**ANALISI DEI PRINCIPALI INQUINANTI ATMOSFERICI IN LOMBARDIA E STUDIO DELLA LORO RELAZIONE CON LE CONDIZIONI METEOROLOGICHE**

**Relatore**: Antonio Candelieri

**Co-relatore** Luca Colombo:

**Tesi di Laurea Magistrale di:**

*Stefano Bassis*

*Matricola 826368*

**Anno Accademico 2021-2022**

# Introduzione

# Introduzione del problema

## Inquinanti dell’aria

L’oggetto dello studio è l’inquinamento atmosferico, esso consiste nel rilascio nell’atmosfera terrestre di agenti fisici, chimici e inquinanti biologici che modificano le caratteristiche naturali atmosferiche causando un effetto dannoso su esseri viventi e ambiente. Questi agenti e inquinanti sono causa di danni ambientali, contribuiscono all’inquinamento termico e al fenomeno di innalzamento di temperatura comunemente detto riscaldamento globale. Inoltre a causa della loro composizione chimica possono reagire con altre sostanze generando sostanze inquinanti.   
Gli agenti inquinanti dell’atmosfera sono molti e di diverso tipo, di seguito sono indicati i principali:

* Particolato atmosferico
* Ossidi di azoto
* Monossido di carbonio
* Ozono

Questi sono gli inquinanti maggiormente studiati e monitorati. Infatti nella rete per il monitoraggio della qualità dell’aria di ARPA Lombardia a queste sostanze sono dedicati il maggior numero di sensori per la loro misurazione.  
L’inquinamento atmosferico è causato da tutte le attività che producono uno o più degli inquinanti sopra elencati. Le attività umane che maggiormente contribuiscono all’accumulo di sostanze nocive nell’atmosfera sono: le attività industriali, gli impianti per la produzione di energia, gli impianti di riscaldamento e il traffico. Queste sono le principali cause di inquinamento antropico ma alcuni fenomeni naturali come l’erosione del suolo contribuiscono, in misura minore, all’inquinamento atmosferico.

Tra i processi direttamente responsabili del rilascio di inquinanti nell’aria è la lavorazione e lo sviluppo di combustibili fossili, infatti questo processo è ritenuto responsabile del 75% dell’inquinamento atmosferico. A causa del forte impatto di questo processo le principali fonti di rilascio di inquinanti nell’atmosfera si annoverano gli impianti chimici industriali, gli inceneritori, i motori a scoppio degli autoveicoli, le combustioni in genere; di seguito vengono brevemente analizzate le principali cause di inquinamento atmosferico.

* **Gli spostamenti:** Il traffico e gli spostamenti con vari mezzi sono la principale causa di emissioni di ossido di azoto e polveri fini. I tubi di scarico costituisco quindi una delle principali cause dell’inquinamento atmosferico soprattutto se non sono dotati di filtri antiparticolato. Infatti le reazioni che portano alla combustione dei carburanti producono sostanze inquinanti che se non vengono adeguatamente filtrate si riversano in modo cospicuo nell’atmosfera. Negli ultimi anni la sensibilità su questo tema è aumentata notevolmente, con essa anche le leggi che definiscono la qualità dei filtri in dotazione ai tubi di scarico. Mezzi di trasporto più vecchi però emettono ancora una quantità considerevole di sostanze inquinanti nell’atmosfera. In particolare Nel 2020 le percentuali di emissioni provenienti dal traffico stradale rispetto alle emissioni complessive erano del: 55% circa per gli ossidi di azoto () e del 20% circa per le polveri fini (PM10, PM2.5).
* **Il Riscaldamento:** Il contributo del riscaldamento residenziale all’inquinamento atmosferico nelle nostre città si avvicina o addirittura supera quello del settore dei trasporti. Infatti grandi quantità di polveri fini sono dovute all’utilizzo di impianti di combustione e di riscaldamento a legna. Dagli anni ’90 questo tipo di inquinamento si è ridotto in maniera determinante grazie al progresso tecnologico. Tuttavia ancora oltre il 56% degli edifici in Italia è in classe energetica G. La diffusione di impianti di riscaldamento tecnologicamente arretrati comporta che questo sia la principale causa di emissioni di polveri sottili e di monossido di carbonio. Infatti nel 2018 Particolarmente consistente il ruolo del riscaldamento residenziale nell’inquinamento atmosferico: da solo, infatti, è responsabile del 64% della quantità di PM2,5, del 53% di PM10 e del 60% di CO.
* **Attività agricole e allevamenti:** Si è stimato che l’agricoltura è stata responsabile nel 2015 del 6,9% delle emissioni totali di gas serra ed è stata pertanto la terza fonte di emissioni di dopo il settore energetico e il settore dei processi industriali. Anche per quanto riguarda le polveri sottili PM10 l’agricoltura si attesta al terzo posto per le emissioni e al secondo posto per le emissioni di Benzopirene. Inoltre le macchine agricole invece emettono ossidi di azoto e particolato. Allo stesso modo, il settore dell’allevamento intensivo è il più grande responsabile delle emissioni di ammoniaca (), dei gas serra, metano (CH₄) e di protossido di azoto (N₂O).  
  Il seguente grafico mostra lo sviluppo dal 1990 al 2018 delle tonnellate di emesse dal settore agricolo.



Figura 1, sviluppo delle tonnellate di emesse dal settore agricolo

* **Attività industriali:** Il settore industriale è responsabile di oltre la metà delle emissioni totali di alcuni principali inquinanti atmosferici e dei gas a effetto serra, nonché di altri importanti impatti ambientali, tra cui il rilascio di inquinanti nell’acqua e nel suolo, la produzione di rifiuti e il consumo energetico. In particolare i processi industriali liberano nell’aria ossidi di azoto, polvere, composti organici volatili e diossido di zolfo e altri agenti inquinanti.

Le sostanze inquinanti presenti nell’atmosfera causano diversi effetti nocivi sulla salute umana, in particolare questo tipo di inquinanti hanno un ruolo in molte patologie a carico dell’apparato polmonare, cardiocircolatorio e del sistema immunitario. Ogni persona sviluppa determinate complicazioni in base all’agente a cui è stato esposto, al grado di esposizione, oltre che alla sua genetica e al suo stato di salute. Inoltre le sostanze inquinanti svolgono un ruolo sinergico con altri agenti nocivi (come il fumo di sigaretta o l’amianto) e contribuiscono a peggiorare sensibilmente i sintomi di malattie pregresse. A conferma di quanto scritto in precedenza l’inquinamento dell’aria causa da solo ogni anno 2,1 a 4,21 milioni di morti. Circa il 20% delle morti premature, secondo le stime dell’OMS, sono da attribuire all’inquinamento.  
Oltre a danni diretti sulla salute umana l’inquinamento atmosferico ha effetto sull’ambiente in generale essendo una delle cause del riscaldamento globale impedendo la dispersione della radiazione infrarossa. Inoltre l’inquinamento atmosferico agisce anche sulla vegetazione infatti l’ozono può provocare perturbazioni nella crescita della vegetazione e incidere sulla vitalità delle piante sensibili.  
Il problema è molto ampio e complesso ma di estrema importanza, nel seguito si descrivono le varie sostanze inquinanti oggetto dello studio.

Il particolato atmosferico

Il particolato è l’insieme delle sostanze atmosferiche presenti in aria, la cui

dimensione può variare da pochi nm a 100 µm, I componenti del particolato sono: solfati, nitrati, ione di ammonio, cloruro di sodio, particelle carboniose, polvere minerale ed acqua. In particolare il PM10 ha diametro aerodinamico inferiore a 10 µm ed è in grado di penetrare nel tratto superiore dell'apparato respiratorio ed è a sua volta composto dall’unione di altre particelle di minore dimensione, per la maggior parte particelle di pm2,5. Il PM2.5 ha diametro aerodinamico inferiore a 2.5 µm, in grado di raggiungere i polmoni ed i bronchi secondari. Esso può derivare da processi legati all’attività umana, è principalmente emesso da alcune attività industriali, dai processi di combustioni relative a centrali termoelettriche, gli inceneritori, il riscaldamento ed il traffico autoveicolare. Nelle aree urbane, il particolato può avere origine anche dall’usura dell’asfalto, dei pneumatici, dei freni, delle frizioni. Inoltre può essere originato da sorgenti naturali come: l'erosione del suolo, gli incendi boschivi, le eruzioni vulcaniche, la dispersione di pollini, il sale marino. La principale problematica relativa alla presenza del pm10 nell’aria è il forte impatto che porta sulla salute della popolazione che risiede nelle aree in cui la sua concentrazione è particolarmente elevata. Queste particelle hanno effetti nocivi sulla salute umana, questa dipende sia dalla composizione chimica che dalla dimensione delle particelle: quelle di diametro superiore a 10 µm si fermano nelle mucose rinofaringee dando luogo ad irritazioni e allergie; quelle di diametro compreso tra 5 e 10 µm raggiungono la trachea e i bronchi; quelle, infine, con diametro inferiore a 5 µm possono penetrare fino agli alveoli polmonari ed interferire con il naturale scambio di gas all’interno dei polmoni. La capacità del particolato di provocare danni alla salute discende anche dalla sua composizione, in particolare dalla presenza di metalli pesanti e idrocarburi policlici aromatici adsorbiti sulla sua superficie. L’esposizione cronica al particolato contribuisce al rischio di sviluppare patologie respiratorie e cardiovascolari così come può aumentare il rischio di tumore polmonare. A conferma di quest’ultima affermazione Nel 2013 l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro ha classificato il particolato come cancerogeno di classe 1. In particolare è stato stimato che riduce l’aspettativa di vita media di 1-2 anni soprattutto a causa delle particelle di pm2,5 di cui è principalmente composto, esse infatti sono un fattore di rischio per alcuni tumori che colpiscono l’apparato respiratorio. Infatti l'Organizzazione Mondiale della Sanità, basandosi su dati raccolti nel 2008, ha stimato che le polveri sottili siano responsabili di circa 2 milioni di decessi nel mondo all'anno. Di seguito viene riportata una tabella raffigurante i dati relativi ai decessi nelle principali città italiane nel triennio 2006-2008 (dati riportati da Ansa).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Città | Decessi medi per anno | Decessi totali sul triennio |
| Torino | 813 | 2439 |
| Milano | 906 | 2718 |
| Verona | 168 | 504 |
| Padova | 140 | 420 |
| Bologna | 291 | 873 |
| Roma | 1508 | 4524 |
| Palermo | 324 | 972 |
| Venezia | 164 | 492 |
| Firenze | 241 | 723 |
| Napoli | 378 | 1137 |
| Bari | 129 | 387 |
| Genova | 443 | 1329 |
| Messina | 124 | 372 |
| Catania | 110 | 330 |
| Trieste | 173 | 411 |
| **Totale** | **5876** | **17628** |

Per prevenire i danni causati dal particolato atmosferico sono state fissate delle soglie per la protezione della protezione umana. Nello specifico le soglie sono le seguenti:

* Limite giornaliero PM10: 50 µg/m³ media oraria da non superare più di 35 giorni/anno
* Limite annuale PM10: 40 µg/m³ media annua
* Limite annuale PM2.5: 25 µg/m³ media annua

Ossidi di azoto

I Successivi inquinanti presi in considerazione sono gli ossidi di azoto, le combinazioni di azoto e ossigeno presenti nell’aria sono classificati in funzione dello stato di ossidazione dell'azoto e sono le seguenti:

* **NO** Ossido di azoto.
* Triossido di azoto (Anidride nitrosa).
* Biossido di azoto.
* Tetrossido di di azoto (Ipoazotide).
* Pentossido di di azoto (Anidride nitrica).

Tra queste le specie chimiche presenti in aria come inquinanti naturali ed antropogenici e che destano maggiori preoccupazioni in termini di inquinamento atmosferico, sono essenzialmente ossido e biossido di azoto (NO e ). Queste sono anche le specie chimiche analizzate in questo studio oltre che le maggiormente monitorate da ARPA Lombardia tra gli ossidi di azoto. Il termine indica la somma del monossido di azoto (NO) e del biossido di azoto (). L'ossido di azoto è un inquinante primario che si forma generalmente dai processi di combustione ad alta temperatura; è un gas a tossicità limitata, al contrario del biossido di azoto. L' ha un odore forte, pungente, è irritante e di colore giallo-rosso.

È responsabile, con altri prodotti, del cosiddetto smog fotochimico, in quanto base per la produzione di una serie di inquinanti secondari pericolosi come l'ozono o l'acido nitrico.  
Lo smog fotochimico è la miscela di composti ossidanti

presente nei bassi strati della troposfera, dove si forma a seguito di complessi

meccanismi di reazione fotochimici. Questi, in presenza di radiazione solare,

coinvolgono quali precursori principali gli idrocarburi non metanici e gli

ossidi di azoto. Lo smog fotochimico contiene un’ampia varietà di sostanze di

interesse ambientale costituite principalmente: dall’ozono, dal biossido di azoto

e da alcuni composti organici reattivi. Questi inquinanti sono in grado di determinare

effetti nocivi sulla salute e sugli ecosistemi e possono provocare danni ai materiali da

costruzione. Contribuisce per circa un terzo alla formazione delle piogge acide.  
Gli ossidi di azoto hanno origine naturale, le fonti più importanti sono: eruzioni vulcaniche, incendi e processi biologici. La maggior quantità di inquinante però è di origine antropica con le combustioni ad alta temperatura, come quelle che avvengono all'interno delle camere di combustione dei motori degli autoveicoli. Altre fonti di ossidi di azoto sono gli le centrali termoelettriche e in genere tutti gli impianti di combustione di tipo industriale.

L'aumento del traffico veicolare degli ultimi anni ha generato un livello crescente delle concentrazioni di ossidi di azoto, specialmente nelle aree urbane. In caso di inquinamento fortuito da monossido di azoto, la concentrazione decade tra i 2 e i 5 giorni, ma nel caso di emissioni continue (ad esempio in aree urbane a forte traffico veicolare), si assiste all'attivazione di un ciclo giornaliero che porta alla produzione di inquinanti secondari, quali il biossido di azoto. Il picco si registra nelle ore a traffico più intenso, per poi scendere nelle ore notturne.  
Tra gli ossidi di azoto, solo l' ha rilevanza tossicologica: Provoca irritazione all'apparato respiratorio, mal di gola e tosse. Questa irritazione, a lungo termine, compromette le funzioni polmonari, procurando bronchiti croniche, asma ed enfisema polmonare. Può causare anche danni all'apparato cardio-vascolare. Già con 15 ppm di , si avvertono irritazioni alle mucose, al naso e agli occhi. Con concentrazioni maggiori, superata la soglia di 10 ppm, il biossido di azoto porta ad avere problemi nella respirazione polmonare ed edemi polmonari. Comporta inoltre un aumento del rischio di tumore.

Riguardo al regno vegetale l'ha effetti minori di quelli generati dal biossido di zolfo, anche se può interferire con gli scambi gassosi a livello fogliare, provocando necrosi o clorosi. Il biossido di azoto provoca inoltre un eccesso di concimazione e un‘acidificazione dei terreni, danneggiando così la vegetazione. Gli ossidi di azoto contribuiscono anche alla formazione delle piogge acide e ha conseguenze importanti sugli ecosistemi acquatici e terrestri.  
Le soglie fissate da Arpa Lombardia per contenere questa tipologia di inquinanti sono le seguenti:

* Limite orario di per la protezione della salute umana: 200 µg/m³ media oraria da non superare più di 18 volte/anno
* Limite annuale di per la protezione della salute umana: 40 µg/m³ media annua
* Soglia di informazione e allarme per l’: 400 µg/m³ misurata su tre ore consecutive
* Livello critico di per la protezione della vegetazione: 30 µg/m³ di

Monossido di Carbonio

Il monossido di carbonio (CO) è un gas tossico, incolore, inodore, insapore e non irritante che, senza ventilazione adeguata, può raggiungere concentrazioni elevate. Si produce per combustione incompleta di qualsiasi materiale organico. La combustione incompleta avviene in presenza di scarso contenuto di ossigeno nell’ambiente. Poiché incolore, inodore, insapore e non irritante può essere inalato in modo impercettibile, fino a raggiungere nell’organismo concentrazioni letali. Il CO presente nell'aria degli ambienti chiusi proviene principalmente dal fumo di tabacco e da fonti di combustione non dotate di aspirazione come: radiatori portatili a kerosene e a gas, caldaie, scaldabagni, caminetti e stufe a legna o a gas. Il monossido di carbonio può anche provenire dall'esterno quando il locale si trova annesso ad un garage o ad un'autofficina o in prossimità di strade con intenso traffico veicolare. Nelle abitazioni, in condizioni normali, i livelli sono compresi tra 1,5 e 4,5 mg/m3. In presenza di processi di combustione, quali sistemi di riscaldamento e di cottura o di fumo di tabacco, e inadeguata ventilazione, le concentrazioni interne possono superare quelle esterne e raggiungere livelli sino a 60 mg/m3. Durante l’inverno nelle abitazioni possono verificarsi concentrazioni superiori a quelle esterne e livelli di inquinamento elevati si riscontrano più frequentemente in edifici vecchi. Le fonti di monossido di carbonio nell’atmosfera variano al variare della zona, questo inquinante infatti è particolarmente legato alla vicinanza di fonti emissive. Nelle aree urbane ad esempio la sorgente principale è rappresentata dal traffico veicolare per cui le concentrazioni più elevate si riscontrano nelle ore di punta del traffico. Tra i vari mezzi di trasporto i veicoli a benzina in condizioni tipiche di traffico urbano rallentato danno il principale apporto alla generazione di monossido di carbonio. Tra i motori degli autoveicoli, quelli a ciclo Diesel ne emettono quantità minime, in quanto la combustione del gasolio avviene in eccesso di aria. La seconda fonte emissiva in aree urbane invece sono gli impianti di riscaldamento di ambienti interni. In aree extraurbane invece le principali fonti emissive di monossido di carbonio sono le centrali termoelettriche e gli inceneritori di rifiuti, dove la combustione avviene in condizioni migliori con formazione di anidride carbonica. Altre sorgenti significative di CO sono le raffinerie di petrolio, gli impianti siderurgici e, più in generale, tutte le operazioni di saldatura.  
Il monossido di carbonio (CO) inalato si lega con l'emoglobina, una proteina presente a livello dei globuli rossi e adibita al trasporto dell'ossigeno, formando la carbossiemoglobina (COHb). Tale legame è tale 200 e le 300 volte più stabile di quello formato tra emoglobina ed ossigeno, in questo modo il CO impedisce il normale trasporto dell'ossigeno ai tessuti periferici, determinando effetti tossici. Per concentrazioni ambientali di CO inferiori a 5 mg/m3, corrispondenti a concentrazioni di COHb inferiori al 3%, non si hanno effetti apprezzabili sulla salute negli individui sani. Diversamente, nei pazienti con malattie cardiache, anche basse concentrazioni possono provocare una crisi anginosa. La crisi anginosa è una malattia che causa un forte dolore al torace. È causata da un temporaneo scarso afflusso di sangue al cuore che determina mancanza di ossigeno al tessuto cardiaco. Il fenomeno prende anche il nome di ischemia; questa però è reversibile e non arriva al punto di provocare danno cardiaco permanente. La malattia si manifesta abitualmente con dolore toracico improvviso, acuto e transitorio. A concentrazioni maggiori si verificano emicrania, confusione, disorientamento, capogiri, visione alterata e nausea. Concentrazioni particolarmente elevate possono causare coma e morte per asfissia. La severità delle manifestazioni cliniche da intossicazione da CO dipende dalla sua concentrazione nell’aria inspirata, dalla durata dell’esposizione e dalle condizioni di salute delle persone coinvolte. Particolarmente suscettibili sono gli anziani, le persone con affezioni dell’apparato cardiovascolare e respiratorio, le donne in stato di gravidanza, i neonati ed i bambini in genere. Circa l’80% dei casi di avvelenamento da CO rilevati dai Pronto Soccorso, si verifica tra le mura domestiche. In Italia le statistiche ufficiali più recenti riportano 500-600 morti l’anno, di cui circa i 2/3 per intossicazione volontaria. Attualmente è attivo un dibattito sull’esistenza di intossicazione cronica da CO. In alcuni soggetti esposti per lungo tempo all’assorbimento di piccole quantità dell’inquinante, è stata notata una sintomatologia caratterizzata da astenia, cefalea, vertigini, nevriti, sindromi parkinsoniane ed epilettiche, aritmie, crisi anginose.  
La soglia fissate da Arpa Lombardia per contenere questo inquinante è la seguente:

* Limite orario di CO per la protezione della salute umana: 10 mg/m³ come media mobile 8h

Ozono

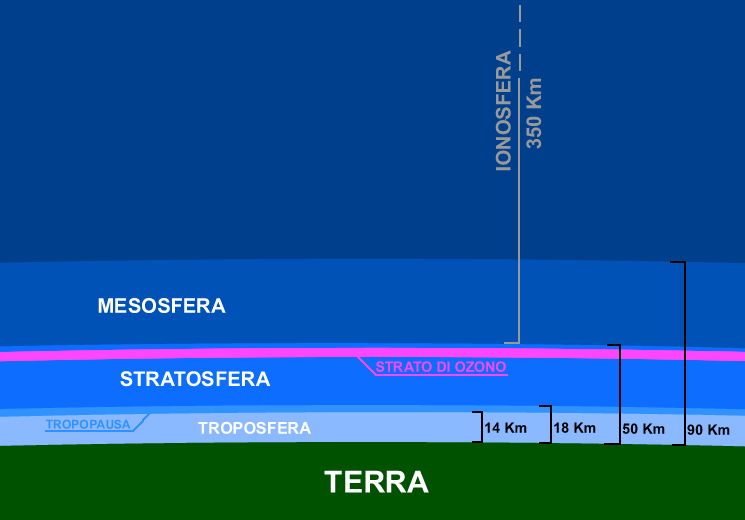
L'ozono è un gas formato da tre atomi di ossigeno (). In natura si trova in concentrazioni rilevanti negli strati alti dell'atmosfera terrestre, dove costituisce una fascia protettiva nei confronti della radiazione ultravioletta del sole. Questa zona dell’atmosfera è detta stratosfera. L'ozono è indispensabile alla vita sulla terra perché impedisce di far passare i raggi solari pericolosi per la salute umana, tra questi i più noti sono i raggi ultravioletti.  


Figura 2, descrizione dell'atmosfera terrestre

Nela troposfera invece è presente in basse concentrazioni, tranne nelle aree in cui la presenza di alcuni inquinanti chimici in cui, se in concomitanza di fattori meteo-climatici favorevoli, si può avere aumento della concentrazione. L’ozono è un gas che presenta un odore pungente ed è molto reattivo. Nella troposfera si forma a seguito dalla reazione tra ossidi di azoto, composti organici volatili e raggi solari. La reazione a seguito della quale si ha la produzione di ozono è la seguente: NO + O3 frecce NO2 + O2. L’ozono si forma quindi a seguito della reazione tra biossido di azoto e ossigeno, questa reazione produce ossido di azoto e ozono. La generazione di ozono nella troposfera è strettamente legata alla presenza di biossido di azoto per cui le cause della produzione di questi due inquinanti sono molto simili tra loro. L’ozono inoltre è molto sensibile al movimento delle masse d’aria e a differenza del monossido di carbonio non è strettamente legato alla vicinanza di fonti emissive. Invece è maggiormente legato ad alcune variabili meteorologiche quali: l'intensità della radiazione solare, la temperatura, la direzione e la velocità del vento. Per questo motivo si osservano delle sistematiche variazioni stagionali nei valori di ozono. I periodi tardo-primaverili ed estivi, le particolari condizioni di alta pressione, elevate temperature e scarsa ventilazione, favoriscono il ristagno e l'accumulo degli inquinanti. Il forte irraggiamento solare innesca una serie di reazioni fotochimiche che determinano concentrazioni di ozono più elevate rispetto al livello naturale. Questo livello corrisponde ad una concentrazione compresa tra i 20 e gli 80 microgrammi per metro cubo di aria. I valori massimi sono raggiunti nelle ore più calde della giornata, dalle 12 alle 18, per poi scendere durante le ore notturne. Altre fonti generative di ozono di origine antropica sono strumenti elettrici ad alto voltaggio, responsabili di elevate concentrazioni in ambienti chiusi. Fonti di origine naturale invece sono: erosione del suolo, emissioni vulcaniche e spore.  
Gli effetti dell’ozono sulla salute umana sono simili a quelli del biossido di azoto, questo a causa della forte relazione chimica tra i due inquinanti. Infatti i principali danni causati da questo inquinante sono relativi alle vie respiratorie e consistono in: irritazioni alle mucose oculari e alle prime vie aeree, tosse, fenomeni broncostruttivi ed alterazione della funzionalità respiratoria. Studi epidemiologici condotti in popolazioni urbane esposte ad ozono mostrano sintomi irritativi sulle mucose oculari e sulle prime

vie respiratorie per esposizioni di alcune ore a livelli di ozono a partire da 0,2 mg/m3 in media oraria. In bambini ed in giovani adulti sono state osservate riduzioni transitorie della funzionalità respiratoria, a livelli inferiori di ozono, a partire da 0,12 mg/m3 in media oraria.  
L’ozono è l’inquinante atmosferico di gran lunga più nocivo per la vegetazione. Ha un effetto tossico sulle cellule poiché ostacola la fotosintesi e quindi anche la crescita delle piante. A causa dei valori attuali d’inquinamento, sono stati osservati e dimostrati danni alle colture e perdite di raccolto che, a seconda della coltura, della regione e dell’anno, oscillano tra il 5 e il 15 per cento. L’ozono nuoce anche all’economia forestale. Combinato con altre sostanze inquinanti, rappresenta infatti un fattore di stress per gli alberi ed è corresponsabile dei danni alle foreste. Le elevate concentrazioni estive di ozono danneggiano visibilmente le piante e la vegetazione, soprattutto le latifoglie, i cespugli e le colture. Una prolungata esposizione all’ozono può provocare perturbazioni nella crescita della vegetazione e incidere sulla vitalità delle piante sensibili. L’esposizione indebolisce gli alberi e rallenta la crescita del legno, due fenomeni che hanno ripercussioni negative soprattutto sulla stabilità dei boschi di protezione. Una prolungata esposizione all’ozono causa anche una riduzione della produzione agricola, specie per il grano e le patate. Le perdite variano tuttavia a seconda delle colture, delle regioni e delle situazioni climatiche. Alcuni studi hanno mostrato che il perdurare di un elevato carico di ozono modifica la biodiversità, riduce la produzione di coltivazioni e prati, mina la resistenza della vegetazione a parassiti e altri agenti patogeni.  
Le soglie fissate da Arpa Lombardia per il controllo di questo inquinante sono le seguenti:

* Limite di O3 per la protezione della salute umana: 120 µg/m³ come MM8 da non superarsi per più di 25 volte all’anno
* Soglia di osservazione per l’O3: 180 µg/m³ media oraria
* Soglia di allarme per l’O3: 240 µg/m³ media oraria
* Livello critico di O3 per la protezione della vegetazione: 8.000 µg/m³·h come media su 5 anni AOT40 calcolato dal 1 maggio al 31 luglio
* Livello critico di O3 per la protezione delle foreste: 18.000 µg/m³·h come media su 5 anni AOT40 calcolato dal 1 aprile al 30 settembre.

## Condizioni Meteorologiche

### Gli inquinanti emessi in atmosfera da una sorgente sono soggetti a fenomeni di diffusione e dispersione. Un ruolo di fondamentale importanza è giocato delle variabili meteorologiche poiché il trasporto delle sostanze immesse nell’aria è determinato dal movimento delle masse d’aria. La concentrazione degli inquinanti nell’atmosfera è determinata quindi non solo dal numero e dall’intensità delle sorgenti di inquinamento, dalla distanza da tali sorgenti e dalle trasformazioni chimiche e fisiche cui vengono sottoposti. Gli inquinanti sono influenzati anche 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 degli inquinanti è dovuta all’intensità del vento. 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. In genere, a parità di emissione d’inquinanti dalle sorgenti, le concentrazioni in aria a piccola scala 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. Viceversa, le concentrazioni diventano elevate in presenza di correnti discendenti, in condizioni di alta pressione di notte e con vento debole, oppure in condizioni di nebbia persistente che provoca processi di accumulo. Nella 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, tendono a salire verso l’alto e vengono sostituite da masse d’aria più fredde provenienti dall’alto. Questo processo porta al rimescolamento degli strati inferiori della troposfera. In alcuni casi, tuttavia, la temperatura dell’aria ad una certa altezza, può avere un andamento crescente con l’altitudine, per poi cominciare a decrescere di nuovo. Questa zona detta strato di inversione ostacola gli 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 al di sotto dello strato di inversione, con conseguente aumento della loro concentrazione.

### Gli elementi che caratterizzano una inversione sono: lo spessore, la quota e l’intensità del gradiente di temperatura. Il gradiente di temperatura indica la direzione e la velocità con cui la temperatura varia. Lo spessore dell’inversione è definito dalla distanza tra la quota di inizio e fine dell’inversione. L’inversione termica può essere al suolo o in quota. Questi due casi possono verificarsi su terreni liberi da costruzioni: negli agglomerati urbani infatti le inversioni avvengono raramente. L’inversione termica porta a un mescolamento degli inquinanti nei primi strati. Tale situazione porta all’accumulo degli inquinanti e ad una loro diffusione in area urbana poiché i gas vengono emessi al di sotto dell’inversione e ne rimangono al di sotto. L’inversione termica è un fenomeno tipico dei mesi autunnali e 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. A terra invece si forma un cuscinetto d’aria fredda pesante mentre al di sopra si trova aria calda più leggera. Questa stratificazione è molto stabile tanto che può durare alcune decine di ore e impedisce qualsiasi circolazione verticale dell’aria fredda più in basso. Di conseguenza l’inversione termica impedisce la dispersione degli inquinanti immessi in questi strati dell’atmosfera. Vento e temperatura giocano un ruolo importante nella formazione di fenomeni di inversione termica infatti un vento forte porta a rimescolamenti di masse d’aria a diverse temperatura. Una bassa temperatura invece porta a un maggior utilizzo di impianti di riscaldamento i quali aumentano la temperatura negli strati bassi della troposfera. In questo modo il gradiente di temperatura aumenta e questo favorisce il verificarsi di fenomeni di inversione termica. Inoltre come scritto in precedenza gli impianti di riscaldamento generano la formazione di molti inquinanti i quali non vengono dispersi a causa dell’inversione termica. In primo tipo di inversione termica che spesso causa di eventi di inquinamento in aree urbane è l’inversione di tipo radiativo. Questa 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 è rapido al punto che lo strato d’aria adiacente alla superficie terrestre diviene più freddo dello strato immediatamente superiore. Questo porta alla formazione di uno strato di inversione in genere a quote piuttosto basse, intorno ai 50 metri. Un’inversione termica così generata 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 che si verifica in aree prossime al mare è quella generata dalla brezza di mare, questo fenomeno è diffuso in particolare nell’area di Roma). La brezza consiste nello spostamento orizzontale delle masse d’aria che si trovano al di sopra di una superficie più calda, il mare nelle ore notturne, verso una massa d’aria o una superficie più fredda, la terra. Questo tipo di inversione ha in genere un’altezza maggiore di quella di tipo radiativo, intorno alle poche centinaia di metri e la sua intensità e persistenza è spesso la causa dell’insorgere nell’area romana di fenomeni di inquinamento 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. Se questo non avviene, l’inversione può persistere in quota anche per diversi giorni, innescando un fenomeno di smog fotochimico. Il fenomeno si prolunga con intensità crescente per più giorni consecutivi. Un fenomeno meteorologico come una precipitazione è in grado di rompere l’equilibrio dato da un’inversione termica. Per questo motivo le precipitazioni giocano un ruolo importante nella dispersione degli inquinanti atmosferici al suolo.

### Precipitazioni La pioggia è un fenomeno facente parte delle precipitazioni atmosferiche, queste ultime comprendono tutti i fenomeni di trasferimento di acqua allo stato liquido o solido dall'atmosfera al suolo. Inoltre è uno degli stadi del ciclo idrologico ovvero l’insieme dei fenomeni di flusso e circolazione dell'acqua all'interno dell'idrosfera. Le precipitazioni non sono originate da tutti i tipi di nuvole, ma soltanto da quelle caratterizzate da un notevole sviluppo in verticale, come nembostrati e cumulinembi. Affinché si formino le precipitazioni, è necessario che le goccioline d'acqua contenute all'interno delle nubi diventino tanto grosse da non poter più essere sostenute da correnti ascensionali presenti nelle nubi stesse, per cui cadono al suolo per effetto della forza di gravità. Le gocce di pioggia si formano per coalescenza cioè per progressiva unione, aggregazione di più goccioline. Nei centri urbani le precipitazioni svolgono inoltre un importante ruolo nel miglioramento della qualità dell’aria, rimuovendo dalla troposfera le sostanze inquinanti in essa presenti. La precipitazione atmosferica più comune è la pioggia mentre meno frequenti sono neve, grandine, rugiada e brina. Le precipitazioni vengono in genere misurate utilizzando due tipi di strumenti: pluviometro e pluviografo. Il primo strumento consiste in un piccolo recipiente, in genere di forma cilindrica, ha il compito di raccogliere e conservare la pioggia che si è verificata in un certo intervallo di tempo, sul territorio dove è installato. In questo modo è possibile ottenere una misura giornaliera delle precipitazioni in una data località. Il pluviografo invece è uno strumento che ha il compito di registrare la pioggia verificatasi a una scala temporale inferiore al giorno. L’ammontare della pioggia si misura in millimetri (mm) attraverso i pluviometri o pluviografi: 1 mm di pioggia equivale a 1 litro d'acqua caduto su una superficie di 1 m². Per avere un'idea si può considerare che in Italia piovono dai 100 mm ai 3000 mm all'anno. Un giorno di pioggia fine non porta più di 1 mm d'acqua, mentre un temporale lungo e violento porta anche 30 mm d'acqua. Questo fenomeno atmosferico si è visto essere legato alla concentrazione di pm10 nell’atmosfera, in particolare uno studio dell’Istituto Superiore di Sanità (Dina D, Notaro C (2008) Interazione di alcuni parametri meteorologici sulla qualità dell’aria) analizza il legame tra pioggia e vento con la concentrazione di pm10 nell’atmosfera. In particolare analizza quante volte la concentrazione di pm10 è diminuita in seguito a una giornata con precipitazioni e riporta i seguenti risultati relativi alla decrescita di quest’ultima in relazione alle precipitazioni. I dati sono stati raccolti dalla stazione di rilevamento del materiale particellare (PM) dell’ISS, ubicata in un’area semicentrale di Roma. Dai risultati mostrati si nota il ruolo svolto dalla pioggia nella variazione di concentrazione di pm10 nell’atmosfera.

### Variazione della concentrazione di pm10 a seguito di una giornata con precipitazioni.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Variazione della concentrazione di pm10 a seguito di una giornata con precipitazioni | Probabilità di decrescita della concentrazione di pm10 | Intervallo di confidenza al 95% della probabilità precedentemente calcolata |
| PM10 decresce in caso di pioggia | 62.85 % | 60.92 – 64.78 |
| PM10 decresce in caso di non pioggia | 46.15 % | 44.16 – 48.14 |

### Temperatura

La temperatura è la proprietà fisica che registra il trasferimento di energia termica da un sistema a un altro. Due sistemi si trovano in equilibrio termico se non avviene nessun trasferimento di energia. Due sistemi in equilibrio termico sono alla stessa temperatura. Quando esiste una differenza di temperatura, il calore tende a muoversi dal sistema a temperatura più alta verso il sistema a temperatura più bassa, fino al raggiungimento dell'equilibrio termico. Il calore si può trasferire tramite conduzione, convezione o irraggiamento. La temperatura non è una misura diretta della quantità di energia termica o calore di un sistema. Però, con buona approssimazione, se a un sistema viene fornito calore, la sua temperatura aumenta, se invece gli viene sottratto calore, la sua temperatura diminuisce. La temperatura di un sistema è direttamente legata al movimento dei suoi atomi e delle sue molecole. Un incremento di temperatura corrisponde a un incremento del movimento degli atomi. Per questo, la temperatura viene anche definita come l'indice dello stato di agitazione molecolare del sistema.   
La temperatura può essere misurata in vari modi che variano in base al valore che viene assegnato a una temperatura nulla e in base alla quantità di calore necessaria per innalzare di un grado la temperatura. Le scale di misurazione si dividono in due parti: le scale relative come le scale Celsius o Fahrenheit e le scale assolute come la scala assoluta.  
Le scale relative sono più antiche ed empiriche, hanno come riferimenti il punto di fusione dell’acqua e quello di ebollizione. La scala Celsius pone a 0 gradi Celsius (°C) il punto di fusione del ghiaccio e il valore di 100 °C corrisponde al punto di ebollizione dell'acqua a livello del mare. La scala Fahrenheit invece pone a 32 gradi Fahrenheit (F) il punto di fusione del ghiaccio e a 212 F il punto di ebollizione dell’acqua sempre al livello del mare.  
Le scale assolute si basano sulla definizione di temperatura assoluta che si definisce come la temperatura misurata da una scala in cui lo zero corrisponde allo zero assoluto. La scala più rappresentativa di questo insieme è la scala Kelvin che pone il valore di 0 gradi Kelvin (°K) allo zero assoluto e definisce un grado come della temperatura del punto triplo dell'acqua. La seguente tabella mette a comparazione le scale fin qui indicate

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Descrizione** | **Kelvin** | **Celsius** | **Fahrenheit** |
| Zero assoluto | 0 | −273,15 | -459,67 |
| Temperatura più bassa registrata sulla superficie terrestre | 184 | −89,2 | −128,2 |
| Temperatura di fusione dell'acqua a pressione standard | 273.15 | 0 | 32 |
| Temperatura media della superficie terrestre | 288 | 15 | 59 |
| Temperatura media di un corpo umano | 310 | 36.8 | 98.2 |
| Temperatura più alta mai registrata sulla superficie terrestre | 331 | 53.9 | 129,0 |
| Temperatura di ebollizione dell'acqua a pressione standard | 373,15 | 100 | 212 |

Data una scala di misura per rilevare concretamente la temperatura in un luogo e in un istante temporale esistono diversi modi, basati sulle proprietà fisiche di un determinato materiale in condizioni di temperatura note. Uno degli strumenti di misura più comunemente utilizzati per la misurazione della temperatura è il termometro a liquido. Esso consiste di un tubicino capillare di vetro riempito con mercurio o altro liquido. L'incremento di temperatura fa espandere il liquido e la temperatura viene determinata misurando il volume del fluido all'equilibrio. Altri strumenti meno noti sono la termocoppia, basato sull'effetto Seebeck, e la termoresistenza che sfrutta la resistività dei materiali.  
Il legame tra temperature registrate e inquinamento è noto con il nome di effetto serra, fenomeno secondo il quale un elevato numero di gas serra nell’aria provocherebbe un innalzamento della temperatura al suolo. Si definiscono gas serra i gas presenti nell’atmosfera che incidono sul bilancio energetico della terra. I principali gas serra, ovvero biossido di carbonio (CO2), metano (CH4) e protossido di azoto (N2O), sono presenti per natura nell’atmosfera in concentrazioni limitate. L’effetto serra è il meccanismo secondo il quale una parte dei raggi solari che penetrano nell’atmosfera e raggiungono la superficie terrestre viene riflessa, mentre una parte dell’energia dei raggi solari viene assorbita e convertita in calore. L’anidride carbonica nell’atmosfera impedisce che il calore generato esca di nuovo completamente dall’atmosfera. Questo meccanismo è detto effetto serra naturale. Senza l’effetto serra, le temperature del nostro pianeta sarebbero costantemente sotto zero. L’effetto serra antropico si somma agli sviluppi naturali precedentemente introdotti. L’effetto serra antropico deriva dall’attività umana, che produce emissioni aggiuntive di gas serra, le quali ostacolano la fuoriuscita delle radiazioni termiche dall’atmosfera e sono quindi responsabili di un di accumulo di calore. Tale situazione è causata dall’industrializzazione e dalla conseguente combustione di fonti di energia fossile come il carbone, il petrolio e il gas naturale, e anche dallo sfruttamento di grandi superfici di terreno, ad esempio con il disboscamento delle foreste pluviali tropicali. La temperatura media della superficie terrestre è aumentata di più di 1°C dall’industrializzazione, quindi si è trattato di un aumento insolitamente rapido. Ciascuno degli ultimi quattro decenni è stato più caldo di tutti i decenni precedenti a partire dal 1850. Questo fenomeno modifica l’equilibrio naturale provocando l’aumento di temperatura indicato.

### Vento

L’ultimo fenomeno meteorologico preso in considerazione è il vento nelle sue componenti di intensità e direzione. Il vento, in meteorologia, viene definito come il movimento di una massa d'aria atmosferica da un'area con alta pressione (anticiclonica) a un'area con bassa pressione (ciclonica). È causato dalle differenze di pressione atmosferica che spingono l'aria da zone di alta pressione a zone di bassa pressione per effetto della forza di gradiente. Quest’ultima è una forza generata dalla differenza di pressione attraverso una superficie e si definisce: date due regioni a pressione differente in un mezzo, si definisce forza di gradiente la differenza che genera un'accelerazione dal punto di pressione più alta a quello di pressione più bassa. La forza di gradiente è responsabile dello spostamento delle masse d’aria mentre la forza di Coriolis è responsabile della deviazione di queste masse influenzandone la direzione. A quote basse la direzione del vento è influenzata anche da altri fattori, i più influenti sono: l’orografia del territorio e l’attrito causato dall’immersione o dall’emersione della superficie terrestre. L’altra componente d’interesse è la velocità del vento, dovuta alla forza di gradiente, cresce all’aumentare della differenza di pressione tra le due regioni che causano lo spostamento delle masse d’aria. Infatti, Considerando una generica pressione P, la forza di gradiente può essere espressa in forma vettoriale come a P dove ρ è la densità del fluido su cui si esercita la forza, nel caso del vento l’atmosfera, P è il gradiente della pressione generica P, e è l’accelerazione del fluido in questione, nel caso del vento l’atmosfera. La formula sopra riportata indica l’accelerazione dovuta alla forza di gradiente. Lo studio dell’Istituto Superiore di Sanità (Dina D, Notaro C, Interazione di alcuni parametri meteorologici sulla qualità dell’aria) analizza quante volte la concentrazione di PM10 è diminuita in seguito a una giornata con forti raffiche di vento e riporta i seguenti risultati relativi alla decrescita di concentrazione di pm10 in relazione al vento. I dati sono stati raccolti dalla stazione di rilevamento del materiale particellare (PM) dell’ISS, ubicata in un’area semicentrale di Roma.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Variazione della concentrazione di pm10 a seguito di una giornata con forte vento | Probabilità di decrescita della concentrazione di pm10 | Intervallo di confidenza al 95% della probabilità precedentemente calcolata |
| PM10 decresce in caso di vento | 58.11% | 56.14 – 60.08 |
| PM10 decresce in caso di non vento | 41.69% | 39.72 – 43.66 |

Da questi risultati si nota il ruolo svolto dal vento nella variazione di concentrazione di pm10 nell’atmosfera. Infatti il vento è in grado di spostare le masse d’aria sia a livello longitudinale che a livello latitudinale portando gli inquinanti in zone dell’atmosfera in cui possono dissolversi e perdere la loro tossicità. Inoltre come evidenziato in precedenza il vento è in grado di rompere lo strato di inversione termica che tende a concentrare gli inquinanti al livello del suolo. Nel caso in cui la componente ventosa non dovesse disperdere le molecole inquinanti a livello latitudinale si genera una situazione di pericolo in cui gli inquinanti prodotti in una zona del globo possono essere trasportati a diverse decine di kilometri di distanza. Se si verifica questa situazione si potrebbe riscontrare la presenza di molecole inquinanti in zone impreviste in cui potrebbero potenzialmente causare danni maggiori rispetto a quelli che causerebbero nella zona di produzione. Prendendo ad esempio l’ozono è possibile trovare molecole di questo inquinante in zone lontane dalla zona di produzione causando danni imprevisti. Una concreta possibilità è che molecole di ozono prodotte in zone trafficate urbane vengano trasportate in zone boschive in cui sono in grado di causare danni importanti alla vegetazione.

# Data engineering

# Data analysis

## Statistiche descrittive

## Impatto del lockdown

## Modelli

### Modello descrittivo

### Modello predittivo

# Risultati

# Conclusioni

# Ringraziamenti

# Bibliografia Dina D, Notaro C (2008) Interazione di alcuni parametri meteorologici sulla qualità dell’aria