

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Biomedica

Anno Accademico 2024/2025

Analisi e studio della situazione ambientale ad Alessandria: rischi per la salute e prospettive future



**Politecnico
di Torino**

Relatori:
Prof. Umberto Lucia
Ing. Giulia Grisolia

Candidato:
Alessandro Bartelli
S317451

Sommario

La Pianura Padana è tra i territori più inquinati d'Europa; questa criticità è determinata dalla combinazione di elevate pressioni antropiche e di condizioni orografiche e meteo-climatiche sfavorevoli che impediscono la dispersione degli inquinanti. Il presente lavoro di tesi ha l'obiettivo di esaminare il caso specifico della città di Alessandria, adottando una metodologia descrittivo – analitica della situazione critica in cui si trova. Dopo aver fornito le basi fisiologiche del corpo umano, aver analizzato i principali meccanismi di tossicità degli inquinanti e i relativi rischi per la salute umana, si passa ad un'analisi della qualità delle matrici ambientali del territorio e i fattori che potrebbero aver contribuito alla loro contaminazione.

Questa analisi ha seguito una metodologia basata sull'acquisizione, l'elaborazione e l'interpretazione di dati ufficiali dell'ARPA Piemonte. Nello specifico, sono stati analizzati sia i trend storici che i dati recenti relativi alla qualità dell'aria dalle centraline di monitoraggio urbano. Per l'acqua, invece, è stato esaminato lo stato chimico di un tratto del Fiume Bormida e della falda superficiale, con un focus su PFAS (Per- and polyFluoroAlkyl Substances) e metalli pesanti. Infine, l'analisi del suolo si è basata sui report ARPA relativi alla contaminazione da metalli e PFAS nella Valle Bormida.

Tutti i valori sono stati confrontati con i limiti normativi attuali, i futuri target UE 2030 e le linee guida dell'OMS.

I risultati per l'aria mostrano un trend decennale in miglioramento per PM10 e PM2.5; tuttavia, le medie annuali 2024-2025, pur rispettando gli attuali limiti normativi, rimangono significativamente superiori agli obiettivi UE 2030 e alle raccomandazioni OMS. L'NO₂ rispetta i limiti futuri, ma presenta concentrazioni quasi doppie rispetto a quelle raccomandate dall'OMS, mentre l'O₃ evidenzia un andamento costante negli anni, senza miglioramento. Le acque superficiali sono definite da uno stato chimico "non buono", con superamenti persistenti degli Standard di Qualità Ambientale (SQA) per il PFOS (PerFluoroOctaneSulfonic acid). Le acque di falda superficiali presentano uno stato chimico definito come "scarso", con criticità relative alla presenza di cromo esavalente (Cr VI). Infine, i suoli della Valle Bormida evidenziano concentrazioni medie di cromo e nichel superiori ai limiti normativi e una contaminazione diffusa da PFAS.

L'analisi dimostra che Alessandria è caratterizzata da una forte criticità ambientale, aggravata da un pesante inquinamento storico. Nonostante il rispetto di alcuni parametri normativi attuali, il confronto con i futuri limiti UE 2030 e, soprattutto, con le stringenti linee guida OMS, rivela un rischio sanitario significativo per la comunità. Le misure attuali appaiono insufficienti per raggiungere gli obiettivi di salute pubblica a breve termine.

Il lavoro si conclude con la presentazione della possibilità di integrare soluzioni tecnologiche innovative con un'estensione delle misure sanitarie, al fine di ottenere una reale tutela della popolazione esposta.

Abstract

The Po Valley is among the most polluted areas in Europe; this critical situation is determined by the combination of high anthropogenic pressures and unfavorable orographic and weather-climatic conditions that impede the dispersion of pollutants. This thesis aims to examine the specific case of the city of Alessandria, adopting a descriptive-analytical methodology to address its critical situation. After providing the physiological basis of the human body and analyzing the main toxicity mechanisms of pollutants and the associated risks to human health, the analysis moves on to the quality of the territory's environmental matrices and the factors that may have contributed to their contamination. This analysis followed a methodology based on the acquisition, processing, and interpretation of official data from ARPA Piemonte. Specifically, both historical trends and recent air quality data from urban monitoring stations were analyzed. For water, the chemical status of a stretch of the Bormida River and the surface aquifer was examined, focusing on PFAS (Per- and PolyFluoroAlkyl Substances) and heavy metals. Finally, the soil analysis was based on ARPA reports concerning metal and PFAS contamination in the Bormida Valley.

All values were compared with current regulatory limits, future EU 2030 targets, and WHO guidelines.

The results for air show a ten-year improving trend for PM10 and PM2.5; however, the annual averages for 2024-2025, while still meeting current regulatory limits, remain significantly higher than the EU 2030 targets and WHO recommendations. NO₂ meets future limits, but has concentrations almost double those recommended by the WHO, while O₃ shows a constant trend over the years, without improvement. Surface waters are defined by a "not good" chemical state, with persistent exceedances of the Environmental Quality Standards (EQS) for PFOS (PerFluoroOctaneSulfonic Acid). Surface groundwater bodies show a chemical state defined as "poor", with critical issues related to the presence of Hexavalent Chromium (Cr VI). Finally, the soils of the Bormida Valley show average concentrations of chromium and nickel above regulatory limits and widespread PFAS contamination.

The analysis demonstrates that Alessandria is characterized by a serious environmental crisis, exacerbated by heavy historical pollution. Despite compliance with some current regulatory parameters, a comparison with future EU 2030 limits and, above all, with the stringent WHO guidelines, reveals a significant health risk for the community. Current measures appear insufficient to achieve short-term public health objectives.

The thesis concludes by presenting the possibility of integrating innovative technological solutions with an extension of health measures, in order to achieve effective protection for the exposed population.

Indice

Indice delle figure.....	7
Indice delle tabelle	8
1. Introduzione	9
1.1 Scopo della tesi.....	12
1.2 Struttura della tesi.....	13
2. Cenni di fisiologia del corpo umano.....	15
2.1 Visione microscopica dell'organismo.....	16
2.2 Visione macroscopica dell'organismo.....	20
3. Inquinamento	26
3.1 Inquinamento dell'aria	28
3.1.1 Inquinanti principali	28
3.1.2 INGRESSO NEL CORPO.....	37
3.1.3 DANNI ALLA SALUTE.....	41
3.2 Inquinamento dell'acqua	52
3.2.1 Inquinanti principali	52
3.2.2 INGRESSO NEL CORPO.....	59
3.2.3 Danni alla salute	61
3.3 Inquinamento del suolo	66
3.3.1 Inquinanti principali	66
3.3.2 Ingresso nel corpo	68
3.3.3 Danni alla salute	69
4. Metodologia	72
4.1 Fasi della ricerca	73
4.2 Analisi del contesto	74
4.2.1 Contesto geografico	74
4.2.2 Rischi derivanti da attività industriali locali	75
4.3 Acquisizione dei dati	76
4.3.1 Dati qualità aria	76
4.3.2 Dati sulla qualità dell'acqua	77
4.3.3 Dati sulla qualità del suolo	77
4.4 Elaborazione ed analisi dati.....	78

4.5 Valutazione delle soluzioni e proposte	79
4.6 Limitazioni della metodologia	80
5. Analisi contesto padano e alessandrino.....	82
5.1 Pianura Padana.....	83
5.2 Territorio Regionale e inquinamento storico	86
5.3 Settore agro-zootecnico.....	89
5.4 Industrie Alessandrine.....	93
6. Presentazione dei dati.....	104
6.1 Dati inquinamento dell'aria	105
6.1.1 Situazione attuale, ottobre 2024 / settembre 2025	106
6.1.2 Trend decennale e condizioni meteorologiche.....	122
6.2 Dati inquinamento dell'acqua	135
6.2.1 Acque superficiali	136
6.2.2 Falde acquifere	140
6.3 Dati inquinamento del suolo	147
7. Impegni attuali e possibili soluzioni	152
7.1 Misure attuali	153
7.1.1 Azioni sulla qualità dell'aria.....	153
7.1.2 Azioni sulla qualità dell'acqua	159
7.1.3 Azioni sulla qualità del suolo.....	162
7.2 Possibili soluzioni.....	164
7.2.1 Soluzioni per l'inquinamento dell'aria	164
7.2.2 Soluzioni per l'inquinamento dell'acqua	173
7.2.3 Soluzioni per l'inquinamento del suolo.....	175
8. Conclusione	180
Bibliografia	184

Indice delle figure

Figura 1. Condizione meteorologica Pianura Padana [57]	84
Figura 2. Rischio di eutrofizzazione misurato come eccesso dei carichi critici di deposizioni di azoto in Europa nel 2022 [62]	92
Figura 3. Concentrazione PM10 Stazione Volta Ottobre 2024 – Settembre 2025	108
Figura 4. Concentrazione PM10 Stazione D’Annunzio Ottobre 2024 – Settembre 2025	108
Figura 5. Concentrazione PM2.5 Stazione Volta Ottobre 2024 – Settembre 2025	112
Figura 6. Concentrazione NO2 Stazione Volta.....	115
Figura 7. Concentrazione NO2 Stazione D’Annunzio	115
Figura 8. Concentrazione media giornaliera annua NO ₂	118
Figura 9. Concentrazione media giornaliera annua O ₃	120
Figura 10. Concentrazione media giornaliera annua O ₃	122
Figura 11. Concentrazione media mensile PM10.....	123
Figura 12. Variazione concentrazione annua PM10	124
Figura 13. Concentrazione media mensile PM2.5	126
Figura 14. Variazione concentrazione annua PM2.5	127
Figura 15. Concentrazione media mensile NO2.....	128
Figura 16. Concentrazione media annua NO2	129
Figura 17. Concentrazione oraria media annua NO2.....	131
Figura 18. Concentrazione media mensile O3.....	132
Figura 19. Concentrazione oraria media annua O3	134
Figura 20. Stato Chimico dei fiumi Tanaro (Nord) e Bormida (Sud-Est) (2021)	137
Figura 21. Concentrazione di PFOS nel fiume Bormida, relativi limiti di quantificazione e limiti di legge.....	138
Figura 22. Stato Chimico delle falde superficiali presenti nella città di Alessandria.	142
Figura 23. Concentrazione di nitrati nella falda superficiale T25, Alessandria.	143
Figura 24. Contaminazione da Cromo, Nichel, Cobalto e Vanadio nell’area 24_005, Valle del Bormida, Alessandria.	147
Figura 25. Livelli di Metalli Pesanti nei Suoli (Area 24_005) – Confronto tra media rilevata e limiti di legge (CSC). Alessandria.....	148

Indice delle tabelle

Tabella 1. Riferimenti normativi italiani PM10 [2]	31
Tabella 2. Riferimenti normativi italiani NO ₂ [2]	33
Tabella 3. Riferimenti normativi italiani O ₃ [2]	35
Tabella 4. Riferimenti normativi italiani SO ₂ [2]	37
Tabella 5. Descrizione termini di classificazione per sostanze tossiche [23] ...	54
Tabella 6. Criteri per la classificazione PBT e vPvB [23]	54
Tabella 7. Riferimenti normativi italiani di nitriti e nitrati nelle acque [32]	59
Tabella 8. Livello di rischio ambientale per settore e matrice nel contesto alessandrino.	101
Tabella 9. Limiti normativi attuali e futuri PM10	111
Tabella 10. Limiti normativi attuali e futuri PM2.5	114
Tabella 11. Limiti normativi attuali e futuri NO ₂	117
Tabella 12. Limiti normativi attuali e futuri O ₃	121
Tabella 13. Sintesi annuale dei rilevamenti misurabili di PFAS e dei superamenti degli Standard di Qualità Ambientale (SQA) nel periodo 2021- 2025.	139
Tabella 14. Differenze principali tra le caratteristiche delle acque di falda superficiale e di falda profonda.	141
Tabella 15. Concentrazioni di cromo esavalente [µg/l] nella falda T25, Alessandria. Anni 2015-2021	145
Tabella 16. Riduzione massima della concentrazione di inquinanti	167

1. Introduzione

L'epoca contemporanea è stata segnata da un'accelerazione tecnologica e industriale senza precedenti. Già dalle prime rivoluzioni industriali l'umanità ha intrapreso un percorso di enorme sviluppo, capace di modificare in breve tempo la società, l'economia e la vita quotidiana.

Questo sviluppo ha portato una lunga serie di benefici: progressi enormi nel campo della medicina, aumento della produttività agricola e industriale e una connettività globale che consente di accorciare le distanze tra le persone. Il progresso tecnologico è stato, e continua a essere, il motore primario che ha portato al miglioramento delle condizioni di vita a livello globale.

Questo modello di sviluppo, basato per decenni su uno sfruttamento intensivo delle risorse, ha però generato criticità sottovalutate per troppo tempo, il cui impatto ambientale è oggi innegabile. La spinta verso l'industrializzazione e l'innovazione è proceduta di pari passo con un aumento del costo ambientale di cui ora siamo costretti ad affrontare le conseguenze sotto forma di un inquinamento estremamente diffuso.

Le emissioni derivanti dai processi industriali, dai sistemi di riscaldamento, dalla produzione di energia e dai trasporti hanno saturato lo strato di atmosfera più vicino alla Terra di gas e particolati nocivi, alterando i suoi delicati equilibri e causando gravi danni alla

salute della popolazione esposta. L'aria non è l'unica matrice ambientale colpita, a causa di scarichi industriali, deflussi agricoli, rifiuti non biodegradabili, pratiche illegali di smaltimento, anche il suolo e l'acqua di fiumi, falde, oceani, sono andati incontro ad una grave contaminazione sia puntuale che diffusa. Questo comporta gravi ripercussioni minacciando la biodiversità acquatica, la disponibilità di acqua potabile, la fertilità del suolo e contaminando pesantemente la catena alimentare fino a raggiungere l'uomo.

Ci troviamo quindi di fronte a un paradosso critico: lo stesso progresso che ci ha permesso di prosperare sta mettendo a rischio la sostenibilità del sistema che ci ospita, e di conseguenza la nostra, non disponendo di un altro mondo in cui vivere.

L'inquinamento ambientale è la principale minaccia del nostro secolo, agisce come un nemico invisibile che penetra nel corpo umano senza essere visto fino all'insorgenza di patologie. L'esposizione effettiva è difficilmente monitorabile su vasta scala ma gli effetti negativi sono dimostrati e preoccupanti.

Esistono delle zone del Pianeta più a rischio di altre, a causa della massiccia diffusione di industrie, aziende agricole, ma anche in relazione alla densità di popolazione che vive in una specifica area. Questa condizione è aggravata in luoghi in cui l'orografia del territorio contribuisce al problema, impedendo la dispersione degli inquinanti e favorendone il ristagno, aumentando, di conseguenza, la

concentrazione nell'ambiente e la relativa esposizione della popolazione.

In questa condizione specifica si trova il Bacino Padano e, in particolare, la città di Alessandria.

1.1 Scopo della tesi

In un contesto in cui l'inquinamento rappresenta una minaccia crescente, è importante comprendere gli effettivi rischi alla salute che esso comporta, per poter attuare le giuste misure al fine di ridurre l'esposizione delle persone in relazione alla specifica situazione.

Lo scopo di questa tesi è quello di analizzare la situazione specifica della città di Alessandria in relazione alla presenza di inquinanti in atmosfera, in acqua e nel suolo e i relativi effetti che essi provocano alla salute umana. Il lavoro non ha l'obiettivo di analizzare la correlazione tra gli inquinanti diffusi nel territorio e la situazione sanitaria ad Alessandria; piuttosto, dopo aver analizzato i rischi provocati dall'esposizione a specifici inquinanti, si è proceduto con lo studio delle condizioni di qualità ambientale passate e presenti, al fine di evidenziare i rischi a cui la popolazione va incontro.

1.2 Struttura della tesi

Di seguito è riportata la struttura della tesi, evidenziando i principali contenuti trattati:

- Inizialmente viene fornita una panoramica dei principali meccanismi fisiologici che permettono la vita dell'essere umano, sia a livello macroscopico che microscopico; questo è utile come base minima al fine di comprendere la gravità dei danni provocati dagli inquinanti.
- Il terzo capitolo si concentra sulla descrizione degli inquinanti più diffusi e pericolosi, sulle modalità di ingresso nel corpo umano e sui relativi danni che essi provocano una volta entrati nell'organismo.
- Il quarto capitolo presenta la metodologia utilizzata per condurre l'analisi, specificando i metodi di raccolta dati e le modalità di analisi;
- Il quinto capitolo offre una panoramica del contesto in cui è immersa la città di Alessandria a livello orografico e regionale;
- Il sesto capitolo ha l'obiettivo di presentare e analizzare i dati raccolti, offrendo una chiave di lettura per la loro interpretazione;
- Nel settimo capitolo sono presentate le attuali misure in atto volte a contrastare l'inquinamento nella città e possibili proposte per rendere più efficienti gli attuali programmi;
- L'ultimo capitolo è dedicato alle conclusioni, viene ripercorso il lavoro ponendo l'attenzione in particolare sui risultati ottenuti e sulle proposte di progetti futuri.

2. Cenni di fisiologia del corpo umano

L'inquinamento atmosferico rappresenta la principale minaccia a livello globale per la salute umana. Il suo impatto provoca milioni di casi di patologie e decessi prematuri. L'obiettivo di questa sezione è quello di fornire le fondamenta per la comprensione di quanto verrà detto in seguito, saranno quindi trattate a livello microscopico e macroscopico le principali strutture del corpo di cui successivamente saranno viste le patologie causate dall'inquinamento. Dopodiché saranno analizzati nel dettaglio gli inquinanti, il modo in cui questi penetrano all'interno del corpo e le principali conseguenze che ne derivano.

Il corpo umano è un sistema incredibilmente complesso dove ad ogni livello di organizzazione, dalla singola cellula fino all'intero organismo, si trovano dei motori biologici che svolgono funzioni ben precise e che permettono il procedere della vita: alcuni gestiscono le informazioni genetiche, altri si occupano della produzione di energia, altri ancora difendono l'organismo da attacchi esterni.

2.1 Visione microscopica dell'organismo

A livello molecolare la vita si basa sull'interazione di tre classi di macromolecole: gli acidi nucleici, che costituiscono il genoma umano; le proteine, che svolgono la maggior parte delle funzioni; i lipidi, che formano le barriere all'interno delle quali si svolgono queste attività.

L'acido desossiribonucleico (DNA) è una macromolecola che contiene tutte le informazioni necessarie a qualsiasi processo biologico e quindi alla vita; la sua integrità è fondamentale per il corretto funzionamento di ogni parte dell'organismo e per la trasmissione del patrimonio genetico alle generazioni successive. La sua struttura è una doppia elica è formata da due filamenti polinucleotidici avvolti l'uno sull'altro in direzione antiparallela. I filamenti sono composti da uno scheletro di desossiribosio, uno zucchero e gruppi fosfato, su cui si trovano le 4 basi azotate che si legano a coppie tra di loro tramite legami idrogeno per tenere unita la doppia elica.

L'acido ribonucleico (RNA) agisce principalmente come intermediario per trasformare le informazioni genetiche in proteine. L'RNA è una macromolecola formata da una catena costituita da unità più piccole chiamate ribonucleotidi formati da uno zucchero (il ribosio), un gruppo fosfato e una base azotata.

Il DNA è coinvolto in due processi fondamentali: la replicazione e la trascrizione:

- Replicazione: per fare in modo che una cellula possa duplicarsi prima è necessario che si duplichi il DNA tramite un processo semiconservativo operato da un complesso proteico. Gli enzimi principali in questo processo sono l'elicasi, che svolge la doppia elica, la DNA Polimerasi, che sintetizza il nuovo DNA aggiungendo nucleotidi all'estremità 3' di una catena già esistente e la DNA ligasi, che unisce i frammenti sintetizzati per creare un filamento continuo;
- Trascrizione: è il processo in cui l'informazione contenuta in un gene viene copiata in una molecola di RNA messaggero (mRNA). L'RNA polimerasi si lega ad una specifica regione del DNA chiamata promotore e svolge in quel punto la doppia elica, utilizzando uno dei due come stampo per iniziare la sintesi di una nuova catena. L'mRNA prodotto servirà come stampo per la sintesi delle proteine.

Le proteine sono le macromolecole più abbondanti e versatili della cellula, hanno una struttura tridimensionale formata da catene di amminoacidi tenuti insieme da un legame peptidico. Le proteine svolgono un grandissimo numero di funzioni, dalla catalisi delle reazioni metaboliche fino alla segnalazione cellulare e al trasporto di molecole da un luogo all'altro.

Come catalizzatori biologici prendono il nome di enzimi e hanno il compito di accelerare le reazioni chimiche necessarie per la vita, che

altrimenti non avrebbero una velocità adeguata a permettere il mantenimento dell'omeostasi, riducendo l'energia di attivazione richiesta. Ogni enzima ha una regione tridimensionale, chiamata sito attivo, a cui si lega la molecola reagente, il substrato. In base alla disposizione degli amminoacidi nel sito attivo ogni enzima avrà una sua specificità per un certo substrato, a cui si adatterà per ottimizzare la catalisi.

Le proteine, inoltre, formano il citoscheletro cellulare oppure possono agire come trasportatori di molecole legandosi a loro per veicarle nel circolo sanguigno come fa l'emoglobina. I fosfolipidi costituiscono le membrane biologiche, che non sono involucri passivi, ma barriere dinamiche che definiscono i confini delle cellule e attuano una selezione di tutto ciò che può entrare ed uscire. In ambiente acquoso i fosfolipidi si organizzano in un doppio strato, le teste si dispongono verso l'esterno e verso l'interno della cellula, mentre tra le due file di teste ci sono le code idrofobe. Questa struttura serve sia da barriera sia da matrice fluida in cui sono immerse le proteine di membrana, essenziali per la comunicazione e per il trasporto.

Per quanto riguarda il metabolismo cellulare e la produzione di energia la struttura principale coinvolta è il mitocondrio. Qui i nutrienti vengono convertiti in adenosina trifosfato (ATP), attraverso la respirazione cellulare. Il mitocondrio è un organello a doppia membrana: quella esterna è semplice e permeabile a piccole molecole e ioni grazie ai canali proteici, quella interna è impermeabile ed altamente selettiva e

ripiegata in modo da aumentarne la superficie, qui si trovano i complessi proteici della catena di trasporto degli elettroni e dell'ATP sintasi.

Il processo di produzione di energia si svolge in diverse fasi: glicolisi, ciclo di Krebs, catena di trasporto degli elettroni. Tutto parte da una molecola di glucosio e tramite una lunga catena di reazioni si arriva alla produzione di energia. Questo processo per funzionare ha bisogno di ossigeno, che entra nel corpo umano tramite la respirazione.

2.2 Visione macroscopica dell'organismo

A livello macroscopico il corpo umano è formato da organi, sistemi e apparati che lavorando insieme svolgono le funzioni che permettono la vita.

L'apparato respiratorio rende possibile l'ingresso delle molecole di ossigeno nel corpo necessarie per la vita, ma al tempo stesso possiede barriere biologiche che limitano fisicamente l'ingresso di altre sostanze. L'epitelio delle vie aeree superiori è caratterizzato da cellule ciliate e cellule caliciformi mucipare, queste formano l'apparato mucociliare, un sistema di difesa che blocca le particelle di grandi dimensioni ($>5\ \mu m$) nel muco e le trasporta verso la faringe per poi espellerle o deglutirle.

Lo scambio gassoso tra polmoni e sangue avviene negli alveoli, la parte terminale dell'apparato respiratorio, che sono rivestiti da un epitelio speciale formato da due tipi principali di cellule:

- Pneumociti di tipo I: cellule squamose estremamente sottili che coprono circa il 95% della superficie alveolare, ottimali per la diffusione dei gas;
- Pneumociti di tipo II: cellule cuboidali che producono il surfattante, una miscela di lipidi e proteine che impedisce il collasso degli alveoli. In caso di danno agli pneumociti di tipo I queste cellule possono differenziarsi per assumere la stessa forma e lo stesso ruolo di questi ultimi.

All'interno degli alveoli sono presenti i macrofagi alveolari, cellule immunitarie responsabili della fagocitosi delle particelle più piccole (circa $1\ \mu m$), batteri e detriti. Le molecole di ossigeno dagli alveoli passano nel flusso sanguigno e poi vengono trasportate nel corpo grazie al sangue pompato dal cuore.

Il cuore è un muscolo involontario cavo che contraendosi pompa il sangue nei vasi per renderlo disponibile agli altri organi e tessuti attraverso la piccola e la grande circolazione. Tramite la piccola circolazione il sangue è veicolato ai polmoni per permettere gli scambi gassosi, con la grande circolazione, invece, il sangue ossigenato è distribuito a tutti gli altri distretti.

Il collegamento tra il cuore e il resto del corpo è realizzato dall'apparato vascolare: arterie e vene portano rispettivamente il sangue dal cuore al resto del corpo e viceversa. Questo apparato è un circuito chiuso ma permeabile a sostanze come ossigeno, nutrienti, ioni, acqua e ormoni; tuttavia, in alcuni casi troviamo una permeabilità estremamente ridotta come nel caso della barriera emato - encefalica per proteggere il cervello.

L'encefalo è l'organo da cui parte la rete neurale che svolge compiti di ricezione, trasmissione ed elaborazione delle informazioni provenienti dall'interno e dall'esterno dell'organismo. C'è una divisione tra sistema nervoso centrale (SNC) e sistema nervoso periferico (SNP), il primo è formato da cervello e midollo spinale, mentre il secondo è composto da

nervi e gangli, strutture che fungono da stazione intermedia nella trasmissione degli impulsi.

L'unità anatomo - funzionale del sistema nervoso è il neurone, una cellula specializzata nella trasmissione di segnali elettrici e nella comunicazione chimica tramite i neurotrasmettitori a livello sinaptico.

In aggiunta alla barriera emato - encefalica, per la protezione del SNC troviamo la microglia, un sistema immunitario specializzato composto da una popolazione cellulare unica di origine mieloide. Hanno una forma stellata in un cervello sano e agiscono come sentinelle che monitorano lo stato dei neuroni; in caso di danno, invece, ritirano i loro prolungamenti e migrano verso il sito in cui è stato riscontrato il problema.

Il ruolo di difesa della microglia è fondamentale, ma al tempo stesso può diventare pericolosa in caso di attivazione cronica o eccessiva (neuroinfiammazione), portando al danneggiamento e alla morte di neuroni tramite il rilascio di sostanze tossiche: questo processo è la base di patologie neurodegenerative come l'Alzheimer, il Parkinson e la sclerosi multipla.

Nel resto dell'organismo il meccanismo di protezione e difesa è gestito dal sistema immunitario, un sistema complesso in grado di riconoscere, attaccare ed eliminare patogeni esterni e cellule anomale. Questi processi sono regolati da un delicato equilibrio tra attivazione e soppressione, guidato da una precisa comunicazione cellulare.

Le cellule principali del sistema immunitario sono:

- Macrofagi: cellule fagocitiche che inglobano gli agenti estranei e presentano i loro antigeni ai linfociti per avviare una risposta specifica;
- Linfociti T: coordinano e attivano le altre cellule immunitarie oppure uccidono direttamente le cellule infette da virus o le cellule tumorali;
- Linfociti B: responsabili della produzione di anticorpi, proteine specifiche utilizzate per neutralizzare i patogeni o marcarli per renderli riconoscibili ad altre cellule immunitarie.

L'organismo ha poi un sistema di smaltimento dei rifiuti e delle sostanze tossiche, composto da fegato e reni. Il primo è formato da epatociti e, tra le altre cose, modifica chimicamente le molecole tossiche per poi legarle con molecole idrosolubili e trasportarle all'esterno del corpo. I reni invece filtrano il sangue tramite i nefroni, bloccano i prodotti di scarto per poi espellerli attraverso l'urina, mentre assorbono le sostanze biologicamente utili e non dannose.

Altri processi vitali come la crescita, il metabolismo, la riproduzione, la risposta allo stress sono regolati e coordinati dal sistema endocrino. Le ghiandole endocrine producono ormoni e li rilasciano direttamente nel flusso sanguigno, ogni processo si basa sull'interazione tra ormoni e recettori, un sistema efficiente ma molto delicato. Il complesso ormone-recettore ha la capacità di legarsi in modo diretto al DNA e ha lo scopo di guidare la trascrizione, regolando l'espressione genica.

Questi recettori sono proteine e possono trovarsi sia all'interno della cellula sia sulla membrana cellulare.

Anche la capacità di riprodursi è una funzione biologica fondamentale, ma al tempo stesso è estremamente delicata e sensibile ai fattori esterni. L'informazione genetica contenuta negli spermatozoi e negli ovociti deve rimanere intatta per avere la possibilità di riprodursi e completare la formazione di un nuovo individuo. Le cellule come gli spermatozoi sono altamente specializzate e vulnerabili, quindi una piccola modifica o interferenza potrebbe bloccare completamente il processo.

Si è visto come l'organismo sia una macchina efficiente che lavora in modo perfettamente coordinato in grado di gestire cellule con funzioni molto diverse per far sì che tutto funzioni nel modo giusto. Questa complessità ed efficienza però è molto vulnerabile e sensibile a fattori esterni che possono provocare cambiamenti in questo equilibrio. Nonostante i processi di difesa, di eliminazione dei rifiuti e di riparazione presenti è possibile che qualcosa riesca ad aggirare il sistema di protezione e vada a creare danni che, partendo dall'interno di una cellula, possono propagarsi a diversi livelli fino a raggiungere tutto l'organismo.

3. Inquinamento

L'inquinamento rappresenta la principale minaccia ambientale per la salute umana a livello globale.

Sebbene l'attenzione si focalizzi frequentemente solo sull'inquinamento atmosferico e sulle relative conseguenze a carico dell'apparato respiratorio, è scientificamente accertato che gli effetti dovuti all'esposizione si manifestano a livello sistemico, inducendo danni all'intero organismo sia a breve sia a lungo termine.

Inoltre, è evidente che l'aria è solo uno dei vettori con cui le particelle tossiche entrano nel corpo umano. L'assorbimento di sostanze tossiche, o xenobiotici, può avvenire anche tramite acqua e suolo, sia direttamente che indirettamente tramite la catena alimentare. Seppur differenziandosi per la via di ingresso nell'organismo, gli effetti patogeni che ne derivano sono da ritenere del tutto paragonabili a quelli che portano gli inquinanti aerodispersi, sia qualitativamente che quantitativamente.

La sezione che segue è dedicata alla trattazione dei principali agenti inquinanti problematici nel territorio Alessandrino, dei meccanismi attraverso cui superano le barriere biologiche del corpo umano e ai conseguenti danni provocati. Verrà effettuata una divisione tra inquinanti di aria, acqua e suolo per cercare di avere una visione divisa per caratteristiche e modi di esposizione. Va considerato, però, che gli inquinanti non sono statici: migrano dal suolo alle acque e viceversa, e

che le sostanze del suolo possono generare polveri che si disperdono nell'aria per poi ricadere su suolo o corpi idrici. Questa divisione per compartimenti è a scopo puramente organizzativo e non si esclude che le sostanze inquinanti si possano trovare in altri contesti diversi da quelli in cui sono stati inseriti in questo lavoro.

Le informazioni relative agli inquinanti contenute nella seguente sezione sono state raccolte dai canali di ARPA Piemonte, nozioni di altra provenienza verranno opportunamente citate.

Non tutte le particelle considerate inquinanti rappresentano un reale problema per l'uomo, questo perché il corpo umano, come visto in precedenza, possiede barriere biologiche per evitare che queste penetrino all'interno e meccanismi di difesa per bloccarle ed eliminarle prima che provochino danni. Nonostante ciò, ci sono molecole che riescono a superare le barriere ed aggirare le difese, mandando in cortocircuito il sistema immunitario provocando gravi danni.

3.1 Inquinamento dell'aria

Nella presente sezione saranno analizzati e caratterizzati i principali inquinanti che si trovano nell'aria che respiriamo. Successivamente saranno trattate le modalità di ingresso all'interno del corpo e i danni locali e sistemici che ognuno di questi può provocare.

Si stima che l'inquinamento atmosferico causi milioni di morti ogni anno, e le patologie a questo attribuibili sono equivalenti ad altri problemi di natura globale come l'alimentazione scorretta e il tabagismo, ponendolo al vertice tra le maggiori minacce ambientali per la salute. [1]

3.1.1 Inquinanti principali

1) Il particolato atmosferico

Il particolato atmosferico (PM) è considerato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) il principale fattore di rischio per la salute tra gli inquinanti atmosferici.

Non si tratta di una particella in particolare ma di una miscela complessa di particelle solide e liquide di natura organica e inorganica, aventi dimensioni da pochi nanometri a oltre una decina di micrometri. I principali componenti sono solfati, nitrati, ioni di ammonio, cloruro di sodio, particelle carboniose, polveri minerali e acqua.

Il particolato può essere diviso in 3 categorie in relazione alla dimensione delle particelle:

- PM10: con diametro aerodinamico inferiore a 10 micrometri, in grado di penetrare nel tratto superiore dell'apparato respiratorio;
- PM2.5: con diametro aerodinamico inferiore a 2.5 micrometri, in grado di raggiungere i polmoni e i bronchi secondari;
- Particelle ultrafini (UFP): con diametro aerodinamico inferiore a 0.1 micrometri, in gradi di penetrare nei bronchioli arrivano fino agli alveoli.

Il PM è formato da una frazione primaria, la parte effettivamente prodotta ed immessa in atmosfera, e una frazione secondaria, la parte formata in atmosfera tramite reazione chimica con altri inquinanti, come ossidi di azoto o biossido di zolfo. Quest'ultima può costituire fino al 60% - 80% del PM totale misurato. Il particolato fine è anche il principale mezzo di diffusione per altre sostanze tossiche come metalli pesanti e idrocarburi che si legano alla sua superficie.

La sorgente principale del particolato atmosferico è riconducibile a fenomeni antropici di combustione come processi industriali, attività agricole, utilizzo di combustibili fossili e traffico veicolare. È presente, in aggiunta, una parte derivata da sorgenti naturali come attività vulcanica, tempeste di sabbia, dispersione di pollini, erosione di rocce, incendi boschivi.

I suoi tempi di permanenza in atmosfera sono lunghi e può essere trasportato a grandi distanze, questo è il principale motivo per cui le variazioni delle concentrazioni nel tempo dipendono molto dai fattori meteo - climatici come il vento e le precipitazioni.

Per la misurazione delle concentrazioni di particolato nell'aria si sfrutta il sistema gravimetrico, ovvero la raccolta delle polveri con un diametro inferiore a 10 micrometri o a 2.5 micrometri su di un filtro e la successiva pesatura. Al fine di monitorare la concentrazione in tempo reale si sta affermando, in Piemonte, una strumentazione automatica basata su tecnologie di assorbimento delle radiazioni beta.

Norma tecnica per la misurazione: UNI EN 12341:2014 "Aria ambiente - Metodo gravimetrico di riferimento per la determinazione della concentrazione in massa di particolato sospeso PM10 o PM2,5".

I riferimenti normativi a livello italiano sono espressi in Tabella 1: Decreto Legislativo 13 agosto 2010 n. 155 "Attuazione della direttiva 2008/50/CE" relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa.

Riferimento	Indice statistico	Numero limite superamenti/ anno	Valore limite
PM10 - Valore limite per la protezione della salute umana	media 24 ore	35	50 µg/m ³
PM10 - Valore limite per la protezione della salute umana	media annuale	-	40 µg/m ³
PM2.5 - Valore limite per la protezione della salute umana	media annuale	-	25 µg/m ³

Tabella 1. Riferimenti normativi italiani PM10. [2]

II) Ossidi di azoto (NO_x)

Si generano in tutti i processi di combustione per reazione tra ossigeno e azoto ad alte temperature. I più significativi a livello di inquinamento sono l'ossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO₂), ma tra i due soltanto il secondo è caratterizzato da un profilo di tossicità significativo; ne consegue che l'impianto normativo, che impone vincoli legali sulle concentrazioni massime, si applichi unicamente a quest'ultimo.

L' NO_2 è quasi esclusivamente un inquinante secondario, si forma prevalentemente in atmosfera per ossidazione dell' NO e ha un ruolo determinante nella formazione dello smog fotochimico: inquinamento atmosferico che si manifesta in presenza di luce solare intensa e temperature elevate, specialmente in contesti urbani e durante il periodo estivo. Questo fenomeno è il risultato di reazioni chimiche complesse tra ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili (COV) e ozono. Gli NO_x permangono in atmosfera solo per qualche giorno, in particolare il biossido di azoto resiste per circa tre giorni.

Per la misurazione dei livelli di ossidi di azoto viene sfruttato il principio della chemiluminescenza, dopo aver fatto reagire il monossido di azoto con l'ozono prodotto dallo strumento si misura l'intensità della luminescenza caratteristica, che è proporzionale alla concentrazione di NO . Nel caso di NO_2 si deve prima ridurre a NO tramite un convertitore al molibdeno.

Norma tecnica di riferimento per la misurazione: UNI EN 14211:2012
"Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di diossido di azoto e monossido di azoto mediante chemiluminescenza"

I riferimenti normativi a livello italiano sono espressi in Tabella 2: Decreto Legislativo 13 agosto 2010 n. 155

Riferimento	Indice statistico	Numero superamenti/ anno	Valore limite
Valore limite per la protezione della salute umana - orario	Media oraria	18	200 µg/m ³
Valore limite per la protezione della salute umana - annuale	Media annuale	-	40 µg/m ³
Soglia di allarme	Media oraria (su tre ore consecutive)	-	400 µg/m ³

Tabella 2. Riferimenti normativi italiani NO₂. [2]

III) Ozono troposferico (O₃)

L'ozono è un gas la cui molecola è formata da tre atomi di ossigeno, la sua concentrazione è elevata nella stratosfera tra i 30 km e i 50 km dal suolo e a questa altitudine svolge un'importantissima funzione protettiva assorbendo un'alta percentuale di radiazioni ultraviolette provenienti dal sole. Nella troposfera, lo strato dell'atmosfera più vicino al suolo, invece, è considerato un inquinante fotochimico secondario, formato da trasformazioni chimico-fisiche ad alte temperature in presenza di forte irraggiamento solare.

I suoi precursori hanno origine in contesti fortemente antropizzati, causati da veicoli a motore, processi di combustione, solventi chimici, industrie. Nelle aree in cui si produce molto NO, l'O₃ può essere consumato dalla reazione:



Questo spiega perché i valori più elevati di ozono si raggiungono in zone suburbane, poste a valle delle sorgenti dei precursori, dove viene trasportato dagli agenti atmosferici senza avere possibilità di reagire ed essere eliminato.

Per la misura della concentrazione di ozono si utilizza uno specifico rilevatore che misura la variazione di intensità luminosa di un campione di aria quando è esposta ad una radiazione ultravioletta a 254 nm, la concentrazione è proporzionale alla quantità di radiazione assorbita.

Norma tecnica di riferimento per la misurazione: UNI EN 14625:2012 "Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di ozono mediante fotometria ultravioletta".

I riferimenti normativi a livello italiano sono espressi in Tabella 3: Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155.

Riferimento	Indice Statistico	Numero superamenti/anno	Valore limite
Valore obiettivo per la protezione della salute umana	Massimo giornaliero della media mobile su 8 ore consecutive	25 volte/anno (come media su 3 anni)	120 µg/m ³
Obiettivo a lungo termine per la protezione della salute umana	Massimo giornaliero della media mobile su 8 ore consecutive	-	120 µg/m ³
Soglia di allarme	Media oraria (su tre ore consecutive)	-	240 µg/m ³
Soglia di informazione	Media oraria	-	180 µg/m ³

Tabella 3. Riferimenti normativi italiani O₃. [2]

IV) Biossido di zolfo (SO₂)

Il biossido di zolfo (SO₂) è un gas dall'odore acre e pungente, molto solubile in acqua; si tratta di un inquinante primario.

La sua formazione avviene per ossidazione dello zolfo nel corso dei processi di combustione di materiali che contengono questo elemento come impurità. Le principali attività responsabili della sua immissione in atmosfera sono l'utilizzo di combustibili fossili, i processi metallurgici, la produzione di materiali plastici. Una percentuale molto bassa di SO₂ proviene dal traffico veicolare, in particolare dai veicoli con motore

diesel, mentre in natura è prodotto prevalentemente dall'attività vulcanica. In atmosfera il biossido di zolfo può permanere da pochi giorni fino ad alcune settimane, espandendosi su scala regionale a causa degli eventi atmosferici. Al contrario dell'ozono, l' SO_2 presenta valori di concentrazione massimi nella stagione invernale, specialmente in corrispondenza di aree urbanizzate dove sono in funzione impianti domestici di riscaldamento alimentati con combustibili solidi o liquidi.

La misurazione delle concentrazioni di SO_2 si basa sul metodo della fluorescenza: un campione d'aria viene immesso nello strumento e colpito da radiazioni UV a 230 - 190 nm che eccitano le molecole. Per stabilizzarsi e tornare alla loro conformazione originale queste molecole emettono energia sotto forma di radiazioni nello spettro del visibile, l'intensità della radiazione luminosa è funzione della concentrazione di SO_2 presente nel campione.

Norma tecnica di riferimento: UNI EN 14212:2012 "Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di diossido di zolfo mediante fluorescenza ultravioletta".

I riferimenti normativi a livello italiano sono espressi in Tabella 4: Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155.

Riferimento per SO₂	Indice statistico	Numero superamenti/anno	valore limite
Valore limite per la protezione della salute umana	Media oraria	24	350 µg/m ³
Valore limite per la protezione della salute umana	Media giornaliera	3	125 µg/m ³
Soglia di allarme	Media oraria (su tre ore consecutive)	-	500 µg/m ³
Livelli critici per la protezione degli ecosistemi	Media annuale e media invernale (1° ottobre-31 marzo)	-	20 µg/m ³

Tabella 4. Riferimenti normativi italiani SO₂. [2]

3.1.2 INGRESSO NEL CORPO

Come visto in precedenza, l'architettura dell'apparato respiratorio è strutturata per ottimizzare l'efficienza dello scambio gassoso tra l'organismo e l'ambiente esterno. La stessa efficienza, tuttavia, lo rende

anche la via di accesso più diretta ed efficace per gli inquinanti aerodispersi.

1) Particolato Atmosferico

Una volta entrato nel corpo tramite inalazione il particolato si distribuisce lungo l'albero respiratorio in base al suo diametro aerodinamico creando irritazioni nei siti di deposito. Le particelle che si depositano nella regione rinofaringea e tracheobronchiale vengono intrappolate e rimosse, le prime tramite meccanismi fisici come muco, tosse e starnuti, le seconde vengono gestite dal sistema di clearance mucociliare: sistema composto da muco viscoelastico che riveste le vie aeree e intrappola le particelle e da un tappeto di cellule epiteliali che spingono il muco verso la faringe dove verrà deglutito o espulso.

Il PM_{2.5} e le particelle ultrafini, invece, riescono a superare questa barriera diffondendosi nelle vie aeree più piccole e profonde, fino alla regione alveolare, dove sono presenti dei macrofagi che hanno il compito di fagocitare ed eliminare le particelle estranee. Nonostante questo, se sottoposti ad una sollecitazione cronica i macrofagi potrebbero andare incontro a sovraccarico diventando sempre meno efficienti.

L'infiammazione a diversi livelli dell'apparato respiratorio ne mina l'integrità strutturale, aprendo fessure tra le cellule epiteliali che aumentano la permeabilità, permettendo agli xenobiotici di penetrare nei tessuti sottostanti fino ad entrare nel circolo sanguigno. Negli alveoli

l'interfaccia tra tessuto e capillari è estremamente sottile, misurando in alcuni punti meno di 0.5 μm , ed esistono diversi metodi con cui le particelle riescono a superarla e i due principali sono:

- Traslocazione passiva intercellulare: le particelle di dimensioni più piccole ($< 10 \text{ nm}$) riescono a passare tra le giunzioni che legano tra loro cellule epiteliali ed endoteliali;
- Traslocazione attiva transcellulare (Transcitosi): le particelle possono essere internalizzate tramite endocitosi dalle cellule endoteliali alveolari e, invece di essere eliminate, vengono trasportate fino al lato basolaterale dove vengono rilasciate tramite esocitosi nello spazio interstiziale entrando a contatto con i capillari, questo vale anche per particelle leggermente più grandi.

[3][4][5][6]

II) NO_2

Le molecole di NO_2 hanno una solubilità relativamente bassa e grazie a questo riescono a raggiungere le parti terminali dei polmoni e solo qui reagiscono formando prodotti di reazione come acido nitroso (HNO_2) e acido nitrico (HNO_3) secondo la reazione:



L'acido nitroso e l'acido nitrico, a loro volta, essendo instabili in acqua si dissociano rapidamente in ioni nitriti (NO_2^-) e ioni nitrati (NO_3^-). Gli ioni NO_2^- e NO_3^- , essendo piccoli ed idrosolubili, riescono ad attraversare la barriera tra alveoli e capillari passando attraverso piccoli pori e canali acquosi presenti nelle membrane cellulari o negli spazi presenti tra una cellula e l'altra. [7]

III) O_3

Come nel caso del NO_2 , anche l' O_3 , essendo un gas poco solubile in acqua, riesce a penetrare a fondo nei polmoni. La sua reazione principale avviene con gli acidi grassi polinsaturi presenti nelle membrane delle cellule polmonari e nel surfattante, in cui si formano dei prodotti secondari tossici, noti come Prodotti di Ossidazione Lipidica (LOPs). Questi includono:

- Aldeidi (come la malondialdeide)
- Perossido di idrogeno (H_2O_2)
- Altri radicali liberi

[8]

IV) SO₂

L'SO₂, a differenza dei precedenti, essendo molto solubile in acqua si ferma nella parte superiore dell'apparato respiratorio. Qui reagisce velocemente con le mucose delle vie aeree superiori formando acido solforoso che causa irritazione chimica immediata. L'acido solforoso a sua volta potrebbe dissociarsi in ioni bisolfito (HSO₃⁻) e, in misura minore, ioni solfito (SO₃²⁻), che potrebbero raggiungere gli alveoli ed entrare in circolo grazie ai meccanismi di trasporto per soluti e ioni.[9]

3.1.3 DANNI ALLA SALUTE

Analizzare i danni che gli inquinanti aerodispersi provocano all'organismo è un compito complesso, a causa della miscela di sostanze presenti è spesso difficile isolare chiaramente il ruolo di una piuttosto che dell'altra. In questa sezione saranno trattate sia le patologie associabili all'esposizione a molecole tossiche prese singolarmente sia alla miscela aerodispersa su più livelli.

I) PM2.5 e PM10

Il particolato atmosferico, come visto precedentemente, riesce a penetrare a fondo nell'apparato respiratorio entrando nel circolo

sanguigno, e portando con sé sostanze tossiche agisce da vettore per il loro ingresso nel corpo.

I danni sistemici, soprattutto delle particelle più fini, sono ormai accertati da anni. Di seguito verrà fornita una panoramica dei rischi attribuibili al particolato atmosferico sui vari distretti del corpo umano, ricordando sempre che, in particolar modo in questo caso, i danni sono causati da una miscela di sostanze e non da un singolo agente. La letteratura scientifica è concorde sul ruolo dell'inquinamento atmosferico come fattore di rischio significativo per un'ampia gamma di patologie del sistema nervoso centrale. Tutti gli agenti inquinanti trattati in precedenza sono stati associati a processi di neuroinfiammazione cronica, stress ossidativo e danno neuronale.

Lo stress ossidativo è uno squilibrio nell'organismo che si verifica quando si è in presenza di un eccesso di specie reattive all'ossigeno (ROS), chiamate radicali liberi, e una carenza di antiossidanti per neutralizzarle. I ROS provocano la perossidazione lipidica danneggiando le membrane cellulari, alterano e compromettono la struttura delle proteine, contribuiscono all'invecchiamento precoce e causano mutazioni nel DNA.

Il danno neurologico si sviluppa attraverso percorsi patogenetici complessi e interconnessi. Le particelle possono esercitare la loro tossicità sul cervello principalmente in due modi: uno indiretto, mediato da processi sistemici, e uno diretto, tramite la traslocazione fisica nel SNC:

- Via indiretta (Infiammazione Sistemica): l'inalazione di particolato innesca una potente risposta infiammatoria a livello polmonare e cardiovascolare, causando il rilascio di mediatori infiammatori (citochine) nel circolo sanguigno. Queste molecole sono in grado di attraversare la barriera emato-encefalica (BEE), attivando una cascata neuroinfiammatoria all'interno del cervello.
- Via diretta (Traslocazione): è stato dimostrato che le particelle più piccole possono raggiungere direttamente il parenchima cerebrale. Questo può avvenire sia by-passando la BEE attraverso il nervo olfattivo, sia inducendo un danno diretto alla barriera stessa, aumentandone la permeabilità. Un meccanismo rilevante è "l'effetto cavallo di Troia", secondo cui le particelle di PM agiscono come vettori, trasportando altre tossine adsorbite sulla loro superficie (es. metalli pesanti, idrocarburi policiclici aromatici) direttamente nel SNC.

A livello cellulare, questi processi causano l'attivazione cronica della microglia, causando microgliosi attiva. Questa condizione porta a generare un ambiente neurotossico caratterizzato da stress ossidativo e da una successione di eventi infiammatori, che culmina nel danneggiamento e nella morte dei neuroni. Questa neurotossicità si manifesta in diversi disturbi neurologici, neurodegenerativi e psichiatrici:

- Malattie neurodegenerative: l'esposizione cronica è associata a patologie come l'Alzheimer e il Parkinson. È stato osservato che il

PM2.5 favorisce l'accumulo delle proteine beta-amiloide, un tratto caratteristico dell'Alzheimer, e alfa-sinucleina, associata al Parkinson;

- Patologie cerebrovascolari: esiste una forte correlazione tra l'esposizione al PM2.5 e l'aumento dell'incidenza, dei ricoveri e della mortalità per ictus, con un'associazione più marcata per la forma ischemica rispetto a quella emorragica;
- Malattie autoimmuni: l'esposizione a inquinanti come il PM10 è stata collegata a un aumento delle ricadute di malattie come la sclerosi multipla. Gli inquinanti, secondo alcune ipotesi, potrebbero attivare i linfociti T autoreattivi che migrano nel SNC, provocando demielinizzazione;
- Disturbi dello sviluppo e psichiatrici: il cervello è estremamente vulnerabile durante lo sviluppo fetale e nella prima infanzia, l'esposizione prenatale al PM può causare danni cerebrali permanenti, influenzando lo sviluppo neurologico e cognitivo in maniera fortemente negativa aumentando il rischio di disturbi come ADHD, demenza, depressione e schizofrenia.

[10][11][12]

L'esposizione al particolato atmosferico, e in particolare alle polveri sottili e ultrafini, provoca gravi danni al sistema cardiovascolare, tra cui infarto del miocardio, aritmie cardiache, ictus ischemico, ipertensione, disfunzione vascolare e aterosclerosi.

Anche in questo caso i danni avvengono attraverso due meccanismi principali:

- Azione diretta: le particelle ultrafini entrano nel flusso sanguigno e raggiungono direttamente il cuore e i vasi; qui possono causare tossicità diretta, instabilità delle placche aterosclerotiche e formazione di trombi;
- Azione indiretta: le particelle depositate nei polmoni scatenano una forte risposta infiammatoria e stress ossidativo a livello locale che porta il danneggiamento dei vasi sanguigni e favorendo la progressione dell'aterosclerosi.

[13]

Aumenti a breve termine del PM 2.5 elevano il rischio relativo di eventi cardiovascolari acuti dall'1% al 3% in pochi giorni. Esposizioni a lungo termine, nell'ordine di diversi anni, aumentano questo rischio in misura maggiore (circa il 10%) anche a causa dello sviluppo di patologie come ipertensione e diabete. [14]

L'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro (IARC) ha classificato l'inquinamento atmosferico, ed in particolare il PM2.5, come cancerogeno certo per l'uomo (Gruppo 1). L'esposizione prolungata aumenta il rischio di sviluppare tumore al polmone, anche nei non fumatori, ed è stata notata un'associazione positiva con un aumentato rischio di cancro alla vescica.

La letteratura suggerisce ulteriori associazioni con altri tipi di cancro come quello al seno, al colon-retto e al fegato, nonostante i risultati non siano universalmente riconosciuti. [15][16]

II) NO₂

L'inalazione di diossido di azoto (NO₂) innesca una cascata di eventi fisiopatologici che collegano l'esposizione ambientale a patologie cardiovascolari. Come visto in precedenza, il processo ha inizio a livello polmonare dove l'interazione del NO₂ con i fluidi polmonari e alveolari provoca la formazione di ioni NO₂⁻ e NO₃⁻ che, superando la barriera alveolo-capillare, accedono al flusso sanguigno.

Dopo essere entrati in circolo, si manifestano due fenomeni principali, come documentato dal profilo tossicologico dell'ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry) sull'NO₂[17]:

- Stress ossidativo sistemico: in qualità di specie reattive dell'azoto (RNS), gli ioni nitrito e nitrato promuovono uno stato di stress ossidativo generalizzato. Questo squilibrio, in questo caso, si traduce in un danno cellulare su vasta scala, con perossidazione dei lipidi di membrana e alterazione di proteine e acidi nucleici;
- Induzione di metemoglobinemia: lo ione nitrito ossida il ferro ferroso (Fe²⁺) a ferro ferrico (Fe³⁺) all'interno dell'emoglobina, generando metaemoglobina. Questa forma di emoglobina è funzionalmente

inattiva, incapace cioè di legare e trasportare ossigeno molecolare, provocando situazioni di ipossia tissutale. La comprensione di questi meccanismi è utile a spiegare l'aumento del rischio di sviluppare patologie cardiache. Un miocardio soggetto a stress ossidativo e ad una ridotta ossigenazione diventa elettricamente instabile e più suscettibile a disturbi del ritmo.

Studi sull'associazione tra esposizione a inquinanti atmosferici e aritmie sono contrastanti, ma uno studio di vasta portata, condotto dalla Fudan University su 322 città cinesi e pubblicato sul Canadian Medical Association Journal, ha concluso che l'esposizione acuta all'inquinamento atmosferico è correlata a un aumentato rischio di aritmia sintomatica. In modo particolare, lo studio ha evidenziato che, tra i vari inquinanti, il biossido di azoto mostrava l'associazione più forte e consistente con i quattro tipi di aritmie esaminate: fibrillazione atriale, flutter atriale, extrasistole e tachicardia sopraventricolare.[18]

III) O₃

L'ozono non fa eccezione tra gli inquinanti con prove schiaccianti relative alla tossicità respiratoria e sistemica.

Secondo l'Istituto Superiore di Sanità al 2008, a causa di concentrazioni superiori a 70 µg/m³ di ozono, avvengono circa 21.000 decessi prematuri all'anno nell'UE. A questi si aggiungono 14.000 ricoveri ospedalieri per malattie respiratorie. [19]

Il report dell'OMS Europa del 2008 evidenzia che l'esposizione all'ozono provoca alterazioni al sistema respiratorio e che l'esposizione acuta è associata a un aumento della mortalità e della morbidità, mentre l'esposizione cronica può causare danni permanenti ai bronchioli, aumentando la mortalità in soggetti che presentano malattie respiratorie e cardiovascolari. [20]

Questa tesi è avvalorata da uno studio condotto in Cina e pubblicato sull'European Heart Journal [21], che mette in relazione l'esposizione ad alte concentrazioni di ozono e problemi cardiovascolari. Anche in questo caso si afferma che in caso di esposizione prolungata la mortalità di persone con problemi alle vie respiratorie e malattie cardiocircolatorie aumenta. Viene affermato che tali effetti siano mediati dall'alterazione di pathway biologici fondamentali, che comprendono l'induzione di processi infiammatori, lo stress ossidativo, la disfunzione dell'endotelio e compromissioni della regolazione autonoma cardiaca.

L'ozono è anche implicato nell'ossidazione del colesterolo LDL all'interno delle placche aterosclerotiche. Inoltre, l'esposizione a questo inquinante è associata a un incremento dei livelli di citochine pro-infiammatorie, a un'alterazione dei meccanismi fibrinolitici e a una disfunzione della variabilità della frequenza cardiaca, tutti fattori che contribuiscono alla genesi di malattie cardiovascolari.

Lo studio, condotto su 6,4 milioni di ricoveri in 70 città cinesi, ha quantificato l'aumento del rischio per diverse patologie.

Un incremento di $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nella concentrazione di ozono (media mobile di 2 giorni) è associato a un aumento del rischio di ricovero per:

- Malattia coronarica (CHD): +0,46%;
- Angina pectoris: +0,45%;
- Infarto miocardico acuto (AMI): +0,75%;
- Sindrome coronarica acuta (ACS): +0,70%;
- Insufficienza cardiaca: +0,50%;
- Ictus: +0,40%;
- Ictus ischemico: +0,41%.

Il rischio di essere ricoverati in ospedale per problemi cardiovascolari cresce notevolmente durante i giorni in cui l'inquinamento da ozono è più intenso.

Lo studio ha confrontato i giorni con bassa concentrazione di ozono (inferiore a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) con i giorni di alta concentrazione (superiore a $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$). In queste giornate più inquinate, il rischio aggiuntivo di ricovero ospedaliero è stato:

- +3,38% per l'ictus
- +6,52% per l'infarto miocardico acuto

L'analisi per sottogruppi ha mostrato che gli effetti dell'ozono sono costantemente maggiori nelle persone anziane (età ≥ 65 anni) per malattia coronarica, insufficienza cardiaca e ictus.

IV) SO₂

Le molecole di SO₂ sono le uniche, tra quelle presenti in questa analisi, che reagiscono in modo molto rapido una volta entrate nelle vie aeree superiori ed è qui che si concentrano i loro effetti nocivi. L'effetto più comune e immediato dell'inalazione di SO₂ è la broncocostrizione, che in caso di soggetti asmatici può avvenire a concentrazioni molto basse (0.1 ppm), mentre in caso di soggetti sani avviene a concentrazioni generalmente superiori a 1 ppm. Esposizioni prolungate sono state associate ad aumento dei sintomi della bronchite sull'uomo e ad alterazione della funzionalità polmonare, mentre studi su animali esposti a concentrazioni elevate per periodi di durata intermedia (da 15 giorni a 364 giorni) hanno mostrato necrosi cellulare, perdita di ciglia, infiammazione della mucosa bronchiale e un aumento del numero di cellule caliciformi. Per quanto riguarda gli effetti sistemici sappiamo che l'SO₂ è un forte irritante per gli occhi e l'esposizione può portare congiuntivite e bruciore, mentre studi su lavoratori e animali suggeriscono che possa indurre stress ossidativo sui globuli rossi. In questo caso lo stress ossidativo ha come bersaglio le cellule che rivestono le vie aeree, provocando infiammazione e una maggiore suscettibilità a infezioni respiratorie.

Nonostante sia stato dimostrato che l'esposizione prolungata all' SO_2 sia genotossica, cioè provochi danni cromosomici nelle cellule somatiche dell'uomo, l'Agenzia Internazionale per la Ricerca sul Cancro lo classifica nel gruppo 3 ("non classificabile quanto alla sua cancerogenicità per l'uomo"), non essendoci prove di una correlazione tra esposizione a SO_2 e tumori. [22]

3.2 Inquinamento dell'acqua

L'inquinamento delle fonti idriche rappresenta un grave problema sanitario. In questa sezione saranno analizzati gli inquinanti principali che si trovano nelle fonti d'acqua e che, per via diretta o indiretta, entrano a contatto con l'uomo, si tratterà di come avviene il contatto e dei danni causati alla salute. Con inquinamento delle fonti d'acqua ci si riferisce a fiumi, laghi, falde e acqua destinata all'agricoltura e all'allevamento, non soltanto all'acqua potabile.

3.2.1 Inquinanti principali

I) PFAS

Le sostanze per- e polifluoroalchiliche (PFAS) costituiscono una classe di oltre 10.000 composti organici di sintesi, non presenti in natura, originati principalmente da processi di produzione industriale o dalla degradazione di precursori. Questi composti si sono diffusi in tutto il mondo a partire dagli anni Cinquanta, il loro scopo era quello di rendere più resistenti i tessuti, la carta, i rivestimenti per contenitori alimentari.

La struttura chimica dei PFAS è caratterizzata da catene alchiliche in cui gli atomi di idrogeno sono parzialmente o completamente sostituiti da atomi di fluoro. La lunghezza di queste catene e la natura dei gruppi funzionali ad esse legati determinano le specifiche caratteristiche di ciascun composto. Tra le molecole più studiate e normate troviamo

l'acido perfluorooottanoico (PFOA) e l'acido perfluorooottansolfonico (PFOS).

Molti composti PFAS, tra cui PFOA, PFOS e i PFCAs a catena lunga (C9-C14), sono classificati come sostanze persistenti, bioaccumulabili e tossiche (PBT), o molto persistenti e molto bioaccumulabili (vPvB). La descrizione di questi termini fornita dal Ministero dell'Ambiente nel 2016 è presente in Tabella 5 e in Tabella 6.

Termine	Definizione
PBT	Sostanze Persistenti, Bioaccumulabili e Tossiche.
vPvB	Sostanze molto Persistenti (very Persistent) e molto Bioaccumulabili (very Bioaccumulative).
Persistenza (P)	Indica la capacità di una sostanza di resistere ai processi di degradazione, rimanendo inalterata a lungo nell'ambiente (acqua, suolo, ecc.).
Bioaccumulo (B)	Descrive la tendenza di una sostanza ad accumularsi negli organismi viventi.
Tossicità (T)	È la capacità di una sostanza di causare effetti nocivi a organismi biologici, determinata tramite studi specifici.
Emivita	Tempo necessario per dimezzare la quantità di una sostanza.
BCF	Fattore di Bioconcentrazione. Rapporto tra la concentrazione della sostanza in un organismo e quella nell'acqua.
NOEC	No-Observed Effect Concentration. La massima concentrazione alla quale non si osserva alcun effetto.

Termine	Definizione
EC ₁₀	Effective Concentration 10. La concentrazione che causa un effetto (diverso dalla morte) nel 10% degli individui esposti.

Tabella 5. Descrizione termini di classificazione per sostanze tossiche. [23]

Caratteristica	Criterio per la classificazione PBT	Criterio per la classificazione vPvB
Persistenza (P)	Si verifica una delle seguenti condizioni di emivita: in acqua marina: > 60 giorni in acqua dolce: > 40 giorni in sedimento marino: > 180 giorni in sedimento d'acqua dolce: > 120 giorni nel suolo: > 120 giorni	Si verifica una delle seguenti condizioni di emivita: in acqua dolce/marina: > 60 giorni in sedimento dolce/marino o suolo: > 180 giorni
Bioaccumulo (B)	Fattore di bioconcentrazione (BCF) > 2.000	Fattore di bioconcentrazione (BCF) > 5.000
Tossicità (T)	Si verifica una delle seguenti condizioni: NOEC o EC ₁₀ a lungo termine < 0,01 mg/L Classificata come Cancerogena (1A/1B), Mutagena (1A/1B) o Tossica per la riproduzione (1A, 1B, 2) Altre prove di tossicità cronica (es. STOT RE 1 o 2)	Non applicabile. La tossicità non è un criterio per la classificazione vPvB, poiché il loro alto grado di persistenza e bioaccumulo è già considerato estremamente preoccupante.

Tabella 6. Criteri per la classificazione PBT e vPvB. [23]

Il bioaccumulo, in particolare, porta a biomagnificazione, cioè il processo in cui la concentrazione di una sostanza aumenta man mano che si sale al livello trofico successivo, procedendo dal basso verso l'alto nella piramide alimentare.

Queste proprietà li qualificano come Sostanze Estremamente Preoccupanti (SVHC – Substance of Very High Concern), soggette a una rigorosa gestione del rischio da parte delle autorità europee per la loro potenziale minaccia alla salute umana e agli ecosistemi.

In risposta ai rischi associati, l'Unione Europea ha implementato progressive restrizioni. A partire dal 2006, la produzione e l'uso del PFOS sono stati limitati e la sostanza è oggi inclusa nell'Allegato XVII del Regolamento (CE) n. 1907/2006 (REACH). Analogamente, dal 2020, il PFOA non è più prodotto né commercializzato nel territorio dell'Unione.

A livello nazionale, l'Italia ha definito nel 2019 degli Standard di Qualità Ambientale (SQA) per alcuni PFAS nelle acque superficiali e sotterranee, il cui superamento implica una declassificazione della qualità del corpo idrico e l'adozione di misure correttive.

Infine, con il Decreto Legislativo 18/2023, che attua la Direttiva (UE) 2020/2184, e poi con il più recente Decreto Legislativo 102/2025, sono stati stabiliti parametri specifici ancora più stringenti per i PFAS nelle acque destinate al consumo umano, imponendo l'adozione di misure appropriate per l'eliminazione del rischio qualora tali valori vengano superati.

Negli ultimi anni, si sta assistendo alla rapida comparsa di nuove sostanze, la cui identificazione non è sempre immediata. Questo fenomeno genera un ritardo nell'adeguamento delle normative, non riuscendo a tenere il passo con la diffusione dei composti. Alcuni Paesi però hanno già iniziato ad includere questi nuovi PFAS nelle sostanze vietate o limitate. Una soluzione potrebbe essere quella di passare da un controllo sostanza per sostanza ad uno a gruppi per far fronte ai lunghi tempi previsti per la valutazione del rischio. Un articolo pubblicato su Environmental Science & Technology Letters suggerisce di considerare l'intera classe dei PFAS come pericolosa per velocizzare ulteriormente i processi di valutazione del rischio. [24][25][26][27]

II) Metalli pesanti: Arsenico (As), Cadmio (Cd), Nichel (Ni) e Piombo (Pb)

Arsenico, cadmio, nichel e piombo sono elementi chimici classificati come inquinanti delle acque a causa della loro tossicità e persistenza.

L'arsenico (As) è un metalloide che si forma principalmente per via naturale tramite la dissoluzione di minerali e rocce ricche di questo elemento. La principale fonte dal lato umano riguarda l'uso di pesticidi. [28]

Il cadmio (Cd) e il piombo (Pb) sono metalli pesanti che si formano quasi esclusivamente da fonti antropiche: principalmente da scarichi industriali, produzione e smaltimento di batterie (al Ni-Cd e al piombo),

pigmenti e, per il piombo in particolare, la corrosione di vecchie tubature idriche. Il cadmio deriva principalmente dall'uso estensivo di fertilizzanti fosfatici in agricoltura.

Il nichel (Ni) ha una duplice origine: naturale, per erosione di rocce ultramafiche, e antropica, da processi industriali come la produzione di acciaio inossidabile oppure il rilascio da leghe metalliche.

Questi elementi non sono biodegradabili e la loro permanenza negli ecosistemi acquatici è indefinita. Non c'è un tempo in cui vengono eliminati e di conseguenza si ripartiscono tra la colonna d'acqua e i sedimenti, dove tendono ad accumularsi, agendo come una fonte di contaminazione a lungo termine. Anche loro, come i PFAS, possono accumularsi nei sistemi viventi e lungo la catena alimentare. [29]

La legislazione italiana, tramite il Decreto Legislativo 18/2023 che recepisce la Direttiva europea sulle acque destinate al consumo umano, stabilisce i seguenti valori di concentrazione per le acque potabili (limiti massimi):

- Arsenico: 10 µg/L
- Cadmio: 5 µg/L
- Nichel: 20 µg/L
- Piombo: 5 µg/L

[30]

III) Nitriti e Nitrati

Nitriti e nitrati fanno parte del naturale ciclo dell'azoto, dove la materia organica viene decomposta e trasformata. Il problema sorge quando si ha una concentrazione innaturale nell'ambiente a causa delle attività umane e la conseguente contaminazione delle risorse idriche.

Il settore agricolo e zootecnico costituiscono la principale fonte di contaminazione diffusa; l'impiego estensivo di fertilizzanti azotati di sintesi e l'applicazione agronomica di effluenti zootecnici causano infatti fenomeni di lisciviazione verso le falde sotterranee e di ruscellamento verso i corpi idrici superficiali. Ulteriori contaminazioni derivano da fonti puntiformi, come gli scarichi di acque reflue urbane e industriali che non hanno subito un adeguato trattamento di abbattimento dell'azoto a causa dell'inefficienza degli impianti di depurazione.[31]

A fronte dei gravi rischi sanitari associati, la legislazione italiana, con il Decreto Legislativo 18/2023, stabilisce rigorosi standard di qualità per le acque destinate al consumo umano, fissando la concentrazione massima ammissibile per i nitrati a 50 mg/L e per i nitriti a 0,50 mg/L. [32]

Altre limitazioni sono presenti per le acque in bottiglia, le acque di falda e le acque superficiali, come descritte in tabella 7.

Tipo di Acqua	Nitrati (NO₃⁻)	Nitriti (NO₂⁻)	Riferimento Normativo
Minerale	45 mg/L	0,02 mg/L	Normativa acque minerali
Minerale per l'infanzia	10 mg/L	0,02 mg/L	Normativa acque minerali
Sotterranea	50 mg/L	-	D.Lgs. 152/2006
Superficiale	> 50 mg/L (inquinata)	-	D.Lgs. 152/2006

Tabella 7. Riferimenti normativi italiani di nitriti e nitrati nelle acque. [32]

3.2.2 INGRESSO NEL CORPO

Il modo più frequente e rapido con cui l'uomo può entrare in contatto con inquinanti dispersi in acqua è sicuramente l'ingestione.

L'ingresso nel corpo di sostanze tossiche può avvenire in modo diretto in caso di ingestione di acque contaminate, oppure in modo indiretto nel caso in cui acque contaminate vengano utilizzate in agricoltura e in allevamento, provocando un bioaccumulo nelle piante o negli animali destinati all'alimentazione umana.

I) PFAS

I PFAS, grazie alla loro natura anfifilica, riescono a penetrare le membrane cellulari. In questo modo riescono ad entrare in circolo dove, comportandosi come acidi grassi, si legano a proteine plasmatiche come l'albumina che permettono la distribuzione sistemica.[33]

II) Metalli pesanti

I metalli pesanti, dopo essere stati ingeriti, sfruttano un meccanismo di mimetismo ionico per penetrare nel corpo: la loro somiglianza con ioni essenziali (come calcio e zinco) inganna i trasportatori proteici delle cellule intestinali, che li traghettano attivamente nel circolo sanguigno. [34]

III) Nitriti e nitrati

Nitriti e nitrati, essendo ioni piccoli e idrosolubili, vengono assorbiti molto efficientemente nell'intestino tenue, passando attraverso canali acquosi e spazi intercellulari per raggiungere rapidamente il flusso sanguigno. In particolare, i nitrati vengono assorbiti quasi completamente nei primi tratti intestinali. [17]

3.2.3 Danni alla salute

I) PFAS

I PFAS rappresentano una minaccia significativa per la salute a causa della loro capacità di bioaccumulo: una volta entrati in circolo si accumulano in particolare nel fegato, causando alterazioni degli enzimi epatici, nei reni e nel sangue. L'esposizione cronica è associata a un ampio spettro di patologie.

È stata dimostrata una correlazione con:

- Ipercolesterolemia: attivazione anomala di PPARs (Peroxisome Proliferator-Activated Receptors), recettori nucleari che regolano il metabolismo dei lipidi;
- Malattie della tiroide: disturbo del normale funzionamento degli ormoni;
- Ipertensione gestazionale: aumento della pressione arteriosa dopo la ventesima settimana di gestazione.

Mentre molti PFAS sono classificati come possibili cancerogeni per l'uomo, il PFOA è considerato un cancerogeno certo (Gruppo 1); evidenze li collegano ad un aumentato rischio di cancro al rene e ai testicoli. La loro azione come interferenti endocrini provoca alterazione dell'equilibrio ormonale, con potenziali effetti negativi sulla fertilità e sullo sviluppo fetale. Dal momento che queste sostanze possono attraversare la placenta e sono presenti anche nel latte materno,

l'esposizione può iniziare già nella fase prenatale e continuare durante il periodo di allattamento.[33][35][36]

In aggiunta, studi epidemiologici e tossicologici hanno associato l'esposizione ai PFAS, in particolare i composti più noti come PFOA e PFOS, a disfunzioni del sistema immunitario interferendo con i linfociti B causando stress ossidativo e infiammazioni: l'esposizione potrebbe provocare una ridotta risposta anticorpale alle vaccinazioni, in particolare nei bambini, rendendoli più suscettibili alle malattie. [37]

Coerentemente con il fatto che queste sostanze sono, in parte, filtrate dai reni, un'esposizione elevata e prolungata può portare ad una ridotta funzionalità renale e ad un maggior rischio di malattia renale cronica. [38]

II) Metalli pesanti

I metalli pesanti possono causare gravi effetti tossici già a basse concentrazioni, gli effetti specifici variano però a seconda del metallo:

- Piombo: è un potente neurotossico, pericoloso in particolar modo per i bambini poiché dalla stessa dose possono assorbire una quantità fino a cinque volte maggiore rispetto ad un adulto. Il loro sistema nervoso è significativamente più vulnerabile, e può andare incontro a danni permanenti al cervello come difficoltà di apprendimento, problemi comportamentali e ridotta capacità di attenzione.

L'esposizione a livelli elevati può portare a coma, convulsioni e morte. Negli adulti, invece, l'esposizione può portare ad un aumento della pressione sanguigna, danni renali e cardiovascolari. Sempre secondo l'OMS non esiste una concentrazione di piombo nel sangue considerabile sicura; [39]

- Arsenico: è classificato, in particolare nella sua forma inorganica, come cancerogeno certo per l'uomo (Gruppo 1) dall'IARC. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS) il consumo di acque potabili contenenti arsenico in quantità comprese tra 50 e 100 µg per litro di acqua potabile aumenta il rischio di sviluppare tumori della pelle, al polmone o alla vescica. Di conseguenza è stato posto un limite di concentrazione massima nelle acque potabili di 10 µg/L dalla Direttiva 98/83/CE. Nonostante non causi mutazioni dirette, non è infatti un forte mutageno, la sua cancerogenicità deriva dalla sua capacità di alterazione della regolazione genica: può modificare i pattern di metilazione e alterare le modifiche degli istoni, piccole proteine attorno alle quali si avvolge il DNA. Questa alterazione potrebbe promuovere l'accensione di oncogeni e lo spegnimento di oncosoppressori. L'arsenico può portare a stress ossidativo e interferisce con il metabolismo energetico sostituendo il fosfato durante il processo di sintesi di ATP, formando legami instabili che idrolizzano spontaneamente. L'esposizione a lungo termine è associata a malattie cardiovascolari, diabete e danni neurologici; [40][41][42][43]

- Cadmio: i bersagli principali del cadmio sono i reni, accumulandosi nel tempo nel parenchima renale si può arrivare a disfunzioni e insufficienza renale. Può, in aggiunta, interferire con il metabolismo del calcio causando fragilità nelle ossa e aumentando il rischio di fratture. Questa condizione è alla base della malattia "Itai Itai" (osteomalacia con vari gradi di osteoporosi, associata a grave tubulopatia renale), documentata, a seguito di una grave contaminazione ambientale, in Giappone a partire dal 1912; [44]
- Nichel: l'IARC classifica i composti di nichel come cancerogeni del Gruppo 1 se l'esposizione coinvolge le vie respiratorie. Le evidenze di cancerogenicità per ingestione sono deboli. Tra gli effetti acuti più documentati si trova la dermatite allergica da contatto, ovvero l'insorgenza di reazioni cutanee sviluppate dopo l'ingestione. Altri sintomi presenti a dosi elevate sono nausea, diarrea, vomito e mal di testa. A lungo termine l'esposizione potrebbe provocare esiti avversi sulla riproduzione e lo sviluppo, ma i dati al momento non sono conclusivi e accertati. [45]

III) Nitriti e Nitrati

Sebbene entrambi siano rilevanti, il pericolo principale per l'uomo deriva dai nitriti. I nitrati, tuttavia, pur essendo meno tossici, possono essere trasformati in nitriti sia dall'ambiente che dallo stesso corpo umano nell'intestino, rappresentando dunque un pericolo indiretto.

Il danno più grave associato all'ingestione di nitriti, come visto per l' NO_2 inalato, è la metaemoglobinemia, rappresentando un rischio ancora più preoccupante nei bambini sotto i 6 mesi di vita.

Inoltre, nell'ambiente acido dello stomaco i nitriti reagiscono con composti amminici dando origine a N-nitrosammine; molte di queste nitrosammine hanno dato esiti positivi relativi alla cancerogenicità in studi su animali e sono classificati nel Gruppo 2 come probabili cancerogeni per l'uomo dall'IARC. Associazioni con tumori specifici sono ancora oggetto di studio ma l'evidenza tossicologica riguardo la formazione di questi composti è un campanello d'allarme importante e porta ad un controllo rigoroso delle concentrazioni in acqua potabile.

[46]

3.3 Inquinamento del suolo

L'inquinamento del suolo, come quello dell'acqua, rappresenta un problema di massima importanza a causa delle molteplici vie con cui una sostanza dal terreno può traslocare nei corsi d'acqua e nelle falde, oppure alzarsi in aria, aiutata dagli agenti atmosferici, sotto forma di polveri ed essere poi inalata.

Inquinanti attivi del suolo come PFAS, Piombo, Nichel, Arsenico, Cadmio, essendo già stati trattati nella sezione precedente non saranno inclusi in questa, pur essendo pienamente consapevoli che le sopracitate sostanze si trovino nelle acque così come nel suolo, essendo strettamente legati.

3.3.1 Inquinanti principali

I) Cromo esavalente (Cromo VI)

Il cromo esavalente è una forma di ossidazione del cromo metallico, elemento poco diffuso in natura, presente principalmente nella crosta terrestre. A differenza del cromo trivalente, il cromo esavalente rappresenta un grande pericolo per la salute umana.

La sua formazione è dovuta a processi industriali e, una volta riversato nel suolo, riesce a permeare a fondo raggiungendo le acque di falda e i corsi d'acqua per poi essere trasportato altrove essendo altamente idrosolubile.

Il cromo VI è un composto ampiamente usato in diversi settori dell'industria, in particolare per la creazione di leghe metalliche e per i rivestimenti superficiali con funzione sia protettiva che estetica. Trova applicazione come conservante per il legno, come fissativo nell'industria tessile e come pigmento per prodotti farmaceutici e cosmetici. [47]

II) DDT

Il dicloro - difenil - tricloroetano (DDT) è un potente insetticida appartenente alla famiglia dei composti organoclorurati, utilizzato su vasta scala dal 1939.

All'inizio venne celebrato per il suo effetto insetticida che ha aiutato a debellare malattie trasmesse da insetti come la malaria e il tifo, ma negli anni '60 è emersa la sua grande pericolosità per l'uomo a seguito di studi scientifici approfonditi.

In Italia l'uso è stato vietato nel 1969 ma la produzione e l'esportazione è proseguita per decenni. La sua grande diffusione deriva dal fatto che viene prodotto tramite processi semplici ed economici, che però gli donano ottima stabilità chimica ed efficienza.

La stabilità chimica è la caratteristica che lo rende un Inquinante Organico Persistente (POP, Persistent Organic Pollutant), essendo estremamente resistente alla degradazione (il suo tempo di

dimezzamento nel suolo varia da 2 a 15 anni). Una volta rilasciato si lega nel suolo senza possibilità di essere trasportato via dalle piogge essendo quasi insolubile in acqua. Ha anche una predisposizione al bioaccumulo e alla biomagnificazione legandosi ai tessuti adiposi grazie alla sua liposolubilità. [48]

3.3.2 Ingresso nel corpo

I) Cromo VI

Per la popolazione residente nei pressi di siti contaminati da cromo VI l'esposizione può manifestarsi principalmente tramite l'ingestione. Le molecole presenti nel suolo possono entrare nella catena alimentare attraverso l'assorbimento da parte delle radici delle piante. Una volta assorbiti, questi composti subiscono un processo di bioaccumulo nei tessuti vegetali. L'esposizione umana avviene, come per gli altri inquinanti che contaminano acqua e suolo, tramite il consumo di prodotti vegetali o animali contaminati, oppure tramite l'ingestione diretta di acqua potabile contaminata. Un'altra possibilità di assunzione di cromo si verifica per via inalatoria, ma questo accade quasi esclusivamente in ambienti lavorativi chiusi. [49]

II) DDT

La via di ingresso principale, anche in questo caso, è l'alimentazione, a causa dei processi di bioaccumulo e biomagnificazione, oppure tramite acqua contaminata.

Altre vie di esposizione meno rilevanti in un contesto di vita comune sono l'inalazione e l'assorbimento cutaneo. [50]

3.3.3 Danni alla salute

I) Cromo VI

Una volta ingerito il cromo esavalente viene ridotto nello stomaco alla sua forma meno tossica, il cromo trivalente. Tuttavia, può accadere che non tutto il cromo venga ridotto e che la parte rimanente possa essere assorbita dall'organismo.

Il suo principale meccanismo di danno è la forte azione ossidativa, ma può causare irritazione cronica delle mucose, nausea, vomito, dolori addominali, ulcere ed emorragie nel tratto gastro - intestinale. In seguito al suo assorbimento nell'intestino viene trasportato agli organi di depurazione con il rischio di causare danni alle cellule epatiche e renali. Il cromo esavalente è classificato come cancerogeno del Gruppo 1 se l'assunzione avviene per via inalatoria, ma sono studi tossicologici riscontrano chiare evidenze nell'associazione tra l'ingestione e il cancro

negli animali da laboratorio, in particolare tumore alla cavità orale e all'intestino tenue.

Sono state riscontrate associazioni statisticamente significative tra l'esposizione a lungo termine di acqua potabile contaminata e cancro allo stomaco, ma al momento la comunità scientifica non è completamente concorde sull'argomento. [51][52][53][54]

II) DDT

Il DDT, come già detto, è vietato da molti anni, per questo è improbabile che ci siano episodi di esposizione acuta, di conseguenza i danni da valutare sono principalmente quelli cronici che riguardano una bassa esposizione per periodi prolungati, ricordando i lunghi tempi di dimezzamento della sostanza che potrebbe restare nel suolo per decenni.

L'esposizione cronica a questa sostanza, e dei suoi derivati come il DDE, può portare a molteplici danni neurologici, riproduttivi, metabolici e al rischio di sviluppare tumori come quello al seno. [55]

4. Metodologia

Il presente lavoro di tesi si configura come uno studio di caso descrittivo-analitico finalizzato alla comprensione approfondita della situazione di inquinamento ambientale in cui si trova la città di Alessandria. L'obiettivo dello studio non riguarda soltanto la quantificazione della presenza di contaminanti, ma l'analisi delle interazioni tra i fattori di pressione (industriali, agricoli, urbani), le condizioni geografiche - meteorologiche e le matrici ambientali (aria, acqua, suolo).

4.1 Fasi della ricerca

La ricerca è stata suddivisa in tre fasi distinte per guidare il lettore in un percorso strutturato su diversi livelli:

- Analisi del contesto (cap.4): fase qualitativa dedicata alla comprensione profonda del contesto in cui si trova la città di Alessandria. Lo scopo è comprendere i motivi da cui deriva la vulnerabilità del territorio, inserire la città in un contesto ben più ampio che comprende una zona vastissima del territorio italiano, la Pianura Padana;
- Analisi dei dati (cap.5): fase quantitativa di raccolta, elaborazione e analisi dei dati ambientali ufficiali. Lo scopo è quello di misurare il livello di contaminazione, identificare la presenza di eventuali tendenze temporali e confrontare i dati con le norme legislative Nazionali ed Europee vigenti e future;
- Analisi delle soluzioni e proposte (cap.6): fase dedicata alla descrizione e all'analisi delle soluzioni operative attuali volte a mitigare il problema dell'esposizione pubblica alle sostanze inquinanti, proponendo altre possibili soluzioni o approcci attuabili in relazione al contesto della città.

Questo approccio, basato sulla combinazione di contesto territoriale e dati puntuali, è stato scelto per permettere di comprendere sia la gravità effettiva dei valori analizzati, sia i motivi di una situazione locale altamente vulnerabile e danneggiata.

4.2 Analisi del contesto

La prima fase del lavoro è stata svolta tramite una revisione sistematica di un corpus eterogeneo di fonti, principalmente derivanti da società europee come EEA (European Environment Agency), ESA (European Space Agency) e diverse ARPA (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale) regionali.

4.2.1 Contesto geografico

Per comprendere l'inquinamento territoriale di fondo l'analisi è iniziata partendo dalla grande area geografica della Pianura Padana, per la quale sono state consultate fonti italiane ed europee insieme a report scientifici per identificare i fattori critici principali: morfologia, condizioni meteorologiche e stagionalità.

Il focus partito dalla Pianura Padana è stato ristretto per analizzare la situazione regionale e provinciale e comprendere eventuali fragilità e pressioni specifiche presenti. Dagli archivi della Regione Piemonte sono stati ricercati dati istituzionali relativi alla presenza di inquinamento diffuso. Questa ricerca ha portato all'identificazione della presenza di SIN (Siti di Interesse Nazionale) nel territorio regionale e provinciale, oltre alla valutazione dello stato di contaminazione e bonifica tramite l'ASCO (Anagrafe Regionale dei Siti Contaminati). Dati statistici del 7° Censimento dell'Agricoltura hanno confermato il grande impatto ambientale provocato dal settore agro-zootecnico: è stato analizzato il

trend relativo a intensificazione e specializzazione e le relative conseguenze in merito all'aumento della pressione ambientale derivante dall'inquinamento da azoto. In relazione a ciò sono stati analizzati documenti normativi come la "Direttiva Nitrati" ed è stato introdotto il concetto di Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN).

4.2.2 Rischi derivanti da attività industriali locali

Come ultima parte della prima fase relativa al contesto, non potendo stabilire un nesso di causalità diretta per ogni inquinante, è stato valutato il rischio ambientale e sanitario legato alla presenza di un grande numero di industrie di vario genere nel territorio Alessandrino. Dopo aver identificato i vari settori industriali, per ognuno è stata condotta un'analisi divisa per matrice (aria, acqua, suolo), in relazione ai rischi derivanti dai processi di produzione e stoccaggio. Per ogni settore industriale analizzato è stata presentata la BAT (Best Available Techniques) per la riduzione dei rischi associati.

4.3 Acquisizione dei dati

Tutti i dati grezzi relativi agli inquinanti sono stati scaricati in formato .csv e trasferiti al software di calcolo Microsoft Excel,

Questa fase è consistita nella raccolta dei dati ufficiali e validati disponibili sui canali di ARPA Piemonte. Questa scelta metodologica è stata fondamentale per provare l'oggettività e l'affidabilità dei dati, consentendo la riproduzione dell'analisi. I canali utilizzati per reperire i dati sono stati principalmente il Geoportale ARPA, database scaricabili e reportistica. L'analisi è stata divisa per matrice ambientale.

4.3.1 Dati qualità aria

I dati provengono dal Sistema Regionale di Rilevamento della Qualità dell'Aria (SRRQA) gestiti da ARPA, in particolare da due stazioni presenti ad Alessandria: Stazione Volta, rappresentativa dell'inquinamento di fondo urbano; Stazione D'Annunzio, scelta per misurare l'impatto specifico del traffico veicolare.

Gli inquinanti studiati nell'analisi sono i quattro considerati più critici nella zona: PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂, O₃. Altri inquinanti sono stati esclusi a causa del loro livello estremamente basso e non considerato un pericolo per la salute della popolazione. Le specifiche di raccolta dati per ogni inquinante saranno descritte nel capitolo 5.

4.3.2 Dati sulla qualità dell'acqua

L'acquisizione dei dati sulle acque è stata divisa in due: acque superficiali e acque di falda; in entrambi i casi l'analisi si è concentrata sulla ricerca di sostanze inquinanti come PFAS e metalli:

- Acque superficiali: analisi concentrata sul fiume Bormida, per il quantitativo più significativo di dati reperibili su di esso. Sono state effettuate delle valutazioni generali sullo stato chimico dell'intera zona e altre più specifiche sulle concentrazioni di inquinanti in un singolo tratto;
- Acque di falda: analisi concentrata sulle acque di falda superficiale, in particolare sulla falda presente appena sotto la città, valutandone lo stato chimico e la presenza di inquinanti in specifici punti di monitoraggio.

4.3.3 Dati sulla qualità del suolo

Il suolo è la matrice in cui si sono riscontrate le maggiori problematiche nella raccolta dei dati a causa della mancanza di una rete efficiente e continua e della carenza di report specifici. La metodologia di raccolta, quindi, si è basata su dati puntuali e campagne di monitoraggio ARPA come quelle relative alla valle del Bormida disponibili sul Geoportale. Gli inquinanti ricercati nelle analisi sono principalmente metalli e PFAS.

4.4 Elaborazione ed analisi dati

I dati trasferiti su Excel sono stati sottoposti a pulizia dei valori nulli; successivamente, si è proceduto con la scelta dei metodi di aggregazione dei dati per la creazione di grafici e tabelle riassuntive. Nei grafici sono visualizzate serie storiche per analizzare l'andamento delle concentrazioni nel tempo, identificando stagionalità, picchi anomali e trend di miglioramento/peggioramento, oltre a valori medi annuali, mensili o giornalieri.

La strategia analitica adottata per l'analisi dei dati è consistita nella loro valutazione in relazione ai limiti di legge attuali, ai limiti futuri imposti dall'UE per il 2030 e ai limiti raccomandati dall'OMS. Questi tre parametri sono utili per valutare, rispettivamente, la conformità alla legge attuale, la possibilità di raggiungere gli obiettivi del 2030 e il rischio effettivo sulla salute pubblica.

I dati sono stati analizzati in relazione al periodo ottobre 2024 - settembre 2025 per quanto riguarda la situazione annuale. Inoltre, è stata calcolata e analizzata la tendenza delle medie annuali degli ultimi anni e l'incidenza dei fattori meteorologici per gli inquinanti dell'aria e delle acque. L'analisi delle tendenze non è stata effettuata per i dati relativi al suolo a causa della mancanza di report che fornissero un numero consistente di dati per la sua realizzazione.

4.5 Valutazione delle soluzioni e proposte

Come ultima fase del lavoro sono state analizzate le attuali misure alessandrine di prevenzione e riduzione dell'inquinamento come il semaforo antismog e le operazioni di bonifica e biomonitoraggio. Sono state analizzate delle soluzioni per la riduzione degli inquinanti e la loro applicabilità o meno alla città di Alessandria su base critica.

4.6 Limitazioni della metodologia

Questa metodologia presenta alcuni limiti:

- **Dati mancanti:** l'analisi è completamente soggetta alla disponibilità dei dati, perciò le medie calcolate sono sensibili alla mancanza di dati per alcuni giorni o periodi. Per la media annuale questa mancanza non influisce particolarmente sui risultati, a differenza delle medie mensili che analizzano un periodo più corto;
- **Dati sul suolo:** i dati relativi al suolo sono estremamente limitati. Non avendo a disposizione database organizzati come per le altre matrici, infatti, l'analisi si è limitata ai report ARPA disponibili;
- **Correlazione fonte-inquinante:** questo lavoro analizza le fonti di inquinamento e le cataloga in base al rischio derivante dalla loro semplice presenza (condizioni normali) o dalla possibilità che si verifichino incidenti in alcune industrie, senza però attribuire ogni frazione di inquinante ad una specifica fonte;
- **Variabilità meteorologica:** le condizioni meteorologiche, data la loro natura estremamente variabile e imprevedibile, rappresentano un importante fattore confondente. Questo elemento è stato utilizzato per interpretare alcuni valori anomali emersi, fermo restando che la creazione di un modello previsionale dedicato non rientra negli scopi di questa tesi;

5. Analisi contesto padano e alessandrino

I fattori principali che influenzano la qualità ambientale nel territorio di Alessandria sono rappresentati dalle condizioni orografiche e meteorologiche sfavorevoli del bacino padano e dalla pressione esercitata da una densa e diversificata rete di industrie. Ai precedenti si aggiunge la grande influenza del settore agro-zootecnico. Questi tre agiscono in un modo sinergico in cui ognuno amplifica gli effetti degli altri portando ad un continuo peggioramento e ad una difficile gestione della situazione nel territorio.

5.1 Pianura Padana

La pianura padana è da anni tra le regioni più inquinate d'Europa secondo l'European Environment Agency (EEA), costantemente menzionata nei report annuali sulla qualità dell'aria. La causa principale di questa situazione è attribuita, oltre che alla grande densità di emissioni antropiche, alla morfologia della Pianura Padana e alle relative condizioni meteorologiche che provocano l'accumulo di inquinanti e la formazione di particolato secondario. [56]

La pianura ha una superficie di 47.820 km^2 e si trova in una posizione estremamente chiusa: è circondata a nord e ad ovest dalle alpi, a sud dagli appennini. Questa morfologia impedisce lo spostamento di grandi masse d'aria provocando un accumulo di inquinanti senza possibilità di smaltimento tramite fenomeni meteorologici. La velocità del vento, infatti, è tra le più basse d'Europa, provocando un ristagno delle sostanze emesse in tutta l'area. In Figura 1 è possibile apprezzare il territorio della pianura con la caratteristica e persistente nuvolosità a bassa quota.



Figura 1. Condizione meteorologica Pianura Padana. [57]

Il tipo di inquinamento atmosferico nel bacino è estremamente dipendente dalla stagione: nei mesi invernali, con la presenza di un'alta concentrazione di emissioni derivanti dai sistemi di riscaldamento domestici, aumenta il rischio di esposizione a particolato atmosferico e agli inquinanti derivati dalla combustione; nei mesi estivi invece, a causa del forte irraggiamento del sole, la regione è colpita da smog fotochimico provocato dalle reazioni tra le radiazioni solari e gli inquinanti primari, tale situazione può portare ad innalzamenti dei livelli di ozono. [57]

Nei mesi invernali, inoltre, sono frequenti i fenomeni di inversione termica. Solitamente l'aria calda carica di inquinanti si sposta in alto

per poi disperdersi, invece nel caso dell'inversione termica si definisce una situazione in cui uno strato di aria calda si posiziona al di sopra dell'aria inquinata e densa che si trova al suolo. Di conseguenza si bloccano i movimenti convettivi, intrappolando gli inquinanti negli strati più bassi dell'atmosfera per giorni, causando picchi nella concentrazione di PM. Il termine deriva dal fatto che, solitamente, in atmosfera esiste un gradiente termico verticale per cui, all'aumentare dell'altitudine, diminuisce la temperatura dell'aria di circa 6 gradi per ogni chilometro, invece durante il fenomeno si registra un gradiente inverso. Questa situazione si verifica principalmente in inverno dal momento che il sole non riesce a scaldare a sufficienza il suolo durante il giorno, che di conseguenza non cede abbastanza calore all'aria per permetterle di riscaldarsi in misura sufficiente da provocare la convezione. [58]

5.2 Territorio Regionale e inquinamento storico

Per contestualizzare ulteriormente la città di Alessandria a livello provinciale e regionale è necessario approfondire l'inquinamento che storicamente la contraddistingue.

La conferma del fatto che la città si trovi in una zona geografica particolarmente sotto pressione è rappresentata dalla presenza di Siti di Interesse Nazionale (SIN) e Siti di Interesse Regionale (SIR), cioè aree altamente contaminate la cui bonifica è di competenza statale o regionale.

Sul territorio regionale, alla data 13/01/2025, sono presenti 1303 siti censiti nell'anagrafe regionale dei siti contaminati (ASCO), di cui il 67.5% (879 siti) ha un procedimento attivo, mentre per il 32,5% (423 siti) risulta concluso. 541 siti, tra quelli con un procedimento attivo, sono attualmente in fase di verifica. Gli interventi di bonifica sono divisi in: bonifica e ripristino ambientale (431), bonifica e ripristino ambientale con misure di sicurezza (70), messa in sicurezza operativa (22), messa in sicurezza permanente (111), oppure una combinazione delle precedenti. Il 10.1% (131) dei siti regionali si trova sul territorio provinciale di Alessandria.

Un sito contaminato, come descritto dalla Regione Piemonte, è "un sito all'interno del quale le concentrazioni di contaminanti nelle diverse matrici ambientali (suolo, sottosuolo, acque sotterranee e superficiali) sono tali da determinare un rischio sanitario-ambientale non

accettabile in funzione della destinazione d'uso e dello specifico utilizzo".

Più del 50% dell'inquinamento dei siti deriva da una cattiva gestione degli impianti e delle strutture, il 20% da una cattiva gestione dei rifiuti, l'8% da sversamenti accidentali in suolo e acqua mentre il 17% da eventi accidentali, il resto da altre cause.

I SIN nella provincia di Alessandria sono due dei quattro totali a livello regionale:

- SIN di Casale Monferrato: relativo alla massiccia contaminazione da amianto causato dalla presenza di aziende del settore nel territorio. Il sito comprende anche il centro urbano e le zone circostanti;
- SIN di Serravalle Scrivia: relativo ad un'area industriale adibita storicamente al trattamento dei rifiuti, che ha portato ad un'importante contaminazione del suolo e delle acque.

[59]

Un ulteriore fattore di preoccupazione per la provincia di Alessandria è rappresentato dall'inquinamento della valle del Bormida. Per circa un secolo aziende situate a monte del fiume hanno sversato scarti di produzione ricchi di sostanze tossiche direttamente nelle acque del fiume Bormida causando un disastro ecologico devastante. A causa di questa situazione il fiume è stato dichiarato biologicamente morto per molto tempo e le sue acque velenose impedivano la proliferazione di qualunque forma di vita. Le acque, nel frattempo, hanno inquinato altri

fiumi e i terreni nei quali scorrono e, anche dopo la chiusura delle aziende e i tentativi di bonifica, questo inquinamento storico persiste nei sedimenti rappresentando un'importante minaccia ambientale.

5.3 Settore agro-zootecnico

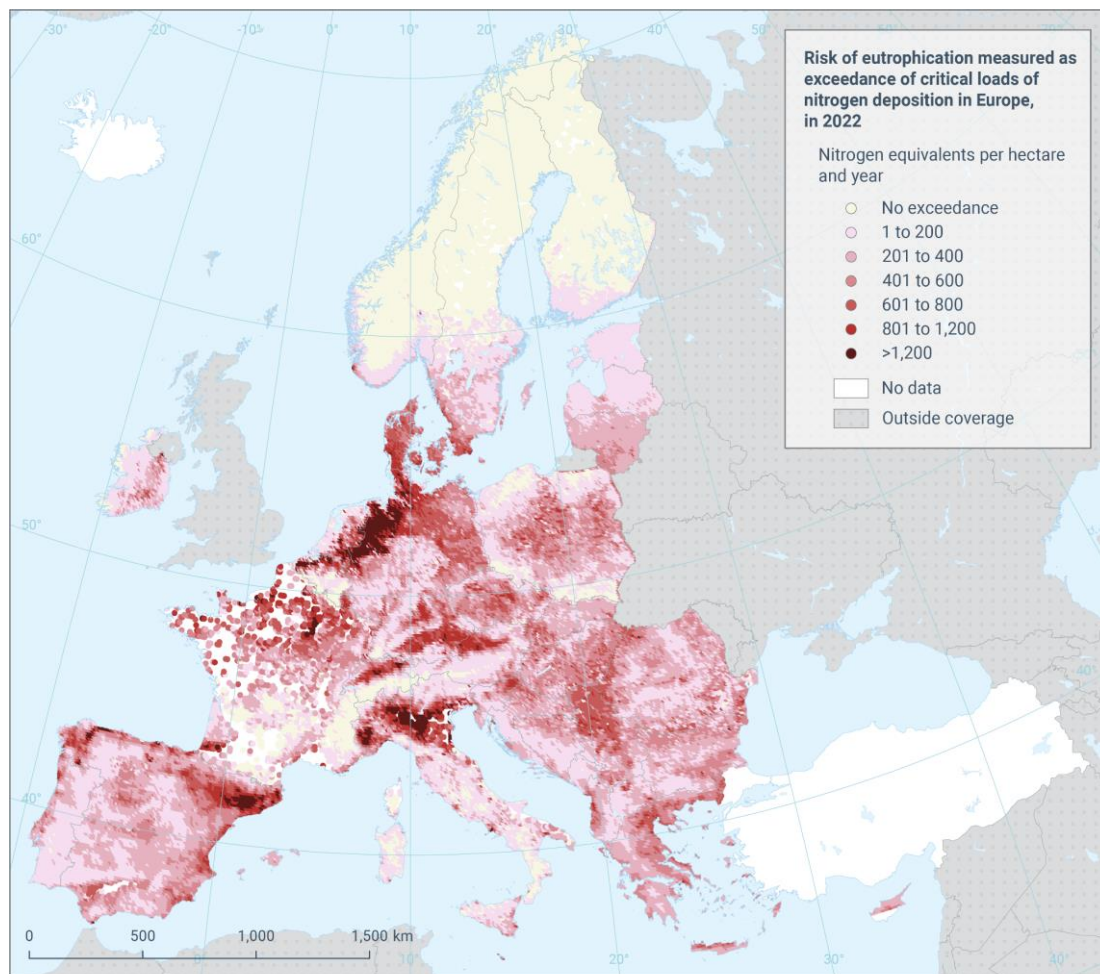
La regione Piemonte nel 2019-2020, come testimoniato dal 7° Censimento dell'Agricoltura, ha registrato una diminuzione nel numero di aziende agricole del 23% rispetto al decennio precedente, ma con un calo delle superfici agricole totali (SAT) e utilizzate (SAU) solo, rispettivamente, del 18.3% e del 6.8%. Questo testimonia un processo in corso già osservato nei decenni precedenti: sempre meno lavoratori gestiscono un territorio utilizzato che resta pressoché invariato, portando ad un ampliamento degli appezzamenti gestiti da ogni singola azienda. La stessa tendenza riguarda gli allevamenti di animali. La provincia di Alessandria è al terzo posto, dopo Torino e Cuneo, sia per numero di aziende sia per estensione delle superfici. [60]

Per permettere la sostenibilità economica della gestione di terreni e allevamenti sempre più grandi le aziende sono portate verso la specializzazione e l'intensificazione, ovvero la massimizzazione della produttività per unità di superficie o per capo di bestiame. L'intensificazione porta ad un numero maggiore di animali in una zona limitata che implica un numero elevato e concentrato di reflui zootecnici da gestire, mentre in ambito agricolo questo processo si traduce in un uso massiccio di fertilizzanti. I precedenti fattori sono la principale causa dell'inquinamento da azoto: in atmosfera sotto forma di ammoniacale, nel suolo e nelle acque sotto forma di nitrati.

Sul piano legislativo Europeo è in vigore la “Direttiva Nitrati” (Direttiva 91/676/CEE) che ha lo scopo di salvaguardare le acque dall’inquinamento di nitrati di origine agricola. In Italia a regolamentare il sistema è il Decreto Legislativo 152/2006. [61]

A livello del suolo l’azoto viene solitamente adsorbito dal terreno ma, in caso di eccessiva produzione, la sovrabbondanza si trasforma in ioni nitrati che, essendo altamente solubili, per il 99% vengono trasportati dalle acque piovane o di irrigazione, finendo nelle falde o nei fiumi. Tramite appositi studi isotopici sull’azoto è possibile riconoscere se l’origine dei nitrati sia l’agricoltura o l’allevamento. La “Direttiva Nitrati” utilizza come strumento di controllo la designazione di Zone Vulnerabili ai Nitrati (ZVN), ovvero zone in cui la concentrazione di nitrati nelle acque presenta, o potrebbe presentare, valori al di sopra di 50 mg/l. Per quanto riguarda la sezione zootecnica, la direttiva impone un limite massimo annuo all’apporto di azoto di 170 kg per ettaro. Nella provincia di Alessandria un grande numero di comuni rientra nelle ZVN e la pressione del settore agro-zootecnico agisce sulla qualità dell’aria in gran parte a causa delle emissioni di ammoniaca (NH_3). Agricoltura e allevamento causano il 92% delle emissioni di ammoniaca totali del Piemonte, dati che confermano quelli UE; secondo l’EEA il settore agricolo è responsabile del 93% delle emissioni di azoto ridotto in atmosfera, quasi totalmente prodotti dal bestiame. L’ammoniaca di per sé non rientra tra le polveri sottili, ma in atmosfera agisce da precursore per formare particolato atmosferico secondario, soprattutto $\text{PM}_{2.5}$.

Oltre ai gravi problemi di inquinamento, la produzione eccessiva di azoto e la relativa deposizione causa grandi squilibri negli ecosistemi. L'eccesso di composti contenenti azoto può portare ad eutrofizzazione nei sistemi acquatici: l'azoto provoca una fioritura anomala di alghe che, una volta morte, vengono decomposte da batteri consumando ossigeno, come conseguenza si ha uno stato di ipossia dell'ambiente acquatico con gravi conseguenze sulla fauna. A livello del suolo la sovrapproduzione di azoto è determinante per l'arricchimento e l'acidificazione (abbassamento del pH), danneggiando le radici delle piante che potrebbero rilasciare i metalli pesanti nel suolo minando fortemente la biodiversità. In Figura 2 si nota come la Pianura Padana sia tra le zone con il più alto valore di azoto equivalente per ettaro e anno in tutta Europa. [62]



Reference data: © EuroGeographics, © FAO (UN), © TurkStat Source: European Commission – Eurostat/GISCO

Figura 2. Rischio di eutrofizzazione misurato come eccesso dei carichi critici di deposizioni di azoto in Europa nel 2022. [62]

5.4 Industrie Alessandrine

Dopo aver esplorato la morfologia del territorio e il contesto in cui si trova Alessandria ora l'obiettivo sarà fornire le fonti locali di pressione ambientale causate dalla presenza di industrie in diversi settori. La presenza di industrie sul territorio non verrà analizzata come la fonte certa dei livelli di inquinamento presenti sul territorio, ma come un possibile rischio ecologico basato sulla categoria di produzione. Di norma esistono leggi e procedure per limitare il più possibile la dispersione nell'ambiente di materiali di scarto, ma la possibilità di malfunzionamenti o procedure non applicate alla perfezione può portare ad un rischio che è giusto analizzare dal momento che certi eventi potrebbero capitare nella quotidianità. Verranno presentate le migliori tecniche disponibili (BAT - Best Available Techniques) per la gestione dei rischi.

I principali settori che saranno analizzati sono:

- Vernici e rivestimenti;
- Metalmeccanico e packaging;
- Chimico;
- Gomma / pneumatici;
- Cosmetico.

l) Vernici e rivestimenti

La presenza di industrie dedicate alla produzione di vernici, smalti e rivestimenti implica diversi rischi a livello ambientale:

- **Aria:** i COV rappresentano la principale criticità di questa classe di industrie a livello di emissioni atmosferiche. Durante ogni fase dei processi si verifica l'evaporazione dei solventi e quindi il rilascio di COV, ma l'emissione più significativa avviene durante l'applicazione e l'essiccazione del prodotto. In questa ultima fase, a causa dell'overspray, ovvero la nebbia di prodotto che non si deposita sull'oggetto, si disperde particolato atmosferico in aria. Per limitare l'emissione di COV è in vigore dal 2008 la Direttiva 2004/42/CE; [63]
- **Acqua:** le acque di lavaggio dei reattori e delle attrezzature contaminate da solventi, resine e pigmenti, se non opportunamente depurate e smaltite, possono veicolare metalli pesanti come piombo e cadmio nei corsi d'acqua in cui vengono sversate;
- **Suolo:** i rifiuti che, se non gestiti correttamente, potrebbero provocare danni ambientali a livello del terreno, derivano da filtri esausti, contenitori contaminati, solventi esausti e tutti gli scarti solidi della produzione.

BAT: la BAT principale consiste nel sostituire le vernici a base di solventi con alternative meno impattanti a livello ambientale come vernici acquose, in polvere (senza solventi) o ad alto stato solido (minor uso di solventi). I COV prodotti dovrebbero essere raccolti e trasferiti ad un post-combustore che, bruciandoli ad alte temperature, li degradi

producendo CO₂ e acqua. Per le acque reflue sono necessari impianti di depurazione per eliminare pigmenti, resine e metalli prima del loro rilascio nella rete idrica. [64]

II) Metalmeccanico e packaging

Si tratta di un settore molto diversificato che comprende una vasta gamma di processi come stampaggio, saldatura, trattamenti superficiali, trattamenti galvanici ecc. I principali rischi sono i seguenti:

- **Aria:** in questi processi si forma una vasta gamma di sostanze tossiche pericolose sia per l'ambiente esterno sia, in modo ancora più preoccupante, per le persone che lavorano all'interno di queste industrie. Tra le sostanze prodotte nei processi metalmeccanici si possono trovare COV, gas di combustione come SO_x e NO_x, nebbie acide, nebbie di cromo esavalente;
- **Acqua:** le acque di raffreddamento e di risciacquo possono essere contaminate da metalli pesanti, acidi, fosfati, oli o solidi sospesi. La necessità è disporre di un impianto di depurazione altamente efficiente e identificare le migliori tecniche disponibili come da Decreto Legislativo 372/99 (art. 3, comma 2);
- **Suolo:** in queste industrie si genera una grande quantità di rifiuti solidi, dalle terre e sabbie di fonderia esauste, che rappresentano la percentuale maggiore, fino a fanghi prodotti dall'impianto di

trattamento delle acque reflue e altre soluzioni di processo esauste.

[65]

BAT: per prevenire la contaminazione delle acque è fondamentale, all'interno dell'impianto, la presenza di una sezione di disoleazione per separare oli ed emulsioni e una in cui trattare fisicamente e chimicamente le acque per far precipitare i metalli pesanti disciolti. Inoltre, una sezione dedicata alla filtrazione degli oli e dei bagni di sgrassaggio risulta necessaria per prolungarne la vita, consentendone il riutilizzo per un tempo maggiore che si traduce in una minore quantità di rifiuti. Per quanto riguarda le polveri e gli inquinanti aerodispersi è fondamentale installare cappe aspiranti in prossimità dei punti di emissione per dirigere le particelle a impianti di filtrazione dell'aria ad alta efficienza. In ultimo, ma di difficile attuazione a causa dei costi, dovrebbe essere ridotto l'utilizzo di solventi clorurati per lo sgrassaggio ed utilizzare invece detergenti a base acquosa o tecniche di pulizia come quella ad ultrasuoni.

III) Chimico

È il settore più rilevante del territorio Alessandrino, le aziende in questo ambito si dedicano alla produzione di polimeri speciali a base organica e inorganica. Il rischio ecologico principale deriva dai PFAS, estremamente stabili e persistenti, e dal loro smaltimento in ogni loro forma:

- **Aria:** si possono verificare emissioni di COV e composti organo-fluorati, come i PFAS, da parte dei reattori, dall'impianto di essiccamento o da quello di trattamento termico. Potrebbero, oltretutto, verificarsi rilasci non controllati di sostanze tramite valvole o pompe difettose;
- **Acqua:** gli scarichi delle industrie chimiche rappresentano la principale via di esposizione delle acque ai rifiuti inquinanti. Anche in questo caso sono i PFAS i principali responsabili del rischio alla salute umana, contaminando le acque possono essere trasportati a grandi distanze se presenti in alte concentrazioni;
- **Suolo:** i PFAS contenuti nei fanghi degli impianti di trattamento delle acque reflue potrebbero essere sversati accidentalmente nel terreno, provocando una contaminazione molto pericolosa che potrebbe, con pioggia o irrigazione, penetrare a fondo nel terreno fino a raggiungere acque di falda. La contaminazione del suolo può avvenire tramite la deposizione di PFAS o altri composti presenti in aria.

BAT: la migliore tecnica per contrastare il problema sarebbe la sostituzione dei PFAS con alternative meno pericolose e biodegradabili, ma questa via è estremamente difficile da percorrere per cause tecniche ed economiche. La tecnica più concretamente realizzabile consiste in trattamenti di separazione per le acque reflue come filtrazione su carboni attivi granulari (GAC), resine a scambio ionico o membrane per l'osmosi inversa. I trattamenti distruttivi possono essere

attuati solo per rifiuti concentrati come i GAC esausti, e necessitano di impianti autorizzati che possono incenerire i rifiuti ad altissime temperature ($> 1100^{\circ}$) al fine di rompere i legami carbonio-fluoro. [66]

IV) Gomma / pneumatici

Settore di rilevanza nel contesto locale, in questo caso il rischio non deriva soltanto dai processi di produzioni, ma in proporzione molto maggiore dall'usura e dallo smaltimento del prodotto finito.

Fase di produzione:

- Aria: a causa dei processi di miscelazione a caldo, vulcanizzazione, aggiunta di additivi come il nero di carbonio (fuliggine), e della presenza di composti come solforati, è presente un forte rilascio di COV e PM, che se non opportunamente contenuti e gestiti può portare ad un grave inquinamento della matrice aerea;
- Acqua: in presenza di acque di raffreddamento o acque reflue contaminate non correttamente gestite è alto il rischio che, nel momento in cui vengono riversate nelle acque superficiali, vadano a contaminarle con fuliggine, residui di gomma, detergenti, oli. Anche le polveri, depositandosi, potrebbero finire in acqua direttamente o indirettamente penetrando attraverso il terreno;
- Suolo: il suolo potrebbe essere inquinato da rifiuti solidi o liquidi sia per deposizione delle polveri, sia a causa di perdite accidentali dai

serbatoi di stoccaggio, di perdite nelle operazioni di carico e scarico o di guasti nelle tubature.

Fase di utilizzo: questa è la fase critica, in cui l'usura continua degli pneumatici rilascia nell'ambiente particelle plastiche, gomma sintetica, fuliggine, metalli, dalla dimensione micrometrica o nanometrica, facilmente trasportabili da vento e pioggia. La frazione più grossolana può accumularsi ai bordi delle strade ed entrare in contatto con il suolo, questa parte è circa il 75% del totale, mentre la frazione più fine può essere trasportata dalle piogge fino a raggiungere dei corsi d'acqua o disperdersi in aria creando ulteriore PM.

BAT: utilizzare sistemi chiusi con appositi sistemi di aspirazione per ridurre le emissioni di PM e composti contenenti zolfo. I composti gassosi che si creano, come i COV, devono essere captati e trattati con macchine come ossidatori termici rigenerativi (RTO).

Purtroppo, le BAT si limitano ai processi di produzione, ma come visto in precedenza i principali rischi ambientali, e di conseguenza per la salute umana, derivano dalla fase di utilizzo. [67]

V) Cosmetici

Come nel caso degli pneumatici, anche in ambito cosmetico il problema ambientale principale deriva principalmente dalla fase di

utilizzo, in modo molto maggiore rispetto alla fase di produzione, sebbene anch'essa presenti possibili criticità:

- **Aria:** le emissioni principali riguardano i gas serra come CO₂ legati al consumo energetico. Potrebbero essere presenti emissioni di COV derivanti dall'uso di alcoli e profumi;
- **Acqua:** interessata in grande misura nella fase di utilizzo, dal momento che quasi tutti i cosmetici sono wash-off, ovvero vengono risciacquati finendo nelle acque reflue domestiche. Una vasta gamma di prodotti conteneva in passato polimeri che agivano da agenti esfolianti, stabilizzanti, opacizzanti, che, una volta scaricati nelle acque, contribuiscono all'inquinamento idrico da parte di microplastiche. Molti composti chimici presenti nei cosmetici non riescono ad essere completamente rimossi dagli impianti di depurazione e la creazione di nuove sostanze permette, in alcuni casi, di sfuggire al controllo attuato tramite leggi e normative specifiche. Si stima che in Europa vengano rilasciate ogni anno circa 3.800 tonnellate di microplastiche da cosmetici attraverso gli scarichi domestici. [68]
- **Suolo:** in questo ambito è enorme la quantità di imballaggi, soprattutto in plastica, che devono essere gestiti in fase di produzione e di fine vita al termine dell'utilizzo.

BAT: la primaria, e ormai obbligo di legge, consiste nel sostituire le microplastiche con altri composti inerti e biodegradabili come microsfele di cellulosa o silice. È imprescindibile un impianto di

trattamento chimico-fisico delle acque reflue per la rimozione di tensioattivi, oli, pigmenti e un impianto di aspirazione e gestione dei COV. [64]

Un riassunto relativo all'analisi dei rischi legati alla presenza di industrie appartenenti ai precedenti settori industriali è riportato in Tabella 8.

Settore Industriale	Rischio Stimato per l'Aria	Rischio Stimato per l'Acqua	Rischio Stimato per il Suolo
Chimico	Alto (COV, PFAS)	Alto (PFAS, composti organici)	Medio-Alto (PFAS)
Metalmeccanico - Fonderie	Alto (Polveri, Metalli, COV)	Basso (Acque di raffreddamento)	Medio (Rifiuti: sabbie, scorie)
Metalmeccanico - Trattamenti	Medio (Nebbie acide, Cr VI)	Alto (Metalli pesanti, cianuri)	Medio (Fanghi)
Gomma - Produzione	Medio (COV, polveri, odori)	Basso	Basso
Gomma - Uso (Abrasione)	Medio (Microplastiche come PM)	Medio-Alto (Microplastiche, gomma, fuliggine)	Alto (Microplastiche, gomma, fuliggine)
Vernici	Alto (COV, particolato)	Medio (Acque di lavaggio)	Medio (Rifiuti: morchie, fanghi)
Cosmetici	Basso (Consumi energetici, CO ₂)	Medio (Microplastiche, chimici)	Medio (Rifiuti da packaging)

Tabella 8. Livello di rischio ambientale per settore e matrice nel contesto alessandrino.

Per tutte le categorie di industrie i danni relativi alle errate procedure di smaltimento dei rifiuti o ai danni accidentali può compromettere

gravemente la stabilità ambientale. È fondamentale la presenza di impianti di depurazione e di contenimento all'avanguardia, sottoposti a continui controlli e manutenzione per ridurre al minimo la possibilità di creare un rischio per la popolazione. Una volta rilasciate in aria, nel suolo o nelle acque queste sostanze in parte restano in sito, causando danni enormi alla salute umana, alla flora e alla fauna, e in parte vengono trasportati dagli agenti atmosferici allargando sempre di più il bacino di popolazione soggetta all'esposizione di sostanze nocive.

6. Presentazione dei dati

Questa sezione è dedicata alla presentazione dei dati ufficiali ARPA Piemonte relativi all'inquinamento ambientale ad Alessandria, reperiti tramite i canali pubblici dell'agenzia. I dati saranno presentati, visualizzati e confrontati con i nuovi limiti imposti dall'UE per il 2030 e con le linee guida dell'OMS.

6.1 Dati inquinamento dell'aria

I dati relativi all'inquinamento dell'aria sono tra i più completi e attendibili, grazie alle continue misurazioni manuali e automatiche che vengono effettuate dalle stazioni di rilevamento. Una grande quantità di dati viene frequentemente registrata ed elaborata dalle stazioni del Sistema Regionale di Rilevamento della Qualità dell'Aria (SRRQA), gestito da ARPA per poter fornire un quadro affidabile relativo alle concentrazioni degli inquinanti maggiormente presenti nella matrice aerea.

Nella città di Alessandria sono presenti tre stazioni:

- Stazione D'Annunzio: è una stazione di tipo "traffico", cioè posizionata in una zona urbana (residenziale/commerciale) per misurare l'impatto delle emissioni prodotte dal traffico;
- Stazione Volta: è una stazione di tipo "fondo", cioè posizionata in un'area non direttamente sottoposta ad intenso traffico e di conseguenza può essere utile per misurare il livello di inquinamento di fondo della zona, cioè il livello al quale la popolazione è sottoposta;
- Stazione Spinetta: è una stazione di tipo "industriale", ovvero misura i livelli di inquinamento in una zona industriale specifica per monitorare alcuni parametri precisi.

Ogni stazione misura solo alcuni tipi di composti, in base al rischio a cui è esposta una certa zona. Per esempio, nella stazione D'Annunzio non

vengono misurati valori come il PM_{2.5} o l'O₃ perché, nel caso di una stazione di "traffico", le sostanze di interesse sono quelle che derivano dalla combustione nei motori come NO_x o PM₁₀. Ogni stazione registra diversi parametri, ma questa analisi si concentra su quelli più impattanti a livello sanitario. Di conseguenza, i dati analizzati saranno solo quelli provenienti dalle stazioni di traffico e di fondo, in modo da evidenziare i reali livelli di esposizione della popolazione.

Inquinanti come SO_x, CO, benzene, ormai non rappresentano più un problema critico per la salute pubblica ad Alessandria, dal momento che i loro valori di concentrazione sono costantemente molto bassi e sotto controllo, ben al di sotto dei limiti di legge e delle raccomandazioni dell'OMS.

6.1.1 Situazione attuale, ottobre 2024 / settembre 2025

Alessandria, come visto in precedenza, è spesso descritta come una delle città più inquinate d'Italia a livello di sostanze tossiche presenti in atmosfera. Verranno ora analizzati i livelli degli inquinanti maggiormente impattanti per la salute umana registrati tra ottobre 2024 e settembre 2025 e le relative linee guida di UE e OMS. Alcuni dati risultano mancanti, in quei casi si è deciso di lasciare il campo vuoto, seppur con la consapevolezza di perdere alcune informazioni. Una soluzione avrebbe potuto essere quella di aggiungere dati fittizi in linea con la media del periodo ma, tenendo in considerazione le rapide

variazioni di concentrazione che potrebbero verificarsi anche a distanza di un giorno, è stata presa una decisione più conservativa.

I) PM10

Il PM10 è da anni uno degli inquinanti che desta maggiore preoccupazione nella città di Alessandria. In Figura 3 e Figura 4 è possibile apprezzare l'andamento della concentrazione di PM10 registrato, rispettivamente, nelle stazioni Volta e D'Annunzio dall'ottobre 2024 al novembre 2025. Sono presentati il valore medio registrato nel periodo di interesse di un anno (verde), il valore medio limite di legge attuale ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$; rosso), il valore medio limite previsto dal 2030 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$; giallo) e il valore medio limite secondo le raccomandazioni dell'OMS ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$; blu).

Per la stazione Volta, essendo disponibili sia i dati raccolti con il metodo gravimetrico manuale (il gold standard) sia quelli raccolti in automatico tramite il metodo basato su raggi beta, è stata effettuata una media dei dati raccolti con entrambi i metodi per ridurre al minimo i valori mancanti nel corso del tempo.

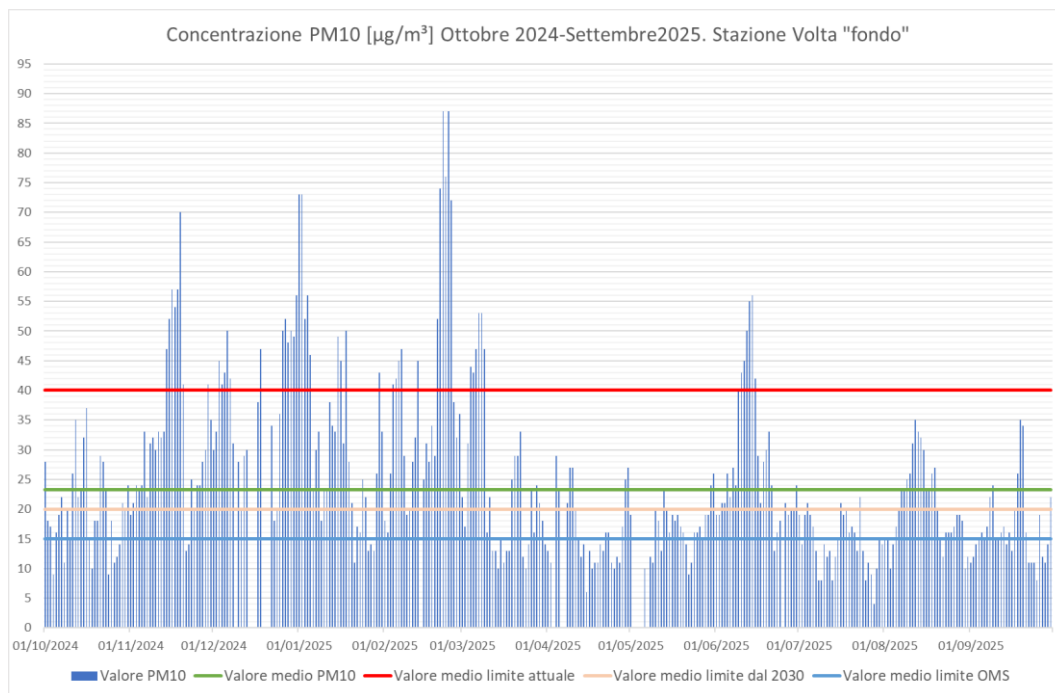


Figura 3. Concentrazione PM10 Stazione Volta ottobre 2024 - settembre 2025.

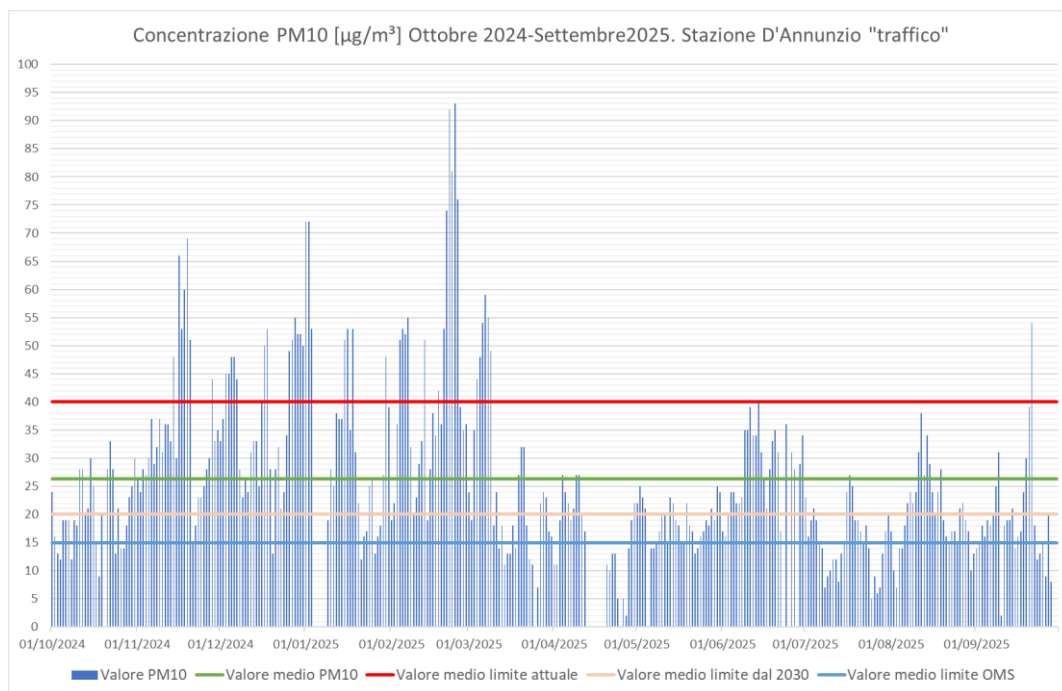


Figura 4. Concentrazione PM10 Stazione D'Annunzio ottobre 2024 - settembre 2025.

Dai grafici è evidente il fatto che le concentrazioni maggiori di PM10 sono registrate durante i mesi invernali. Questa associazione è la prova dell'impatto relativo all'aumento del riscaldamento domestico e all'effetto dell'inversione termica che blocca gli inquinanti vicino al suolo e non permette la loro dispersione in atmosfera. Questi picchi stagionali rappresentano un rischio concreto di esposizione acuta. Come discusso nel paragrafo 3.1.3, il particolato inalato durante questi episodi può superare la barriera alveolare e innescare processi di infiammazione sistemica e stress ossidativo, aggravando la condizione di soggetti vulnerabili.

Il valore medio nel periodo analizzato si trova al di sotto del valore medio limite di legge, ma, allo stesso tempo, si trova ben al di sopra del limite previsto a partire dal 2030 e delle raccomandazioni ancora più stringenti dell'OMS. Il quadro generale è estremamente preoccupante ed è necessario ridurre drasticamente le emissioni per poter raggiungere, almeno, l'obiettivo imposto dall'UE in tempi ragionevoli.

Dall'analisi degli andamenti è possibile notare che il valore relativo alla stazione D'Annunzio sia leggermente più alto ($26.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$) di quello della stazione Volta ($23,71 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Tale differenza deriva dal fatto che questa stazione, essendo una stazione localizzata in una zona particolarmente soggetta al traffico veicolare, subisca un maggiore impatto derivante da quest'ultimo. Tuttavia, nonostante questa differenza, anche la stazione urbana Volta presenta valori allarmanti, questo suggerisce che il traffico non rappresenta il problema principale

della zona, ma soltanto uno dei fattori che contribuiscono a rendere l'aria carica di inquinanti.

Oltre al rispetto del limite sulla media annuale, la normativa italiana attuale impone un secondo vincolo sul numero di superamenti giornalieri. In particolare, la concentrazione media giornaliera non deve superare la soglia di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per più di 35 giorni all'anno. Nell'arco temporale analizzato i giorni di superamento della soglia sono stati 20. Per il calcolo però, in questo caso, sono stati raccolti solamente i dati ufficiali derivanti dal metodo gravimetrico perché è l'unico utilizzato a questo specifico scopo, e l'assenza di dati in alcuni giorni potrebbe aver provocato una sottostima del valore. Nonostante questa scelta conservativa, il numero di superamenti è comunque al di sopra della soglia prevista per il 2030 (18 giorni), considerando, in aggiunta, che dal prossimo decennio il valore soglia sarà di $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e non più di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Il futuro limite Europeo è, oltretutto, molto al di sopra delle raccomandazioni dell'OMS, che ritengono accettabili soltanto 3 superamenti annui dei $45 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I valori limite sono riassunti in Tabella 9.

Parametro di riferimento	Valore soglia giornaliero	N° max superamenti annui
Normativa Attuale (UE/Italia)	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$	35 giorni
Normativa Futura (UE 2030)	$45 \mu\text{g}/\text{m}^3$	18 giorni

Parametro di riferimento	Valore soglia giornaliero	N° max superamenti annui
Raccomandazione OMS	45 µg/m ³	3 giorni

Tabella 9. Limiti normativi attuali e futuri PM10.

II) PM 2.5

La variazione nel tempo durante l'anno della concentrazione di PM2.5 è descritta in Figura 5. In questo caso i dati resi disponibili dagli enti pubblici riguardano unicamente la stazione Volta perché, a differenza del PM10 che presenta una percentuale significativa delle sue particelle generata dall'usura di freni, asfalto e gomme, il PM2.5 si genera in particolare a causa dei sistemi di riscaldamento domestici, oltre che a causa delle industrie e degli scarichi dei veicoli. La sua composizione suggerisce che non sarebbe evidente una differenza apprezzabile tra una stazione e l'altra, per questo la concentrazione di PM2.5 viene misurata solo in una zona urbana in modo da fornire indicazioni precise sulla dose a cui è esposta la popolazione.

Come nel caso del PM10 i dati sono stati selezionati come la media tra i valori ricavati dal metodo gravimetrico e quelli ricavati con il metodo automatico della stazione per minimizzare i valori nulli, seppur con la consapevolezza che i dati gravimetrici siano i più affidabili. La concentrazione media annuale risulta essere di 15,81 µg/m³.

Il valore limite attuale si attesta a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre quelli previsti dall'UE per il 2030 e quelli raccomandati dall'OMS sono, rispettivamente, $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

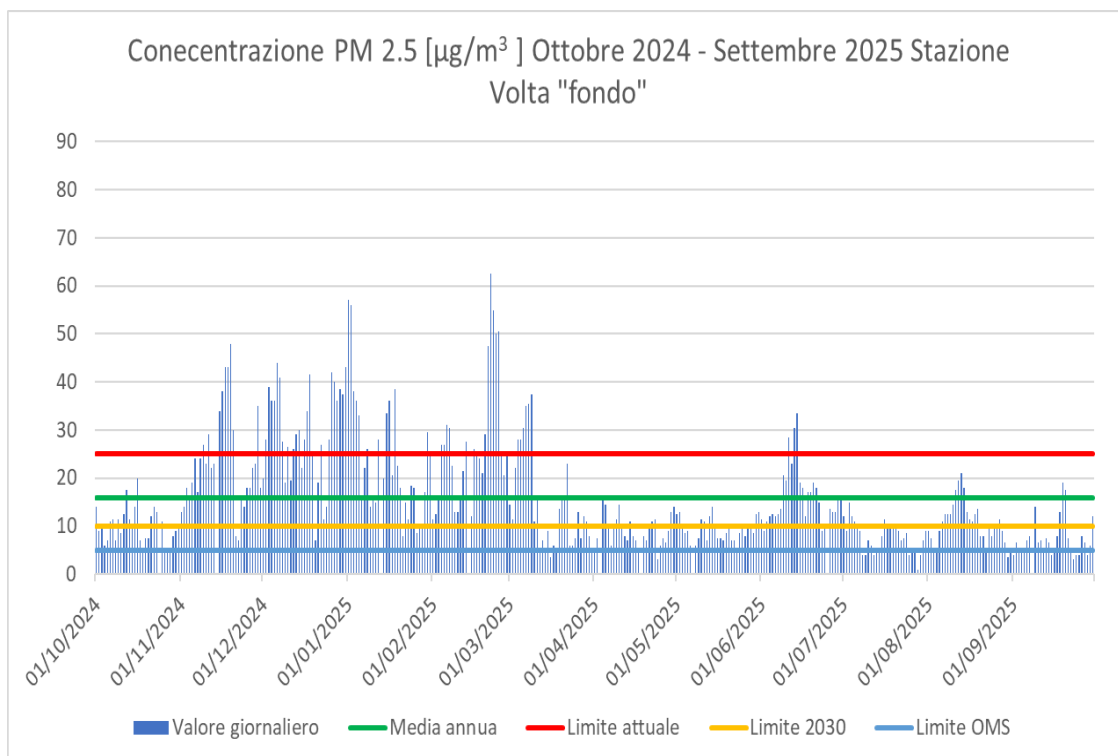


Figura 5. Concentrazione PM2.5 Stazione Volta ottobre 2024 - settembre 2025.

Similmente a quello del PM10, l'andamento nel tempo del PM2.5 presenta un'evidente sproporzione tra mesi invernali ed estivi, con i primi che presentano concentrazioni medie sensibilmente più alte per gli stessi motivi descritti in precedenza.

Il senso di sicurezza provocato dal valore medio che si attesta ampiamente al di sotto dei limiti attuali potrebbe distogliere

l'attenzione dal fatto che per rispettare la soglia prevista per il 2030 dall'UE sarebbe necessario un abbattimento del 36.52% delle concentrazioni rilevate, un valore enorme, difficilmente raggiungibile in un lasso di tempo così ridotto. I limiti più stringenti rispetto al PM10 sono la prova della maggiore pericolosità del PM2.5, con una soglia di $5\mu\text{g}/\text{m}^3$ posta dall'OMS relativa ai possibili effetti sulla salute.

Un altro fattore preoccupante riguarda la grande quantità di valori esageratamente elevati, che indica un'esposizione acuta significativa per la popolazione. Nonostante l'esposizione cronica (media annuale) sia accettabile secondo la normativa vigente, quella acuta (i picchi giornalieri) è altissimo, con valori che sono 10-12 volte superiori a quanto raccomandato dall'OMS per la salvaguardia della salute. Al momento, però, non esiste una soglia fissa che regoli il numero massimo di superamenti giornalieri durante un anno, esponendo la popolazione ad un rischio elevato generato da un buco normativo. Questa soglia verrà inserita con il piano europeo del 2030 come descritto nella Tabella 10.

Parametro di riferimento	Valore soglia giornaliero	N° max superamenti annui
Normativa Attuale (UE/Italia)	Non definito	Non definito
Normativa Futura (UE 2030)	$25\mu\text{g}/\text{m}^3$	18 volte

Parametro di riferimento	Valore soglia giornaliero	N° max superamenti annui
Raccomandazione OMS	15 µg/m ³	3-4 giorni

Tabella 10. Limiti normativi attuali e futuri PM2.5.

III) NO₂

I valori di NO₂ sono raccolti in modo continuativo ogni ora, mettendo quindi a disposizione un database di 24 valori ogni giorno. Nelle Figure 6 e 7 sono presentati i valori medi giornalieri del periodo analizzato, rispettivamente, della stazione Volta e D'Annunzio. Ogni valore giornaliero è stato calcolato come la media dei 24 valori giornalieri. Successivamente il valore annuo medio è stato calcolato come la media dei valori medi dei 365 giorni. In questo caso la stazione di fondo è utile a monitorare gli effetti sulla popolazione, dal momento che il dato più utile riguarda la concentrazione media effettiva alla quale gli abitanti sono esposti. La stazione di traffico, invece, è utile per monitorare la fonte primaria di emissione, in particolar modo i motori diesel, per verificare la presenza di picchi di concentrazione in un particolare giorno o in particolari orari.

Diversi giorni risultano completamente privi di dati, questi non saranno tenuti in considerazione nel calcolo della media annua e negli episodi di esposizione acuta.

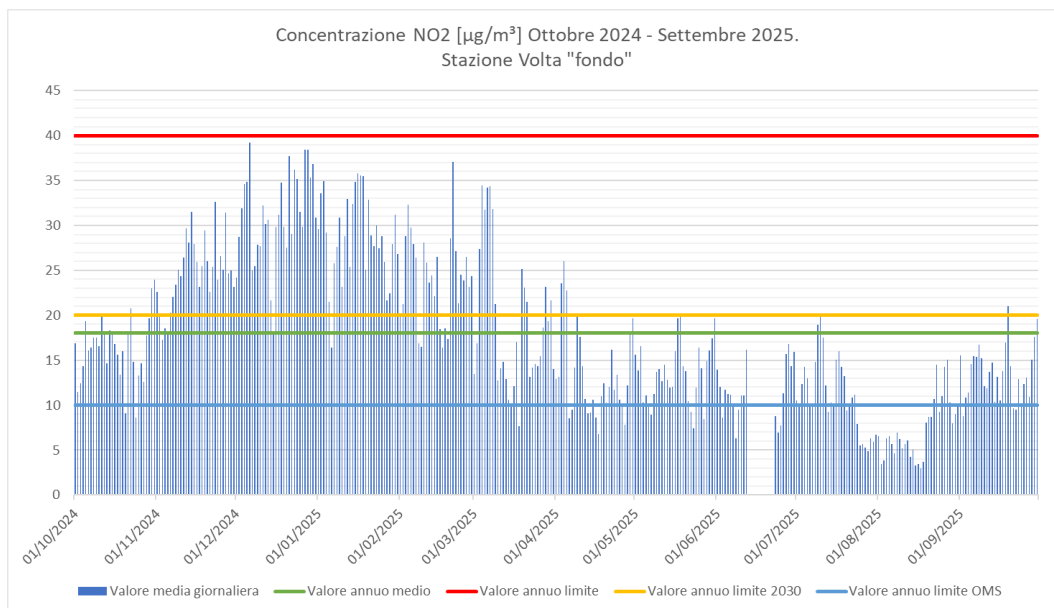


Figura 6. Concentrazione NO₂ Stazione Volta.

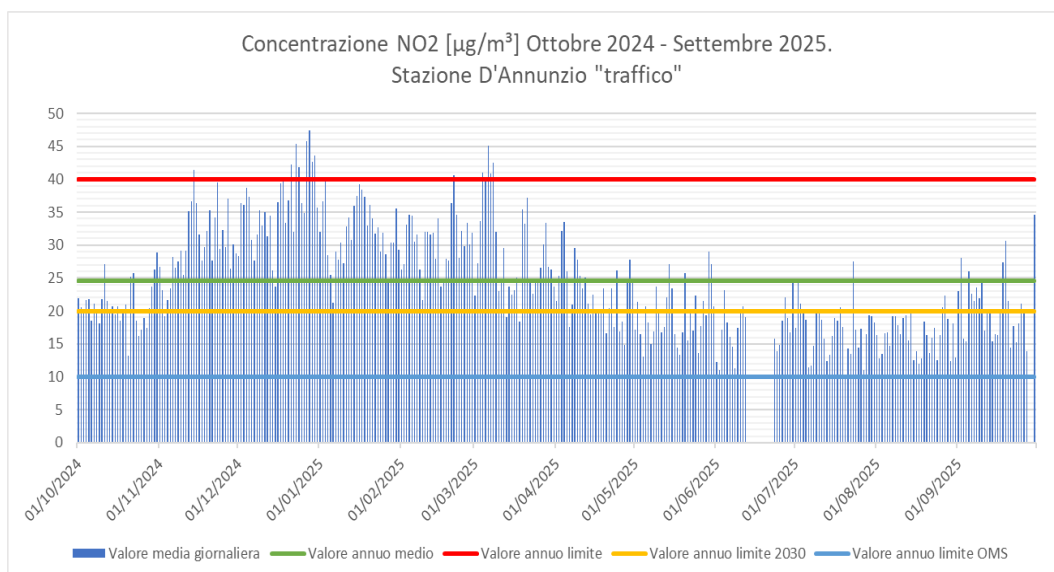


Figura 7. Concentrazione NO₂ Stazione D'Annunzio.

Dai grafici è possibile notare che, come ampiamente previsto, la concentrazione media giornaliera nella stazione di traffico è più elevata rispetto alla stazione di fondo, questo perché la prima si trova posizionata in prossimità della fonte di emissione principale e quindi più sensibile ad eventi acuti che di conseguenza vanno ad influire sul valore medio annuo.

La stazione di fondo presenta un valore annuo medio al di sotto dei limiti attuali, ma anche al di sotto del limite previsto per il 2030, seppur di poco. La stazione di traffico, al contrario, presenta valori maggiori del limite futuro imposto dall'UE, restando comunque ampiamente al di sotto dei limiti annuali. Entrambe le stazioni si trovano a livelli quasi 2 volte più elevati rispetto ai limiti suggeriti dall'OMS, il che testimonia la grave situazione in cui si trova la città nonostante formalmente rispetti la normativa vigente e si trovi sulla buona strada per il 2030.

Proprio a causa della frequenza degli eventi di esposizione acuta è previsto un limite orario di $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 18 volte all'anno, questo limite è ampiamente rispettato nel caso di Alessandria. Nel 2030 il limite orario resterà invariato ma i giorni in cui sarà considerato ammissibile superare questo limite scenderanno a 3. In aggiunta, verrà immesso un limite giornaliero di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 18 volte l'anno dal 2030, anche se secondo l'OMS il valore accettabile sarebbe di $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con l'impegno di restare sempre al di sotto di questa soglia. La città nel corso del periodo analizzato ha rispettato il limite di superamenti giornalieri di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ non

registrandone nessuno, tuttavia i superamenti della soglia suggerita dall'OMS sono stati ben 88, dimostrando nuovamente che il fatto di rispettare i limiti di legge non implichi una buona qualità dell'aria o un basso rischio di sviluppare patologie correlate all'inquinamento. Un riassunto dei riferimenti normativi è presente in tabella 11.

Fonte Normativa	Limite Media Oraria	Limite Media Giornaliera (24h)
Normativa Attuale (UE 2008/50/CE)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (max 18 superamenti/anno)	Non previsto
Obiettivo UE 2030	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (max 3 superamenti/anno)	50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (max 18 superamenti/anno)
Raccomandazioni OMS (2021)	200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabella 11. Limiti normativi attuali e futuri NO₂.

Osservando poi il grafico in Figura 8 è possibile notare l'andamento orario medio annuo della concentrazione di NO₂ per la stazione Volta per comprendere immediatamente il contributo delle emissioni in diverse fasce orarie.

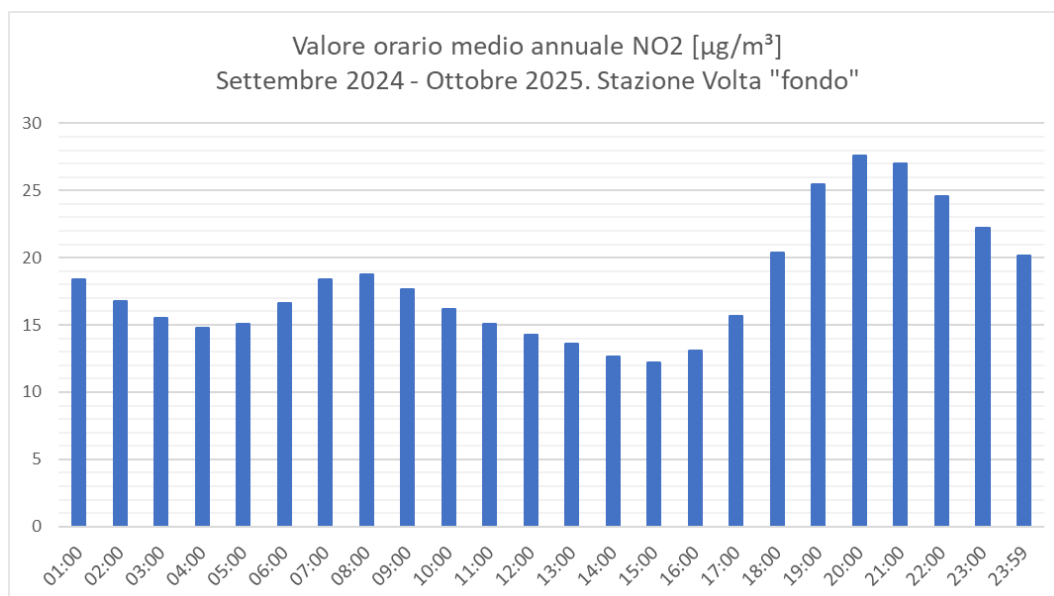


Figura 8. Concentrazione media giornaliera annua NO₂.

L'andamento della concentrazione oraria è utile per comprendere la somma totale degli effetti dei tre principali fattori che contribuiscono a mantenere alto il livello di NO₂ in atmosfera:

- **Traffico:** contribuisce in modo importante al primo picco registrato tra le 7:00 e le 9:00 del mattino, orario di punta del traffico a causa di impegni scolastici e lavorativi, e al secondo picco, che ha inizio alle 18:00 quando la giornata lavorativa giunge al termine;
- **Riscaldamenti:** contributo importante al picco serale, quando la popolazione rientra in casa e, in inverno, vengono accese le caldaie che contribuiscono in misura importante alle emissioni di NO₂;
- **Inversione termica:** amplifica enormemente i contributi precedenti nella fascia serale. Al tramonto il suolo si raffredda velocemente e

questo strato d'aria inquinato resta bloccato vicino al suolo, alzando le concentrazioni orarie serali.

IV) O₃

I dati relativi alle concentrazioni di ozono sono raccolti dall'ARPA ogni ora nella stazione Volta, mentre non sono presenti nella stazione di traffico. Anche in questo caso dati relativi a diversi giorni risultano completamente assenti: come nei casi precedenti, i giorni senza dati non saranno tenuti in considerazione, né per quanto riguarda la media annuale totale, né nel conteggio di eventuali superamenti del limite giornaliero.

Nel grafico in Figura 9 è apprezzabile l'andamento giornaliero (calcolato come media dei dati orari in un giorno) delle concentrazioni di O₃ nel periodo ottobre 2024 - settembre 2025. Il valore medio giornaliero è stato considerato, come da protocollo, come il valore massimo delle 24 medie mobili giornaliere calcolate su 8 ore.

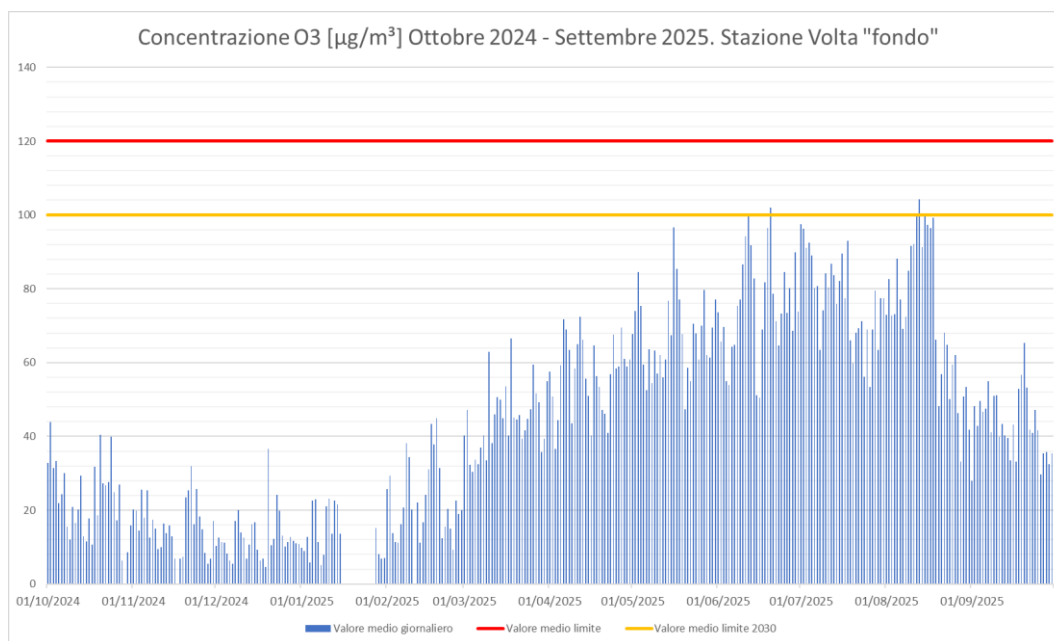


Figura 9. Concentrazione media giornaliera annua O₃.

In questo caso notiamo un'inversione rispetto ai grafici precedenti, i valori più elevati sono registrati nel periodo estivo, a dimostrazione del fatto che l'ozono è un inquinante che si forma grazie alla radiazione solare, massima in estate, e alle alte temperature che aumentano la velocità delle reazioni chimiche.

I limiti per l'O₃ fanno riferimento non alla media annuale ma al numero di superamenti totali da parte dei valori massimi della media mobile di 8 ore, limiti ampiamente rispettati per la legislazione attuale. Le attuali normative stabiliscono un massimo di 25 superamenti annui della soglia di 120 µg/m³ calcolati come media su 3 anni, nel 2030 la soglia sarà abbassata a 100 µg/m³ con un massimo di 18 superamenti come media di 3 anni. Le raccomandazioni OMS sono in linea con i 100 µg/m³,

seppur non ammettendo superamenti, ma aggiungono un limite di 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ nei periodi estivi.

Un riassunto di questi dati è presente in tabella 12.

Fonte Normativa	Limite per la Salute (Max media mobile 8h)	Superamenti Concessi (per il limite 8h)	Limite di Picco Stagionale (8h)
Normativa Attuale (UE)	120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	25 giorni/anno (come media su 3 anni)	-
Obiettivo UE 2030	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18 giorni/anno	-
Raccomandazioni OMS (2021)	100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Non previsto (si applica il limite stagionale)	60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tabella 12. Limiti normativi attuali e futuri O_3 .

In Figura 10 si può apprezzare la media oraria durante l'anno che, in linea con i dati relativi alla media giornaliera, dimostrano una concentrazione estremamente più alta nelle ore centrali del giorno, nei momenti in cui è presente una radiazione solare maggiore accompagnata da temperature più elevate.

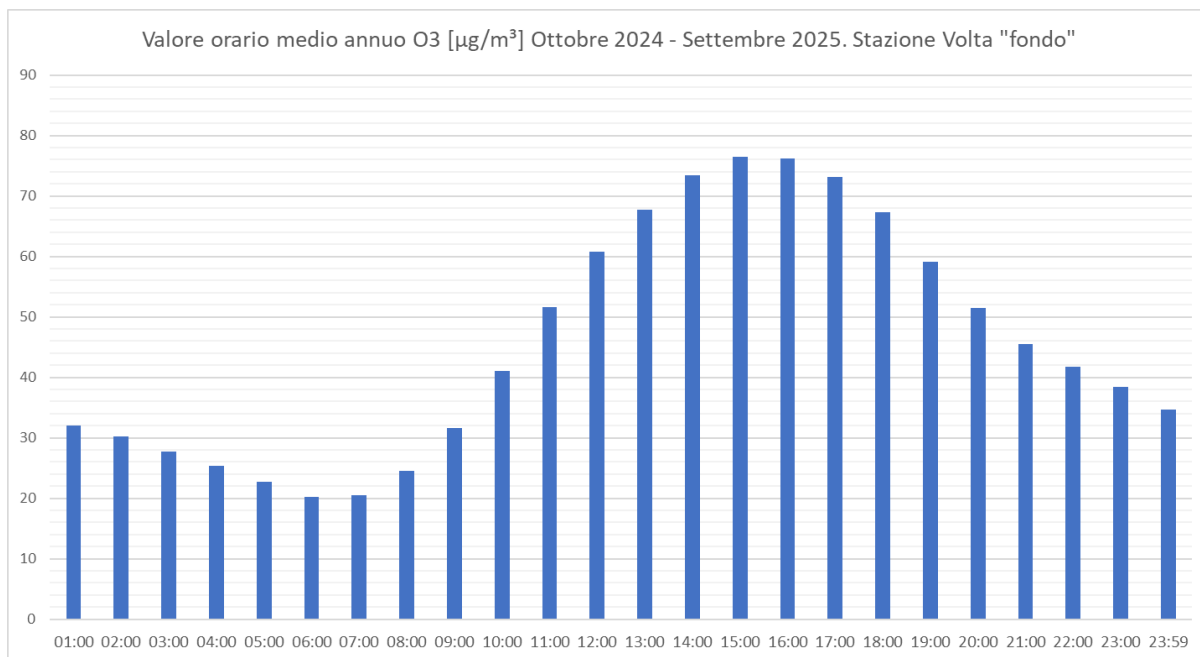


Figura 10. Concentrazione media giornaliera annua O₃.

6.1.2 Trend decennale e condizioni meteorologiche

Di seguito saranno analizzati gli andamenti delle concentrazioni degli inquinanti nel corso dell'ultimo decennio. Saranno presentati diversi tipi di grafici per analizzare al meglio il trend annuale di fondo, la stagionalità e il rispetto dei limiti di legge.

I) PM₁₀

Nel grafico in Figura 11 è analizzata la tendenza mensile del valore di PM₁₀ registrato nel corso di 10 anni ad Alessandria, includendo l'anno analizzato nella sezione precedente. Si tratta del modo più immediato

per comprendere il reale andamento delle concentrazioni nel tempo e per effettuare previsioni e programmi per il futuro. In questo caso i valori giornalieri sono stati ricavati come media tra i valori derivati dalle misure manuali e quelli derivati dalle misure automatiche, per limitare al minimo la presenza di campi vuoti nei dati. Questa metodologia è stata applicata solo fino ad inizio 2019, negli anni precedenti gli unici dati disponibili erano quelli delle rilevazioni di manuali di basso volume.

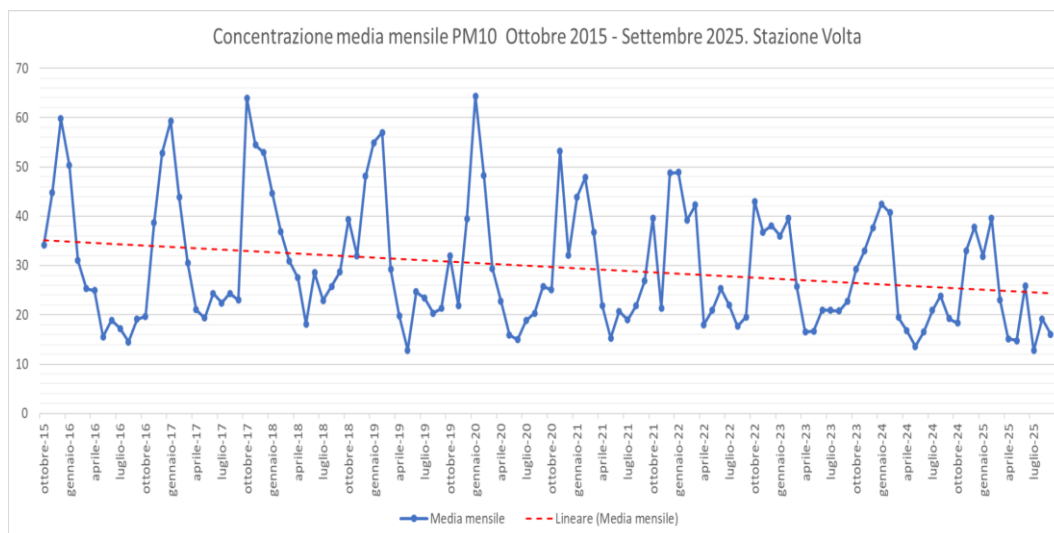


Figura 11. Concentrazione media mensile PM10.

Nel grafico è evidente la stagionalità rappresentata dai picchi dei mesi invernali. La linea rossa tratteggiata evidenzia la tendenza dell'ultimo decennio, con una riduzione costante delle emissioni. I picchi più elevati si trovano in corrispondenza del mese di gennaio, nonostante variazioni dipendenti dalle condizioni meteorologiche dello specifico anno. Per quanto riguarda i valori minimi abbiamo una distribuzione durante

tutto il periodo primaverile ed estivo, in particolare da maggio ad agosto.

In **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** si può notare la media annua in relazione ai limiti UE attuali, a quelli previsti per il 2030 e a

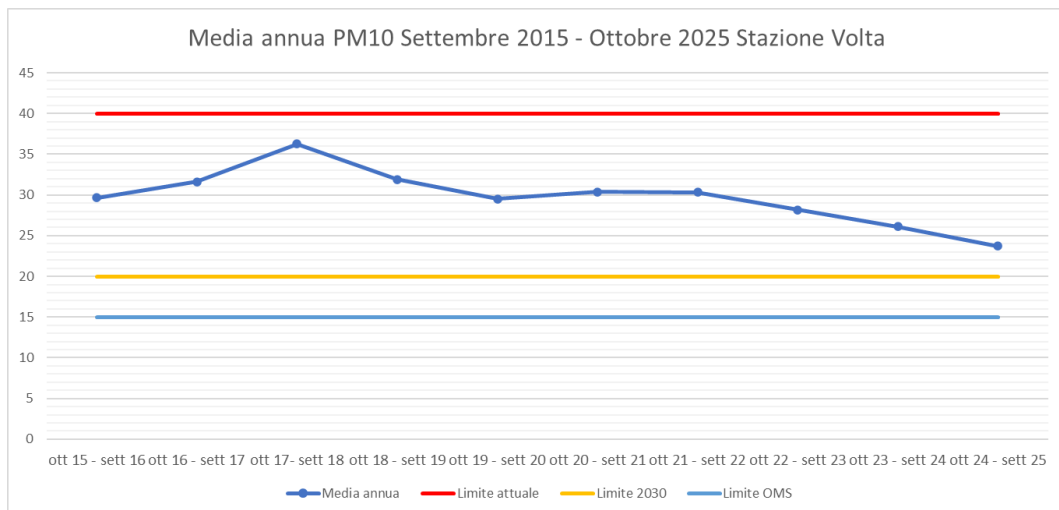


Figura 12. Variazione concentrazione annua PM10.

quelli raccomandati dall'OMS.

Questo grafico, come il precedente, evidenzia un trend che punta verso una riduzione sempre maggiore delle emissioni negli ultimi anni, avvicinandosi al limite previsto per il 2030 facendo ben sperare per un ulteriore miglioramento della situazione nel prossimo futuro.

Tuttavia, questo costante miglioramento delle condizioni potrebbe portare a false speranze: come abbiamo visto, un grande impatto sull'inquinamento è dato dalle imprevedibili condizioni meteorologiche, per esempio un paio di inverni più secchi rispetto agli ultimi anni potrebbero provocare un aumento della media annua. Un altro fattore

da tenere in considerazione riguarda il fatto che i primi interventi sono solitamente i più semplici e che portano i risultati più immediati. Per esempio, limitare la circolazione dei veicoli di vecchia generazione è una soluzione veloce, che porta subito ad un abbattimento dei valori, ma la sfida diventa sempre più difficile andando avanti nel tempo, con la necessità di imporre soluzioni aggiuntive che potrebbero presentare problemi di realizzazione a causa dei costi elevati o del lungo periodo di implementazione, come, per esempio, in riferimento a miglioramenti del trasporto pubblico o a metodi meno impattanti di riscaldamento degli edifici.

II) PM 2.5

Dai dati riportati nel grafico in Figura 13 si riscontra che, come per la concentrazione media di PM10, anche quella del PM 2.5 evidenzia una tendenza decrescente negli ultimi anni. I dati relativi al singolo mese sono stati raccolti come media dei valori giornalieri, escludendo i giorni in cui il rilevamento non è stato validato.

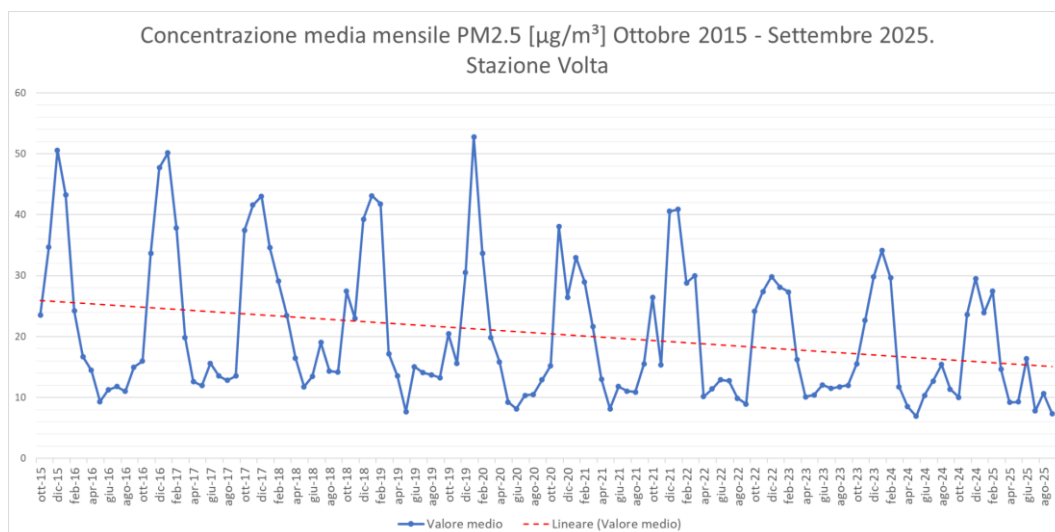


Figura 13. Concentrazione media mensile PM2.5.

L'andamento delle medie mensili del PM2.5, come illustrato nel grafico, conferma un andamento solidale con i dati del PM10 analizzati in precedenza: presenza di picchi nei mesi invernali (in particolare gennaio) e valori minimi nei mesi estivi. Sebbene le due frazioni del particolato abbiano sorgenti e meccanismi di formazione leggermente differenti, esse condividono molte sorgenti emissive e sono soggette agli stessi fattori meteorologici che ne determinano l'accumulo e la dispersione. Di conseguenza, un'elevata concentrazione registrata in una delle due frazioni agisce come un affidabile indicatore predittivo di livelli elevati nell'altra.

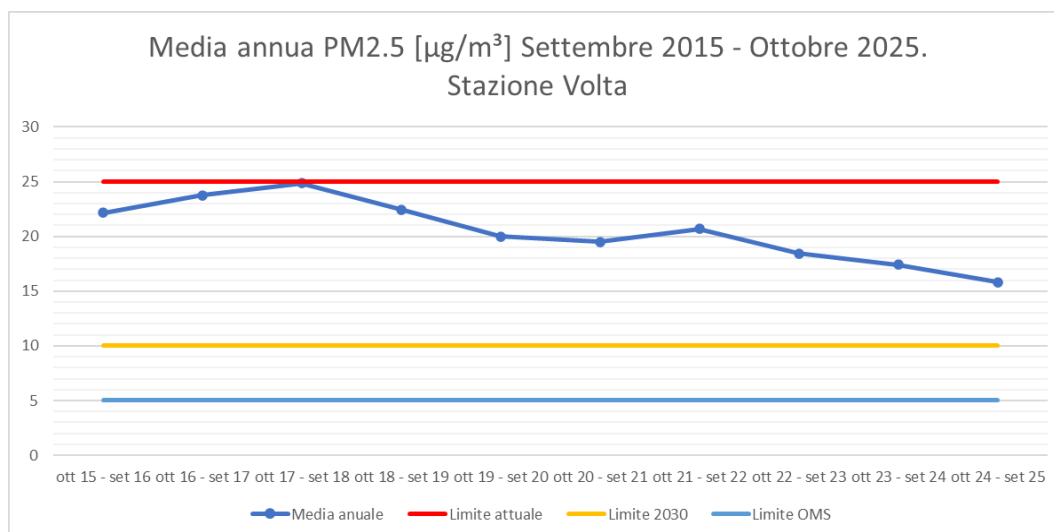


Figura 14. Variazione concentrazione annua PM2.5.

La stessa correlazione si manifesta, pertanto, nella media annua, nonostante i limiti di concentrazione per il PM2.5 siano inferiori a causa della sua maggiore pericolosità. Benché sia evidente il miglioramento degli ultimi anni e il rispetto dei limiti di legge, il risultato previsto per il 2030 resta lontano necessitando di un ulteriore decremento nella media annua di $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Negli ultimi 5 anni il decremento è stato di $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, il che rende difficilmente immaginabile un'ulteriore riduzione ancora più elevata per il prossimo quinquennio, considerando, come visto in precedenza, la natura non lineare dei processi di mitigazione.

III) NO₂

I dati relativi alle concentrazioni di NO₂ sono, come visto in precedenza, registrati con frequenza oraria e quindi oltre all'andamento delle medie mensili nel tempo e delle medie annuali verrà presentato il grafico che evidenzia la media oraria di tutti i giorni compresi nel periodo selezionato, per evidenziare ulteriormente la variazione oraria al netto di eventi meteorologici particolari.

La variazione della media mensile nel corso del periodo ottobre 2024 - settembre 2025 e il relativo trend è visibile in Figura 15.

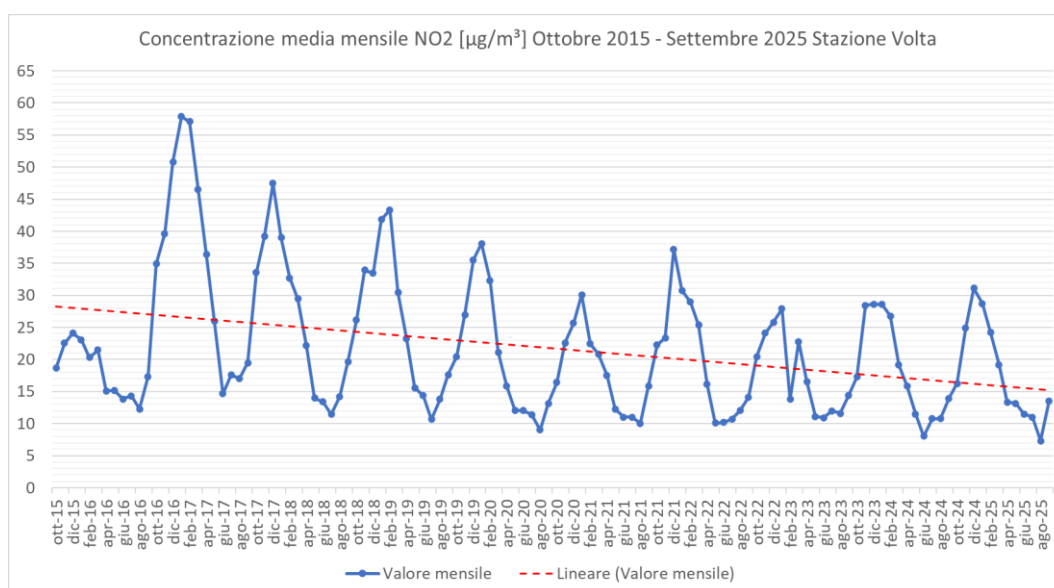


Figura 15. Concentrazione media mensile NO₂.

Il grafico rispecchia quello del particolato atmosferico, il motivo è rappresentato in primo luogo dal fatto che questi inquinanti condividono la fonte di emissione: la combustione relativa al traffico veicolare, alla presenza di industrie e dei sistemi di riscaldamento domestico. Inoltre, gli stessi eventi atmosferici che in inverno bloccano il PM vicino al suolo e in estate ne favoriscono la dispersione, agiscono in modo identico sull' NO_2 .

Anche in questo caso il trend è in miglioramento, evidenziando l'efficienza dei provvedimenti presi negli ultimi anni. Questo può essere visto in maniera ancora più diretta guardando alle medie annuali in Figura 16, confrontate con la normativa attuale e futura.

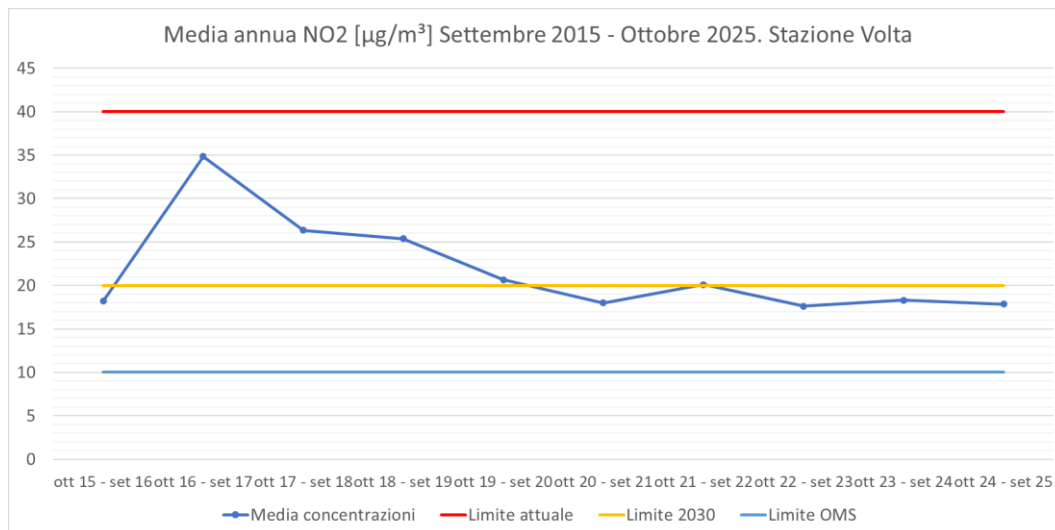


Figura 16. Concentrazione media annua NO_2 .

In questo grafico è presente un dato che a primo impatto potrebbe suscitare perplessità, ovvero la differenza enorme tra i dati relativi al periodo "ott 2015 - set 2016" e a quello "ott 16 - set 17". Questo fa emergere un aspetto fondamentale più volte ribadito in questo lavoro, cioè l'imprevedibile impatto delle condizioni meteorologiche. L'inverno registrato tra il 2015 e il 2016 è stato estremamente sopra la media per quanto riguarda le temperature, si è registrato in particolare, secondo ARPA Piemonte, il novembre più caldo dal 1958, portando ad un minore utilizzo di riscaldamenti. In questo caso, è stata fondamentale la presenza di condizioni meteorologiche favorevoli alla dispersione.

L'inverno successivo, invece, è stato uno dei peggiori degli ultimi anni in quanto a temperature e precipitazioni, estremamente rare. Negli anni seguenti i fenomeni meteorologici sono stati più ordinari, come visibile dall'assenza di picchi importanti e da una situazione abbastanza stabile. Le concentrazioni medie si stanziano ben al di sotto del limite annuale e di poco sotto a quello che entrerà in vigore nel 2030, esponendo comunque la zona ad un rischio di superamento in presenza di condizioni meteo anomale. In aggiunta, anche se all'interno dei limiti previsti, le medie annuali restano piuttosto stabili, confermando le difficoltà nel mettere in campo soluzioni efficienti per ridurre ulteriormente le emissioni, con la speranza lontana di poter raggiungere in futuro il limite di esposizione raccomandato dall'OMS.

In Figura 17 si può apprezzare la variazione oraria giornaliera media calcolata su tutto il periodo analizzato. Il risultato è una giornata tipo

calcolata sulla media di 10 anni, utile a confermare i dati già proposti in precedenza per l'anno appena trascorso, ovvero la presenza di due picchi principali, il primo in riferimento alle emissioni della mattina, e il secondo più importante che unisce il contributo di traffico veicolare, riscaldamento e l'assenza del sole al tramonto.

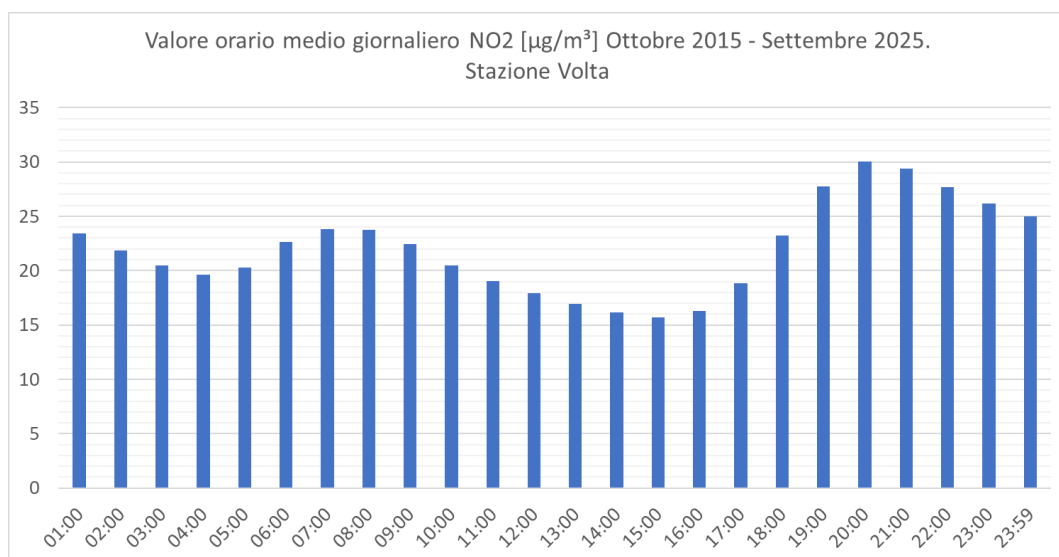


Figura 17. Concentrazione oraria media annua NO₂.

IV) O₃

Anche nel caso dell'O₃ i dati sono raccolti con frequenza oraria, il che è utile per valutare con precisione la variazione della sua concentrazione in atmosfera in base all'orario. L'andamento giornaliero sarà valutato insieme a quello mensile per comprendere meglio l'azione delle radiazioni solari e delle alte temperature nella formazione di ozono.

In Figura 18 è possibile apprezzare la variazione media mensile nel periodo analizzato.

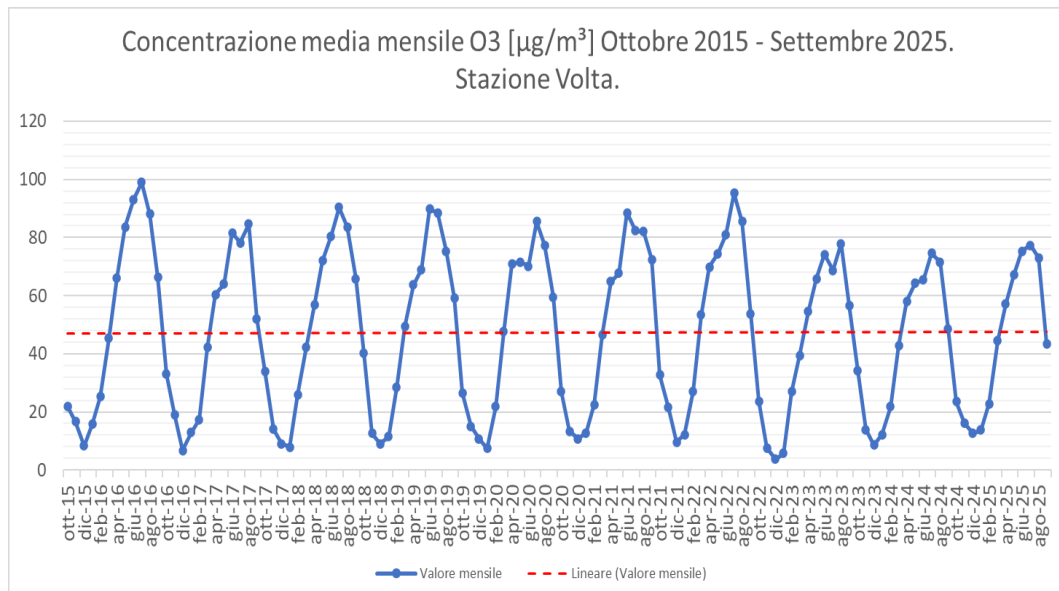


Figura 18. Concentrazione media mensile O₃.

Contrariamente agli altri inquinanti, l'ozono presenta picchi nei mesi estivi e non in quelli invernali, per i motivi già descritti in precedenza. Non è presente un limite medio annuo dal momento che si tratta di un problema che riguarda quasi esclusivamente la stagione estiva. Tuttavia, dal grafico è possibile notare che la situazione relativa all'ozono è tutt'altro che sotto controllo, non riuscendo a mettere in pratica soluzioni efficaci per far diminuire i livelli di concentrazione nell'aria.

L'assenza di un miglioramento nel tempo è causata da tre principali fattori:

- Inquinante secondario: l'ozono si forma in atmosfera a seguito di reazioni chimiche di altri composti come NO_x o COV. La molteplicità di precursori e delle relative fonti emissive rende particolarmente complessa l'adozione e l'efficacia di strategie di controllo e mitigazione;
- Abbassamento dei livelli di NO_2 : nelle aree urbane il biossido di azoto agisce da distruttore nei confronti delle molecole di ozono durante la notte. Il calo della concentrazione della prima causa un abbassamento dell'efficacia di questo meccanismo di mitigazione naturale;
- Cambiamenti climatici: l'incremento delle temperature medie e della radiazione solare neutralizzano i benefici ambientali derivanti dalla riduzione delle emissioni dei suoi precursori.

Nel grafico in Figura 19 è mostrato l'andamento orario medio giornaliero dell' O_3 nel periodo di dieci anni. La curva di valori è indicativa nell'evidenziare il contributo fornito dalle alte temperature e dalla luce solare nella formazione di ozono. Una gobba evidente è presente proprio in corrispondenza delle ore mediamente più calde della giornata, alle 16:00 è presente il picco massimo derivato dalle ore di sole precedenti, successivamente si procede verso una diminuzione della concentrazione nel periodo serale e notturno per poi riprendere a salire la mattina seguente.

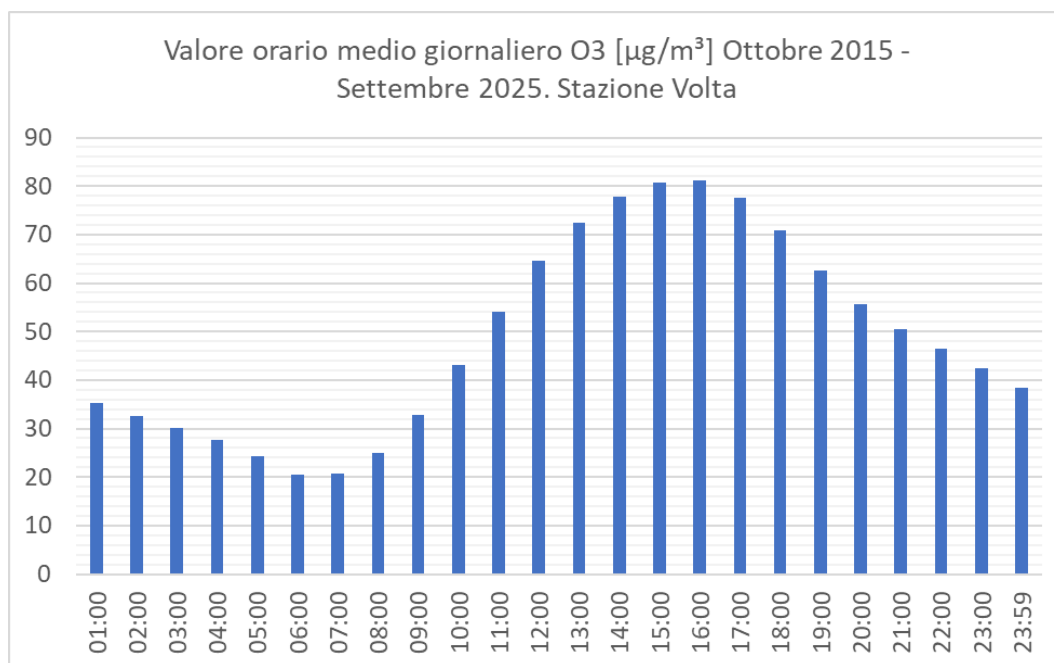


Figura 19. Concentrazione oraria media annua O₃.

6.2 Dati inquinamento dell'acqua

L'analisi e la valutazione dello stato di salute delle acque nel Piemonte viene gestito dall'ARPA seguendo un rigoroso quadro normativo - scientifico descritto dalla Direttiva Quadro sulle Acque (DQA) 2000/60/CE redatta dall'Unione Europea. Questa direttiva rappresenta un enorme passo avanti nella gestione delle risorse idriche in Europa finalizzata all'analisi e alla protezione degli ambienti acquatici tramite una fitta rete di stazioni di monitoraggio. In Italia la DQA è stata recepita attraverso il Decreto Legislativo 152/2006 ("Testo Unico Ambientale") e i successivi decreti attuativi tra cui il D.M. 260/2010, il quale definisce nel dettaglio i criteri tecnici e le metodologie specifiche per il monitoraggio e la classificazione dello stato delle acque. [69]

Questo provvedimento è di fondamentale importanza per adattarsi al sistema di classificazione Europeo, rafforzando la validità scientifica dei dati, delle classificazioni ARPA e delle relative conclusioni che possono essere tratte. È stato coniato il termine "corpo idrico" (una porzione omogenea di fiume, lago o falda) come unità di gestione fondamentale. Le attività di controllo non sono più universali, ma pianificate sulla base dell'analisi del rischio di ogni singolo corpo idrico. Il monitoraggio avviene per cicli pluriennali (il primo è stato nel 2009-2011) ed è specifico per ogni sito di interesse, differenziandosi tra monitoraggio di sorveglianza e monitoraggio operativo: non tutti i corpi idrici vengono analizzati ogni anno e non tutti i parametri vengono valutati ovunque. I dati disponibili pubblicamente, dunque,

rappresentano l'ultimo rilevamento disponibile per quella specifica area.

6.2.1 Acque superficiali

Il monitoraggio ARPA delle acque superficiali comprende fiumi e laghi, tuttavia, per quanto riguarda la città di Alessandria, le stazioni di maggiore interesse raccolgono dati relativi al fiume Bormida e al fiume Tanaro.

I parametri che vengono monitorati sono molteplici, comprendono lo stato chimico e quello ecologico, lo stato complessivo, presenza di indicatori biologici come macroinvertebrati, microrganismi, alghe unicellulari e macrofite acquatiche, LiMeco (indice sintetico che descrive la qualità delle acque dal punto di vista di nutrienti e ossigeno), qualità morfologica, indice idro morfologico e idrologico e la presenza di inquinanti specifici.

Il parametro che sarà analizzato in questo lavoro è lo stato chimico, valutato in base ad una lista di 33 + 8 sostanze pericolose o pericolose prioritarie. Queste sostanze specifiche sono inquinanti per i quali sono previsti Standard di Qualità Ambientale (SQA) definiti su scala nazionale. Il protocollo ARPA, consultabile nella sezione "Qualità delle acque in Piemonte" è il seguente: "viene registrato il valore medio annuo di concentrazione dell'inquinante e lo SQA è determinato sulla base della valutazione del dato peggiore di un triennio per il monitoraggio

operativo e di un anno per il monitoraggio di sorveglianza". Sono presenti due classi relative allo Stato Chimico: buono e non buono.

Lo Stato Chimico visualizzabile dalla mappa interattiva sul Geoportale ARPA relativa alla qualità dei fiumi si riferisce all'ultimo resoconto validato e verificato, risalente al 2021. In quel caso i due fiumi Bormida (a sud-est) e Tanaro (a nord) avevano entrambi ricevuto lo status di "non buono", evidenziato dal colore rosso visibile in Figura 20.

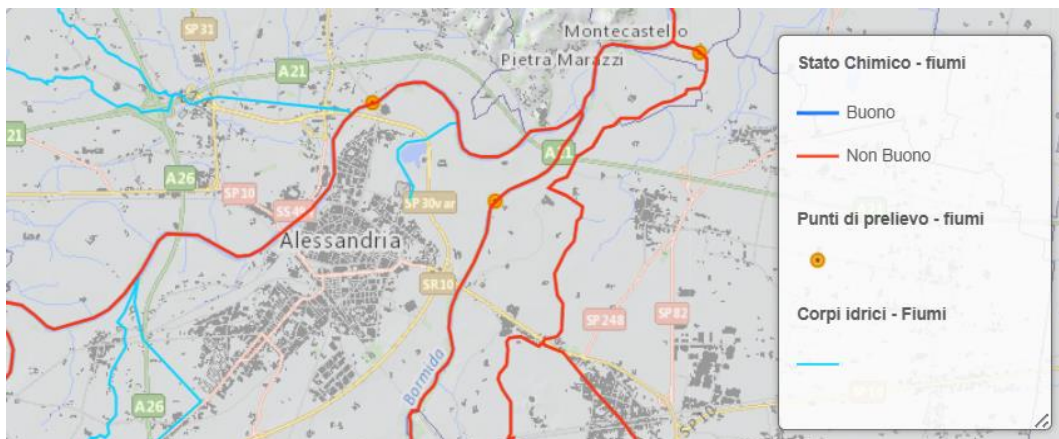


Figura 20. Stato Chimico dei fiumi Tanaro (Nord) e Bormida (Sud-Est) (2021).

Oltre alla mappa interattiva, però, sono disponibili i dati registrati e aggiornati con cadenza mensile o bimestrale relativi ai PFAS. Questi dati più recenti, relativi al punto di prelievo situato ad Est della città sul fiume Bormida (PUN_0033326), tendono a confermare quelli ufficiali del 2021, dal momento che alcuni inquinanti superano gli SQA. In particolare, la concentrazione di Acido perfluorooottansolfonico (PFOS), è costantemente al di sopra del limite annuo previsto ($0.00065\mu\text{g/l}$,

superato anche di 20 volte) nel periodo che va dal 25 gennaio 2021 al 2 settembre 2025. A seguito di ciò, con ogni probabilità, per il triennio attuale il fiume manterrà il suo Stato Chimico negativo. Tra l'altro, il PFOS è tra i PFAS più pericolosi per la salute umana, e i suoi limiti sono considerevolmente più bassi degli altri, rientrando tra le sostanze pericolose prioritarie. In Figura 21 è visibile la variazione di concentrazione di PFOS tra il 2021 e il 2025.

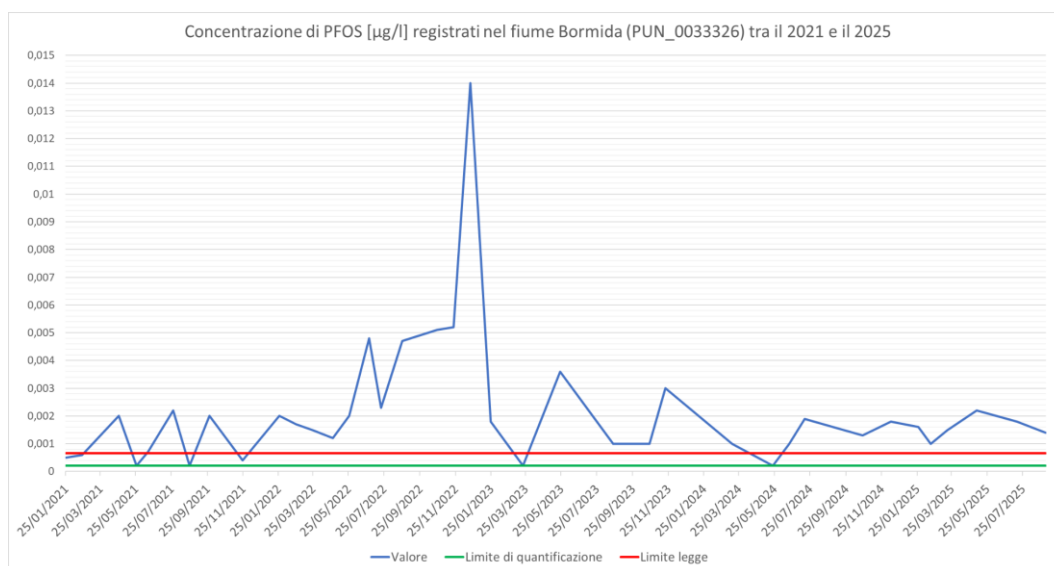


Figura 21. Concentrazione di PFOS nel fiume Bormida, relativi limiti di quantificazione e limiti di legge.

Tra le altre sostanze, nel periodo analizzato, il cC6O4, il PFOA (ultimo superamento nel 2022) e il PFHxA (Acido perfluoroesanoico) hanno superato diverse volte gli SQA. La situazione annuale nel periodo 2021-2025 (incompleto) è riassunta in Tabella 13. La tabella sintetizza unicamente i campioni in cui è stato superato il Limite di

Quantificazione (LQ). Non sono inclusi nel conteggio i numerosi campioni risultati 'non quantificabili'.

Anno	Totale rilevamenti misurabili	N° totale di superamenti SQA	Sostanze che hanno superato i limiti
2021	50	12	PFOS, PFOA, cC6O4
2022	72	19	PFOS, PFOA, cC6O4, PFHxA
2023	27	7	PFOS, cC6O4
2024	10	5	PFOS
2025	7	6	PFOS

Tabella 13. Sintesi annuale dei rilevamenti misurabili di PFAS e dei superamenti degli Standard di Qualità Ambientale (SQA) nel periodo 2021-2025.

L'analisi dei dati evidenzia due tendenze principali e distinte:

1. Crollo dei rilevamenti totali: il numero di rilevamenti misurabili era estremamente alto nel 2021 (50) e ha raggiunto un picco nel 2022 (72), dati rappresentativi di un inquinamento di fondo costante. Dopo il 2022, si osserva un drastico calo del numero di rilevamenti

misurabili (solo 10 nel 2024 e 7 nel 2025), dimostrando l'efficacia delle misure operative;

2. Diminuzione della quantità di inquinanti:

- Periodo 2021-2022: In questi anni l'inquinamento era ampio e diversificato. Ben quattro diverse sostanze (PFOS, PFOA, cC6O4 e PFHxA) superavano i rispettivi limiti di legge, con un picco di 19 superamenti totali nel 2022;
- Periodo 2024-2025: l'inquinamento non è più diversificato, ma diventa cronico e specifico del PFOS che, essendo un PFAS, comporta tutti i rischi di bioaccumulo ed epatotossicità descritti del paragrafo 3.2.3.

6.2.2 Falde acquifere

Le acque di falda possono essere divise in due grandi categorie: quelle superficiali sono il primo strato d'acqua nel sottosuolo, si trovano a contatto con il terreno intorno e sono, perciò, molto vulnerabili all'inquinamento; le acque di falda profonda si trovano più in basso, sono confinate (in pressione) tra strati impermeabili, risultando molto più protette dallo scambio di sostanze pericolose. La differenza chiave sta quindi nella profondità, nel confinamento e, di conseguenza, nel livello di esposizione agli inquinanti, come evidenziato in Tabella 14.

Caratteristica	Acqua di falda superficiale	Acqua di falda profonda
Posizione	Primo strato d'acqua, vicino alla superficie.	Sotto la falda superficiale, a maggiore profondità.
Copertura Geologica	Non confinata. A contatto diretto con il terreno.	Confinata (o semi-confinata). Intrappolata tra strati impermeabili (es. argille).
Alimentazione	Diretta e rapida (infiltrazione pioggia, fiumi).	Indiretta e lenta (spesso da aree lontane dove lo strato affiora).
Vulnerabilità Inquinamento	Molto Alta. Esposta direttamente alle attività umane.	Molto Bassa. Protetta dagli strati impermeabili superiori.

Tabella 14. Differenze principali tra le caratteristiche delle acque di falda superficiale e di falda profonda.

Le normative europee, specificamente le Direttive 2000/60/CE e 2006/118/CE, stabiliscono un chiaro obiettivo di qualità ambientale per tutti i corpi idrici sotterranei (GWB). Questo requisito si applica indistintamente agli acquiferi superficiali e profondi delle aree di pianura, a quelli nei fondivalle alpini e appenninici, e ai sistemi idrici di

montagna e collina. In Figura 22 si può notare lo stato chimico puntuale di falda e GWB superficiali aggiornato al 2021.

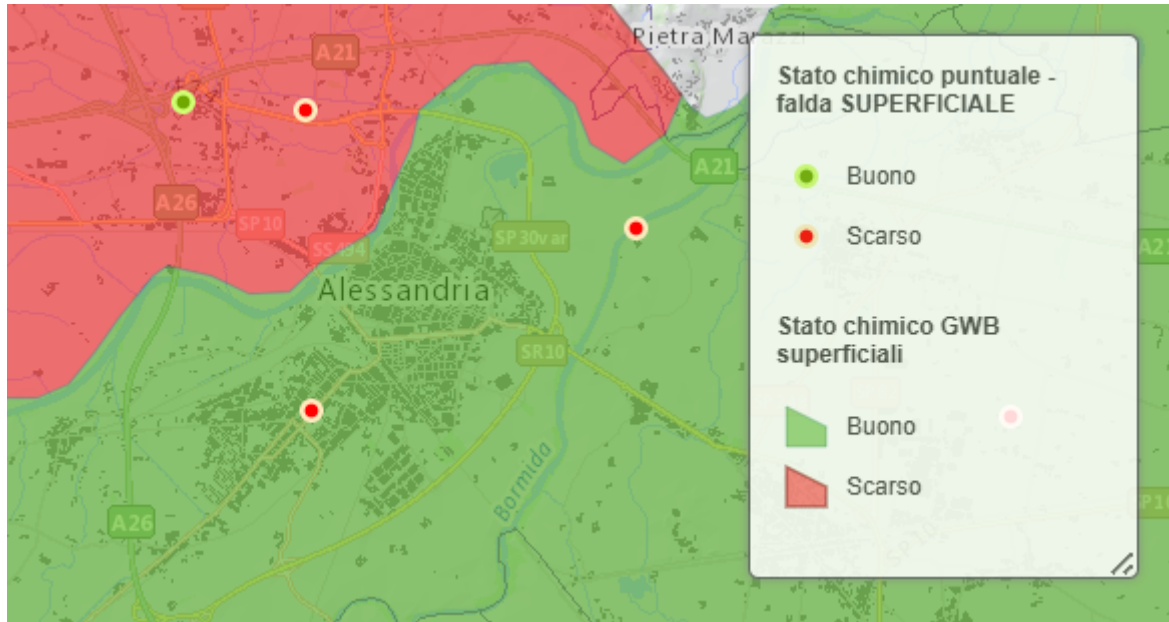


Figura 22. Stato Chimico delle falde superficiali presenti nella città di Alessandria.

L'obiettivo fondamentale è portare o mantenere ogni corpo idrico in uno stato chimico "buono". La scadenza originariamente fissata per raggiungere questo traguardo era il 2015. Tuttavia, la legislazione ammette la possibilità di deroghe, purché motivate, che possono posticipare il termine ultimo per il conseguimento dello stato "buono" fino al 2027. Per definire lo Stato Ambientale complessivo delle acque sotterranee, si considerano due componenti distinte: lo Stato Quantitativo (SQ) e lo Stato Chimico (SC). Per ciascuno di questi due parametri, la classificazione è binaria: possono essere giudicati come "buoni" o "scarsi".

In questa sezione sarà analizzata, in particolare, la falda superficiale collocata esattamente sotto alla città. Inizialmente la ricerca è stata condotta al fine di valutare la presenza di nitriti e nitrati nella falda, arrivando alla conclusione quest'ultima si trova in una posizione di estrema vulnerabilità nei confronti dei secondi, pur rispettando in modo sistematico i limiti di legge (50 mg/l), tranne un unico caso isolato (nel 2016) nel periodo che va dal 2009 al 2021. Nonostante il rispetto dei limiti di legge è presente una grande variabilità anche a distanza di poco tempo, come è possibile notare in Figura 23, che indica la sensibilità della falda a quello che accade nella zona sovrastante.

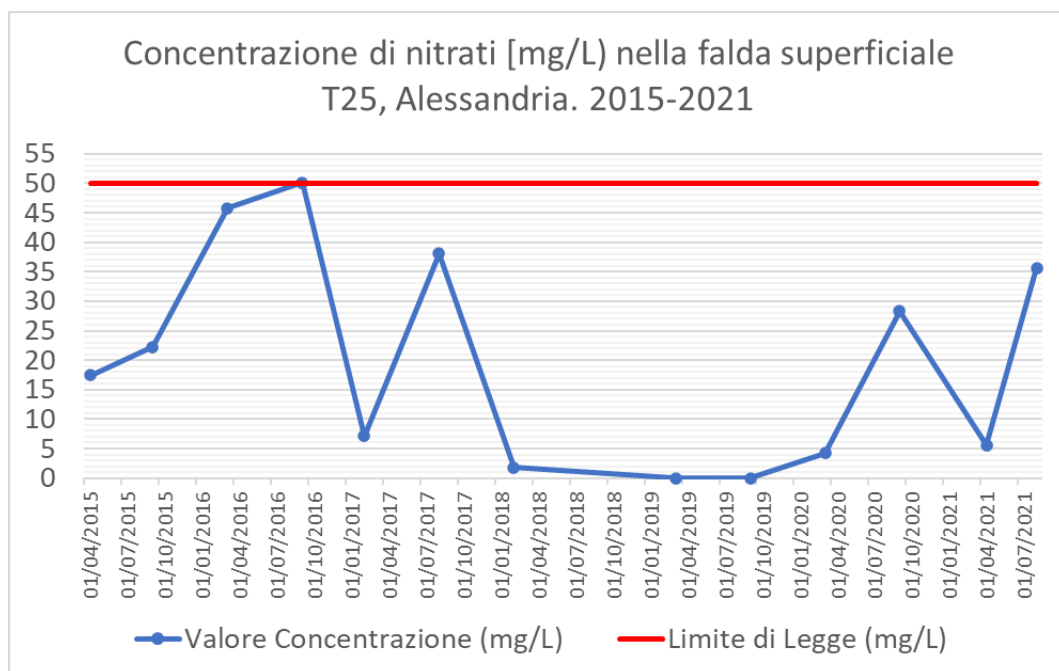


Figura 23. Concentrazione di nitrati nella falda superficiale T25, Alessandria.

La variabilità indica non la presenza massiccia e continuativa, ma più probabilmente un'esposizione legata ad eventi specifici o cicli stagionali. I periodi di basse concentrazioni come il biennio 2018 - 2019 potrebbero coincidere con periodi di piogge intense che quindi tenderebbero a diluire la concentrazione totale, mentre periodi di alta concentrazione potrebbero coincidere con periodi di siccità in cui i nitrati si sono accumulati nel terreno, seguiti da piogge che trasportano in massa gli inquinanti verso la zona di falda.

Successivamente è stata valutata la presenza di metalli, rilevando un dato allarmante per quanto riguarda il cromo esavalente: negli anni tra il 2015 e il 2021 si sono verificati frequenti superamenti del limite di 5 µg/l, come riportato in Tabella 15, determinando lo stato chimico di "scarso" per la falda.

Data Rilevazione	Anno	Valore (µg/l)	Limite (µg/l)	Stato
2015-04-22	2015	14,0	5,0	limite superato
2015-09-09	2015	12,0	5,0	limite superato
2016-03-02	2016	2,1	5,0	a norma
2016-09-05	2016	2,3	5,0	a norma
2017-02-28	2017	< 2,0	5,0	a norma

Data Rilevazione	Anno	Valore (µg/l)	Limite (µg/l)	Stato
2017-08-28	2017	14,3	5,0	limite superato
2018-02-26	2018	< 2,0	5,0	a norma
2018-09-11	2018	< 2,0	5,0	a norma
2019-03-20	2019	< 2,0	5,0	a norma
2020-03-03	2020	3,0	5,0	a norma
2020-09-16	2020	35,0	5,0	limite superato in modo grave
2021-04-06	2021	< 2,0	5,0	a norma
2021-08-31	2021	17,3	5,0	limite superato

Tabella 15. Concentrazioni di cromo esavalente [µg/l] nella falda T25, Alessandria. Anni 2015-2021.

Oltre alla frequenza dei superamenti, un altro dato preoccupante riguarda la loro gravità, testimoniata dalla presenza di un picco di sette volte superiore al limite di legge e da altri picchi più bassi ma ricorrenti. Il trend non va verso un miglioramento, ma piuttosto varia continuamente tra valori a norma e picchi preoccupanti, questa fluttuazione mette in evidenza la possibilità della presenza di una fonte

di contaminazione ancora attiva, oppure di meccanismi di rilascio intermittenti causati da oscillazioni della falda o sversamenti. Report ARPA più recenti (2022-2023) confermano la presenza di cromo VI nella zona di Spinetta Marengo, testimoniando che la situazione è tutt'altro che risolta e anzi, il cromo esavalente continua ad essere una grande fonte di preoccupazione per le acque di Alessandria.

Nella stessa zona sono stati fatti rilevamenti, tramite il pozzo privato 00600300024, relativi ai PFAS, evidenziando la presenza di PFOA tra il 2016 e il 2021, rientrando comunque entro i limiti di legge ($0.5 \mu\text{g/l}$); il loro superamento provocherebbe la dichiarazione del sito come "contaminato", richiedendo interventi di bonifica. Nonostante ciò, essendo il punto di prelievo un "pozzo privato", è fondamentale valutare la presenza di queste sostanze confrontandole con i limiti di legge più stringenti relative alle acque potabili ($0.1 \mu\text{g/l}$). Questo limite per le acque potabili non si applica esclusivamente allo PFOA ma viene calcolato come somma di tutti i PFAS presenti. Tra il 2020 e il 2021 sono tre i campioni che superano questo limite, e un altro si attesta a $0,08 \mu\text{g/l}$ per il solo PFOA, rendendo estremamente probabile che la presenza di PFAS totali superi il limite consentito.

6.3 Dati inquinamento del suolo

Trovare dati pubblici che riguardano l'inquinamento del suolo è un lavoro complesso. Considerando che la maggior parte del suolo appartiene a privati è estremamente difficile creare una rete di monitoraggio efficiente che tenga sotto controllo dei parametri nel tempo, ciò che si fa è fare delle ricerche puntuali in caso di necessità.

Sul geoportale dell'ARPA è disponibile una sezione dedicata al suolo in cui sono presenti dati aggiornati riguardo alla presenza di sostanze come cromo, nichel, cobalto e vanadio nella valle in cui scorre il fiume Bormida, come mostrato in Figura 24.

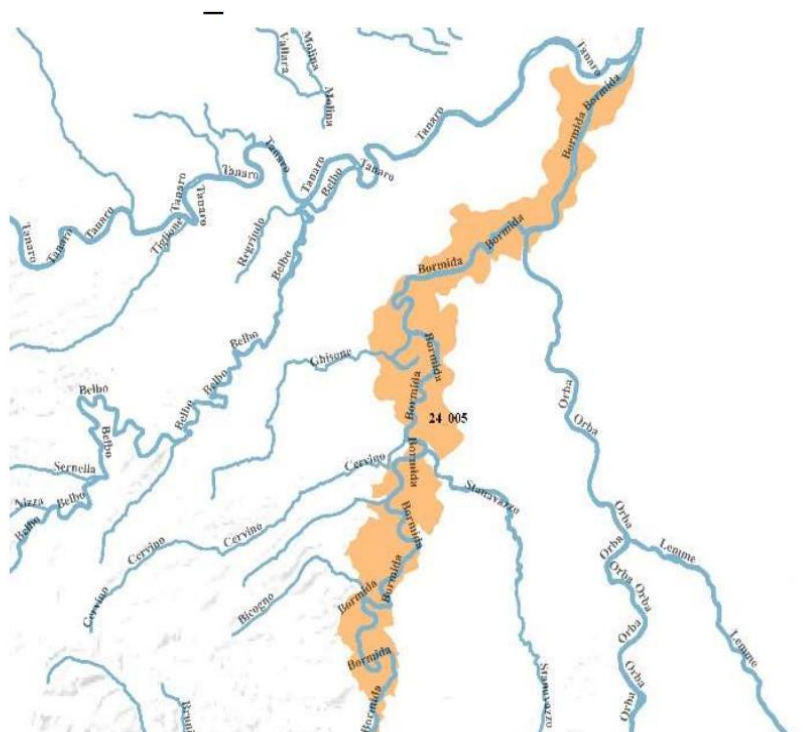


Figura 24. Contaminazione da Cromo, Nichel, Cobalto e Vanadio nell'area 24_005, Valle del Bormida, Alessandria.

I dati presentati di seguito in Figura 25 riassumono un'analisi statistica di 17 campioni di suolo prelevati nell'area evidenziata in figura 25, concentrandosi sulla presenza dei quattro metalli pesanti citati in precedenza e i relativi limiti di legge che riguardano la Concentrazione Soglia di Contaminazione (CSC), un valore che se superato fa scattare l'obbligo di un processo di bonifica per eliminare gli inquinanti o mettere in sicurezza il sito.

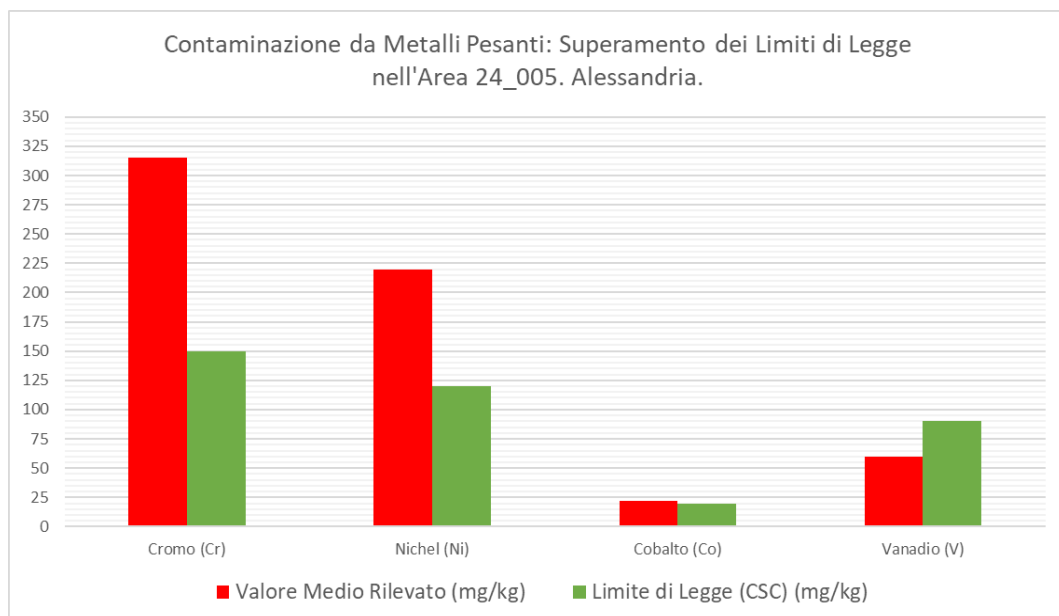


Figura 25. Livelli di Metalli Pesanti nei Suoli (Area 24_005) - Confronto tra media rilevata e limiti di legge (CSC). Alessandria.

Come si nota dal grafico, i livelli di cromo e nichel superano abbondantemente i limiti di legge, aumentando enormemente il rischio di esposizione per la popolazione, e il conseguente rischio cancerogeno discusso nel paragrafo 3.3.3, tramite contatto diretto o indiretto (tramite

la catena alimentare dopo l'assorbimento dei metalli da parte delle piante). Un ulteriore problema può verificarsi tramite la migrazione di questi metalli dal terreno alle acque, raggiungendo fiumi e acque di falda.

La contaminazione da cromo è un problema storico nell'Alessandrino, con particolare focus nella zona industriale di Spinetta Marengo, dove la presenza di numerose industrie aumenta il rischio di esposizione del suolo a cromo VI. In effetti, nel 2024 sono emerse evidenze che suggeriscono la possibile presenza di terreni contaminati nell'area.

Se i dati sui metalli pesanti certificano una contaminazione diffusa del suolo lungo il corso del Bormida, esiste, oltretutto, un tipo di contaminazione puntuale e concentrata derivante dalla presenza di PFAS. L'ARPA ha condotto numerose campagne di monitoraggio della situazione ambientale e sanitaria legata alla presenza di PFAS confermando, in una sintesi delle attività presentata al Comune di Alessandria, la presenza di queste sostanze in acqua e suolo. I PFAS più diffusi nella zona sono il PFOA, l'ADV e il cC604.

Nel 2023 l'Agenzia di è dotata di un'apposita strumentazione "per la determinazione di PFAS nel suolo" a conferma della gravosità della situazione e dal rischio sanitario per la popolazione. Le analisi hanno confermato la presenza di queste sostanze nei campi agricoli, aumentando la possibilità di amplificazione del problema, ampliando sempre di più il bacino di esposizione diretta e indiretta.

Oltre ai PFAS nel suolo di Alessandria, trattandosi di una provincia a fortissima vocazione agricola, è presente una grande concentrazione di pesticidi, che con le stesse modalità degli inquinanti possono attraversare vari livelli trofici per arrivare poi a contatto con l'uomo.

La contaminazione del suolo resta un problema di massima importanza per il Comune, come testimoniato dalla grande campagna di monitoraggio messa in atto e dalle operazioni intensive di bonifica in una zona messa a dura prova da un inquinamento diffuso che riguarda tutte le matrici ambientali presenti sul territorio.

7. Impegni attuali e possibili soluzioni

In questo capitolo sarà valutato l'impegno attuale e le prospettive future per ridurre l'inquinamento nella città di Alessandria, comprendendo sia provvedimenti a livello comunale, sia quelli su scala regionale o interregionale.

7.1 Misure attuali

Sono numerose le azioni e i provvedimenti avviati per contrastare il problema dell'inquinamento, questi comprendono sia azioni operative di emergenza come il "semaforo antismog" e l'azione di biomonitoraggio della popolazione, che piani a lungo termine come il Piano Regionale di Qualità dell'Aria (PRQA) e il Piano di Tutela delle Acque.

7.1.1 Azioni sulla qualità dell'aria

La gestione della qualità dell'aria ad Alessandria rappresenta una sfida ambientale e sanitaria estremamente complessa. In presenza di una situazione critica sia per l'esposizione acuta che per quella cronica è necessario un progetto complesso e articolato che riesca a far coesistere pianificazione nel tempo ed interventi rapidi e mirati da poter attuare al bisogno. A livello sovraregionale sono stati siglati nel 2017 gli Accordi del Bacino Padano tra il Ministero dell'Ambiente e le regioni Piemonte, Lombardia, Veneto ed Emilia-Romagna. Questa intesa è fondamentale per stabilire un piano d'azione comune altrimenti, se ogni regione agisse in modo autonomo, non ci sarebbe una coordinazione efficiente e di conseguenza si riscontrerebbe una minore efficacia delle misure adottate.

Lo strumento con cui la regione Piemonte mette in atto gli impegni presi negli Accordi è il Piano Regionale di Qualità Ambientale: una serie di misure, limitazioni e divieti che hanno l'obiettivo, a medio-lungo termine, di migliorare la qualità regionale dell'aria. Nel frattempo, per far fronte ad

eventi emissivi acuti, esistono delle misure comuni di emergenza a breve termine come il semaforo antismog.

I) Piano Regionale di Qualità dell'Aria

Il PRQA consiste in una serie di misure con lo scopo finale di rispettare i limiti di legge europei previsti per il 2030. Nel piano sono previste azioni su più fronti:

- Trasporti: la strategia relativa ai trasporti segue l'approccio Evita - Sposta - Migliora:
 - Evita: misure relative alla riduzione della necessità di spostamento individuale tramite diverse azioni:
 - promozione del telelavoro;
 - organizzazione della logistica urbana con mezzi alimentati con energia pulita più efficienti;
 - attuazione di programmi di mobility management per aziende ed enti pubblici.
 - Sposta: misure volte a rendere più sostenibili gli spostamenti tra cui:
 - incremento dell'utilizzo dei mezzi pubblici tramite miglioramento del ticketing e fidelizzazione dell'utenza;
 - promozione della mobilità ciclistica grazie ad un potenziamento delle infrastrutture, del numero di parcheggi sicuri e incentivi per il bike sharing;
 - estensione delle zone a traffico limitato (ZTL) e delle aree pedonali;
 - adozione dei Piano Urbani della Mobilità Sostenibile (PUMS);

- disincentivazione dell'uso del diesel tramite rimodulamento delle accise sui carburanti, delle tasse automobilistiche e la limitazione programmata della circolazione per i veicoli più vecchi ed inquinanti (Euro 5 ed Euro 6), aggiungendo delle Low Emission Zones (LEZ) nel centro urbano.
- Migliora: misure per aumentare l'efficienza degli spostamenti:
 - rinnovo della flotta dei trasporti pubblici locali inserendo veicoli a basse emissioni;
 - introduzione di criteri ambientali per la ripartizione dei fondi dedicati ai trasporti pubblici;
 - promozione della mobilità su veicoli elettrici e del car-sharing;
 - limitazioni nell'uso di macchinari agricoli o di cantiere più inquinanti all'interno delle aree critiche.
- Energia: interventi mirati per aumentare l'efficienza energetica e l'utilizzo di fonti di riscaldamento meno impattanti:
 - riqualificazione energetica degli edifici pubblici e privati;
 - sviluppo di un teleriscaldamento efficiente utilizzando fonti rinnovabili;
 - efficientamento degli impianti termici esistenti;
 - regolamentazione del riscaldamento a biomassa legnosa, imponendo limitazioni sulle emissioni e sull'installazione di nuovi impianti;
 - promozione della produzione di energia da fonti rinnovabili senza combustione diretta e relativo uso nell'edilizia;
 - campagne di formazione e informazione relative al risparmio energetico e alle fonti rinnovabili.
- Industria: azioni con lo scopo di ridurre le emissioni da parte del settore industriale:

- applicazione rigorosa delle BAT imponendo limiti più stringenti relativamente alle emissioni;
- migliore gestione dei solventi e delle tecniche di abbattimento al fine di limitare l'emissione di COV;
- controlli più stretti relativi alle emissioni diffuse di polveri da cantieri, cave e attività industriali.
- Agricoltura: le misure sono relative principalmente alle emissioni di ammoniaca:
 - supporto finanziario e successivo obbligo dell'utilizzo di tecniche per ridurre il rilascio di ammoniaca nel terreno e nelle acque;
 - sostituzione di fertilizzanti azotati con materiali organici non inquinanti;
 - limitazione della combustione all'aperto dei residui delle colture in periodi critici.
- Riqualificazione urbana: misure per aumentare l'efficienza energetica edilizia e la presenza di aree verdi:
 - riqualificazione/rigenerazione di edifici del '900 costruiti senza tener conto dei loro altissimi consumi energetici;
 - incremento degli spazi verdi urbani al fine di favorire l'assorbimento degli inquinanti e della CO₂ da parte delle specie vegetali.

[70]

II) Semaforo antismog

Il semaforo antismog è un sistema di misure dinamico concepito per affrontare i casi di inquinamento atmosferico acuto; fa parte degli Accordi

del Bacino Padano ma è gestito da ARPA Piemonte. Il protocollo consiste nell'attuazione di misure temporanee omogenee ed è attivo dal 15 settembre al 15 aprile, il periodo in cui le concentrazioni di particolato atmosferico sono più elevate. Il meccanismo di funzionamento è il seguente: ARPA Piemonte effettua controlli e previsioni sulla qualità dell'aria tre volte a settimana (lunedì, mercoledì e venerdì), e sulla base delle previsioni viene attivato un livello di allerta che dura dal giorno seguente fino al giorno di valutazione successivo. In questo modo si cerca di prevenire il raggiungimento di concentrazioni troppo elevate di inquinanti che aumenterebbero i rischi per la salute; agendo in previsione dei giorni seguenti è possibile, teoricamente, adattare dinamicamente le misure restrittive in relazione alle condizioni meteorologiche e ai livelli di inquinamento previsti. Il sistema consiste in tre livelli:

- Livello 0 - Verde: nessuna allerta e condizioni ordinarie, restano comunque in vigore le limitazioni permanenti strutturali;
- Livello 1 - Arancio: scatta al superamento per tre giorni consecutivi della soglia di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e provoca le seguenti restrizioni principali:
 - limitazioni alla circolazione di veicoli EURO 5 ed EURO 4;
 - divieto di sosta con il motore acceso;
 - limitazione dell'uso di generatori di calore domestici alimentati a biomassa legnosa;
 - divieto di combustione all'aperto;
 - limite di 18°C (tolleranza di 2°C) per le medie nelle abitazioni e negli esercizi commerciali;
 - divieto di spandimento di liquami zootecnici;

- divieto di distribuzione di fertilizzanti, ammendanti e correttivi contenenti azoto.
- Livello 2 – Rosso: scatta al superamento per tre giorni consecutivi della soglia di $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e provoca le seguenti restrizioni principali:
 - tutte le limitazioni previste per il livello 1;
 - limitazioni più stringenti alla circolazione di veicoli EURO 5.

L'insieme di queste misure rende ancora più evidente come il problema dell'inquinamento sia multi-causale, le limitazioni non si concentrano soltanto sulla riduzione del traffico veicolare ma riguardano anche il settore agricolo e il riscaldamento domestico.

[71]

III) MOVE - IN (Monitoraggio dei veicoli inquinanti)

Si tratta di un servizio della Regione Piemonte con lo scopo di controllare le emissioni degli autoveicoli più inquinanti per permettere delle deroghe alla loro circolazione. Il servizio è totalmente facoltativo ma promosso dalla Regione tramite fondi destinati all'installazione di una black box sui mezzi privati dei cittadini con l'obiettivo di monitorare i chilometri percorsi. Ad ogni veicolo viene assegnato un tetto massimo di chilometri percorribili durante l'anno, questa soglia varia in base alla classe e al tipo di veicolo; restando sottosoglia è possibile circolare liberamente a qualsiasi ora tutti i giorni, anche nelle zone soggette a limitazioni. Questa speciale deroga è sospesa

durante l'attivazione delle misure di allerta di livello 1 e 2 del semaforo antismog.

[71]

7.1.2 Azioni sulla qualità dell'acqua

Le azioni in corso per quanto riguarda la qualità dell'acqua sono concentrate nel Piano di Tutela delle Acque, affiancate dal biomonitoraggio in corso nell'area più contaminata della città.

1) Piano di Tutela delle Acque (PTA)

Il Piano di Tutela delle Acque è lo strumento regionale con cui viene applicata la normativa europea (Direttiva Quadro sulle Acque 2000/60/CE) e nazionale (D.Lgs. 152/2006) in relazione alle acque.

I punti fondamentali del PTA per il Piemonte riguardano i seguenti obiettivi:

- Protezione e miglioramento: tutelare e migliorare lo stato qualitativo e quantitativo dei corpi idrici;
- Utilizzo sostenibile: promuovere un bilanciamento sostenibile nell'utilizzo delle risorse idriche;
- Riduzione dell'inquinamento: ridurre l'inquinamento tramite azioni di depurazione e prevenzione;

Nel territorio di Alessandria l'attuazione delle misure è competenza dell'Ente di Governo d'Ambito n.6 "Alessandrino" (EGAT06), che governa il Sistema Idrico Integrato nella zona tramite il Piano d'Ambito, coerente con il PTA regionale. La gestione effettiva degli impianti è poi affidata alla società SOGERI. Gli interventi si concentrano su tre obiettivi principali:

- Miglioramento dell'impianto di depurazione: si tratta dell'intervento più importante ed oneroso per la città, che ha l'obiettivo di proteggere le acque dei fiumi Bormida e Tanaro ed è basato su:
 - progetto per migliorare la linea fanghi dell'impianto al fine di ridurre la quantità di fanghi prodotti riducendo l'impatto ambientale e generando un forte risparmio economico;
 - ampliamento della capacità di trattamento dell'impianto;
 - collegare le frazioni all'impianto di depurazione principale tramite l'ampliamento della rete fognaria;
 - ottimizzazione generale della rete.
- Protezione delle falde, per salvaguardare le principali risorse di acqua potabile nella città sono in corso le seguenti attività:
 - studi idrogeologici approfonditi sulle acque profonde per definire le zone specifiche da cui la città preleva acqua potabile per sottoporle ad una maggiore protezione nei confronti di potenziali inquinanti;
 - monitoraggio della barriera idraulica nella zona di Spinetta Marengo, un sistema di circa 40 pozzi che ha l'obiettivo di prevenire la dispersione degli inquinanti verso acque di falda più profonde e pulite.

- Sensibilizzazione della popolazione tramite il progetto “#beretrasparente”, promuovendo il consumo consapevole dell’acqua del rubinetto.

Per quanto riguarda il trattamento dell’acqua potabile sono utilizzati dei sistemi di filtrazione specifici che si avvalgono di impianti a carboni attivi per abbattere il rischio che i PFAS raggiungano le acque delle abitazioni. Oltre a questo, agiscono impianti a resina che contribuiscono ulteriormente alla purificazione delle acque tramite trattamenti chimici. Questi impianti sono utili nel mantenere sotto controllo la presenza di metalli pesanti, per i quali sono presenti ulteriori sistemi di filtraggio come quelli specifici per il cromo esavalente.

La presenza dei precedenti sistemi è supportata da una fitta rete di monitoraggio gestita da ASL e ARPA.

[72]

II) Biomonitoraggio PFAS

Nella zona circostante al polo chimico di Spinetta Marengo è in atto un’attività di biomonitoraggio con lo scopo di comprendere il reale livello di esposizione dei cittadini, misurando direttamente la concentrazione di queste sostanze nel sangue.

Sono stati avviati due progetti distinti in relazione al biomonitoraggio della popolazione:

- Biomonitoraggio della regione Piemonte e della ASL di Alessandria: la partecipazione è volontaria ed è rivolta ai residenti nell'area considerata a maggior rischio. L'obiettivo finale è quello di misurare la concentrazione di PFAS nel sangue della popolazione residente nei pressi del polo chimico di Spinetta Marengo per poter definire il livello di esposizione ed attivare percorsi gestiti dall'ASL per la presa in carico sanitaria. È strutturato in diverse fasi, aumentando sempre di più l'area di monitoraggio, attualmente il programma è esteso a tutti i cittadini che si trovino nel raggio di 3 km. Inoltre, è in definizione un piano di monitoraggio pluriennale per i soggetti arruolati [73]
- Progetto di ricerca "SCENARIOS": si tratta di un progetto di ricerca europeo coordinato dall'Università del Piemonte Orientale e dall'Azienda Ospedaliero-Universitaria di Alessandria. L'obiettivo di questo progetto è quello di sviluppare e validare metodologie di analisi innovative, rapide ed economiche per identificare la presenza di PFAS, inclusi quelli di nuova generazione. Il reclutamento ha coinvolto 300 cittadini: 100 residenti nel raggio di 3 km dal polo chimico, 100 nella fascia tra 3 km e 6 km e gli ultimi 100 oltre i 6 km. [74]

7.1.3 Azioni sulla qualità del suolo

La maggior parte delle azioni relative alla presenza di inquinanti nel suolo si concentrano in opere di gestione e bonifica di siti storicamente contaminati, legati in particolare al passato industriale della città. Il problema, in questi casi, risiede nei lunghi processi giudiziari e burocratici che servono per definire ed iniziare le azioni di bonifica. Il monitoraggio da parte di ARPA

Piemonte è un fattore importante per la consapevolezza: il primo passo verso la bonifica del suolo è la definizione dei siti contaminati; tuttavia, il monitoraggio deve essere supportato da ingenti azioni di bonifica che, a causa dei costi elevati, finiscono per passare in secondo piano ed essere soggette a deleghe, ritardi e altre problematiche.

Per quanto riguarda la prevenzione dell'inquinamento esiste il programma del Complemento di Sviluppo Rurale (CSR). Questo è il documento con cui le regioni definiscono la propria strategia per lo sviluppo rurale nel periodo 2023-2027, traducendo gli obiettivi europei di sostenibilità e riduzione dell'inquinamento in azioni concrete. Gli interventi principali del CSR per quanto riguarda la prevenzione dell'inquinamento sono i seguenti:

- Riduzione dell'azoto: finanziare l'acquisto di alcune attrezzature specifiche per la distribuzione di reflui zootecnici a bassa emissione, con l'obiettivo di ridurre le emissioni di ammoniaca e di altri derivati dell'azoto nel suolo;
- Riduzione di sostanze chimiche: interventi che promuovono pratiche agricole in cui sono limitati l'uso di fertilizzanti chimici, contenenti azoto, e di pesticidi, che possono contenere metalli pesanti.

[75]

7.2 Possibili soluzioni

Come visto nella sezione precedente, sono numerose le misure adottate dalla Regione e dal Comune per migliorare la qualità di aria, acqua e suolo nel territorio Alessandrino. Il loro effetto, però, non sembra avere l'efficacia necessaria a trasformare la zona in un ambiente più salubre e con meno rischi per la popolazione in tempi brevi, anche in riferimento ai limiti di esposizione agli inquinanti raccomandati dall'OMS. In questa sezione saranno proposte soluzioni innovative ed alternative che potrebbero essere integrate nei piani della regione al fine di contribuire alla riduzione della concentrazione di inquinanti.

7.2.1 Soluzioni per l'inquinamento dell'aria

Soluzioni innovative per migliorare la qualità dell'aria si stanno diffondendo in molte aree del mondo, questo perché è evidente la necessità di combinare progresso tecnologico e azioni concrete per combattere e prevenire l'inquinamento, portando ad un miglioramento delle condizioni sanitarie della popolazione. Non tutte le misure sono applicabili ovunque, per esempio la torre cinese di Xi'an, struttura di 100 metri di altezza finalizzata alla purificazione dell'aria, non sarebbe applicabile in un contesto come la città di Alessandria per evidenti motivi economici e tecnici. Sono invece possibili numerose azioni ed interventi di scala più ridotta che però possono contribuire in maniera attiva alla riduzione delle concentrazioni degli inquinanti.

Queste proposte sono da considerarsi come un'aggiunta che potrebbe essere fatta alle misure attuali, fondamentali per ridurre il problema alla radice, prevenendo la formazione stessa degli inquinanti.

1) Materiali fotocatalitici

Sostanze a base di biossido di titanio presentano caratteristiche incredibilmente utili per distruggere gli ossidi di azoto, come descritto nell'articolo di Ma et al.[76]. Il biossido di azoto agisce da catalizzatore, quando viene colpito dalla radiazione solare i suoi elettroni vengono eccitati dalla banda di valenza alla banda di conduzione; successivamente, le lacune elettroniche e gli elettroni migrano sulla superficie e reagiscono con l'acqua e con l'ossigeno presenti in atmosfera formando, rispettivamente, radicali liberi idrossilici ($\cdot\text{OH}$) e ioni superossido ($\cdot\text{O}_2^-$). Questi radicali liberi attaccano e degradano gli ossidi di azoto ossidandoli a specie meno tossiche, principalmente acido nitrico (HNO_3), tramite una serie di passaggi intermedi. L'acido nitrico che si forma sulla superficie del materiale viene rimosso principalmente sotto forma di nitrati dalla pioggia o dall'umidità ambientale. Agendo da catalizzatore, e non da reagente, il biossido di titanio non si consuma, pertanto il suo effetto dovrebbe essere permanente. Nonostante la conseguenza diretta si riscontri a livello di concentrazioni di NO_2 , essendo questo un precursore di O_3 e $\text{PM}_{2.5}$, si verifica un effetto secondario fondamentale nella prevenzione della formazione di questi due inquinanti.

La proprietà del biossido di titanio ha una vasta applicazione a livello urbano: i materiali in cui è contenuto possono essere applicati su superfici come asfalto, pavimentazione oppure possono essere mescolati alle vernici per edifici; un'altra applicazione riguarda l'applicazione di rivestimenti su lastre di vetro posizionate sui pannelli solari, dotandoli così di una doppia funzione.

Un aspetto da tenere in considerazione, però, è la scarsa efficacia in presenza di forte umidità e la necessità di una forte radiazione solare. Questi limiti si presentano ad Alessandria proprio in corrispondenza dei mesi invernali quando le emissioni sono massime, riducendo l'efficacia di tale soluzione se applicata, per esempio, al manto stradale. In secondo luogo, il costo rappresenta un ostacolo importante: se per asfaltare un chilometro di strada il costo è in media di 150.000 – 500.000 mila euro, il costo stimato utilizzando asfalto con materiali fotocatalitici incrementa fino a 400.000 – 800.000 mila euro. Questa misura necessita quindi di un grande investimento a fronte di un miglioramento effettivo relativamente basso.

Questa tecnologia, però, potrebbe comunque rivelarsi utile se utilizzata per il rivestimento di pareti verticali, soprattutto quelle più esposte alla luce solare.

II) Biofiltrazione attiva tramite city tree

Tecnologie come i city tree possono essere una scelta intelligente in diversi contesti. Si tratta di installazioni verticali coperte da pannelli di muschio vivo utilizzate per filtrare l'aria che dispongono, in aggiunta, di sistemi integrati di

ventilazione per attirare forzatamente grandi masse d'aria attraverso la vegetazione per massimizzare l'effetto. Il city tree è stato sviluppato da un'azienda tedesca, questa afferma che una singola struttura comporta un effetto di filtraggio e di riduzione dell'inquinamento pari a 275 alberi piantati in città.

All'interno della stessa installazione vengono utilizzate diverse specie di muschio al fine di aumentare il filtraggio diversificando le proprietà dei singoli vegetali. Il 50% del particolato intrappolato viene metabolizzato dal muschio stesso ed utilizzato come nutriente, il 25% è metabolizzato da microorganismi che vivono nel substrato e il restante 25% viene immagazzinato nei sedimenti.

I dati dettagliati sull'efficacia della struttura sono stati forniti in Italia nell'ambito del progetto europeo "City Tree Scaler" a Modena, e sono riassunti in Tabella 16 [77].

Tipo di Particolato	Riduzione Massima Nell'Area Circostante
PM10	Fino al 15%
PM2.5	Fino al 20%
PM1	Fino al 13%
Particelle ultrasottili	Fino al 38%
Black Carbon	Fino al 17%

Tabella 16. Riduzione massima della concentrazione di inquinanti.

I risultati dimostrano una grande efficacia, sebbene si tratti di una misura estremamente localizzata, portando benefici effettivi in un'area di circa 200m².

Di fondamentale importanza è la tecnologia IoT che gestisce diversi parametri per permettere la filtrazione attiva e la sopravvivenza del muschio tra cui:

- Monitoraggio della qualità dell'aria per attivare il filtraggio;
- Monitoraggio della temperatura e dell'umidità per permettere la sopravvivenza delle specie vegetali;
- Sistema di irrigazione smart completamente automatizzato.

Dal lato pratico, considerando le dimensioni di una piazza o di strade trafficate, un singolo City Tree porterebbe benefici irrisori. Pensando ad un'area come Piazza della Libertà ad Alessandria e considerando un'altezza di 10m dal suolo un city tree dovrebbe gestire un volume di circa 180.000m³. Una singola istallazione filtra circa 5.000 m³/h di aria. Considerando poi l'influenza del vento che contribuisce al ricircolo dell'aria portando via, di conseguenza, anche aria pulita, si evince che il beneficio reale sia estremamente basso.

Questa applicazione può quindi dimostrarsi molto utile in aree chiuse o semichiusate, come cortili scolastici o di fronte a strutture ospedaliere, oppure in piccole aree pedonali. Il basso costo è un fattore importante che potrebbe permettere la diffusione di queste strutture in contesti come quello di Alessandria, bonificando zone ad alta presenza di inquinanti riducendo il

rischio di eventi sanitari acuti nella popolazione più a rischio come bambini e anziani.

La presenza di city tree potrebbe, oltretutto, sensibilizzare la popolazione, portando le persone ad effettuare una riflessione sulle emissioni e di conseguenza una maggiore attenzione personale, provocando indirettamente un miglioramento della situazione.

III) Monitoraggio iper-locale

Una possibile strategia per un maggiore monitoraggio della qualità dell'aria consiste nell'utilizzo di una fitta rete di sensori a basso costo come quelli basati su tecnologie elettrochimiche per i gas (NO_2 e O_3) e sensori ottici per il particolato. Questi da soli presentano numerosi problemi di calibrazione, essendo suscettibili al fenomeno della deriva causato da temperatura e umidità, non presente, invece, nelle centraline di riferimento dell'ARPA. I limiti descritti, però, possono essere superati tramite tecniche di machine learning come la Random Forest Regression, che permette di correggere l'offset di base e le interferenze ambientali sui dati. [78]

Una rete iper - locale potrebbe portare numerosi benefici, tra cui la creazione di un gemello digitale della città per poter simulare la dispersione degli inquinanti in relazione a determinati limiti applicabili alla circolazione. Un ulteriore vantaggio potrebbe essere la creazione di una rete di identificazione delle sorgenti: se, per esempio, nel periodo invernale in un quartiere residenziale poco trafficato dovesse verificarsi una concentrazione elevata di PM_{10} , potrebbe testimoniare un impatto

eccessivo del riscaldamento residenziale; in questo modo si andrebbe ad agire specificatamente in determinati quartieri in relazione al contesto.

IV) Precipitatore elettrostatico (ESP)

Un precipitatore elettrostatico è un dispositivo installabile sul sistema di scarico fumi di stufe e caldaie al fine di ridurre le emissioni di PM10 e PM2.5. L'ESP utilizza degli elettrodi ad alta tensione per caricare elettricamente le particelle di PM presenti nei fumi; successivamente, questi passano attraverso piastre di raccolta di carica opposta dove il PM carico resta intrappolato venendo separato dal fumo che poi si disperderà in atmosfera.

Secondo uno studio di Migliavacca et al. [79], l'efficienza di questi sistemi può raggiungere il 50-80% nei sistemi su piccola scala, dimostrandosi buoni per quanto riguarda il filtraggio di PM e nanoparticelle quando i filtri sono puliti. L'efficienza si riduce progressivamente con l'usura, specialmente in dispositivi più piccoli e che agiscono su apparecchi con maggiori emissioni; l'usura deriva dall'imbrattamento, cioè l'accumulo di sostanza sulle piastre che riduce la superficie efficace, rendendo necessari interventi di pulizia.

La validazione scientifica relativa agli ESP è solida e la loro implementazione nei piani di bonifica della qualità dell'aria potrebbe portare notevoli benefici per quanto riguarda l'inquinamento e la salute pubblica nelle zone residenziali.

L'applicabilità in una città come Alessandria è elevata, gli ESP potrebbero diventare un fattore importante nella limitazione del PM immesso in

atmosfera dal riscaldamento domestico, e il loro acquisto potrebbe essere incoraggiato da contributi governativi al fine di limitare l'esposizione sia acuta che cronica.

V) Soppressori di Polvere

Come visto in precedenza, le particelle di PM su strada non provengono soltanto dagli scarichi dei motori, ma in misura maggiore sono formate dall'usura di freni, pneumatici ed asfalto, e sono messe in circolazione dal traffico che le solleva dall'asfalto. La polvere stradale risolleverata può contribuire in modo significativo alla percentuale di PM in atmosfera nelle aree urbane in caso di siccità.

Per affrontare questo problema una soluzione potrebbe essere l'uso di soppressori di polvere come i sali di cloruro di calcio e cloruro di magnesio. Questi sali hanno una grande affinità per l'umidità ed assorbono il vapore acqueo dall'aria, successivamente, dopo aver assorbito una certa quantità di acqua, si sciolgono formando una soluzione liquida sulla superficie stradale. Questa soluzione che si viene a formare mantiene la strada leggermente umida e appiccicosa, in grado di legare le particelle fini di polvere impedendo che queste ultime possano sollevarsi a causa dei flussi d'aria generati dal passaggio dei veicoli.

Diversi studi su strada condotti in India ed Europa hanno dimostrato l'efficacia di queste polveri nel ridurre la concentrazione di particolato presente in atmosfera. In uno studio condotto su strade asfaltate, l'applicazione di cloruro di calcio a dosaggi di $30\text{g}/\text{m}^2$ ha portato a riduzioni

massime di PM10 e PM2.5 oltre il 97% immediatamente dopo l'applicazione. Lo stesso studio indica come il cloruro di calcio abbia effetti leggermente più efficaci rispetto al cloruro di magnesio. L'efficacia, però, tende a diminuire molto velocemente nel tempo a causa di usura e fenomeni di lisciviazione causati da piogge, già dopo 24 ore la riduzione di polveri è risultata minore rispetto all'effetto immediato, seppur mostrando, comunque, degli effetti positivi. [80]

Studi condotti in Europa hanno dimostrato l'efficacia di cloruri e acetati con ottimi risultati, ottenendo riduzioni delle emissioni di PM tra il 30% e il 60%, con variazioni in base alla quantità applicata. Queste polveri sono particolarmente utili nei mesi invernali secchi e nelle condizioni di inversione termica, nei primi perché il lavaggio delle strade con acqua porterebbe ad un rischio di ghiacciare le strade, nel caso dell'inversione termica invece, a causa della mancata dispersione delle polveri in atmosfera, occorre una soluzione da poter applicare direttamente alla fonte su strada. [81]

Questo metodo è già consolidato ed utilizzato da decenni nei Paesi del Nord Europa, e la letteratura scientifica è concorde sull'utilizzo di polveri per prevenire l'innalzamento delle concentrazioni di PM causate da traffico veicolare. Una città come Alessandria, sottoposta a condizioni meteo climatiche estremamente sfavorevoli, potrebbe beneficiare di una soluzione di questo tipo, da applicare in determinate condizioni per contribuire al controllo del particolato atmosferico.

7.2.2 Soluzioni per l'inquinamento dell'acqua

In questa sezione saranno analizzate diverse tecnologie innovative, che hanno lo scopo di bonificare le acque da PFAS e metalli pesanti, che siano applicabili in un contesto come quello alessandrino. Il problema principale riscontrato, tuttavia, risiede nella difficoltà di trovare tecniche e metodologie applicabili in breve termine, a causa della necessità di modifica ed aggiornamento dei grandi impianti di depurazione. I metodi per l'eliminazione definitiva dei PFAS risultano estremamente costosi e con lunghi tempi di implementazione e validazione, per questo la scelta migliore nel breve termine è aumentare la capacità di depurazione e raccolta degli inquinanti per poi stocarli in serbatoi specifici.

1) Frazionamento schiumogeno

Questa tecnica sfrutta la capacità dei PFAS di adsorbirsi a bolle d'aria, in questo modo è possibile concentrarli come schiuma e separarli dall'acqua. Test effettuati su scala pilota hanno mostrato un'efficienza di rimozione dal 60% all'84% in base al tipo di PFAS (rispettivamente percolato di discarica e schiume antincendio). Un'efficacia minore è stata rilevata in relazione a PFAS a catena corta, e durante i test sono state rilevate emissioni significative in aria, costituendo un potenziale rischio per i lavoratori. [82]

Questa tecnica è tuttora studiata in una falda in Danimarca nell'ambito del progetto SCENARIOS, e a guidare l'esperimento è l'Università del Piemonte Orientale. Il ruolo guida assunto dall'università piemontese costituisce un indicatore significativo del potenziale interesse strategico della città di

Alessandria verso i risultati di tale ricerca. La speranza è che queste metodologie possano trovare applicazione in futuro nella zona di Alessandria, per una migliore gestione del problema relativo alla contaminazione delle falde.

II) Adsorbimento con nanomateriali

Un crescente settore di ricerca mira a sostituire le BAT tradizionali basate su filtri al carbone attivo granulare con dei materiali su scala nanometrica per il trattamento idrico. Una revisione di Jawed et al. [83] discute un grande numero di tecniche di rimozione di metalli pesanti dalle acque, principalmente quelle reflue industriali, basate su nanomateriali ingegnerizzati. Questi nanomateriali vengono utilizzati come adsorbenti, sono cioè in grado di legare le sostanze inquinanti sulla propria superficie e, una volta raccolti, possono essere puliti e gli inquinanti smaltiti. La funzionalizzazione superficiale di questi materiali è la chiave delle loro capacità adsorbenti, aumentando la loro affinità per gli ioni dei metalli pesanti, la selettività e la facilità di recupero dei nanomateriali per poterli riutilizzare.

Nonostante tutto, sebbene queste tecniche siano estremamente promettenti, risultano altamente impraticabili a causa degli alti costi e della grande quantità di acqua che dovrebbero filtrare nel contesto di un depuratore urbano.

III) Estensione del biomonitoraggio

Un'azione concreta e realizzabile in tempi brevi è quella di estendere il biomonitoraggio sulla popolazione. Questa strategia deve essere realizzata in concomitanza di sviluppi tecnologici, dal momento che si tratta soltanto di una misura di emergenza. Dal lato sanitario, è importante intervenire tempestivamente per mettere in sicurezza la popolazione locale, rendendola consapevole della propria situazione e seguendola in un percorso riabilitativo in caso di esposizione aggravata.

Il biomonitoraggio viene proposto perché la contaminazione è in corso da decenni e, non potendo risolvere la situazione inquinanti in tempi brevi, è necessario fornire il massimo supporto sanitario per prevenire il rischio di sviluppo massiccio di patologie gravi, cercando di includere tutta la popolazione esposta al rischio.

7.2.3 Soluzioni per l'inquinamento del suolo

Come per l'acqua, anche per il suolo le metodologie più innovative e tecnologiche comportano un grande dispendio economico, non sempre sostenibile da parte di una città.

I) Termovalorizzatori

Alessandria presenta un grave problema generato dallo smaltimento dei rifiuti, e la proposta di un termovalorizzatore potrebbe portare diversi benefici:

- Discariche: le discariche rappresentano un rischio enorme per l'inquinamento di aria, acqua e suolo; i rifiuti potrebbero penetrare nel suolo, contaminandolo, per poi sprofondare nel terreno fino a raggiungere le acque di falda;
- Smaltimento dei rifiuti: molti rifiuti, oltre a finire in discariche, vengono portati altrove per essere smaltiti, che implica un costo elevato ed una fonte di emissioni aggiuntiva causata dal trasporto;
- Produzione di energia elettrica: il calore generato dalla combustione dei rifiuti genera energia elettrica immessa nella rete nazionale, riducendo la dipendenza da combustibili fossili;
- Produzione di calore: il calore residuo può essere recuperato ed utilizzato per alimentare una rete di teleriscaldamento urbano;
- Riduzione dei costi di smaltimento: come visto in precedenza lo smaltimento dei rifiuti ha un costo, e la presenza di un termovalorizzatore potrebbe ridurlo drasticamente.

II) Fitobonifica

La fitobonifica è una tecnologia che consiste nell'utilizzare piante per rimuovere, degradare o contenere i contaminanti presenti nel suolo e nelle acque in base alla tipologia di piante utilizzate:

- Fitoestrazione: si basa sull'utilizzo di piante iperaccumulatrici capaci di assorbire una grande quantità di metalli pesanti ed immagazzinarli nel fusto e nelle foglie, rimuovendo fisicamente una parte delle sostanze inquinanti dal suolo attraverso le radici;

- Fitostabilizzazione: alcune specie di piante sono in grado di immobilizzare gli inquinanti nel suolo, adsorbendo le sostanze sulla superficie delle radici. Questa tecnica permette di prevenire la mobilità delle sostanze, evitando che si espandano in superficie o che migrino negli strati sottostanti a causa della lisciviazione.

Tra le due la seconda è quella potenzialmente più applicabile nel contesto di Alessandria, rappresentando una soluzione economicamente sostenibile a lungo termine; non risolve il problema, ma lo immobilizza nel terreno, escludendo comunque che si espanda verso altri terreni o acque, limitando l'esposizione della popolazione alle sostanze presenti.

III) Soil washing

Si tratta di una delle poche tecniche effettivamente funzionanti nei confronti dei PFAS. Il terreno viene scavato e trattato direttamente in-situ:

1. Una zolla di terreno viene scavata, ripulita dai detriti grossolani, miscelata e inserita nell'impianto;
2. Il terreno viene miscelato con acqua e additivi chimici e il fango passa in una serie di setacci che separano il terreno in base alle dimensioni, i PFAS si legano principalmente alla frazione più fine;
3. La maggior parte del volume considerato pulito esce dall'impianto, viene nuovamente testato e, se sono soddisfatti gli standard di qualità, viene considerato terra bonificata e riutilizzato nel sito;

4. L'acqua di lavaggio viene depurata e riutilizzata, i fanghi e i carboni attivi, usati per separare i PFAS, sono il rifiuto finale ad alta concentrazione che deve essere smaltito;
5. Lo smaltimento finale consiste nello stoccaggio in discariche per rifiuti speciali o nell'incenerimento ad alta temperatura.

8. Conclusioni

In un mondo sempre più esposto ai danni generati dall'inquinamento il primo passo fondamentale verso un cambiamento volto al miglioramento è prendere consapevolezza della situazione e dei possibili rischi a cui si va incontro. Negli ultimi anni sono aumentate le misure governative e le attenzioni rivolte a questo tema delicato, ma in contesti particolarmente sensibili come quello di Alessandria, è importante intervenire su più fronti simultaneamente.

Questo lavoro si è concentrato sulla valutazione della situazione passata e attuale attraverso l'analisi di dati oggettivi di contaminazione della zona alessandrina, cercando di comprendere perché ci sia una situazione così grave, partendo dall'inquinamento storico causato dalle industrie, passando per la sfavorevole collocazione geografica, fino ad arrivare alle fonti di inquinamento odierne. Sono stati presentati i rischi per la salute della popolazione associati ad un inquinamento diffuso di aria, acqua e suolo. I principali inquinanti sono stati descritti focalizzandosi sui metodi di ingresso nel corpo umano e i relativi danni causati sia da episodi di esposizione acuta che cronica.

Sono state analizzate le misure adottate nella città per contrastare il problema, arrivando alla conclusione che le attuali soluzioni non sono sufficienti per rispettare completamente le nuove direttive europee previste per il 2030, tantomeno per rispettare le raccomandazioni dell'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Infine, sono state proposte tecnologie innovative da poter affiancare alle attuali misure, in modo da attuare una strategia multilivello e multimodale, concentrandosi sia sul presente che sul futuro.

Degna di una citazione è la missione Copernicus Sentinel-4 e le sue prime immagini datate 8 ottobre 2025, che rappresentano l'ultima frontiera del monitoraggio ambientale. Si tratta di un satellite in grado di misurare le concentrazioni quasi in tempo reale di NO₂, SO₂ e O₃ direttamente da un'orbita geostazionaria a 36.000km di altitudine sopra l'Europa centro – meridionale e il Nord Africa., sfruttando la luce riflessa e la composizione dell'atmosfera con particolari spettrometri.

Questo lavoro è da intendersi come la prima parte di un lungo percorso, la presa di coscienza della gravità della situazione basata sull'analisi di dati oggettivi per spingere verso un futuro più sostenibile e pulito che migliori la qualità della vita.

Un possibile sviluppo di questo progetto potrebbe includere una Valutazione di Impatto Sanitario (VIS) quantitativa, utilizzando dati ambientali e dati ricavati da un biomonitoraggio più esteso, insieme ai dati dell'ASL di Alessandria, riguardo a specifiche correlazioni tra inquinanti e patologie. Queste VIS, inoltre, si renderebbero necessarie per testare la reale efficacia a livello sanitario di eventuali misure adottate per la riduzione degli inquinanti.

Una valutazione sanitaria accurata sarebbe il modo migliore per selezionare le misure più adatte alle specifiche situazioni in cui si trova la città: ad esempio, se un quartiere residenziale dovesse registrare un numero

elevato di ricoveri causati da un'esposizione acuta agli inquinanti atmosferici nel periodo invernale, si potrebbe pensare di incentivare, in quella zona della città, l'acquisto di dispositivi ESP per ridurre le emissioni derivate dai riscaldamenti domestici.

Bibliografia

1. Organizzazione Mondiale della Sanità, Ufficio Regionale per l'Europa. *Linee Guida Globali OMS sulla Qualità dell'Aria: Particolato (PM_{2,5} e PM₁₀), Ozono, Biossido di Azoto, Anidride Solforosa e Monossido di Carbonio. Sintesi*. 2022.
2. Italia. "Decreto Legislativo 13 agosto 2010, n. 155. Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa." *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, Serie Generale, n. 216, 15 settembre 2010, Supplemento Ordinario n. 217. Normattiva, www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir:stato:decreto.legislativo:2010-08-13;155
3. Istituto Nazionale per l'Assicurazione contro gli Infortuni sul Lavoro (INAIL). *Libro Bianco: Esposizione a Nanomateriali Ingegnerizzati ed Effetti sulla Salute e Sicurezza nei Luoghi di Lavoro*. INAIL, 2013, <https://www.inail.it/cs/internet/docs/alg-libro-bianco-esposizione-nanomateriali-ingegnerizzati.pdf>
4. Oberdörster, G., et al. "Nanotoxicology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles." *Environmental Health Perspectives*, vol. 113, no. 7, July 2005, pp. 823-39. <https://doi.org/10.1289/ehp.7339>.
5. Kreyling, W. G., et al. "A Systematic Review of the Translocation of Inhaled Nanoparticles from the Lung to Other Organs." *Toxicology and Applied Pharmacology*, vol. 268, no. 2, 2013, pp. 222-45.
6. Detampel, P., et al. "In Vivo Clearance of Nanoparticles by Transcytosis across Alveolar Epithelial Cells." *PLoS One*, vol. 14, no. 9, 30 Sept. 2019, e0223339. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0223339>.
7. Chakraborty, Amitesh. "A Common Byproduct of Nitration Reaction in Laboratory – Nitrogen Dioxide: Compilation of Its Pharmacokinetics and Toxicity Studies." *International Journal of Pharmaceutical Sciences*, vol. 2, 2024, pp. 1550-64. <https://doi.org/10.5281/zenodo.13862937>.
8. Svizzera, Confederazione. Ufficio Federale dell'Ambiente (UFAM). "Effetti dell'inquinamento da ozono." *UFAM*, 9 ago. 2024, www.bafu.admin.ch/bafu/it/home/temi/aria/info-specialisti/sostanze-inquinanti/ozono--effetti-sull-uomo-e-sull-ambiente.html.
9. United States, Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological Profile for*

Sulfur Dioxide. Sept. 1998,
wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=253&tid=46.

10. Block, M. L., and Lilian Calderón-Garcidueñas. "Air Pollution: Mechanisms of Neuroinflammation and CNS Disease." *Trends in Neurosciences*, vol. 32, no. 9, Sept. 2009, pp. 506–16. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2009.05.009>.
11. Kim, H., et al. "Air Pollution and Central Nervous System Disease: A Review of the Impact of Fine Particulate Matter on Neurological Disorders." *Frontiers in Public Health*, vol. 8, 16 Dec. 2020, 575330. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.575330>.
12. Alhussaini, A. R., et al. "Air Pollution and Its Adverse Effects on the Central Nervous System." *Cureus*, vol. 15, no. 5, 12 May 2023, e38927. <https://doi.org/10.7759/cureus.38927>.
13. Du, Y., et al. "Air Particulate Matter and Cardiovascular Disease: The Epidemiological, Biomedical and Clinical Evidence." *Journal of Thoracic Disease*, vol. 8, no. 1, Jan. 2016, pp. E8–19. <https://doi.org/10.3978/j.issn.2072-1439.2015.11.37>.
14. Rajagopalan, S., et al. "Air Pollution and Cardiovascular Disease: JACC State-of-the-Art Review." *Journal of the American College of Cardiology*, vol. 72, no. 17, Oct. 2018, pp. 2054–70. <https://doi.org/10.1016/j.jacc.2018.07.099>.
15. Wang, R., et al. "Association between Long-Term Ambient Air Pollution Exposure and the Incidence of Breast Cancer: A Meta-Analysis Based on Updated Evidence." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 289, 2025, 117472. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.117472>.
16. Guo, C., et al. "Long-Term Exposure to Ambient Fine Particles and Gastrointestinal Cancer Mortality in Taiwan: A Cohort Study." *Environment International*, vol. 138, 2020, 105640. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105640>.
17. United States, Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological Profile for Nitrate and Nitrite*. Oct. 2017, wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=1418&tid=272.
18. Xue, X., et al. "Hourly Air Pollution Exposure and the Onset of Symptomatic Arrhythmia: An Individual-Level Case–Crossover Study in 322 Chinese Cities." *Canadian Medical Association Journal*, vol. 195, no. 17, May 2023, pp. E601–11. <https://doi.org/10.1503/cmaj.220929>.
19. Istituto Superiore di Sanità. "Inquinamento: gli effetti dell'ozono sulla salute." *ISSalute*, 23 maggio 2024, www.issalute.it/index.php/la-salute-

[dalla-a-alla-z-menu/i/inquinamento-gli-effetti-dell-ozono-sulla-salute.](#)

20. Svizzera, Confederazione. Ufficio Federale dell'Ambiente (UFAM). "Scheda Effetti dell'inquinamento da ozono." UFAM, 9 ago. 2024, www.bafu.admin.ch/bafu/it/home/temi/aria/info-specialisti/sostanze-inquinanti/ozono--effetti-sull-uomo-e-sull-ambiente.html.
21. Jiang, Yunxing, et al. "Ozone Pollution and Hospital Admissions for Cardiovascular Events." *European Heart Journal*, vol. 44, no. 18, 7 May 2023, pp. 1622–32. <https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehad091>.
22. United States, Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). "Health Effects." *Toxicological Profile for Sulfur Dioxide*, Sept. 1998, pp. 11–125, wwwn.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=253&tid=46.
23. Ministero della Salute, Direzione Generale della Prevenzione Sanitaria. *REACH: Bollettino di informazione del Centro Nazionale Sostanze Chimiche, prodotti cosmetici e protezione del consumatore*, n. 2, Luglio 2016, https://www.reddit.com/r/firefox/comments/16m34do/how_do_i_download_pdf_when_the_website_doesnt/?tl=it.
24. Italia. *Decreto Legislativo 23 febbraio 2023, n. 18*. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana, Serie Generale, n. 55, 6 marzo 2023.
25. Unione Europea. *Direttiva (UE) 2020/2184 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 16 dicembre 2020 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano*. Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, L 435/1, 23 dicembre 2020.
26. "Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS)." *European Chemicals Agency*, 2025, echa.europa.eu/hot-topics/per-and-polyfluoroalkyl-substances-pfas.
27. Kwiatkowski, Carol F., et al. "Scientific Basis for Managing PFAS as a Chemical Class." *Environmental Science & Technology Letters*, vol. 7, no. 8, 2020, pp. 532–43, doi:10.1021/acs.estlett.0c00255.
28. World Health Organization. "Arsenic." WHO, 14 June 2022, www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/arsenic.
29. Alloway, Brian J. *Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and their Bioavailability*. Springer, 2013.
30. Italia. "Allegato I, Parte B: Parametri chimici." *Decreto Legislativo 23 febbraio 2023, n. 18. Attuazione della direttiva (UE) 2020/2184 del*

- Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2020, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano. *Gazzetta Ufficiale*, Serie Generale, n. 55, 6 marzo 2023, www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/03/06/23G00025/sg.
31. Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA). *Rapporto Ambiente – SNPA: Edizione 2023*. Report Ambientali SNPA, n. 39, 2023
 32. Italia. *Decreto Legislativo 23 febbraio 2023, n. 18. Attuazione della direttiva (UE) 2020/2184 del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 dicembre 2020, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano*. *Gazzetta Ufficiale*, Serie Generale, n. 55, 6 marzo 2023, www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2023/03/06/23G00025/sg.
 33. Istituto Superiore di Sanità (ISS). *Perfluoro-alchilici (PFAS): cosa sono, i rischi per la salute e i limiti di esposizione*. 2023.
 34. United States, Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). *Toxicological Profile for Lead*. 2020.
 35. EFSA Panel on Contaminants in the Food Chain (EFSA CONTAM Panel), et al. "Risk to Human Health Related to the Presence of Perfluoroalkyl Substances in Food." *EFSA Journal*, vol. 18, no. 9, 2020, e06223. <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223>.
 36. Zahm, Shelia, et al. "Carcinogenicity of Perfluorooctanoic Acid and Perfluorooctanesulfonic Acid." *The Lancet Oncology*, vol. 25, no. 1, Jan. 2024, pp. 16–17. [https://doi.org/10.1016/S1470-2045\(23\)00622-8](https://doi.org/10.1016/S1470-2045(23)00622-8).
 37. United States, Department of Health and Human Services, Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). "Health Effects of PFAS." *Agency for Toxic Substances and Disease Registry*, 24 June 2022, www.atsdr.cdc.gov/pfas/health-effects/index.html.
 38. Stanifer, John W., et al. "Perfluorinated Chemicals as Emerging Environmental Threats to Kidney Health: A Scoping Review." *Clinical Journal of the American Society of Nephrology*, vol. 13, no. 10, 1 Oct. 2018, pp. 1479–1492.
 39. World Health Organization. "Lead Poisoning." *World Health Organization*, 11 Sept. 2023, www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/lead-poisoning-and-health.
 40. Istituto Superiore di Sanità, *Arsenico*. 15 maggio 2019, www.iss.it/arsenico
 41. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). "Toxicological Profile for Arsenic." *U.S. Department of Health and Human*

Services, Public Health Service, 2007,
www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp2.pdf.

42. Ratnaike, R. N. "Acute and Chronic Arsenic Toxicity." *Postgraduate Medical Journal*, vol. 79, no. 933, July 2003, pp. 391–396. *PubMed Central*, doi:10.1136/pmj.79.933.391.
43. *Direttiva 98/83/CE del Consiglio, del 3 novembre 1998, concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano*. Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, L 330, 5 dicembre 1998, pp. 32–54.
44. World Health Organization. *Cadmium in Drinking-water. Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. World Health Organization, 2019, www.who.int/publications/i/item/9789241550509.
45. World Health Organization. *Nickel in Drinking-Water. Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality*. World Health Organization, 25 May 2021. Version for public review.
46. World Health Organization (WHO). *Nitrate and Nitrite in Drinking-water. Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*. 2022, <https://www.docsity.com/it/docs/soluzione-eipass-7-moduli-ultima-versione-risposte-esatte-modulo-3/5304611/>.
47. World Health Organization. "Chromium in Drinking-water." *Background Document for Development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality*, 2003, iris.who.int/bitstream/handle/10665/75365/WHO_SDE_WSH_03.04_55_eng.pdf.
48. United States Environmental Protection Agency. "DDT – A Brief History and Status". *United States Environmental Protection Agency*, 11 Aug. 2023, www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/ddt-brief-history-and-status.
49. Shin, D.Y., et al. "Adverse Human Health Effects of Chromium by Exposure Route: A Comprehensive Review Based on Toxicogenomic Approach." *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 24, no. 4, 8 Feb. 2023, <https://doi.org/10.3390/ijms24043410>.
50. Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). "DDT, DDE, and DDD – ToxFAQs™". *Centers for Disease Control and Prevention*, 28 Apr. 2022, wwwn.cdc.gov/TSP/ToxFAQs/ToxFAQsDetails.aspx?faqid=80&toxid=20.

51. National Toxicology Program. *Toxicology and Carcinogenesis Studies of Sodium Dichromate Dihydrate (CAS No. 7789-12-0) in F344/N Rats and B6C3F1 Mice (Drinking Water Studies)*. U.S. Department of Health and Human Services, National Institutes of Health, 2008, a https://ntp.niehs.nih.gov/sites/default/files/ntp/htdocs/lt_rpts/tr546.pdf. Technical Report Series, no. 546.
52. Welling, Roberta, et al. "Chromium VI and Stomach Cancer: A Meta-Analysis of the Current Epidemiological Evidence." *Occupational and Environmental Medicine*, vol. 72, no. 2, 2015, pp. 151-59. PubMed, <https://doi.org/10.1136/oemed-2014-102178>.
53. Costa, Max, and Eric M. Su. "Molecular Mechanisms of Carcinogenicity and Other Toxic Effects of Hexavalent Chromium." *Environmental Health Perspectives*, vol. 124, no. 8, Aug. 2016, pp. 1241-50.
54. Bai, Yu, et al. "Hexavalent Chromium in Drinking Water and Gastric Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis." *Chemosphere*, vol. 209, Oct. 2018, pp. 603-10.
55. Eskenazi, Brenda, et al. "The Pine River Statement: Human Health Consequences of DDT and DDE Exposure." *Environmental Health Perspectives*, vol. 117, no. 9, 2009, pp. 1359-1367., <https://doi.org/10.1289/ehp.11748>.
56. European Environment Agency. "Europe's air quality status 2023". *European Environment Agency*, 24 Apr. 2023, www.eea.europa.eu/publications/europes-air-quality-status-2023.
57. "Air pollution fluctuations over the Po Valley." *European Space Agency*, 13 Feb. 2024, www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Air_pollution_fluctuations_over_the_Po_Valley.
58. "Il Bacino Padano: geografia, clima e qualità dell'aria." *Arpae Emilia-Romagna*, www.arpae.it/it/temi-ambientali/educazione_alla_sostenibilita/progetti-in-corso/leggere-i-dati-e-farne-buon-uso/aria/bacino-padano-geografia-clima-qualita-dell-aria.
59. "Bonifica Aree Inquinare." *Regione Piemonte*, www.regione.piemonte.it/web/temi/ambiente-territorio/ambiente/amianto-bonifiche-cave/bonifica-aree-inquinare.

60. Italia, Istituto Nazionale di Statistica. 7° Censimento Generale dell'Agricoltura, ISTAT, 2022, www.istat.it/it/censimenti/agricoltura/2020.
61. Consiglio delle Comunità Europee. *Direttiva 91/676/CEE del Consiglio, del 12 dicembre 1991, relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole*. Gazzetta ufficiale delle Comunità europee, vol. L 375, 31 dic. 1991, pp. 1-8.
62. European Environment Agency. "Eutrophication caused by atmospheric nitrogen deposition in Europe." European Environment Agency, 15 Nov. 2022, www.eea.europa.eu/ims/eutrophication-caused-by-atmospheric-nitrogen.
63. Unione Europea. Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea. *Direttiva 2004/42/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 21 aprile 2004, relativa alla limitazione delle emissioni di composti organici volatili dovute all'uso di solventi organici in talune pitture e vernici e in taluni prodotti per carrozzeria e recante modifica della direttiva 1999/13/CE*. Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, L 143, 30 apr. 2004, pp. 87-96. EUR-Lex, data.europa.eu/eli/dir/2004/42/oj.
64. Commissione Europea. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document on the Production of Speciality Inorganic Chemicals*. Publications Office of the European Union, 2006. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/ofc_bref_0806.pdf.
65. Commissione Europea. *Integrated Pollution Prevention and Control: Reference Document on Best Available Techniques for the Surface Treatment of Metals and Plastics*. Agosto 2006.
66. Commissione Europea. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector*. Publications Office of the European Union, 2016. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/cww_bref_2016.pdf.
67. Commissione Europea. *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Production of Polymers*. Publications Office of the European Union, 2007. https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/2019-11/pol_bref_0807.pdf.

68. European Chemicals Agency (ECHA). *Annex XV Restriction Report: Proposal for a Restriction on Intentionally Added Microplastics*. Version 1.2, agosto 2019, <https://echa.europa.eu/documents/10162/05bd96e3-b96d-4740-9833-03c14a2b3046>.
69. Italia. Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. "Decreto 8 novembre 2010, n. 260." *Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana*, n. 30, 7 febbraio 2011, Supplemento Ordinario n. 31. Normattiva, www.normattiva.it
70. Regione Piemonte. *Piano regionale di qualità dell'aria. Approvato con D.C.R. 25 marzo 2019, n. 364-6854*. Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte, n. 16, suppl. 1, 18 apr. 2019.
71. Città di Alessandria, "Protocollo misure antismog." comune.alessandria.it/schede-informative/protocollo-misure-antismog
72. Regione Piemonte, Direzione Ambiente, Governo e Tutela del Territorio. *Piano di Tutela delle Acque: Programma delle Misure di Piano*. Dicembre 2018. Regione Piemonte, https://www.regione.piemonte.it/web/sites/default/files/media/documenti/2019-01/pta2018_programma_delle_misure.pdf
73. Regione Piemonte, "Risultati biomonitoraggio PFAS in provincia di Alessandria." www.regione.piemonte.it/web/temi/sanita/prevenzione/risultati-biomonitoraggio-pfas-provincia-alessandria
74. Università del Piemonte Orientale, "PFAS, l'impegno per la salute dei cittadini". mediacentre.uniupo.it/it/news/pfas-limpegno-salute-dei-cittadini
75. Regione Piemonte. "CSR 2023-2027. Investimenti per ridurre le emissioni (SRD02_A). Bando 2". *Bandi Regione Piemonte*, 7 nov. 2024
76. Ma, H., et al. "TiO₂-Based Photocatalysts for Removal of Low-Concentration NO_x Contamination." *Catalysts*, vol. 15, no. 2, 2025, art. 103. <https://doi.org/10.3390/catal15020103>.
77. Villani, M. G., et al. "Evaluating the Impact of a Wall-Type Green Infrastructure on PM₁₀ and NO_x Concentrations in an Urban Street Environment." *Atmosphere*, vol. 12, no. 7, 2021, p. 839, <https://doi.org/10.3390/atmos12070839>.
78. Bush, T., et al. "Machine learning techniques to improve the field performance of low-cost air quality sensors." *Atmospheric*

Measurement Techniques, vol. 15, no. 11, 2022, pp. 3261–3278. *Copernicus Publications*, doi:10.5194/amt-15-3261-2022.

79. Migliavacca, G., et al. "Reduction of PM Emissions from Biomass Combustion Appliances: Evaluation of Efficiency of Electrostatic Precipitators." *Chemical Engineering Transactions*, vol. 37, 2014.
80. Shaikh, S., et al. "Effectiveness of chemical road dust suppressants on paved roads of Pimpri Chinchwad." *Journal of Air Pollution and Health*, vol. 8, no. 4, 2023, pp. 14542. *DOAJ*, doi:10.18502/japh.v8i4.14542.
81. AIRUSE. "The Efficacy of Dust Suppressants to Control Road Dust Re-Suspension in Northern and Central Europe." Report 14, Progetto AIRUSE (LIFE11/ENV/ES/584), 2016.
82. Smith, S. J., *Innovative treatment technologies for PFAS-contaminated water: Utilizing foam partitioning and exploring electrochemical oxidation*. 2023. Swedish University of Agricultural Sciences, PhD dissertation. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae*, no. 2023:53, <https://doi.org/10.54612/a.6p8i5lbs81>.
- Jawed, A., et al. "Engineered Nanomaterials and Their Surface Functionalization for the Removal of Heavy Metals: A Review." *Journal of Water Process Engineering*, vol. 33, 2020, article 101009. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2019.101009>.