Questo lavoro di tesi tratterà solamente dell'ultimo punto, che è stato oggetto del lavoro nel periodo si stage svolto presso la struttura *Arpa Ingegneria ambientale*. Si rimanda alla bibliografia per una trattazione completa di tutti gli aspetti dello studio ambientale.

I dati sin qui raccolti hanno permesso di effettuare uno studio sull'andamento dei flussi di inquinanti emessi dai due inceneritori soprattutto in relazione alle profonde modifiche che hanno subito nelle configurazioni impiantistiche rispetto allo stato descritto nel precedente rapporto.

In particolare l'impianto Mengozzi è stato completamente rinnovato, mentre l'impianto HERA ha inserito migliorie al sistema di depurazione fumi che hanno comportato una drastica riduzione delle emissioni di ossidi di azoto.

6.2 Gli impianti di termovalorizzazione dei rifiuti

6.2.1 Impianto Mengozzi

L'impianto Mengozzi è stato costruito ex novo nel 2001 ed è entrato in funzione nel 2002; al fine di ridurre l'impatto delle emissioni gassose dovute all'attività di incenerimento, ha adottato una linea di abbattimento fumi di tipo ibrido.

Essa è costituita essenzialmente da due sezioni:

- Sistema semisecco;
- Sistema umido.

I sistemi ibridi costituiti dalla combinazione in serie di processi di abbattimento, sviluppati per sfruttare al meglio i vantaggi delle singole sezioni, offrono interessanti prospettive soprattutto nella configurazione semisecco-umido in cui il primo stadio, oltre ad rimuovere il particolato, funge da evaporatore degli spurghi liquidi del secondo stadio, dedicato al controllo dei gas acidi e dei microinquinanti volatili.

La configurazione del sistema abbattimento fumi dell'impianto Mengozzi è schematizzata in figura 7, in cui è possibile evidenziare le due sezioni ed il percorso che i fumi seguono prima di essere liberati in atmosfera.

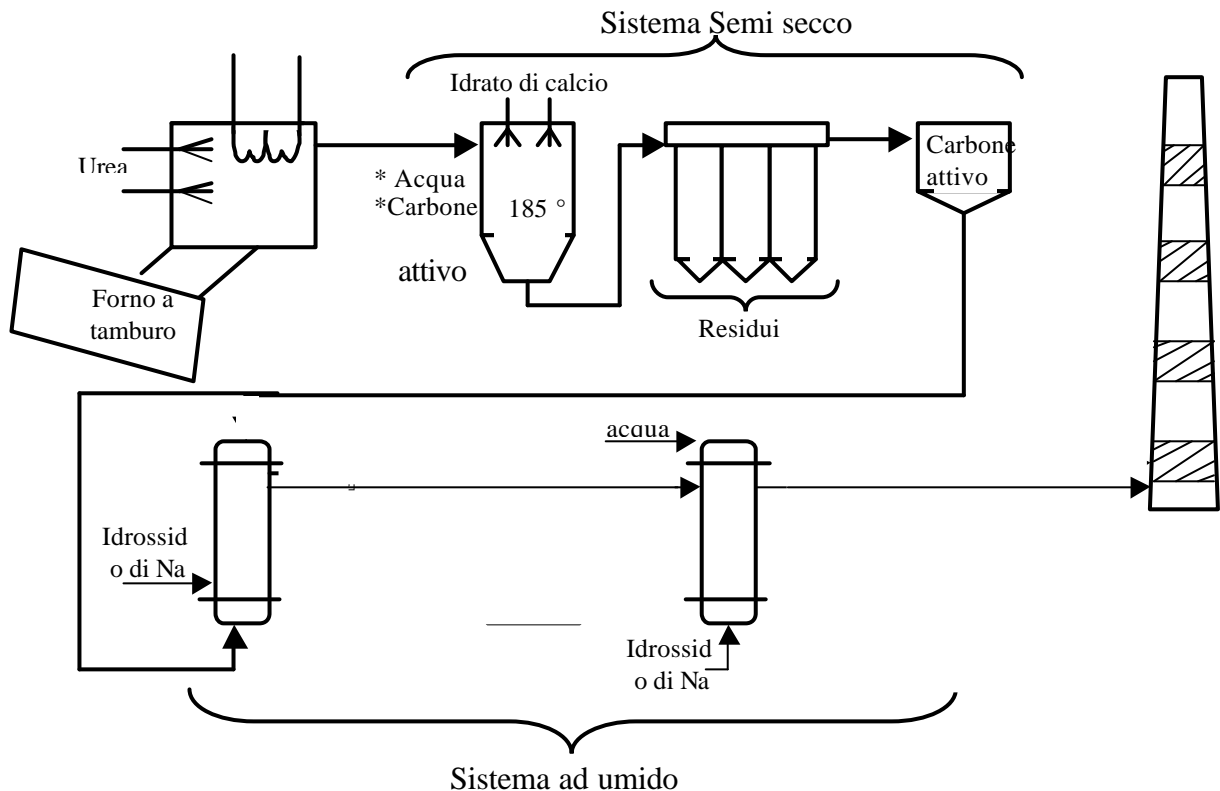
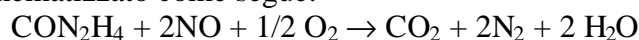


figura 7. Schema della linea di condizionamento fumi

Prima della sezione di abbattimento fumi, ai fini di limitare le emissioni di NO_x, si effettua una reazione di denitrificazione, mediante immissione di urea in camera di post-combustione in corrispondenza dell'intervallo del profilo di temperatura dei fumi decrescente tra 900 °C e 850 °C;

Il sistema adottato è del tipo SNCR "selective non catalytic reduction" in cui gli NO_x vengono trasformati in azoto molecolare mediante iniezione di Urea direttamente in camera di post-combustione.

Il meccanismo delle reazioni di degradazione è estremamente complesso, coinvolge un numero assai elevato di stadi elementari: dal punto di vista della trasformazione globale, esso può tuttavia essere schematizzato come segue:



La scelta dell'Urea, rispetto all'utilizzo dell'ammoniaca, è dovuta a numerosi vantaggi in termini di facilità di manipolazione e stoccaggio e di proprietà fluidodinamiche delle soluzioni acquose che ne migliorano l'utilizzo.

L'ottimizzazione del sistema nei confronti dell'efficienza di conversione e della minimizzazione dell'ammoniaca residua, derivante sia dall'eccesso di reagente sia dalla sua formazione in reazioni secondarie, richiede un accurato posizionamento degli ugelli di iniezione in zone comprese tra 900 °C e 850 °C in presenza di opportuni additivi.

6.2.2 Emissioni impianto HERA

L'impianto HERA ha subito adeguamenti rispetto alla configurazione impiantistica considerata nel precedente studio, in particolare le modifiche hanno riguardato la sezione di alimentazione dei fumi, il sistema di abbattimento degli NO_x e delle polveri.

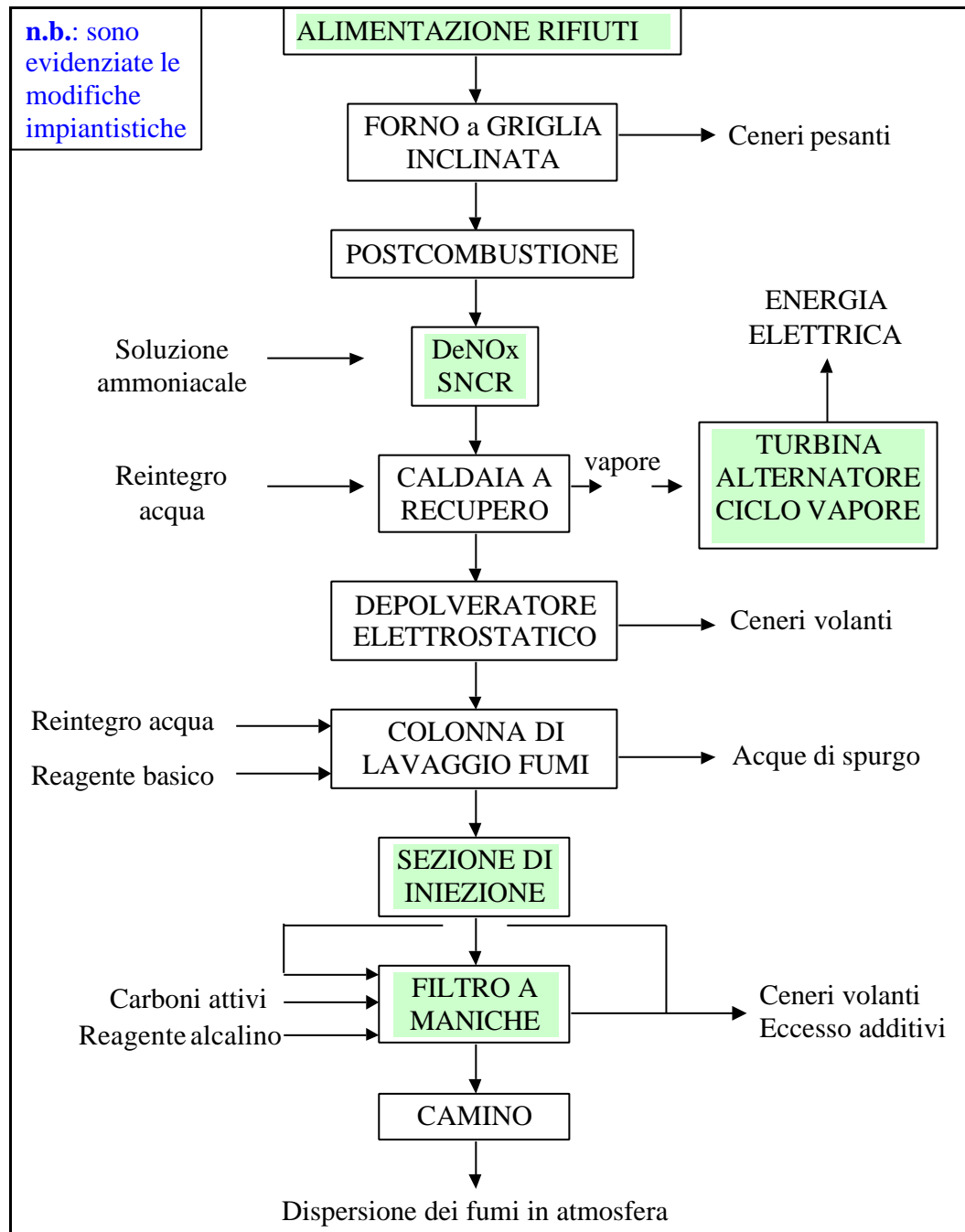


figura 8. Layout impianto HERA con evidenziate le migliori impiantistiche

L'analisi dei flussi annuali degli inquinanti denota una netta diminuzione di gran parte di essi rispetto alla situazione descritta nel precedente studio; ciò è dovuto essenzialmente al completo rinnovamento dell'impianto Mengozzi entrato in funzione nel 2002 ed all'adeguamento dell'impianto HERA.

E' utile puntualizzare che contestualmente al rinnovamento degli impianti sono aumentate le portate autorizzate in particolare per quanto riguarda il Mengozzi, ciò ha comportato un aumento delle emissioni di Anidride Carbonica la quale si forma stechiometricamente nel processo di combustione ed inoltre non viene rimossa dai sistemi di abbattimento.

Relativamente agli Ossidi di Azoto, si riscontra un aumento delle quantità emesse dal Mengozzi. Se si fa riferimento all'utilizzo dell'impianto ad Urea tali valori dovrebbero rientrare entro i flussi del quadriennio 1997-2001.

La situazione in generale non è stata aggravata grazie alla diminuzione delle emissioni dell'impianto HERA il quale è passato da valori superiori ai 200 mg/Nm³ (valore limite per la 503/97) a concentrazioni di poco superiori ai 100 mg/Nm³.

Altro inquinante particolarmente caratteristico degli impianti di incenerimento è il particolato il quale ha subito per entrambi gli impianti una diminuzione che risulta più marcata per l'impianto Mengozzi.

Acido Cloridrico e Mercurio hanno denotato un eguale andamento a conferma degli effettivi miglioramenti ottenuti dalla costruzione del nuovo impianto Mengozzi e dall'adeguamento del HERA.

PARTE SPERIMENTALE

7 I modelli di simulazione di dispersione degli inquinanti in atmosfera

Le norme prevedono che gli standard di qualità dell'aria non vengano superati in alcun punto del territorio. Tuttavia, se si ipotizza che l'unico mezzo conoscitivo sia la misura diretta delle concentrazioni, in pratica il controllo della qualità dell'aria può essere effettuato solo in un numero finito di punti coincidenti con le postazioni di misura delle varie reti di rilevamento presenti sul territorio nazionale. Tale numero, estremamente esiguo, non consente certo di ottenere una fotografia, anche se approssimata, della distribuzione spazio-temporale della concentrazione dei vari inquinanti di interesse. Per poter fare un passo in avanti è necessario l'impiego di modelli matematici di simulazione della dispersione degli inquinanti in atmosfera.

In generale un modello matematico è uno strumento matematico/informatico che cerca di ricostruire il più fedelmente possibile lo stato della concentrazione dei vari inquinanti in un dominio di calcolo spazio-temporale di interesse. Di per sé non ha limitazioni nel fornire indicazioni in ogni punto del territorio, tuttavia il problema è quanto la previsione del modello sia realistica. E' evidente che il modello, in quanto tale, sarà sempre una approssimazione della realtà e quindi le sue previsioni saranno sempre in disaccordo con quanto misurato. Questo disaccordo può essere quantificato in termini statistici e tali indicatori statistici possono essere utili per confrontare le *performances* di modelli differenti applicati alla medesima realtà. Va comunque rilevato che praticamente ogni modello presenta un maggiore o minore grado di calibrabilità (*tuning*) che gli consente in qualche modo di adattarsi alle misure. Da ciò deriva una possibile strategia di impiego dei modelli:

- si applichi ad una data realtà il modello che si intende esaminare senza alcun tipo di *tuning*;
- si confrontino i risultati ottenuti con le misure effettuate da una rete di rilevamento presente nel territorio o con i risultati di opportune campagne sperimentali;
- si effettui la taratura del modello in modo tale che le discrepanze tra modello e misure per il dominio spazio-temporale considerato scenda al di sotto di un livello stabilito.

A questo punto il modello può considerarsi tarato per quella realtà e può essere realistico valutare le sue previsioni come una rappresentazione abbastanza realistica della realtà stessa. Va rilevato, inoltre, che le operazioni di pianificazione richiedono la stima preventiva dell'impatto ambientale di nuove installazioni energetiche ed industriali. E' evidente che non si possono effettuare questi studi a posteriori, pertanto è giocoforza effettuare simulazioni modellistiche che consentano di ottenere una base conoscitiva oggettiva per un confronto tra differenti strategie operative con l'obiettivo di individuare la strategia che può essere considerata a minimo impatto.

Una sostanza, una volta immessa nell'atmosfera, per effetto dei numerosi fenomeni a cui è soggetta, quali il trasporto dovuto all'azione del vento, la dispersione per effetto dei moti turbolenti dei bassi strati dell'atmosfera, la deposizione, ecc. , si distribuisce nell'ambiente circostante, diluendosi in un volume di aria di dimensioni più o meno grandi in funzione delle particolari condizioni atmosferiche presenti. Ciò significa che se una sostanza viene immessa nell'atmosfera in un determinato punto del territorio (*sorgente*) ad un dato istante e con determinate modalità di emissione, è possibile ritrovarla in altri punti de territorio dopo un tempo più o meno lungo, con un diverso valore di concentrazione in funzione della diluizione

che ha subito lungo il suo tragitto. La valutazione dei valori assunti dalla concentrazione in tutti i punti dello spazio ed in ogni istante ovvero la previsione dell'evoluzione nel tempo del campo di concentrazione di una determinata sostanza costituisce l'obiettivo dei modelli di simulazione della dispersione degli inquinanti in atmosfera.

Per valutare con un adeguato grado di approssimazione tale campo di concentrazione, è necessario prendere in considerazione e schematizzare un considerevole numero di fenomeni specifici che hanno luogo durante il trasporto della sostanza in atmosfera. Detti fenomeni specifici sono di diversa natura:

- fisici (trasporto, diffusione, innalzamento del pennacchio)
- chimici (reazioni chimiche di trasformazione, decadimento radioattivo)
- chimico-fisici (deposizioni, ecc.)

Con queste premesse è facile intuire come le attività di ricerca e sviluppo in questo settore non siano state orientate verso la progettazione di un modello in grado di soddisfare le differenti esigenze di accuratezza e completezza, ma siano state bensì articolate in diversi filoni che hanno condotto alla realizzazione di altrettante classi e/o categorie di modelli. Questo stato di fatto comporta in molti casi un attento vaglio dei modelli suggeriti dalla letteratura, prima dell'adozione di uno di essi per soddisfare un'aspecifica esigenza. Per agevolare questo compito sono stati condotti numerosi tentativi di rassegna ragionata e di razionale categorizzazione. Presupposto essenziale di tali attività è l'individuazione degli elementi caratteristici che sono alla base dei vari modelli, mediante i quali è possibile suddividere i modelli stessi in classi, categorie, tipologie, ecc..

Un primo elemento utile a tal fine è l'approccio analitico di base impiegato, mediante il quale i modelli si possono suddividere in:

- modelli *stocastici* o *statistici*
- modelli *deterministici*

I modelli stocastici non stimano la concentrazione degli inquinanti sulla base di relazioni fisiche di causa-effetto, ma sulla base dei dati misurati dalla rete di monitoraggio. Essi sono in grado di fornire il valore stimato della concentrazione di inquinante nei soli punti di misura della rete. La loro possibilità di utilizzo è quindi circoscritta alla previsione dei valori che le stazioni della rete registreranno in futuro, e, limitatamente a tale obiettivo, forniscono risultati migliori rispetto ai modelli deterministici. Tuttavia risulta che essi sono del tutto inadeguati a studiare i fenomeni in atto o a prevedere situazioni che non siano controllate da una rete di rilevamento.

I modelli deterministici, categoria composta da un numero considerevole di modelli differenti, pongono come base di calcolo delle loro previsioni, relazioni di causa-effetto tra le emissioni delle sorgenti e la meteorologia da un lato (*cause*) e le concentrazioni degli inquinanti nel dominio di calcolo (*effetti*) dall'altro.

Sulla base del metodo con cui si descrive l'evoluzione nel tempo del fenomeno dell'inquinamento, i vari modelli deterministici si differenziano in metodi *stazionari* e metodi *dinamici*. Nei primi, l'evoluzione temporale di un fenomeno è trattata come una sequenza di stati quasi-stazionari, cosa che semplifica notevolmente il modello, diminuendone però la generalità e l'applicabilità. I secondi, invece, trattano l'evoluzione del fenomeno in modo dinamico. I modelli stazionari sono molto utilizzati per la loro semplicità e per l'economicità d'impiego ed in genere costituiscono un valido strumento per un'analisi preliminare di realtà non particolarmente complesse.

Un altro importante elemento di distinzione dei modelli è costituito dalla *scala spaziale* ovvero dalla distanza dalla sorgente entro cui il modello è in grado di descrivere il fenomeno; si distinguono le seguenti classi:

- a scala locale (*short range*), modelli che descrivono la dispersione degli inquinanti fino a distanze dell'ordine della decina di chilometri;
- a *mesoscala*, modelli che trattano domini spaziali dell'ordine delle centinaia di chilometri;
- a grande scala o *sinottici (long range)*, che descrivono fenomeni che possono interessare aree molto vaste fino a migliaia di chilometri dalla sorgente.

I modelli possono essere distinti anche in funzione del loro livello di complessità ovvero del numero di fenomeni di cui tengono conto nel determinare il campo di concentrazione. Usualmente si fa riferimento alle seguenti tre tipologie.

- modelli complessi
- modelli di media complessità
- modelli semplici

7.1 Il modello ADMS-Urban

ADMS-Urban, acronimo di Atmospheric Dispersion Modelling System, è un modello di dispersione in atmosfera di sostanze inquinanti rilasciate nelle aree urbane da sorgenti industriali, domestiche e dal traffico su strada. ADMS-Urban consente di eseguire la stima delle concentrazioni basandosi su modelli di sorgenti puntuali, lineari, di aree e di volumi. È stato ideato per considerare i problemi legati alla dispersione degli inquinanti a partire dal più semplice, come la singola sorgente puntuale isolata o la singola strada, per arrivare ai più complessi problemi urbani, come le emissioni industriali, domestiche e quelle del traffico su strada in aree urbane estese.

Il sistema è dotato di varie funzionalità elencate di seguito:

- un pre-processore meteorologico che calcola i parametri dello strato limite sulla base di dati di input, come: velocità del vento, giorno, ora, presenza o meno di nuvole, oppure velocità del vento, flusso di calore superficiale e altezza dello strato limite. I dati meteorologici possono essere non elaborati, calcolati in media ogni ora o analizzati statisticamente.
- Un modello avanzato di dispersione in cui la struttura dello strato limite è caratterizzata dall'altezza dello strato stesso e dalla lunghezza di Monin-Obukhov, una scala di lunghezza che dipende dalla velocità di attrito e dal flusso di calore superficiale.
- Un profilo verticale non-gaussiano della concentrazione in condizioni convettive, che tiene conto della natura anisotropa della turbolenza all'interno dello strato limite atmosferico, che può determinare elevate concentrazioni sulla superficie vicino alle sorgenti.
- Un'interfaccia grafica interattiva di facile utilizzo.
- Un collegamento diretto al database Emissions Inventory.
- L'integrazione con un sistema GIS commerciale (Arcview GIS-ESRI)
- Versatilità delle applicazioni come ad esempio il confronto con gli standard EPAQS, l'implementazione degli obiettivi nazionali strategici per la qualità dell'aria nel Regno Unito (UK National Air Quality Strategy) le linee guida e i limiti dell'UE e dell'OMS, la pianificazione del traffico, la valutazione dell'impatto ambientale, i possibili scenari e le proiezioni per il futuro.
- Una gamma completa di tipi di sorgente: è possibile modellizzare contemporaneamente fino a 1500 sorgenti puntuali, lineari, stradali, di area e di volume.
- Un modello integrato di street canyon.

- La modellizzazione di reazioni chimiche con NO, NO₂, O₃ e i VOC.
- Il calcolo delle emissioni sulla base di dati di conteggio del traffico, utilizzando un database di coefficienti di emissione.
- Il calcolo realistico del flusso e della dispersione su terreno complesso e intorno agli edifici.

7.2 Teoria della dispersione atmosferica

Si definisce strato limite atmosferico la regione all'interno della troposfera condizionata dalla superficie terrestre (dalla rugosità, dall'azione del caldo e del freddo) che può estendersi fino a 2,5 km al di sopra della stessa. Lo strato limite atmosferico è la zona in cui si verifica la diffusione dell'inquinamento; il suo spessore durante il giorno varia di ora in ora, anche in relazione al periodo dell'anno. Lo strato limite subisce l'influenza delle condizioni meteorologiche i fattori primari sono l'insolazione e la forza del vento.

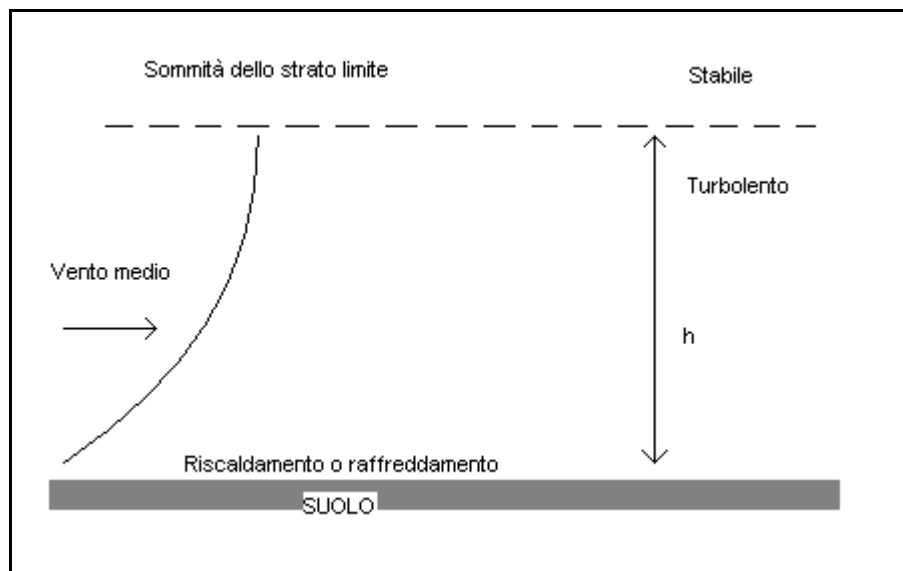


Figura 9. strato limite atmosferico

Lo strato limite atmosferico (turbolenza, condizioni meteorologiche) influisce notevolmente sulla dispersione di qualunque pennacchio o nuvola di inquinante che si trovi al suo interno. La concentrazione di sostanze inquinanti a livello del suolo può passare da molto bassa a molto alta, in relazione alle variazioni di stato dello strato limite di ora in ora. Lo stato dello strato limite è detto stabilità.

7.2.1 L'approccio tradizionale

La stabilità dello strato limite è stata classificata in 7 categorie da Pasquill e Gifford. Tali categorie vanno da A a G, dove A rappresenta le condizioni più convettive (o instabili), D le condizioni neutri e G le condizioni più stabili.

L'approccio tradizionale alla modellizzazione della dispersione è consistito nell'utilizzare la stabilità di Pasquill per definire lo strato limite. Tali modelli si sono basati sulla supposizione che la distribuzione della concentrazione in tutte le condizioni della stabilità fosse gaussiana, sia nella direzione orizzontale che in quella verticale. La propagazione in entrambe le direzioni si è basata su esperimenti e si è supposto che fosse costante per tutta l'altezza dello strato limite. In realtà si sa che il gradiente di temperatura varia con il variare dell'altezza e

che i vortici di turbolenza convettiva impiegano del tempo a crescere e a salire, pertanto le condizioni attraverso tutto lo strato limite sono diverse.

7.2.2 L'approccio utilizzato in ADMS-Urban

In ADMS-Urban viene utilizzato un modello che non richiede l'immissione delle categorie di Pasquill, ma consente di combinare una serie di condizioni meteorologiche per rappresentare stabilità atmosferiche differenti. I principali parametri dell'approccio utilizzato sono la lunghezza di Monin-Ubukhov (L_{MO}) e l'altezza dello strato limite (h).

La lunghezza di Monin-Ubukhov misura l'importanza relativa del galleggiamento generato dal riscaldamento del suolo e del rimescolamento meccanico provocato dall'attrito della superficie del terreno. Da un punto di vista fisico rappresenta lo spessore dello strato limite, all'interno del quale il rimescolamento meccanico è la più importante forma di generazione di turbolenza.

$$L = \frac{-u_*^3}{B}$$

dove u_* è la velocità di attrito, che aumenta con l'aumentare della velocità del vento e della lunghezza della rugosità, e B è il galleggiamento, che aumenta con l'aumentare del flusso di calore della superficie.

In condizioni d'instabilità la lunghezza di Monin-Ubukhov è negativa. Quindi, la grandezza L_{MO} (indicata da $|L_{MO}|$) è rappresentata dalla misura dell'altezza dal suolo dove la turbolenza convettiva (cioè i moti turbolenti provocati dal riscaldamento della superficie) prevale rispetto alla turbolenza meccanica, provocata dall'attrito sulla superficie terrestre. Tale valore sarà inferiore a 10 m in condizioni convettive, mentre lo spessore dello strato limite, h , sarà probabilmente di 1000-1500 m. Pertanto la turbolenza convettiva prevale per quasi tutto lo spessore dello strato limite ed è solo a un livello molto basso, vicino al suolo, in cui invece prevale la turbolenza meccanica dall'attrito e minore la grandezza L_{MO} .

In condizioni prossime alla neutralità è possibile che la grandezza di Monin-Ubukhov sia positiva o negativa, ma la sua grandezza sarà notevole. In tal caso la turbolenza meccanica prevale nella maggior parte o anche in tutto lo spessore dello strato limite. La velocità del vento varia da moderata ad alta e spesso il cielo è coperto. L'aumento della velocità del vento accresce la turbolenza con origini meccaniche, mentre la presenza delle nuvole impedisce il riscaldamento o il raffreddamento del suolo, che altrimenti si verificherebbe. La grandezza L_{MO} sarà probabilmente maggiore di quella dello spessore dello strato limite (di solito intorno agli 800m), pertanto il galleggiamento non prevarrà a nessun livello nello spessore dello strato limite.

In condizioni stabili la lunghezza di Monin-Ubukhov è positiva. Lo strato limite è formato da strati di diversa densità, con gli strati più densi in prossimità del suolo. Questi strati tendono a fermare qualsiasi moto verticale provocato dagli attriti sulla superficie terrestre, sebbene ci sia turbolenza debole provocata dall'azione dei vari strati uno sull'altro. Quindi L_{MO} rappresenta la misura dell'altezza dal suolo in cui il moto di turbolenza verticale risulta maggiormente inibito dalla stratificazione stabile. Il valore L_{MO} sarà abbastanza basso (di solito inferiore ai 20 m). Tuttavia la turbolenza meccanica sarà comunque prevalente nello strato limite, perché anche il suo spessore è ridotto (100-200m).

Da quanto detto risulta chiaro che la struttura di uno strato limite convettivo è molto diversa da quello di uno strato limite stabile. Alcune condizioni sono auspicabili perché favoriscono la rapida dispersione delle sostanze inquinanti nell'aria, mentre altre possono favorire il

problema dell'inquinamento. Le condizioni migliori per la dispersione variano a seconda della sorgente di inquinamento.

Se la sorgente è a livello del suolo, le condizioni convettive tendono a rimescolare la nuvola di inquinante lontano dal terreno e a disperderla.

Nelle condizioni stabili si ha minore rimescolamento, ma alta concentrazione della nuvola di inquinante a livello del suolo, che potrebbe propagarsi sottovento per una certa distanza.

Al contrario, nel caso di una sorgente di inquinamento elevata, ad esempio una ciminiera, le condizioni convettive porteranno la nuvola di inquinante verso il suolo più rapidamente di quanto non avverrebbe in condizioni neutrali o stabili. Ciò determinerà concentrazioni più elevate a livello del suolo, più vicino alla sorgente.

D'altro canto, in condizioni stabili è possibile che la nuvola di inquinante si propaghi sottovento ben staccata dal suolo per notevoli distanze. Durante questo tempo la nuvola di inquinante potrebbe essersi dissolta sufficientemente perché le concentrazioni a livello del suolo siano abbastanza basse da non causare danni.

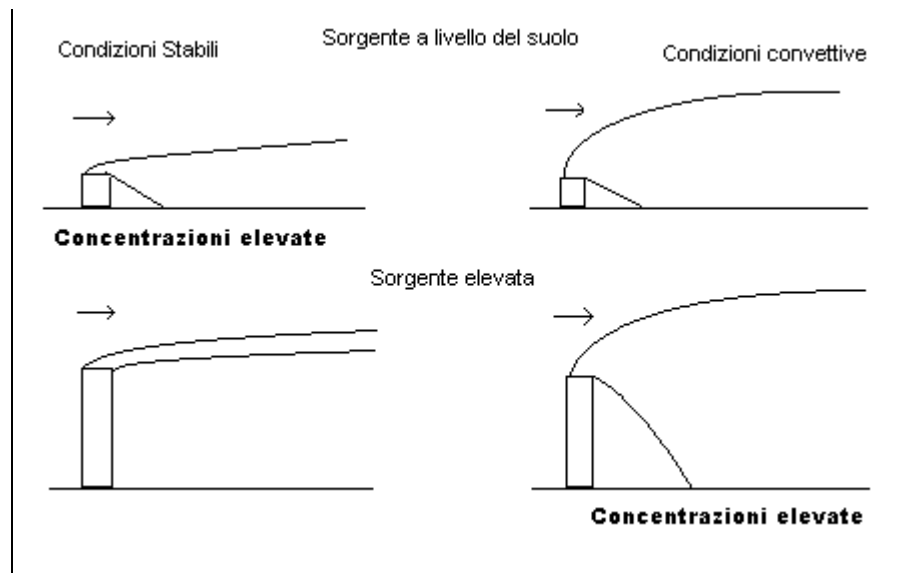


Figura 10. Diffusione di inquinanti

8 RISULTATI E CONCLUSIONI

Come già richiamato precedentemente, la zona di studio è rappresentata da un'area circolare di 3,5 km di raggio con centro i due inceneritori. L'area comprende la zona industriale di Coriano, la zona produttiva di Villa Selva e di Pieve Acquedotto.

Le applicazioni del modello ADMS-Urban hanno riguardato la simulazione delle concentrazioni al suolo dei principali macroinquinanti (SO₂, NO₂, CO, Polveri, COT), dovute alle emissioni degli impianti di termodistruzione dei rifiuti. Per quanto riguarda le emissioni derivanti dalle altre fonti, attualmente in fase di elaborazione, sarà necessaria una successiva implementazione del lavoro.

Gli inceneritori sono stati considerati come sorgenti puntuali. Per quanto riguarda l'input meteorologico, sono stati utilizzati i dati prodotti dal modello CALMET, preprocessore meteorologico tridimensionale che interpola, nello spazio e nel tempo, le osservazioni disponibili provenienti da stazioni al suolo e radiosondaggi, e ricostruisce i campi atmosferici sul territorio regionale, su un grigliato regolare (messi a disposizione da ARPA Servizio IdroMeteorologico).

Una volta raccolti i dati necessari alla corretta applicazione del modello, sono state effettuate simulazioni, con stima delle concentrazioni al suolo ed individuazione delle aree di massima ricaduta.

Gli scenari riprodotti, relativi alla diffusibilità in atmosfera su base temporale di un anno, hanno lo scopo di ricostruire l'andamento delle concentrazioni medie annuali in aria, al livello del suolo, degli inquinanti. Le rappresentazioni grafiche di tali simulazioni sono caratterizzate da isolinee di concentrazione, espressa in ug/m³, ottenute dall'elaborazione dei dati forniti dal modello su una matrice che, nel caso in studio, rappresenta una porzione di territorio quadrata (7 Km; 7 Km), centrata sugli inceneritori.

Viene di seguito riportata la rosa dei venti rappresentativa della distribuzione annuale di direzione e velocità del vento, realizzata dall'elaborazione dei dati meteorologici e climatici utilizzati dal modello nelle varie simulazioni effettuate, che evidenzia quali sono le principali direzioni di provenienza del vento e quindi di dispersione degli inquinanti.

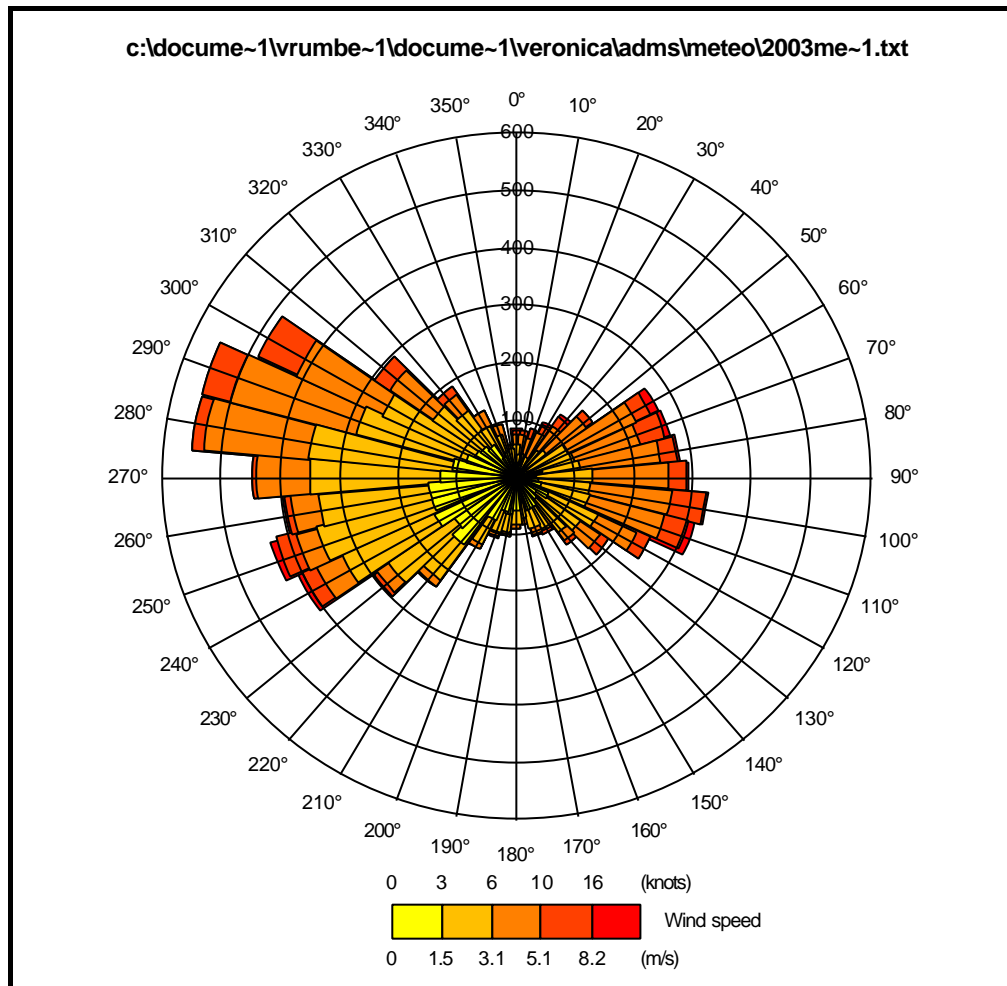
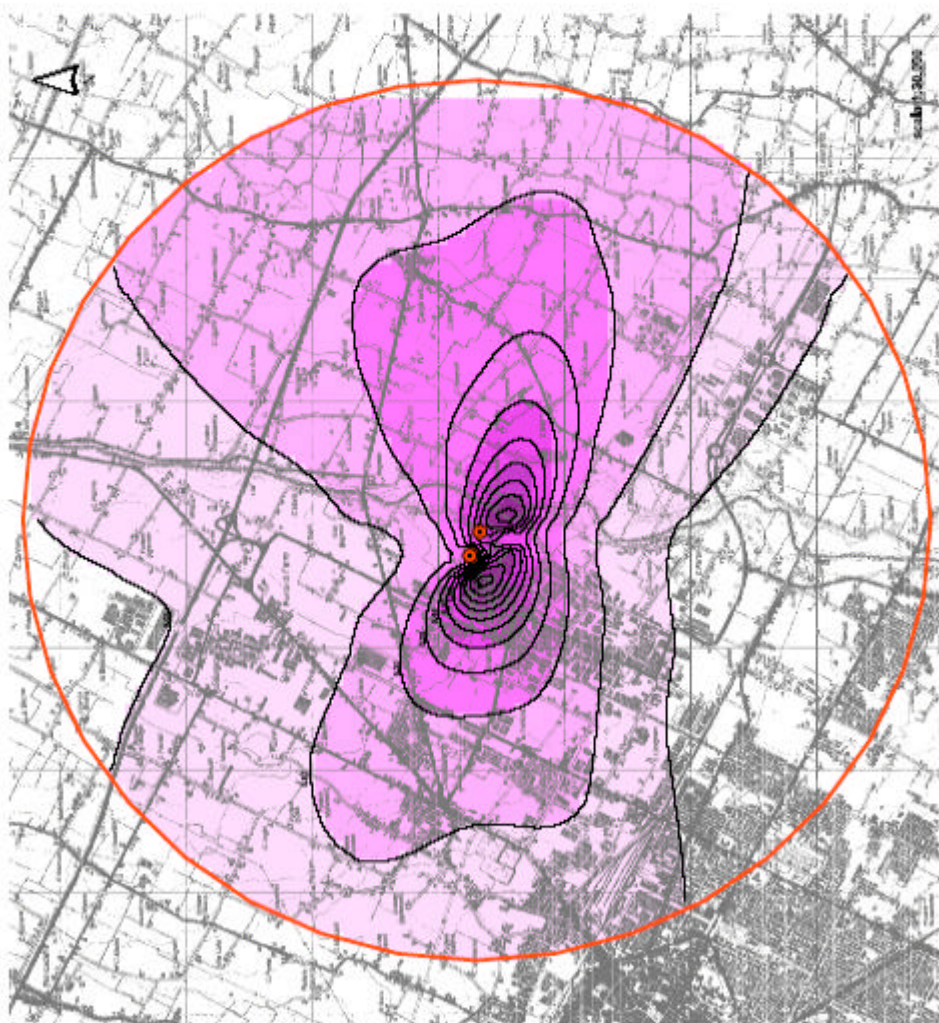


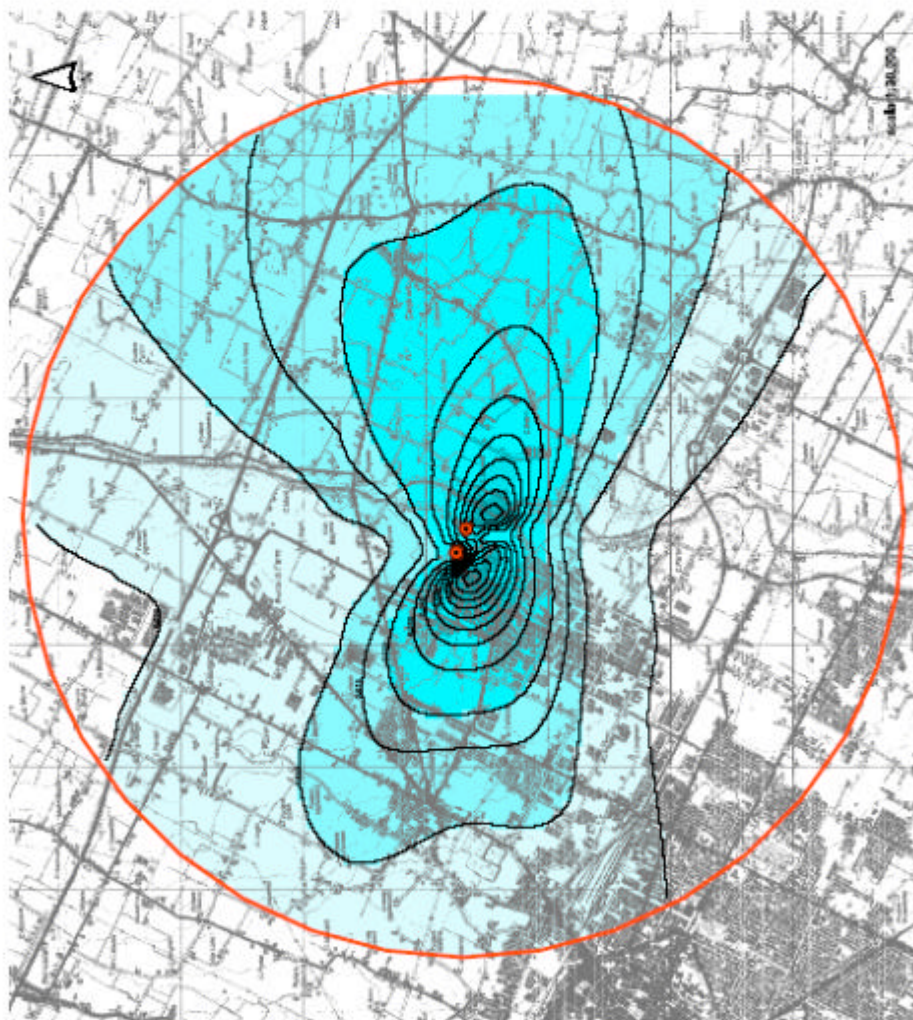
Figura 11. Distribuzione delle frequenze annuali di direzione e velocità del vento

Vengono qui presentati i primi risultati ottenuti dall'applicazione del modello all'area di studio. Le mappe di inquinamento mostrano le concentrazioni medie annuali a livello del suolo degli inquinanti emessi dagli impianti di incenerimento, utilizzando come dati di input i valori limite autorizzati ai sensi del DM 503/97 (allegato 1).

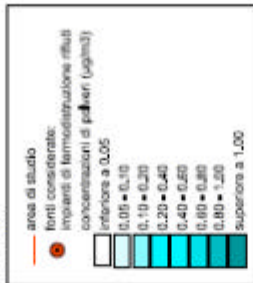
CONCENTRAZIONI MEDIE ANNUALI A LIVELLO DEL SUOLO DI SO₂ (µg/m³)



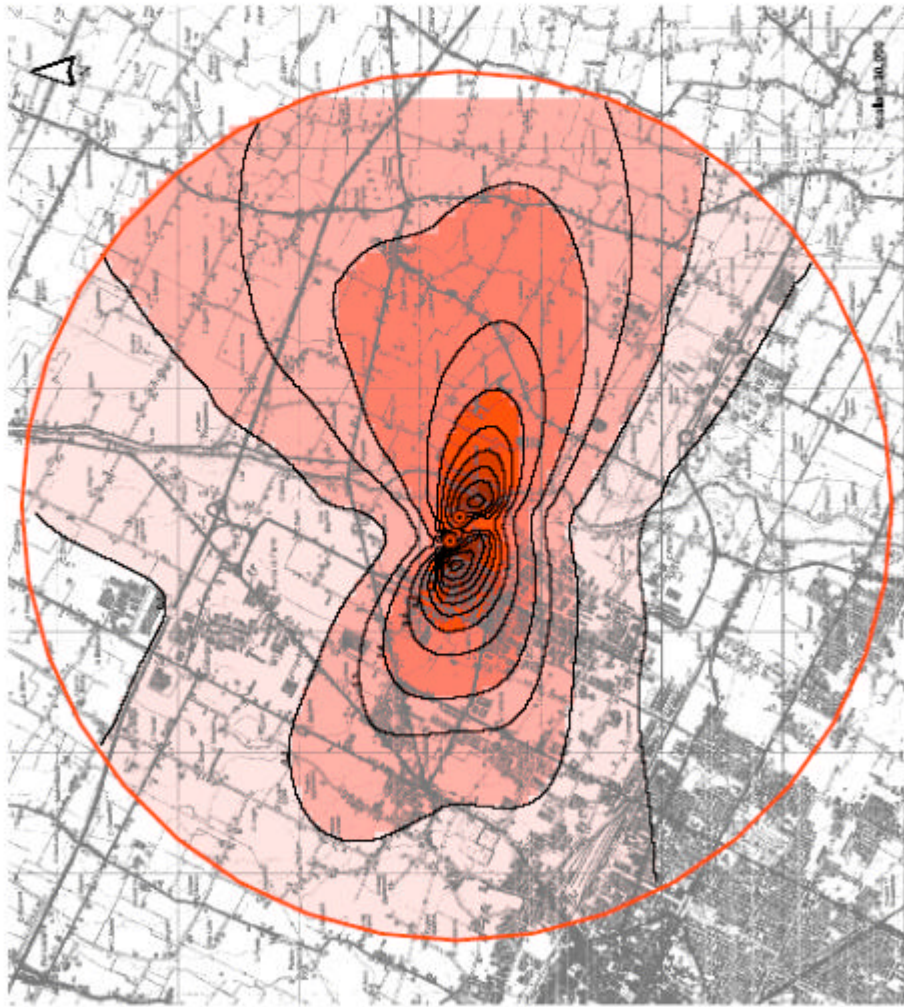
CONCENTRAZIONI MEDIE ANNUALI A LIVELLO DEL SUOLO DI POLVERI ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



LEGENDA



CONCENTRAZIONI MEDIE ANNUALI A LIVELLO DEL SUOLO DI NO₂ (µg/m³)

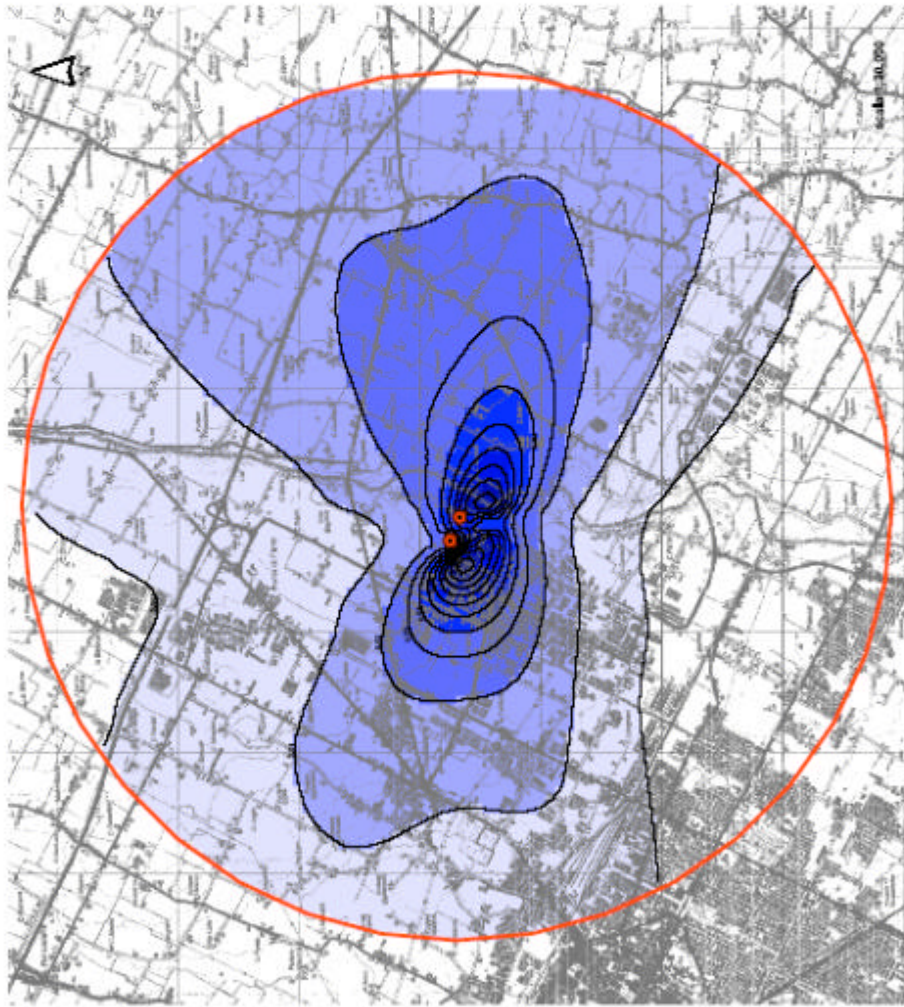


LEGENDA

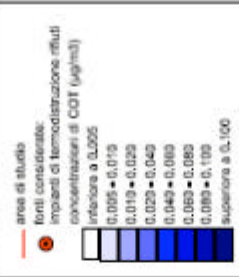
- area di studio
 - fonti considerate
 - impianti di termoidratazione rifiuti
- concentrazioni di NO₂ (µg/m³)
- | |
|-----------------|
| inferiore a 0,1 |
| 0,1 - 0,2 |
| 0,2 - 0,4 |
| 0,4 - 0,6 |
| 0,6 - 1,0 |
| 1,0 - 1,2 |
| 1,2 - 1,6 |
| 1,6 - 2,0 |
| superiore a 2,0 |



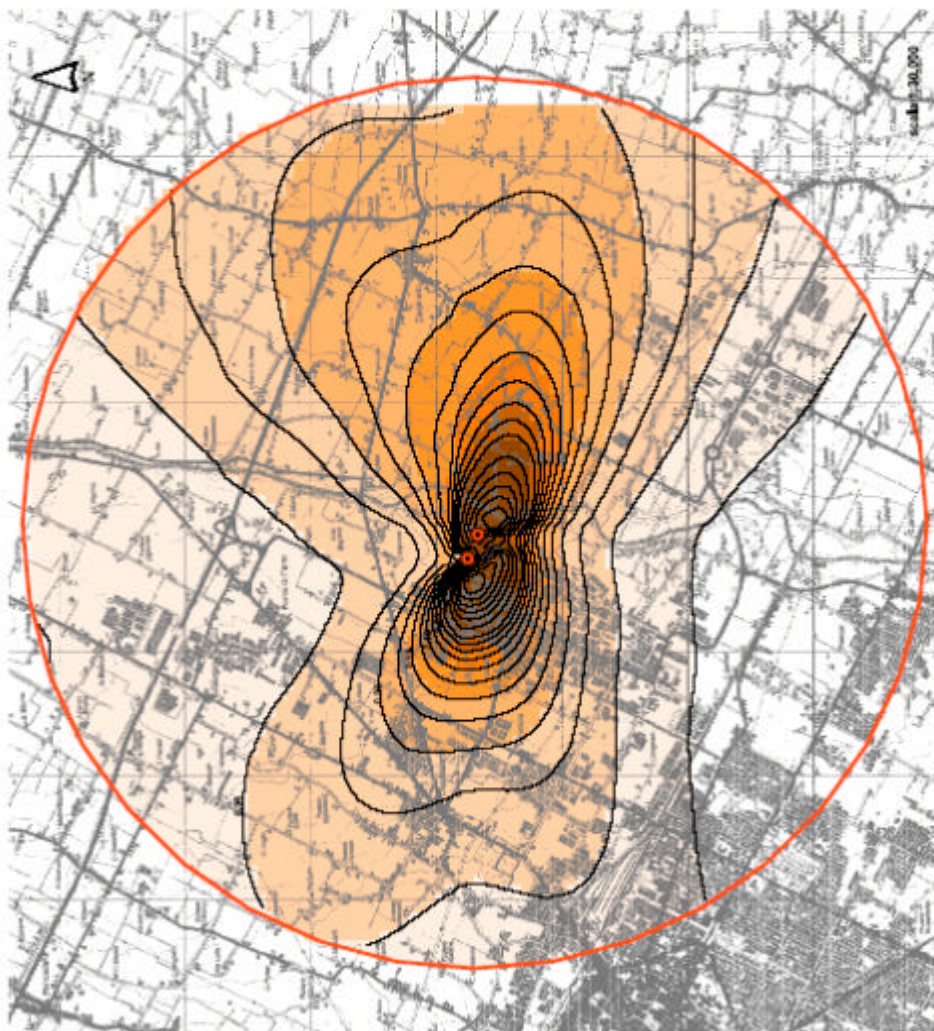
CONCENTRAZIONI MEDIE ANNUALI A LIVELLO DEL SUOLO DI COT ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



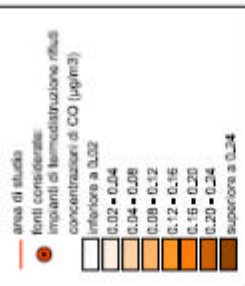
LEGENDA



CONCENTRAZIONI MEDIE ANNUALI A LIVELLO DEL SUOLO DI CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)



LEGENDA



Nella prosecuzione del lavoro, è previsto il completamento della valutazione delle pressioni in atto; includendo cioè le emissioni derivanti dalle altre fonti. Nell'area di studio, inoltre, sono previste alcune sostanziali modifiche alla situazione emissiva in atto; infatti è prevista la costruzione di un nuovo centro commerciale, di uno scalo di interscambio merci, e la costruzione di una tangenziale intorno al centro urbano. Pertanto l'applicazione del modello matematico potrà dare interessanti valutazioni sull'impatto ambientale che queste opere apporteranno alla zona di interesse.

Bibliografia

- ARPA-IA Emilia-Romagna, L.Morselli ed altri, *Studio Ambientale-Territoriale dell'area industriale-urbana di Coriano, Comune di Forlì. Rapporto Finale*, (2001).
- ARPA-IA Emilia-Romagna, L.Morselli ed altri, *Studio Ambientale-Territoriale dell'area industriale-urbana di Coriano, Comune di Forlì. Stato Avanzamento Lavori*, (2004).
- ARPA- Emilia-Romagna, *Linee guida per la predisposizione del documento tecnico di supporto alla redazione dei piani e dei programmi di cui all'art. 8 del d.lgs. 351/99*, (2004).
- S.Bugli, *Inquinamento atmosferico da emissioni industriali*, (2003)
- G:Finzi-G.Brusasca, *La Qualità dell'Aria: Modelli Previsionali e Gestionali*, Masson Ed., (1991)
- F.Pavone, S.Cuffini, D.Anfossi, A.Nanni, G.Tinarelli, *Metodologie integrate per il controllo della qualità dell'aria in aree ad alta urbanizzazione*. (2000).
- F.Desiato, G.Brusasca, M.Deserti, G.Zanini, *I modelli nella valutazione della qualità dell'aria*, Relazione ANPA RTI CTN-ACE 2/2000.
- ANPA / CTN_ACE, *Linee guida agli inventari locali di emissioni in atmosfera*, (2001).
- CERC, *ADMS-Urban User Guide v.2.0*, (2003)

Per la Normativa si rimanda al capitolo 5