

# POLITECNICO DI TORINO

Tesi di Laurea Magistrale in Ingegneria Matematica



Tesi di Laurea Magistrale in

## Modellazione della qualità dell'aria nella città di Aosta

Supervisors

Prof. Sofia FELLINI

Prof. Luca RIDOLFI

Prof. Pietro SALIZZONI

Dott. Tiziana Magri

(ARPA Valle d'Aosta)

Candidate

Guillaume GERBELLE

Anno Accademico 2024-2025



# Abstract

Modellazione della qualità dell'aria nella città di Aosta. La qualità dell'aria in ambiente urbano rappresenta un tema di grande rilevanza per la salute pubblica e la pianificazione territoriale. Il presente elaborato, svolto in collaborazione con ARPA Valle d'Aosta, si propone di analizzare la qualità dell'aria nella città di Aosta mediante l'utilizzo del modello numerico SIRANE, sviluppato dall'École Centrale de Lyon, per la simulazione della dispersione degli inquinanti in ambito urbano considerando le specificità meteorologiche locali. Il modello suddivide lo strato atmosferico urbano in due regioni distinte: la urban canopy, che comprende il volume d'aria tra gli edifici, e lo strato atmosferico sovrastante. All'interno della canopy il trasporto degli inquinanti è descritto tramite scambi tra le strade adiacenti e tra ciascuna strada e l'atmosfera superiore, mentre nello strato esterno il flusso è rappresentato come un flusso a strato limite sopra una superficie ruvida, descritto secondo la teoria di Monin-Obukhov. Il lavoro ha previsto una fase preliminare di elaborazione dei dati di input, comprendenti flussi di traffico, dati meteorologici e concentrazioni di inquinanti, convertiti nel formato richiesto dal modello SIRANE. Le sorgenti emissive considerate includono il traffico veicolare, gli impianti di riscaldamento degli edifici e un impianto industriale. Particolare attenzione è stata dedicata all'analisi dell'influenza delle condizioni meteorologiche tipiche delle aree alpine, quali l'inversione termica e il foehn, sulla dispersione degli inquinanti: la prima tende a limitare la diffusione verticale degli inquinanti, mentre la seconda ne favorisce il rimescolamento. Il confronto tra i risultati del modello e le misure sperimentali fornite da ARPA Valle d'Aosta ha mostrato una buona capacità di SIRANE nel riprodurre le tendenze spaziali e temporali delle concentrazioni di  $NO_2$  e  $PM_{10}$  in ambito urbano. Lo studio pertanto conferma la validità del modello come strumento di supporto per la valutazione della qualità dell'aria e la pianificazione di strategie di mitigazione a scala urbana.





# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>1</b>
1.1	Inquinamento Atmosferico . . . . .	1
1.1.1	Focus su emissioni da traffico . . . . .	2
1.2	Condizioni metereologiche critiche tipiche delle zone alpine . . . . .	14
1.3	Modelli di dispersione degli inquinanti in atmosfera . . . . .	19
<b>2</b>	<b>Modellazione fisica</b>	<b>21</b>
2.1	Dati di Input . . . . .	26
2.2	Risultati . . . . .	27
2.2.1	Risultati Meteo . . . . .	27
2.2.2	Concentrazioni SIRANE . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Contesto territoriale</b>	<b>33</b>
3.1	Caratterizzazione meteo-climatica . . . . .	34
3.2	Contesto emissivo . . . . .	37
<b>4</b>	<b>Elaborazione dati di INPUT</b>	<b>43</b>
4.1	Scelta del dominio di studio . . . . .	43
4.2	Geometria Urbana . . . . .	44
4.2.1	Creazione del grafo stradale della città di Aosta . . . . .	45
4.2.2	Caratterizzazione dei box stradali . . . . .	46
4.3	Emissioni . . . . .	48
4.3.1	Emissioni puntuali . . . . .	48
4.3.2	Emissioni lineari . . . . .	49
4.3.3	Emissioni superficiali . . . . .	52
4.3.4	Modulazione temporale . . . . .	54
4.4	Dati meteorologici . . . . .	56
<b>5</b>	<b>Scenari</b>	<b>59</b>
5.1	Scenario 1 . . . . .	60
5.2	Scenario 2 . . . . .	71
5.3	Scenario 3 . . . . .	78
5.4	Scenario 4 . . . . .	86

<b>6 Conclusioni</b>	95
<b>Elenco delle figure</b>	97
<b>Bibliografia</b>	101



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Inquinamento Atmosferico

L'Atmosfera è un involucro gassoso che circonda la terra in cui tanto l'uomo quanto la vita animale e vegetale sono immersi, questo involucro è suddiviso in più strati e quello di maggiore interesse, per quel che riguarda la vita umana, è sottilissimo ed è a diretto contatto con il suolo terrestre. La lenta evoluzione del pianeta, durata milioni di anni, ha progressivamente trasformato l'Atmosfera fino a renderla l'ambiente ideale per la vita umana, animale e vegetale. Lo sviluppo tecnologico alimentato dalla rivoluzione industriale degli ultimi secoli ha determinato profondi cambiamenti nell'Atmosfera andando a rompere equilibri molto importanti. Questi squilibri nascono dall'immissione in Atmosfera di sostanze non presenti nella costituzione originaria e per l'aumento sproporzionato di altre sostanze già presenti. Si può pertanto definire inquinamento atmosferico questa contaminazione dell'ambiente atmosferico. L'interesse generale è quello di riuscire a gestire questo fenomeno: limitarlo o ridurlo dove possibile per poter garantire una sicurezza per la salute umana senza rinunciare allo sviluppo tecnologico.

L'inquinamento atmosferico pertanto corrisponde alla situazione in cui in Atmosfera siano presenti sostanze a concentrazioni tali da essere superiori a quelle naturalmente presenti in aria e tali da poter produrre potenziali effetti nocivi sulla salute umana, sulla qualità della vita, sulla flora e sulla fauna. La causa dell'inquinamento atmosferico è principalmente l'azione antropica in tutte le sue declinazioni: attività industriali e mezzi di trasporto. Le sostanze immesse dall'azione antropica sono le più varie. I processi di combustione che hanno luogo nelle industrie e nei mezzi di trasporto sono i principali responsabili delle emissioni di ossidi di zolfo, di carbonio e di azoto. Alle attività industriali invece si deve l'immissione in atmosfera di una schiera molto numerosa e varia di sostanze inorganiche (ossidi di zolfo, di azoto, di carbonio, polveri ed altro ancora) ed organiche. Si noti inoltre

che l'industria nucleare rilascia in aria radionuclidi di varia natura ed il trasporto aereo causa l'immissione di prodotti della combustione in strati dell'atmosfera non raggiungibili dall'uomo e dalle sue azioni. Lo strato sottile dell'atmosfera sopraccitato prende il nome di strato limite terrestre (PBL Planet Boundary Layer). Lo studio delle caratteristiche di tale ambiente atmosferico in cui ha luogo l'emissione, il trasporto e la dispersione degli inquinanti prende il nome di micrometeorologia.

Appurato che la dispersione degli inquinanti avvenga in questo strato e in virtù della presenza della turbolenza che ne complica la descrizione, sono stati sviluppati dei modelli che potessero aiutare in questo intento. Il grado di complessità dei modelli sarà proporzionale all'uso che se ne vuole fare e al caso studio particolare. Operativamente un modello di simulazione della dispersione degli inquinanti in aria è un algoritmo che riceve in *input* tre dati (struttura geografica del territorio, emissioni degli inquinanti, caratteristiche fisiche del PBL) e restituisce come risultato di *output* la distribuzione spazio-temporale della concentrazione dei vari inquinanti oggetto dello studio. Nel corso degli anni è stato inoltre necessario fornire una definizione di inquinamento dell'aria anche a livello legale. Per inquinamento dell'aria pertanto si definisce "ogni modificazione della normale composizione o stato fisico dell'aria atmosferica, dovuta alla presenza nella stessa di una o più sostanze in quantità e con caratteristiche tali da alterare le normali condizioni ambientali e di salubrità dell'aria; da costituire pericolo ovvero pregiudizio diretto o indiretto per la salute dell'uomo; da compromettere le attività ricreative e gli altri usi legittimi dell'ambiente; alterare le risorse biologiche e gli ecosistemi ed i beni pubblici e privati".[1]

Si noti inoltre che esiste una classificazione per gli inquinanti: esistono i primari e quelli secondari. Per inquinanti primari si intendono quelle sostanze presenti nelle emissioni e che intervengono direttamente sulla salute umana (CO, NO, idrocarburi, SO<sub>2</sub> e particolato). Gli inquinanti secondari invece sono il prodotto delle reazioni tra inquinanti primari o tra inquinanti primari e i componenti naturali dell'atmosfera.

### 1.1.1 Focus su emissioni da traffico

Innumerevoli studi hanno evidenziato che il deterioramento della qualità dell'aria nei centri urbani è principalmente imputabile alle emissioni derivanti dal traffico. Prima di procedere con un *piano di risanamento* è necessaria una ricerca di strategie di intervento sull'emissione da traffico. Le possibilità di intervento sono numerose ma prima di esplorarle è utile procedere con una descrizione approfondita del *regime fotochimico* che governa le reazioni tra i diversi inquinanti sul dominio di interesse.

Le emissioni autoveicolari sono costituite da una complessa miscela di gas e particelle originata sia dalla incompleta combustione del combustibile sia dalle numerose reazioni chimiche che si svolgono nei cilindri a causa del raggiungimento

di pressioni e temperature elevate. Le emissioni atmosferiche da traffico veicolare possono suddividersi in due classi: le **emissioni allo scarico** e quelle **evaporative**. Le prime che corrispondono al contributo maggiore, sono una diretta conseguenza del processo di combustione e risultano dipendenti da diversi fattori legati al tipo di veicolo, al ciclo di funzionamento e alla configurazione del motore, al suo regime di utilizzo, allo stato di usura e al combustibile utilizzato. La seconda classe raggruppa le emissioni che derivano principalmente dalla volatilità del combustibile sono pertanto costituite unicamente da idrocarburi e si verificano sia durante la marcia sia durante le soste a motore spento. Queste sono influenzate dalle variazioni di temperatura e dalla pressione di vapore esercitata dal combustibile, sono aumentate consistentemente negli anni, tuttavia il contributo recentemente è diminuito conseguentemente all'introduzione di sistemi di controllo come il canister, dispositivo antinquinamento che consiste in un contenitore con filtro a carboni attivi che assorbe i vapori di benzina emessi impedendo il raggiungimento dell'atmosfera. Sono legate al sistema di alimentazione dei veicoli, sono originate dalle variazioni di temperatura giornaliera e dalle conseguenti perdite dovute all'evaporazione del combustibile dal serbatoio durante la guida ed il parcheggio e dai fenomeni di permeazione e perdite di carburante. Le due classi sopracitate corrispondono al PM exhaust, per **PM non exhaust** invece si intendono le emissioni derivanti da usura di pneumatici e freni e da abrasione dalla strada. Il materiale che viene prodotto dagli effetti di usura e attrito tra le superfici è soggetto a fenomeni di evaporazione alle alte temperature sviluppate dal contatto e si noti che non tutto il materiale usurato diventa particolato atmosferico. L'emissione di particolato derivante dall'usura degli pneumatici è fortemente legata alla composizione degli stessi, a base generalmente di gomme sintetiche e naturali, additivi metallici (l'ossido di zinco viene utilizzato come agente vulcanizzante) ed organici. Il carico ed il numero di assi del veicolo, i meccanismi di trazione e sterzo, le caratteristiche della superficie stradale percorsa, influiscono inoltre sulle emissioni. Il tasso di usura degli pneumatici è determinato dalla composizione, dalla posizione, dalle condizioni e dall'età, dal comportamento e dalle condizioni di guida (diversi studi dimostrano che alla guida in ambito urbano è associato il tasso di usura più elevato per unità di percorrenza), dal sistema di trazione del veicolo (nei veicoli a trazione anteriore si usurano più velocemente gli pneumatici anteriori; il contrario accade nei veicoli a trazione posteriore), dalle condizioni stradali, dalle condizioni atmosferiche. Influiscono sul tasso di usura anche sistemi di sterzo non allineati e una pressione non corretta degli pneumatici. Riguardo all'emissione di particolato derivante dall'usura dei freni si distingue tra freni a disco e freni a tamburo caratterizzati da differenti sistemi di configurazione. Sulle emissioni influiscono anche le differenti composizioni dei materiali che costituiscono le componenti delle guarnizioni. La posizione dei freni nel veicolo influisce inoltre sul tasso di usura più di quanto la posizione delle gomme influisca sul proprio. I meccanismi di azionamento dei freni (elettrico,

idraulico, pneumatico, meccanico) hanno infine una diversa influenza sul tasso di usura. L'emissione di particolato da abrasione della superficie stradale, legata alla composizione dei materiali costituenti, risulta affetta da elevata incertezza in quanto molto variabile sia da Paese a Paese, sia all'interno di uno stesso Paese. L'abrasione stradale risulta inoltre determinata anche dalla velocità dei veicoli e dalla pressione degli pneumatici. L'usura di questi ultimi e del manto stradale sono infatti strettamente legate, ma mancano al momento dati sperimentali sui fattori di emissione che tengano conto delle diverse combinazioni tra pneumatici e superfici stradali. Le condizioni climatiche possono inoltre influire in modo determinante: nelle zone a clima freddo, ad esempio, in cui vengono utilizzati frequentemente gli pneumatici chiodati, l'usura della strada e le concentrazioni di materiale particolato imputabili alla risospensione sono molto maggiori; i trattamenti antighiaccio basati sullo spargimento di sabbia e sale hanno inoltre un impatto molto importante; infine anche la temperatura atmosferica ed il livello di umidità influiscono sull'usura della strada[4].

Si riportano nel seguito alcuni dei principali inquinanti emessi da sorgenti mobili, suddivisi in base al loro stato di aggregazione:

- *fase gassosa*: biossido di zolfo, ossidi di azoto, monossido di carbonio, idrocarburi alifatici (C1-C18), benzene, idrocarburi policiclici aromatici, metanolo, etanolo, formaldeide, acetaldeide.
- *fase particolata*: particelle carboniose, idrocarburi alifatici(C14-C35), idrocarburi policiclici aromatici, piombo.

Un fattore influente sulle emissioni è costituito dal rapporto A/F (air-fuel) tra aria e combustibile alimentati nei cilindri. La carenza di ossigeno, che si verifica nelle miscele ricche, favorisce la presenza di CO e di idrocarburi, a seguito dell'incompleta combustione, mentre riduce quella degli  $NO_x$ , la cui formazione è strettamente dipendente dalla disponibilità dell'ossigeno stesso. Per miscele povere, l'ampia disponibilità di ossigeno minimizza le emissioni di CO e quelle di idrocarburi, che possono tuttavia aumentare per miscele estremamente povere, a seguito della difficoltà di combustione per la massiccia presenza di aria; le emissioni di  $NO_x$  (era segnato concentrazione di NOX secondo me è emissioni) subiscono invece una costante riduzione dovuta alla progressiva diminuzione della temperatura con l'impoverimento della miscela legato all'effetto diluente dell'aria in eccesso.

La presenza o meno di  $SO + 2e$  particolato nelle emissioni dei motori risulta fortemente dipendente dal tipo di combustibile utilizzato. Il biossido di zolfo  $SO_2$  deriva completamente dall'ossidazione dello zolfo contenuto nel combustibile, mentre il materiale particolato è legato alle difficoltà di combustione dei carburanti contenenti frazioni idrocarburiche pesanti: questi due composti si ritrovano nei gas di scarico nei motori alimentati a gasolio mentre sono assenti in quelli a benzina.

L'entità e le caratteristiche qualitative delle emissioni degli autoveicoli dipendono dalle modalità di combustione e dal tipo di combustibile. Il combustibile dipende dal tipo di motore utilizzato: ad accensione comandata ( ciclo Otto, alimentato a benzina) oppure ad accensione spontanea ( ciclo Diesel, alimentato a gasolio). I due motori presentano anche condizioni di combustione differenti che mostrano una dipendenza dal regime di funzionamento del motore stesso, dalla sua anzianità e dal suo stato di manutenzione. I principali fattori che intervengono nel definire le emissioni possono essere così raggruppati:

- tipo di motorizzazione,
- regime di funzionamento del motore (velocità, accelerazione, soste a motore acceso, percorrenza a freddo),
- età e manutenzione del veicolo.

Un altro fattore che condiziona le emissioni sono le caratteristiche del combustibile, in particolare l'influenza del contenuto di idrocarburi aromatici della benzina sulle concentrazioni di  $NO_x$  e VOC (Composti Organici Volatili) specialmente in relazione alla possibilità di utilizzo come antidetonanti in sostituzione dei derivati alchilici del piombo. Nei motori ad accensione spontanea le reazioni di combustione si autoinnescano quando la miscela raggiunge le condizioni di temperatura e pressione che ne determinano l'accensione. In questi motori la combustione avviene in fase eterogenea: il combustibile non viene infatti evaporato e miscelato con l'aria prima dell'alimentazione e le reazioni di combustione si innescano in fase liquida. A questa eterogeneità e alle conseguenti maggiori difficoltà nell'adottare condizioni ottimali di combustione, sono imputabili in particolare le emissioni di materiale particolato e di idrocarburi incombusti. Una delle caratteristiche più importanti del motore Diesel è costituita dal suo funzionamento in un intervallo di rapporti aria/combustibili estremamente poveri. La presenza degli ossidi di azoto allo scarico è regolata anche in questi motori dalla temperatura e dalla disponibilità di ossigeno. Gli  $NO_x$  risultano confrontabili, mentre CO e VOC sono decisamente inferiori per i motori Diesel che emettono rilevanti quantitativi di particolato, soprattutto ai carichi più elevati. Le emissioni allo scarico risultano influenzate in maniera molto significativa dal regime di utilizzo del motore, in relazione alle differenti condizioni di combustione che si vengono a creare come conseguenza delle variazioni nella velocità e nell'accelerazione del veicolo. Le emissioni subiscono incrementi medi molto elevati con la partenza a freddo nei motori a benzina per il CO ed i VOC, più contenuti per gli  $NO_x$ ; per questi ultimi, valori analoghi si verificano nei motori Diesel, i quali tuttavia presentano incrementi più contenuti per il CO e i VOC. L'aumento delle emissioni dipende anche dalla temperatura ambiente in relazione al maggior tempo richiesto dal motore per portarsi in condizione di regime "caldo"



con il diminuire della temperatura esterna.

Per carburante si intende qualsiasi sostanza naturale o artificiale capace di bruciare in un motore a combustione interna, con produzione di energia, i carburanti più utilizzati sono la benzina e il gasolio.

La benzina è una complessa miscela di idrocarburi con 4-11 atomi di carbonio caratterizzata da un intervallo di ebollizione compreso tra 30 °C e 260 °C. Nella realtà dei fatti la benzina commerciale presenta una composizione più complessa: per soddisfare i requisiti motoristici le industrie petrolifere devono formulare miscele idonee alle necessità dei moderni motori ad accensione comandata. La benzina si ricava dal petrolio attraverso una serie di operazioni, la prima delle quali è la distillazione frazionata che serve per separare i vari composti alle loro differenti temperature di ebollizione. Una caratteristica specifica della benzina è possedere un numero di ottano ben definito, questo numero risulta un indice della capacità del carburante di resistere alla detonazione all'interno della camera di scoppio.

Il gasolio invece è una miscela di idrocarburi con 9-20 atomi di carbonio, costituita da frazioni di distillazione del petrolio comprese tra 230°C e 360°C. Contiene paraffine a catena lineare ramificata, nafteni, idrocarburi aromatici e tracce di idrocarburi policiclici aromatici.

Il Gpl (Gas Petrolio Liquefatto) è una miscela di gas propano e butano che, in natura, si trova in giacimenti petroliferi e metaniferi. Il Gpl è un combustibile a basso costo e può essere impiegato su tutti gli automezzi a benzina, con alcune piccole modifiche impiantistiche; è infatti necessario dotare il veicolo di bombole per il suo stoccaggio e di un apposito apparato di carburazione. È uno dei combustibili meno inquinanti in quanto brucia lasciando pochissimi residui carboniosi. Emette quantità trascurabili o nulle di piombo,  $SO_2$ , aldeidi e particelle, e abbassa, rispetto alla benzina senza piombo in assenza di dispositivo catalitico, le emissioni di HC del 40 % e quelle di CO del 20-30%. Gli aspetti negativi consistono in una riduzione del 10% della potenza del motore ed in un leggero incremento dei consumi[12].

Una significativa riduzione delle emissioni inquinanti può essere ottenuta ricorrendo all'uso di benzine ossigenate, che differiscono da quelle tradizionali in quanto alcuni dei composti aromatici sono sostituiti da composti ossigenati, i quali contengono l'ossigeno in una catena di atomi di carbonio e idrogeno. Generalmente, fra i composti ossigenati, vengono preferiti gli eteri a causa della loro bassa pressione di vapore e delle caratteristiche superiori di miscelazione. Le benzine ossigenate contengono anche piccole quantità di composti aromatici e di ossigeno derivati dall'etanolo o dal metanolo che permettono agli idrocarburi del combustibile di bruciare più efficientemente anche a basse temperature; conseguentemente sono convertite in minori quantità di CO in  $CO_2$  e vengono prodotte minori quantità di idrocarburi, mentre le emissioni di ossidi di azoto restano inalterate.

I biocombustibili hanno ricevuto una crescente attenzione negli ultimi anni in quanto possibili sostituti di benzina, di diesel, o di altre miscele di combustibili convenzionali [3]. Esistono veicoli alimentati da alcool (ad esempio etanolo o metanolo), oppure da miscele di petrolio ed alcool (quest'ultime presentano il 20%).

L'*etanolo*, è considerato l'alcool meno critico nell'impiego per l'autotrazione, perché poco sensibile ai problemi del tenore di umidità e in quanto esistono esempi di impiego commerciale, senza la necessità di incrementi particolarmente gravi. L'*etanolo* utilizzato come combustibile è allo stato puro, riduce, rispetto alla benzina, dal 20-30% le emissioni di CO, del 5-10% quelle di  $NO_2$  e produce quantitativi rilevanti di aldeidi. Per poter funzionare con l'alimentazione ad etanolo, i veicoli necessitano di modifiche impiantistiche. Il costo di produzione dell'*etanolo* è circa il doppio di quello per la produzione del petrolio.

Il *metanolo* può essere prodotto dal legno, dal carbone o dal gas naturale. I veicoli alimentati a metanolo emettono piccole quantità di composti, principalmente metanolo incombusto e formaldeide. Il metanolo incombusto è molto meno attivo fotochimicamente dei composti organici emessi dai veicoli a benzina; d'altra parte la formaldeide prodotta è invece molto reattiva e potenziale causa di alti livelli di ozono (oltre ad essere un composto cancerogeno). Esistono diversi problemi nell'applicazione dell'ipotesi di sostituire la benzina con il metanolo. Anzitutto a parità di volume rispetto alla benzina, il metanolo produce solo la metà di energia, e quindi per poter avere la stessa autonomia di guida, il serbatoio di un veicolo a metanolo dovrebbe avere una capacità doppia rispetto ai serbatoi in commercio. Inoltre il metanolo è altamente corrosivo, quindi le attuali stazioni di rifornimento necessiterebbero di nuovi serbatoi di immagazzinamento, i veicoli di serbatoi inossidabili e materiali resistenti alla corrosione, e potrebbero insorgere problemi relativamente all'uso di pompe self-service. Infine il metanolo, avendo una volatilità piuttosto bassa alle basse temperature, potrebbe fare insorgere difficoltà di avviamento a freddo, specie durante l'inverno. Per superare questo problema si usano solitamente miscele dette "M85", in cui è presente l'85% di metanolo e il 15% di benzina. Il metanolo presenta anche problemi di miscibilità quando il contenuto di acqua nell'alcol supera qualche centinaia di ppm. Per questo motivo, dato che nei serbatoi di stoccaggio dell'alcol e nelle benzine sono sempre presenti piccole quantità di acqua, si rendono indispensabili aggiunte di composti solubilizzanti. Le benzine ad alto contenuto di idrocarburi aromatici tollerano invece presenze di acqua superiori. L'uso di metanolo nelle benzine, fino a valori massimi del 20%, richiede l'adeguamento della carburazione delle vetture; sotto tale modifica si ottengono netti miglioramenti dei rendimenti energetici e delle caratteristiche delle emissioni (riduzione dei contenuti di CO, HC, benzene). Il costo di produzione del metanolo è paragonabile a quello della benzina, ma, nel caso in cui si ipotizzasse l'impiego diffuso del metanolo, il costo di riconversione delle stazioni di rifornimento

e di componenti dei veicoli necessiterebbe del supporto finanziario governativo.

Il *biodiesel* è un estere metilico di oli vegetali (soia, grano, semi di cotone, arachide, girasole), che può essere impiegato come combustibile alternativo al gasolio tradizionale sia per il trasporto, sia per il riscaldamento (U.S. Department of Energy, 1997). Esso può essere commercializzato sia allo stato puro, sia miscelato con il gasolio. Il surplus sviluppatosi sui terreni coltivati in Europa, ha aumentato gli interessi negli agricoltori nei confronti della coltivazione di raccolti finalizzati anche alla produzione di combustibili. Quindi, molti paesi europei hanno cominciato a produrre piante da cui ottenere biodiesel. Per utilizzare questo combustibile alternativo non è necessario effettuare modifiche al motore e le emissioni di  $SO_2$ ,  $CO$ ,  $NO_2$ , e  $CO_2$  vengono ridotte del 2-5% rispetto alle emissioni del diesel tradizionale. Esperimenti con autobus alimentati con biodiesel (ad esempio a Reading, in Inghilterra, nel 1993) hanno evidenziato come esso sia generalmente più costoso del diesel, ma meno inquinante; per rendere competitive tale combustibile, sarebbero necessari sussidi da parte del governo. Allo stato attuale esistono in Austria più di 100 stazioni di rifornimento che vendono biodiesel allo stesso prezzo del gasolio. In Italia è in via di sperimentazione biodiesel "diluito" in normale gasolio, una nuova miscela di combustibile (costituita all'80% da normale gasolio e da biodiesel per il restante 20%), che ha alimentato i mezzi di trasporto pubblico di varie città, fra cui Vercelli, Cremona, Roma, Firenze, Genova, Bergamo e Bologna. Il biodiesel trova consensi, oltre che nel trasporto pubblico, anche nel riscaldamento, soppiantando gli oli combustibili. Grazie a questo combustibile si ha una riduzione del 50% del particolato e una altrettanto consistente riduzione degli ossidi di carbonio. I vantaggi sono inoltre evidenti se si considera che il biodiesel non contiene né zolfo, né composti aromatici, né benzene.

Il metano è presente in natura allo stato gassoso e il suo impiego come carburante presenta una serie di vantaggi: facilita la reazione di combustione grazie alla migliore miscelazione tra gas e aria rispetto ai carburanti liquidi; rende superflua l'aggiunta di additivi in quanto ha un elevato numero di ottano e un elevato potere calorifico; contribuisce al mantenimento del buono stato del motore ed alla pulizia degli oli di lubrificazione grazie alla combustione più pulita dovuta al basso contenuto di composti estranei, soprattutto per quanto riguarda sostanze catramose e minerali non combustibili [12]; ha un costo decisamente inferiore rispetto alla benzina; può essere considerato un combustibile sicuro, in quanto non presenta rischi di esplosioni o di incendi. Inoltre, il gas naturale compresso (CNG), non producendo "scorie", ha un favorevole impatto sulla durata dei motori e sulla pulizia degli oli di lubrificazione. Il  $CO$  è ridotto del 50-90%, gli idrocarburi reattivi del 50-80%, e non sono emesse particelle particolate, né benzene, né  $SO_2$ . Le emissioni di  $NO_x$  restano inalterate, oppure possono aumentare [3]. Le emissioni di metano incombusto non costituiscono un grosso problema dal punto di vista sanitario essendo scarsamente

reattive e poco tossiche, ma possono rappresentare un problema ambientale in quanto il metano appartiene al gruppo dei gas serra. Punti critici della vettura sono il fatto che essa necessita di un apposito apparato di carburazione, crea disagi agli utenti per lo scarso numero di pompe distributrici e ha un'autonomia limitata: il gas va immagazzinato in bombole che hanno una densità energetica pari a un quarto dei serbatoi di benzina (bombole con un volume di 100 litri equivalgono a un serbatoio di benzina da 25 litri). Conseguentemente il metano è destinato ad un impiego prevalentemente cittadino [2] ed è maggiormente indicato su autobus e camion, piuttosto che su automobili: affinché i veicoli possano avere una certa autonomia è necessario che dispongano di serbatoi di grandi dimensioni, installabili più facilmente su mezzi pesanti.

Altri studi sono stati e sono tuttora rivolti alla messa a punto di tecnologie di contenimento delle emissioni in atmosfera, le cui linee guida riguardano principalmente la circolazione dei gas di scarico, la progettazione di trappole per l'abbattimento del particolato nei motori diesel, l'uso di marmitte catalitiche e l'uso di miscele magre nella carburazione. Nel seguito si elencano e si descrivono alcune tra le principali tecnologie per il controllo delle emissioni.

L'introduzione dei dispositivi catalitici ha reso necessario formulare una benzina priva di piombo dal momento che questo metallo avvelena il catalizzatore. I composti piombo-alchili che hanno garantito il potere anti-detonante della benzina super, sono stati sostituiti, nella benzina senza Pb, da livelli più elevati di benzene e di altri idrocarburi aromatici (toluene, o-m-p-xilene, etilbenzene, ecc.). Il benzene ha un altissimo numero ottanico ed è in grado di migliorare quello della benzina anche se miscelato in piccola quantità. Nella benzina senza piombo, introdotta in tutta Europa nel periodo 1986-88, la concentrazione di Pb non doveva superare 0,013 g Pb/l (contro gli attuali 0,15 g Pb/l della super). Di conseguenza, i livelli di benzene sono aumentati fino a sfiorare il 5% in peso e quelli degli idrocarburi aromatici totali il 60% [12]. Se da un lato dunque si è cercato di risolvere il problema della nocività del piombo, ci si è ritrovati ad affrontare il pericolo posto da una sostanza addirittura cancerogena, quale si è dimostrata essere il benzene. La Comunità Europea ha limitato la percentuale di benzene al 5% in Italia il contenuto di benzene nelle benzine verdi è stato via via ridotto dal 2% in volume del 1993 fino a valori sotto l'1% negli anni più recenti. Il dispositivo catalitico consente notevoli riduzioni delle emissioni di tutti gli inquinanti e, più precisamente, riduce del 60-80% le emissioni di CO, del 30-80% quelle di NO<sub>2</sub>, del 90% quelle di benzene, dell'80-95% quelle di Ipa e del 90% quelle di for- maldeide [6]. Va ricordato che il perfetto funzionamento delle marmitte catalitiche trivalenti è vincolato a limiti tecnici: la temperatura di funzionamento deve essere compresa nell'intervallo 300-850 °C, e non sono accettate sostanze come piombo o zolfo che danneggiano il catalizzatore, l'efficienza di conversione diminuisce molto rapidamente al di

fuori di un ristretto intervallo di valori del rapporto aria/combustibile. Facendo riferimento al limite tecnico relativo alla temperatura, è opportuno evidenziare che nell'intervallo di tempo necessario al raggiungimento della temperatura di funzionamento, le emissioni di inquinanti sono incontrollate. Per tale ragione l'utilizzo di vetture catalizzate per brevi tragitti, quali quelli di tipo urbano, non fornisce risultati ottimali dal punto di vista dell'abbattimento degli inquinanti.

La propulsione veicolare elettrica risale ai primi anni dell'automobile; tuttavia, intorno al 1920 i veicoli elettrici hanno perso la competizione con i veicoli alimentati con i motori ciclo Otto e ciclo Diesel, a causa delle prestazioni inferiori (relativamente alla velocità, all'accelerazione, ecc.), della breve vita della batteria e della necessità di frequente ricarica. Le batterie odierne hanno permesso in parte di superare queste di limitazioni (prestazioni e durata), con la conseguenza che i veicoli alimentati elettricamente possono soddisfare il mercato dove la distanza massima giornaliera non ecceda 200 km dove sia possibile la ricarica. Un aspetto positivo del veicolo elettrico è la sua silenziosità di funzionamento che viene ottenuta senza l'aggiunta di materiali fonoassorbenti, come avviene invece nelle vetture a scoppio. Le uniche emissioni del veicolo elettrico sono di particolato, prodotto a causa del consumo dei pneumatici, dei cuscinetti frenanti e della frizione. I principali limiti di questo veicolo sono :

- bassa energia immagazzinabile per ogni chilogrammo di batteria;
- bassa autonomia e limitate prestazioni;
- batterie disposte in serie che occupano un significativo spazio nel veicolo e rappresentano circa 1/3 del peso del veicolo stesso;
- costo elevato;
- l'esigenza di avere un'infrastruttura per la ricarica delle batterie con "colonnine" nel maggior numero possibile di aree di stazionamento.

Per poter combinare i benefici dei veicoli elettrici e di quelli a motore a scoppio sono stati concepiti i veicoli a doppia motorizzazione ovvero i veicoli ibridi o bimodali. In questo tipo di veicoli il motore a scoppio è sempre funzionante e agisce anche da motogeneratore per mantenere carica la batteria, mentre la motorizzazione elettrica fornisce le punte di potenza richieste in accelerazione e su pendenza. La motorizzazione convenzionale viene usata solo per i lunghi tragitti extraurbani mentre per i tragitti urbani può essere utilizzata solo la trazione elettrica. I due motori però comportano un peso maggiore e problemi di ingombro e costo, il peso determina pertanto un aumento notevole dei consumi di benzina.

Le possibilità di riduzione delle emissioni urbane sono notevoli, articolabili su più livelli e possono coinvolgere diversi attori.

L'adozione dei limiti di velocità consentirebbe di ottenere riduzione di consumi e di conseguenza di emissioni a costo nullo. Un modo per far rispettare i limiti di velocità, che si inserisce nell'approccio di *traffic calming*, consiste nel apportare cambiamenti fisici alle strade come introdurre curve, dossi, pavimentazioni e superfici stradali particolari, cavalcavia, rotonde, incroci e parcheggi riservati ai residenti.

I divieti di traffico possono essere utilizzati per diminuire il volume di traffico in generale, o relativo a specifici tipi di veicoli, su determinate strade o in aree a rischio di inquinamento atmosferico. I divieti di circolazione, possono essere imposti solo ad alcuni veicoli (pesanti, leggeri non catalizzati, ecc.) o solo per alcune ore del giorno (le ore di punta), allo scopo di migliorare la qualità dell'aria ed incoraggiare l'uso di veicoli più puliti. Un espediente per migliorare la qualità dell'aria nelle aree residenziali consiste nello scoraggiare gli automobilisti pendolari ad entrare in queste aree, convogliando il traffico in altre aree meno sensibili; occorre tuttavia che i mezzi pubblici che percorreranno queste zone siano efficienti, con brevi tempi di percorrenza e bassi costi di manutenzione. Questo approccio risulta efficiente in virtù del fatto che se è vero che le zone a 30 km/h risultano essere una politica per la sicurezza degli utenti della strada più vulnerabili (pedoni e ciclisti) bisogna però tenere conto del fatto che un veicolo a 30 km/h inquina maggiormente di un veicolo con una velocità maggiore. Liberare alcune zone delle città dal passaggio di veicoli risulta quindi la soluzione migliore per preservare la qualità dell'aria e la salute delle persone.

Le circonvallazioni sono una soluzione che da tempo ha mostrato la sua efficacia in città congestionate da traffico. Per mezzo di queste strade è possibile impedire ai veicoli pesanti di attraversare il centro della città oltre alla necessità di coinvolgerli nel traffico pesante, il tutto rendendo il traffico più fluido e scorrevole. D'altra parte molte città, da quando sono state costruite queste vie di collegamento tangenziali, si sono allargate, così che le circonvallazioni ora si trovano spesso adiacenti ad aree suburbane residenziali e possono costituire nuovi seri rischi alla qualità dell'aria locale, a causa del grande volume di traffico che le caratterizza.

Un ulteriore possibile provvedimento è quello dell'obbligo di spegnimento del motore per veicoli in sosta, un veicolo che staziona lasciato a motore acceso infatti produce alti livelli di HC e CO dal momento che il motore non sta lavorando in condizioni di efficienza situazione tipica dei veicoli fermi ai semafori o bloccati in coda in un ingorgo. Le emissioni di questo tipo derivano anche dagli autobus in sosta alle fermate, dai taxi che attendono i clienti e tutti gli scenari simili.

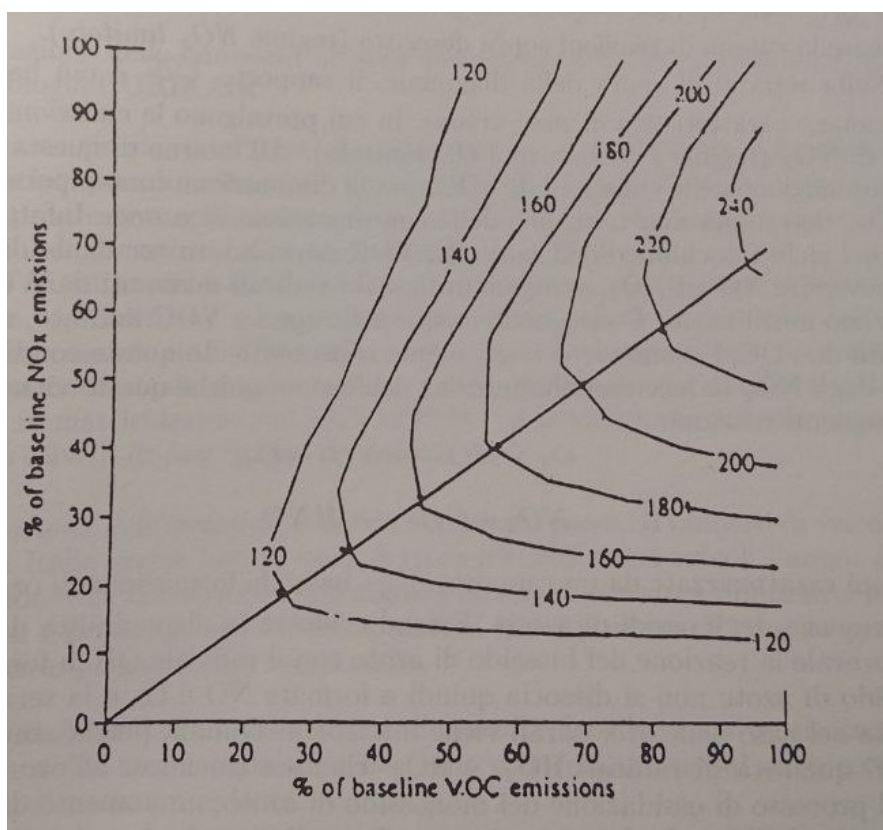
In ambito urbano il sistema di trasporti pubblici produce meno inquinamento per persona trasportata rispetto alle macchine private che molto spesso trasportano solo un passeggero. Per incrementare l'efficienza del trasporto pubblico, permettendo agli autobus di spostarsi più liberamente, potrebbe essere utile individuare strade percorribili solo dai mezzi pubblici. Si può anche dare la priorità agli autobus ai

semafori, fornendoli di un dispositivo elettronico che ritarda il rosso finché l'autobus non è passato, o un segnale che dice che l'autobus ha superato l'incrocio e i tempi del semaforo tornano al ciclo originale. Alcuni studi suggeriscono che questa misura può diminuire i ritardi degli autobus del 10% senza aumentare in modo significativo i ritardi degli altri veicoli; tuttavia, quando le strade sono molto trafficate, dare questo tipo di precedenza ai mezzi pubblici, può causare ritardi anche rilevanti ai mezzi privati [3]. L'implementazione di misure di gestione del traffico atte a scoraggiare l'uso di veicoli privati, deve essere accompagnata da misure che rendano i trasporti pubblici economici, confortevoli, sicuri ed efficienti (minori tempo d'attesa, affidabilità, densità della rete di percorsi). All'efficienza possono contribuire anche tariffe integrate (tessere) intercambiabili tra i diversi mezzi pubblici (metropolitana, autobus, tram, ecc.), che rendano il sistema dei trasporti pubblici conveniente dal punto di vista economico. L'interesse nell'incrementare l'offerta e l'efficienza del trasporto pubblico ha come obiettivo quello di riuscire a spostare parte del traffico sui mezzi pubblici per ridurre le emissioni. Rimane centrale il fatto che la proposta del mezzo pubblica viene utilizzata nel momento in cui risulti vantaggiosa a livello economico e di tempo rispetto all'uso dell'auto privata. In questa ottica negli ultimi anni si è potuto vedere in tutte le città uno sviluppo delle ciclabili. Una percentuale non irrilevante degli spostamenti in auto riguarda tratti molto ridotti che posso essere percorsi sia a piedi oppure in bici con il grande vantaggio di non dover dedicare del tempo per trovare il posteggio per il veicolo. La bicicletta è un mezzo economico, rapido, salutare che non comporta problemi di parcheggio, si pensi all'importanza che ha rivestito durante la rivoluzione industriale. La bicicletta era per eccellenza il mezzo utilizzato da tutti gli operai per rendersi in fabbrica al lavoro. Le attenzioni nei confronti dei ciclisti sono sempre maggiori nelle città basti pensare alle case avanzate ai semafori e agli incroci, ai parcheggi custoditi in prossimità delle stazioni ferroviarie oppure ai servizi di bike sharing. Per la morfologia dell'Italia chiaramente non in tutte le città possono essere rese "bike-friendly" specialmente le città che si sviluppano in verticale e presentano dei dislivelli importanti.

### **Caratterizzazione fotochimica di un'area**

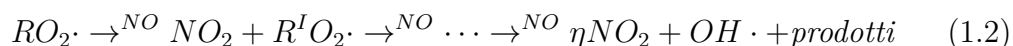
In un contesto atmosferico chimicamente reattivo una stessa strategia di controllo delle emissioni può avere effetti positivi o negativi in base al contesto in cui viene attuata. Prima di applicare un qualsiasi intervento finalizzato al contenimento degli episodi di smog fotochimico è bene valutarne l'impatto. Gli effetti del controllo delle emissioni sulla formazione di ozono possono essere rappresentati concettualmente da un diagramma a isolinee dall'esame del quale risulta chiaro che le concentrazioni di ozono, in seguito al controllo dei suoi precursori, possono variare in direzioni opposte a seconda delle caratteristiche fotochimiche del dominio.

Nella figura l'asse delle ascisse rappresenta la percentuale residua di VOC emessi a fronte della riduzione delle emissioni antropogeniche di tali composti, mentre l'asse



**Figura 1.1:** Diagramma delle isoline di ozono.

delle ordinate rappresenta la percentuale in termini di  $NO_x$  risultante dal controllo delle rispettive emissioni. Nel piano sono riportate le linee a concentrazione di ozono costante. L'area al di sotto della linea diagonale rappresenta punti con un rapporto  $\frac{VOC}{NO_x}$  relativamente alto, tipico delle aree rurali, caratterizzate da emissioni di VOC di origine biogenica e da scarse emissioni antropogeniche di  $NO_x$  (regime fotochimico  $NO_x$  limitato): la formazione di ozono in questa area risulta limitata dalla disponibilità di  $NO_x$ . All'interno di questo dominio si può infatti ottenere una riduzione delle concentrazioni di ozono, diminuendo entrambe le emissioni di  $NO_x$  e VOC o diminuendo anche solo le emissioni di  $NO_x$ . La catena di reazioni che si innesca in ambito rurale può essere così riassunta:



dove  $\eta$  è il numero delle molecole di NO ossidate a  $NO_2$  per ogni molecola di VOC consumata nella prima reazione. In presenza di elevate concentrazioni di



VOC quindi, a partire da radicali organici, vengono formate  $\eta$  molecole di  $NO_2$ , favorendo l'accumulo di ozono che non viene utilizzato per convertire  $NO$  a  $NO_2$ . Se il rapporto  $\frac{VOC}{NO_x}$  è elevato, gli ossidi di azoto risultano allora limitanti perché servono ad innescare la catena di reazioni sopra descritta. Nella zona al di sopra della diagonale, il rapporto  $\frac{VOC}{NO_x}$  è più basso: questa situazione è caratteristica di aree urbane, in cui prevalgono le emissioni antropogeniche di  $NO_x$  (regime fotochimico VOC limitato). All'interno di questa zona, sia la sola diminuzione delle emissioni di VOC, sia dalla diminuzione contemporanea di VOC e  $NO_x$ , determina una riduzione delle concentrazioni di ozono. Infatti, l'introduzione nel ciclo fotochimico dell'azoto dei VOC porta ad un accumulo di  $O_3$ , poiché per convertire  $NO$  a  $NO_2$ , vengono utilizzati i radicali derivanti dai VOC, lasciando l'ozono inutilizzato. Conseguentemente nella zona di VOC limitato, riducendo la quantità di VOC, l'ozono viene nuovamente consumato. In queste condizioni un aumento degli  $NO_x$  induce una diminuzione dell'ozono, poiché questo viene consumato dalle seguenti reazioni:



In regioni caratterizzate da un rapporto  $\frac{VOC}{NO_x}$  basso la formazione di ozono è inibita dalla presenza degli ossidi di azoto. Essendo ridotta la disponibilità di radicali organici prevale la reazione del biossido di azoto con il radicale  $OH\cdot$  a formare  $HNO_3$ . Il biossido di azoto non si dissocia quindi a formare  $NO$  e  $O_3$  e la serie di reazioni illustrata nel caso delle aree rurali viene interrotta. Dal momento che sono disponibili maggiori quantità di radicali  $HO_2\cdot$  e  $RO_2\cdot$  che, sostituendosi all'ozono, prendono parte al processo di ossidazione del monossido di azoto, un aumento di VOC causa un aumento di  $O_3$ .

Exhaust e non exhaust

## 1.2 Condizioni meteorologiche critiche tipiche delle zone alpine

La porzione di atmosfera di interesse è lo strato limite planetario (Planetary Boundary Layer, PBL in letteratura) che corrisponde alla parte di atmosfera i cui moti sono influenzati dalla presenza della superficie terrestre oltre che dal gradiente orizzontale di pressione e dalla forza di Coriolis. In questa porzione di atmosfera la struttura del campo di moto del fluido atmosferico presenta una notevole variabilità spatio-temporale e risulta molto complesso descriverla in termini quantitativi. Si procede quindi con una schematizzazione del moto del fluido attraverso una componente di trasporto che tiene conto delle caratteristiche medie del campo di

moto ed un termine di dispersione turbolenta che tiene conto delle oscillazioni attorno al valore medio. L'effetto di trasporto influenza principalmente i moti orizzontali e viene quantificato attraverso la conoscenza della struttura del campo di vento medio. La dispersione turbolenta invece influenza prevalentemente le caratteristiche dei moti verticali del fluido atmosferico ed è generata dal riscaldamento della superfici terrestre (turbolenza di tipo convettivo) e dalla presenza di rugosità e di rilievi (turbolenza meccanica). Il contributo del trasporto viene stimato ricostruendo il campo di vento, mentre la turbolenza viene descritta attraverso dei coefficienti di dispersione lungo le tre direzioni.

L'energia radiante proveniente dal sole interagisce in diversi modi con l'atmosfera e la superficie terrestre. Uno dei termini più rappresentativi ai fini della descrizione delle caratteristiche dei moti atmosferici ed in particolare della turbolenza di origine convettiva è costituito dal flusso del calore sensibile ( $Q_h$ ) ovvero la quantità di calore che la superficie cede all'atmosfera attraverso un processo di convezione. Tale energia è in grado di riscaldare l'aria dando luogo a moti ascendenti e discendenti il cui effetto è rendere più efficiente il rimescolamento dell'atmosfera lungo la verticale. Il flusso di calore sensibile è generalmente positivo durante le ore diurne e negativo di notte perché la superficie si raffredda cedendo energia sotto forma radiante. In questo caso si nota un raffreddamento degli strati bassi dell'atmosfera e un conseguente effetto di smorzamento della turbolenza. Il flusso di calore sensibile è definito dalla seguente formula:

$$Q_h = -\rho c_p u_* \theta_* \quad (1.5)$$

dove  $\rho$  rappresenta la densità dell'aria,  $c_p$  il calore specifico a P costante,  $u_*$  la velocità di attrito e  $\theta_*$  la temperatura di scala. Il calore sensibile può essere ricavato direttamente dalla sua definizione determinando  $u_*$  e  $\theta_*$  attraverso la teoria della similarità. Un altro modo per ottenere  $Q_h$  è sfruttando l'equazione di bilancio energetico (metodo del bilancio) che definisce la radiazione netta come segue:

$$R_n = Q_h + Q_l + Q_g \quad (1.6)$$

dove  $R_n$  rappresenta la radiazione netta,  $Q_l$  il flusso di calore latente e  $Q_g$  il flusso di calore verso il terreno.

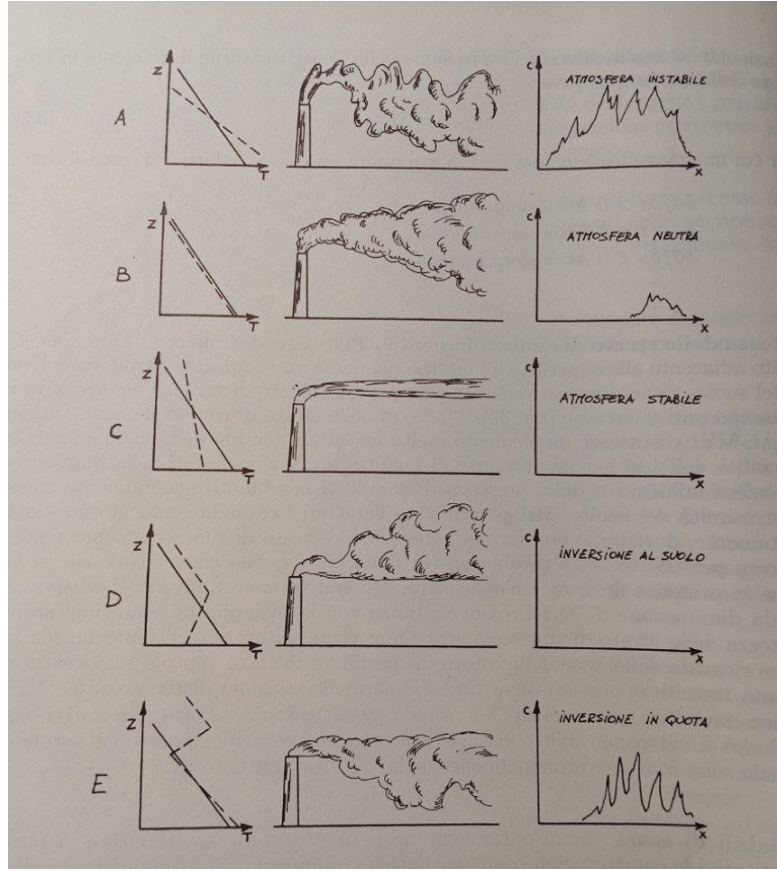
Un fattore che fornisce indicazioni sulla capacità dispersiva dell'atmosfera, particolarmente lungo la componente verticale è il profilo verticale di temperatura. In atmosfera, una particella elementare d'aria si muove verticalmente in modo adiabatico. Il suo gradiente di temperatura è:

$$\gamma = -\frac{\delta T}{\delta z} = g/C_p \simeq 0.0098 \quad (1.7)$$

dove  $T$  rappresenta la temperatura,  $z$  l'altezza dal suolo a cui si trova la particella,  $g$  l'accelerazione gravitazionale e  $C_p$  il calore specifico per unità di massa dell'aria a

pressione costante. Le caratteristiche del moto della particella verranno influenzate dalla struttura verticale del profilo di temperatura dell'atmosfera. Le situazioni che si possono realizzare sono le seguenti: atmosfera instabile, atmosfera stabile, atmosfera neutra e inversione termica. L'atmosfera instabile è quella situazione in cui il gradiente termico dell'atmosfera è minore di quello adiabatico ed è determinata dai moti convettivi innescati dal riscaldamento del terreno nel periodo diurno. Ogni eventuale moto iniziale di particelle d'aria verrà amplificato sia verso l'alto sia verso il basso: infatti a seguito di un moto casuale verso l'alto dovuto ad un'espansione adiabatica la particella viene a trovarsi ad una temperatura maggiore dell'aria a quella quota, mentre con un moto casuale verso il basso si trova ad una temperatura inferiore. In tal caso il rimescolamento dell'aria è favorito e pertanto gli inquinanti eventualmente presenti in atmosfera vengono dispersi in volumi d'aria molto grandi. Questo scenario è generalmente accompagnato da venti di debole intensità il che implica che gli inquinanti tendono a disperdersi ma molto vicino alla sorgente. Le condizioni instabili possono essere particolarmente critiche per grosse emissioni in quota (come dai camini industriali), perché la forte diluizione verticale accompagnata dalla scarsa dispersione orizzontale può portare alte concentrazioni al suolo nei pressi della sorgente. La situazione di atmosfera neutra si realizza quando il gradiente termico è quello adiabatico e determina una situazione di equilibrio indifferente per tutti gli spostamenti della particella; la dispersione verticale di inquinanti è quindi sostanzialmente determinata dalla turbolenza meccanica presente in atmosfera. La situazione di atmosfera stabile invece si realizza nel momento in cui il gradiente termico dell'atmosfera è maggiore di quello adiabatico e in tal caso i moti verticali della particella verranno smorzati e pertanto la dispersione verticale degli inquinanti sarà molto bassa. L'inversione termica è la situazione in cui la temperatura aumenta con la quota e viene generata dal raffreddamento notturno della terra che cede calore all'atmosfera per irraggiamento. L'altezza di questo strato è generalmente limitato a 100-200 m. La dispersione di inquinanti in prossimità del suolo è inibita dalla forte stabilità verticale, mentre quelli emessi al di sopra dello strato di inversione, diffondono in quota. In particolari condizioni quali nebbia, subsidenza si può presentare anche il caso di inversione in quota e in tal caso la disomogeneità termica rappresenta una barriera per la diffusione verso l'alto degli inquinanti emessi al di sotto di questo strato. Le condizioni di stabilità atmosferica, quella di inversione in particolare, possono risultare molto critiche in presenza di significative emissioni al suolo (come le emissioni da traffico oppure dal riscaldamento nei grossi centri urbani), perché l'assenza di dispersione verticale favorisce l'accumulo degli inquinanti in prossimità del suolo, con conseguente aumento delle concentrazioni rilevate.

Spesso è comodo usare, al posto della temperatura  $T$ , la temperatura potenziale  $\theta$  che rappresenta la temperatura assunta dalla particella d'aria qualora venga



**Figura 1.2:** Rappresentazioni dei possibili scenari per l'atmosfera in base alle condizioni meteorologiche.

portata adiabaticamente ad una pressione di riferimento di 1000 hPa, definita da:

$$\theta = T \left( \frac{1000}{p} \right)^{\frac{(k-1)}{k}} \quad (1.8)$$

dove  $T$  è la temperatura reale della particella d'aria,  $p$  è la pressione reale della particella d'aria,  $k = \frac{C_p}{C_v}$  con  $C_p$  calore specifico della massa elementare di aria a pressione costante e  $C_v$  quello a volume costante. Manipolando analiticamente l'espressione della  $\theta$  per ricavarne il gradiente in funzione della quota, si ottiene:

$$\frac{\delta\theta}{\delta z} = \frac{\delta T}{\delta z} + \gamma \quad (1.9)$$

In questa maniera si può procedere con una classificazione del tipo di atmosfera in base al segno del rapporto  $\frac{\delta\theta}{\delta z}$ : se positivo allora l'atmosfera si dirà stabile, se

negativo l'atmosfera sarà instabile e se invece è pari a zero allora l'atmosfera sarà neutra.

Un'altra grandezza di interesse in questo ambito è rappresentata dall'altezza dello strato di rimescolamento ovvero l'altezza dello strato adiacente alla superficie all'interno del quale un composto, introdotto a livello del suolo, viene disperso verticalmente per turbolenza meccanica o convettiva in un tempo pari a circa un'ora. L'altezza dello strato di rimescolamento costituisce un elemento molto importante ai fini della valutazione della qualità dell'aria perché permette di quantificare le dimensioni della porzione di atmosfera influenzata dalla presenza di composti inquinanti, generalmente emessi in prossimità del suolo. Questa altezza segue un caratteristico andamento giorno-notte, solitamente durante le ore diurne l'altezza dello strato di rimescolamento tende a crescere per effetto della turbolenza (in particolare quella convettiva) che si sviluppa in presenza di radiazione solare. Dopo il tramonto, invece, si nota una rapida diminuzione di questa altezza in concomitanza con lo sviluppo di condizioni stabili.

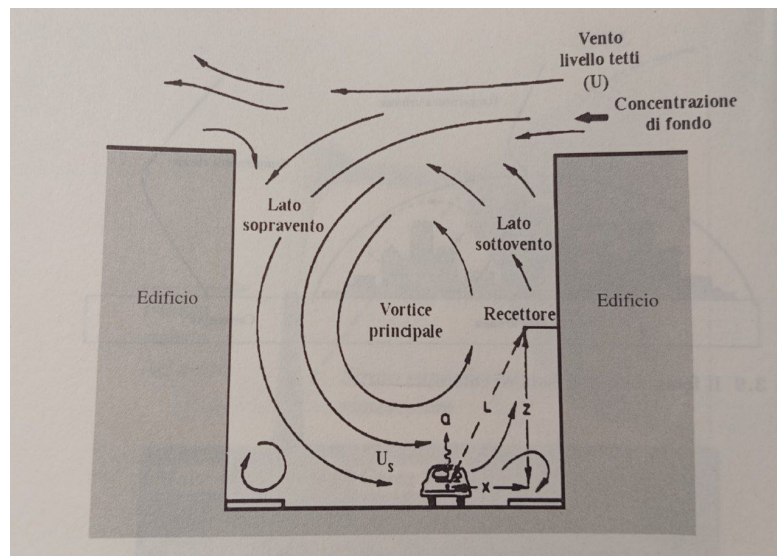
Si elencano ora alcune variabili di scala che sono dei parametri che permettono di caratterizzare in termini quantitativi le caratteristiche della turbolenza all'interno del *Mixing Layer* nelle diverse condizioni di dispersione. Ricordiamo ad esempio la velocità di frizione  $u_*$ , la velocità di scala convettiva  $w_*$  e la lunghezza di Monin-Obukhov  $L$  definita come il rapporto fra la turbolenza di origine meccanica e quella di origine convettiva:

$$L = \frac{-u_*^3 T \rho_a C_p}{K g Q_h} \quad (1.10)$$

dove  $K$  è la costante di Von Karmann ( $\approx 0.4$ ).  $H_0$  che è pari a  $\frac{u_*^3 T \rho_a C_p}{K g Q_h}$  determina il segno di  $L$  ed è positivo generalmente di giorno ( $L < 0$ ), quando la terra riceve calore per irraggiamento che cede, in parte, all'atmosfera per convezione; è nullo in assenza di flussi termici ( $L \pm \infty$ ) ed è negativo ( $L > 0$ ) solitamente di notte quando la terra, cedendo calore per irraggiamento, diminuisce la sua temperatura raffreddando anche gli altri strati atmosferici prossimi al suolo e pertanto si ha cessione di calore dall'atmosfera alla terra.

L'esistenza di complessità e disomogeneità del terreno può indurre lo sviluppo di dinamiche di carattere generalmente locale o, al più di mesoscala, che possono sovrapporsi, spesso diventando predominanti, alla struttura generale della circolazione. Inoltre, con frequenza, queste situazioni influenzano in modo significativo la dispersione degli inquinanti e quindi richiedono una modellazione specifica per poter essere studiati in maniera opportuna. Per il seguente elaborato è utile definire il concetto di canyon urbano che verrà ampiamente citato e utilizzato. Per canyon stradale si intende una strada relativamente stretta, chiusa da edifici che sono disposti su entrambi i lati in modo continuo. La presenza di strade circondate

da alti edifici può indurre modificazioni nella struttura della circolazione, in particolare, quando il vento spira trasversalmente rispetto all'asse della strada, la cavità generata dagli edifici favorisce lo sviluppo di una circolazione elicoidale. Questa situazione può portare all'accumulo di forti concentrazioni di inquinanti in corrispondenza di punti ricettori nei pressi degli edifici posti lungo il lato sopravvento. La presenza del canyon induce lo sviluppo di un flusso di ritorno attraverso la strada, in prossimità del suolo, che veicola nei punti ricettore una componente emissiva entrante dall'esterno, sopravvento alla strada e proveniente da sorgenti distanti che va a sommarsi a quella dipendente dalle emissioni generate all'interno della strada con conseguente accumulo.



**Figura 1.3:** Rappresentazione di un Canyon urbano.

## 1.3 Modelli di dispersione degli inquinanti in atmosfera

Il punto di partenza per la gestione della qualità dell'aria consiste nel quantificare il problema dell'inquinamento atmosferico e ciò si realizza per mezzo delle reti di monitoraggio che però non sono sufficienti a fornire una fotografia, anche se approssimata, della distribuzione spazio-temporale della concentrazione dei vari inquinanti di interesse. Risulta pertanto necessario introdurre e utilizzare modelli matematici di simulazione della dispersione degli inquinanti in atmosfera. Un modello di questo genere è uno strumento matematico-informatico che cerca di

ricostruire il più fedelmente possibile lo stato della concentrazione dei vari inquinanti in un dominio di calcolo spazio-temporale di interesse.

Una sostanza (inquinante o meno), una volta immessa nell'atmosfera, per effetto dei numerosi fenomeni quali il trasporto dovuto all'azione del vento, la dispersione per effetto dei moti turbolenti dei bassi strati dell'atmosfera, la deposizione ecc., si distribuisce nell'ambiente circostante, diluendosi in un volume di aria di dimensioni più o meno grandi in funzione delle particolari condizioni atmosferiche presenti. L'obiettivo del modello è la previsione dell'evoluzione nel tempo del campo di concentrazione  $C(x,y,z;t)$  della sostanza in esame. Si noti inoltre che durante il trasporto della sostanza in atmosfera si hanno fenomeni specifici: fisici (trasporto, diffusione, innalzamento pennacchio), chimico-fisici (reazioni chimiche di trasformazione) e chimico-atomici (deposizione).

In base all'approccio analitico scelto si ha una prima e netta divisione: modelli statistici e modelli deterministici. I primi non prevedono la concentrazione di inquinanti sulla base di relazioni fisiche di causa-effetto, ma sulla base dei dati misurati dalla rete nel passato. Essi sono in grado di fornire il valore futuro della concentrazione di inquinante nei soli punti di misura della rete e risulta evidente il loro utilizzo limitato. Il gruppo dei modelli deterministici racchiude in sé un gran numero di modelli aventi come fattore comune delle relazioni di causa-effetto tra le sorgenti e la meteorologia (cause) e le concentrazioni degli inquinanti nel dominio di calcolo (effetti).

Questi modelli si possono inoltre classificare ulteriormente in base all'evoluzione temporale: i modelli stazionari rappresentano fenomeni che possono essere considerati costanti nel tempo o dinamici quando si ha una variabilità in funzione del tempo. Un altro parametro per la classificazione è la scelta della scala spaziale il cui intervallo è così composto: *microscala* (100m-1km), *scala locale* (10-100km), *mesoscala* (100-1000km), *scala regionale* (1000-5000km) ed infine *scala globale* che copre tutta la superficie terrestre.

"I modelli di simulazione della dispersione degli inquinanti in aria sono ormai diventati uno strumento di estrema utilità per l'analisi dello stato della qualità dell'aria e per le stime preventive dell'impatto su un territorio di sorgenti potenzialmente inquinanti" [11].

## Capitolo 2

# Modellazione fisica

Si propone ora una presentazione del software SIRANE utilizzato durante il lavoro di tesi. SIRANE è un programma sviluppato dall'Ecole Centrale de Lyon e ha come obiettivo la modellazione della dispersione di inquinanti in ambito urbano restituendo l'evoluzione temporale e spaziale della concentrazione dei vari inquinanti. SIRANE viene utilizzato in ambito urbano con particolare attenzione agli agglomerati di edifici tipici dei quartieri cittadini, prima di procedere con la descrizione richiamiamo il concetto di *canyon urbano* che verrà ampiamente utilizzato nel seguito. Per *canyon urbano* si intende una strada relativamente stretta, chiusa tra edifici che sono disposti su entrambi i lati in modo continuo. Lavorando in ambito urbano si considera la microscala come la scala spaziale del problema, per questo motivo bisogna tenere in conto delle modifiche del flusso atmosferico dovute alla geometria urbana, tra queste la presenza di strati di intenso *shear* alla sommità della copertura urbana, la debole diffusione indotta dagli edifici che aumenta il trasporto turbolento di quantità di moto, calore, umidità e inquinanti e la resistenza aerodinamica indotta dagli edifici. Per poter modellare il flusso e i fenomeni di trasporto a questa scala bisogna però procedere con una descrizione semplificata della geometria urbana. Si esclude la possibilità della completa ricostruzione della geometria urbana dentro ad un dominio computazionale e la soluzione di un sistema di equazioni di governo seguendo un approccio CFD dal momento che, in presenza di un gran numero di strade e di inquinanti, tale approccio risulta essere troppo dispendioso in termini di costi computazionali. La semplificazione sulla geometria urbana richiede una semplificazione anche sui fenomeni di trasporto degli inquinanti il che comporta:

- caratterizzare la parte inferiore dello strato limite atmosferico dove le dinamiche di flusso sono tipicamente determinate dalla dimensione e dalla densità degli edifici e dalla geometria delle strade;
- stimare i flussi avettivi degli inquinanti lungo l'asse stradale



- parametrizzare lo scambio della massa tra la zona di ricircolo dentro al canyon urbano e nella zona esterna al flusso;
- parametrizzare lo scambio di massa alle intersezioni delle strade.

SIRANE è stato concepito seguendo l'approccio che prevede un reticolo di strade e una decomposizione dell'intero flusso nell'atmosfera esterna e il sub flusso della canopy urbana. Tale disposizione può modificare la struttura della circolazione dell'aria. Nel caso in cui il vento spirasse trasversalmente rispetto all'asse della strada, si avrebbe che la cavità generata dagli edifici favorirebbe lo sviluppo di una circolazione elicoidale che potrebbe portare a un accumulo di forti concentrazioni di inquinanti in corrispondenza di punti ricettori nei pressi degli edifici posti lungo il lato sopravvento. La presenza del canyon induce lo sviluppo di un flusso di ritorno attraverso la strada, vicino al suolo, che veicola nei punti ricettore una componente emissiva entrante dall'esterno, sopravvento alla strada e proveniente da sorgenti distanti, che va a sommarsi a quella dipendente dalle emissioni generate dalle emissioni all'interno della strada, con conseguente accumulo. Pertanto per ogni *canyon stradale* la concentrazione è calcolata come la somma di due componenti: la concentrazione di fondo e la concentrazione legata all'emissione di inquinante da parte delle vetture presenti. SIRANE inoltre si basa sul concetto di rete stradale e il flusso complessivo si divide in flusso esterno e quello nel *urban canopy sub-flow*. Il modello procede come primo punto in una divisione del dominio in 2 sottodomini: atmosfera esterna e *urban canopy* ovvero il tessuto urbano.

Le sorgenti emissive considerate da SIRANE sono di tre tipi: puntuali (ciminiere delle fabbriche), lineari (emissioni da traffico) ed infine superficiali (emissioni da riscaldamento per edifici). Il passo temporale è pari a 1 h e per ogni passo temporale la dispersione dell'inquinante viene calcolata assumendo condizioni stazionarie e concentrazioni indipendenti tra un passo e l'altro. Questa caratteristica del modello può risultare un difetto in situazioni in cui si poco vento per diverse ore.

SIRANE non considera gli edifici in sé ma lo spazio vuoto che esiste tra questi. Gli edifici e la strada delimitano dei box che risultano essere aperti sopra e frontalmente. Il flusso all'interno di ogni strada è guidato dalla componente parallela del vento esterno e si assume che l'inquinante sia uniformemente mescolato nel volume della strada. Vengono considerati i seguenti meccanismi di trasporto nel tessuto urbano che determinano il calcolo della concentrazione media dentro ogni tratto stradale:

- trasferimento di massa convettivo lungo la strada dovuto al vento medio lungo il loro asse;
- trasferimento turbolento lungo le interfacce tra la strada e lo strato limite atmosferico sovrastante;

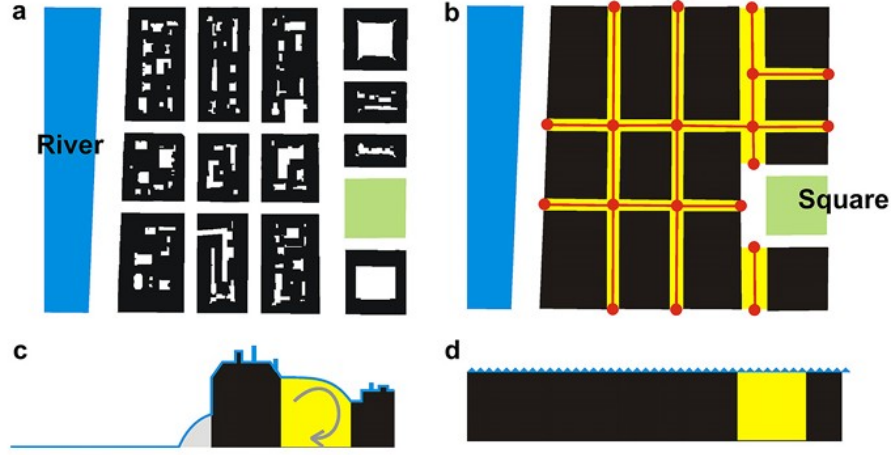
- il trasporto convettivo agli incroci.

Il flusso al di sopra della rete stradale è descritto dalla teoria della similarità di Monin-Obukhov. La presenza del sottostrato di scabrezza appena al di sopra della copertura urbana viene trascurata e il flusso esterno si assume uniforme sul piano orizzontale. La dispersione degli inquinanti trasportati o diffusi nell'aria sovrastante viene presa in considerazione utilizzando un modello a pennacchio gaussiano, con le deviazioni standard  $\sigma_y$  e  $\sigma_z$  parametrizzate dalla teoria della similarità.

La dispersione degli inquinanti alla scala considerata è influenzata dalla presenza e dalla geometria degli edifici risulta pertanto necessario tenerne conto in qualsiasi modello, in virtù di questa osservazione il modello SIRANE si concentra sulla scala degli edifici ( $L \sim 10m$ ). La geometria dei dettagli degli edifici ( $L < 1m$ ) viene invece trascurata non perché i dettagli non abbiano influenza sul flusso ma a causa dell'elevato onere computazionale. Per quel che riguarda la scala topografica ( $L > 100m$ ) SIRANE ignora tali variazioni e assume un flusso esterno che si sviluppa su una superficie piana con una rugosità uniformemente distribuita.

Si denotano due zone principali per la geometria urbana: gli spazi interconnessi che corrispondono alle strade e quelli isolati ovvero i cortili nei quali raramente si hanno emissioni e pertanto vengono trascurati. La concentrazione di inquinanti in queste aree viene assunta pari a quella nell'aria sopra al livello del tetto nel flusso atmosferico esterno. Questa approssimazione viene fatta ogni volta che il volume stradale mostra una sproporzione tra larghezza e altezza del canyon urbano come per piazze e piazzali. Per poterli classificare correttamente si introduce il rapporto  $\frac{W}{H}$  dove  $W$  rappresenta l'ampiezza del canyon e  $H$  la sua altezza. Un canyon stradale con un rapporto  $\frac{W}{H} > 3$  verrà considerato come uno spazio aperto, altrimenti verrà trattato propriamente come un canyon urbano. Complessivamente si ha che il reticolo di strade viene modellato come un insieme di scatole. Lo scambio di inquinanti avviene tra scatole adiacenti e tra scatole e atmosfera. L'obiettivo del modello è ottenere la concentrazione degli inquinanti in ogni tratto stradale ovvero in ogni box stradale.

Nei canyon urbani le dinamiche di flusso sono complesse ma complessivamente si ha che questo flusso è composto da una componente ricircolante sulla sezione trasversale della strada, che è sovrapposta a un flusso lungo la strada. La dinamica di questo flusso dipende dai dettagli geometrici delle strade e dalla dinamica del flusso del strato limite esterno, che determina il forcing del flusso all'interno della strada. Poiché SIRANE è stato concepito per calcolare le concentrazioni mediate spazialmente all'interno di ogni strada, non siamo interessati ai dettagli del flusso al suo interno. Ci concentriamo invece sulla velocità del vento mediata spazialmente lungo l'asse della strada,  $U_{street}$ , responsabile di un flusso advettivo medio ai bordi a monte e a valle del canyon. Si assume che la velocità media  $U_{street}$  è determinata da un equilibrio tra l'ingresso turbolento al livello del tetto e il drag delle pareti



**Figura 2.1:** Rappresentazione di come viene gestito il reticolo urbano con il dettaglio dei tratti di terreno aperto.

dell'edificio. Pertanto, trascuriamo sia l'effetto dei gradienti di pressione sia gli altri effetti causati dai veicoli in movimento. La velocità media  $U_{street}$  viene utilizzata per calcolare il bilancio di massa all'interno di ogni strada e il bilancio dei flussi d'aria agli incroci.

$$U_{street} = U_H \cos(\varphi) \frac{\partial_i^2}{HW} \left[ \frac{2\sqrt{2}}{C} (1 - \beta) \left( 1 - \frac{C^2}{3} + \frac{C^4}{45} \right) + \beta \frac{2\alpha - 3}{\alpha} + \left( \frac{W}{\delta_i} - 2 \right) \frac{\alpha - 1}{\alpha} \right] \quad (2.1)$$

dove:

- $\alpha = \ln \left( \frac{\delta_i}{z_{0,build}} \right)$
- $\beta = \exp \left[ \frac{C}{\sqrt{2}} \left( 1 - \frac{H}{\delta_i} \right) \right]$
- $U_H = u_* \sqrt{\frac{\pi}{\sqrt{2kZC}} \left[ Y_0(C) - \frac{J_0(C)Y_1(C)}{J_1(C)} \right]}$
- $C$  è la soluzione di  $\frac{Z_{0,build}}{\delta_i} = \frac{2}{C} \exp \left[ \frac{\pi}{2} \frac{Y_1(C)}{J_1(C)} - \gamma \right]$
- $\delta_i = \min(H; W/2)$

e dove  $J_0$ ,  $J_1$  e  $Y_1$  sono funzioni di Bessel,  $u_*$  è la velocità di frizione del flusso dello strato limite soprastante,  $\phi$  è la direzione del vento esterno rispetto all'asse della strada,  $H$  e  $W$  sono rispettivamente l'altezza e la larghezza delle strade ed

infine  $z_0$ , *build* è la rugosità delle pareti dei canyon urbani. La velocità media  $U_{street}$  viene utilizzata per calcolare il bilancio di massa all'interno di ogni strada e il bilancio dei flussi d'aria agli incroci.

Il flusso agli incroci delle strade sono strettamente legati alla dimensione, all'orientamento e la relativa distanza degli edifici che costeggiano le strade. Si distinguono due tipologie di intersezioni: quando il rapporto della larghezza delle strade è sufficientemente alto, si ha una 'intersezione semplice' ed il flusso all'interno dell'intersezione è quasi scollegato da quello del flusso esterno. Al contrario, per rapporti bassi, come nelle piazze, il flusso esterno penetra profondamente nella canopy urbana.

Il calcolo delle concentrazioni verrà eseguito per mezzo di un sistema di equazioni lineari aventi come incognite le concentrazioni medie nello spazio per ogni strada. Ad ogni box stradale è associata un'equazione di bilancio di massa considerando gli scambi con i box contigui e lo strato atmosferico sovrastante. Sotto l'ipotesi di condizioni di equilibrio stazionario SIRANE utilizza l'equazione che segue:

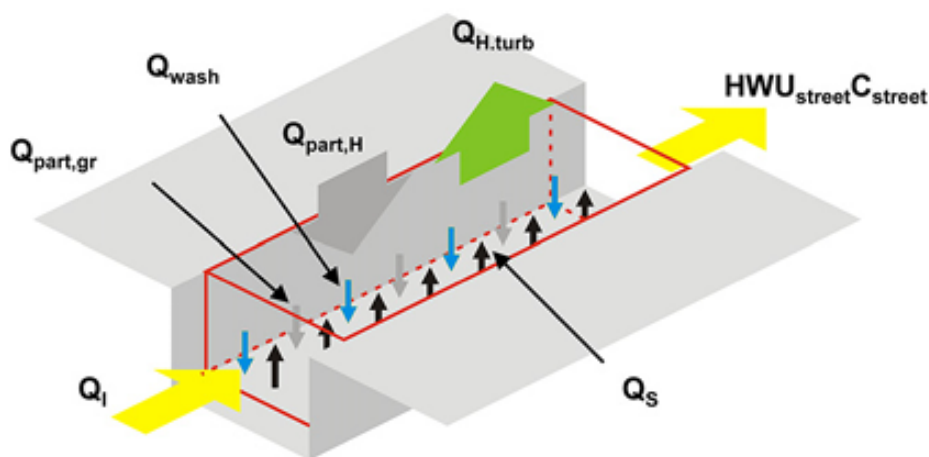
$$Q_s + Q_I + Q_{part,H} = Q_{H,turb} + HWU_{street}C_{street} + Q_{part,gr} + Q_{wash} \quad (2.2)$$

dove:

- $Q_s$ : tasso di inquinante emesso internamente alla strada;
- $Q_I$ : flusso di inquinante trasportato dal flusso medio lungo l'asse della strada e entrante a monte;
- $Q_{part,H}$ : flusso di sedimentazione delle particelle solide entranti dall'interfaccia strada-atmosfera;
- $HWU_{street}C_{street}$ : flusso di inquinante trasportato dal flusso medio lungo l'asse stradale e uscente a valle;
- $Q_{H,turb}$ : flusso di inquinante scambiato per diffusione turbolenta tra strada e atmosfera;
- $Q_{part,gr}$ : flusso di deposito solido sul terreno;
- $Q_{wash}$ : quantità di inquinante eliminata per unità di tempo dal deposito umido.

Le quantità a sinistra nell'equazione corrispondono ai flussi entranti, mentre a destra troviamo i flussi uscenti. Il modello richiede inoltre dei dati meteorologici: velocità del vento, direzione del vento, temperatura, radiazione solare, copertura delle nuvole e precipitazioni. Il passo temporale con cui bisogna fornire queste

grandezze è pari a un'ora. Per mezzo di queste quantità verranno calcolati altri parametri meteo come la lunghezza di Monin-Obukhov di utilità per la descrizione del fenomeno di diffusione.



**Figura 2.2:** Schematizzazione dell'equazione di bilancio per un singolo box.

## 2.1 Dati di Input

SIRANE richiede dei dati di input in modo che possano essere fornite informazioni inerenti a questi aspetti:

- geometria edifici;
- meteorologia;
- emissioni;
- inquinamento di fondo;
- ricettori.

La geometria degli edifici viene fornita attraverso uno shapefile nel quale sono riportate tutte le informazioni geometriche di ogni box stradale andando inoltre a specificare se si tratta di un canyon urbano oppure no. I dati meteo di input vengono poi forniti andando a considerare una stazione meteo dentro al dominio di interesse, il passo temporale di questi dati è di 1 ora, a partire da questi dati si ottengono gli altri parametri meteo quali la lunghezza di Monin-Obukhov che saranno poi importanti per la determinazione del fenomeno di diffusione.

Come ultimo parametro utile al modello si considerano le emissioni degli inquinanti. In ambito urbano le emissioni hanno origine molteplice: gli scarichi delle macchine, le ciminiere delle fabbriche oppure i riscaldamenti degli edifici. SIRANE distingue tre macro categorie di sorgenti:

- Sorgenti puntuali : fabbriche;
- Sorgenti superficiali : riscaldamenti degli edifici;
- Sorgenti lineari: scarichi delle auto disposte lungo le strade.

Le emissioni puntuali vengono fornite con un file di testo per ognuna di queste dove ne viene specificato il contributo orario apportato nell'atmosfera. Le emissioni superficiali, invece vengono passate attraverso tanti file di testo quante sono le ore della simulazione nei quali sono raccolte le coordinate dal quale proviene il contributo con l'entità per ogni singolo inquinante. Per quanto riguarda le sorgenti lineari si utilizza un unico file nel quale ad ogni strada corrisponde un ID differente al quale è associato un singolo contributo per ogni inquinante che verrà poi modulato nel tempo attraverso alcuni coefficienti di modulazione (uno per ogni slot orario).

Non è ancora stato considerato l'inquinamento di fondo che tiene traccia dell'inquinamento che non è causato dalle fonti di inquinamento ma è presente in maniera naturale. Questo viene fornito attraverso un file di testo in cui per ogni slot orario della simulazione vengono riportati i valori per ogni inquinante.

Infine, l'ultimo dato di input necessario corrisponde ai ricettori e alla griglia di calcolo. I ricettori sono punti specifici all'interno della mappa per i quali vengono riportate le concentrazioni di fondo per ogni slot orario, nel caso in esame coincidono con le centraline che ARPA utilizza per tenere traccia delle concentrazioni di fondo. La griglia di calcolo, viene invece definita attraverso le coordinate estreme in x e y, il numero di punti in cui viene divisa la mappa nelle due direzioni.

## 2.2 Risultati

Una volta che sono stati inseriti tutti i dati di input necessari per il periodo di simulazione desiderato, la simulazione inizia e alla sua fine si ottengono i seguenti risultati che si suddividono in due macro categorie: meteo e concentrazioni inquinanti. Si noti che tutti i dati restituiti sono calcolati per ogni slot orario della simulazione di interesse.

### 2.2.1 Risultati Meteo

I dati meteo, che sono calcolati per ogni slot orario all'interno della simulazione, sono: velocità del vento (U), direzione del vento (Dir), temperatura (T), altezza

del boundary layer (HCla), velocità d'attrito ( $u$ ), fluttuazione della direzione del vento ( $\sigma_\theta$ ), copertura delle nuvole (Cld), flusso di calore sensibile ( $H_0$ ) e lunghezza di Monin-Obukhov ( $L_{MO}$ ). Per quanto riguarda la temperatura e la velocità e la direzione del vento, queste sono le stesse che vengono fornite in ingresso. Nel seguito si descrivono uno per uno i dati meteo di output.

### Altezza del Boundary Layer

L'altezza del Boundary layer (HCla) rappresenta l'altezza entro la quale la presenza degli edifici, o comunque della rugosità della superficie, influenza la turbolenza e tutti gli altri fenomeni di mescolamento dell'atmosfera. Questa è determinata differentemente in base a se l'atmosfera risulta stabile o meno. Le formule utilizzate dal software sono:

$$\begin{cases} HCla = \frac{L_{MO}}{3.8} \left( -1 + \sqrt{1 + 2.28 \frac{u_*}{f L_{MO}}} \right) & \text{se } L_{MO} > 0 \text{ (atmosfera stabile)} \\ HCla = 0.3 \frac{u_*}{f} & \text{se } L_{MO} = 0 \text{ (atmosfera neutra)} \\ \frac{dHCla}{dt} = \frac{T(1.4u_*^3 + 5u_*^3)}{g'_0 e^{\gamma_{ext} HCla^2}} & \text{se } L_{MO} < 0 \text{ (atmosfera instabile)} \end{cases} \quad (2.3)$$

dove si indica con:

- $f$  il parametro di Coriolis ( $f = \frac{4\pi \sin(2\pi\phi/360)}{86.400}$ );
- $w_* = u_* \left( \frac{HCla}{k L_{MO}} \right)^{1/3}$  la scala delle velocità convettive;
- $\gamma_{ext} = \frac{\partial \theta}{\partial z}$  il gradiente in direzione verticale della temperatura potenziale.

Altro parametro che viene restituito dal software è la velocità di attrito, la quale rappresenta la scala della velocità nei pressi della parete. Questa viene determinata invertendo la seguente formula :

$$u(z) = \frac{u_*}{k} \left[ \ln \left( \frac{z - d_{disloc} + z_{0,disloc}}{z_{0,disloc}} \right) - \left( \psi_m \left( \frac{z - d_{disloc} + z_{0,disloc}}{L_{MO}} \right) - \psi_m \left( \frac{z_{0,disloc}}{L_{MO}} \right) \right) \right] \quad (2.4)$$

con:

- $k$  costante di von-Karman;
- $d_{disloc}$  altezza di spostamento;
- $z_{0,disloc}$  rugosità aerodinamica del sito;

- la funzione  $\psi_m(\zeta)$  è definita come segue:

$$\psi_m(\zeta) = \begin{cases} 2 \ln\left(\frac{1+x}{2}\right) + \ln\left(\frac{1+x^2}{2}\right) - 2 \arctan(x) + \pi/2 & \text{se } -500 < L_{MO} < 0 \\ \psi_m(\zeta) = 0 & \text{se } |L_{MO}| \geq 500 \\ \psi_m(\zeta) = -5\zeta & \text{se } 0 < L_{MO} < 500 \end{cases}$$

dove  $x = (1 - 16\zeta)^{1/4}$ .

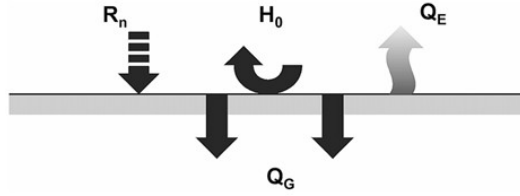
### Flusso di Calore Sensibile

Questo termine ( $H_0$ ) permette di rappresentare, quando positivo, il passaggio di calore dal terreno all'atmosfera, mentre se negativo rappresenta il passaggio opposto[8]. Per ottenerlo SIRANE utilizza la formula riportata in [10]:

$$R_N = H_0 + Q_E + Q_G \quad (2.5)$$

dove:

- $R_N$  rappresenta la radiazione netta solare;
- $Q_G$  rappresenta il flusso di calore diffusivo verso il terreno;
- $Q_E$  rappresenta il flusso di calore latente.



**Figura 2.3:** Bilancio di energia al livello del suolo in condizioni di stazionarietà.

A questo punto SIRANE dopo aver invertito l'equazione (1.5) determina prima  $R_N$  attraverso il contributo delle onde corte incidenti, infatti, queste vengono date come input al software. Da qui SIRANE procede con il calcolo grazie alla seguente formula:

$$R_N = \frac{(1 - a)K_{\downarrow} + (0.94 \cdot 10^{-5}T^2 - \varepsilon)\sigma T^4 + 60(Cld/8)}{1.12} \quad (2.6)$$

in cui abbiamo:

- $a$  che rappresenta l'albedo del sito;
- $\varepsilon$  che rappresenta il coefficiente di Stull, il quale è considerato 0.88;



- $\sigma$  che rappresenta la costante di Boltzmann;
- $Cld$  la copertura nuvolosa.

Da qui, indicando con  $\alpha$  il coefficiente di Priestley-Taylor e con  $c_G$  la costante di proporzionalità tra  $R_N$  e  $Q_G$  si può riscrivere il seguente sistema le cui formule seguono [5], [9] e [1]:

$$\begin{cases} Q_E = \frac{\alpha}{1 + \exp(-0.055(T - 279))}(R_N - Q_G) + 20\alpha \\ Q_G = c_G R_N. \end{cases}$$

A questo punto sostituendo il tutto si trova la forma finale per il flusso di calore sensibile:

$$H_0 = (1 - c_G)R_N - \frac{\alpha}{1 + \exp(-0.055(T - 279))}((1 - c_G)R_N - 20\alpha). \quad (2.7)$$

### Lunghezza di Monin-Obukhov

Uno dei parametri che risulterà essere molto presente all'interno del lavoro è la lunghezza di Monin-Obukhov. Questa veste un ruolo particolarmente importante perché rappresenta il rapporto tra l'energia turbolenta prodotta da fattori meccanici e quella prodotta da moti convettivi. SIRANE calcola tale parametro attraverso la seguente formula:

$$L_{MO} = -\frac{\rho C_p^2 \theta}{kg H_0} u_*^3 \quad (2.8)$$

con:

- $\rho$  densità dell'aria;
- $C_p$  coefficiente di calore specifico a pressione costante ( $C_p = 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );
- $k$  costante di von-Karman;
- $\theta$  temperatura potenziale.

### Cloud Cover

La copertura nuvolosa entra in gioco all'interno del calcolo della radiazione netta e perciò riveste un ruolo molto importante all'interno della dinamica del fenomeno. Essa viene misurata in Okta e perciò assume valori che vanno da un minimo pari a 0 ad un massimo pari al valore 8. Per il calcolo di questa quantità il software inverte la seguente formula riportata in [7]:

$$K_{\text{down}} = \begin{cases} (990 \sin(\psi) - 30) \left(1 - 0.75 \left(\frac{Cld}{8}\right)^{3.4}\right) & \text{di giorno} \\ 0 & \text{di notte} \end{cases}$$

con

$$\sin(\psi) = \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \cos\left(\frac{2\pi}{24}(t_{HTU} - 12)\right)$$

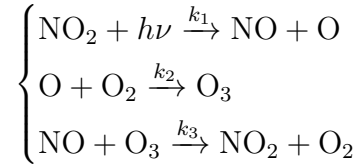
$$\delta = 23.45 \sin\left(\frac{2\pi}{365}(j + 284)\right)$$

dove:

- $j$  è il giorno dell'anno;
- $t_{HTU}$  è l'ora del giorno;
- $\phi$  è la latitudine del sito;
- di notte viene imposto  $Cld = 8$ .

### Costanti Cinetiche di Reazione

I fenomeni di dispersione degli inquinanti a livello del quartiere sono caratterizzati da una scala di tempo dell'ordine di poche decine di minuti. Essendo che la maggior parte delle reazioni che avvengono in atmosfera hanno tempi di reazione molto più lunghi questi vengono trascurati all'interno del software. Una reazione, che invece avviene in un tempo abbastanza breve da modificare in maniera importante i campi di concentrazione di alcuni inquinanti è sicuramente quella che coinvolge gli ossidi di nitrogeno, le quali reazioni inducono una creazione/distruzione dell'ozono. Siccome il ciclo chimico è molto complesso SIRANE utilizza una semplificazione di questo attraverso il ciclo di Chapman, riportato da [10] e scritto di seguito:



A questo punto si nota che la reattività di O è molto alta, tanto che il tempo caratteristico risulta trascurabile rispetto alle altre. Per procedere, consideriamo, allora, condizioni di foto-stazionarietà [13] e/o il rapporto  $k_1/k_3$  costante in spazio e tempo o solo in spazio. Utilizzando questa ultima ipotesi si possono scrivere le seguenti equazioni per le due costanti riportate in [7]:

$$\begin{cases} k_1 = \frac{1}{60}(0.5699 - [9.056 \cdot 10^{-3}(90 - \chi)]^{2.546}) \left(1 - 0.75 \left(\frac{Cld}{8}\right)^{3.4}\right) \\ k_3 = 1.325 \cdot 10^2 \exp\left(-\frac{1430}{T}\right) \end{cases}$$

con  $\chi$  che rappresenta l'elevazione solare.

### 2.2.2 Concentrazioni SIRANE

SIRANE restituisce un valore di concentrazione per ogni inquinante considerato ad ogni intervallo temporale di un'ora, fornisce inoltre le concentrazioni sulla griglia ottenuta partendo dal dominio di interesse e considerando il numero di punti in cui dividerla fornito in input.

Le ultime tipologie di risultato che si ottengono sono quelli relativi ai ricettori. Questi rappresentano alcuni punti specifici nei quali vengono misurate le concentrazioni dei vari inquinanti per ogni ora della simulazione. Per ogni ricettore e per ogni slot orario viene restituito un file di testo dove vengono riportate le concentrazioni dei vari inquinanti e il deposito secco di questi. Questi file sono file di testo con estensione .DAT e per ogni inquinante e per ogni stazione vengono fornite alcune statistiche, eccone alcune:

- il massimo e il minimo delle concentrazioni per ogni ricettore;
- il numero di ore e di giorni in cui viene superato un certo percentile per ogni ricettore;
- lo scarto quadratico medio normalizzato tra la serie temporale di concentrazioni ottenuta dal modello e quella misurata;
- l'errore relativo medio tra la serie temporale delle concentrazioni ottenuta dal modello e quella misurata;
- il coefficiente di correlazione tra la serie temporale del modello e quella misurata.

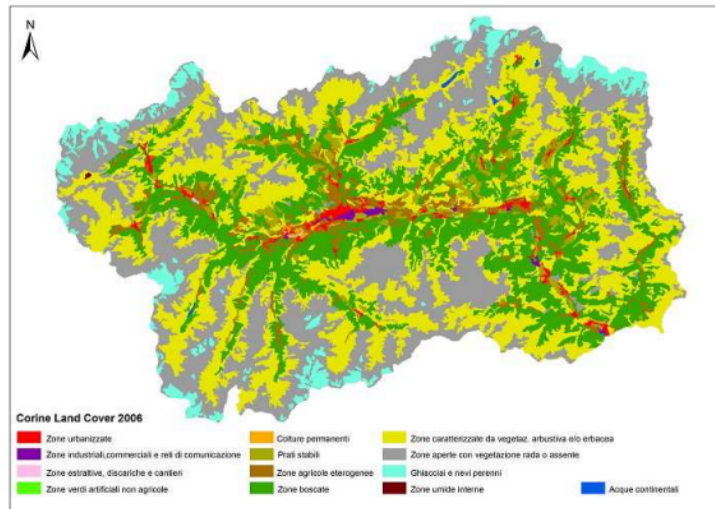
## Capitolo 3

# Contesto territoriale

La regione Valle d'Aosta è situata all'estremità nord-occidentale della catena alpina, dove questa cambia orientazione, da sud-nord a ovest-est. Il territorio della regione, di forma quasi rettangolare, si estende per circa 80 km di lunghezza e 40 km di larghezza. Confina a est ed a sud con il Piemonte, a nord con la Svizzera ed a ovest con la Francia. La Valle d'Aosta si trova racchiusa tra i più imponenti massicci delle Alpi; solo nell'angolo sud orientale le montagne lasciano un varco attraverso il quale la Dora Baltea sfocia nella pianura canavesana. Attraverso i valichi montani verso la Svizzera e verso la Francia avviene il trasferimento di masse d'aria di origine occidentale e settentrionale dal versante esterno a quello interno della catena alpina. Il solco vallivo principale, percorso dalla Dora Baltea e lungo circa 100 km, ha direzione sud-nord da Pont-Saint-Martin a Montjovet, poi ruota in direzione est-ovest fino ad Avise, dove cambia nuovamente direzione e diventa sud-est nord-ovest. Le valli laterali sono percorse da affluenti della Dora Baltea a regime torrentizio. L'estensione del territorio è di circa  $3260 \text{ km}^2$ , con una quota media di 2106 metri variabile dai circa 310 metri dell'estremità sud orientale ai 4810 metri del Monte Bianco, con oltre il 60% del territorio sopra i 2000 m di quota.

La caratterizzazione dell'uso del suolo è stata effettuata sulla base delle categorie Corine Land Cover, progetto di realizzazione e aggiornamento di una carta di copertura del suolo a scala europea attraverso l'elaborazione di immagini satellitari, coordinato dall'Agenzia Europea per l'Ambiente (EEA) e realizzato in Italia dall'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). L'uso e la copertura del suolo sono fattori determinanti di pressione sull'ambiente, ma definiscono anche l'estensione delle superfici di territorio su cui si esercitano gli impatti di fattori specifici, come l'inquinamento atmosferico e acustico, sulla popolazione e sugli ecosistemi.

La figura riporta su riferimento percentuale la distribuzione del territorio regionale in base alle tipologie di paesaggio naturale/artificiale: si osserva che più



**Figura 3.1:** Uso del suolo della regione Valle d'Aosta secondo Corine Land Cover 2006 (Fonte: ARPA Valle d'Aosta)

del 80% costituito da boschi, aree naturali ed aree di alta montagna. L'area più propriamente antropizzata, caratterizzata da urbanizzazione, aree agricole o tenute a pascolo, occupa meno del 10% della regione.

### 3.1 Caratterizzazione meteo-climatica

Il sistema climatico è un sistema complesso, costituito dall'atmosfera, la superficie terrestre, la neve, il ghiaccio, gli oceani e dalle interazioni tra queste componenti. La componente atmosfera è particolarmente importante per la caratterizzazione del clima, definito come tempo meteorologico medio. Il clima è usualmente descritto in termini di media e di variabilità di temperatura, precipitazioni, vento in un periodo di tempo (tipicamente 30 anni, come indicato dall'Organizzazione Meteorologica Mondiale). Il riconoscimento e la stima dei trend delle variabili climatiche devono essere effettuati attraverso l'elaborazione statistica delle serie temporali di dati rilevati dalle stazioni di monitoraggio presenti sul territorio.

La Regione Valle d'Aosta appartiene al macroclima temperato oceanico delle medie latitudini, con mesoclima di montagna delle Alpi occidentali del versante mediterraneo. All'interno della regione vi è una notevole varietà di topoclimi (quelli delle singole vallate) e di microclimi (ad esempio quello di una porzione di suolo all'ombra), determinati dalle variazioni di altitudine e dalla diversa esposizione dei versanti. Questi ultimi due fattori sono particolarmente importanti nel determinare il clima di una regione ad orografia complessa come la Valle d'Aosta. All'aumentare

della quota si possono individuare i seguenti andamenti per le principali grandezze fisiche di interesse meteorologico:

- diminuzione della temperatura dell'aria;
- aumento del numero di giorni di neve al suolo e di gelo;
- aumento della trasparenza dell'aria e della visibilità, per una minore concentrazione di aerosol (da 1010/m<sup>3</sup> al livello del mare a 109/m<sup>3</sup> a 3000 metri) ed un minore contenuto di vapore acqueo;
- aumento dell'intensità della radiazione solare: a 200 m di quota si ha circa il 40-50% radiazione proveniente dal Sole, a 3000 metri circa il 60-70%, una frazione che alla latitudine delle Alpi equivale all'apporto energetico ricevuto in pianura all'equatore;
- aumento della velocità del vento;
- diminuzione della pressione atmosferica, con andamento approssimativamente esponenziale.

Gli imponenti massicci montuosi che circondano la Valle d'Aosta agiscono come una barriera sui flussi atmosferici a grande scala, determinando un generale effetto di ombra pluviometrica sulle vallate interne (xericità intralpina). In particolare, le perturbazioni di origine atlantica hanno effetti più importanti sui settori nord-occidentali della regione, mentre quelle di origine mediterranea interessano maggiormente il settore sud orientale. Le correnti atmosferiche che riescono ad oltrepassare la catena alpina risultano modificate: infatti si verificano spesso effetti di incanalamento dei venti nelle valli, associati talvolta a fenomeni di foehn. L'orografia complessa è anche la causa, insieme alla radiazione solare, della nascita di un fenomeno tipico delle valli montane: la circolazione di brezza. La diversa esposizione dei versanti alla radiazione solare influisce profondamente sulle caratteristiche termiche: i versanti a sud, "Adret", sono caratterizzati da temperature miti ed elevato soleggiamento; i versanti a nord, "Envers", hanno invece temperature più rigide. Questa caratteristica determina sia il tipo di vegetazione sia la distribuzione degli insediamenti umani.

La temperatura dell'aria è una delle variabili principali che caratterizzano il clima di una determinata area geografica. Attraverso l'elaborazione delle serie temporali dei dati di temperatura, con l'utilizzo di opportune tecniche statistiche, è possibile evidenziare l'esistenza di un trend di temperatura, valutarne l'entità e confrontarlo con quelli provenienti da studi a scala globale. La distribuzione delle precipitazioni medie annuali sul territorio valdostano evidenzia una elevata variabilità dei quantitativi di pioggia cumulata dovuta alla complessa interazione tra i fenomeni meteorologici e la morfologia del territorio. Dall'analisi delle serie

storiche dei dati di precipitazione si evidenzia anche una elevata variabilità temporale.

Le misure del vento sono fortemente influenzate dalla posizione della stazione di misura rispetto all'orografia locale e dunque sono rappresentative di un'area di estensione limitata. Per le stazioni della Valle d'Aosta, l'orografia condiziona fortemente il regime di vento: in quasi tutte le stazioni si vede una predominanza dei venti che spirano lungo l'asse vallivo (da monte o da valle) e, in generale, le stazioni di fondovalle hanno velocità medie inferiori rispetto alle stazioni di montagna. Inoltre, dall'analisi delle serie storiche, non si osserva variabilità significativa nelle direzioni di provenienza mentre da un anno all'altro si può vedere una variazione della velocità media. Tra tutte le stazioni di misura presenti sul territorio regionale, sono state scelte cinque stazioni, appartenenti alla rete di monitoraggio della qualità dell'aria di ARPA Valle d'Aosta, rappresentative di zone con regimi anemologici diversi: Aosta Mont-Fleury (577m) nel fondovalle centrale, Donnas (341m) nel fondovalle orientale, Etroubles (1330m), La Thuile (1637m) e Cogne (1758m) in montagna. Per analizzare i dati di velocità del vento, a partire dalla scala Beaufort e considerando i valori abitualmente misurati in Valle d'Aosta, sono state definite 6 classi di velocità racchiuse nella seguente tabella.

	classe	range di velocità
c1	calma di vento	< 0.5 m/s
c2	bava di vento	tra 0.5 e 1.5 m/s
c3	brezza leggera	tra 1.5 e 3.5 m/s
c4	brezza tesa	tra 3.5 e 5.5 m/s
c5	vento moderato	tra 5.5 e 8 m/s
c6	vento forte	> 8 m/s

La Valle d'Aosta, come tutte le regioni montuose, presenta alcune caratteristiche di circolazione atmosferica tipiche, determinate dall'interazione dei flussi a grande scala con la struttura orografica complessa.

Nel periodo primaverile-estivo, in condizioni di alta pressione, nelle valli si assiste alla comparsa di venti termici generati dal diverso riscaldamento del terreno della valle rispetto alla pianura, questo fenomeno prende il nome di **circolazione di brezza**. Gli effetti sono la presenza di vento di intensità anche moderata nelle ore diurne che soffia da valle verso monte e di vento debole nelle ore notturne da monte a valle. Le concentrazioni di inquinanti sono generalmente basse per le buone condizioni di ventilazione; essendo però la circolazione di brezza associata a condizioni anticicloniche e con elevato irraggiamento solare, si possono avere concentrazioni di ozono elevate.

Nelle situazioni di alta pressione invernale, il forte irraggiamento notturno dovuto al cielo sereno può portare la temperatura dell'aria vicina al suolo a valori molto

bassi e durante il giorno i raggi solari non hanno energia sufficiente per riscaldare il terreno. L'aria raffreddata discende lungo i versanti delle montagne per accumularsi nel fondovalle e si verifica il fenomeno dell'inversione termica: la temperatura dell'aria aumenta con la quota, invece di diminuire. Al di sotto dell'inversione termica l'aria è ricca di umidità e possono verificarsi anche episodi di foschia; i moti verticali dell'aria sono praticamente assenti e si ha di conseguenza un accumulo di inquinanti nello strato di inversione; la visibilità è ridotta e i venti sono molto deboli o assenti. In queste condizioni gli inquinanti si accumulano negli strati inferiori dell'atmosfera ed i valori di concentrazione, in particolare per il particolato, possono essere molto elevati.

Un altro fenomeno tipico legato al territorio valdostano è il vento di **foehn**. Questo si verifica quando tra i due versanti di una catena montuosa si ha una elevata differenza di pressione. L'aria che arriva a ridosso di una catena montuosa, non potendo girarle attorno, è costretta a salire; durante la salita si raffredda e se è sufficientemente umida si hanno fenomeni di condensazione e di precipitazione. L'aria che discende sul versante sottovento è molto secca e la discesa lungo il versante ne provoca il riscaldamento. Sul versante sottovento si assiste ad un repentino aumento della temperatura, ad una diminuzione dell'umidità relativa e alla comparsa di vento da moderato a forte, con raffiche irregolari. Queste condizioni hanno un notevole effetto di ripulitura dell'aria dagli inquinanti prodotti localmente e di conseguenza le concentrazioni di inquinanti sono molto basse. Trattandosi però di un vento di caduta, è in grado di trasportare nei bassi strati l'aria proveniente da quote più alte (superiori ai 4000 m data l'altezza della catena alpina nella nostra regione), relativamente più ricca di ozono. In corrispondenza di un evento di foehn si avrà dunque una diminuzione degli inquinanti primari come ossidi di azoto e le polveri, ma contemporaneamente un aumento della concentrazione di ozono.

La presenza di fenomeni di precipitazione favorisce la deposizione al suolo degli inquinanti e quindi la diminuzione della loro concentrazione in aria; la precipitazione di tipo convettivo (come quella che si verifica nei temporali) ha un effetto di dilavamento maggiore della precipitazione di tipo stratiforme.

L'incanalamento dei venti sinottici all'interno della struttura orografica della Valle d'Aosta si manifesta con la persistenza di venti di moderata intensità e di direzione prevalentemente occidentale. In tali condizioni, le concentrazioni di inquinanti non raggiungono valori elevati.

## 3.2 Contesto emissivo

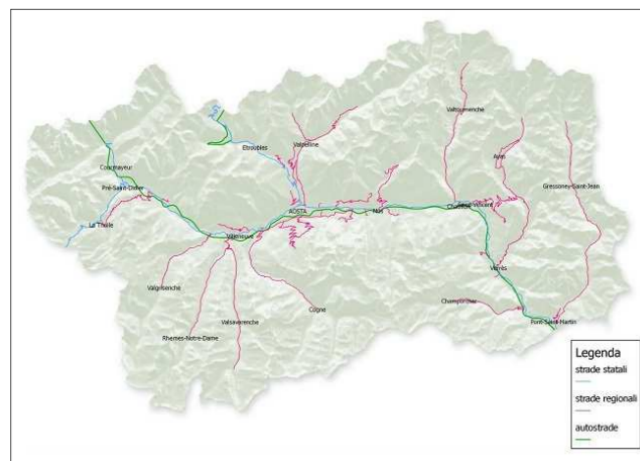
La popolazione residente in Valle d'Aosta definita sulla base del Censimento al 31 dicembre 2023, ammonta a 122.877 residenti e più di un quarto della popolazione vive nella sola città di Aosta (26,9%). La regione negli ultimi decenni ha incentrato



una buona porzione della propria economia sul turismo, pertanto nei periodi di grande afflusso turistico, soprattutto durante l'inverno, alcuni comuni registrano un notevole aumento della popolazione e di conseguenza aumentano sia la richiesta energetica per il riscaldamento sia il traffico, con impatti a volte rilevanti sulla qualità dell'aria. Un altro aspetto che può influire sui consumi energetici e conseguentemente sulla qualità dell'aria di una certa località è la presenza di lavoratori provenienti da un altro comune. Per una valutazione delle emissioni in atmosfera da impianti di riscaldamento che tenga conto anche di questi due aspetti è stato introdotto il concetto di popolazione equivalente definito come la somma della popolazione residente, di quella turistica (giornaliera) e dei lavoratori.

L'elevata distribuzione spaziale degli insediamenti abitativi sul territorio e la concentrazione delle attività e dei servizi nel fondovalle centrale e nel capoluogo regionale rendono abbastanza elevata la richiesta di mobilità, anche se il numero di abitanti della regione è limitato. Si osserva inoltre una forte predominanza della mobilità privata in rapporto alla mobilità pubblica, specialmente per quella porzione di popolazione che abita nelle vallate più lontane del capoluogo. Questa situazione potrebbe essere spiegata dall'elevata dispersione sul territorio dei centri abitati e da un trasporto pubblico particolarmente difficoltoso in una regione di montagna, non sempre in grado di rispondere alle esigenze degli utenti.

L'orografia del territorio regionale è tale che le infrastrutture viarie, anche quelle per il traffico interregionale o transfrontaliero, insistono sulle strette fasce di fondovalle ove risiede la maggior parte della popolazione.



**Figura 3.2:** Rete viaria principale in Valle d'Aosta (fonte: ARPA Valle d'Aosta)

L'infrastruttura viaria della regione può essere così raggruppato come appare nella tabella seguente:

<b>Tipologia di strada</b>	<b>Lunghezza totale</b>
<b>Strade regionali</b>	391 km
<b>Strade statali</b>	151 km
<b>Autostrade</b>	103 km

I flussi di traffico sulla rete stradale e autostradale influenzano direttamente le emissioni e quindi la qualità dell'aria. Il volume di traffico circolante sul territorio regionale è fortemente condizionato, soprattutto per quanto riguarda i mezzi pesanti, dalla presenza del Traforo del Monte Bianco e del Traforo del Gran San Bernardo, importanti vie di comunicazione con la Francia e la Svizzera. Per la valutazione dei volumi di traffico viene utilizzato il parametro Traffico Giornaliero Medio (TGM) che è una stima del numero medio di transiti giornalieri rappresentativo della variabilità annuale del traffico. Gli impatti ambientali del traffico autoveicolare sono determinati in modo rilevante, oltre che dai volumi complessivi di traffico, anche dalla composizione del parco circolante, che viene definito rispetto alla classificazione derivante da Direttive europee, in continuo aggiornamento. I parchi veicolari circolanti in Valle d'Aosta risultano avere un buon livello di rinnovo per le classi motoristiche a minor inquinamento, in particolare per i veicoli leggeri del parco locale e per quelli pesanti transitanti in autostrada. Per quanto riguarda il parco circolante dei veicoli leggeri, confrontando la distribuzione nelle classi, definite dalla Direttiva europea, delle automobili circolanti in Valle d'Aosta con quella delle altre regioni nord-occidentali italiane, si osserva un maggior rinnovamento del parco circolante rispetto all'area presa in considerazione. In particolare risultano elevate le percentuali riferite alle classi Euro 5 ed Euro 6.

<b>Classe</b>	<b>Parco ACI VDA</b>	<b>Parco ACI Italia Nord-Ovest</b>
<b>Euro 0</b>	5%	8%
<b>Euro 1</b>	2%	3%
<b>Euro 2</b>	8%	12%
<b>Euro 3</b>	11%	18%
<b>Euro 4</b>	25%	36%
<b>Euro 5</b>	43%	22%
<b>Euro 6</b>	7%	1%

Confrontando la composizione del parco circolante di veicoli commerciali pesanti (superiori a 3,5 tonnellate) immatricolati in Valle d'Aosta, con quella dei mezzi pesanti transitanti al Traforo del Monte Bianco, si osserva che la componente transfrontaliera è molto più aggiornata. Il parco dei mezzi pesanti transitante in autostrada risulta più recente rispetto a quello relativo al traffico locale: questo è dovuto sia per il divieto di transito dei mezzi Euro 0, Euro 1 ed Euro 2 (a partire

dal 1 novembre 2012) al Traforo del Monte Bianco, sia perché, facendo percorsi più lunghi, vengono rinnovati con maggior frequenza.

La rete ferroviaria valdostana negli ultimi anni ha conosciuto un piano di miglioramento per fare fronte a diversi difetti. Nel tempo la rete non è risultata in grado di garantire uno standard di qualità adeguato: tempi di percorrenza lunghi, puntualità e affidabilità del servizio scarsi, treni in buona parte obsoleti. I treni obsoleti sono stati sostituiti, a partire da settembre 2019, con 8 treni bimodali che la Regione ha acquistato dalla società svizzera Stadler Bussnang AG. Questo tipo di treni ha ridotto i tempi di percorrenza della tratta Aosta-Torino e ha evitato grandi disagi ai passeggeri che precedentemente dovevano fare scalo a Ivrea e Chivasso cambiando pertanto 2 treni.

Dal gennaio 2024 la tratta ferroviaria tra Ivrea ed Aosta è chiusa per consentire l'esecuzione dei lavori di elettrificazione della linea Aosta-Ivrea, la fine dei lavori è prevista per dicembre 2026 e una volta conclusi la tratta Aosta-Torino sarà completamente elettrificata. I lavori di elettrificazione hanno pertanto l'obiettivo di fornire un'offerta più efficiente e di incentivare l'uso dei mezzi pubblici e una mobilità più sostenibile.

Il contesto produttivo regionale di attività che possono avere un impatto sulla qualità dell'aria è costituito prevalentemente da piccole attività artigianali (carrozzerie, falegnamerie, lavanderie). Il comparto produttivo di fusione e lavorazione dei metalli è caratterizzato dalla presenza dell'acciaieria Cogne Acciai Speciali S.p.A. di Aosta che costituisce una fonte di emissione di entità di gran lunga più rilevante rispetto a tutti gli altri comparti produttivi. Il numero di ditte in possesso di autorizzazione alle emissioni in atmosfera riflette il contesto produttivo regionale, con prevalenza di attività artigianali (falegnamerie, carrozzerie, lavanderie) e di attività di lavorazione inerti e produzione di calcestruzzo e asfalto. Il numero complessivo di punti di emissione da tali attività costituisce una frazione rilevante del numero di punti di emissione totali presenti nel territorio regionale. Tuttavia, la quantità complessiva ( $m^3$  /anno) di effluente gassoso emesso dall'attività di fusione e lavorazione metalli evidenzia che tale categoria produttiva costituisce una fonte di impatto ambientale molto più rilevante rispetto a tutte le altre attività, in quanto caratterizzata da impianti di maggiori dimensioni e dal funzionamento continuo del ciclo produttivo industriale. Rispetto agli anni precedenti, è aumentato il numero di impianti di produzione di calore ed energia (impianti di cogenerazione alimentati con fonti rinnovabili, impianti di teleriscaldamento a biomassa).

In Valle d'Aosta esistono 6 stabilimenti rientranti nel campo di applicazione della cosiddetta "Direttiva IPPC" (dir. 96/61/CE, dir. 2008/01/CE, dir. 2010/75/Ue, regolamentata in Italia dal d.lgs. 152/2006, parte seconda, titolo III-bis) soggetti ad AIA (Autorizzazione Integrata Ambientale): Discarica di Brissogne, Discarica di Pontey, Cogne Acciai Speciali S.p.A. (attività di fusione e produzione acciaio, attività di laminazione, attività di decapaggio), Heineken Italia S.p.A. (produzione

di birra), Brabant Alucast Italy Site Verrès S.r.l. (produzione di particolari pressofusi per settore automobilistico), Sub ATO Monte Emilius (impianto di trattamento di rifiuti liquidi).

Le caratteristiche meteo-climatiche della regione Valle d'Aosta hanno sempre determinato forti richieste energetiche per il riscaldamento, con effetti importanti sulla qualità dell'aria, soprattutto nelle aree maggiormente antropizzate. In passato i combustibili utilizzati per il riscaldamento erano la legna ed il carbone, mentre a partire dagli anni '50 hanno iniziato a diffondersi impianti di riscaldamento alimentati con derivati del petrolio (olio combustibile e gasolio). Fino agli anni '60 circa l'80% degli impianti era alimentato a nafta o a carbone. Solo a partire dagli anni '90 cominciano ad essere utilizzati combustibili alternativi e meno inquinanti (metano, gas propano liquido) e fonti di energia alternativa (solare, fotovoltaica).

Attualmente esistono sei reti di teleriscaldamento in funzione nel territorio valdostano. Cinque delle reti già realizzate, nei comuni di La Thuile (2 impianti), Pré-Saint-Didier, Morgex, Pollein, sono alimentate a biomassa legnosa sotto forma di cippato. Una sesta rete di ridotte dimensioni è connessa ad un cogeneratore installato nella località turistica di Pila, nel comune di Gressan, ed è caratterizzata da motori cogenerativi alimentati a gasolio a servizio di un complesso turistico. E' in fase di allacciamento la rete di teleriscaldamento della città di Aosta che utilizzerà il calore prodotto da caldaie a metano e quello recuperato dalle acque di raffreddamento dell'impianto siderurgico adiacente. Sono infine presenti in Valle d'Aosta 238 reti di fornitura di GPL, generalmente installate nelle zone di alta montagna non raggiunte dal metanodotto di fondovalle.

Gli inquinanti considerati nell'inventario delle emissioni della Valle d'Aosta sono:

- macroinquinanti: particolato (PM10, PM2.5), ossidi di azoto ( $NO_x$ ), monossido di carbonio (CO), biossido di zolfo ( $SO_2$ ), composti organici volatili non metanici (COVNM), benzene (C6H6), ammoniaca ( $NH_3$ );
- gas climalteranti: anidride carbonica (CO2), metano (CH4), protossido di azoto ( $N_2O$ ), esafluoruro di zolfo ( $SF_6$ );
- microinquinanti: arsenico (As), piombo (Pb), cadmio (Cd), cromo (Cr), rame (Cu), mercurio (Hg), nichel (Ni), selenio (Se), zinco (Zn), idrocarburi policiclici aromatici (IPA).

I metalli pesanti hanno una notevole rilevanza sanitaria in quanto persistono nell'ambiente e danno luogo a fenomeni di bioaccumulo. Alcuni metalli, quali arsenico (As), cadmio (Cd), cromo (Cr), nichel (Ni), e gli Idrocarburi Policiclici Aromatici (IPA) sono riconosciuti come importanti agenti cancerogeni e ricadono nella classe 1 (cancerogeni certi) dell'International Agency for Research on Cancer (IARC).

La presenza di numerose tipologie di sorgenti ha reso necessaria l'elaborazione di una loro classificazione in base a criteri univoci. In particolare, nell'ambito del progetto europeo CORINAIR è stata adottata una nomenclatura unica ed uguale per tutti detta SNAP97 (Selected Nomenclature for Air Pollution activities). Tale classificazione si basa sulla ripartizione in undici macrosettori delle attività antropiche e naturali responsabili delle emissioni in atmosfera degli inquinanti monitorati.

Macrosettore	Codice SNAP
Centrali elettriche pubbliche, cogenerazione, teleriscaldamento	01
Combustione - terziario ed agricoltura	02
Combustione - industria	03
Processi produttivi	04
Estrazione e distribuzione di combustibili fossili	05
Uso di solventi	06
Trasporti stradali	07
Altre sorgenti mobili	08
Trattamento e smaltimento rifiuti	09
Agricoltura	10
Natura	11

## Capitolo 4

# Elaborazione dati di INPUT

Si presenta nel seguito il modo con cui sono stati riperti e elaborati i dati di input necessari a SIRANE per il caso studio della città di Aosta andando a descrivere i procedimenti e i ragionamenti seguiti. Per la preparazione dei dati sono stati utilizzati diversi strumenti:

- QGIS per il trattamento dei dati georeferenziati
- Python per elaborazione dei dati di input, per l'analisi dei risultati di SIRANE e per la creazione di mappe e diagrammi

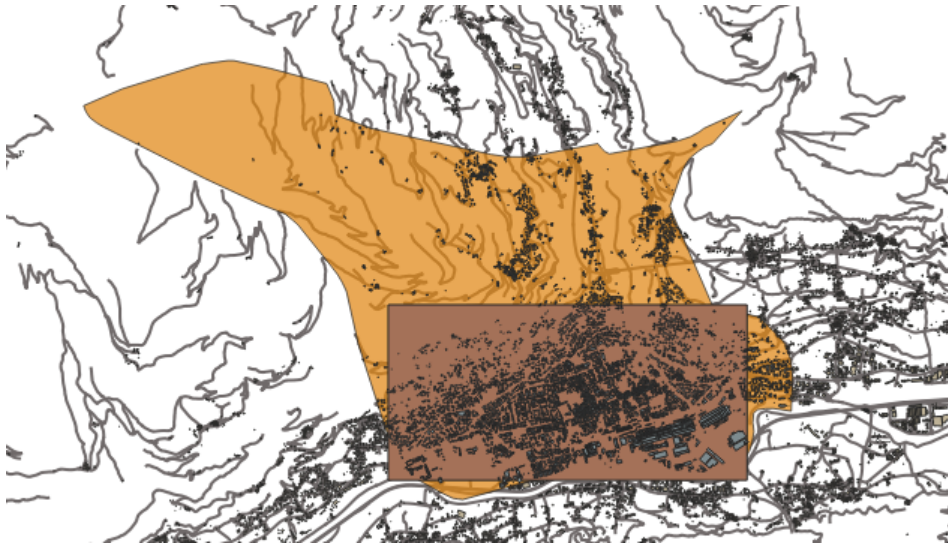
### 4.1 Scelta del dominio di studio

Si procede pertanto con una descrizione del dominio di interesse del caso studio. Ci si concentra sulla città di Aosta dal momento che risulta il capoluogo della regione e dove si trova più di un quarto della popolazione dell'intera regione. Il comune di Aosta si estende in un'ampia pianura di  $21 \text{ km}^2$  al centro della regione alpina, circondata da alte montagne tra cui il Grand Combin e il Mont Vélan a nord, il Mont Emilius e la Becca di Nona a sud e la Testa del Rutor a ovest. La città è sorta alla confluenza del fiume Dora Baltea con il torrente Buthier e delle due storiche vie di comunicazione che conducevano in Francia e in Svizzera attraverso i valichi alpini del Piccolo San Bernardo e del Gran San Bernardo, e oggi anche tramite i trafori del Monte Bianco e del Gran San Bernardo. Va ricordato inoltre che Aosta è punto di transito della Via Francigena, l'antica via di pellegrinaggio da Canterbury a Roma che, nel tratto valdostano, scende dal Gran San Bernardo e prosegue, lungo la valle centrale, fino a Pont-Saint-Martin.

Aosta per natura e conformazione territoriale accoglie gli abitanti della regione Valle d'Aosta, si noti che il 75 % popolazione valdostana si concentra nei 28 comuni che formano la valle centrale non montana, mentre nei restanti comuni di media

e alta montagna si distribuisce la rimanente popolazione. Inoltre, più della metà della popolazione regionale si concentra nei 9 comuni di ampiezza demografica pari o superiore a 3.000 residenti e nel capoluogo. Questo dato risulta essere un ulteriore motivo valido per scegliere la città di Aosta come caso studio.

Partendo dai confini reali del comune di Aosta, area di colore ocra e considerando la zona con più edifici si è scelto come area di studio il dominio rettangolare di colore marrone, ovvero ci si concentra dove c'è la maggiore concentrazione di edifici. Tale scelta è stata inoltre dettata dal fatto che al di fuori del dominio marrone gli edifici si trovano ad una quota diversa in virtù dell'orografia del territorio in modo da semplificare la trattazione.



**Figura 4.1:** Rappresentazione su QGIS dei confini del comune di Aosta, in ocra e del dominio di interesse in marrone.

L'area scelta, oltre agli edifici della città di Aosta, contiene anche le arterie stradali principali ovvero la statale SS26 che rappresenta la strada principale per attraversa la Valle d'Aosta da Est a Ovest e viceversa, la statale SS27 che collega Aosta al colle del Gran San Bernardo che corrisponde al confine con la Svizzera ed infine l'autostrada E25 che collega la Valle d'Aosta a Ovest con la Francia tramite il Traforo del Monte Bianco e a Est con il Canavese.

## 4.2 Geometria Urbana

Il modello SIRANE modella ogni tratto stradale come una cavità di una sezione rettangolare caratterizzata dalla propria lunghezza  $L$ , dalla propria larghezza  $W$ , dalla sua altezza  $H$ , da una rugosità aerodinamica  $z_{0,build}$  e da un tasso di rilascio

di massa di inquinante  $Q_S$ . Il campo di vento nelle singole strade è calcolato in funzione dell'intensità e della direzione del vento nell'atmosfera esterna, adottando un modello analitico sviluppato su basi teoriche e validato mediante simulazioni numeriche. Per riuscire ad ottenere questo tipo di dati è necessario ricavare il reticolo stradale e l'insieme della totalità degli edifici della città di Aosta. Questi dati sono disponibili sul geoportale della regione Valle d'Aosta in formato shapefile. (sito: <https://geoportale.regione.vda.it> ) I file di partenza riferiti all'intero territorio regionale sono stati elaborati per adattarli al dominio di studio. Nello specifico sono stati utilizzati due shapefile:

- *viabilità.shp* che rappresenta tutte le strade e ad ogni strada è associato un ID differente, il nome della strada, la tipologia e la lunghezza
- *edifici.shp* che rappresenta la totalità degli edifici e associa ad ognuno di questi un ID, la sua altezza e la sua superficie.

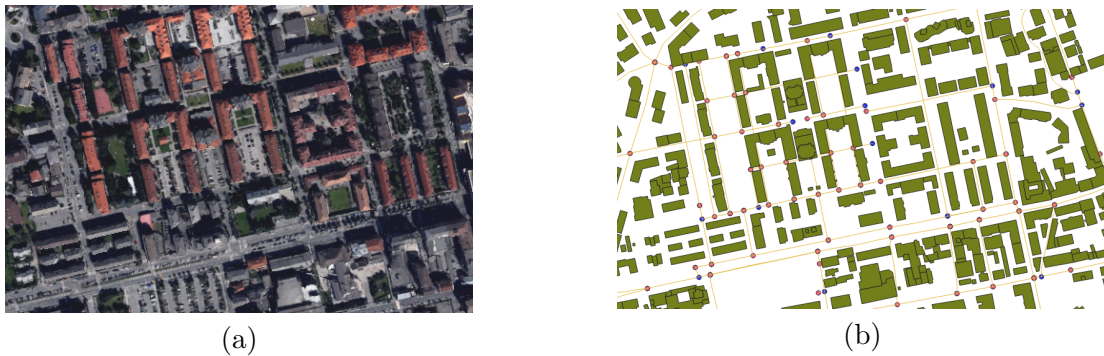
Il primo file *viabilità.shp* rappresenta tutte le strade della Regione e ad ogni strada è associato un ID differente, il nome della strada, la tipologia e la lunghezza. Il file *edifici.shp* racchiude tutti gli edifici della Regione e associa ad ogni edificio un ID, la sua altezza e la sua superficie.

#### 4.2.1 Creazione del grafo stradale della città di Aosta

A partire dal file *edifici.shp* Il primo passo è stato quello di delimitare un dominio più piccolo che comprendesse la città di Aosta e parte dei suoi dintorni, il criterio utilizzato per tale scelta è quello descritto nella sezione 4.3. Questo dominio è stato suddiviso a sua volta in due sottodomini: uno rappresentante il centro storico pedonale di Aosta e l'altro tutto ciò che si trova fuori dal primo. Questa suddivisione è stata dettata da due motivazioni: la prima concerne le emissioni da traffico assenti nel centro storico mentre la seconda invece è legata alla geometria urbana delle vie pedonali. L'approccio utilizzato per ottenere la larghezza delle strade ha suggerito questa divisione per evitare di arrivare alla situazione in cui la larghezza delle vie del centro storico avessero la stessa larghezza di quelle urbane e extraurbane.

Un'ulteriore informazione richiesta da SIRANE è la presenza di due colonne , NDDEB e NDFIN, che indicano rispettivamente il nodo iniziale e il nodo finale di ogni arco stradale. Questa informazione non è presente nel file di partenza ed è pertanto stata ottenuta attraverso un'elaborazione su QGIS. I nodi sono stati ottenuti considerando l'intersezione degli archi stradali e sono stati numerati in modo che ogni nodo avesse un numero a lui associato, in questo modo il grafo ha tutti gli attributi richiesti dal modello SIRANE. Dal momento che SIRANE è stato concepito per un uso urbano, sono state trascurate i tratti stradali in rosso dal momento che sono fuori da tessuto urbano e sulla collina che circonda Aosta.





**Figura 4.2:** a) Geometria reale su Google Earth. b) Geometria urbana con edifici e grafo del reticolo stradale su QGIS.



**Figura 4.3:** Reticolo stradale finale in colore verde chiaro, in rosso ci sono le strade trascurate.

#### 4.2.2 Caratterizzazione dei box stradali

Nel seguito vengono descritte le operazioni che sono state eseguite per ottenere i dati necessari per la caratterizzazione del Canyon Urban. Le operazioni sono le medesime per il dominio del centro storico e quello fuori dal centro storico, l'unica differenza consiste nella diversa dimensione del buffer che sarà minore per le strade del centro storico.

Per il calcolo della larghezza della strada si considera il file `viabilità.shp` e si procede con un'operazione di buffering in modo che il buffer ottenuto riesca a intersecare gli edifici. Gli strumenti di QGIS permettono il calcolo immediato dell'area e del perimetro per tutti i buffer, mentre non esiste una funzione che possa fornire direttamente la larghezza delle strade. Coerentemente all'osservazione di sopra si noti che per il sottodominio del centro città si è utilizzato un buffer

più piccolo. Il calcolo della larghezza della strada in entrambi i domini è stato realizzato considerando la seguente formula approssimata:

$$W = \frac{2 * Area}{Perimetro} \quad (4.1)$$

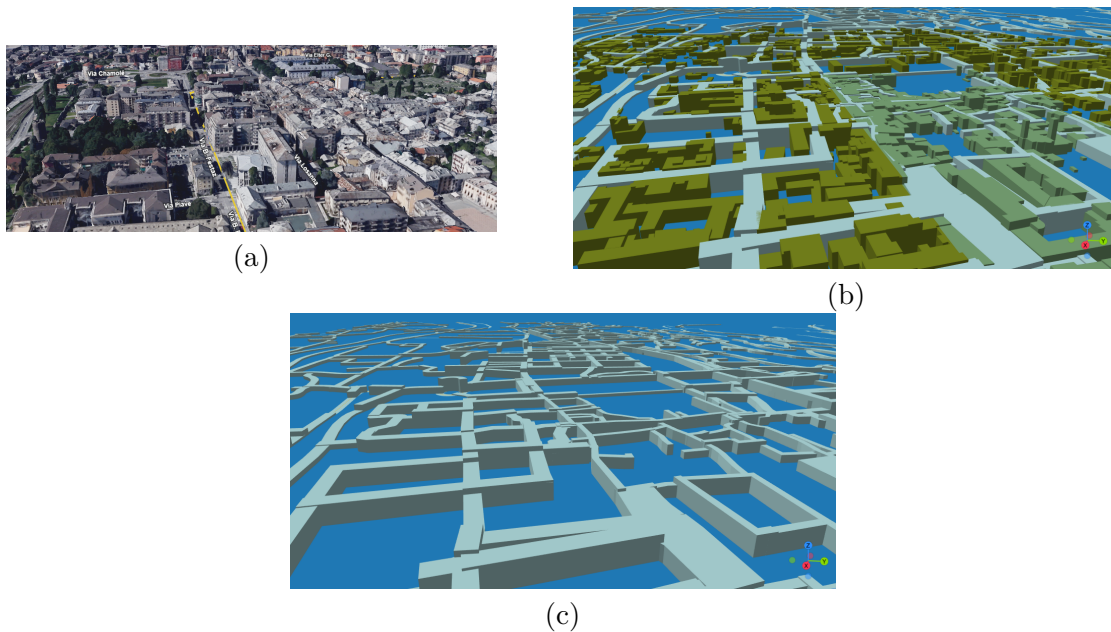
Si è giunti a questa considerando le strade come dei rettangoli di cui si conoscono l'area e il perimetro calcolati con QGIS. Considerando l'area pari  $A = L * W$ , dove  $L$  rappresenta la lunghezza del rettangolo e  $W$  la larghezza che è la nostra incognita. Il perimetro di un rettangolo è noto essere pari a  $P = 2(L + W)$ . Dall'espressione dell'area si nota che la larghezza può essere calcolata come  $W = \frac{A}{L}$ , mentre la lunghezza  $L$  può essere calcolata come  $L = \frac{Perimetro}{2} - W$ . Sotto l'ipotesi che  $W \ll L$  allora si può approssimare la lunghezza come segue  $L \simeq \frac{Perimetro}{2}$  grazie alla quale si trova la formula (6). L'approssimazione risulta sensata in virtù del fatto che la proporzione tra la lunghezza della strada e la sua larghezza è pari a 1:10. La larghezza della strada è pari al 10% della lunghezza della strada. La validità della formula approssimata è stata confermata inoltre andando a considerare come campione alcune strade e usando gli strumenti di misura di Google Earth.

L'altezza media richiede un passaggio preliminare ulteriore dal momento che gli edifici che si affacciano sulla stessa strada non hanno degli ID che possano essere confrontati fra loro per farne delle statistiche. Per ovviare a questo problema è stata eseguita una intersezione tra il layer delle strade e quello degli edifici, ottenuta questa intersezione è stata fatta una media sull'altezza usando come chiave l'ID della strada. Si ottiene pertanto l'altezza del canyon urbano che è pari alla media delle altezze degli edifici attorno alla strada.

A questo punto si uniscono i due layer dei due sottodomini per ottenere un unico layer finale che contenga tutte le grandezze che definiscono i canyon urbani in modo da descrivere le strade come richiesto dal modello SIRANE, corrispondente alla immagine 6.c) qui riportata.

Variabile	Descrizione	Type	Unità di misura	Min	Max
<b>ID</b>	ID dell'arco stradale	stringa	-	-	-
<b>TYPE</b>	Tipo di strada	intero	-	0 = canyon urbano	1 = strada a terreno aperto
<b>NDDEB</b>	ID nodo inizio	stringa	-	-	-
<b>NDFIN</b>	ID nodo fine	stringa	-	-	-
<b>WG</b>	Larghezza sinistra della strada	double	m	> 0	-
<b>WD</b>	Larghezza destra della strada	double	m	> 0	-
<b>HG</b>	Altezza sinistra della strada	double	m	> 0	-
<b>HD</b>	Altezza della strada	double	m	> 0	-
<b>MODUL_EMIS</b>	Modulazione emissione	intero	-	0	-

**Tabella 4.1:** Dettaglio della struttura degli attributi del reticolo richiesto da SIRANE.



**Figura 4.4:** a) Rappresentazione 3D degli edifici su Google Earth. b) Geometria urbana con edifici e canyon urbani su QGIS. c) Canyon urbani su QGIS nel formato richiesto da SIRANE.

## 4.3 Emissioni

Concentriamo ora l'attenzione sulla gestione delle emissioni, come indicato sopra SIRANE considera tre macro categorie di emissioni: puntuali, lineari e superficiali. Le sorgenti puntuali sono riferite ai camini di industrie, quelle superficiali al riscaldamento degli edifici ed infine quelle lineari considerano le emissioni dei veicoli lungo le strade.

### 4.3.1 Emissioni puntuali

Nella città di Aosta è presente un'industria siderurgica con diversi punti di emissione afferenti ai vari reparti produttivi. Ai fini di questo studio si è deciso di considerare un solo punto di emissione corrispondente al camino con l'emissione continua tutto l'anno. Si noti che la città di Aosta presenta al suo interno una fabbrica siderurgica che rappresenta la principale sorgente emissiva puntuale del caso studio in esame. Tale fabbrica concentra la propria produzione su acciai inossidabili lunghi e leghe nichel.

### 4.3.2 Emissioni lineari

SIRANE richiede di assegnare ad ogni arco stradale un valore orario di emissione per ogni inquinante. Per ogni arco l'emissione totale è il prodotto tra un fattore di emissione dipendente dal tipo di veicolo e il numero di veicoli circolanti, oltre la lunghezza del tratto stradale. Per calcolare questo valore è stato necessario reperire le informazioni sulle caratteristiche dei veicoli circolanti nella città di Aosta e sui flussi di veicoli. I dati del parco macchine fanno riferimento al dato ACI del 2023, i flussi invece provengono da elaborazione di dati di campagne effettuate da ARPA Valle d'Aosta con contatraffico posizionati in arterie stradali significative.

#### Calcolo dei fattori di emissione

I fattori di emissione sono stati calcolati per mezzo di uno script Python a partire dal parco veicolare del 2023 della città di Aosta e dai fattori di emissione nazionali forniti da ISPRA relativi al trasporto stradale. Sono stati considerati i seguenti inquinanti:

*CO | NOx | NO | NO2 | PM2.5 | PM10 | PM exhaust | CO2*

I fattori di emissione sono espressi in grammi di inquinante emesso per ogni chilometro di strada e per ogni veicolo. Lo script determina, per ogni inquinante considerato, un fattore emissivo medio per i veicoli leggeri e uno per quelli pesanti. Questo fattore medio è calcolato a partire dalla composizione del parco veicolare (categoria, alimentazione e tipologia EURO).

#### Flusso veicolare

A questo punto è stato possibile completare le informazioni del grafo stradale associando ad ogni arco stradale un valore di traffico giornaliero medio (TGM). Nella tabella seguente sono riportati gli attributi associati ad ogni arco stradale:

<b>Idno</b>	ID strada
<b>Tail</b>	Nodo finale
<b>Head</b>	Nodo iniziale
<b>Leng</b>	Lunghezza tratto
<b>Lane</b>	Num. corsie
<b>Capa</b>	Capacità
<b>Mfwl</b>	Num. veicoli leggeri / giorno (media)
<b>Mfwp</b>	Num. veicoli pesanti / giorno (media)
<b>Hier</b>	Gerarchia delle strade

**Tabella 4.2:** Attributi del reticolo stradale.

Chiaramente non tutte le strade sono trafficate allo stesso modo e non sono uguali, sussiste una gerarchia che ne determina delle differenze sostanziali. Risulta pertanto necessario procedere con una classificazione delle strade e quella utilizzata è qui riportata nella tabella seguente si noti che il numero più piccolo corrisponde al livello gerarchico maggiore. I tipi di strada( SCP= strada comunale pedonale, SC, SR , SS e E25) sono presenti nel file shape delle strade e sono utilizzati per la loro classificazione.

Tipo di strada	Gerarchia
SCP	5
SC	4
SR	3
SS	2
E25	1

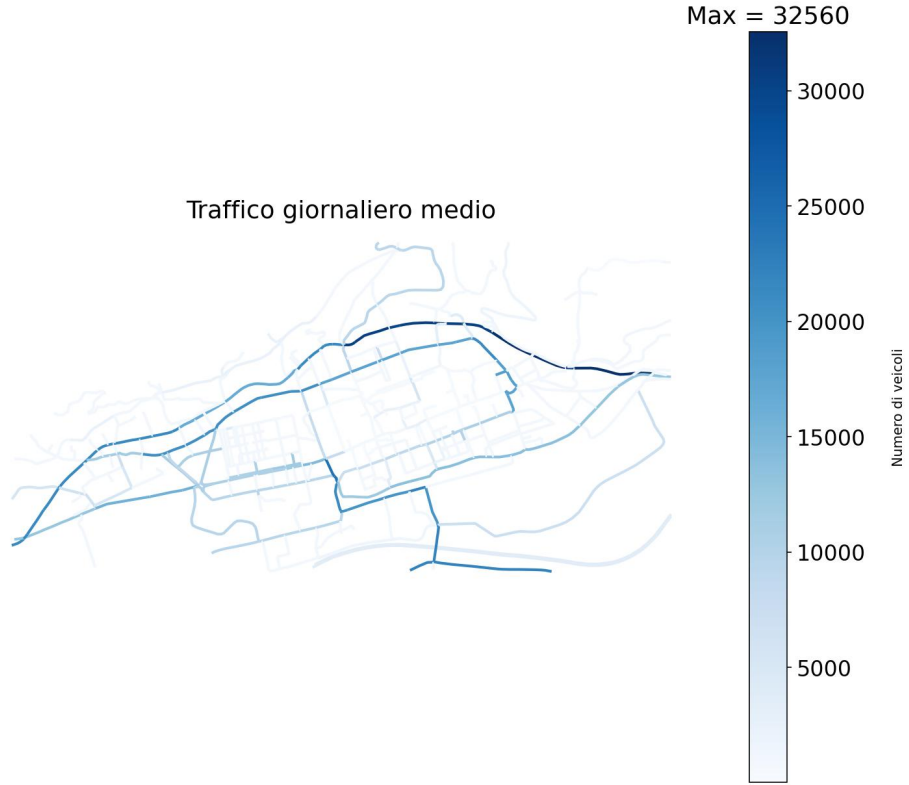
L'obiettivo del modello è quello di restituire per ogni tratto stradale la concentrazione oraria dell'inquinante e per fare questo bisogna fornire in INPUT le informazioni sul traffico veicolare su ogni tratto stradale. Si noti che per le colonne *Mfwl* e *Mfwp* i dati sono stati presi da un lavoro svolto in precedenza da ARPA Valle d'Aosta utilizzando il modello CARUSO che aveva però utilizzato un grafo meno dettagliato, i dati mancanti sono stati aggiunti per similitudine usando come chiave la tipologia della strada. Tale scelta è stata dettata dall'idea che verosimilmente, per il caso studio di Aosta, il traffico delle vie secondarie sia pressoché simile e proporzionale al tipo di strada.

Si fornisce come primo dato il grafo corrispondente al numero di veicoli giornalieri circolanti nel tessuto urbano, questa informazione risulta utile per visualizzare la distribuzione spaziale dei flussi veicolari. Come riportato dall'immagine si nota come gli assi stradali maggiormente battuti siano la statale SS 26 che permette gli spostamenti sull'asse Est-Ovest e le stradali regionali SR 18, SR 19 e SR 20 che costituiscono l'ingresso e l'uscita nella zona Sud della città. Le strade che presentano il colore più marcato corrispondono alle strade più trafficate, si nota pertanto come nel centro del dominio, ovvero il centro pedonale storico della città delimitato dalle mura romane, i colori tenui corrispondono ad un'assenza di traffico veicolare dovuta alle limitazioni della città.

Si mostrano ora alcune mappe rappresentanti le emissioni lineari dovute dal traffico, si nota come i valori maggiori siano legati alle strade con un maggiore flusso veicolare.

### **Calcolo delle emissioni**

Avendo ora la struttura del grafo del reticolo stradale contenente tutte le informazioni necessarie si procede al calcolo dei coefficienti di emissione per gli inquinanti.



**Figura 4.5:** Traffico giornaliero medio.

Una volta che sono stati calcolati i fattori emissivi e determinati i flussi, si procede con il calcolo dell'emissione giornaliera per l'inquinante  $i$ -esimo, per il tratto stradale  $j$ -esimo per veicoli pesanti e leggeri tramite la formula corrispondente alla metodologia Tier 2 di COPERT:

$$\begin{aligned} E_{ijL} &= L_j Q_{jL} E_{f,iL} \\ E_{ijP} &= L_j Q_{jP} E_{f,iP} \end{aligned} \quad (4.2)$$

dove:

- $Q_j$  è il flusso di traffico lungo il segmento  $j$  ;
- $E_{ijL}$  e  $E_{ijP}$  sono i fattori di emissioni medi per l'inquinante  $i$  per veicoli leggeri e pesanti;
- $L_j$  è la lunghezza del segmento.

Il risultato che si ottiene è un file di tipo csv in cui ad ogni arco stradale, con il proprio ID, vengono associate le emissioni totali giornaliere di ogni inquinante. Nell'immagine seguente se ne fornisce un esempio:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	ID	CO2l	CO2p	COl	COp	NOxl	NOxp	NOl	NOp
2	3781.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	3782.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	4218.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	4219.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	3937.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	4220.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	2856.0	2572.0940044329254	10241.544693458824	17.182934320041618	17.66754993462421	3.33950238614263	71.5345648486268	2.5161184144495743	63.13032848243031
9	2858.0	13456.939785636063	53582.74231589033	89.89940184410915	92.43486249732688	17.471944045146675	374.26172220011193	13.164081071073849	330.2915941529866
10	2845.0	945.6227957473991	3765.2737843598616	6.317255264721183	6.495422770082429	1.2277582301994963	26.299472370818677	0.9250435347241082	23.20967958912879
11	2846.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	2850.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	2855.0	4764.484086265742	18971.187144274685	31.829247679941346	32.726937803107624	6.19601262138977	132.5088800222018	4.66079627110993	116.94107792984121
14	2859.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	2864.0	1709.390538510676	6806.456456342827	11.419653747765217	11.741725776687469	2.219409108437551	47.541353901095306	1.6721940820012724	41.955959257271275
16	2865.0	3600.640645345866	14337.00402506255	24.054164277207583	24.73257131685233	4.674925568836543	100.14029864273266	3.522281151449489	88.37518343552885
17	2867.0	1382.0640860923525	5503.092454064413	9.232911540746345	9.493310202428166	1.7944158749069559	38.437690388119606	1.3519867045967735	33.92183939949592
18	2870.0	1272.95376306114	5068.6377866382745	8.503997471740055	8.743838344341732	1.652751463730091	35.40313588379437	1.245250912128607	31.24379944690414
19	2876.0	2025.0875872005838	8063.478627429118	13.52864512075675	13.910197686084219	2.629291471442613	56.3213316002763	1.981016308209167	49.704421520103494
20	2877.0	2655.0178495984665	10571.73024070269	17.736909012486397	18.237148546769898	3.447167338637047	73.84082627191397	2.597237616725381	65.16563884640006
21	2879.0	1200.21354848622	4779.001341687516	8.018054759069194	8.244190438950776	1.5583085229455145	33.38009954757755	1.1740937171498296	29.458439478509618
22	2880.0	2036.7260216097827	8109.8204586212405	13.606395954784087	13.990141350946772	2.6444023419681457	56.645017414071	1.9924014594057715	49.990079115046626
23	2883.0	1563.914623736083	6227.183566441309	10.447768322423496	10.742429965905556	2.0305232268683975	43.49528122866166	1.5298796920437174	38.38523932048223
24	3812.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	2885.0	1272.95376306114	5068.6377866382745	8.503997471740055	8.743838344341732	1.652751463730091	35.40313588379437	1.245250912128607	31.24379944690414
26	2886.0	3964.341726033327	15785.186249816341	26.483877840561885	27.230810843807106	5.147140272759426	110.25548032381677	3.878067126343764	97.30211827750146

Figura 4.6: File di tipo csv contenente le emissioni totali giornaliere.

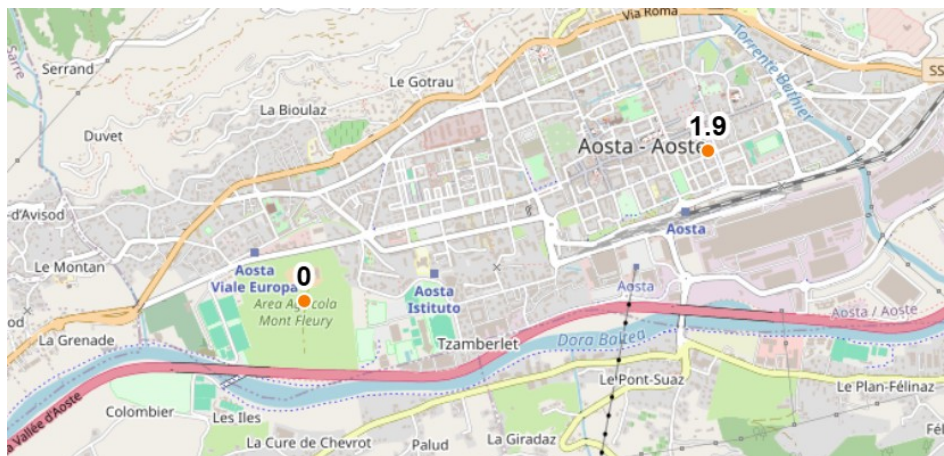


Figura 4.7: Stazione meteorologica scelta per la città di Aosta.

### 4.3.3 Emissioni superficiali

Relativamente alle emissioni superficiali, nel caso in esame derivanti dagli impianti di riscaldamento domestico, il modello SIRANE richiede che queste siano distribuite su un grigliato che ricopre l'intero dominio di calcolo.



Il dato di partenza è stato ricavato dall'inventario regionale delle emissioni in atmosfera (gestito da ARPA Valle d'Aosta) e corrisponde al totale annuo di emissione di ogni inquinante nel comune di Aosta.

Per questo lavoro è stato scelto un grigliato con celle di 520m di lato, per un totale di 32 celle. Ogni cella ha un proprio ID che permette di distinguerla l'una dall'altra. Il dato di emissione del singolo inquinante riferito ad ogni cella è stato calcolato a partire dal totale annuo di emissione dell'intero dominio, suddiviso sulle diverse celle del grigliato in base alla percentuale di edificato presente. Il dato a disposizione è riferito a tutta l'area del comune di Aosta ma sarebbe un errore distribuire uniformemente questo dato perché vorrebbe dire che ogni cella ha un fattore di emissione costante il che non corrisponde alla realtà, bisogna pertanto capire quanti siano gli edifici e la loro superficie per poi procedere con la distribuzione del dato in base alla percentuale di edificato.

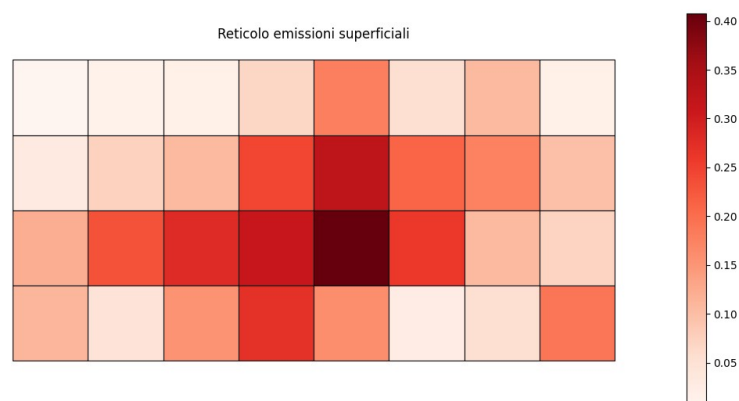
Inoltre come si evince dall'immagine in una cella ricadono più edifici e alcuni sono ritagliati dai bordi delle celle, è necessario procedere con un'elaborazione per tenere traccia della percentuale di edificato su ogni cella. Si calcola pertanto l'area occupata dai singoli edifici e si calcola il rapporto tra la somma delle aree degli edifici e tra l'area totale della cella. Si procede con una seconda proporzione andando a considerare questi rapporti ottenendo il rapporto di edificato totale. Questo numero sarà pertanto utilizzato per distribuire in modo coerente le emissioni superficiali. Come indicato nell'immagine che segue si ha che le celle più colorate risultano essere le celle con maggiore edificato e pertanto maggiore emissione.



**Figura 4.8:** Reticolo delle emissioni superficiali.

Come risultato finale si ottiene un dataframe con 32 righe corrispondenti alle 32 celle con i valori emissivi annui per ogni cella.





**Figura 4.9:** Reticolo delle emissioni superficiali colorato in base al valore emissivo proporzionato rispetto all'edificato.

NO <sub>x</sub>	CO	COV	SO <sub>2</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>25</sub>	CO <sub>2</sub>
31.2536	526.7517	59.9924	7.7345	21.6717	21.1276	38745.6232
0.002943177	0.049604462	0.005649533	0.000728364	0.002040841	0.001989603	3.648707336

**Tabella 4.3:** Dati relativi alle concentrazioni di inquinanti totale annuo e totale annuo per cella.

#### 4.3.4 Modulazione temporale

In virtù del fatto che SIRANE richiede dati in ingresso di tipo orario risultano essere necessarie le modulazioni per tutte e tre le classi di emissioni.

##### Emissioni puntuali

Le emissioni puntuali a disposizione per il lavoro seguente sono già fornite con passo orario quindi non è necessaria alcuna modulazione di tipo orario. Il file che racchiude queste emissioni è un file di tipo *.dat* il cui numero di righe è pari al numero di ore della simulazione oraria.

##### Emissioni lineari

Le emissioni lineari che vengono fornite in ingresso a SIRANE sono le emissioni lineari giornaliere e vengono modulate dal modello stesso attraverso un file che contiene le modulazioni orari per ogni giorno dell'anno, come riportato nella figura che segue.

### Emissioni superficiali

Per quel che riguarda le emissioni superficiali la modulazione temporale è stata realizzata facendo uso dei dati in possesso di ARPA Valle d'Aosta. Partendo da un dato totale annuo sono pertanto necessarie tre modulazioni: la prima mensile, la successiva è quella giornaliera ed infine quella oraria. Per la prima e per l'ultima si considerano i coefficienti presenti nelle tabelle seguenti, per quella giornaliera invece si considerano il numero di giorni del mese. La modulazione oraria è stata eseguita usando i coefficienti già in possesso di ARPA Valle d'Aosta mentre i coefficienti per la modulazione mensile sono stati concordati con la dottoressa Tiziana Magri ragionando sui mesi in cui viene utilizzato maggiormente il riscaldamento.

Ora	Frazione	Ora	Frazione
1	0.0	13	0.0678
2	0.0	14	0.0678
3	0.0	15	0.0
4	0.0	16	0.0339
5	0.0	17	0.0339
6	0.0	18	0.0678
7	0.0847	19	0.0847
8	0.0847	20	0.0847
9	0.0847	21	0.0847
10	0.0339	22	0.0847
11	0.0	23	0.0339
12	0.0678	24	0.0

**Tabella 4.4:** Distribuzione della frazione di emissione in base all'ora.

Mese	Frazione	Mese	Frazione
Gennaio	0.25	Luglio	0
Febbraio	0.15	Agosto	0
Marzo	0.10	Settembre	0
Aprile	0.05	Ottobre	0.05
Maggio	0	Novembre	0.15
Giugno	0	Dicembre	0.25

**Tabella 4.5:** Distribuzione della frazione di emissione per mese dell'anno.

Dal momento che il dato che si vuole ottenere deve aver passo orario è necessario procedere con una elaborazione del dato in possesso. Questo trattamento è stato realizzato su QGIS con il fine di riuscire ad associare ad ogni edificio un fattore emissivo orario.

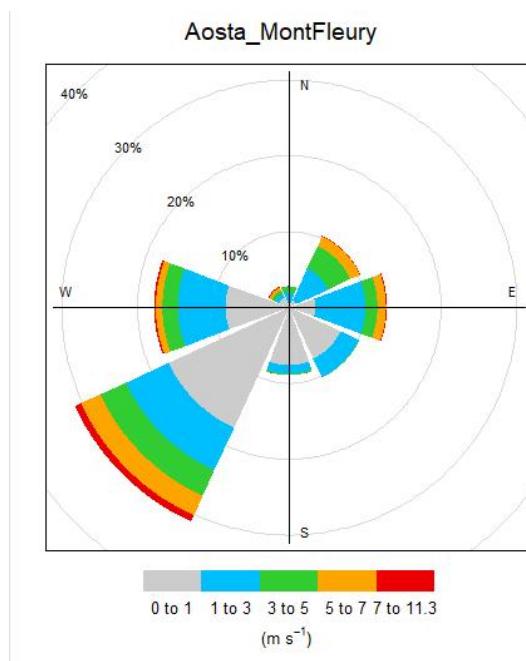
## 4.4 Dati meteorologici

Per i dati meteorologici si considera la stazione meteorologica di ARPA di Aosta Mont-Fleury, questa è situata in campo aperto e fornisce dati a cadenza oraria come richiesto da SIRANE. Nelle immagini che seguono si mostra la stazione e la sua ubicazione nel dominio di interesse.

I dati richiesti in ingresso da SIRANE sono la velocità e la direzione del vento, la temperatura, le precipitazioni e il cloud cover e sono reperibili dai seguenti siti <https://cf.regione.vda.it/it/mappa-dati-stazioni-periferiche> e scaricabili consultando il seguente link <https://presidi2.regione.vda.it/strdataviewdownload> e sono forniti sottoforma di file di tipo .csv, dopo un'elaborazione sono poi salvati nel formato .dat come richiesto dal programma.



**Figura 4.10:** Stazione meteorologica di Mont Fleury.



**Figura 4.11:** Distribuzione percentuale misurata nel periodo 2020-2024.



# Capitolo 5

## Scenari

Per il lavoro in questione sono stati considerati quattro casi studio in virtù delle caratteristiche meteorologiche e dei parametri di ingresso del modello. Le concentrazioni finali restituite dal modello sono ottenute considerando le emissioni superficiali, quelle lineari e quelle puntuali. Dal momento che per il caso della città di Aosta le emissioni superficiali sono rappresentate sostanzialmente dal riscaldamento degli edifici il primo scenario si pone l'obiettivo di considerare due settimane di un mese invernale e confrontarle con due settimane tipo di un periodo estivo durante il quale i riscaldamenti degli edifici non sono attivi. Questo primo scenario ha l'intento di comprendere l'influenza che hanno le emissioni superficiali sulle concentrazioni di inquinanti restituite dal programma.

I due scenari successivi prendono in considerazione due fenomeni meteorologici tipici delle zone alpine quali l'inversione termica e il *foehn* ovvero un vento secco e caldo. Questi scenari vogliono pertanto analizzare l'influenza di questi fenomeni sulle concentrazioni di inquinanti.

L'ultimo scenario invece pone la propria attenzione sui flussi veicolari: si vanno a ipotizzare delle riduzioni del traffico veicolare sugli assi principali della città e studiarne le conseguenze sulle concentrazioni calcolate dal programma.

**I risultati delle simulazioni sono fornite sia in formato di mappa, sia diagramma e per apprezzarli al meglio sono stati considerati dei tratti stradali nevralgici.**

Per gli scenari sono stati considerati questi tratti stradali:

1. Corso Battaglione;
2. Via Parigi;
3. Via Saint-Martin de Corléans;
4. Via 1° Maggio;

5. Via Roma;

6. Via Clavalité.

Si però noti che non sono stati utilizzati tutti per ogni simulazione ma sono stati scelti quelli più significativi in base allo scenario considerato.



**Figura 5.1:** Mappa della città di Aosta con le strade di interesse: 1) Corso Battaglione, 2) Via Parigi, 3) Via Saint-Martin de Corléans, 4a) Via Roma tratto aperto, 4b) Via Roma canyon urbano, 5) Via Clavalité e 6) Via 1° Maggio.

La scelta di queste strade è motivata dal loro ruolo strategico nella viabilità della città di Aosta. Si tratta infatti di punti nevralgici dal punto di vista del traffico e, allo stesso tempo, di aree frequentate da numerosi pedoni, elemento che rafforza ulteriormente la pertinenza della selezione. Un esempio significativo è il tratto di Corso Battaglione, configurato come un vero e proprio “canyon urbano”, in cui sono presenti una fermata dell’autobus e diverse attività commerciali, con un conseguente aumento dell’esposizione della popolazione al traffico veicolare.

Per maggiore chiarezza si riporta nel seguito un’immagine che rappresenta la posizione di questi segmenti stradali. Si noti inoltre che per Via Roma sono stati considerati due segmenti: il primo corrispondente ad un tratto considerato come strada aperta mentre il secondo come canyon urbano, per distinguerli sull’immagine verranno indicati rispettivamente come 4a) e 4b).

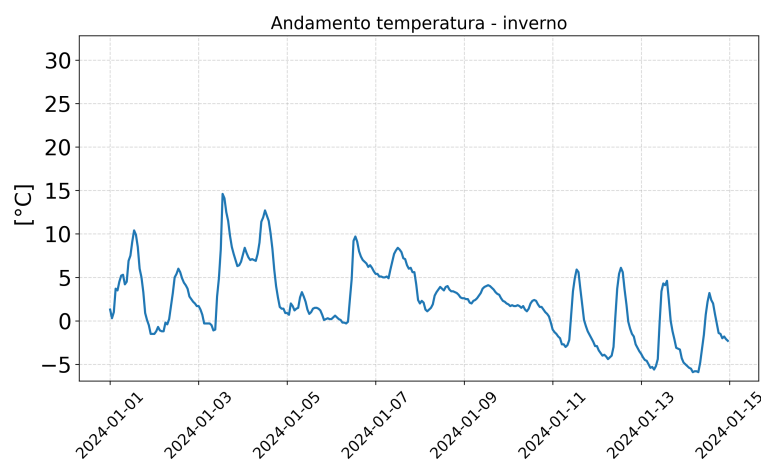
## 5.1 Scenario 1

In questo caso studio sono state considerate le prime due settimane del mese di gennaio dell’anno 2024 per lo scenario invernale e due settimane di luglio dello stesso anno per lo scenario estivo in modo da indagare l’influenza delle emissioni

superficiali, ovvero il riscaldamento, sulle concentrazioni restituite dal modello SIRANE.

L'attenzione verrà posta principalmente su due inquinanti:  $NO_2$  e  $PM_{10}$ . Per tutti i tratti stradali in esame sono state considerate e diagrammate le concentrazioni giornaliere medie e il giorno tipo per poter visualizzare l'andamento giornaliero delle concentrazioni dei vari inquinanti. I tratti stradali di Via Parigi e di Via Roma sono entrambi posti in corrispondenza della statale 26 e pertanto risultano quelli più trafficati e utilizzati per attraversa la città sull'asse Est-Ovest. Il tratto stradale di Via Clavalité rappresenta un altro accesso a Est per la città ed infine Via 1° Maggio rappresenta l'ingresso Sud della città che permette il collegamento dei comuni dell' *envers* della *plaine* alla città di Aosta.

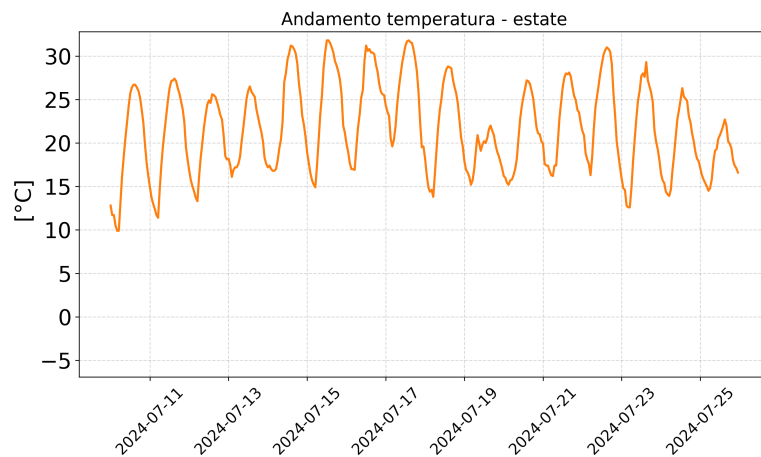
Prima di analizzare i valori delle concentrazioni ottenute tramite il modello SIRANE poniamo la nostra attenzione sulle condizioni meteo che variano tra le due settimane invernali e estive. Le due variabili meteo che cambiano sostanzialmente tra i due periodi sono la temperatura e la velocità del vento. Si osserva, come riportato nelle immagini sottostanti, che nel periodo invernali le temperature sono più rigide e presentano anche meno variabilità durante le ore del giorno. Le temperature estive invece sono maggiori e presentano maggiore variabilità, inoltre come indicato dall'andamento del giorno tipo si ha un andamento crescente fino alle prime ore del pomeriggio che risultano anche le più calde. Mediamente pertanto le temperature in inverno sono più costanti rispetto al periodo estivo.



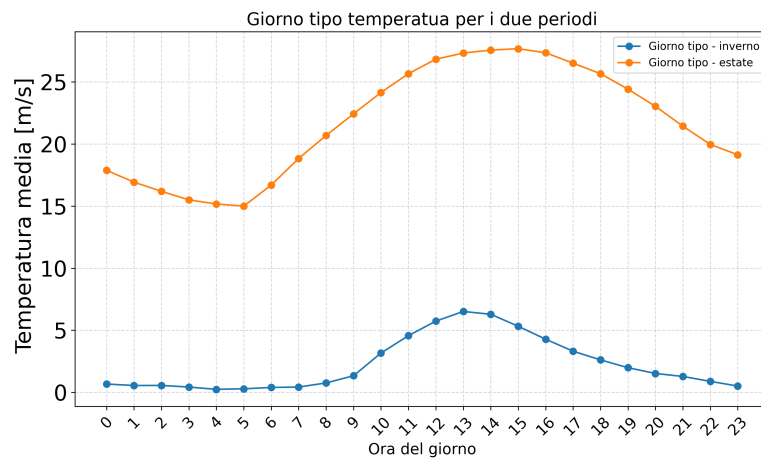
**Figura 5.2:** Confronto dei giorni tipo inverno-estate.

Per quel che riguarda il vento si nota come i valori durante il periodo invernale siano inferiori e mediamente presentino meno oscillazioni. Al contrario, durante il periodo estivo si notano dei valori maggiori e della maggiore variabilità di questi. L'andamento del giorno tipo dei due casi mostra un andamento simile durante le





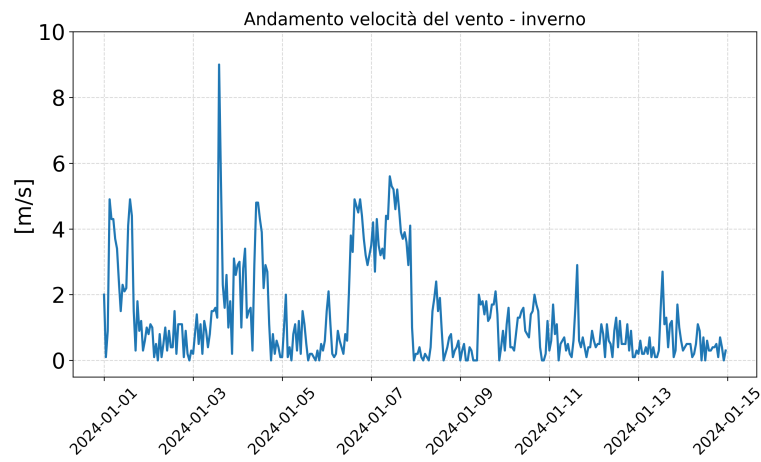
**Figura 5.3:** Confronto dei giorni tipo inverno-estate.



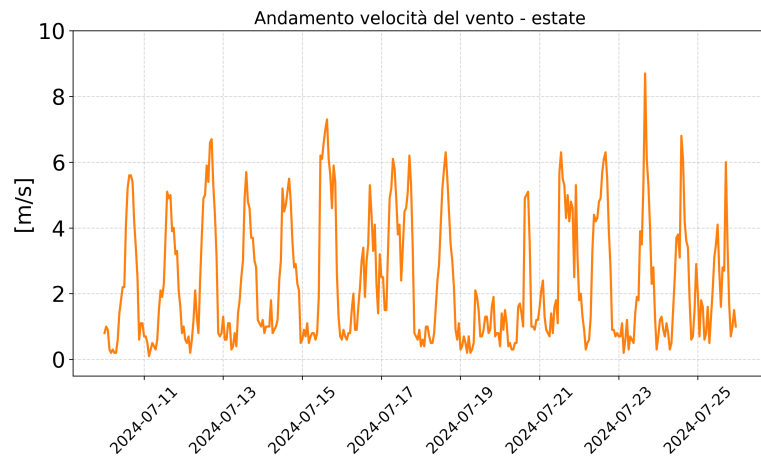
**Figura 5.4:** Confronto dei giorni tipo inverno-estate.

ore del giorno ma la sostanziale differenza è l'intensificazione del vento durante le ore serali estive che è una caratteristica della città di Aosta. Pertanto durante la stagione invernale e estiva l'andamento del vento presenta una crescita verso le ore serali ma durante l'estate questa crescita culmina in un picco che rappresenta il vento intenso delle ore serali estive.

L'immagine che segue mostra la distribuzione spaziale della concentrazione media di  $NO_2$  per la giornata del 01/01/2024. La distribuzione mostra delle concentrazioni maggiori sull'incrocio tra Corso Saint-Martin de Corléans e Corso XXVI febbraio, l'elevata concentrazione è dettata, non solo dal flusso veicolare, ma anche dalle caratteristiche geometriche del tessuto urbano, quella zona presenta

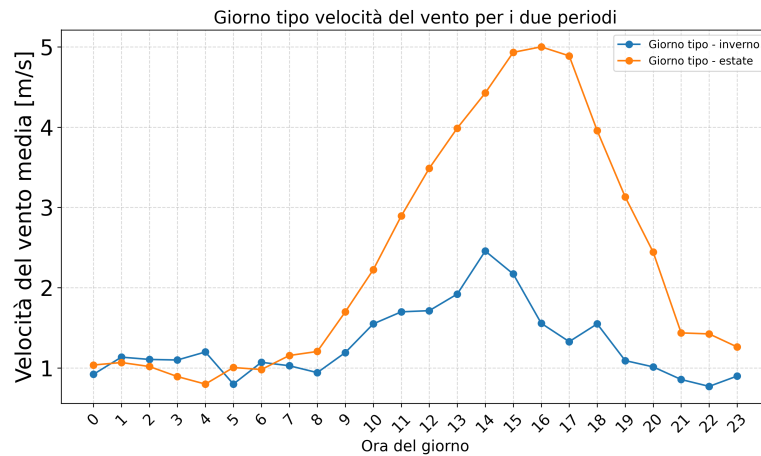


**Figura 5.5:** Confronto dei giorni tipo inverno-estate.

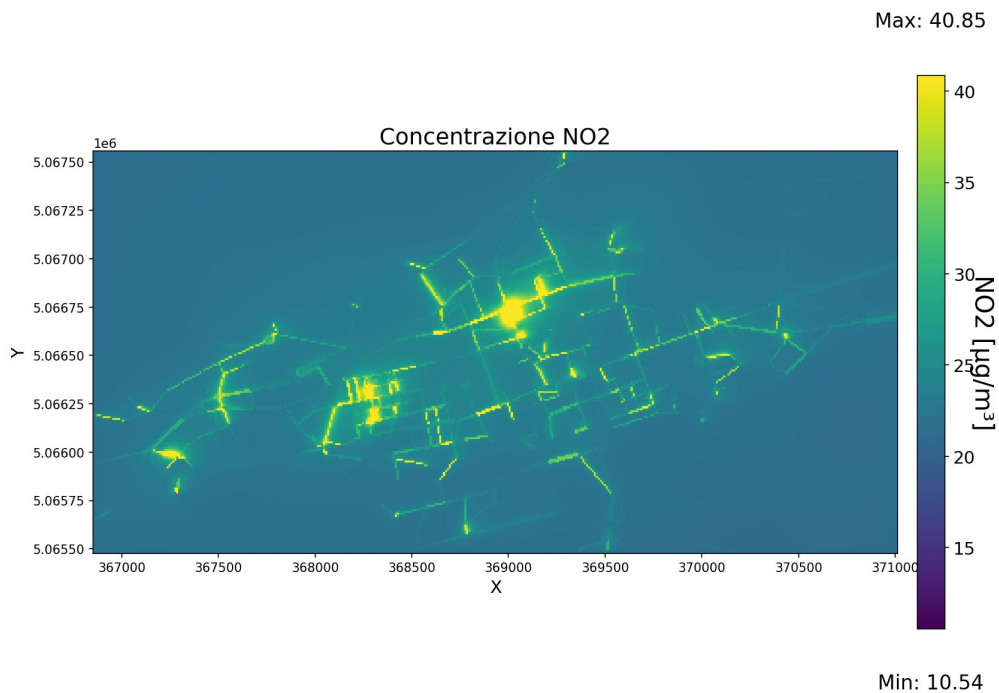


**Figura 5.6:** Confronto dei giorni tipo inverno-estate.

infatti diversi canyon urbani che trattengono maggiormente gli inquinanti rispetto ai tratti di strada aperti.

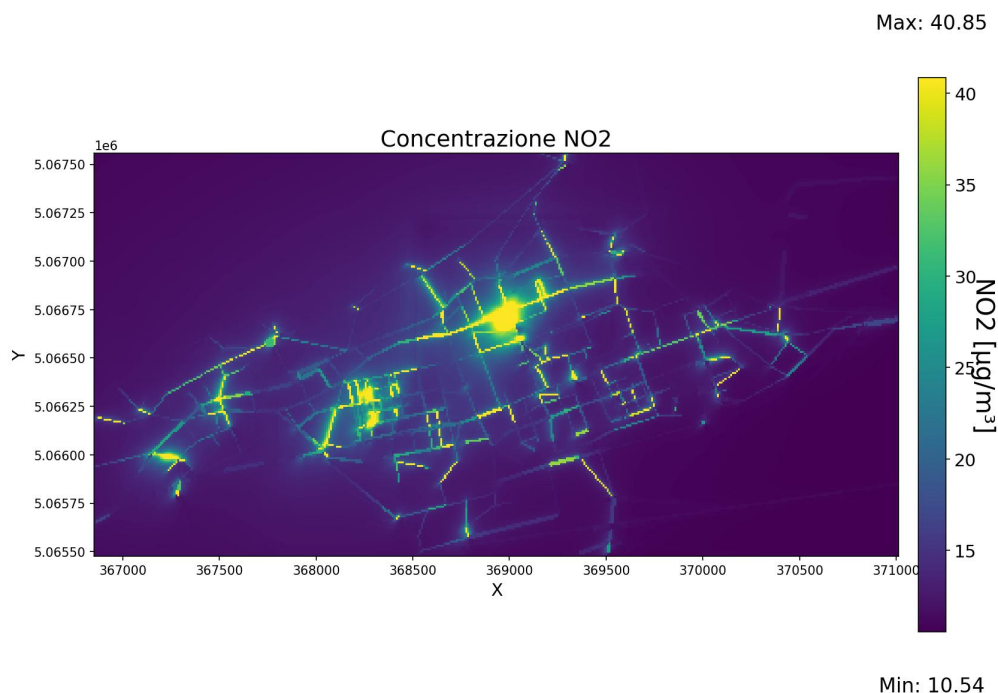


**Figura 5.7:** Confronto dei giorni tipo inverno-estate.



**Figura 5.8:** Concentrazione di NO2 per il giorno 01/01/2024

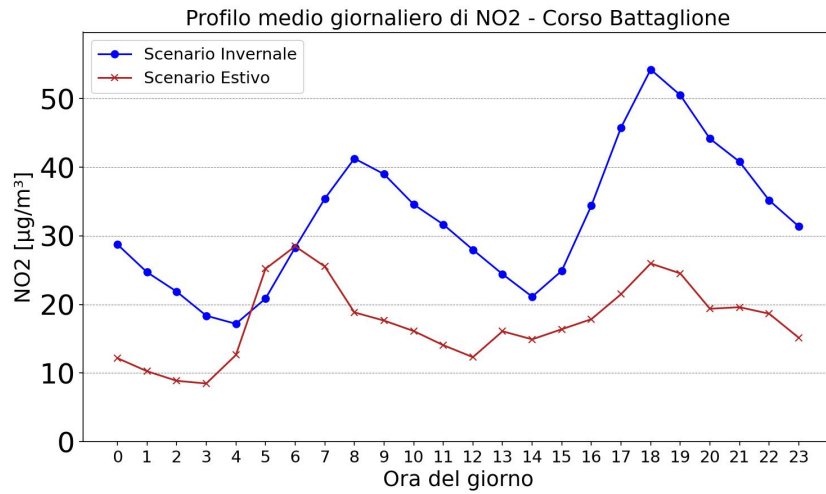
I livelli di biossido di azoto calcolati dal modello SIRANE per Corso Battaglione evidenziano dinamiche giornaliere e settimanali fortemente correlate ai pattern di mobilità urbana. Il profilo medio giornaliero mostra due picchi principali: uno nelle ore mattutine, tra le 8:00 e le 9:00, dove i valori raggiungono localmente oltre i



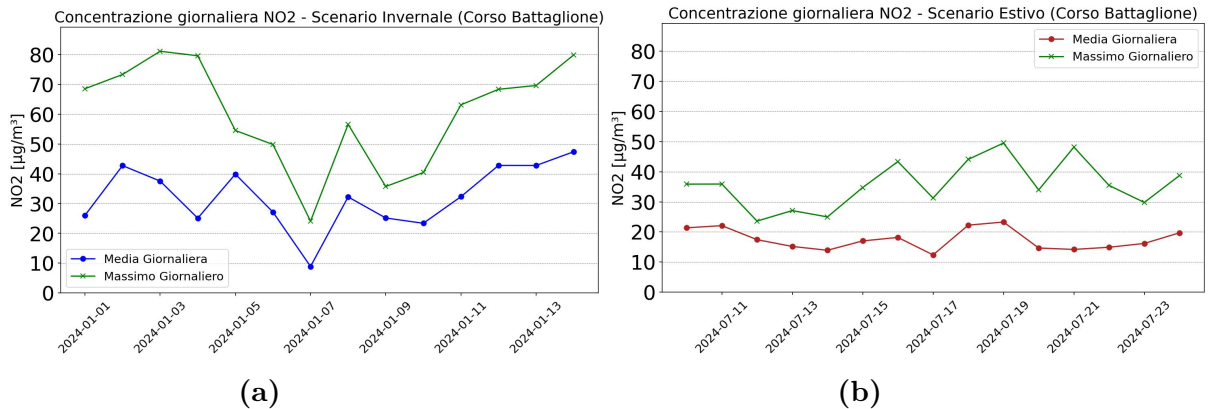
**Figura 5.9:** Concentrazioni di NO<sub>2</sub> per il giorno 10/07/2024

40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , e un secondo, più marcato, nelle ore serali tra le 18:00 e le 20:00, con concentrazioni che superano i 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Questi incrementi coincidono con le fasce orarie di maggiore traffico veicolare, confermando il ruolo prevalente delle emissioni da trasporto come sorgente dell'inquinante. La fase notturna e le prime ore del mattino, al contrario, presentano valori più contenuti, in alcuni casi inferiori ai 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , grazie alla riduzione della circolazione e alle condizioni atmosferiche più favorevoli alla dispersione. L'osservazione delle medie e dei massimi giornalieri nelle due settimane analizzate conferma inoltre una pronunciata variabilità intra-settimanale, con giornate caratterizzate da picchi superiori ai 70–80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , spesso associabili a condizioni meteorologiche stagnanti o a fenomeni di accumulo. Nel complesso, i dati mettono in evidenza un quadro in cui le dinamiche locali di traffico e la morfologia territoriale di Aosta influenzano in modo significativo la qualità dell'aria, rendendo necessario un monitoraggio continuo e un approccio integrato alle politiche di mitigazione.

Consideriamo ora il tratto stradale di Via Roma coincidente con la statale 26 e che permette l'attraversamento della città nella sua parte alta. L'obiettivo è confrontare due segmenti di tale strada ma che presentano caratteristiche geometriche urbane diverse: il primo corrisponde ad un tratto aperto mentre il secondo è un canyon urbano. I risultati sulle concentrazioni nei due tratti diversi mostrano

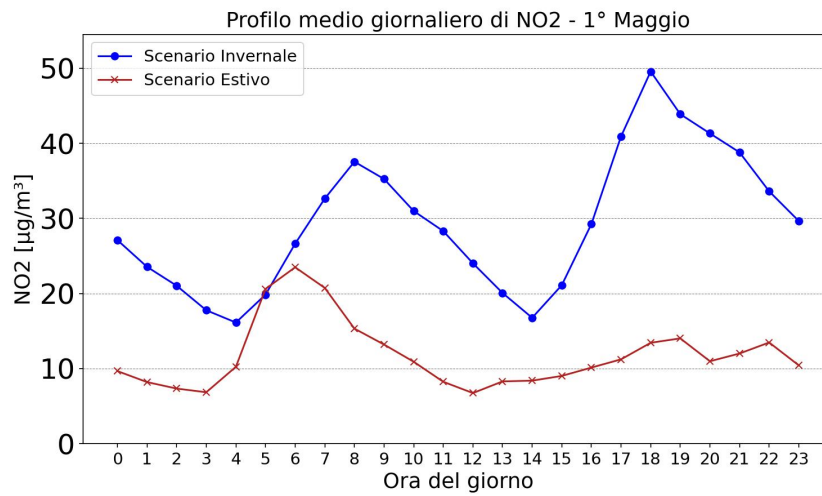


**Figura 5.10:** Giorno tipo confronto inverno-estate per Corso Battaglione.

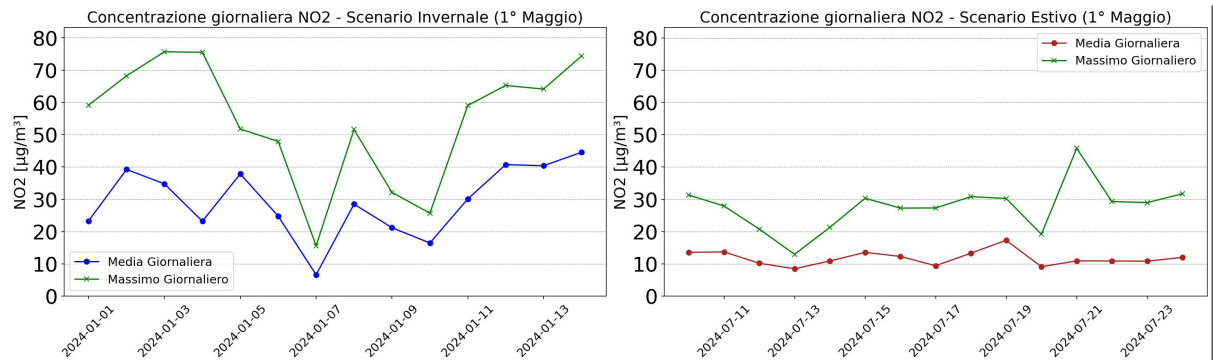


**Figura 5.11:** Confronto tra le concentrazioni di NO2 in Corso Battaglione nello scenario invernale(a) e quello estivo(b).

dei valori più elevati nel tratto di canyon questa condizione morfologica favorisce l'accumulo degli inquinanti prodotti dal traffico veicolare, riducendo la dispersione verticale e orizzontale e creando un microambiente più sfavorevole dal punto di vista della ventilazione. I valori più bassi nel tratto aperto, invece, sono dovuti all'assenza di barriere architettoniche laterali il che permette una maggiore diluizione degli inquinanti e agevola il trasporto atmosferico, contribuendo a concentrazioni più basse. I risultati ottenuti confermano quanto riportato in letteratura, evidenziando come la configurazione urbanistica rappresenti un fattore determinante nella concentrazione di inquinanti in ambito urbano. I dati meteo e il flusso veicolare sono infatti invariati tra i due segmenti, l'unica variabile è la geometria urbana e si può



**Figura 5.12:** Giorno tipo confronto inverno-estate in Via 1° Maggio.

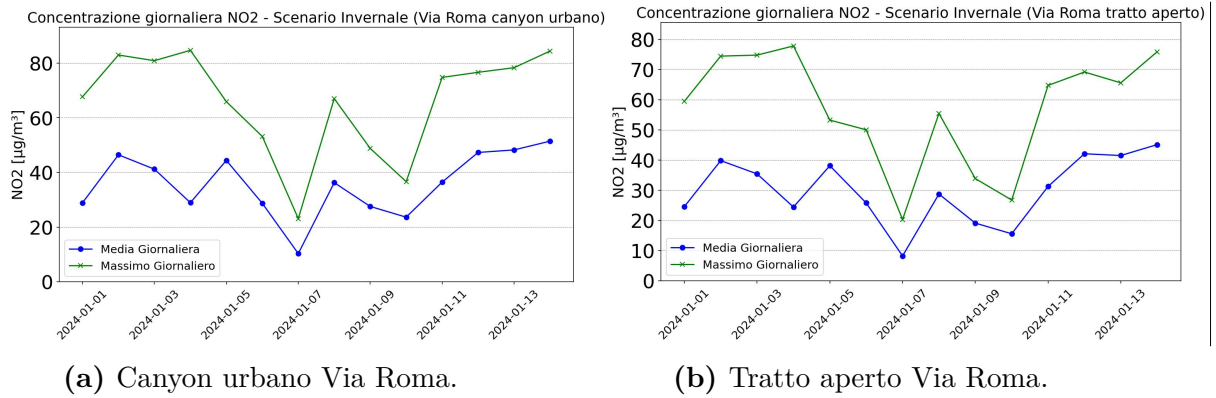


(a) Scenario invernale per Via 1° Maggio.

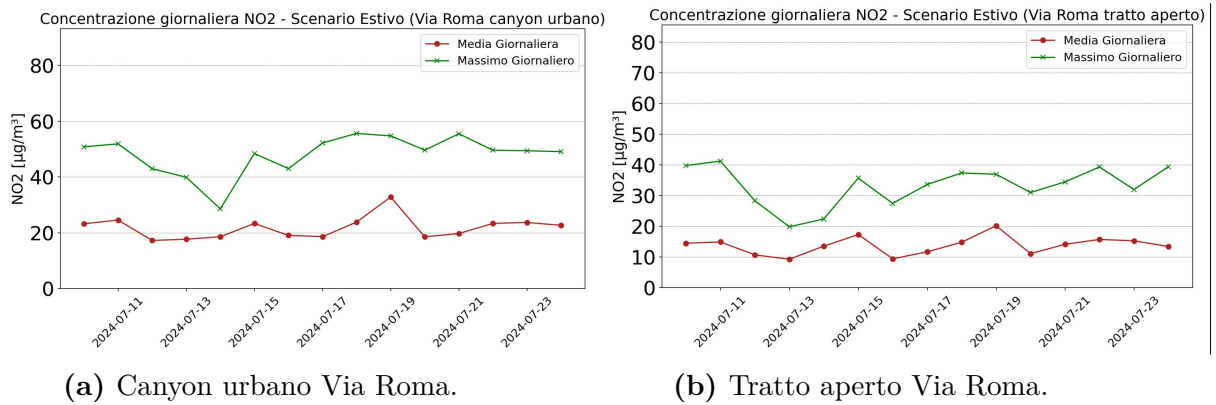
(b) Scenario estivo per Via 1° Maggio.

**Figura 5.13:** Confronto tra le concentrazione di NO2 in Via 1° Maggio nello scenario invernale(a) e quello estivo(b).

quindi giungere alle conclusioni di cui sopra.

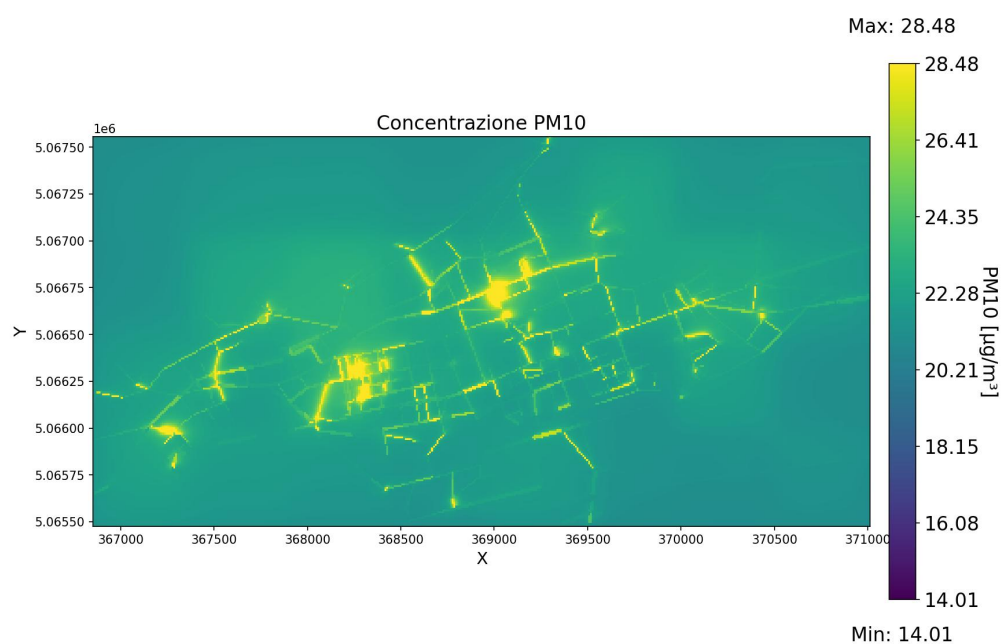


**Figura 5.14:** Confronto tra il tratto di canyon urbano(a) di Via Roma e del tratto aperto(b) durante il periodo invernale.



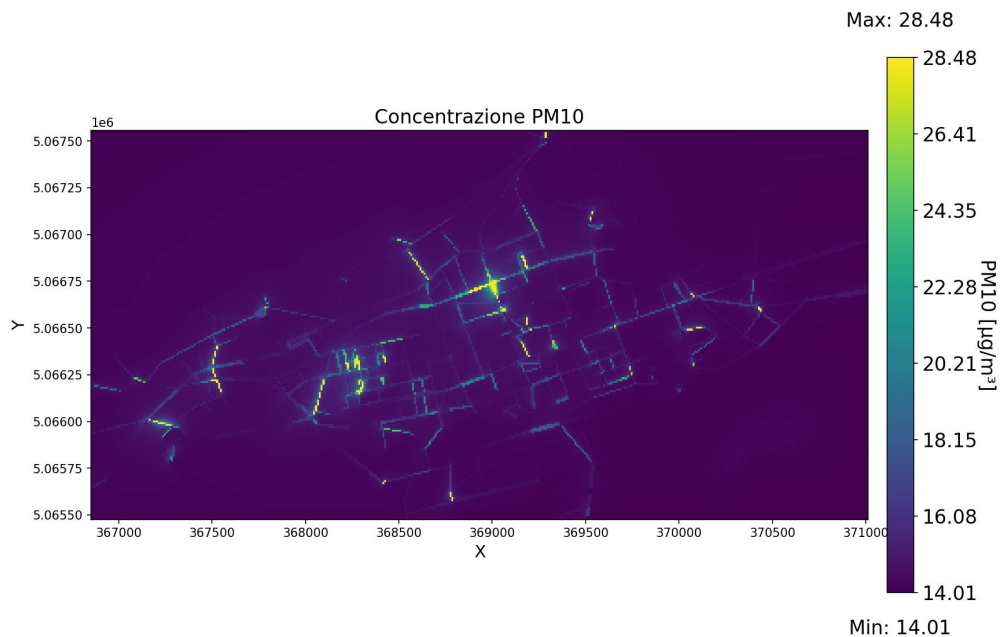
**Figura 5.15**

Concentriamoci ora sui PM10, notando come primo aspetto la differenza tra le mappe di concentrazione media per un giorno invernale e un giorno estivo. Si osserva immediatamente l'assenza del contributo emissivo dei riscaldamenti il che comporta dei valori di concentrazioni minori. Le mappe mostrano quindi in modo netto la differenza dei due scenari, si procede nel seguito con l'analisi dei vari tratti stradali per quantificare le differenze tra i due periodi.



**Figura 5.16:** Concentrazione di PM10 per il giorno 01/01/2024

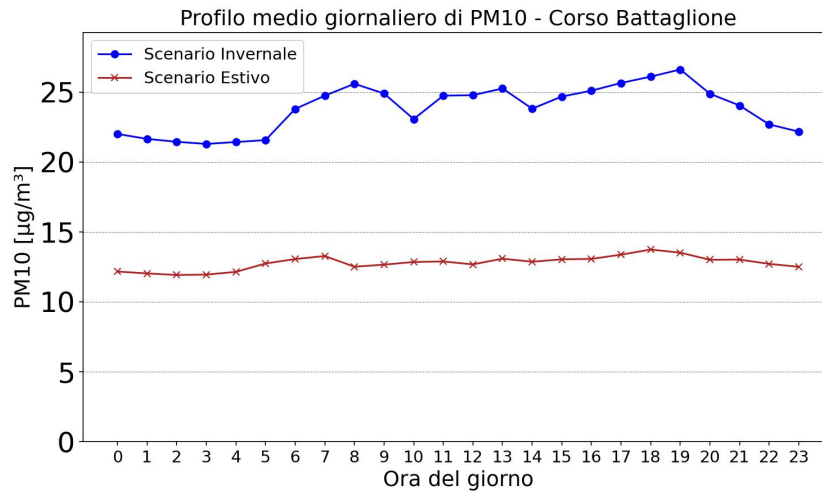




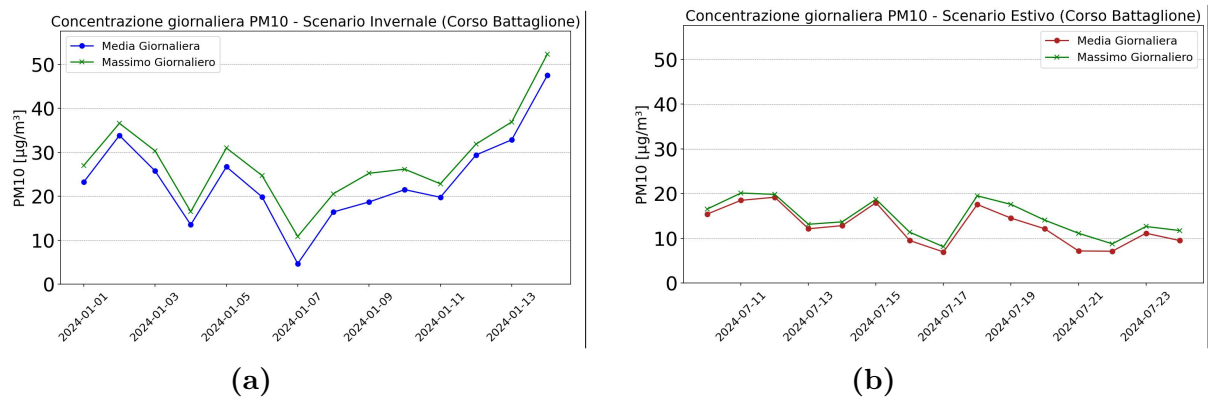
**Figura 5.17:** Concentrazioni di PM10 per il giorno 10/07/2024

Seguendo in modo analogo quanto fatto per precedentemente consideriamo dapprima Corso Battaglione che ricordiamo essere un asse stradale fortemente battuto dalle macchine e posto in una zona della città significativamente densa di abitazioni. L'influenza delle emissioni superficiali salta subito all'occhio tra le due stagioni, durante il periodo estivo si hanno valori di PM10 di 10 unità inferiori rispetto al caso invernale a dimostrazione di quanto l'inquinamento dell'aria da parte del PM10 sia strettamente legato ai riscaldamenti domestici.

Concentriamoci ora su Via Parigi che risulta essere una strada trafficata e presenta diversi edifici il cui contributo emissivo per il riscaldamento è notevole. Come mostrato nelle figure sottostanti si osserva come le concentrazioni di PM10 sia più alte durante il periodo invernale, si notano inoltre nell'andamento del giorno tipo due picchi corrispondenti agli orari, questi corrispondono agli orari in cui i riscaldamenti delle abitazioni sono maggiormente utilizzato.



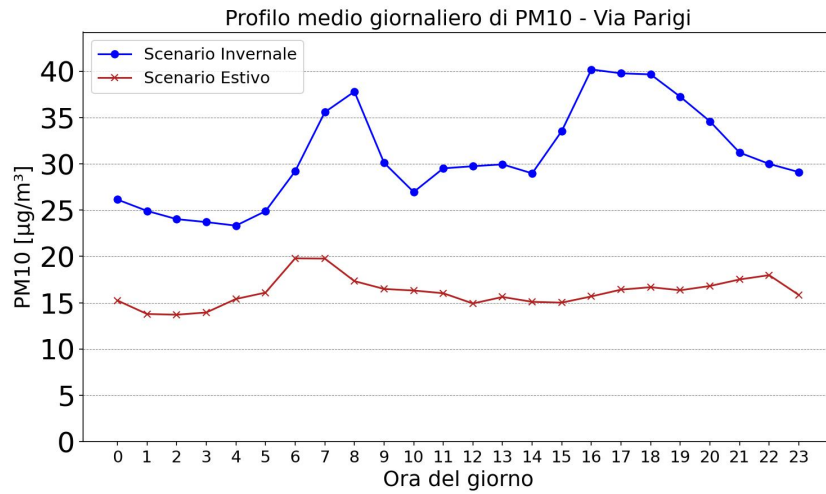
**Figura 5.18:** Giorno tipo di PM10 inverno-estate a confronto per Corso Battaglione.



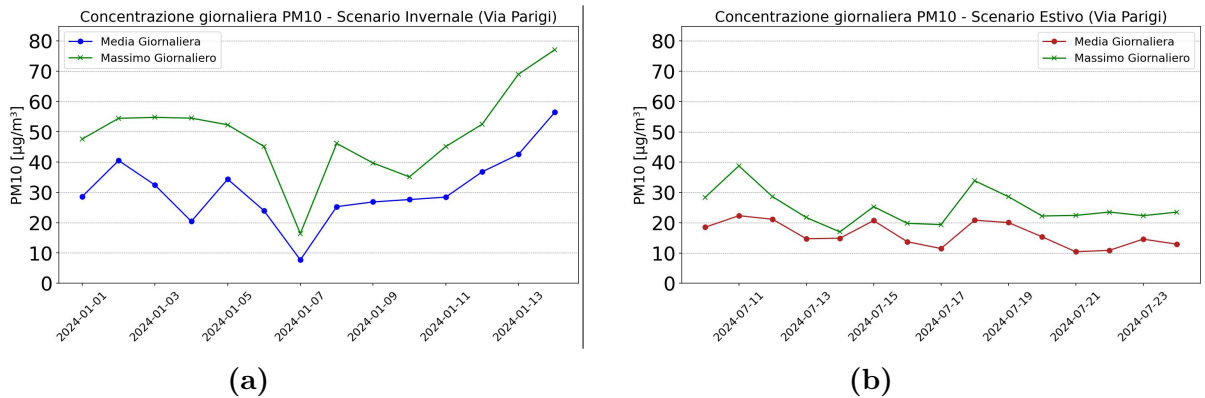
**Figura 5.19:** Confronto tra le concentrazioni di PM10 in Corso Battaglione nello scenario invernale(a) e quello estivo(b).

## 5.2 Scenario 2

In questo scenario teniamo conto del fenomeno del *foehn* che consiste in un vento caldo e secco che spira da monte verso valle. Come mostrato nell'immagine che segue si ottengono dei valori di velocità decisamente maggiori che sono tipici delle giornate di *foehn*. Questo fenomeno avviene con frequenza nella città di Aosta in virtù della presenza delle catene montuose che circondano l'intera regione. L'aria fredda e carica di umidità proveniente da Ovest una volta che incontra le Alpi cede la propria umidità sul versante alpino francese sotto forma di precipitazione, neve o poggia in base alle condizioni meteo, l'aria, ormai priva di umidità, si riversa sul



**Figura 5.20:** Giorno tipo di PM10 inverno-estate a confronto in Via Parigi.

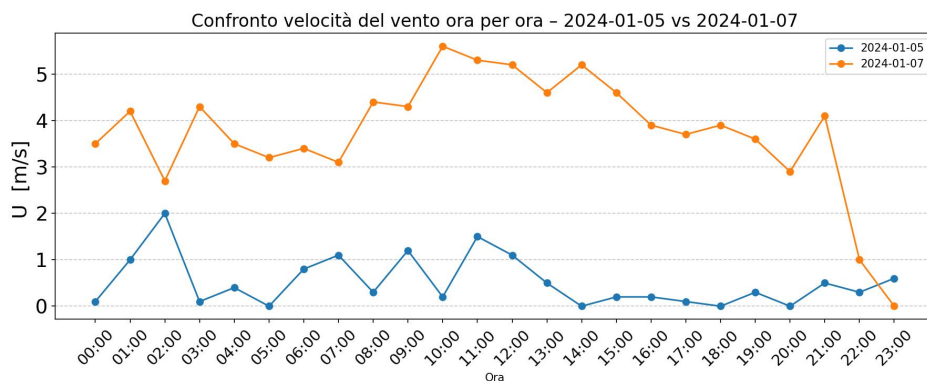


**Figura 5.21:** Confronto tra le concentrazioni di PM10 in via Parigi durante i due periodi.

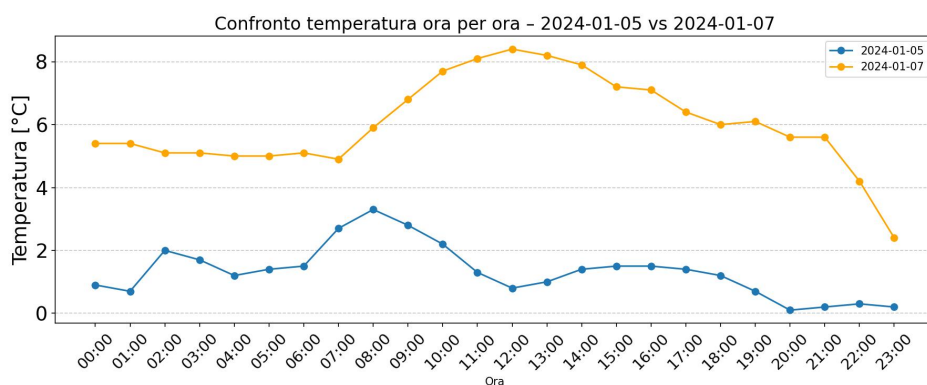
versante italiano sotto forma di vento caldo e secco.

Si noti che il fenomeno del *foehn* in caso è iniziato alle ore 11 del 06/01/2024 e si è concluso alle ore 23 del 07/01/2024, è stato pertanto scelto di considerare il giorno del 05/01/2024 e quello del 07/01/2024 per realizzare un confronto più esplicativo.

Le immagini qui riportate mostrano come durante il giorno di *foehn* si abbia un aumento dell'intensità del vento e che si tratti di un vento caldo come indicato dall'andamento delle temperature. L'andamento di queste variabili meteorologiche gioca un ruolo importante nella concentrazione degli inquinanti considerati.

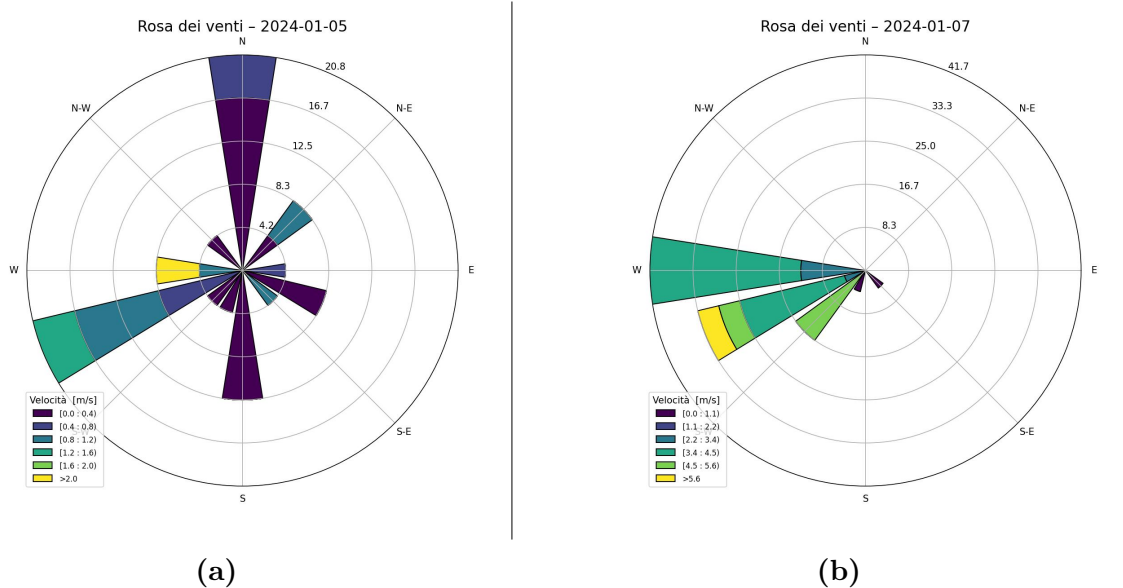


**Figura 5.22:** Confronto dell'andamento della velocità del vento nelle date del 05/01/2024 e del 07/01/2024.

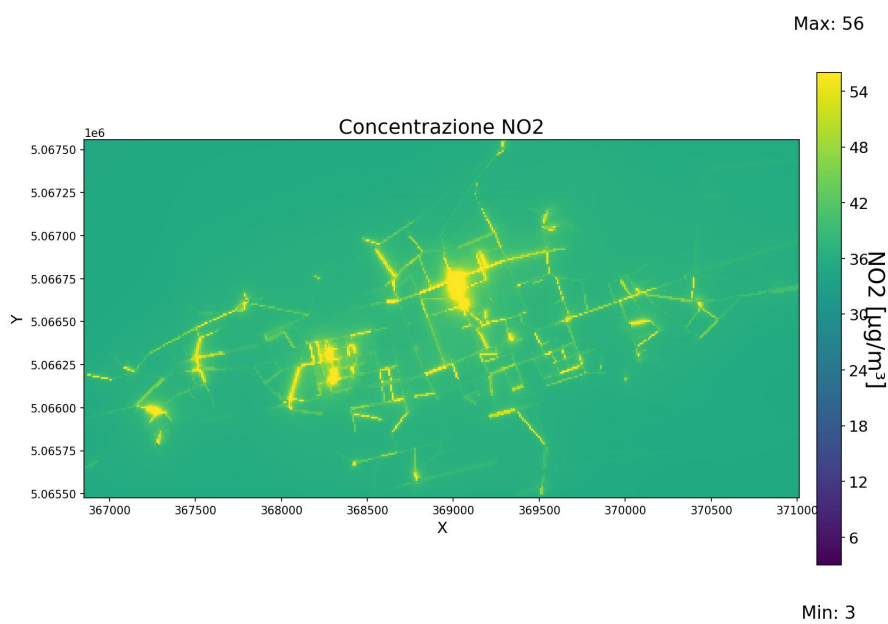


**Figura 5.23:** Confronto dell'andamento della temperatura nelle date del 05/01/2024 e del 07/01/2024.

Le immagini riportate mostrano la distribuzine spaziale della concentrazione di  $NO_2$  per il caso in esame. Salta subito all'occhio come la presenza del *foehn* abbia abbassato notevolmente le concentrazioni di inquinante. Procediamo ora nel seguito a considerare alcune strade per apprezzare nel dettaglio le differenze tra le due giornate.

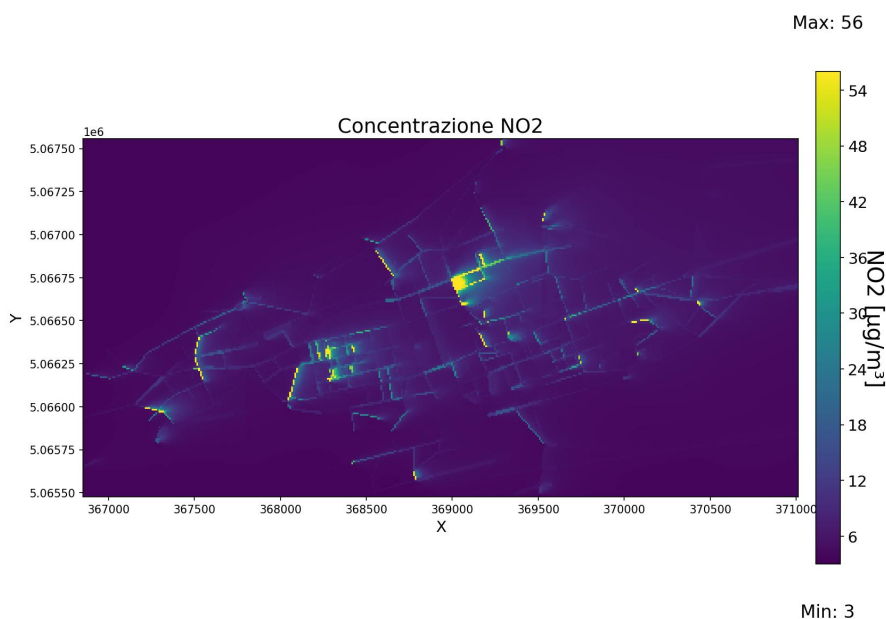


**Figura 5.24:** a) Rosa dei venti per la giornata del 05/01/2024. b) Rosa dei venti per la giornata del 07/01/2024.



**Figura 5.25:** Concentrazione di  $\text{NO}_2$  per la giornata del 05/01/2024.

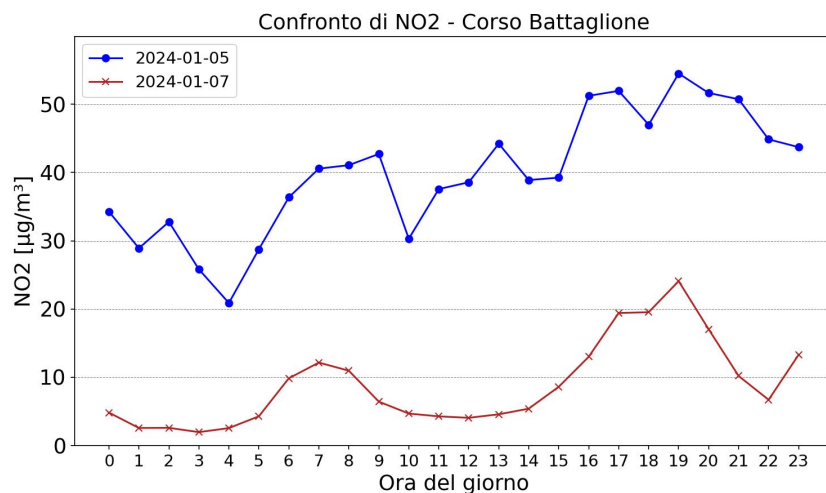
Consideriamo in prima battuta corso Battaglione che risulta essere un asse stradale con un traffico veicolare consistente e una considerevole densità di abitazioni.



**Figura 5.26:** Concentrazione di  $NO_2$  per la giornata del 07/01/2024

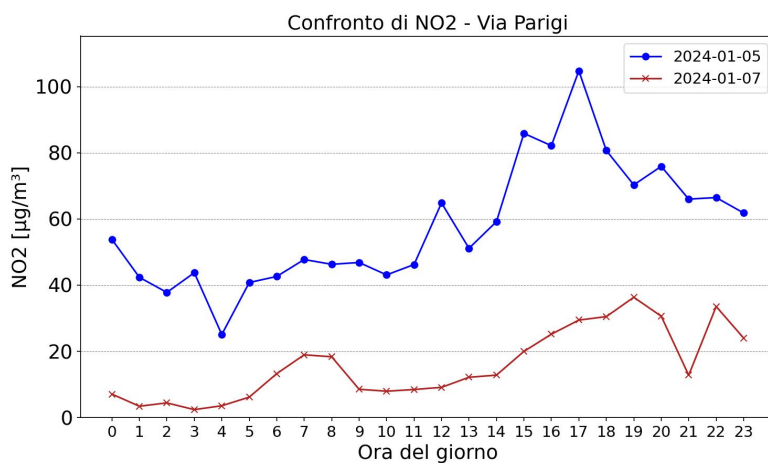
La figura che segue mostra il confronto tra l'andamento orario delle concentrazioni di  $NO_2$  registrate in Corso Battaglione durante due giornate caratterizzate da condizioni meteorologiche opposte: il 5 gennaio 2024, giorno tipico invernale senza l'influenza del *foehn*, e il 7 gennaio 2024, quando invece il fenomeno era attivo. Nel giorno privo di *foehn* si osservano valori di  $NO_2$  nettamente superiori, con concentrazioni comprese tra circa 20 e 55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e un incremento progressivo verso le ore serali, indicativo di un marcato ristagno degli inquinanti favorito dalla scarsa ventilazione e dalle inversioni termiche tipiche della stagione invernale. Al contrario, la giornata interessata dal *foehn* presenta livelli decisamente più bassi, inferiori ai 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  nelle ore notturne e mattutine e con un modesto aumento pomeridiano fino a circa 20–24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tale comportamento riflette l'elevata capacità dispersiva associata al *foehn*, che grazie ai venti caldi e secchi discendenti stabilizza la colonna atmosferica, riduce l'umidità e incrementa la ventilazione orizzontale, favorendo una drastica diminuzione delle concentrazioni di inquinanti primari come il  $NO_2$ . Il confronto tra le due giornate evidenzia in modo netto l'impatto del *foehn* sulla qualità dell'aria, mostrando una riduzione considerevole delle concentrazioni rispetto ai valori osservati in condizioni di stagnazione.

Consideriamo ora il tratto stradale di Via Parigi che risulta essere un tratto della statale 26 che permette l'attraversamento della città di Aosta asull'asse Est-Ovest che risulta di grande utilizzo sia per chi deve entrare o uscire dalla città e da chi deve attraversala per raggiungere comuni limitrofi. I diagrammi riportati mostrano



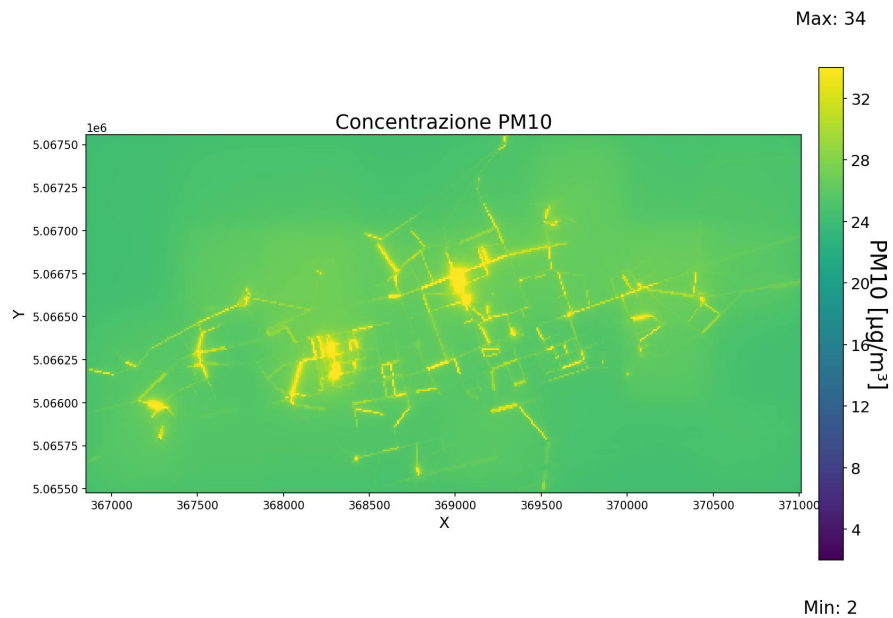
**Figura 5.27:** Confronto  $NO_2$  tra la data del 05/01/2024 e 07/01/2024 in Corso Battaglione.

dei valori di concentrazione di  $NO_2$  con dei picchi in corrispondenza delle ore serali giustificati dalla concomitanza dell'uscita dagli uffici. In modo analogo a quanto riscontrato in Corso Battaglione si nota una diminuzione dei valori di concentrazione di  $NO_2$ .



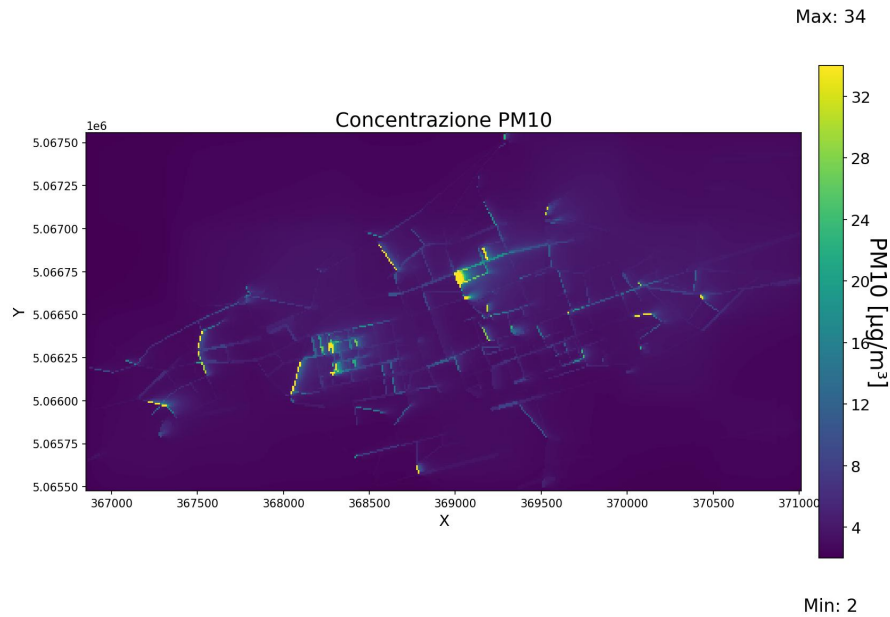
**Figura 5.28:** Confronto  $NO_2$  tra la data del 05/01/2024 e 07/01/2024 in Via Parigi.

Poniamo ora l'attenzione su i  $PM_{10}$  partendo dalla distribuzione spaziale delle concentrazioni di  $PM_{10}$  sul dominio di interesse. Come osservato precedentemente si nota in modo netto l'effetto del fenomeno del *foehn* nel "ripulire" il dominio di interesse.

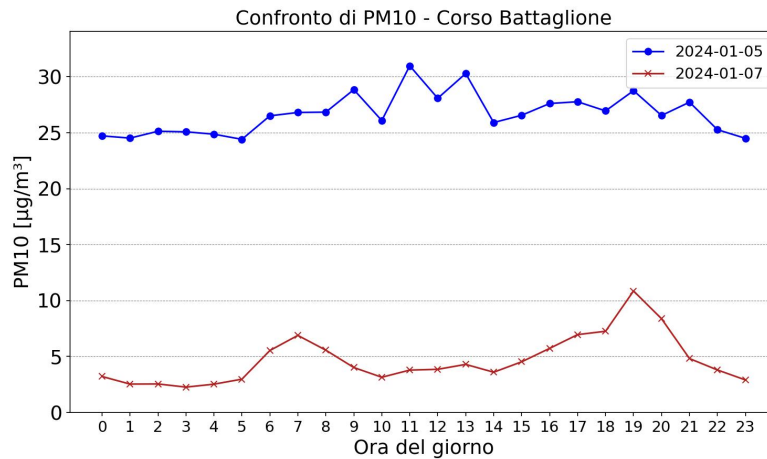


**Figura 5.29:** Concentrazione di  $PM_{10}$  per la giornata del 05/01/2024.





**Figura 5.30:** Concentrazione di  $PM_{10}$  per la giornata del 07/01/2024

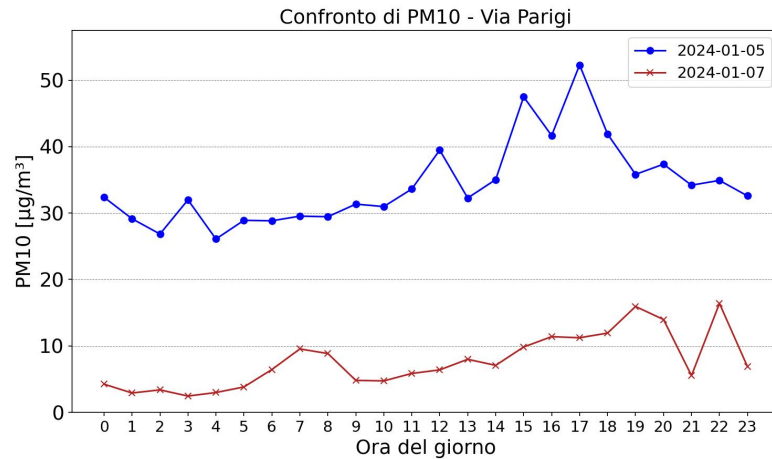


**Figura 5.31:** Confronto di  $PM_{10}$  in corso Battaglione.

### 5.3 Scenario 3

In questo scenario si tiene conto del fenomeno dell'inversione termica che ricordiamo essere un fenomeno atmosferico in cui la normale distribuzione della temperatura dell'aria con l'altitudine si inverte. Nel caso in esame si osserva che tale fenomeno è stato riscontrato nelle date del 11/01, 12/01, 13/01 e del 14/01.

Per apprezzarlo al meglio, pertanto, sono state considerate 3 stazioni meteo:



**Figura 5.32:** Confronto di  $PM_{10}$  in via Parigi.

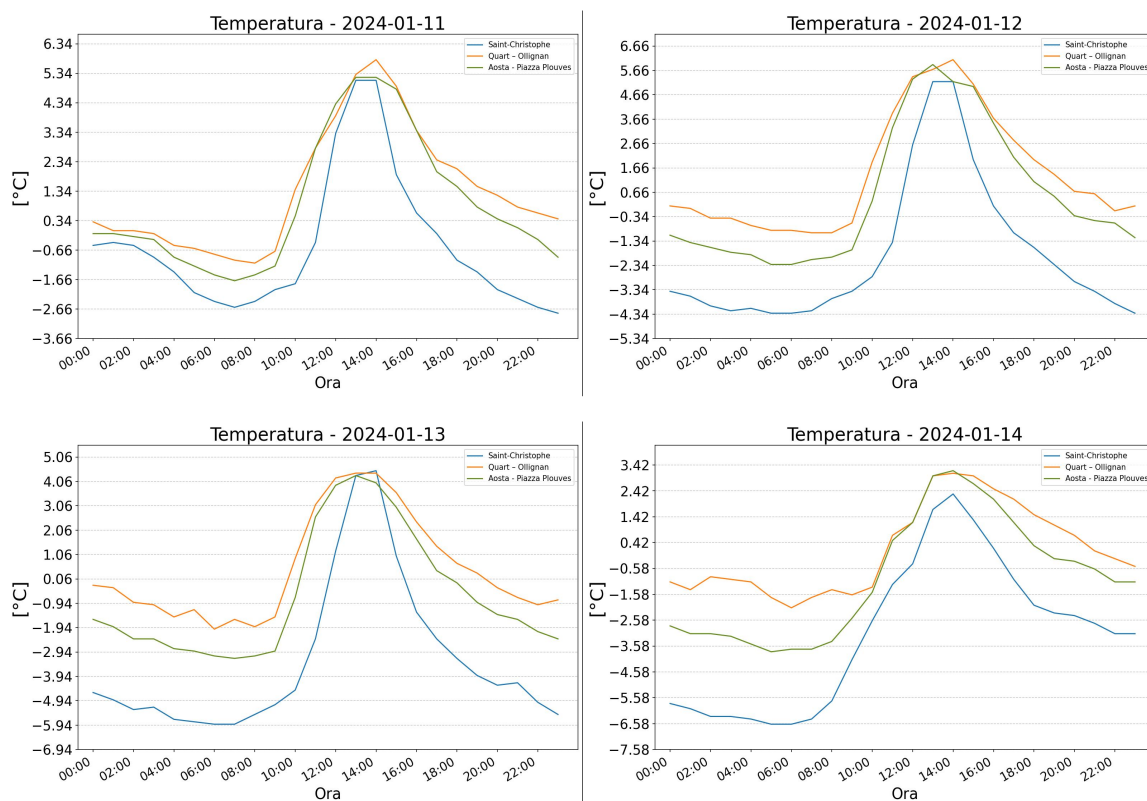
una dentro al dominio di interesse (Piazza Plouves) e due al suo esterno (Saint-Christophe; Quart-Ollignan). Si noti che la stazione di Quart-Ollignan si trova ad una quota di 650 m sul livello del mare, mentre le altre due sono posizionate rispettivamente a 580 m e 545m. La posizione delle stazioni è riportata nell'immagine che segue per agevolare la comprensione della disposizione delle stazioni meteo.



**Figura 5.33:** 1) Stazione meteo di Piazza Plouves (580 m), 2) stazione meteo di Saint-Christophe (545 m) e 3) stazione meteo di Quart-Ollignan (650 m).

La variabile meteorologica che ci informa dalla presenza del fenomeno è la temperatura, nei diagrammi seguenti si può notare come le temperature della stazione di Quart-Ollignan siano le più alte nonostante la sua posizione più elevata rispetto alle altre. I diagrammi riportati mostrano come si abbia inversione, escludurante tutto il giorno, in particolare nelle ore notturne.

Per lo scenario in questione è stato scelto il giorno del 14/01/2024 dal momento



**Figura 5.34:** Andamenti della temperatura nelle quattro giornate considerate.

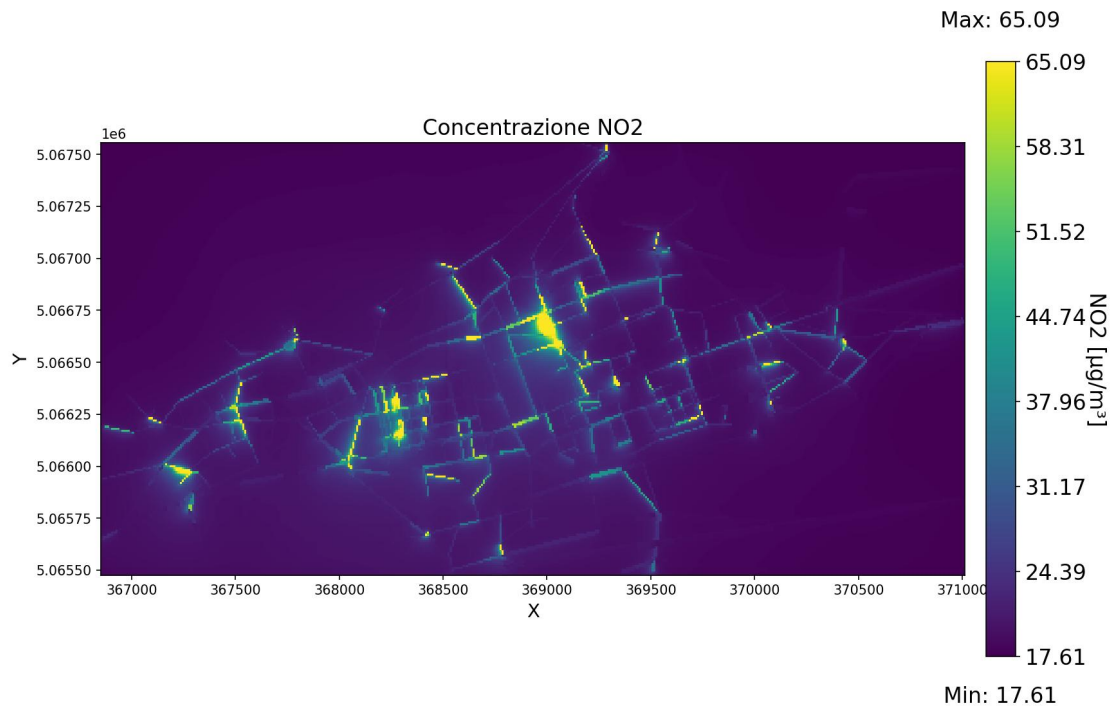
che il fenomeno è decisamente considerevole durante le ore serali e quelle notturne mentre nelle ore centrali, ovvero dalle 10 alle 14, non si ha più inversione termica. L'interesse pertanto è quello di andare a confrontare le concentrazioni del 14/01/2024, giorno che presenta inversione termica, con il giorno 09/01/2024 ovvero un giorno senza inversione termica.

Si procede in modo analogo a quanto fatto negli scenari precedenti, si considerano, in primo luogo, la distribuzione spaziale dell'inquinante in questione sul dominio di interesse e successivamente ci si concentra maggiormente sulle strade principali.

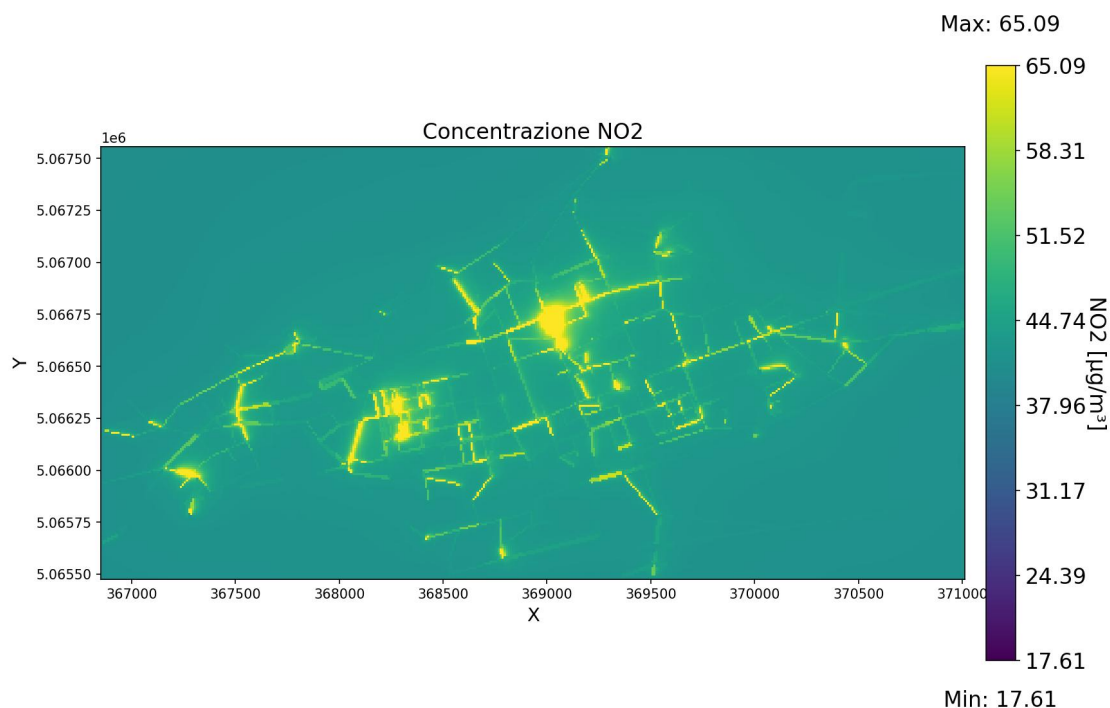
Le due mappe illustrano la concentrazione media giornaliera di biossido di azoto ( $NO_2$ ) al suolo per la città di Aosta, mettendo a confronto due distinti scenari meteorologici. La prima immagine rappresenta un giorno caratterizzato dall'assenza di inversione termica, mentre la seconda mostra la medesima area durante un episodio di inversione termica. Per consentire un confronto diretto ed efficace, entrambi i grafici utilizzano la stessa scala cromatica, con valori di concentrazione che variano da un minimo di 17.61 a un massimo di 65.09  $\mu g/m^3$ .

L'analisi comparativa evidenzia in modo netto l'impatto dell'inversione termica sulla qualità dell'aria. Nel primo scenario, si osserva come le concentrazioni più

elevate di  $NO_2$ , prevalentemente originate dal traffico veicolare, rimangono strettamente confinate lungo le principali arterie stradali ovvero le aree gialle. Il resto del tessuto urbano beneficia di una buona dispersione verticale, mantenendo livelli di fondo molto bassi (aree viola). Al contrario, la seconda mappa mostra molto bene come l'inversione termica agisca da cappa atmosferica, impedendo il rimescolamento dell'aria e intrappolando gli inquinanti nei bassi strati. Questo fenomeno causa un drastico innalzamento delle concentrazioni di fondo, rappresentato nella mappa dalle aree verde-azzurro, su tutta l'area urbana, portando a un ristagno e un accumulo generalizzato degli inquinanti ben oltre le immediate vicinanze delle fonti emissive.



**Figura 5.35:** Concentrazione di  $NO_2$  per la giornata del 05/01/2024.

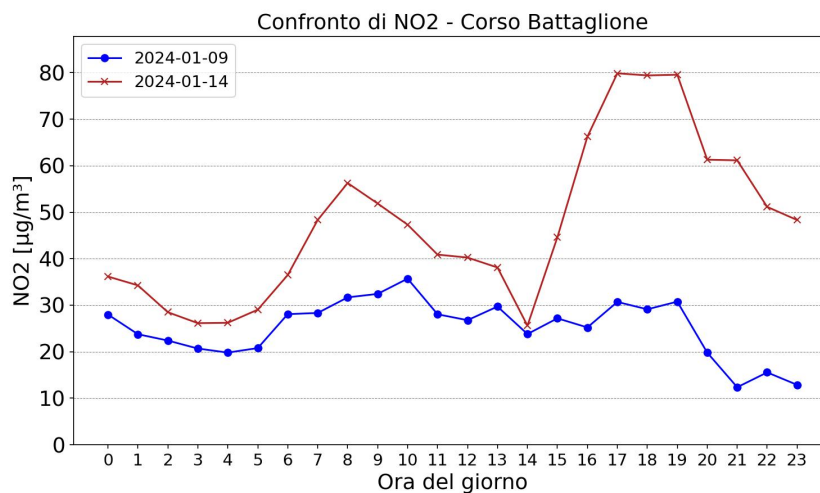


**Figura 5.36:** Concentrazione di  $NO_2$  per la giornata del 07/01/2024

Nel diagramma sotto stante lo scenario di dispersione è rappresentato dalla linea blu e esemplifica uno scenario di buona dispersione atmosferica. In questo caso, le concentrazioni di  $NO_2$  seguono un andamento bimodale strettamente correlato ai flussi di traffico feriale, ovvero i picchi del mattino della sera, ma i valori di fondo rimangono bassi e calano significativamente durante le ore notturne (minimo a  $20 \mu g/m^3$ ). Ciò indica che gli inquinanti emessi vengono dispersi efficacemente, un comportamento coerente con il modello spaziale che mostra l'inquinamento confinato quasi esclusivamente alle arterie stradali.

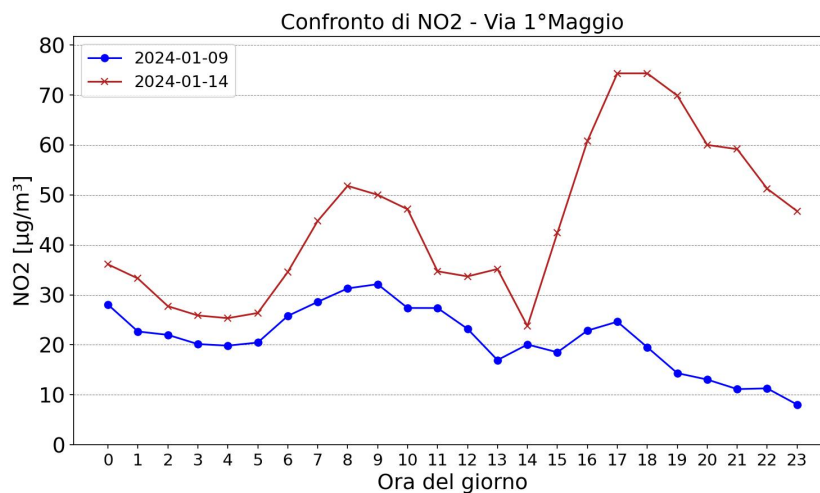
Il secondo scenario del 14 gennaio 2024 è invece rappresentato dalla linea rossa ed è un perfetto esempio di evento di accumulo da inversione termica. La curva temporale mostra tre segnali inequivocabili di "coperchio" atmosferico: Un livello di fondo notturno elevato che indica il mancato rimescolamento e la persistenza degli inquinanti del giorno precedente. Un accumulo costante durante il giorno, dove le emissioni si sommano progressivamente ed infine un picco serale estremo (oltre  $80 \mu g/m^3$ ), esacerbato dalla coincidenza tra la ripresa delle emissioni e il rafforzamento dell'inversione dovuto al calare del sole.

Considerando un altro tratto stradale fortemente trafficato e che rappresenta la porta meridionale per l'accesso alla città si nota ancora che in condizioni di assenza di inversione termica, gli inquinanti si disperdono rapidamente, mantenendo basse



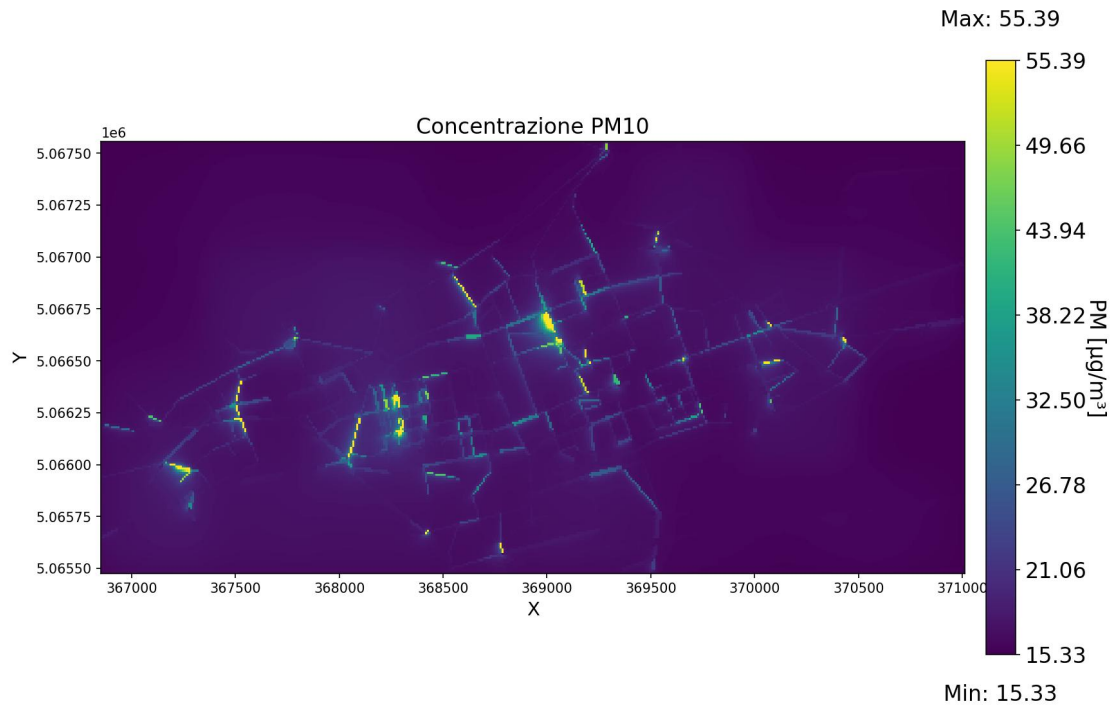
**Figura 5.37:** Confronto  $NO_2$  tra la data del 09/01/2024 e 14/01/2024 in Corso Battaglione.

le concentrazioni di fondo. La coerenza del fenomeno in due punti distinti della città conferma che l'inversione termica agisce su scala urbana, rappresentando il principale fattore meteorologico alla base degli eventi critici di ristagno degli inquinanti.



**Figura 5.38:** Confronto  $NO_2$  tra la data del 09/01/2024 e 14/01/2024 in Via 1° Maggio.

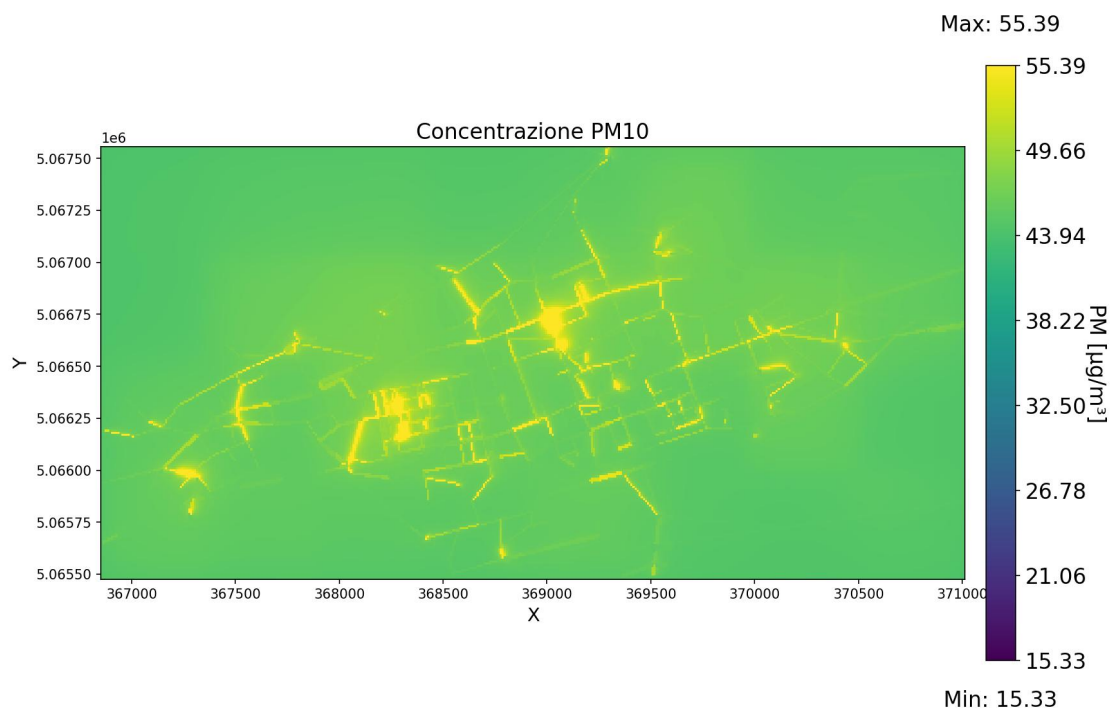
Poniamo ora la nostra attenzione al PM10 e come fatto in precedenza partiamo dalla distribuzione spaziale della concentrazione sull'area di interesse. Le due mappe in esame illustrano la concentrazione media giornaliera di particolato fine PM10 al suolo per la medesima area urbana di Aosta, confrontando l'effetto dell'assenza di inversione termica e della presenza di inversione termica. Le due mappe hanno la stessa scala cromatica per avere un confronto più adeguato, si osserva che i valori di concentrazione variano da 15 a 55  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



**Figura 5.39:** Concentrazione di PM10 per la giornata del 05/01/2024.

Similmente a quanto osservato per il biossido di azoto, l'impatto dell'inversione termica sulla dispersione del PM10 è netto e drastico. Nel primo scenario, si nota che le concentrazioni elevate, ovvero le aree di colore giallo, sono strettamente localizzate lungo le vie di emissione, mentre il resto del tessuto urbano presenta livelli di fondo molto basso, indicando un'efficace dispersione verticale. Al contrario, la seconda mappa evidenzia chiaramente l'effetto della cappa atmosferica creata dall'inversione termica. Il blocco del rimescolamento verticale dell'aria provoca un aumento massivo e generalizzato della concentrazione di fondo di PM10 sull'intera area. Questo dimostra che, in presenza di inversione, il PM10 ristagna e si accumula su scala urbana, esponendo l'intera popolazione a livelli di inquinamento significativamente più alti.



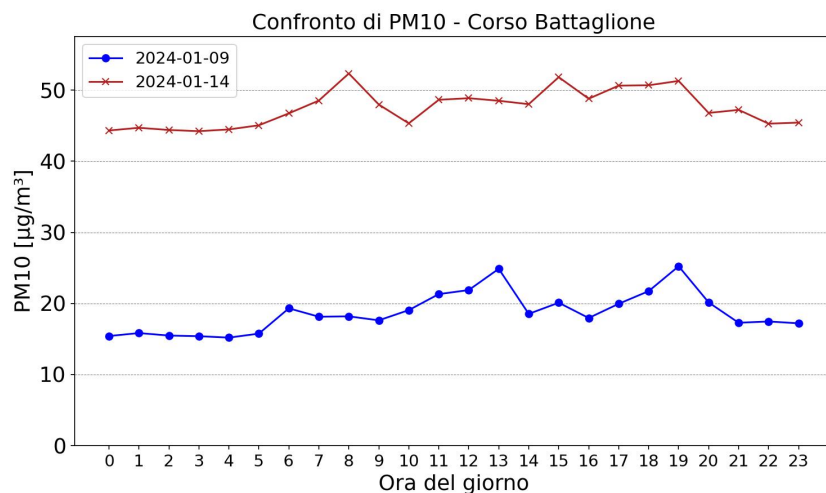


**Figura 5.40:** Concentrazione di PM10 per la giornata del 07/01/2024

Il diagramma che segue mostra l'andamento delle concentrazioni di PM10 in Corso Battaglione. L'andamento del PM10 conferma il forte impatto delle condizioni atmosferiche, pur mostrando dinamiche temporali diverse rispetto al biossido di azoto. Nella giornata del 9 gennaio, ovvero quella senza inversione, le concentrazioni si mantengono su valori nettamente inferiori, oscillando principalmente tra 15 e 25  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  e mostrando una debole corrispondenza con le ore di punta del traffico.

Al contrario, la curva del 14 gennaio, il giorno con inversione, evidenzia un accumulo massivo e costante. I livelli di PM10 si mantengono su valori critici per tutte le 24 ore, oscillando costantemente tra 45 e 52  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Questo andamento quasi piatto, privo dei netti picchi serali e dei crolli notturni osservati per l' $\text{NO}_2$ , riflette la natura meno reattiva del PM10 e la sua capacità di accumularsi in modo uniforme nello strato limite. Il valore medio registrato in questo giorno è prossimo al limite massimo giornaliero di 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , confermando che l'inversione termica è il fattore dominante nel determinare la persistenza di elevati livelli di PM10 su scala urbana.





**Figura 5.41:** Confronto PM10 tra la data del 09/01/2024 e 14/01/2024 in Corso Battaglione.

## 5.4 Scenario 4

Come ultimo scenario si considera un giorno estivo e si va ad alterare in modo arbitrario il flusso veicolare degli assi stradali principali, in primo luogo del 25% e successivamente del 50%. Si ripropone per maggiore chiarezza la mappa della città di Aosta andando ad evidenziare gli assi stradali più trafficati, questi risultano essere la statale 26 composta da Via Roma e Via Parigi che risultano essere gli assi utilizzati per lo spostamento sull'asse Est-Ovest per entrare o attraversare la città. Per quel che riguarda l'entrata dalla parte meridionale della città si considera Via 1° Maggio che è altresì trafficata e si considera inoltre Via Clavalité che è un'ulteriore via di accesso e uscita per la città.

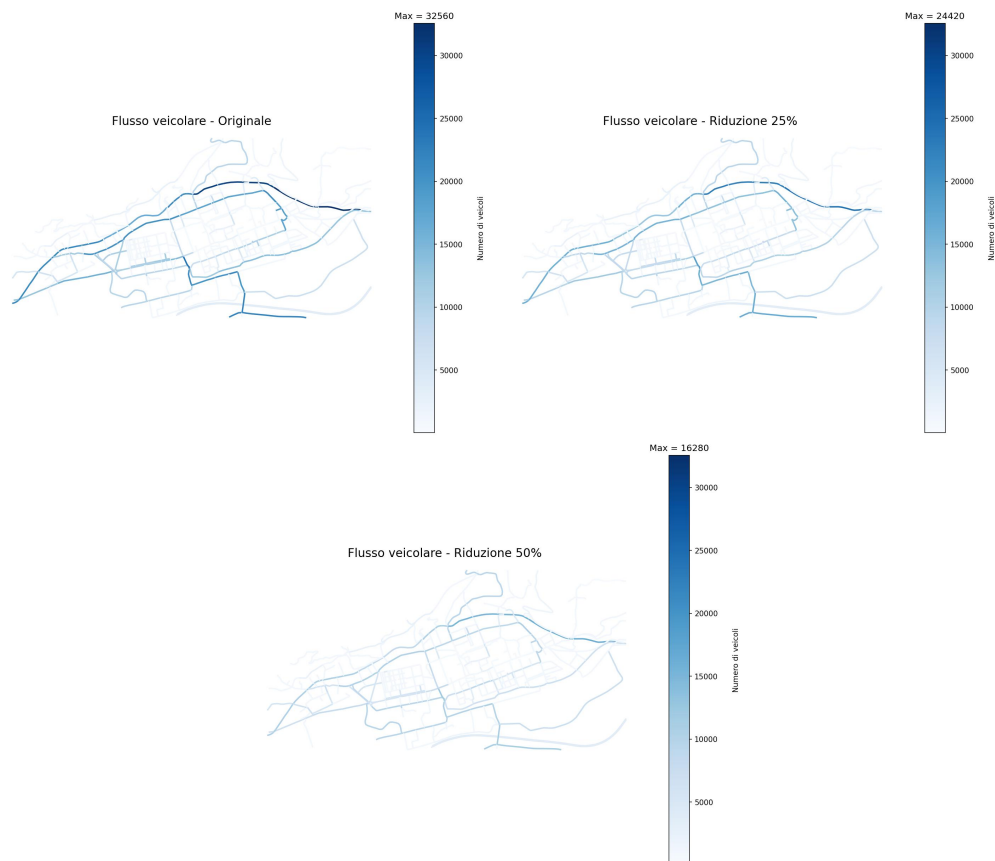
Per quel che riguarda il tessuto urbano si considerano le seguenti strade: Corso Battaglione, via Saint Martin de Corléans e via Torino. Corso Battaglione è stata scelta in virtù della sua posizione è infatti uno snodo importante per il traffico di Aosta e presenta diversi commerci il che implica che si tratti di un luogo della città in cui i cittadini sono esposti direttamente all'inquinamento da traffico, si noti come la scelta di Via Saint-Martin de Corléans è dettata dalle medesime ragioni. Infine Via Torino è stata scelta dal momento che è la strada che affianca la stazione di monitoraggio presente in Piazza Plouves.

L'intento di questo scenario è mostrare quanto il traffico incida sulle concentrazioni di inquinanti, si considera per questo motivo un giorno estivo in modo da potersi concentrare maggiormente sulle emissioni lineari dal momento che le emissioni superficiali, ovvero i riscaldamenti, sono assenti in estate. Questo scenario vuole inoltre mostrare l'utilità e l'efficacia del modello SIRANE nel realizzare



**Figura 5.42:** Principali assi stradali di Aosta: 1) Corso Battaglione; 2) Via Parigi; 3) Via Saint-Martin de Corléans; 4) Via Roma; 5) Via Clavalité; 6) Via 1° Maggio e 7) Via Torino.

scenari per prevedere le concentrazioni in alcuni tratti stradali dopo che in questi sono stati modificati o ridotti i flussi veicolari. Tutto ciò risulta molto utile per le politiche sempre più diffuse in molte città italiane per la chiusura di alcune strade al traffico per restituire delle strade ai cittadini intensi come pedoni.



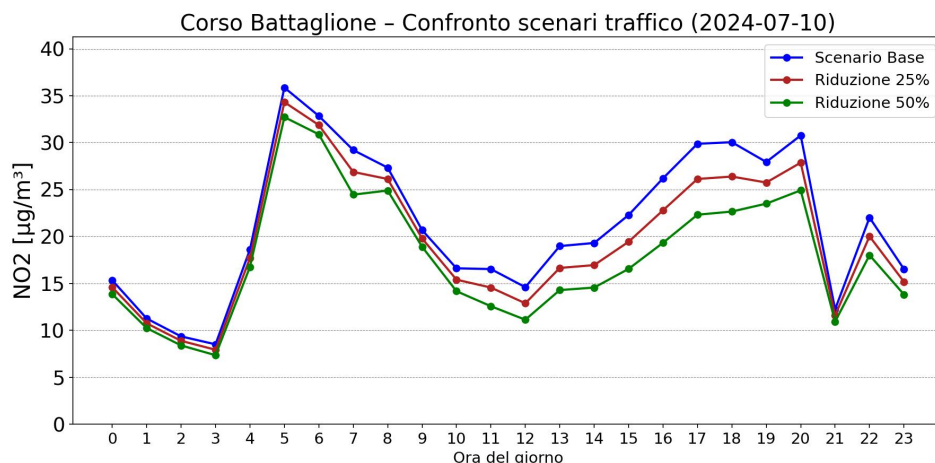
**Figura 5.43:** Confronto tra i tre scenari.

Iniziamo come di consueto andando ad analizzare il caso del  $NO_2$  partendo dalla distribuzione spaziale di quest'ultimo sul dominio di interesse. Le mappe che seguono mettono a confronto lo stesso giorno ma con condizioni iniziali differenti, la variabile modificata è il flusso veicolare su alcuni assi stradali principali. La prima mappa ha le stesse condizioni iniziali del primo scenario mentre la seconda presenta la riduzione del traffico del 25% e la terza invece corrisponde alla riduzione del traffico del 50%.

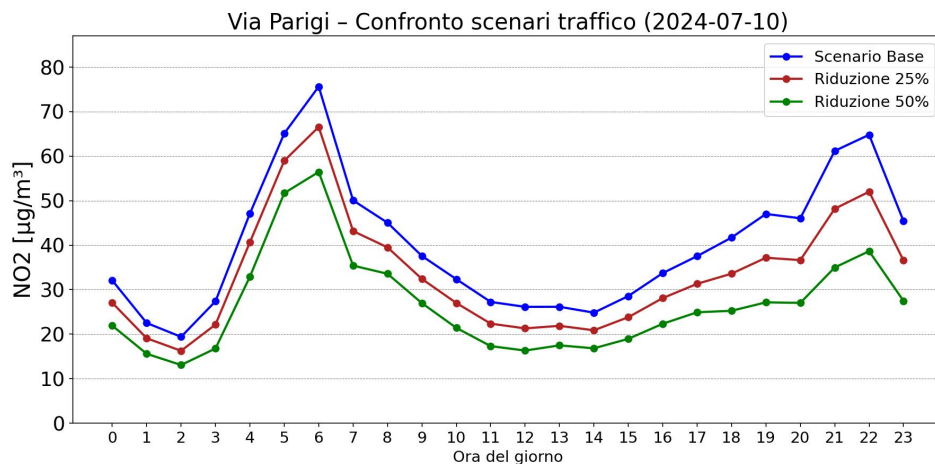
Dal momento che dalle tre mappe non si riesce ad apprezzare al meglio le differenze tra i tre scenari ci concentriamo su alcuni tratti stradali particolarmente trafficati e i cui flussi sono stati variati nei tre scenari considerati.

Partiamo pertanto considerando il tratto stradale di Corso Battaglione che risulta essere un tratto stradale fortemente trafficato, specialmente nelle ore di picco data la sua posizione strategica nel tessuto urbano.

Dai diagrammi si nota come l'andamento delle concentrazioni è simile nei tre casi e mano a mano che si aumenta la riduzione del flusso veicolare si ottengono



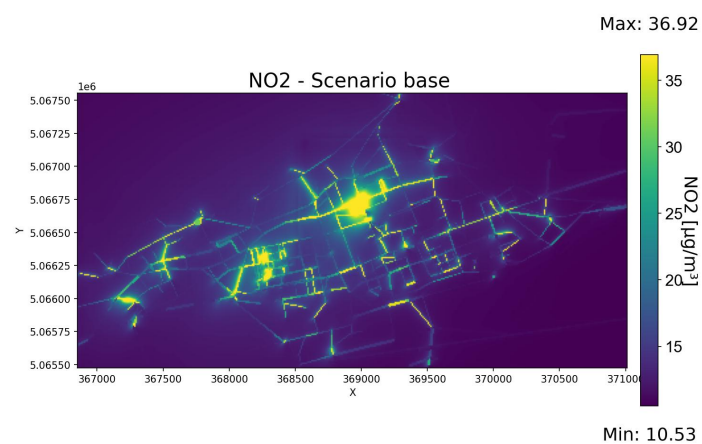
**Figura 5.44:** Confronto delle concentrazioni di  $NO_2$  nei tre scenari con traffico modificato in Corso Battaglione.



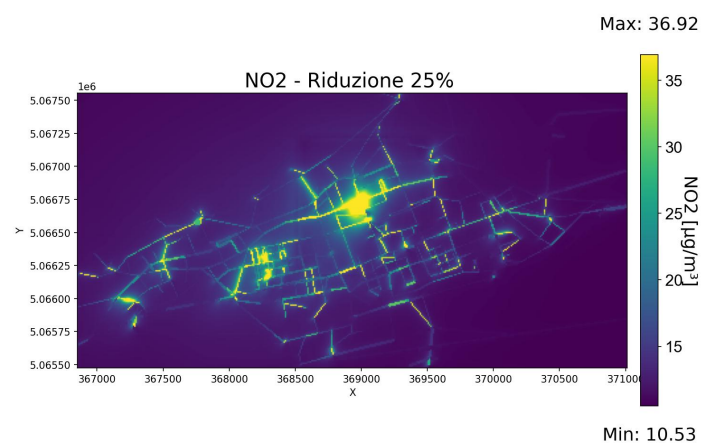
**Figura 5.45:** Confronto delle concentrazioni di  $NO_2$  nei tre scenari con traffico modificato in Via Parigi.

delle concentrazioni inferiori. Si nota inoltre come le differenze maggiori tra le concentrazioni si ottengono negli orari di punta del traffico, ciò viene giustificato dalla riduzione progressiva del flusso veicolare imposta nello scenario. Si nota un comportamento analogo anche per quel che riguarda il tratto di Via Parigi.

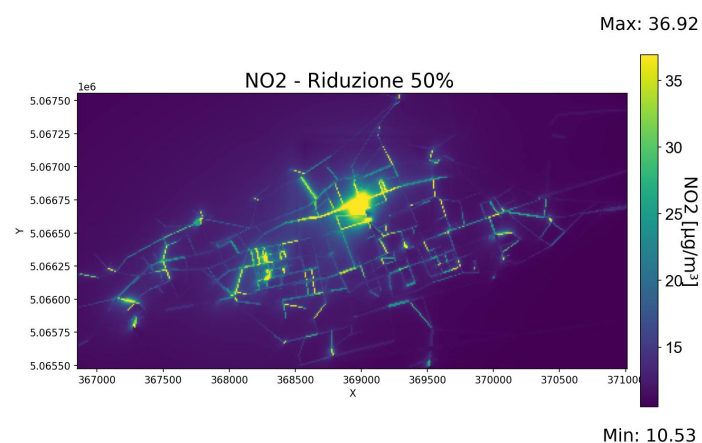
Consideriamo ora il PM10 e ricordando quanto detto precedentemente si nota bene sia dalla mappa della distribuzione spaziale della concentrazione sia dai diagrammi che la variazione di flusso veicolare non ha apportato differenze sostanziali nelle concentrazioni di PM10.



Scenario base

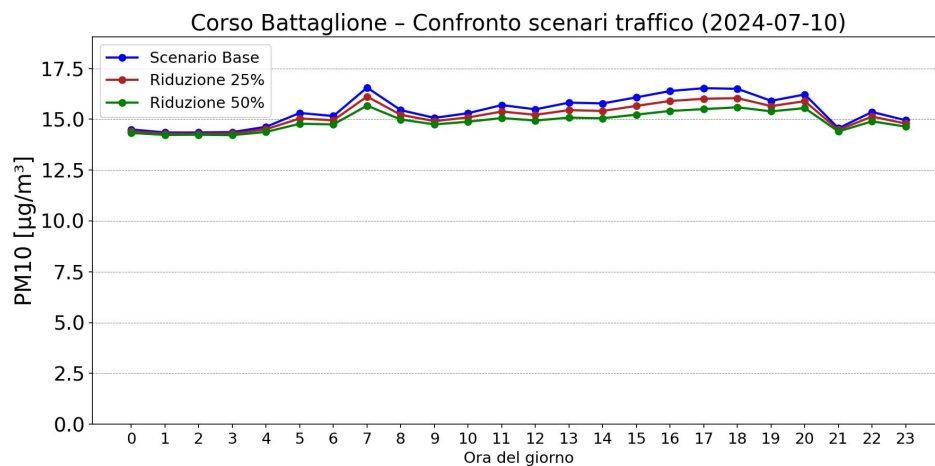


Riduzione 25%

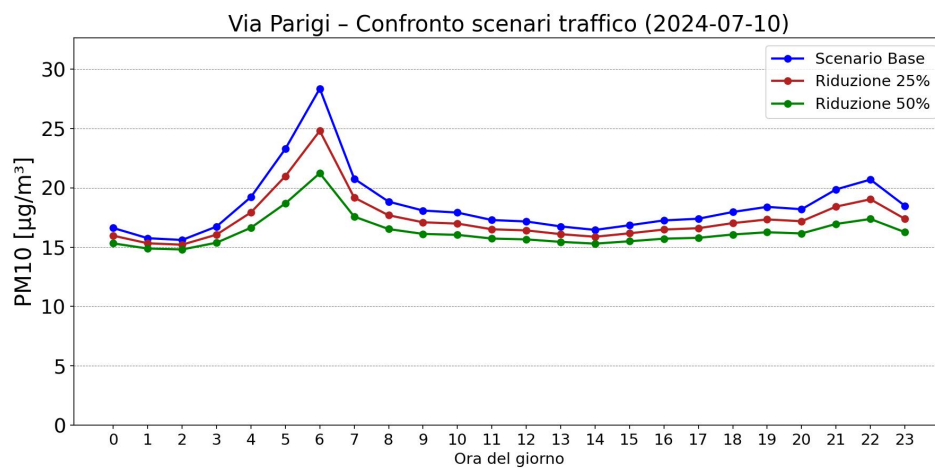


Riduzione 50%

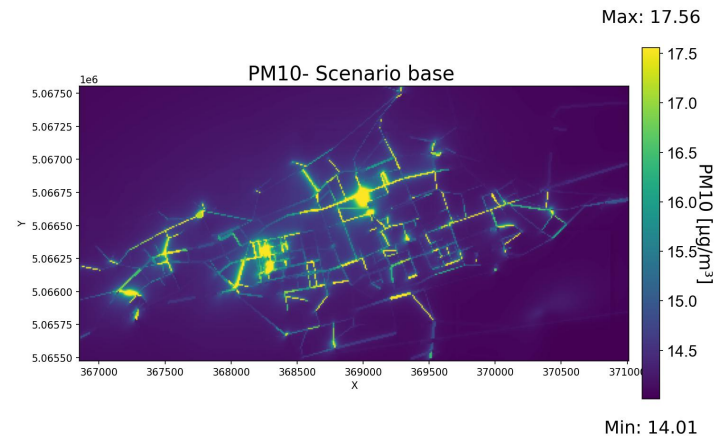
**Figura 5.46:** Mappe delle concentrazioni medie giornaliere di  $NO_2$  per i 3 casi: flusso traffico originale, ridotto del 25% e del 50%.



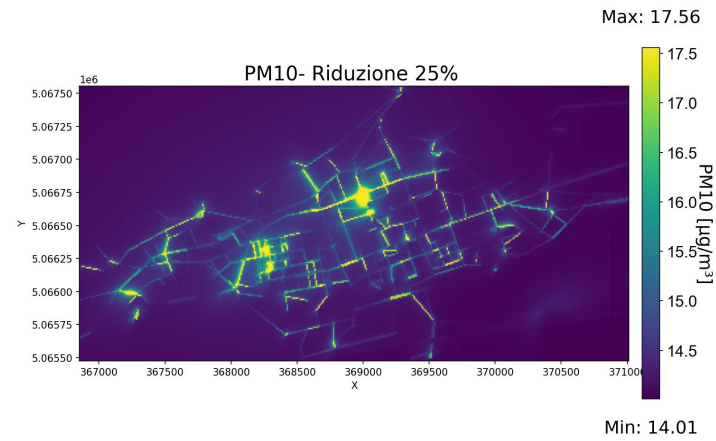
**Figura 5.47:** Confronto delle concentrazioni di PM10 nei tre scenari con traffico modificato in Corso Battaglione.



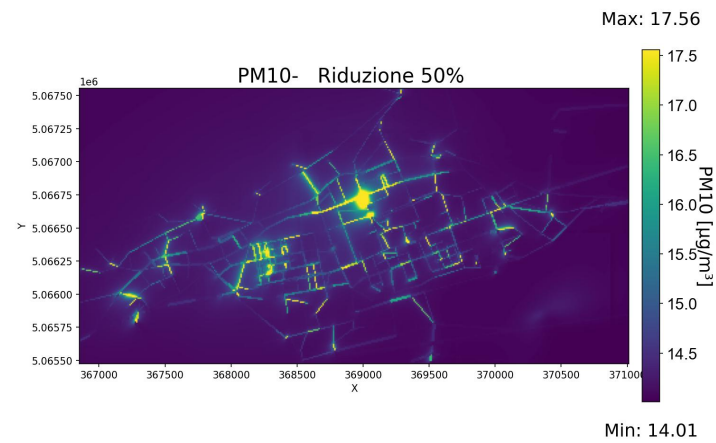
**Figura 5.48:** Confronto delle concentrazioni di PM10 nei tre scenari con traffico modificato in Via Parigi.



Scenario base



Riduzione 25%



Riduzione 50%

**Figura 5.49:** Mappe delle concentrazioni medie giornaliere di  $PM_{10}$  per i 3 casi: flusso traffico originale, ridotto del 25% e del 50%.





## Capitolo 6

# Conclusioni

Il presente elaborato ha affrontato la modellazione della qualità dell'aria nella città di Aosta attraverso l'applicazione del modello numerico SIRANE , sviluppato dall'École Centrale de Lyon, in collaborazione con ARPA Valle d'Aosta. Lo studio si è concentrato sulla simulazione della dispersione degli inquinanti in ambito urbano, considerando la complessa orografia e le specificità meteorologiche locali.

L'analisi dei risultati del modello ha confermato la buona capacità di SIRANE nel riprodurre le dinamiche spaziali e temporali delle concentrazioni di  $NO_2$  e  $PM_{10}$  in contesto urbano, validandolo come strumento predittivo e di supporto decisionale.

Le simulazioni dei diversi scenari hanno permesso di delineare il ruolo preponderante delle varie sorgenti emissive. Il primo scenario ha dimostrato che le emissioni da riscaldamento rappresentano una componente critica per il particolato  $PM_{10}$ , evidenziando concentrazioni significativamente più elevate durante il periodo invernale rispetto a quello estivo. Il

È stata confermata l'influenza cruciale delle condizioni climatiche alpine: l'inversione termica funge da meccanismo di confinamento, limitando drasticamente la diffusione verticale degli inquinanti , mentre il *foehn* esercita un notevole effetto di "pulizia" dell'aria, favorendo il rimescolamento e la diminuzione delle polveri.

L'ultimo scenario ovvero la modellazione con alterazione del flusso veicolare sugli assi stradali principali ha chiaramente indicato che la riduzione mirata del traffico può portare a un sensibile riduzione delle concentrazioni di  $NO_2$ , specialmente in arterie nevralgiche come Corso Battaglione e Via Parigi, mentre le concentrazioni di  $PM_{10}$ , non subiscono variazioni significative.

In definitiva, l'utilizzo di un modello come SIRANE si rivela utile per la pianificazione territoriale, consentendo di valutare l'efficacia di misure localizzate, come le Zone a Traffico Limitato o l'incentivazione di carburanti alternativi, in un ambiente orograficamente complesso e sensibile come la città di Aosta.



# Elenco delle figure

1.1	Diagramma delle isoline di ozono. . . . .	13
1.2	Rappresentazioni dei possibili scenari per l'atmosfera in base alle condizioni meteorologiche. . . . .	17
1.3	Rappresentazione di un Canyon urbano. . . . .	19
2.1	Rappresentazione di come viene gestito il reticolo urbano con il dettaglio dei tratti di terreno aperto. . . . .	24
2.2	Schematizzazione dell'equazione di bilancio per un singolo box. . . . .	26
2.3	Bilancio di energia al livello del suolo in condizioni di stazionarietà. . . . .	29
3.1	Uso del suolo della regione Valle d'Aosta secondo Corine Land Cover 2006 (Fonte: ARPA Valle d'Aosta) . . . . .	34
3.2	Rete viaria principale in Valle d'Aosta (fonte: ARPA Valle d'Aosta) . . . . .	38
4.1	Rappresentazione su QGIS dei confini del comune di Aosta, in ocra e del dominio di interesse in marrone. . . . .	44
4.2	a) Geometria reale su Google Earth. b) Geometria urbana con edifici e grafo del reticolo stradale su QGIS. . . . .	46
4.3	Reticolo stradale finale in colore verde chiaro, in rosso ci sono le strade trascurate. . . . .	46
4.4	a) Rappresentazione 3D degli edifici su Google Earth. b) Geometria urbana con edifici e canyon urbani su QGIS. c) Canyon urbani su QGIS nel formato richiesto da SIRANE. . . . .	48
4.5	Traffico giornaliero medio. . . . .	51
4.6	File di tipo csv contenente le emissioni totali giornaliere. . . . .	52
4.7	Stazione meteorologica scelta per la città di Aosta. . . . .	52
4.8	Reticolo delle emissioni superficiali. . . . .	53
4.9	Reticolo delle emissioni superficiali colorato in base al valore emissivo proporzionato rispetto all'edificato. . . . .	54
4.10	Stazione meteorologica di Mont Fleury. . . . .	56
4.11	Distribuzione percentuale misurata nel periodo 2020-2024. . . . .	57

5.1	Mappa della città di Aosta con le strade di interesse: 1)Corso Battaglione, 2)Via Parigi, 3)Via Saint-Martin de Corléans, 4a)Via Roma tratto aperto, 4b) Via Roma canyon urbano, 5) Via Clavalité e 6)Via 1° Maggio. . . . .	60
5.2	Confronto dei giorni tipo inverno-estate. . . . .	61
5.3	Confronto dei giorni tipo inverno-estate. . . . .	62
5.4	Confronto dei giorni tipo inverno-estate. . . . .	62
5.5	Confronto dei giorni tipo inverno-estate. . . . .	63
5.6	Confronto dei giorni tipo inverno-estate. . . . .	63
5.7	Confronto dei giorni tipo inverno-estate. . . . .	64
5.8	Concentrazione di NO <sub>2</sub> per il giorno 01/01/2024 . . . . .	64
5.9	Concentrazioni di NO <sub>2</sub> per il giorno 10/07/2024 . . . . .	65
5.10	Giorno tipo confronto inverno-estate per Corso Battaglione. . . . .	66
5.11	Confronto tra le concentrazione di NO <sub>2</sub> in Corso Battaglione nello scenario invernale(a) e quello estivo(b). . . . .	66
5.12	Giorno tipo confronto inverno-estate in Via 1° Maggio. . . . .	67
5.13	Confronto tra le concentrazione di NO <sub>2</sub> in Via 1° Maggio nello scenario invernale(a) e quello estivo(b). . . . .	67
5.14	Confronto tra il tratto di canyon urbano(a) di Via Roma e del tratto aperto(b) durante il periodo invernale. . . . .	68
5.15	. . . . .	68
5.16	Concentrazione di PM <sub>10</sub> per il giorno 01/01/2024 . . . . .	69
5.17	Concentrazioni di PM <sub>10</sub> per il giorno 10/07/2024 . . . . .	70
5.18	Giorno tipo di PM <sub>10</sub> inverno-estate a confronto per Corso Battaglione. . . . .	71
5.19	Confronto tra le concentrazione di PM <sub>10</sub> in Corso Battaglione nello scenario invernale(a) e quello estivo(b). . . . .	71
5.20	Giorno tipo di PM <sub>10</sub> inverno-estate a confronto in Via Parigi. . . . .	72
5.21	Confronto tra le concentrazione di PM <sub>10</sub> in via Parigi durante i due periodi. . . . .	72
5.22	Confronto dell'andamento della velocità del vento nelle date del 05/01/2024 e del 07/01/2024. . . . .	73
5.23	Confronto dell'andamento della temperatura nelle date del 05/01/2024 e del 07/01/2024. . . . .	73
5.24	a)Rosa dei venti per la giornata del 05/01/2024. b)Rosa dei venti per la giornata del 07/01/2024. . . . .	74
5.25	Concentrazione di NO <sub>2</sub> per la giornata del 05/01/2024. . . . .	74
5.26	Concentrazione di NO <sub>2</sub> per la giornata del 07/01/2024 . . . . .	75
5.27	Confronto NO <sub>2</sub> tra la data del 05/01/2024 e 07/01/2024 in Corso Battaglione. . . . .	76
5.28	Confronto NO <sub>2</sub> tra la data del 05/01/2024 e 07/01/2024 in Via Parigi. . . . .	76
5.29	Concentrazione di PM <sub>10</sub> per la giornata del 05/01/2024. . . . .	77

5.30	Concentrazione di $PM_{10}$ per la giornata del 07/01/2024 . . . . .	78
5.31	Confronto di $PM_{10}$ in corso Battaglione. . . . .	78
5.32	Confronto di $PM_{10}$ in via Parigi. . . . .	79
5.33	1) Stazione meteo di Piazza Plouves (580 m), 2) stazione meteo di Saint-Christophe (545 m) e 3) stazione meteo di Quart-Ollignan (650 m). . . . .	79
5.34	Andamenti della temperatura nelle quattro giornate considerate. . .	80
5.35	Concentrazione di $NO_2$ per la giornata del 05/01/2024. . . . .	81
5.36	Concentrazione di $NO_2$ per la giornata del 07/01/2024 . . . . .	82
5.37	Confronto $NO_2$ tra la data del 09/01/2024 e 14/01/2024 in Corso Battaglione. . . . .	83
5.38	Confronto $NO_2$ tra la data del 09/01/2024 e 14/01/2024 in Via 1° Maggio. . . . .	83
5.39	Concentrazione di $PM_{10}$ per la giornata del 05/01/2024. . . . .	84
5.40	Concentrazione di $PM_{10}$ per la giornata del 07/01/2024 . . . . .	85
5.41	Confronto $PM_{10}$ tra la data del 09/01/2024 e 14/01/2024 in Corso Battaglione. . . . .	86
5.42	Principali assi stradali di Aosta: 1) Corso Battaglione; 2) Via Parigi; 3) Via Saint-Martin de Corléans; 4) Via Roma; 5) Via Clavalité; 6) Via 1° Maggio e 7) Via Torino. . . . .	87
5.43	Confronto tra i tre scenari. . . . .	88
5.44	Confronto delle concentrazioni di $NO_2$ nei tre scenari con traffico modificato in Corso Battaglione. . . . .	89
5.45	Confronto delle concentrazioni di $NO_2$ nei tre scenari con traffico modificato in Via Parigi. . . . .	89
5.46	Mappe delle concentrazioni medie giornaliere di $NO_2$ per i 3 casi: flusso traffico originale, ridotto del 25% e del 50%. . . . .	91
5.47	Confronto delle concentrazioni di $PM_{10}$ nei tre scenari con traffico modificato in Corso Battaglione. . . . .	92
5.48	Confronto delle concentrazioni di $PM_{10}$ nei tre scenari con traffico modificato in Via Parigi. . . . .	92
5.49	Mappe delle concentrazioni medie . . . . .	93



# Bibliografia

- [1] H. A. R. De Bruin e A. A. M. Holtslag, «A simple parameterization of the surface fluxes of sensible and latent heat during daytime compared with the Penman–Monteith concept,» *Journal of Applied Meteorology*, vol. 21, pp. 1610–1621, 1982.
- [2] C. De Risio, *Auto ecologica a metano compresso*. Teknos, 1996.
- [3] D. Elsom, *Smog Alert: Managing Urban Air Quality*. London: Earthscan Publications, 1996.
- [4] G. Finzi, G. Pirovano e M. Volta, *Gestione della qualità dell'aria, modelli di simulazione e previsione*. McGraw-Hill Libri Italia, 2001.
- [5] A. A. M. Holtslag e A. P. Van Ulden, «A simple scheme for daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data,» *Journal of Climate and Applied Meteorology*, vol. 22, pp. 517–529, 1983.
- [6] IARC, «Monographs on the Evaluation of the Carcinogenic Risk to Humans: Diesel and Gasoline Exhaust and Some Nitroarenes,» World Health Organization, rapp. tecn., 1989.
- [7] F. Kasten e G. Czeplak, «Solar and terrestrial radiation dependent on the amount and type of cloud,» *Solar Energy*, vol. 24, pp. 177–189, 1980.
- [8] T. R. Oke, *Boundary Layer Climates*. Taylor & Francis, 2002.
- [9] C. H. B. Priestley e R. J. Taylor, «On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters,» *Monthly Weather Review*, vol. 100, pp. 81–92, 1972.
- [10] L. Soulhac, P. Salizzoni, F.-X. Cierco e R. Perkins, «The model SIRANE for atmospheric urban pollutant dispersion: Part I, presentation of the model,» *Atmospheric Environment*, vol. 45, pp. 7379–7395, 2011.
- [11] R. Sozzi, *La micrometeorologia e la dispersione degli inquinanti in aria*. Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e Servizi Tecnici, 2003.



- [12] R. Uccelli, C. C. Lombardi e F. Mauro, «Impatto ambientale e sanitario dei carburanti per autotrazione,» *Energia Ambientale Innovazione*, pp. 19–32, 1996.





# Ringraziamenti

Ringrazio sinceramente il professore Luca Ridolfi e la professoressa Sofia Fellini per aver dato la possibilità di poter lavorare con loro per il mio lavoro di tesi. Hanno saputo affiancare il mio lavoro con la loro professionalità e con molta umanità.

Ringrazio inoltre la dottoressa Tiziana Magri per avermi accolto in ARPA Valle d'Aosta e che ha saputo sempre guidarmi e stimolarmi durante questo percorso.