

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria
per l'Ambiente e il Territorio



TESI DI LAUREA MAGISTRALE

Particolato aerodisperso e CC-Moving-Lab: Gestione ed
analisi dei dati con confronto tra stazione fissa urbana e
stazioni esterne suburbane e rurali

Relatrice

Prof.ssa Marina Clerico

Correlatori

Ing. Federica Pognant

Ing. Matteo Bo

Candidata

Chiara Boanini

Anno accademico 2019/2020

ABSTRACT (IT)

L'inquinamento atmosferico è uno dei principali fattori di rischio legati alla salute a livello mondiale e le conseguenze derivanti da esso sono ormai fortemente documentate. Secondo quanto stimato dall'Organizzazione Mondiale della Sanità 9 persone su 10 a livello globale vivono in zone in cui l'aria presenta concentrazioni di sostanze inquinanti aerodisperse non accettabili. Oltre ai critici effetti che comporta alla salute umana, continua a modificare in maniera preoccupante il clima e le sue dinamiche.

Il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino, rientrato all'interno dell'iniziativa "Dipartimenti di Eccellenza 2018-2022" del MIUR, mira, attraverso il progetto Cambiamenti_Climatici@polito (CC@polito), a ridurre l'effetto che l'inquinamento e i cambiamenti climatici provocano sulla popolazione e gli ecosistemi, tramite sistemi di monitoraggio e analisi dati che permettono di arricchire le conoscenze a riguardo in maniera innovativa e sagace. Grazie ai finanziamenti ricevuti dal MIUR per quest'iniziativa e allo sviluppo del laboratorio integrato CC-Lab@polito, è stata avviata la realizzazione del CC-Moving-Lab, un laboratorio mobile che si compone di due diversi elementi: un VAN, già operativo da settembre 2020, e il modulo AQ (Air-Quality), un carrello strumentato in fase di completamento.

Questo lavoro di tesi si inserisce all'interno del contesto della realizzazione del modulo AQ, che permette di effettuare misure per la qualità dell'aria e valutazioni sull'inquinamento atmosferico, ricoprendo un ruolo importante per l'acquisizione dei dati, soprattutto in aree nelle quali non sono già presenti stazioni fisse di monitoraggio. In particolare, il presente elaborato rientra nell'ambito della progettazione esecutiva del modulo, in quanto quella preliminare e definitiva sono state oggetto di studi precedenti. È stata seguita la fase di precollaudo degli strumenti che dovranno essere inseriti all'interno del carrello. Questi si occuperanno della misurazione di PM, NO_x, O₃ e delle condizioni meteorologiche. Per permettere il confronto dei dati registrati dai diversi strumenti si è valutata la necessità di un sistema in grado di elaborare i dati e inserirli all'interno di un database. A questo scopo è stato realizzato un programma attraverso il linguaggio di programmazione Python, che tratta i dati grezzi prodotti dagli strumenti,

fornisce indicazioni rispetto ad errori riscontrati in fase di misurazione e restituisce medie orarie, giornaliere e grafici per agevolare successive analisi e valutazioni.

Successivamente, sfruttando il programma sviluppato, si è svolta un'analisi spaziale dei parametri di qualità dell'aria, mettendo a confronto diversi strumenti nei contesti urbano, suburbano e rurale. In questo modo, è stato possibile effettuare uno studio preliminare per poter comprendere quali saranno le potenzialità e i vantaggi in termini di flessibilità del modulo AQ. In particolare, sono stati confrontati i dati raccolti dagli strumenti collocati nel CC-Green-Roof del Politecnico di Torino e quelli collezionati nelle campagne di misura effettuate dall'estate 2019 a novembre 2020. Dalle elaborazioni dei diversi scenari, non trascurando i problemi che si possono riscontrare durante l'utilizzo degli strumenti, emerge l'effettiva possibilità del loro utilizzo in stazioni mobili come il modulo AQ del CC-Moving-Lab, per il monitoraggio dei parametri relativi alla qualità dell'aria.

ABSTRACT (EN)

Air pollution is one of the major world's health-related risk factors and the consequences of it are highly documented. According to the World Health Organization, 9 out of 10 people globally live in areas where air has unacceptable concentrations of airborne pollutants. In addition to the critical effects it has on human health, it changes the climate and its dynamics in a worrying way.

The Department of Environment, Land and Infrastructure Engineering (DIATI) of the Politecnico di Torino, being part of the initiative "Departments of Excellence 2018-2022" of the MIUR, aims, through the Cambiamenti_Climatici@polito (CC@polito) project, to reduce the effect that pollution and climate change have on the population and ecosystems, through monitoring and data analysis systems that allow to enrich knowledge about it in an innovative and sagacious way. Thanks to the funding received by the MIUR for this initiative and the development of the CC-Lab@polito integrated laboratory, the realization of the CC-Moving-Lab has been started. It is mobile laboratory that consists of two different elements: a VAN, which is already operational since September 2020, and the AQ module (Air-Quality), a tooled trailer which is being completed.

This thesis work is part of the context of the implementation of the AQ module, which allows to carry out measures for air quality and evaluations on air pollution, playing an important role for the acquisition of data, especially in areas where there are already no fixed monitoring stations. In particular, this paper falls within the scope of the executive design of the module, as the preliminary and definitive one have been the subject of previous studies. The pre-testing phase of the instruments that will have to be inserted inside the trailer has been followed. These instruments will perform the measurement of PM, NO_x, O₃ and weather conditions. In order to allow the comparison of the data recorded by the different instruments, the need for a system able to process the data and insert it into a database was evaluated. For this purpose, a program has been created through the Python programming language, which treats the raw data produced by the instruments, provides indications with respect to errors found during the measurement phase and returns hourly and daily averages and graphs to facilitate subsequent analysis and evaluations.

Subsequently, taking advantage of the developed program, a spatial analysis of air quality parameters was carried out, comparing different instruments in urban, suburban and rural contexts. In this way, it was possible to carry out a preliminary study in order to understand what the potential and advantages in terms of flexibility of the AQ MODULE will be. In particular, the data collected by the instruments placed in the CC-Green-Roof of the Politecnico di Torino and those collected in the measurement campaigns carried out from summer 2019 to november 2020 were compared. From the elaborations of the different scenarios, not neglecting the problems that can be rediscovered during the use of the instruments, emerges the real possibility of their use in mobile stations such as the AQ module of the CC-Moving-Lab, for the monitoring of parameters related to air quality.

INDICE

1	INTRODUZIONE	1
2	INQUADRAMENTO NORMATIVO	7
2.1	DIRETTIVA 2008/50/CE	8
2.2	DECRETO LEGISLATIVO N.155 DEL 2010	8
3	INQUINAMENTO ATMOSFERICO	15
3.1	L'ATMOSFERA	15
3.1.1	<i>Gli strati dell'atmosfera</i>	16
3.1.2	<i>Scale spaziali e temporali</i>	18
3.1.3	<i>Stabilità atmosferica</i>	21
3.2	PARAMETRI DELLA QUALITÀ DELL'ARIA DI INTERESSE	26
3.2.1	<i>Particolato atmosferico</i>	26
3.2.1.1	Distribuzione dimensionale e interazione tra le mode	28
3.2.1.2	Meccanismi di rimozione	32
3.2.1.3	Aerosol urbano	35
3.2.2	<i>Ozono e ossidi di azoto</i>	39
3.3	EFFETTI SULLA SALUTE	42
4	CC-MOVING-LAB E STRUMENTAZIONE	45
4.1	CC-MOVING-LAB E MODULO AQ	45
4.2	STRUMENTI E ACCORGIMENTI EMERSI DURANTE LA FASE DI PRECOLLAUDO	50
4.2.1	<i>Analizzatore ottico APM2</i>	50
4.2.2	<i>Analizzatore ottico FIDAS</i>	53
4.2.3	<i>Analizzatore NO_x</i>	56
4.2.4	<i>Analizzatore O₃</i>	58
4.2.5	<i>Campionatore PM</i>	60
4.2.6	<i>Sonda per i gas</i>	62
4.2.7	<i>Stazione meteo</i>	63
5	PROGRAMMA SVILUPPATO PER LE ANALISI DATI	65
5.1	PROGRAMMA 0	67
5.1.1	<i>APM2 e FIDAS</i>	67
5.1.1.1	FASE 0: DEFINIZIONI	67
5.1.1.2	FASE 1: ACQUISIZIONE DATI	71
5.1.1.3	FASE 2: ELABORAZIONE	73

5.1.2	<i>METEO</i>	86
5.1.2.1	FASE 0: DEFINIZIONI.....	86
5.1.2.2	FASE 1: ACQUISIZIONE DATI.....	87
5.1.2.3	FASE 2: ELABORAZIONE	88
5.2	PROGRAMMA 1	95
5.2.1	<i>FASE 0: DEFINIZIONI</i>	95
5.2.2	<i>FASE 1: ACQUISIZIONE DATI ED ELABORAZIONE</i>	96
5.2.2.1	Condizione di database nuovo	97
5.2.2.2	Condizione di database esistente	98
5.2.2.3	Collocazione dati nel database	98
5.3	PROGRAMMA 2	100
5.3.1	<i>FASE 0: DEFINIZIONI</i>	100
5.3.2	<i>FASE 1: ACQUISIZIONE DATI</i>	100
5.3.3	<i>FASE 2: ELABORAZIONE DATI</i>	101
6	ELABORAZIONE DATI E CASI STUDIO	102
6.1	CAMPAGNA DI CANTALUPA E FROSSASCO.....	105
6.2	STRISCIATA SUBURBANA ESTIVA	110
6.3	STRISCIATA SUBURBANA INVERNALE	114
6.4	CAMPAGNA DI SAN GIORIO	117
6.5	CAMPAGNA DI SALBERTRAND.....	124
6.6	CONSIDERAZIONI E CONFRONTI TRA LE DIVERSE CAMPAGNE DI MISURA.....	129
7	CONCLUSIONI	135
	APPENDICI	I
	APPENDICE I – CANTALUPA E FROSSASCO	II
	APPENDICE II – STRISCIATA SUBURBANA ESTIVA.....	IV
	APPENDICE III – STRISCIATA SUBURBANA INVERNALE	VIII
	APPENDICE IV – SAN GIORIO	X
	APPENDICE V – SALBETRAND	XII
	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	XIV

1 Introduzione

La qualità dell'aria e l'inquinamento atmosferico sono tematiche di attuale interesse a livello mondiale. Nonostante le azioni intraprese per cercare di ridurre le emissioni, rimangono molte le aree in cui si registrano concentrazioni di inquinanti sopra i livelli indicati dall'OMS [1]. Questi provocano danni sia alla salute umana che all'ambiente.

Dal report annuale *State of Global Air 2020* dell'Health Effects Institute e dell'Institute for Health Metrics and Evaluation's (IHME's) [2] emerge che nel 2019 l'inquinamento atmosferico è passato dalla quinta alla quarta posizione tra le cause di morte a livello mondiale, come riportato in *Figura 1.1*, mantenendo effetti più dannosi di altri fattori di rischio legati alle malattie croniche, come l'obesità o l'ipercolesterolemia e la malnutrizione. Non c'è da stupirsi, infatti, che alcuni degli obiettivi di sviluppo sostenibile (SDGs), approvati dalle Nazioni Unite per l'Agenda 2030 [3] per contribuire al benessere umano, dell'ambiente e allo sviluppo globale, necessitino di un importante miglioramento della qualità dell'aria per essere raggiunti.

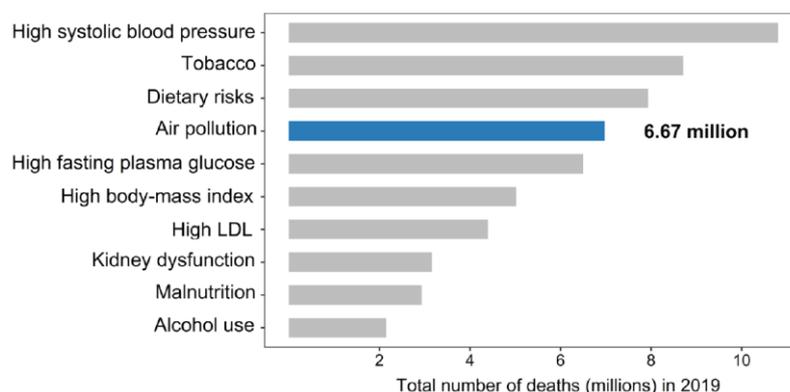


Figura 1.1. Classifica globale dei fattori di rischio tra tutte le cause di morte nel 2019 (fonte: Health Effects Institute, State of Global Air 2020, Boston (MA), 2020).

È da non sottovalutare, però, che esistono grandi disparità ancora oggi nel mondo per quanto riguarda l'inquinamento atmosferico. Secondo l'OMS [4] il 90 % delle morti riconducibili alle scarse condizioni di qualità dell'aria si registrano principalmente in Asia e Africa (si pensi alle condizioni delle zone urbane che si riscontrano in alcune aree di questi continenti e alla desertificazione). Nonostante siano visibili in alcune regioni del mondo miglioramenti nelle concentrazioni di PM_{2.5} [2], nei paesi sottosviluppati o a più basso reddito si continuano a registrare le peggiori situazioni (*Figura 1.2*). Questi andamenti in genere seguono lo sviluppo socioeconomico e demografico di ogni nazione. L'esposizione alla frazione fine di particolato supera ancora a livello globale, tranne che per alcuni paesi a reddito più alto, l'obiettivo prefissato dall'OMS di 10 µg/m³.

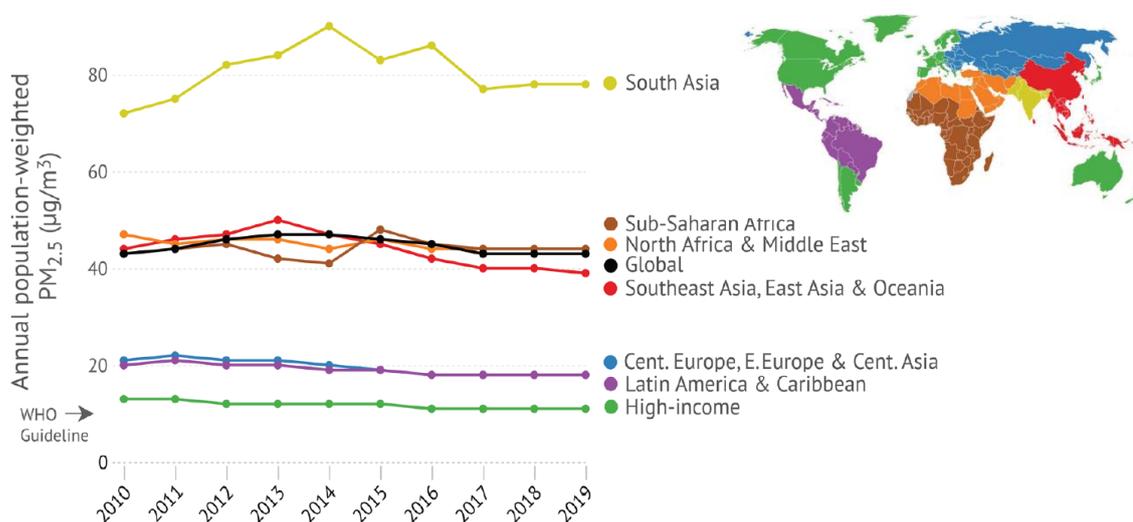


Figura 1.2. Andamento della media annuale della concentrazione di PM_{2.5} dal 2010 al 2019 (fonte: Health Effects Institute, State of Global Air 2020, Boston (MA), 2020).

Il problema dell'inquinamento atmosferico assume una maggiore importanza nell'attuale condizione di emergenza epidemiologica da Covid-19, sottolineando come il rapporto tra questi due fenomeni non possa essere trascurato. Studi preliminari recenti [5], [6] non ancora conclusi, infatti, stanno valutando due principali aspetti della pandemia legati all'inquinamento atmosferico. Il primo riguarda i danni causati all'apparato respiratorio dagli inquinanti presenti in aria, che aggravano sicuramente le condizioni nei soggetti che contraggono il Covid-19, visto il comune organo bersaglio su cui incidono. Allo stesso tempo, si sta cercando di comprendere fino a che punto l'inquinamento atmosferico agevoli la permanenza del virus in aria, considerando le correlazioni riscontrate tra elevati

livelli di contaminazione da particolato atmosferico e cospicua diffusione di infezione virale.

La qualità dell'aria è strettamente legata alla concentrazione di alcuni inquinanti come il particolato (PM), gli ossidi di azoto (NO_x), l'ozono troposferico (O₃), il monossido di carbonio (CO) e il biossido di zolfo (SO₂) [7]. Nel presente lavoro di tesi verrà trattato soprattutto il particolato atmosferico e si effettueranno valutazioni, in forma meno approfondita, sugli ossidi di azoto e l'ozono troposferico.

Il particolato (PM) è una miscela complessa di sostanze solide e liquide sospese in aria. Può essere classificato in funzione di diversi fattori, può avere origine sia antropica che naturale ed essere emesso direttamente in atmosfera (aerosol primario) o derivare da processi di conversione (aerosol secondario) [8].

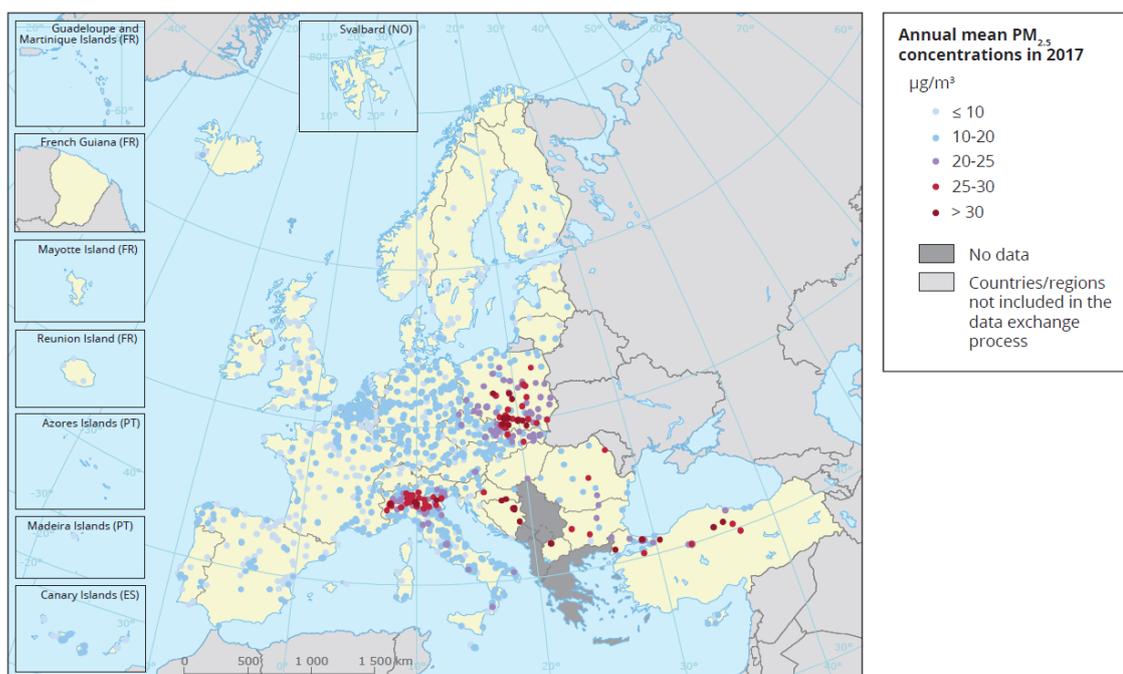


Figura 1.3. Concentrazioni osservate nel 2017 di PM_{2.5} (fonte: European Environment Agency, *Air quality in Europe - 2019 report*, Luxembourg, 2019).

Nonostante la zona europea registri valori di concentrazione di PM molto al di sotto delle aree maggiormente inquinate nel mondo, dalla relazione sulla Qualità dell'Aria in Europa del 2019 dell'European Environment Agency [9] emerge che il Nord Italia è sottoposto a livelli di PM_{2.5} tra i più alti d'Europa (Figura 1.3). Inoltre, la Corte di Giustizia dell'Ue, ha condannato l'Italia per aver violato il diritto sulla qualità dell'aria ambiente,

superando, senza adottare misure appropriate per evitarlo, i valori limite di PM10 tra il 2008 e il 2017.

I dati relativi agli ultimi decenni, infatti, segnalano un miglioramento nelle concentrazioni dei principali inquinanti nel Nord-Italia, ma per quanto riguarda l'ozono e il particolato si registrano ancora condizioni stazionarie di criticità [10]. Le caratteristiche di questi inquinanti, favorite dalle condizioni meteorologiche e orografiche della Pianura Padana, ne provocano una lunga permanenza in atmosfera e una difficoltosa rimozione dalla stessa.

All'interno di questo contesto, emerge la necessità di studi approfonditi che siano in grado di monitorare le concentrazioni di inquinanti, per riuscire ad individuare adeguati piani volti alla riduzione degli effetti dell'inquinamento atmosferico. Per condurre queste campagne le norme (Direttiva 2008/50/CE e D.Lgs. 155/2010), col concetto di "misura indicativa", evidenziano la possibilità di utilizzare stazioni mobili, oltre a quelle fisse. Le stazioni mobili, infatti, permettono di raggiungere luoghi che normalmente non vengono monitorati dalle stazioni delle agenzie regionali e nazionali e sono in grado di raccogliere informazioni riguardanti le condizioni meteorologiche e gli andamenti delle concentrazioni di inquinanti nelle immediate vicinanze di una determinata sorgente emissiva o di un evento catastrofico eccezionale. Le campagne di misura intraprese in questo modo permettono di effettuare valutazioni sito specifiche e individuare adeguate azioni che siano efficaci a livello locale per il miglioramento della qualità dell'aria.

Il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino dedica particolare attenzione a tutti gli aspetti che riguardano la salvaguardia e la gestione della qualità ambientale, la sostenibilità delle attività antropiche e i cambiamenti climatici. Negli anni sono stati intrapresi diversi progetti e attività con lo scopo di ridurre l'effetto che l'inquinamento e i cambiamenti climatici provocano sulla popolazione e gli ecosistemi. Tra gli ultimi troviamo lo sviluppo del laboratorio integrato CC-Lab@polito, all'interno del quale, grazie ai finanziamenti ricevuti dal MIUR per l'iniziativa "Dipartimenti di Eccellenza 2018-2022", è stata avviata la realizzazione del CC-Moving-Lab. Si tratta di un laboratorio mobile che si compone di due diversi elementi: un VAN, già operativo da settembre 2020, e il modulo Air-Quality (AQ), un carrello strumentato in fase di completamento, che permetterà di effettuare misure con

risoluzione temporale elevata di PM, NO_x, O₃ e condizioni meteorologiche per la valutazione della qualità dell'aria.

Il presente elaborato si introduce all'interno del contesto della realizzazione intrapresa dal gruppo di ricerca di Sicurezza Ambientale del DIATI del modulo AQ, in particolare nella fase successiva alla progettazione definitiva, e rappresenta uno sviluppo della Tesi di Dottorato dell'Ing. Matteo Bo [11], all'interno della quale, tra le altre cose, sono stati definiti gli aspetti relativi alla progettazione preliminare. Durante il presente lavoro di Tesi è emersa la necessità di realizzare un programma che fosse in grado di trattare i dati degli strumenti che verranno inseriti all'interno del modulo AQ. A tal scopo è stato progettato, tramite il linguaggio di programmazione Python, un sistema in grado di raccogliere i dati relativi ai vari strumenti per effettuare confronti e valutazioni sulle dinamiche dei diversi inquinanti. Per fare ciò sono stati sfruttati gli strumenti attualmente operativi nel CC-Green-Roof-Lab del Politecnico di Torino, che verranno successivamente utilizzati anche nel laboratorio mobile. Il CC-Green-Roof-Lab (di seguito solo CC-Green-Roof) è, come il CC-Moving-Lab, un'ulteriore sezione del progetto CC-Lab del DIATI, che si compone di un laboratorio a cielo aperto nel quale sono inseriti al momento strumenti atti a monitorare le concentrazioni di particolato aerodisperso e le condizioni meteorologiche. In seguito, è stata seguita attivamente la fase di precollaudo degli strumenti che verranno inseriti all'interno del modulo AQ, durante la quale sono emersi accorgimenti e criticità della gestione degli strumenti. Infine, il programma sviluppato e le conoscenze acquisite sono stati sfruttati per raggiungere il principale obiettivo di questo lavoro di Tesi, cioè effettuare analisi approfondite e confronti tra diversi contesti, in modo tale da poter comprendere quali saranno le potenzialità del laboratorio mobile in termini di flessibilità e verificare l'effettiva possibilità di utilizzo degli strumenti nelle stazioni mobili.

Nel secondo capitolo del presente elaborato viene riassunto l'inquadramento normativo in materia di qualità dell'aria e le normative vigenti a livello europeo e nazionale, evidenziando i limiti imposti e le modalità di misurazione.

Nel terzo capitolo vengono descritte le principali caratteristiche dell'atmosfera, come la sua stabilità viene influenzata dai fenomeni meteorologici e i meccanismi di trasporto ai quali sono sottoposti gli inquinanti al suo interno. Successivamente si analizzano nel

dettaglio gli inquinanti di interesse per il presente elaborato, vale a dire il particolato atmosferico, gli ossidi di azoto e l'ozono troposferico, con particolare attenzione alla distribuzione dimensionale e ai meccanismi di formazione e rimozione dei PM. Infine, si valutano i fattori che determinano la pericolosità di queste sostanze per la salute umana.

Il quarto capitolo è dedicato alla descrizione del progetto CC-Moving-Lab. In particolare, si evidenziano le caratteristiche della strumentazione scelta per il modulo AQ e gli accorgimenti emersi durante la fase di precollaudo degli strumenti.

Nel quinto capitolo si analizza nel dettaglio il programma sviluppato attraverso la programmazione in Python per l'analisi dei dati e l'individuazione degli eventuali errori di misurazione degli strumenti.

Il sesto capitolo contiene l'elaborazione dei dati di diversi casi studio. È stata condotta un'analisi spaziale della qualità dell'aria, confrontando le concentrazioni di particolato nei contesti urbano del CC-Green-Roof del Politecnico di Torino e suburbano o rurale di altre stazioni, sfruttando il programma sviluppato nel capitolo 5. Sono state trattate le campagne di misura esterne condotte dall'estate 2019 a novembre 2020 ed i rispettivi dati ricavati dagli strumenti presenti nella stazione del CC-Green-Roof.

2 Inquadramento normativo

La normativa in materia di qualità dell'aria e d'inquinamento atmosferico è strutturata su diversi livelli: comunitario, nazionale e locale. Attualmente, i principali riferimenti normativi a riguardo sono le Direttive 2008/50/CE e 2004/107/CE, recepite in Italia con il D.Lgs. 155/2010, che definiscono i valori limite delle concentrazioni degli inquinanti in aria e i piani che devono essere attuati nel caso in cui non siano rispettati i limiti. [12]

L'introduzione da parte dell'Unione Europea negli anni settanta di politiche riguardanti la qualità dell'aria ha permesso la riduzione delle emissioni di inquinanti dalle principali fonti. Per raggiungere tali obiettivi, sono state imposte soglie limite di concentrazione per gli inquinanti che possono incidere negativamente su salute umana, organismi biologici e natura, come particolato, ozono, monossido di carbonio, anidride solforosa, ossidi di azoto, piombo e altre sostanze inquinanti. [13]

Nonostante i risultati ottenuti fino ad oggi, la qualità dell'aria continua ad essere un argomento di forte e attuale interesse, in quanto i progressi compiuti non sono sufficienti e l'inquinamento atmosferico continua ad incidere negativamente sulle persone e sulla natura. Per incentivare il miglioramento, la Commissione europea ha adottato e continua a adottare politiche e misure legislative riguardanti la qualità dell'aria. Le più recenti riguardano il pacchetto di politiche *Clean Air* del 2013, che ha fissato obiettivi per il 2020 e il 2030 e la Comunicazione della Commissione al Parlamento Europeo "*Un' Europa che protegge: aria pulita per tutti*", che fornisce indicazioni a livello nazionale, regionale e locale per un pratico miglioramento della qualità dell'aria. [14]

2.1 Direttiva 2008/50/CE

La Direttiva 2008/50/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 21 maggio 2008 relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa definisce quali sono gli obiettivi di qualità dell'aria, che permettano di garantire la salute dell'uomo e dell'ambiente. Stabilisce, inoltre, quali sono le attività di monitoraggio necessarie per verificare il rispetto dei limiti imposti e i piani correttivi da intraprendere nel caso in cui vengano superati. Vengono stabiliti valori soglia, limiti e obiettivi per gli inquinanti riportati nella Direttiva: biossido di zolfo, biossido di azoto, ossidi di azoto, particolato, piombo, benzene, monossido di carbonio e ozono.

Nel momento in cui, anche se non ancora sorpassate, si reputa che esista il rischio che le soglie imposte possano essere superate, sarà necessario attuare piani a breve termine che possano scongiurare l'effettiva violazione dei limiti imposti. La Direttiva impone, inoltre, alle autorità nazionali l'obbligo di informare la popolazione, le organizzazioni e gli organismi di assistenza in merito alla qualità dell'aria esterna nella zona in cui operano. Richiede, infine, alle singole nazioni di pubblicare un report annuale sulla qualità dell'aria e gli inquinanti illustrati nella normativa.

2.2 Decreto Legislativo n.155 del 2010

Il D.Lgs. n. 155/2010 "Attuazione della direttiva 2008/50/CE relativa alla qualità dell'aria ambiente e per un'aria più pulita in Europa" è la normativa nazionale di riferimento per la pianificazione regionale in merito alla gestione della qualità dell'aria. Successivamente sono stati emanati: il D.Lgs. n. 250/2012, che modifica il D.Lgs. n. 155/2010, definendo il metodo di misurazione dei composti organici volatili; il DM 05 maggio 2015, che illustra i metodi di valutazione delle stazioni di misurazione della qualità dell'aria di cui all'articolo 6 del D.Lgs. n.155/2010 e i metodi di campionamento e di analisi per il particolato PM10, PM2.5 e per gli idrocarburi policiclici aromatici diversi dal benzo(a)pirene; il DM 26 gennaio 2017, che recepisce la Direttiva 1480/2015. [15]

Il D.Lgs. n. 155/2010 individua gli inquinanti per i quali è obbligatorio il monitoraggio per la valutazione della qualità dell'aria: biossido di zolfo (SO₂), biossido di azoto (NO₂), ossidi di azoto (NO_x), monossido di carbonio (CO), particolato (PM10 e PM2.5), piombo

(Pb), benzene (C₆H₆), oltre alle concentrazioni di ozono (O₃) e ai livelli nel particolato PM10 di alcuni parametri, quali cadmio (Cd), nichel (Ni), arsenico (As), e Benzo(a)pirene (BaP). [16]

Gli scopi principali del Decreto sono riportati nell'Art. 1 comma 1:

- “1. individuare gli obiettivi di qualità dell'aria per evitare o ridurre gli impatti sulla salute umana e sull'ambiente mediante la definizione di limiti di concentrazione di ciascun inquinante;*
- 2. introdurre standard di valutazione delle caratteristiche dell'aria nel territorio nazionale;*
- 3. ottenere informazioni sulla qualità dell'aria con la finalità di individuare le misure da adottare per contenere l'inquinamento;*
- 4. mantenere o migliorare la qualità dell'aria;*
- 5. garantire al pubblico le informazioni sulla qualità dell'aria.”*

Al fine di raggiungere questi obiettivi, il Decreto si basa su (Art.1 comma 4): mantenimento di elevati standard qualitativi che siano omogenei a livello nazionale; organizzazione di adeguati sistemi di acquisizione e trasmissione dati, che siano appropriati e finalizzati ad un'adeguata informazione; classificazione del territorio nazionale a seconda delle condizioni meteo-climatiche, di urbanizzazione e orografiche, al fine di effettuare un'adeguata valutazione della qualità dell'aria in funzione delle caratteristiche della zona; individuazione di protocolli da attuare nel momento in cui venga registrato un superamento delle soglie di concentrazione degli inquinanti. La raccolta dati necessaria per la valutazione della qualità dell'aria può derivare da misurazioni in siti fissi, cioè *“misurazioni dei livelli degli inquinanti effettuate in stazioni ubicate presso siti fissi, con campionamento continuo o discontinuo, eccettuate le misurazioni indicative”*, o da modellazioni e/o misurazioni indicative, vale a dire *“misurazioni dei livelli degli inquinanti, basate su obiettivi di qualità meno severi di quelli previsti per le misurazioni in siti fissi, effettuate in stazioni ubicate presso siti fissi di campionamento o mediante stazioni di misurazione mobili, o, per il mercurio, metodi di misura manuali come le tecniche di campionamento diffusivo”* (Art.2).

2. Inquadramento normativo

Il Decreto identifica inoltre, le soglie di valutazione superiore e inferiore, necessarie alla classificazione delle zone per l'identificazione dell'adeguato metodo di misurazione per la valutazione della qualità dell'aria. Sono definite soglia di valutazione superiore “*il livello al di sotto del quale le misurazioni in siti fissi possono essere combinate con misurazioni indicative o tecniche di modellizzazione e, per l'arsenico, il cadmio, il nichel ed il benzo(a)pirene, livello al di sotto del quale le misurazioni in siti fissi o indicative possono essere combinate con tecniche di modellizzazione*”, mentre soglia di valutazione inferiore “*il livello al di sotto del quale è previsto, anche in via esclusiva, l'utilizzo di tecniche di modellizzazione o di stima obiettiva*” (Art.2). Queste soglie sono riportate in *Tabella 2.1.*

Tabella 2.1. Soglie di valutazione superiore e inferiore (fonte: D.Lgs.155/10 – ALLEGATO II).

1. BIOSSIDO DI ZOLFO

	Protezione della salute umana	Protezione della vegetazione
Soglia di valutazione superiore	60% del valore limite sulle 24 ore (75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 3 volte per anno civile)	60% del livello critico invernale (12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Soglia di valutazione inferiore	40% del valore limite sulle 24 ore (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 3 volte per anno civile)	40% del livello critico invernale (8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

2. BIOSSIDO DI AZOTO E OSSIDI DI AZOTO

	Protezione della salute umana (NO ₂)	Protezione della salute umana (NO ₂)	Protezione della vegetazione (NO _x)
Soglia di valutazione superiore	70% del valore limite orario (140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 18 volte per anno civile)	80% del valore limite annuale (32 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	80% del livello critico annuale (24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Soglia di valutazione inferiore	50% del valore limite orario (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 18 volte per anno civile)	65% del valore limite annuale (26 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)	65% del livello critico annuale (19,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

2. Inquadramento normativo

3. MATERIALE PARTICOLATO (PM10 PM2,5)

	Media su 24 ore PM10	Media annuale PM10	Media annuale PM2,5*
Soglia di valutazione superiore	70% del valore limite (35 µg/m ³ da non superare più di 35 volte per anno civile)	70% del valore limite (28 µg/m ³)	70% del valore limite (17 µg/m ³)
Soglia di valutazione inferiore	50% del valore limite (25 µg/m ³ da non superare più di 35 volte per anno civile)	50% del valore limite (20 µg/m ³)	50% del valore limite (12 µg/m ³)

** La soglia di valutazione superiore e la soglia di valutazione inferiore del PM2,5 non si applicano alle misurazioni effettuate per valutare la conformità all'obiettivo di riduzione dell'esposizione al PM2,5 per la protezione della salute umana*

4. PIOMBO

	Media annuale
Soglia di valutazione superiore	70% del valore limite (0,35 µg/m ³)
Soglia di valutazione inferiore	50% del valore limite (0,25 µg/m ³)

5. BENZENE

	Media annuale
Soglia di valutazione superiore	70% del valore limite (3,5 µg/m ³)
Soglia di valutazione inferiore	40% del valore limite (2 µg/m ³)

6. MONOSSIDO DI CARBONIO

	Media su 8 ore
Soglia di valutazione superiore	70% del valore limite (7 mg/m ³)
Soglia di valutazione inferiore	50% del valore limite (5 mg/m ³)

7. ARSENICO, CADMIO, NICHEL E BENZO(A)PIRENE.

	Arsenico	Cadmio	Nichel	B(a)P
Soglia di valutazione superiore in percentuale del valore obiettivo	60% (3,6 ng/m ³)	60% (3 ng/m ³)	70% (14 ng/m ³)	60% (0,6 ng/m ³)
Soglia di valutazione inferiore in percentuale del valore obiettivo	40% (2,4 ng/m ³)	40% (2 ng/m ³)	50% (10 ng/m ³)	40% (0,4 ng/m ³)

Il Decreto definisce, poi, la quantità e il posizionamento dei punti di campionamento e le modalità con cui devono essere effettuate le misure, secondo quanto definito dalle norme tecniche UNI EN [17]:

- Ossidi di azoto: UNI EN 14211:2012 “Qualità dell’aria ambiente. Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di diossido di azoto e monossido di azoto mediante chemiluminescenza”
- Ossidi di zolfo: UNI EN 14212:2012 “Qualità dell’aria ambiente. Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di diossido di zolfo mediante fluorescenza ultravioletta”
- Monossido di Carbonio: UNI EN 14626:2012 “Qualità dell’aria ambiente. Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di monossido di carbonio mediante spettroscopia a raggi infrarossi non dispersiva”
- Benzene: UNI EN 14662:2015 “Qualità dell’aria ambiente. Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di benzene”
- Ozono: UNI EN 14625:2012 “Qualità dell’aria ambiente. Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di ozono mediante fotometria ultravioletta”
- Benzo(a)pirene: UNI EN 15549:2008 “Qualità dell’aria. Metodo normalizzato per la misurazione della concentrazione di benzo(a)pirene in aria ambiente”

Viene, successivamente, indicato il valore limite (*“livello fissato in base alle conoscenze scientifiche, incluse quelle relative alle migliori tecnologie disponibili, al fine di evitare, prevenire o ridurre gli effetti nocivi per la salute umana o per l’ambiente nel suo complesso, che deve essere raggiunto entro un termine prestabilito e che non deve essere successivamente superato”*, Art.2) per ogni inquinante, come riportato in *Tabella 2.2*. Questa soglia rappresenta, quindi, il valore di concentrazione che non deve essere superato per la salvaguardia della salute umana. Nel caso in cui non venga rispettato uno dei limiti indicati in *Tabella 2.2*, le regioni sono tenute ad attuare i piani necessari ad individuare le sorgenti di emissione principali, in modo tale da riportare i valori all’interno dei range stabiliti.

2. Inquadramento normativo

Tabella 2.2. Valori limite (fonte: D.Lgs.155/10 – ALLEGATO XI).

Periodo di mediazione	Valore limite	Margine di tolleranza	Data entro la quale il valore limite deve essere raggiunto
Biossido di zolfo			
1 ora	350 µg/m ³ , da non superare più di 24 volte per anno civile		— (1)
1 giorno	125 µg/m ³ , da non superare più di 3 volte per anno civile		— (1)
Biossido di azoto *			
1 ora	200 µg/m ³ , da non superare più di 18 volte per anno civile	50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2010	1° gennaio 2010
Anno civile	40 µg/m ³	50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2010	1° gennaio 2010
Benzene *			
Anno civile	5,0 µg/m ³	5 µg/m ³ (100 %) il 13 dicembre 2000, con una riduzione il 1° gennaio 2006 e successivamente ogni 12 mesi di 1 µg/m ³ fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2010	1° gennaio 2010
Monossido di carbonio			
Media massima giornaliera calcolata su 8 ore (2)	10 mg/ m ³		— (1)
Piombo			
Anno civile	0,5 µg/m ³ (3)		— (1) (3)
PM10 **			
1 giorno	50 µg/m ³ , da non superare più di 35 volte per anno civile	50 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante	— (1)

2. Inquadramento normativo

		fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2005	
Anno civile	40 µg/m ³	20 % il 19 luglio 1999, con una riduzione il 1° gennaio 2001 e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2005	— (1)
PM2,5			
FASE 1			
Anno civile	25 µg/m ³	20% l'11 giugno 2008, con riduzione il 1° gennaio successivo e successivamente ogni 12 mesi secondo una percentuale annua costante fino a raggiungere lo 0 % entro il 1° gennaio 2015	1° gennaio 2015
FASE 2 (4)			
Anno civile	(4)		1° gennaio 2020

(1) Già in vigore dal 1° gennaio 2005.

(2) La massima concentrazione media giornaliera su 8 ore si determina con riferimento alle medie consecutive su 8 ore, calcolate sulla base di dati orari ed aggiornate ogni ora. Ogni media su 8 ore in tal modo calcolata è riferita al giorno nel quale la serie di 8 ore si conclude: la prima fascia di calcolo per un giorno è quella compresa tra le ore 17:00 del giorno precedente e le ore 01:00 del giorno stesso; l'ultima fascia di calcolo per un giorno è quella compresa tra le ore 16:00 e le ore 24:00 del giorno stesso.

(3) Tale valore limite deve essere raggiunto entro il 1° gennaio 2010 in caso di aree poste nelle immediate vicinanze delle fonti industriali localizzate presso siti contaminati da decenni di attività industriali. In tali casi il valore limite da rispettare fino al 1° gennaio 2010 è pari a 1,0 µg/m³. Le aree in cui si applica questo valore limite non devono comunque estendersi per una distanza superiore a 1.000 m rispetto a tali fonti industriali.

(4) Valore limite da stabilire con successivo decreto ai sensi dell'articolo 22, comma 6, tenuto conto del valore indicativo di 20 µg/m³ e delle verifiche effettuate dalla Commissione europea alla luce di ulteriori informazioni circa le conseguenze sulla salute e sull'ambiente, la fattibilità tecnica e l'esperienza circa il perseguimento del valore obiettivo negli Stati membri.

* Per le zone e gli agglomerati per cui è concessa la deroga prevista dall'articolo 9, comma 10, i valori limite devono essere rispettati entro la data prevista dalla decisione di deroga, fermo restando, fino a tale data, l'obbligo di rispettare tali valori aumentati del margine di tolleranza massimo.

** Per le zone e gli agglomerati per cui è concessa la deroga prevista dall'articolo 9, comma 10, i valori limite devono essere rispettati entro l'11 giugno 2011, fermo restando, fino a tale data, l'obbligo di rispettare tali valori aumentati del margine di tolleranza massimo.

3 Inquinamento atmosferico

3.1 L'atmosfera

L'atmosfera terrestre è una miscela di gas composta principalmente da azoto (N₂) 78%, ossigeno (O₂) 20% e argon (Ar) 1%, come riportato in *Tabella 3.1* [18]. Gli ulteriori gas presenti vengono chiamati gas in traccia, ma ricoprono comunque un ruolo importante nella composizione chimica dell'atmosfera. [8]

Tabella 3.1. Composizione media dell'atmosfera per altitudini inferiori a 25 km (fonte: R. G. Barry, R. J. Chorley e M. C. Serreze, Atmosphere, Weather and Climate, Taylor & Francis Group, 2009).

Component	Symbol	Volume % (dry air)	Molecular weight
Nitrogen	N ₂	78.08	28.02
Oxygen	O ₂	20.95	32.00
*Argon	Ar	0.93	39.88
Carbon dioxide	CO ₂	0.037	44.00
†Neon	Ne	0.0018	20.18
*‡Helium	He	0.0005	4.00
†Ozone	O ₃	0.00006	48.00
Hydrogen	H	0.00005	2.02
†Krypton	Kr	0.00011	
†Xenon	Xe	0.00009	
§Methane	CH ₄	0.00017	

Notes: *Decay products of potassium and uranium. †Recombination of oxygen. ‡Inert gases. §At surface.

Gli attuali studi e misurazioni a livello mondiale riportano un drammatico incremento delle concentrazioni di gas come CO₂, metano (CH₄), ossido di azoto (N₂O) e altri

composti alogenati, che vengono individuati, insieme ad altri, come “gas serra”. Questi, infatti, agiscono come isolante termico per la superficie terrestre, assorbendo le radiazioni infrarosse emesse da essa e riflettendole in parte sulla superficie stessa. Il “buco nell’ozono” nella zona antartica del pianeta è un esempio lampante di come anche i gas presenti in traccia siano in grado di perturbare in maniera importante la composizione chimica dell’atmosfera. L’ozono ha la particolarità di essere un fattore rilevante nella tutela degli organismi dalle radiazioni solari ultraviolette nella stratosfera, ma, allo stesso tempo, nello strato inferiore dell’atmosfera un suo eccessivo accumulo rappresenta un pericolo per la salute degli esseri viventi. [8]

Dalla rivoluzione industriale si è registrato un forte incremento della quantità di particelle sospese nelle regioni industrializzate. Queste particelle atmosferiche (aerosol) derivano sia dalle emissioni dirette, che dalla conversione in particelle di gas precursori. Oltre alle conseguenze a livello atmosferico e climatico, possono nuocere alla salute umana soprattutto nelle aree maggiormente industrializzate. Gli avvenimenti storici che si sono susseguiti negli anni hanno portato all’attuale composizione dell’atmosfera, che è quindi fortemente influenzata dalle conseguenze dello sviluppo tecnologico, quali i prodotti della combustione di combustibili fossili e lo sviluppo di nuove sostanze chimiche sintetiche. [8]

3.1.1 Gli strati dell’atmosfera

La stratificazione dell’atmosfera permette di suddividerla in maniera massiva in una zona alta ed una bassa. La prima viene solitamente individuata fino ad un’altezza di circa 50 km e gli studi che la riguardano sono noti come meteorologia, mentre la seconda viene esaminata all’interno delle discipline che riguardano l’aeronomia. Gli strati dell’atmosfera vengono individuati in funzione delle variazioni con l’altezza di temperatura e pressione che la caratterizzano. Come riportato in *Figura 3.1*, l’atmosfera viene suddivisa in [8]:

- Troposfera. Il primo strato, quello più vicino alla superficie terrestre. Ha un’estensione di 10-15 km ed è caratterizzata da un decremento di temperatura di circa 6.5 °C/km con l’aumento della quota. È lo strato nel quale il mixing verticale

e i fenomeni meteorologici sono più marcati. All'interno di questo strato si è anche in presenza di moti advettivi causati dalle traiettorie del vento.

- Stratosfera. Si estende fino ad una quota di circa 45-55 km. È caratterizzata da un incremento della temperatura con l'altitudine a causa dell'assorbimento dei raggi UV. La turbolenza verticale in questo strato è molto bassa.
- Mesosfera. Raggiunge la quota di circa 80-90 km. In questo strato la temperatura diminuisce con l'altitudine, fino a raggiungere circa -80°C , e il mixing verticale è molto rapido.
- Termosfera. La temperatura ha nuovamente un incremento a causa dell'assorbimento di radiazioni a basse lunghezze d'onda di N_2 e O_2 . Il mixing verticale è rapido.
- Exosfera. È lo strato più alto dell'atmosfera, a quote maggiori di 500 km. I gas presenti in questa regione possono sfuggire all'attrazione gravitazionale terrestre se hanno sufficiente energia.

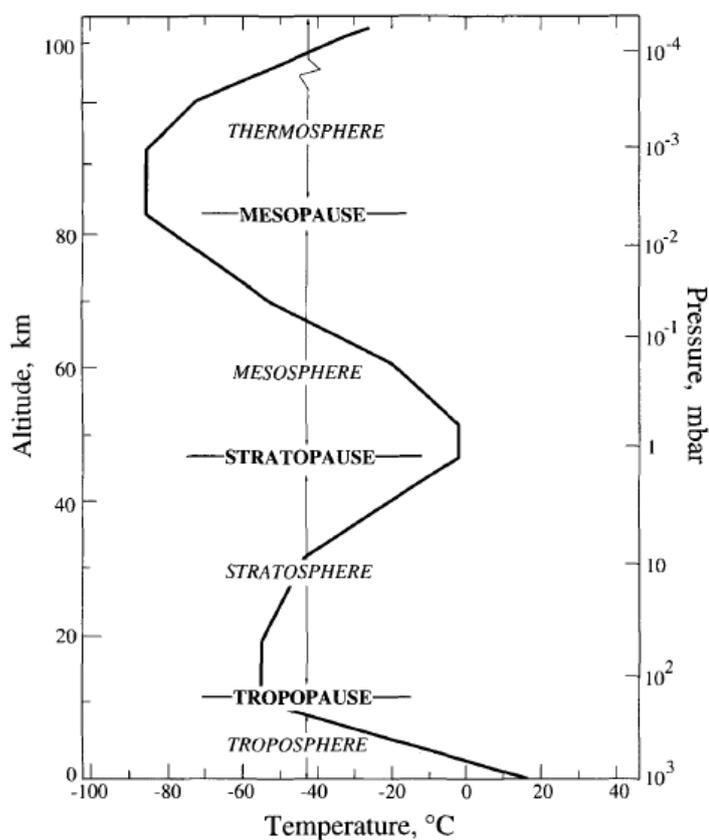


Figura 3.1. Strati dell'atmosfera (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 2006).

La tropopausa è lo strato che divide la troposfera dalla stratosfera e viene definita dal World Meteorological Organization (WMO) come il livello al quale il tasso di diminuzione della temperatura con l'altezza scende a valori inferiori o uguali a 2 K/km [19]. Questo strato ha uno spessore variabile, da circa 18 km in media all'equatore a 8 km ai poli [8], in funzione della temperatura sul livello del mare e della pressione, che a loro volta sono legati alle condizioni climatiche, alla latitudine, alla stagione e alle variazioni giornaliere della pressione. Alla tropopausa la temperatura raggiunge generalmente un valore medio di 217 K (- 56 °C) [18].

La troposfera accoglie circa tutto il vapore acqueo presente nell'atmosfera e, anche se rappresenta una piccola parte dell'atmosfera, contiene circa l'80% della sua massa totale. Al suo interno la temperatura ha un decremento pressoché costante con l'altitudine e in condizioni asciutte il gradiente termico è 9.8 K/km. La troposfera viene solitamente divisa in due parti:

- Strato limite planetario. Strato che si estende dalla superficie terrestre fino a circa 1 km di altitudine. È fortemente condizionato dal cambiamento di temperatura dovuto al ciclo giornaliero.
- Troposfera libera (o strato residuale). Strato che si estende dallo strato limite planetario fino alla tropopausa. [8]

3.1.2 Scale spaziali e temporali

I gas presenti in atmosfera sono sottoposti a numerosi processi chimici e fisici che conferiscono all'atmosfera stessa un ruolo di sistema dinamico. Questi gas, infatti, vengono continuamente scambiati con gli organismi biologici, la vegetazione e gli oceani, comportando un elevato numero di cicli che li riguardano. In particolare, i processi di formazione di tali gas sono generalmente i processi chimici dell'atmosfera stessa, le attività biologiche, le esalazioni vulcaniche, il decadimento radioattivo e le attività industriali. I processi di rimozione dei gas, invece, riguardano soprattutto le reazioni chimiche che avvengono in atmosfera, le attività biologiche, i processi fisici come la formazione di particelle, la deposizione e l'assorbimento da parte di oceani e suolo. La maggior parte degli inquinanti atmosferici può derivare sia da sorgenti sia naturali che

antropiche e, a seconda dei processi di rimozione nei quali vengono coinvolti, possono avere tempi di vita molto diversi. Quindi, risulta molto importante comprendere i processi che regolano i cicli di vita dei gas presenti in atmosfera, in modo tale da avere le giuste conoscenze per agire tempestivamente e contrastare le emissioni da parte dell'uomo, che hanno conseguenze catastrofiche sul clima e sull'ambiente. [8], [20]

Le sostanze presenti in atmosfera subiscono numerosi processi che portano a meccanismi di alterazione diversi. La radiazione solare, quando contiene sufficiente energia, scatena il primo processo chiamato reazione fotochimica, nella quale si ha la rottura dei legami tra le molecole. Un ulteriore processo chimico al quale sono sottoposti i gas è il contatto di molecole diverse, che genera nuove specie con caratteristiche e meccanismi di rimozione completamente diversi da quelli dei precursori. Spesso presentano, infatti, uno stato di ossidazione chimica più elevato o ad esempio un conseguente incremento della polarità. [8]

I gas presenti e i processi chimici e fisici ai quali sono sottoposti permettono, quindi, di paragonare l'atmosfera ad un enorme reattore chimico, all'interno del quale le specie sono introdotte, permangono e vengono rimosse a diverse scale sia temporali che spaziali. [8]

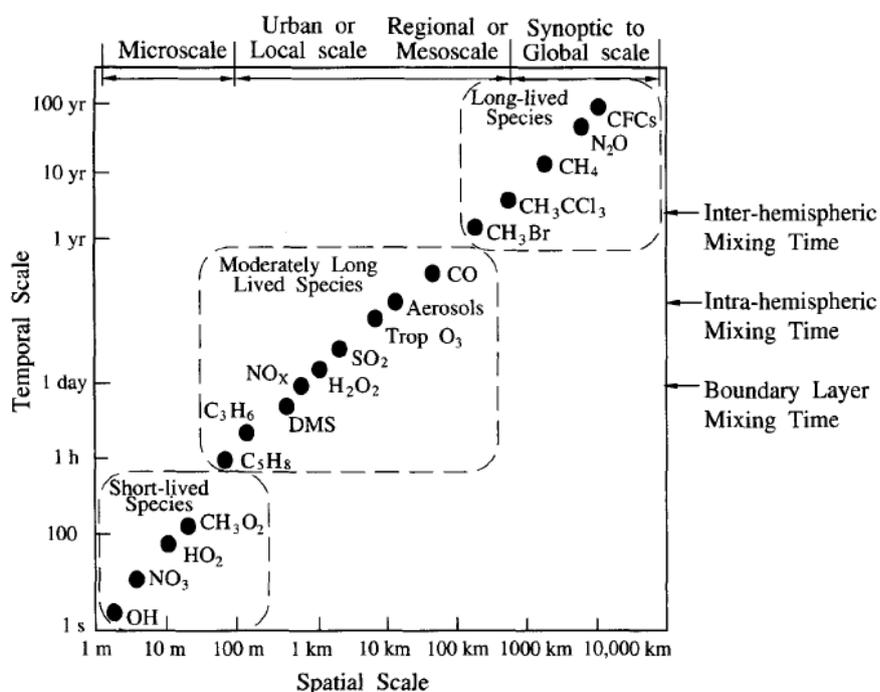


Figura 3.2. Scale spaziali e temporali dei costituenti dell'atmosfera (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 2006).

Le scale di moto contenute nell'atmosfera ricoprono un range di dimensioni che spazia su otto diversi ordini di grandezza (*Figura 3.2*). Generalmente, vengono suddivise nelle seguenti categorie [8]:

- Microscala. Racchiude i fenomeni alle scale di 0-100 m, come il meccanismo di dispersione di un plume proveniente da un camino e la sua interazione con gli edifici circostanti.
- Scala locale. Fenomeni che avvengono alle scale di 1-50 km circa. È la zona nella quale generalmente i contaminanti vengono emessi dalle attività antropiche.
- Mesoscala. Si parla di processi meteorologici più grandi della scala locale, ma più piccoli di quella sinottica. Sono scale fino a centinaia di chilometri. Si fa riferimento, ad esempio, alle brezze marine o ai venti che si instaurano nelle aree monte-valle. [21]
- Scala sinottica. Scala da centinaia a migliaia di chilometri. In questo caso si hanno movimenti interi di sistemi meteorologici.
- Scala globale. Racchiude tutti i fenomeni che si possono osservare alle scale più elevate ($> 5 \cdot 10^3$ km).

I fenomeni che si verificano alle scale sinottica e globale, come riportato in *Figura 3.2*, si riferiscono a scale temporali che rientrano nell'ordine degli anni. Le specie con tempi di residenza maggiori, infatti, hanno la possibilità di permanere in atmosfera per periodi più elevati e quindi di essere sottoposti a meccanismi di movimento che li portino a raggiungere distanze più elevate. Mentre le specie legate alle scale inferiori verranno sottoposte a fenomeni chimici in tempi più brevi. [8]

Phenomenon	Length scale, km
Urban air pollution	1–100
Regional air pollution	10–1000
Acid rain/deposition	100–2000
Toxic air pollutants	0.1–100
Stratospheric ozone depletion	1000–40,000
Greenhouse gas increases	1000–40,000
Aerosol–climate interactions	100–40,000
Tropospheric transport and oxidation processes	1–40,000
Stratospheric–tropospheric exchange	0.1–100
Stratospheric transport and oxidation processes	1–40,000

Figura 3.3. Scale spaziali dei fenomeni chimici atmosferici (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, Wiley-Interscience, 2006).

In *Figura 3.3* sono riportate le scale spaziali dei fenomeni chimici atmosferici. Come si può notare, si hanno delle sovrapposizioni nelle scale dei diversi fenomeni. [8]

Il tempo medio che una molecola di una certa specie trascorre in atmosfera prima che venga rimossa o trasformata in un'altra specie viene detto "tempo di vita". Questo può variare molto ed è strettamente correlato alla scala spaziale della specie. Come si può notare in *Figura 3.2*, infatti, i costituenti con tempi di vita brevi hanno scale temporali caratteristiche ridotte, come ad esempio il radicale ossidrile (OH), che permane mediamente in atmosfera 0.01 s e fa riferimento ad una scala spaziale di circa 1 cm. Mentre il metano (CH₄), con un tempo di vita di circa 10 anni, può essere sottoposto a meccanismi di trasporto che ricoprono distanze pari a tutta la superficie terrestre. [8]

3.1.3 Stabilità atmosferica

L'atmosfera è un sistema in continuo movimento, all'interno del quale si hanno flussi che variano da pochi metri a migliaia di chilometri. La meteorologia è strettamente collegata alla qualità dell'aria e all'inquinamento atmosferico, in quanto, come sottolineato nel paragrafo 3.1.1 - *Gli strati dell'atmosfera*, si occupa della microscala e di quella locale, nelle quali i contaminanti vengono generalmente emessi, sono sottoposti ai meccanismi di trasporto e vengono successivamente rimossi. Risulta di particolare interesse, quindi, lo studio dei concetti base della meteorologia e della stabilità atmosferica per individuare i loro collegamenti all'inquinamento atmosferico. Infatti, dopo l'emissione nella bassa troposfera, cioè nello strato limite planetario, i gas possono essere dispersi, implicando una rapida diminuzione della concentrazione, o, in altri casi, rimangono convogliati in piccoli volumi di aria senza raggiungere una loro diluizione, che porta ad un conseguente incremento dell'inquinamento nell'area di riferimento. Queste due situazioni di miscelamento differente si vengono a creare soprattutto in funzione della variazione della temperatura con l'altitudine e della velocità del vento. [8], [22]

La temperatura nella troposfera generalmente decresce con l'aumentare dell'altezza a causa della diminuzione di pressione, ma nel momento in cui non si hanno più le condizioni di equilibrio (a causa di fenomeni a larga scala o semplicemente per la

variazione di temperatura della superficie), il profilo di temperatura può variare molto rispetto alla condizione iniziale. [8]

I meccanismi di movimento possono essere studiati come un fenomeno adiabatico, durante il quale assumiamo che il pacchetto d'aria non scambi calore con l'ambiente esterno. Il pacchetto d'aria che sale verso l'alto subisce un decremento di pressione e si espande, abbassando la sua temperatura interna. La velocità con cui si raffredda mentre sale viene detto *gradiente adiabatico secco* e corrisponde a:

$$\frac{\partial T}{\partial z} = - 9.8 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Km} \quad (3.1)$$

dove T è la temperatura, mentre z è l'altezza. Il *gradiente termico verticale* rappresenta, invece, la variazione della temperatura dell'aria ambiente che si sta considerando con la quota. È possibile determinare la stabilità dell'atmosfera, e quindi la velocità con cui il contaminante si disperderà in atmosfera, confrontando i profili dei due gradienti sopracitati. [23]

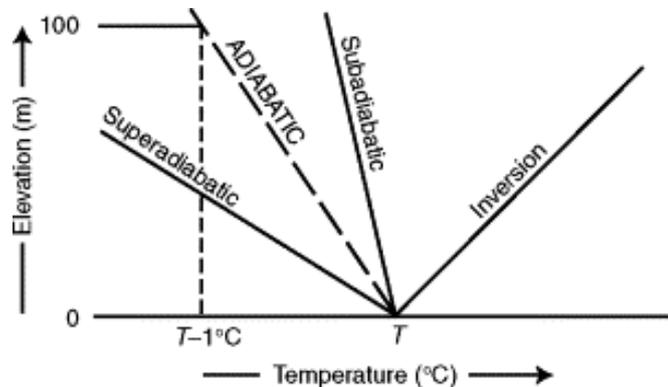


Figura 3.4. Gradiente di temperatura ambiente e gradiente adiabatico secco (fonte: R. F. Weiner e R. A. Matthews, *Environmental Engineering*, 2003).

L'atmosfera è in condizioni di stabilità *neutra* quando il gradiente termico verticale coincide col gradiente termico adiabatico. In questo caso, un pacchetto d'aria che si muove ad un'altezza diversa da quella iniziale, sarà di nuovo in condizioni di equilibrio e non tenderà a continuare il movimento. Come mostrato in *Figura 3.4*, invece, si parla di condizioni super-adiabatiche e quindi di atmosfera *instabile*, quando la temperatura (gradiente termico verticale) diminuisce con l'altezza più velocemente di 9.8 °C/km (gradiente termico adiabatico). Quando si verifica questa condizione, il pacchetto d'aria

che sale verso l'alto seguendo il gradiente adiabatico raggiungerà una temperatura maggiore dell'ambiente circostante (come in *Figura 3.5-A*) e quindi tenderà a salire ancora, a causa dell'espansione dovuta alla temperatura esterna minore (e densità maggiore) della propria. Lo stesso risultato viene ottenuto nel caso in cui il pacchetto d'aria scenda verso il basso. Raggiunge, infatti, una temperatura inferiore a quella circostante e continuerà, quindi, a diminuire la sua quota. [23]

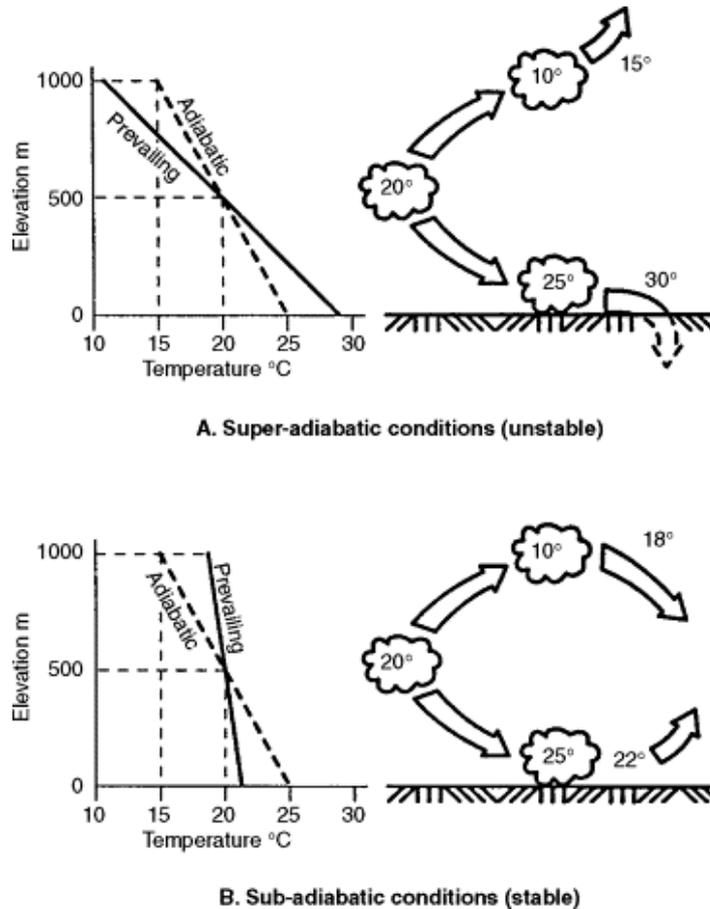


Figura 3.5. Stabilità atmosferica e movimento verticale del pacchetto d'aria (fonte: R. F. Weiner e R. A. Matthews, Environmental Engineering, 2003).

La circostanza di atmosfera *stabile*, invece, si crea nel momento in cui siano presenti condizioni sub-adiabatiche. Il gradiente termico verticale diminuisce più rapidamente di $9.8 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$ (gradiente termico adiabatico) e quindi il pacchetto d'aria che sale verso l'alto raggiunge una temperatura inferiore (quindi densità maggiore) rispetto all'ambiente esterno. Per questo motivo tenderà a tornare a quote inferiori, fino alla condizione iniziale a cui si trovava. Anche in questo caso si ha la stessa tendenza a tornare alla posizione iniziale ugualmente se il pacchetto d'aria scende verso il basso (*Figura 3.5-B*). La

condizione di inversione di temperatura è un caso particolare di atmosfera stabile, in cui la temperatura, invece di diminuire, aumenta con l'altezza. [23]

In generale, quindi, condizioni di atmosfera instabile comportano moti verticali che mescolano rapidamente i contaminanti, incrementando la loro dispersione. L'atmosfera stabile, invece, è caratterizzata da un mescolamento verticale molto più lieve, che inibisce la dispersione dei contaminanti, che tenderanno, quindi, a rimanere in aree prossime alla sorgente di emissione. [8]

La stabilità della bassa atmosfera è fortemente influenzata dai rapidi cambiamenti di temperatura del suolo nell'alternarsi del giorno e della notte. Infatti, quando durante la notte la superficie terrestre si raffredda, provoca la formazione di uno strato di atmosfera stabile a causa della temperatura dell'aria nei pressi del suolo inferiore rispetto a quella sovrastante. Questo tipo di inversione viene chiamato *inversione radiativa* (Figura 3.6-a) e provoca una soppressione del moto verticale dell'aria e dei contaminanti, che non saranno in grado di disperdersi, ma rimarranno concentrati all'interno dello strato di atmosfera stabile, raggiungendo potenzialmente concentrazioni elevate. L'altezza dello strato di inversione termica aumenta con il proseguire della notte e del primo mattino. Dopo mezzogiorno, la situazione di inversione termica è interamente interrotta e si raggiunge una completa condizione di atmosfera instabile, durante la quale i contaminanti presenti hanno la possibilità di disperdersi in un volume molto ampio di aria, comportando una riduzione nelle concentrazioni. Il ciclo appena descritto riparte con l'avvento della sera e della notte. [8], [23]

Come dimostrato da molti studi, le condizioni meteorologiche, comprese le diverse stagioni, possono avere effetti sulla qualità dell'aria, incidendo sulle conseguenze dovute all'alternarsi del giorno e della notte, sulla stabilità atmosferica e sulle caratteristiche dello strato di inversione termica [24]. Quest'ultimo, infatti, si verifica con maggiore intensità (e può permanere anche per più giorni consecutivi) durante la stagione invernale, nella quale la radiazione solare investe la Terra con inclinazioni più elevate rispetto all'estate e con minore intensità. Quindi, la superficie terrestre in inverno accumula un quantitativo minore di calore, che sarà ceduto più rapidamente per irraggiamento dopo il tramonto. Il perdurare di quest'evento è favorito inoltre dalla poca presenza di vento. Forti eventi ventosi possono, infatti, causare un miscelamento dell'aria, portando ad

un'uniformazione delle temperature dei diversi strati dell'atmosfera e, allo stesso tempo, ad un decremento delle concentrazioni di inquinanti presenti nell'aria. Un'ulteriore condizione nella quale si può avere il fenomeno dell'inversione termica è la presenza di neve. Riflettendo in maniera importante la radiazione solare, crea lo stesso effetto del generale clima invernale, schermando il riscaldamento della superficie terrestre, che manterrà temperature ridotte, inibendo il riscaldamento dell'aria nella bassa atmosfera e il miscelamento degli inquinanti. [25]

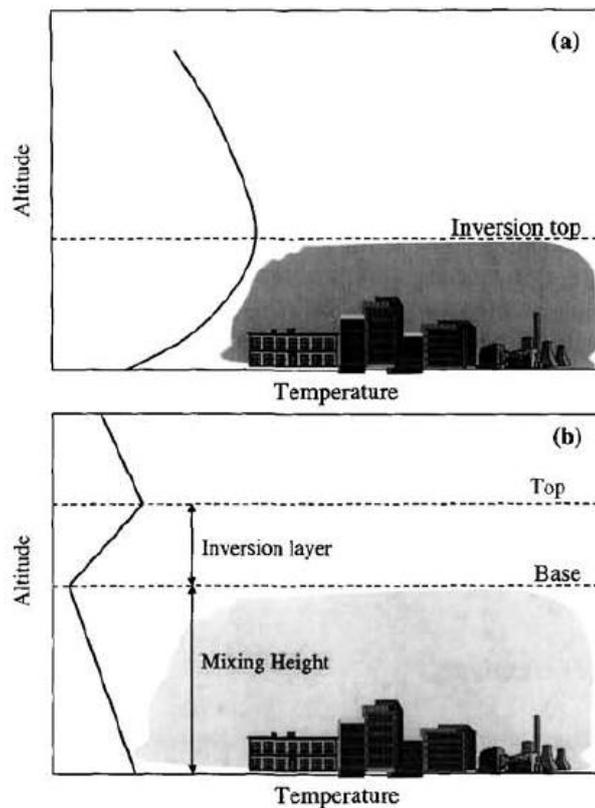


Figura 3.6. Profilo di temperatura e miscelamento dei contaminanti per (a) inversione radiativa e (b) subsidenza atmosferica (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 2006).

Un'altra tipologia di inversione termica è quella che si verifica a quote elevate a causa della *subsidenza atmosferica* (Figura 3.6-b). L'elevata pressione atmosferica che persiste soprattutto nel periodo invernale provoca movimenti d'aria discendenti, che raggiungendo quote inferiori incrementano la propria temperatura essendo sottoposti a compressione. Di solito, l'aria sotto questo strato di inversione è instabile e quindi i contaminanti si mescolano verticalmente fino allo strato stesso senza poterlo attraversare. In queste condizioni di inquinamento atmosferico, l'altezza di miscelazione può arrivare

a poche centinaia di metri. Le notti invernali generalmente sono caratterizzate da un debole gradiente termico verticale, mentre durante il giorno si crea un accentuato strato di inversione che trattiene gli inquinanti presenti in aria. Nelle notti estive, invece, lo strato di inversione radiativo è molto più pronunciato, ma durante il giorno l'atmosfera è in condizioni instabili, permettendo ai contaminanti di disperdersi in un volume d'aria molto più elevato. Si riporta in *Figura 3.7* un esempio di variazione del profilo verticale di temperatura nei mesi di gennaio e luglio a chiarimento di quanto appena detto. [8], [25]

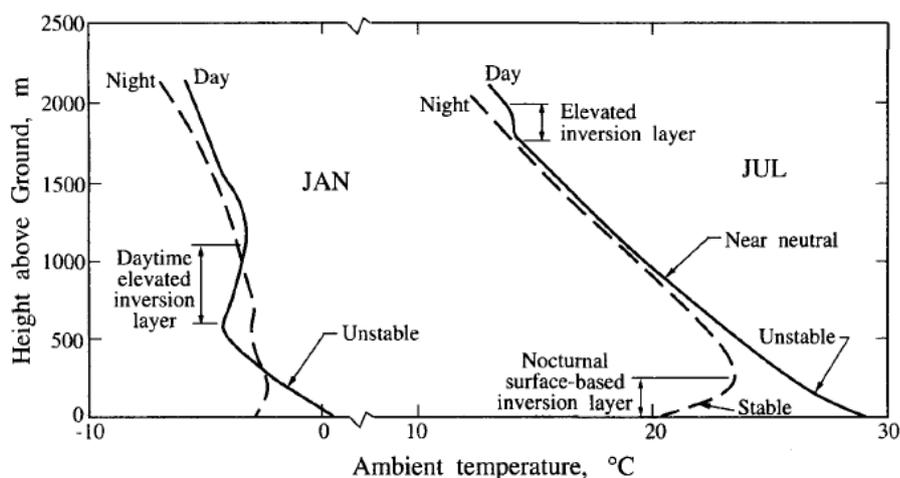


Figura 3.7. Variazioni della struttura verticale dello strato limite planetario nel sito di St. Louis, MO, basate sui dati di gennaio e luglio del 1976 (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, Wiley-Interscience, 2006).

3.2 Parametri della qualità dell'aria di interesse

3.2.1 Particolato atmosferico

Il particolato atmosferico è una miscela complessa di sostanze, che possono avere caratteristiche e dimensioni molto diverse tra loro. Possono spaziare da pochi nanometri, fino a decine di micrometri. Vengono generalmente identificate come particelle ultrafini quelle con diametro aerodinamico minore di $0.1 \mu\text{m}$, particelle fini quelle con diametro aerodinamico minore di $1 \mu\text{m}$, mentre con particelle grossolane si intendono quelle con diametro aerodinamico maggiore di $1 \mu\text{m}$. Secondo l'aspetto che riguarda la salute, invece, vengono classificati in maniera differente, in funzione del livello di profondità che riescono a raggiungere all'interno degli organi del corpo umano. Il PM₁₀, chiamato

anche frazione inalabile, identifica particelle con diametro aerodinamico minore di 10 μm che sono in grado di raggiungere, attraverso le vie respiratorie, la trachea e i bronchi, mentre il PM2.5 rappresenta le particelle con diametro aerodinamico minore di 2.5 μm che possono raggiungere anche gli alveoli polmonari. [26], [27]

Il particolato aerodisperso può essere classificato in funzione di diversi fattori, come la dimensione, il processo di formazione, la sorgente, la composizione chimica o i processi di rimozione. Le particelle di aerosol atmosferico possono essere emesse direttamente e mantenere le proprie caratteristiche (aerosol primario) o essere generate da processi di conversione (aerosol secondario), come condensazione di vapori, evaporazione, fusione con altre particelle o reazioni chimiche. Il particolato può avere origini sia antropiche che naturali ed entrambe queste due fonti possono dar luogo sia a particolato primario, che secondario. [8], [28]

Risulta complesso classificare il particolato in maniera univoca, in quanto i diversi fattori sopracitati si intersecano l'un l'altro e sono spesso collegati. Il tipo di sorgente comporta una certa composizione chimica e un determinato intervallo dimensionale. Il particolato fine e quello grossolano possono derivare sia da sorgenti antropiche che naturali e in *Tabella 3.2* e in *Tabella 3.3* si può notare come le diverse sorgenti possano dar vita a particolato primario o secondario. Le principali fonti naturali sono i detriti (erosione di rocce), le azioni vulcaniche, lo spray marino e la combustione di biomasse. Le emissioni derivanti da attività antropiche, invece, sono legate all'utilizzo di combustibili fossili, ai processi industriali, all'usura dell'asfalto, alla formazione di polveri volatili dall'erosione dei campi coltivati e alle emissioni dei mezzi di trasporto. In funzione della dimensione e delle caratteristiche chimiche, come la reattività con altre specie, è possibile, poi, ad esempio, dedurre quale sarà l'entità del tempo di permanenza all'interno dell'atmosfera da parte delle particelle e i meccanismi di abbattimento ai quali saranno sottoposte. La frazione più grossolana sarà soggetta in maniera dominante alla deposizione secca, che agisce sulla gravità, mentre quella più fine a meccanismi legati a diverse caratteristiche come la superficie specifica, la dimensione e la solubilità. [8], [28], [29]

3. Inquinamento atmosferico

Tabella 3.2. Sorgenti di particolato fine (fonte: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, <https://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>).

Sorgenti antropiche	
Primario	Secondario
Uso di combustibili fossili	Ossidazione di SO ₂
Emissioni di autoveicoli	Ossidazione di NO _x
Polveri volatili	N ₂ O ₃
Usura di pneumatici e freni	Ossidazione di idrocarburi emessi dagli autoveicoli
Sorgenti naturali	
Primario	Secondario
Spray marino	Ossidazione di SO ₂ e H ₂ S emessi da incendi e vulcani
Erosione di rocce	Ossidazione di NO _x prodotto da suolo e luce
Incendi boschivi	Emissione di NH ₃ da animali selvatici
--	Ossidazione di idrocarburi emessi dalla vegetazione (terpeni)

Tabella 3.3. Sorgenti di particolato grossolano (fonte: Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, <https://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>).

Sorgenti antropiche	
Primario	Secondario
Polveri volatili da agricoltura	--
Spargimento di sale	--
Usura asfalto	--
Sorgenti naturali	
Primario	Secondario
Erosione di rocce	--
Spray marino	--
Frammenti di piante ed insetti	--

3.2.1.1 Distribuzione dimensionale e interazione tra le mode

La classificazione del particolato in funzione della dimensione è utile a comprendere i processi che ne determinano la formazione e la rimozione.

Si riporta in *Figura 3.8* una distribuzione in numero e in volume (o massa) del particolato atmosferico. Confrontandole è possibile osservare come le particelle con diametro minore di 0.1 µm, nonostante siano preponderanti in numero, non contribuiscono quasi per niente

alla massa degli aerosol, che invece è rappresentata esclusivamente da quelle con diametro maggiore di $0.1 \mu\text{m}$. [8]

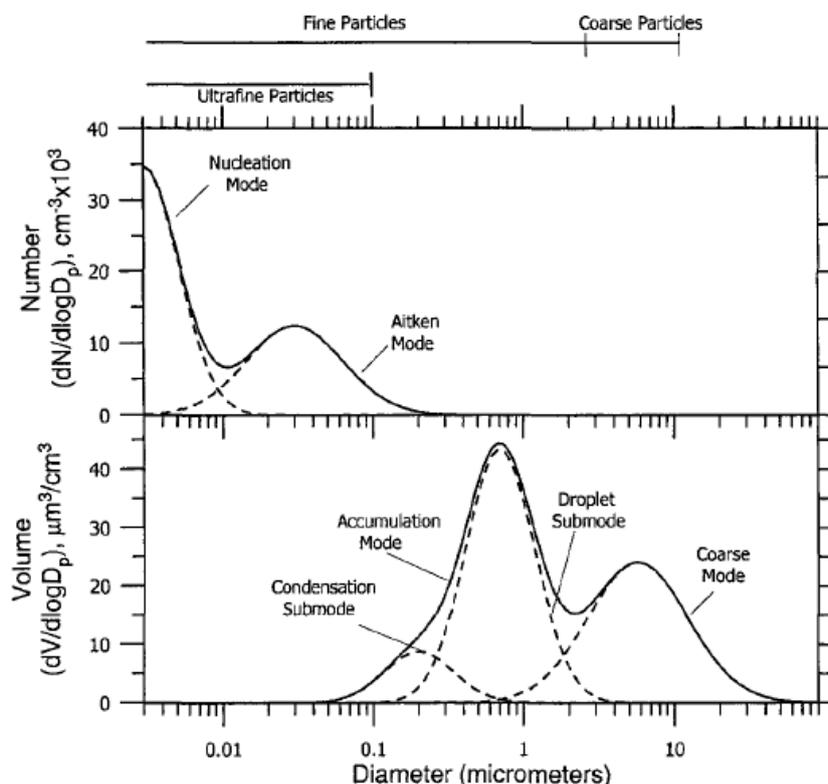


Figura 3.8. Tipica distribuzione in numero e in volume delle particelle atmosferiche con diverse mode (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 2006).

Di solito si possono distinguere quattro mode diverse nelle quali si hanno i picchi di concentrazione. Queste mode sono legate ai meccanismi di formazione e rimozione del particolato dall'atmosfera. La moda di *nucleazione* (diametri fino a $0.01 \mu\text{m}$) è rappresentata da un elevato numero di particelle, che, allo stesso tempo, hanno una concentrazione in massa molto ridotta. I meccanismi di formazione caratteristici di questa moda sono i processi di nucleazione da gas precursori. La moda di *Aitken* (diametri da $0.01 \mu\text{m}$ a $0.1 \mu\text{m}$) è caratterizzata sia da particelle primarie come la fuliggine, che secondarie derivanti da processi di condensazione e coagulazione. La moda di *accumulazione* (diametri da $0.1 \mu\text{m}$ a $2.5 \mu\text{m}$) è quella che ha il picco maggiore nella distribuzione in volume. È composta da particolato primario, proveniente da emissioni dirette, e secondario, derivante da condensazione e coagulazione di solfati e nitrati. La

moda *grossolana* (diametri $> 2.5 \mu\text{m}$), infine, deriva da processi meccanici come il vento o l'erosione, che generano polveri, pollini e sale marino). [8], [26]

In *Figura 3.9* sono riportate le principali mode e i diversi fenomeni responsabili della formazione, trasformazione e rimozione del particolato. Si analizzano, quindi, i principali meccanismi che legano le diverse distribuzioni dimensionali. Le particelle della moda di Aitken derivano principalmente da reazioni legate alla condensazione e alla nucleazione. La prima condizione si verifica soprattutto durante la combustione di gas ad alte temperature, che entrano in contatto con la temperatura più fredda dell'aria esterna. Nel secondo caso, invece, i fenomeni di nucleazione si creano quanto i gas reagiscono con il radicale ossidrilico (OH^-) o con l'ozono (O_3), dando vita a particelle in questo range dimensionale (come ad esempio NH_4NO_3). I processi di formazione delle particelle appartenenti alla moda di accumulazione sono principalmente due. Il primo è scatenato dall'agitazione termica o dai moti Browniani delle particelle di Aitken, che provocano la loro collisione e la conseguente formazione di agglomerati. Si ottiene così un passaggio di particelle della moda di Aitken a quella di accumulazione a causa dell'incremento di dimensione delle particelle stesse. Il secondo processo riguardante la moda di accumulazione è la condensazione e coagulazione di gas. A seconda delle specie chimiche interessate nella reazione, la nucleazione può essere sia omogenea che eterogenea. La moda grossolana, come già visto, incide poco sulla distribuzione numerica del particolato atmosferico, ma ha un'elevata densità di massa. Le particelle di queste dimensioni ($> 2.5 \mu\text{m}$) sono principalmente primarie e derivano soprattutto da processi meccanici, come l'erosione del vento, lo spray marino generato dalle onde e le attività vulcaniche. Questi fenomeni, infatti, a causa del loro meccanismo, è improbabile che riducano i diametri delle particelle a dimensioni minori di $1 \mu\text{m}$, come, allo stesso tempo, la nucleazione, la condensazione e la coagulazione non formano di solito particelle maggiori di $1 \mu\text{m}$. Anche se in maniera meno frequente, nella moda grossolana sono presenti anche particelle di aerosol secondario, che derivano dalla trasformazione di particelle primarie di origine crostale o marina. [30]

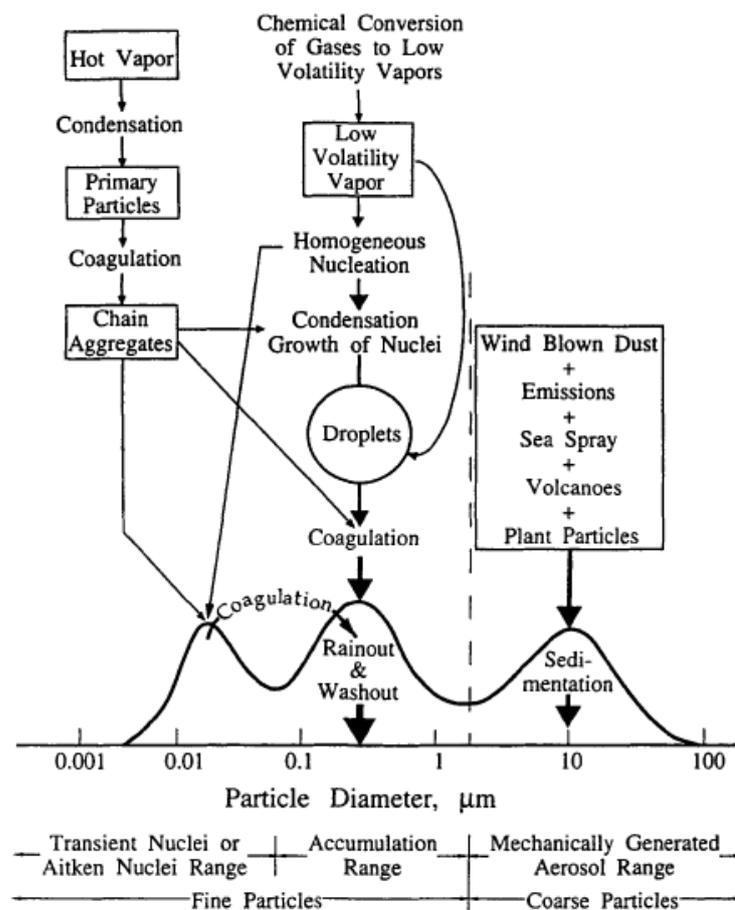


Figura 3.9. Schema delle principali mode, sorgenti, formazione e rimozione di aerosol atmosferico (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 2006).

I meccanismi di rimozione, come approfondito successivamente nel capitolo 3.2.1.2 - *Meccanismi di rimozione*, agiscono in maniera più efficace agli estremi del range dimensionale e risultano inefficienti per le particelle di media dimensione (da 0.1 µm a 2.5 µm). La moda di accumulazione, infatti, è così chiamata in quanto lo scarso effetto dei meccanismi di rimozione provoca un accumulo di particelle in questo range dimensionale. Le particelle da 0.1 µm a 2.5 µm tendono ad avere tempi di residenza molto più lunghi di quelli relativi alle mode di Aitken e grossolana. Quest'ultima, ad esempio, è caratterizzata da particelle che, grazie alle loro dimensioni, hanno velocità di sedimentazione abbastanza elevate da permetterne la rimozione dall'atmosfera in tempi più brevi. [8]

3.2.1.2 Meccanismi di rimozione

Il particolato atmosferico viene rimosso dall'atmosfera grazie ai meccanismi di deposizione secca e deposizione umida. Sono fenomeni che permettono il passaggio delle particelle sospese in aria sulla superficie terrestre, ricoprendo un ruolo importante per il controllo dell'inquinamento atmosferico. Nonostante la deposizione umida non sia un processo continuo come quella secca, ma avvenga solo in presenza di fenomeni di precipitazione, può dare, quando si verifica, un contributo sostanzioso e spesso più importante nella rimozione di particolato dall'atmosfera. [31], [32]

3.2.1.2.1 Deposizione secca

La deposizione secca viene definita come il meccanismo di rimozione che avviene in assenza di precipitazioni. I parametri che influenzano questo fenomeno sono il grado di turbolenza atmosferica presente, le caratteristiche del suolo e le proprietà fisiche, come densità, dimensione e forma, e chimiche della particella. Il flusso verticale di deposizione al suolo F , convenzionalmente negativo verso il basso, è proporzionale alla concentrazione C della specie in atmosfera ad una determinata quota e alla velocità di deposizione v_s . [8]

$$F = -v_s C \quad (3.2)$$

La velocità di deposizione è influenzata da due fenomeni che possono causare la rimozione della particella dall'atmosfera: la caduta gravitazionale e i moti Browniani. Il primo è determinato dalla risultante delle forze verticali che agiscono sulla particella. Viene definita, infatti, la velocità di sedimentazione come differenza tra la forza di gravità, che tende a spingere la particella verso il basso, e quella di galleggiamento, che tende a indirizzarla verso l'alto. La velocità di sedimentazione è direttamente proporzionale al quadrato del diametro della particella e alla differenza tra la densità della stessa e quella dell'aria. Sarà quindi più efficace sulle particelle di dimensioni e densità elevate, rispetto alle fini e meno dense. I moti Browniani, invece, agiscono in maniera differente sulle particelle a seconda del loro diametro. Hanno un effetto che diminuisce all'aumentare del diametro della particella, fino a non incidere più sulle particelle di circa $0.05 \mu\text{m}$. In *Figura 3.10* è possibile osservare l'andamento della velocità di deposizione

in funzione del diametro delle particelle. Si possono individuare tre aree distinte nel grafico. L'efficienza di rimozione è elevata per particelle grossolane (diametri $> 2 \mu\text{m}$), essendo queste principalmente sottoposte a fenomeni di sedimentazione legati alla gravità. Come detto prima, infatti, la velocità di sedimentazione è proporzionale al quadrato del diametro della particella e prevarrà quindi principalmente nei fenomeni di abbattimento delle particelle grossolane. Velocità di sedimentazione, e quindi efficienze di rimozione, elevate si notano anche per l'altro estremo del range dimensionale. Particelle minori di $0.05 \mu\text{m}$ hanno un comportamento dominato principalmente dai moti Browniani, che ne causano la deposizione. Infine, l'efficienza di rimozione presenta un caratteristico minimo per particelle con diametri compresi tra 0.1 e $1 \mu\text{m}$, che risultano essere quindi quelle che presentano maggiore difficoltà ad essere rimosse dall'atmosfera attraverso i meccanismi di deposizione secca. [8]

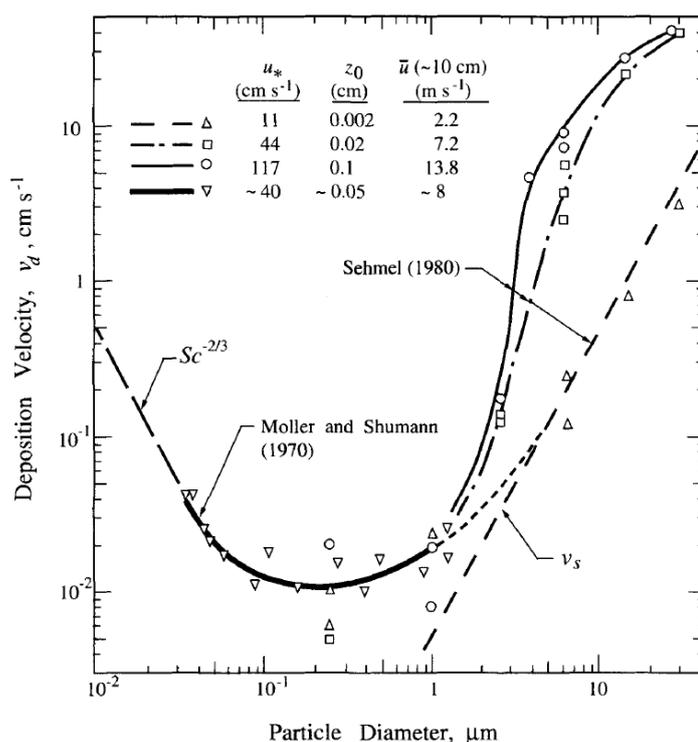


Figura 3.10. Velocità di deposizione secca di particolato aerodisperso (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 2006).

3.2.1.2.2 *Deposizione umida*

La deposizione umida racchiude i fenomeni che sfruttano il dilavamento per rimuovere le particelle di inquinante dall'atmosfera, facendole depositare al suolo. Tra questi si possono individuare la rimozione delle particelle durante eventi di pioggia o neve, l'impatto delle nuvole con la superficie terrestre e la deposizione al suolo delle goccioline presenti nella nebbia. Affinché si verificano questi fenomeni è necessario che la particella di particolato atmosferico si trovi in una zona sufficientemente vicina all'idrometeora, che collida e che venga infine trasportata al suolo. Gli step appena descritti sono reversibili e possono avvenire a quote diverse e interessare la componente acqua in diverse forme. Generalmente, si identifica il dilavamento che avviene all'interno delle nuvole con il termine *rainout*, mentre se il fenomeno avviene a quote inferiori rispetto alle nuvole si parla di *washout*. [8], [32]

Nonostante nella deposizione umida siano compresi anche i fenomeni che governano il dilavamento dei gas, in questa parte verrà approfondita la deposizione umida di particelle causata dalle precipitazioni. Mentre la goccia d'acqua con diametro D_d cade verso il basso, collide e ingloba le particelle di aerosol (di diametro D_p) che hanno il proprio centro all'interno del cilindro di diametro $D_d + D_p$ di caduta della goccia. Un aspetto da considerare, però, è che le linee di flusso sono perturbate nell'intorno della goccia a causa della sua caduta e, nel momento in cui impatta la particella, ne modifica la traiettoria. Quindi, quest'ultima è difficilmente prevedibile ed è solitamente oggetto di approfonditi studi di fluidodinamica. Generalmente si parla, infatti, di efficienza di collisione $E(D_d, D_p)$, cioè il rapporto tra le effettive collisioni che si hanno tra la particella e la goccia d'acqua e il numero totale di particelle presenti nel cilindro di caduta della goccia, attraverso la quale è possibile definire un'approssimazione del coefficiente di dilavamento $\Lambda(D_p)$, per aerosol monodispersi e gocce d'acqua, riportato nell'equazione (3.3). [8]

$$\Lambda(D_p) = \frac{3 E(D_d, D_p) p_0}{2 D_d} \quad (3.3)$$

dove p_0 è l'intensità di pioggia. In *Figura 3.11* è riportato l'andamento del coefficiente di dilavamento in funzione della dimensione delle particelle aerodisperse, in riferimento

a due diametri diversi della goccia d'acqua, 0.2 mm e 2 mm. È stata assunta un'intensità di pioggia di 0.1 mm/h. [8]

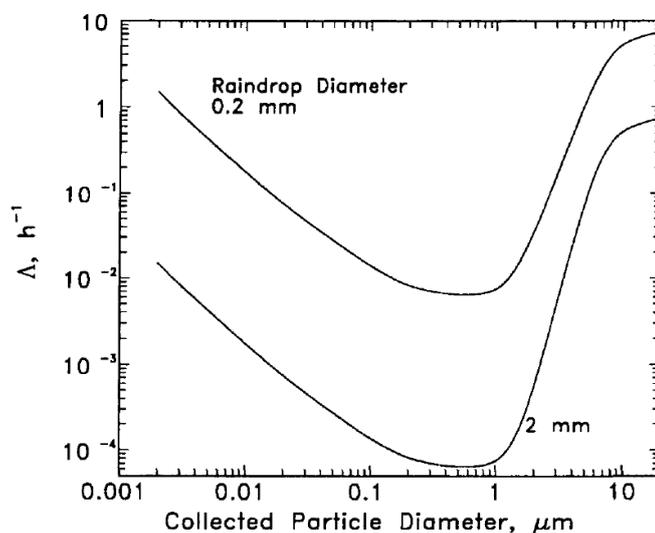


Figura 3.11. Coefficiente di dilavamento per particelle in funzione di due diametri delle gocce di pioggia (fonte: fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 2006).

Si osserva (*Figura 3.11*) come il coefficiente di dilavamento assuma i valori maggiori in corrispondenza degli estremi del range dimensionale. Le particelle con diametri inferiori a 0.2 μm sono sottoposte alla diffusione Browniana, che incrementa l'efficienza di collisione tra particella e goccia d'acqua. Con l'aumento del diametro della particella assume importanza l'effetto della collisione inerziale. La particella a causa delle sue dimensioni, non risente delle linee di flusso perturbate della goccia d'acqua, ma prosegue nella sua traiettoria indisturbata, impattando la goccia. Questi fenomeni, come risultato dell'osservazione del grafico in *Figura 3.11*, suggeriscono una forte efficienza di rimozione grazie alla deposizione umida di particelle con diametri inferiori a 0.1 μm e maggiori di 1 μm . Mentre particelle nell'intervallo dimensionale 0.1-1 μm risultano di più complessa rimozione dall'atmosfera. [8], [32]

3.2.1.3 Aerosol urbano

Le principali sorgenti di particolato antropico si identificano nelle aree urbane e industrializzate. Infatti, gli aerosol urbani sono miscele di emissioni derivanti sia da sorgenti primarie come processi industriali, trasporti, produzione di energia,

riscaldamento domestico, estrazione mineraria e fonti naturali, che secondarie, come i meccanismi di conversione gas-particella. Tutti questi fattori contribuiscono al peggioramento della qualità dell'aria, la salute delle persone e la visibilità nelle aree urbane. [33]

La distribuzione dimensionale degli aerosol in ambito urbano è molto varia, a seconda anche della zona in cui ci troviamo. Ad esempio, si hanno concentrazioni di particelle fini molto elevate vicino a sorgenti come le autostrade, ma diminuiscono rapidamente non appena ci si allontana dalle strade stesse. Tipiche distribuzioni in numero, superficie e volume di aerosol urbani sono riportate in *Figura 3.12*. [8] Parte dell'aumento di concentrazione nei pressi delle strade ricade nella moda di Aitken e di accumulazione, a causa delle particelle emesse a seguito della combustione. Si trovano però anche concentrazioni di particelle nel range dimensionale della media grossolana. Queste derivano soprattutto da fenomeni di risospensione delle polveri dovute al traffico. La maggior parte delle particelle della distribuzione in superficie degli aerosol urbani, però, come mostrato in *Figura 3.12*, è compresa nel range dimensionale della media di accumulazione (0.1 - 0.5 μm), mentre le mode di Aitken e di nucleazione sono trascurabili in questi termini, ad eccezione delle zone vicino alle sorgenti di emissione. [34]

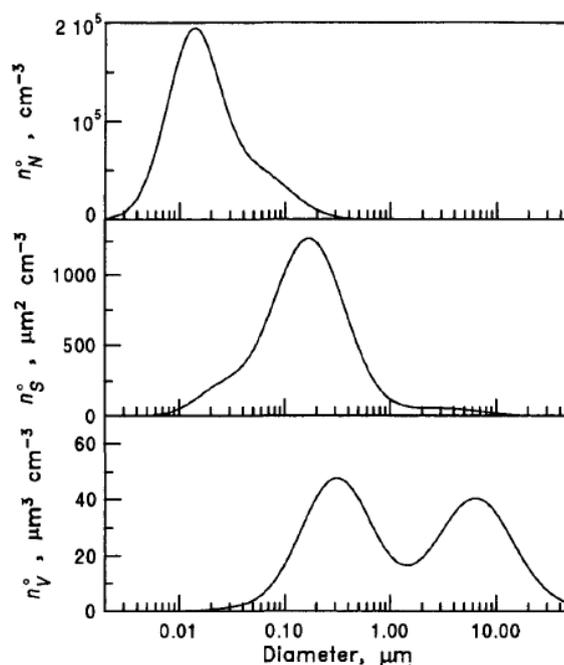


Figura 3.12. Distribuzioni tipiche in numero, superficie e volume di aerosol urbani (fonte: J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change, Wiley-Interscience, 2006).

Secondo le stime dell'OMS [35], l'inquinamento atmosferico urbano da particolato fine (PM_{2.5}) è dovuto per circa il 25% al traffico presente in città e per il 15% alle attività industriali compresa la produzione di energia elettrica. Il riscaldamento domestico incide con il 20%, le sorgenti naturali con il 18%, mentre il restante 22% è legato a sorgenti antropiche non specificate. Per quanto riguarda le sorgenti di PM₁₀, invece, lo studio condotto da Karagulian et al. [36] ha rivelato che il traffico contribuisce per il 25%, mentre le attività industriali incidono con il 18%. Il riscaldamento domestico rappresenta il 15% delle emissioni di PM₁₀, le sorgenti naturali il 22% e, infine, il restante 20% riguarda sorgenti antropiche non specificate.

È comunque complicato definire una specifica distribuzione del peso delle singole sorgenti rispetto alla produzione di particolato urbano, in quanto questo dipende fortemente dalla zona che si sta considerando.

Lo studio di Karagulian et al. [36] ha analizzato le principali sorgenti di particolato in ambito urbano nelle diverse regioni del mondo. Il traffico racchiude varie tipologie di emissioni che derivano da diversi tipi di veicolo. Questi ultimi, infatti, sono responsabili di emissioni primarie di PM e di gas precursori a causa degli scarichi, della combustione di carburanti e dei lubrificanti. Allo stesso tempo, però, emettono un grande quantitativo di particelle in atmosfera a causa dell'usura dei freni e degli pneumatici [37], [38], che inizialmente si depositano sulla strada, ma che vengono rimessi in sospensione a causa del traffico veicolare. La produzione industriale è un'altra sorgente analizzata nello studio di Karagulian et al. [36]. Le principali emissioni derivanti da essa sono legate alla combustione di petrolio e carbone, alla produzione di energia elettrica e alle attività derivanti da diverse tipologie di industrie. Le componenti legate al riscaldamento domestico che maggiormente incidono sulla produzione di particolato sono legna, carbone e combustibile a gas utilizzati per riscaldarsi e per cucinare. Fenomeni di inquinamento atmosferico legati a questi elementi si verificano soprattutto nell'Europa Centrale, dove legna e carbone sono utilizzati per il riscaldamento domestico. Le sorgenti naturali sono polvere e sale marino, che si possono riversare negli ambiti urbani attraverso il vento. Possono derivare dall'erosione delle rocce o da polveri volatili legate all'agricoltura. Il particolato secondario, invece, può essere organico o inorganico e si genera grazie a reazioni tra gli aerosol primari come biossido di azoto (NO₂), ammoniaca

3. Inquinamento atmosferico

(NH₃), anidride solforosa (SO₂) e composti organici volatili non metallici (NMVOCs). [8], [36]

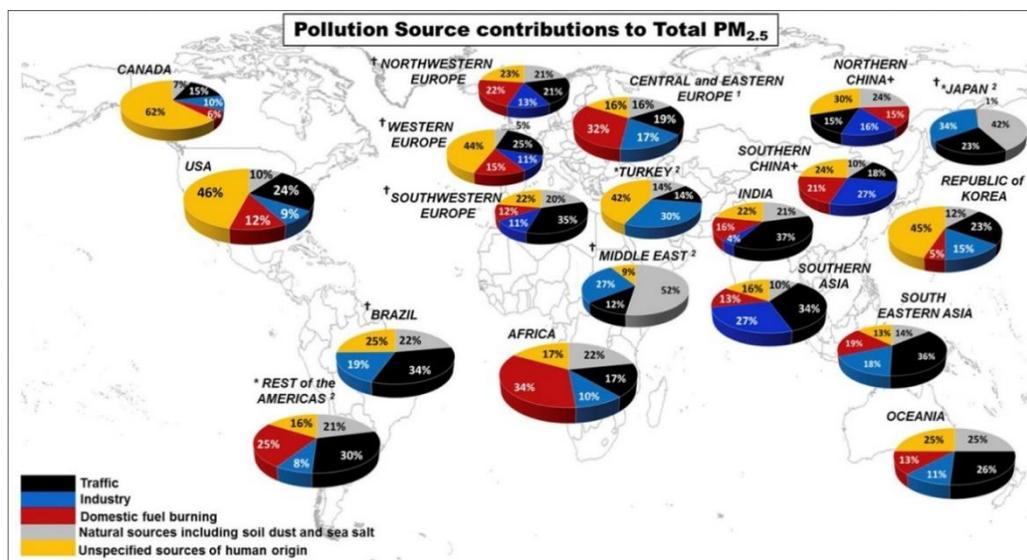


Figura 3.13. Medie ponderate in base alla popolazione dei contributi delle diverse sorgenti ai PM_{2.5} totali (fonte: F. Karagulian, C. A. Belis, C. F. C. Dora, A. M. Prüss-Ustün, S. Bonjour, H. Adair-Rohani e M. Amann, «Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level,» Atmospheric Environment, vol. 120, pp. 475-483, 2015.).

In Figura 3.13 sono riportati i risultati ottenuti dallo studio di Karagulian et al. [36] per quanto riguarda le sorgenti di PM_{2.5}. Si può osservare come in molti dei siti analizzati la sorgente con la percentuale maggiore è il traffico (soprattutto in Asia sud-orientale, Europa sud-occidentale, Asia meridionale, Brasile e nel resto delle Americhe). I processi industriali ricoprono una fetta importante in Asia meridionale, in Turchia e in Giappone, anche se rappresentano la prima sorgente di emissioni solo in Cina meridionale. Il riscaldamento domestico è la principale causa di produzione di PM_{2.5} in Africa e in Europa centrale e orientale. [36]

Allo stesso modo, il grafico in Figura 3.14 riporta i risultati ottenuti da Karagulian et al. [36] per le sorgenti di PM₁₀. In questo caso il traffico è risultato avere un peso maggiore rispetto ai PM_{2.5} (Figura 3.13) in molte delle aree considerate. Questo risultato è probabilmente legato al fatto che le particelle che si creano da usura dei freni o degli pneumatici sono solitamente grossolane e vengono rimesse poi in sospensione a causa del traffico veicolare. In questo studio sono state considerate all'interno della categoria "traffico". Un'altra differenza importante si nota nell'incremento in molte zone della

componente legata alle sorgenti naturali. Questo può essere dovuto al fatto che, come già detto, i fenomeni meccanici come l'erosione delle rocce contribuiscono generalmente in maniera più importante alla produzione di particelle di dimensione maggiore (PM10) rispetto a quelle fini. [36]

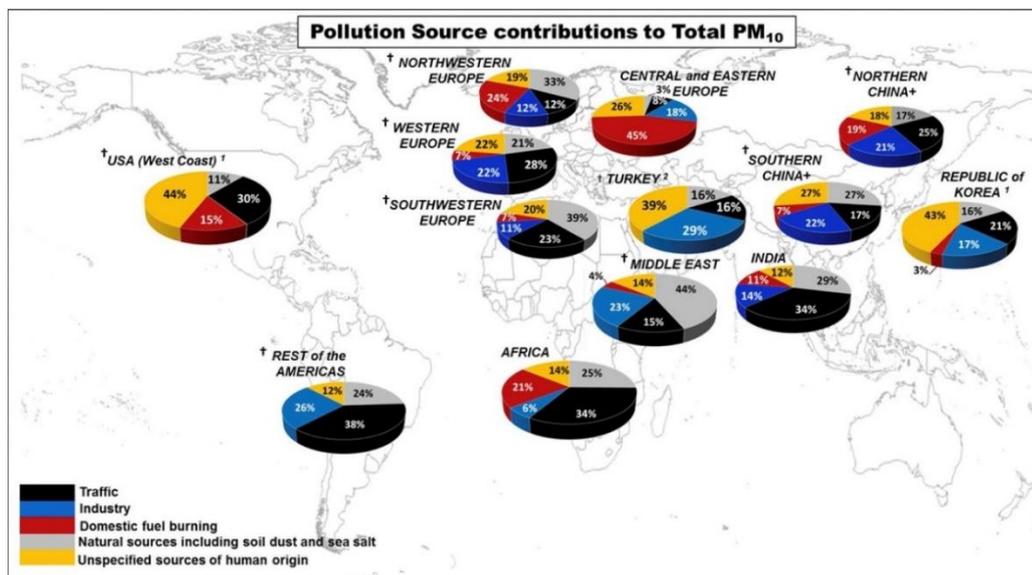


Figura 3.14. Medie ponderate in base alla popolazione dei contributi delle diverse sorgenti ai PM10 totali (fonte: F. Karagulian, C. A. Belis, C. F. C. Dora, A. M. Prüss-Ustün, S. Bonjour, H. Adair-Rohani e M. Amann, «Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level,» Atmospheric Environment, vol. 120, pp. 475-483, 2015.).

3.2.2 Ozono e ossidi di azoto

L'ozono è un gas ossidante presente in atmosfera in traccia, che ha conseguenze e comportamenti diversi a seconda della quota a cui si trova. Si parla infatti di ozono troposferico nello strato più basso dell'atmosfera, mentre a quelli più elevati si ha l'ozono stratosferico. [39]

Il primo rappresenta solo il 10 - 15% di tutto l'ozono presente in atmosfera [40], ma risulta essere nocivo a concentrazioni elevate per le persone e l'ambiente. Non è un inquinante primario, ma si genera a seguito di reazioni tra gas precursori, come gli ossidi di azoto (NO_x) e i composti organici volatili (VOC), indotte dalla radiazione solare in presenza di emissioni di industrie, automobili, raffinerie e altre fonti. Dà origine in questo modo allo smog fotochimico. L'inquinamento da ozono è un problema rilevante soprattutto nei centri urbani, dove si registrano le quantità di emissioni più elevate e si raggiungono nei

mesi estivi prolungati periodi di irraggiamento solare elevato. Anche le zone rurali, però, risentono fortemente della concentrazione di ozono negli strati bassi dell'atmosfera, in quanto, una volta formato nelle aree urbane e industriali, viene trasportato per lunghe distanze dai fenomeni ventosi. [39], [41]

L'ozono stratosferico, invece, rappresenta circa il 90% dell'ozono presente in atmosfera [40], viene prodotto naturalmente e ricopre un ruolo importante nella protezione della superficie terrestre dalle radiazioni ultraviolette. Riesce ad assorbire, infatti, quelle nocive per gli organismi unicellulari e per gli animali (lunghezze d'onda tra 240 e 290 nm) e le UV-B (lunghezze d'onda tra 290 e 320 nm), biologicamente attive e legate all'incremento di cancro alla pelle nelle persone più deboli. Anche se negli ultimi anni si sta contrastando il suo rapido assottigliamento, lo strato di ozono ha subito una forte riduzione a causa delle attività antropiche. [8], [39], [41]

Un'ulteriore classe di inquinanti dell'atmosfera è rappresentata dai composti dell'azoto. Tra i principali si hanno l'ossido di azoto (NO), il biossido di azoto (NO₂), l'ossido di diazoto (N₂O), l'acido nitrico (HNO₃) e l'ammoniaca (NH₃). Con NO_x (ossidi di azoto) si indicano principalmente NO e NO₂. Le principali sorgenti di questi inquinanti nei centri urbani sono legate ai processi di combustione che avvengono nei veicoli, nei camini o nelle centrali termoelettriche. Gli ossidi di azoto sono anche tra i principali costituenti dello smog marrone che si crea nelle aree urbanizzate. L'N₂O deriva principalmente da sorgenti naturali, come l'ammoniaca, e viene impiegato come analgesico e anestetico. [8], [42]

L'azoto N₂ presente in atmosfera per essere utilizzato da molti degli organismi viventi necessita di essere fissato, cioè convertito chimicamente in un altro composto. Quest'azione può avvenire naturalmente, attraverso la conversione dell'azoto in NH₃, NH₄⁺ e composti organici da parte di microrganismi o grazie a fenomeni elettrici atmosferici o altre azioni ionizzanti che si possono verificare in atmosfera. Altrimenti, la fissazione dell'N₂ può essere causata da attività antropiche, a causa di processi industriali, biologici o riguardanti la combustione. Il processo di nitrificazione viene effettuato da microrganismi in grado di ossidare l'NH₄⁺ a NO₂⁻ e NO₃⁻ ed ha come conseguenza il rilascio di NO e N₂O in atmosfera come sottoprodotti. La denitrificazione, invece,

riescono a raggiungere un ciclo stazionario, nel quale l'NO₂ viene degradato e riformato in tempi brevi. È possibile dimostrare, quindi, che la concentrazione di ozono che si forma in atmosfera è direttamente proporzionale al rapporto tra la concentrazione di NO₂ e di NO. Questa equazione viene normalmente identificata come relazione fotostazionaria. [8]

Viste le considerazioni appena fatte, si comprende la necessità di monitorare le concentrazioni in atmosfera di ozono e ossidi di azoto. Per questo motivo nel modulo AQ del CC-Moving-Lab sono stati previsti analizzatori per O₃ (§4.2.4) e NO_x (§4.2.3).

3.3 Effetti sulla salute

L'esposizione umana all'inquinamento atmosferico rappresenta una delle principali cause di gravi conseguenze e malattie croniche alle vie respiratorie [27]. Secondo l'Organizzazione Mondiale della Sanità [43] ha effetti legati alle principali cause di morte e malattie a livello mondiale.

Gli inquinanti che incidono maggiormente sull'inquinamento atmosferico e di conseguenza sulla salute sono il particolato (PM), l'ozono (O₃), il biossido di azoto (NO₂) e il biossido di zolfo (SO₂). [44]

Le conseguenze sulla salute dovute al particolato atmosferico sono già fortemente documentate. Negli ultimi anni sono stati osservati dei decrementi nelle concentrazioni medie di PM, ma più dell'80% della popolazione nella regione europea dell'OMS vive ancora in zone in cui i livelli di PM non rientrano all'interno dei limiti imposti dalle linee guida. [44]

Questi gravi effetti che le particelle aerodisperse hanno sulla salute sono legate alle caratteristiche delle stesse, come la concentrazione in aria e la dimensione, ma anche al fatto che possono agire da veicolo per sostanze altamente tossiche come gli idrocarburi policiclici aromatici. [27]

Come già annunciato nella prima parte del paragrafo 3.2.1 - *Particolato atmosferico* una possibile classificazione del particolato atmosferico si basa sulla pericolosità derivante dalla profondità che le particelle sono in grado di raggiungere negli organi del corpo

umano, in funzione della loro dimensione. Generalmente, infatti, si possono individuare le seguenti frazioni:

- frazione inalabile. Frazione di particelle con diametro $< 20 \mu\text{m}$ che viene è in grado di entrare attraverso il naso e la bocca all'interno del corpo umano.
- frazione toracica. Frazione che attraversando la laringe, raggiunge la regione tracheo-bronchiale.
- Frazione respirabile. Frazione che riesce a penetrare negli alveoli polmonari.

Il PM10 viene associato alla frazione toracica, mentre il PM2.5 a quella respirabile e quindi più pericolosa, essendo in grado di raggiungere le aree più profonde. In *Figura 3.16* sono riportate le curve di deposizione delle particelle lungo l'apparato respiratorio umano in funzione del diametro aerodinamico delle stesse. Si individuano, in particolare, le curve riguardanti la regione extratoracica (cioè le vie aeree superiori: naso-faringe-laringe), quella tracheo-bronchiale e quella alveolare. [45]

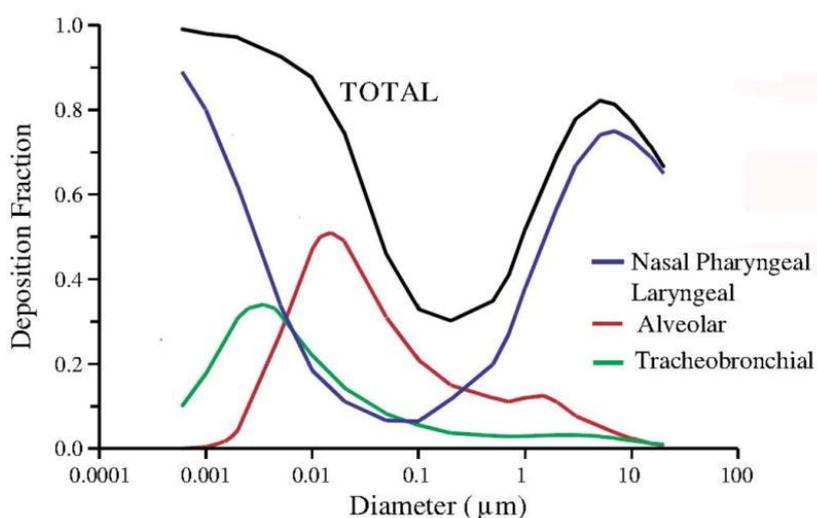


Figura 3.16. Deposizione particellare nell'apparato respiratorio umano in riferimento alle regioni extratoracica, bronchiale e alveolare secondo la Pubblicazione 66 ICRP (1994) (fonte: A. Tsuda, F. S. Henry e J. P. Butler, «Particle transport and deposition: basic physics of particle kinetics,» 2013, p. 1437–1471).

Gli ossidi di azoto, insieme all'ozono troposferico, rappresentano un ulteriore fattore di rischio per la salute umana. Le conseguenze derivanti da un'esposizione di breve durata generalmente non hanno un effetto permanente sull'apparato respiratorio umano. Diversamente, le esposizioni prolungate nel tempo, anche a basse concentrazioni, possono causare gravi danni alla salute. L'ozono può aggravare la situazione di persone

con patologie pregresse o provocare una riduzione della capacità polmonare, diminuendo il trasporto di ossigeno da parte del sangue e generare nei soggetti vertigini, respiro affaticato e infiammazioni. Tra gli ossidi di azoto, l' NO_2 risulta essere più pericoloso dell' NO perché già a basse concentrazioni può provocare irritazioni agli occhi e al naso. L' NO , comunque, per esposizioni prolungate a concentrazioni elevate può comportare anche danni permanenti. Oltre alla tossicità legata alla loro composizione, contribuiscono anche ad aumentare la pericolosità di altre sostanze con le quali reagiscono. [42], [46], [47]

4 CC-Moving-Lab e strumentazione

4.1 CC-Moving-Lab e modulo AQ

Il Dipartimento di Ingegneria dell’Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino, rientrato all’interno dell’iniziativa “Dipartimenti di Eccellenza 2018-2022” del MIUR, mira, attraverso il progetto Cambiamenti_Climatici@polito (CC@polito), a ridurre l’effetto che l’inquinamento e i cambiamenti climatici provocano sulla popolazione e gli ecosistemi, tramite sistemi di monitoraggio e analisi dati che permettono di arricchire le conoscenze a riguardo in maniera innovativa e sagace. Grazie ai finanziamenti ricevuti dal MIUR per quest’iniziativa e allo sviluppo del laboratorio integrato CC-Lab@polito, è stata avviata la realizzazione del CC-Moving-Lab, con lo scopo di fornire un vero e proprio laboratorio di ricerca che sia in grado di avere la giusta flessibilità per effettuare accurate misure in campo. Il laboratorio mobile si compone di due diversi elementi (*Figura 4.1*). [11], [48]



Figura 4.1. CC Moving Lab - VAN e AQ module (fonte: https://www.diati.polito.it/focus/cambiamenti_climatici/cc_lab/cc_moving_lab).

Il primo è il VAN, un furgone motorizzato adibito a laboratorio mobile, che permette di eseguire campagne di misura di pronto intervento in caso di calamità naturali o eventi rilevanti. È possibile, inoltre, sfruttando questo laboratorio mobile, trasportare e installare la strumentazione necessaria alle specifiche campagne o elaborare i dati in tempo reale grazie all'equipaggiamento interno del VAN stesso. Questo primo elemento del CC-Moving-Lab è operativo da settembre 2020 ed ha già effettuato campagne di misura sul Gran Sasso, a Torre Santa Sabina (Brindisi) e nel comune di Mappano (Torino). Il secondo elemento, che è ancora in fase di realizzazione, è il modulo Air Quality (AQ), un carrello strumentato non motorizzato che permette di effettuare misure per la qualità dell'aria e valutazioni dell'inquinamento atmosferico. È fornito di pannelli solari per l'autoalimentazione e può essere trasportato sia dal VAN che da qualsiasi altro veicolo fornito di sistemi di traino opportuni. [11], [48]

Questo lavoro di tesi si inserisce all'interno del contesto della realizzazione intrapresa dal gruppo di ricerca di Sicurezza Ambientale del DIATI del modulo AQ, che si pone l'obiettivo di rendere possibile le misure sia per valutazioni ambientali che in situazioni di calamità. Ricopre, infatti, un ruolo importante per l'acquisizione dei dati soprattutto in aree dove non sono già presenti stazioni fisse di monitoraggio. In particolare, questo lavoro di tesi si inserisce a seguito della fase di progettazione definitiva del modulo. Infatti, le fasi preliminari sono state oggetto di analisi di studi precedenti, come la Tesi di Dottorato dell'Ing. Matteo Bo [11]. Durante il periodo di redazione del presente elaborato è stata inoltre seguita la fase di precollaudo degli strumenti da allocare sul carrello, per i cui dettagli si rimanda al capitolo *4.2 - Strumenti e accorgimenti emersi durante la fase di precollaudo*.

Durante la fase di progettazione le diverse componenti e l'allestimento del modulo sono stati pensati in funzione degli strumenti che dovranno essere inseriti all'interno e all'esterno del carrello. Il modello del rimorchio scelto è "Hero Camper" ed è riportato in *Figura 4.2*. Le sue caratteristiche, come forma, dimensioni, pneumatici fuoristrada, quattro basi stabilizzatrici e sistemi di assorbimento delle vibrazioni permettono una grande versatilità in termini di trasporto e installazione. È, inoltre, dotato di un sistema di georeferenziazione per permettere di individuarne la posizione durante le misure e in caso di necessità. Il portapacchi superiore viene sfruttato per l'installazione di 7 pannelli solari, 3 fissi e 4 scorrevoli, che possono essere aperti una volta che il modulo viene

parcheggiato. La progettazione di questa tecnologia è stata condotta in collaborazione con il Dipartimento di Energia “Galileo Ferraria” (DENERG) del Politecnico di Torino. Sono stati scelti i moduli SunPower Maxeon 3, caratterizzati da una potenza nominale di picco di 400 W ciascuno, per un totale di 2800 W. Come modulo di accumulo è stata selezionata una batteria al litio LG Chem RESU 48V (energia totale accumulata 10kWh). La scala esterna può essere utilizzata per raggiungere la parte superiore del modulo ed effettuare manutenzione sui pannelli solari o sugli strumenti. Al fine di mantenere la temperatura all’interno del modulo nel range operativo degli strumenti (15 - 30 °C), senza interferire con getto diretto sugli stessi, è stato scelto come unità interna un sistema di condizionamento Fujitsu tipo ASYG07KGTA, che ha una potenza nominale di picco di 400 W di raffrescamento e 500 W di riscaldamento. Mentre come unità esterna sarà presente il modello Fujitsu tipo AOYG7KGCA collocato sul timone del rimorchio. [11]



Figura 4.2. Hero Camper.

Gli strumenti che dovranno essere inseriti all’interno del carrello strumentato si occuperanno della misurazione di PM attraverso due analizzatori ottici, APM2 Comde-
Derenda GmbH (§4.2.1) e FIDAS200s Palas GmbH (§4.2.2), e un campionario gravimetrico MCZ (§4.2.5). Quest’ultimo, infatti, permette di effettuare anche analisi chimiche sui campioni di polvere raccolti. Verranno monitorati anche gli NO_x tramite analizzatore certificato Ecotech Serinus 50 (§4.2.3), che riporta i valori di NO_x NO₂ e NO, e l’O₃ utilizzando un analizzatore certificato Ecotech Serinus 30 (§4.2.4). Quest’ultimo combinato con gli ossidi di azoto, oltre a dare indicazioni sulle emissioni

4. CC-Moving-Lab e strumentazione

dirette, permetterà di effettuare valutazioni sul ciclo fotostazionario dell'ozono e sui gas precursori. Gli analizzatori di gas saranno collegati ad un'unica sonda di campionamento esterna (§4.2.6), che prevede il convogliamento dei gas esausti ad una distanza di 10 m in modo tale da scongiurare interferenze con le misurazioni. Sarà possibile valutare le condizioni meteorologiche grazie all'installazione di una stazione meteo VantagePro2 (§4.2.7). Un data logger verrà posizionato sopra un'apposita postazione di lavoro all'interno del mezzo e collegato a tutti gli strumenti, per permettere la gestione dei dati registrati.

Nella Tesi di Dottorato dell'Ing. Matteo Bo [11] è stata definita la disposizione degli strumenti nel modulo AQ, al fine di garantire la corretta stabilità del carrello bilanciando i carichi interni ed esterni. È previsto che l'analizzatore dell'ozono venga posizionato superiormente rispetto a quello degli ossidi di azoto in quanto l'O₃ è caratterizzato da un elevato potenziale di interferenza. Gli analizzatori sono stati selezionati con pompe esterne che vengono posizionate nel vano frontale per evitare che il calore prodotto dagli strumenti sia eccessivo all'interno del carrello. Per la posizione dei singoli strumenti si rimanda alla descrizione di dettaglio di ognuno nel capitolo 4.2 - *Strumenti e accorgimenti emersi durante la fase di precollaudo* e agli schemi in *Figura 4.3* e *Figura 4.4*.

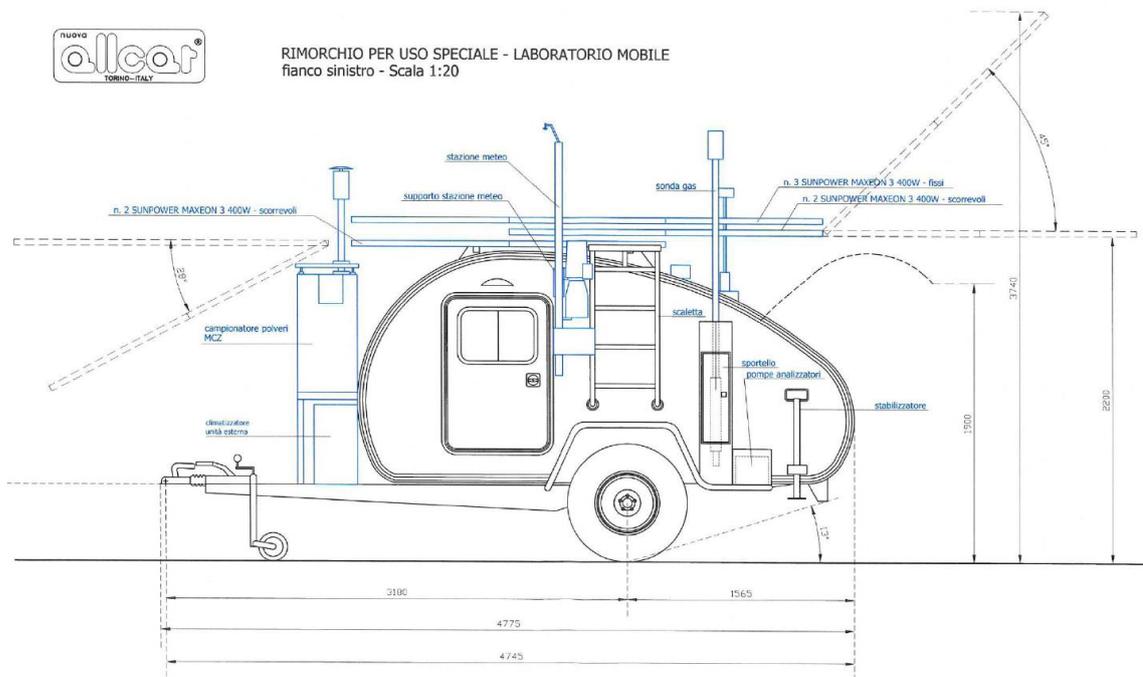


Figura 4.3. Schemi del modulo AQ.

4. CC-Moving-Lab e strumentazione

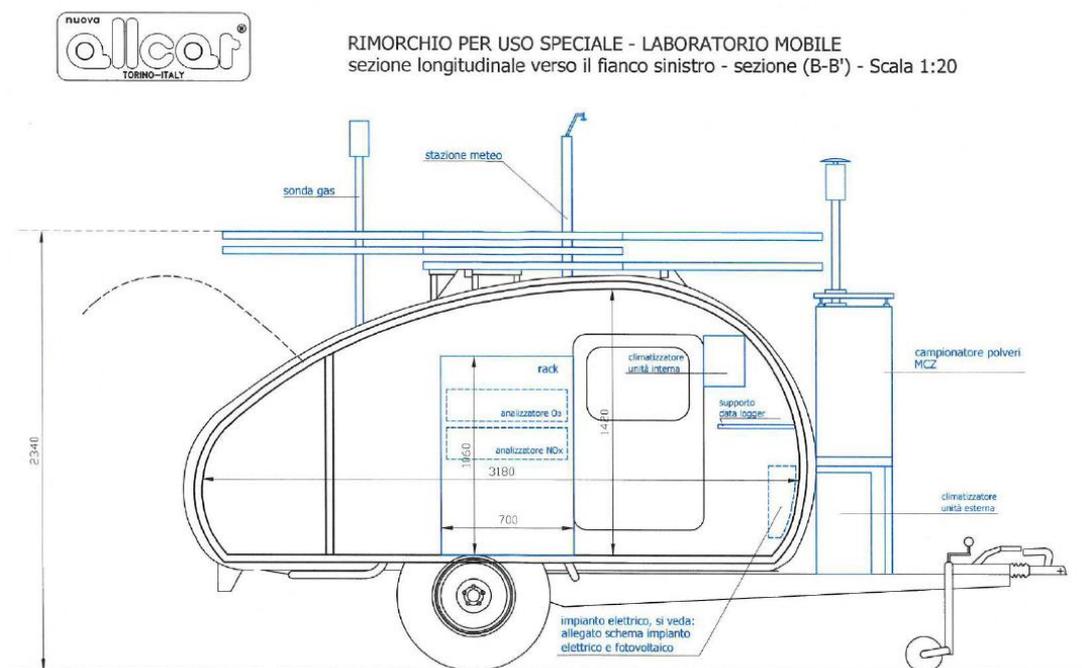
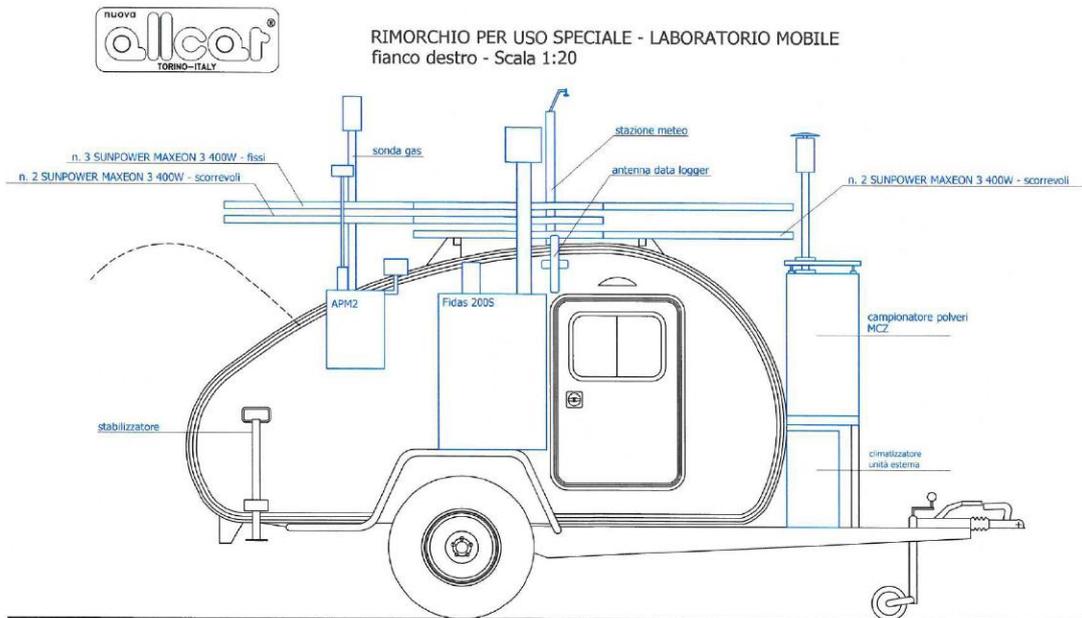


Figura 4.4. Schemi del modulo AQ.

4.2 Strumenti e accorgimenti emersi durante la fase di precollaudo

Si riportano di seguito i dettagli della strumentazione utilizzata per le analisi relative a questo lavoro di tesi, discusse nel capitolo 6 - *Elaborazione dati e casi studio*. Nel presente capitolo verranno elencati gli strumenti impiegati nella campagna di misurazione del CC-Green-Roof del Politecnico di Torino, quelli usati per effettuare le misure negli ambienti suburbani e rurali durante le campagne esterne e quelli inseriti nel modulo AQ del CC-Moving-Lab. I dettagli forniti dai manuali sono integrati nei seguenti paragrafi con le conoscenze acquisite durante la fase di precollaudo degli strumenti per il carrello strumentato del CC-Moving-Lab. In *Tabella 4.1* sono riassunte le diverse destinazioni degli strumenti.

Tabella 4.1. Descrizione dell'utilizzo degli strumenti.

	CC-Green-Roof Politecnico	Campagne suburbane e rurali	Modulo AQ
APM2	X	X	X
FIDAS	X		X
Stazione meteo	X		X
Campionatore PM			X
Sonda gas			X
Analizzatore O ₃			X
Analizzatore NO _x			X
Data logger			X

4.2.1 Analizzatore ottico APM2

Lo strumento APM-2 Air Pollution Monitor Comde Derenda GmbH, come riportato nel manuale [49], è un analizzatore ottico che permettere il monitoraggio dell'inquinamento dell'aria attraverso la determinazione della concentrazione di PM10 e PM2.5. Sfrutta il fenomeno di *light scattering*, cioè la luce riflessa dalle particelle di polvere sospese, attraverso un fotometro ad alta sensibilità per determinare la concentrazione in aria del particolato. L'APM2 è certificato TÜV.



Figura 4.5. Air Pollution Monitor 2 (APM-2) Comde-Derenda GmbH.

L'aria esterna viene aspirata dalla testa campionatrice con una portata volumetrica di 3.3 l/m. Le particelle con diametro maggiore di 10 μm non vengono prelevate, mentre l'aria aspirata viene divisa in due flussi grazie ad un impattore virtuale (*Figura 4.6*). Questa operazione avviene grazie ad un getto laterale, perpendicolare alla direzione del flusso, che permette di suddividere le particelle di diametro minore (PM2.5) dalla frazione piú grossolana (PM10). A questo punto, attraverso elettrovalvole il flusso raggiunge il fotometro, che si compone di un diodo laser che illumina il volume di misurazione. In funzione della luce riflessa registrata dal rilevatore, che è direttamente proporzionale alla concentrazione in massa dell'aerosol all'interno dello spazio di misura, è possibile determinare la concentrazione di PM2.5 e PM10. La frazione grossolana (PM10) contribuisce in maniera ridotta rispetto alla sua massa al segnale di luce diffusa e verrebbe quindi sottostimata nelle misurazioni. Per ovviare a questo problema, a monte del fotometro, l'impattore virtuale permette di aumentare la sensibilità dello strumento alla frazione grossolana, sottoponendola ad arricchimento. Periodicamente viene immessa aria filtrata nel rilevatore di luce per ripristinare e azzerare lo strumento.

Il fotometro è custodito all'interno di un involucro isolato termicamente e mantenuto ad una temperatura di 40° C per eliminare eventuali effetti termici sul segnale. I dati generati

dall'unità vengono memorizzati internamente su una scheda SD ed è possibile trasmetterli ad un computer tramite il modem GPRS integrato.

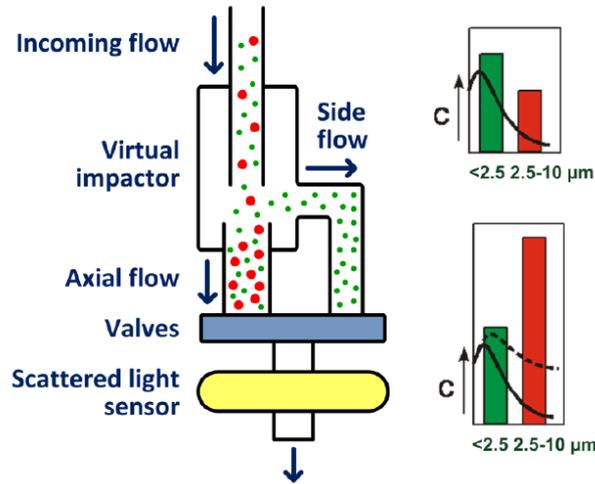


Figura 4.6. Principio di funzionamento del detector (fonte: Comde-Derenda GmbH, Instruction Manual Air Pollution Monitor 2 (APM-2), <https://www.comde-derenda.com/>).

Per quanto riguarda il modulo AQ, verrà posizionato esternamente, in particolare sul fianco destro del carrello (Figura 4.4).

L'APM2 misura alternativamente la concentrazione di PM2.5 e quella di PM10, restituendo i valori con intervallo di 2 minuti. I parametri misurati dallo strumento sono i seguenti (Tabella 4.2).

Tabella 4.2. Dettagli dei parametri misurati dall'APM2 (fonte: Comde-Derenda GmbH, Instruction Manual Air Pollution Monitor 2 (APM-2), <https://www.comde-derenda.com/>).

Voce	U.M.	Dettagli
Date	[mm/dd/yyyy]	Data
Time	[hh:mm:ss]	Orario
Type	[-]	(APM-2)
D/N	[-]	Numero di serie dello strumento
Flush	[mV]	Voltaggio al fotometro durante flussaggio nullo
PM2.5	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentrazione di PM2.5
PM10	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	Concentrazione di PM10
Motor-speed	[%]	% della velocità massima del motore
Photometer Temp.	[°C]	Temperatura del fotometro
Air pressure	[hPa]	Pressione dell'aria
Outside Temp.	[°C]	Temperatura dell'aria esterna

4. CC-Moving-Lab e strumentazione

Rel. Humidity	[%]	Umidità relativa
Event	[-]	Attività in atto
Error	[-]	Messaggio di errore, se ad esempio la temperatura o il flusso eccedono i range di tolleranza

In *Figura 4.7* si riporta un esempio della struttura del file output dello strumento.

Date	Time	Type	S/N	Flush (mV)	PM2.5 (ug/m3)	PM10 (ug/m3)	Motor-speed (%)	Photometer Temp. (°C)	POutside (hPa)	TOutside (°C)	rel. Humidity (%)	Event	Error
08.11.2013	12:02:22	APM-2	0	3081	0	0	0	43,8	1010,4	20	50	Start	ext. Sensor
08.11.2013	12:02:26	APM-2	0	3039	0	0	100	43,7	1010,7	20	50	Stop	ext. Sensor
08.11.2013	12:33:27	APM-2	0	0	0	0	0	40	1010,9	20	50	Start	ext. Sensor
08.11.2013	12:35:00	APM-2	0	3005	0	0	100	40,1	1010,4	20	50	PFlush	ext. Sensor
08.11.2013	12:36:00	APM-2	0	3001	0	0	100	40	1010,9	20	50	Flush	ext. Sensor
08.11.2013	12:38:00	APM-2	0	3001	28	0	67	40,1	1010,7	20	50	PM2.5	ext. Sensor

Figura 4.7. Esempio della struttura del file output dell'APM2.

4.2.2 Analizzatore ottico FIDAS

Il Fidas 200s Palas GmbH è uno spettrometro per aerosol sviluppato per il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico. Secondo quanto riportato nel manuale [50], analizza in continuo le polveri sottili nel range dimensionale di 180 nm - 18 µm presenti in atmosfera. In particolare, monitora PM10, PM2.5, PM1, PM4, PMtot, la concentrazione in numero di particelle Cn e la loro distribuzione dimensionale.

Attualmente il FIDAS 200s e le sue varianti sono gli unici strumenti certificati in grado di monitorare contemporaneamente la concentrazione di PM2.5 e PM10 secondo gli standard VDI 4202-1, VDI 4203-3, EN 12341, EN 14907, EN 16450 e EU Equivalence Guide GDE.

Il FIDAS 200s utilizza, come l'APM2, il principio di *light scattering*, cioè l'analisi della luce riflessa dalle particelle sospese in aria. Il flusso d'aria campionato con una portata volumetrica di circa 0.3 m³/h, raggiunge un volume illuminato in maniera omogenea da una luce bianca. Le particelle, al passaggio all'interno di questo volume, generano un impulso di luce riflessa, che viene registrata da un detector. A seconda del numero di impulsi avvenuti è possibile determinare il numero di particelle, mentre la dimensione delle stesse è funzione dell'intensità dell'impulso.



Figura 4.8. FIDAS 200s Palas GmbH.

Per quanto riguarda il modulo AQ, verrà posizionato esternamente, in particolare sul fianco destro del carrello, sopra il passaruota. (Figura 4.4).

I dati elaborati dallo strumento sono facilmente accessibili e scaricabili. Il FIDAS misura simultaneamente la concentrazione di PM2.5 e quella di PM10, riportando in output le concentrazioni con intervallo temporale di 1 minuto, ottenute come media mobile su 15 minuti. I parametri misurati dallo strumento sono i seguenti (Tabella 4.3).

Tabella 4.3. Dettagli dei parametri misurati dal FIDAS 200s (fonte: Palas GmbH, Maintenance Instruction for service technicians Fine Dust Measuring Device - Fidas system, <https://www.palas.de/en/>).

Voce	U.M.
Date	[mm/dd/yyyy]
Time	[hh:mm:ss]
Comment	[-]
PM1	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM2.5	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM4	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM10	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PMtot	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Cn	[P/cm ³]
Rel. H weather station	[%]
T weather station	[°C]

4. CC-Moving-Lab e strumentazione

p weather station	[mbar]
Status flow	[0/1] (0=no error)
Status coincidence	[0/1] (0=no error)
Status pump	[0/1] (0=no error)
Status weather station	[0/1] (0=no error)
Status IADS	[0/1] (0=no error)
Status channel deviation	[0/1] (0=no error)
Status T(LED)	[0/1] (0=no error)
Status operation mode	[0/1] (0=no error=auto)
Operation mode	[0=scope; 1=auto; 2>manual; 3=idle; 4=calib; 5=offset]
PM1-ambient	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM2.5-ambient	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM4-ambient	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM10-ambient	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PMtot-ambient	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM1-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM2.5-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM4-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM10-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PMtot-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM thoracic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM alveo	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
PM respirable	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
Flowrate	[l/min]
Velocity	[m/s]
Coincidence	[%]
Pump output	[%]
T(IADS)	[°C] (318=not activated)
Channel deviation	[raw channels]
T(LED)	[°C]
External sensor T	[°C] (-40=not activated)
External sensor H	[%]
External sensor p	[mbar] (700=not activated)

4.2.3 Analizzatore NO_x

L'analizzatore di ossidi di azoto Serinus 40 Ecotech Pty Ltd permette la misura di concentrazioni di NO, NO₂ e NO_x in aria ambiente nel range di 0-20 ppm, attraverso il metodo della chemiluminescenza [51]. È certificato secondo gli standard europei TÜV 936/21221977/A.

Grazie alle dimensioni compatte e il peso contenuto, è facilmente utilizzabile nelle stazioni di monitoraggio mobili, come il modulo AQ.



Figura 4.9. Analizzatore Serinus 40 Ecotech Pty Ltd.

Sul retro dello strumento sono presenti le porte RS232 e RS232 Multidrop, un'uscita USB e diverse porte per i collegamenti pneumatici, adibite ognuna ad una specifica funzione.

Durante la fase di precollaudo è emersa l'importanza di rimuovere eventuali tappi presenti sulle porte di prelievo, che altrimenti potrebbero comportare conseguenze sullo strumento, mandandolo in sovrappressione.

L'analizzatore deve essere dotato di pompa esterna visto lo spazio ridotto all'interno. È importante collegare correttamente la pompa alle porte di campionamento sul retro dello strumento. Il tubo di collegamento, infatti, deve essere collegato alla porta "Exhaust" dello strumento e alla porta di input della pompa, come illustrato in *Figura 4.10*. Lo scarico ("Exhaust") della pompa andrà invece verso l'esterno attraverso un collegamento differente.

Nonostante la pompa esterna comporti un assorbimento maggiore rispetto a quello di una pompa interna, il fatto che sia posta esternamente al carrello permette di risparmiare sul consumo energetico per la climatizzazione.



Figura 4.10. Dettaglio collegamento pompa esterna.

Aprendo il coperchio dello strumento è possibile osservarne la struttura interna (*Figura 4.11*). Sotto la scheda madre, sono presenti due filtri in parallelo per il filtraggio del particolato, che vanno periodicamente sostituiti. L'analizzatore restituisce un messaggio di errore sul display quando hanno raggiunto la massima capacità di filtraggio, ma per evitare di invalidare gli ultimi dati raccolti è buona prassi controllare i parametri di indicazione dell'otturazione dei filtri, come ad esempio il flusso. Una sua importante riduzione è un chiaro segno del peggioramento della capacità di filtraggio. In fase di manutenzione annuale viene sostituito il filtro di zero per la calibrazione, che non deve essere quindi cambiato dall'utente. Si deve porre attenzione, invece, al corretto mantenimento della ventola sul retro, effettuando una pulizia periodica completa di smontaggio della stessa.

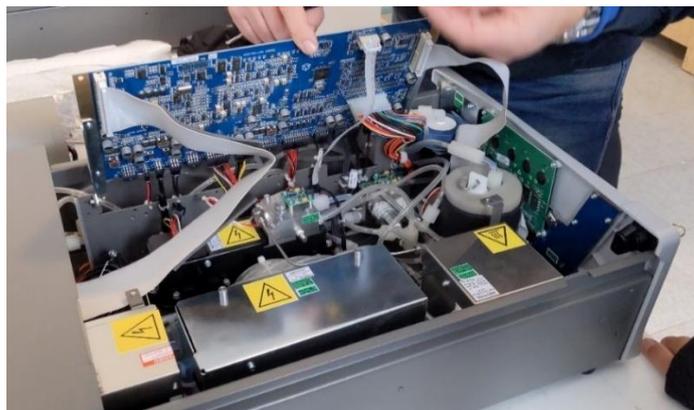


Figura 4.11. Struttura interna Serinus 40 Ecotech Pty Ltd.

L'analizzatore possiede un tubo a permeazione, costituito da un cilindro in acciaio al cui interno è presente l'elemento per la calibrazione. Quest'ultimo viene rilasciato ad una

portata standard, una volta che il tuo è ad una temperatura costante di 50°C. Si suggerisce di rimuovere il cilindro dal tubo a permeazione quando lo strumento non viene utilizzato per lunghi periodi di tempo, per evitare che rilasci la sostanza contenuta al suo interno e ostruisca le strutture idrauliche dello strumento. Generalmente il cilindro deve essere sostituito dopo due anni e mezzo, allo scadere della garanzia.

Lo strumento è in grado di effettuare con una frequenza temporale dell'ordine dei minuti un resettaggio, grazie a scrubber di autozero di cui è dotato.

L'analizzatore Serinus 40, sfruttando il principio di chemiluminescenza, è in grado di misurare le concentrazioni di NO e NO_x attraverso due percorsi diversi. Riferisce, inoltre, i valori di NO₂ come differenza tra le due misure effettuate (NO e NO_x).

All'interno del modulo AQ l'analizzatore Serinus 40 per il campionamento degli ossidi di azoto, insieme a al Serinus 10 (§4.2.4), viene posizionato centralmente nella parte superiore del rack, in modo tale che sia facilmente estraibile durante le operazioni di manutenzione. È previsto che l'analizzatore dell'O₃ venga posizionato sopra quello per gli NO_x, in quanto l'ozono è caratterizzato da un elevato potenziale di interferenza con gli altri gas.

A seguito dell'accensione, lo strumento necessita di circa un'ora per effettuare gli adeguati controlli e raggiungere le condizioni necessarie alla fase di misurazione. Gli esausti dello strumento verranno convogliati, insieme a quelli provenienti dalla sonda, alla pompa posizionata nel case all'esterno del carrello.

Per il salvataggio dei dati è necessario lasciare una chiavetta USB collocata nell'apposita porta all'interno dell'analizzatore.

4.2.4 Analizzatore O₃

L'analizzatore di ozono Serinus 10 Ecotech Pty Ltd permette la misura di concentrazioni di O₃ in aria ambiente nel range di 0-20 ppm, attraverso il metodo dell'assorbimento della radiazione UV [52]. È certificato secondo gli standard europei TÜV 936/21221977/C.

4. CC-Moving-Lab e strumentazione



Figura 4.12. Analizzatore Serinus 10 Ecotech.

Grazie alle dimensioni compatte e il peso contenuto, è facilmente utilizzabile nelle stazioni di monitoraggio mobili, come il modulo AQ.

Nel caso in cui si voglia collegare l'analizzatore insieme ad altri strumenti ad un datalogger è possibile sfruttare le porte RS232 e RS232 Multidrop presente sullo strumento (Figura 4.13). Le altre prese presenti sul retro riguardano l'alimentazione, un'uscita USB e diverse porte per i collegamenti pneumatici, adibite ognuna ad una specifica funzione.



Figura 4.13. Retro dell'analizzatore Serinus 10 Ecotech.

Durante la fase di precollaudo è emersa l'importanza di rimuovere eventuali tappi presenti sulle porte di prelievo, che altrimenti potrebbero comportare conseguenze sullo strumento, mandandolo in sovrappressione.

L'analizzatore è dotato di pompa interna, ma per lo scopo che deve ricoprire all'interno del modulo AQ, è stata esclusa, preferendo l'utilizzo di una pompa esterna.

Aperto il coperchio dello strumento è possibile osservarne la struttura interna. Sotto la scheda madre si trovano le lampade UV inserite all'interno di una camera di misura insieme ad un detector che registra l'attenuazione dell'irraggiamento UV a causa dell'ozono. Lo strumento è in grado di effettuare con una frequenza temporale dell'ordine dei secondi un resettaggio, grazie a scrubber di autozero di cui è dotato. Sono presenti, inoltre, come nel Serinus 40 (§4.2.3), due filtri in parallelo per il filtraggio del particolato, che vanno periodicamente sostituiti. L'analizzatore restituisce un messaggio di errore sul display quando hanno raggiunto la massima capacità di filtraggio, ma per evitare di invalidare gli ultimi dati raccolti è buona prassi controllare i parametri di indicazione dell'otturazione dei filtri, come ad esempio il flusso. Una sua importante riduzione è un chiaro segno del peggioramento della capacità di filtraggio. In fase di manutenzione annuale viene sostituito il filtro di zero per la calibrazione, che non deve essere quindi cambiato dall'utente. Si deve porre attenzione, invece, al corretto mantenimento della ventola sul retro, effettuando una pulizia periodica completa di smontaggio della stessa.

All'interno del modulo AQ l'analizzatore Serinus 10 per il campionamento dell'ozono, insieme a al Serinus 40 (§4.2.3), viene posizionato centralmente nella parte superiore del rack, in modo tale che sia facilmente estraibile durante le operazioni di manutenzione. È previsto che l'analizzatore dell'O₃ venga posizionato sopra quello per gli NO_x, in quanto l'ozono è caratterizzato da un elevato potenziale di interferenza con gli altri gas.

A seguito dell'accensione, lo strumento necessita di circa un'ora per effettuare gli adeguati controlli e raggiungere le condizioni necessarie alla fase di misurazione. Gli esausti dello strumento verranno convogliati, insieme a quelli provenienti dalla sonda, alla pompa posizionata nel case all'esterno del carrello.

Lo strumento non possiede una capiente memoria interna, quindi per il salvataggio dei dati è consigliabile lasciare una chiavetta USB collocata nell'apposita porta all'interno dell'analizzatore.

4.2.5 Campionatore PM

Il campionatore MicroPNS tipo LVS16 Umwelttechnik MCZ GmbH è un sistema controllato per la raccolta di particelle areodisperse su filtri. È in grado di campionare il

particolato su un numero massimo di 16 filtri da 47 mm l'uno, dopo i quali è necessario intervenire manualmente per sostituirli. Il flusso è regolato da una portata volumetrica pari a 2.3 m³/h. A seconda della testa di campionamento che viene installata è possibile misurare le concentrazioni di PM2.5, PM10 o TSP. [53]

Il campionatore è certificato secondo le specifiche EN 12341:2014 e può essere gestito da remoto.

Lateralmente è presente la sonda per la misura della temperatura, che servirà a normalizzare il dato campionato. Il campionatore è dotato di sistema di raffreddamento laterale che permette di mantenere l'area di stoccaggio dei filtri alla temperatura indicata da normativa. Nella parte superiore dello strumento vengono installati il tubo e la testa di campionamento, PM2.5 o PM10 a seconda della misura che si vuole intraprendere.

All'interno del modulo AQ, verrà posizionato esternamente, in particolare sulla parte anteriore (*Figura 4.3 e Figura 4.4*). La testa di campionamento sarà posizionata ad una distanza di circa 0.5 m dai pannelli solari, che potrebbero altrimenti falsare le misure effettuate. I pannelli solari scorrevoli sono stati progettati, inoltre, in modo tale da poter essere aperti e mantenere una posizione che non sia in contrasto con la testa campionatrice dello strumento.



Figura 4.14. Campionatore MicroPNS tipo LVS16 Umwelttechnik MCZ.

I filtri puliti vengono prelevati dal basso e una volta effettuato il campionamento, vengono disposti nel portafiltro adiacente. Nel display è possibile verificare la temperatura del filtro, quella esterna e quella dell'area adibita allo stoccaggio. I dati registrati dallo strumento vengono memorizzati e possono essere scaricati attraverso chiavetta USB.

4.2.6 Sonda per i gas

La sonda di campionamento Sartec, all'interno della progettazione per il modulo AQ, ha il compito di distribuire l'aria campionata agli analizzatori di ozono e ossidi di azoto. Viene posizionata sul lato posteriore sinistro del carrello, sopra il passaruota.

La sonda si compone di:

- testa di prelievo
- sistema di riscaldamento sonda a 70 °C
- tubo di campionamento in PTFE
- aspiratore per assicurare alta velocità di campionamento
- sistema di distribuzione campione



Figura 4.15. Sonda gas Sartec (fonte: Sartec - Saras Ricerche e Tecnologie Srl, Sonda campionamento inquinanti gassosi)

La testa di prelievo è connessa al tubo di campionamento tramite due crociere. Il sistema di riscaldamento è previsto per contrastare la condensazione dell'umidità del campione

mentre attraversa la sonda. Vengono quindi riscaldati tramite una resistenza sia la testa che il tubo di campionamento. Nella parte inferiore dello strumento è presente un aspiratore che assicura il tempo di trasferimento necessario e il sistema di distribuzione che permette di allacciare fino a dodici analizzatori contemporaneamente. [54]

Per installare la tubazione di prelievo si richiede un foro a tenuta idraulica sul telaio del carrello. È necessario monitorare la pulizia dell'anima in teflon all'interno della tubazione per evitare che non svolga correttamente il proprio ruolo.

Per quanto riguarda il modulo AQ, verrà posizionato esternamente, in particolare sul fianco sinistro del carrello (*Figura 4.4*). L'altezza totale della sonda è pari a circa 2.4 m, quindi, considerando un'altezza di 0.5 m da terra del parafrangivo, si ottiene che la sonda raggiunge una quota di 2.9 m dal suolo.

4.2.7 Stazione meteo

La stazione meteo Vantage Pro2 Davis Instruments, come da manuale [55], è composta da due diversi blocchi: i sensori e la console.



Figura 4.16. Stazione meteo Vantage Pro2 Davis Instruments.

Tra i sensori si individuano un pluviometro, un anemometro, che registra sia la velocità che la direzione del vento, un sensore di temperatura e uno di umidità. Si possono inoltre

aggiungere un sensore di radiazione UV e uno schermo per registrare la radiazione solare. La console, invece, contiene un barometro, i sensori di temperatura e umidità interni e fornisce la visualizzazione dei dati all'utente. I dati raccolti dalla stazione possono essere scaricati e trasferiti su pc tramite porta USB o LAN attraverso il programma Weatherlink, per le successive analisi.

Per quanto riguarda il modulo AQ, verrà posizionato esternamente, in particolare sarà agganciato ad un supporto sul fianco sinistro del carrello, accanto alla porta di accesso (*Figura 4.4*).

5 Programma sviluppato per le analisi dati

Come descritto nel capitolo 4 - *CC-Moving-Lab e strumentazione*, questo lavoro di tesi si inserisce all'interno del contesto della realizzazione del modulo AQ del laboratorio mobile. Gli strumenti che dovranno essere inseriti all'interno del carrello si occuperanno della misurazione di PM, NOx, O₃ e delle condizioni meteorologiche. Per permettere il confronto dei dati registrati dai diversi strumenti è emersa la necessità di un sistema in grado di elaborare i dati e inserirli all'interno di un database. A questo scopo è stato realizzato un programma attraverso il linguaggio di programmazione Python.

Python è un linguaggio di programmazione dinamico e di alto livello, che permette lo sviluppo di programmi in maniera semplice e flessibile. Supporta differenti paradigmi di programmazione e può essere eseguito su diverse piattaforme. È, inoltre, *free software*, quindi il download e il suo utilizzo sono gratuiti. [56]

Secondo il TIOBE Programming Community Index [57] aggiornato a novembre 2020, Python è il secondo linguaggio di programmazione più usato a livello mondiale, dopo il linguaggio C. La classifica viene stilata mensilmente, sulla base della quantità di venditori e programmatori che li utilizzano ed indica, quindi, la popolarità dei linguaggi di programmazione.

Il programma sviluppato nel presente lavoro di tesi tratta i dati grezzi prodotti dagli strumenti, fornisce indicazioni rispetto ad errori riscontrati in fase di misurazione e restituisce medie orarie, giornaliere e grafici per agevolare successive analisi e

5. Programma sviluppato per le analisi dati

valutazioni. In particolare, sfruttando il programma elaborato è possibile trattare i file grezzi di APM2, FIDAS e stazione meteo, essendo questi gli strumenti attualmente attivi sul CC-Green-Roof del Politecnico di Torino. In questo modo, è stato possibile lavorare con dati registrati dagli strumenti per redigere in maniera accurata e ottimale il programma per ogni singolo strumento. Potrà essere utilizzato anche per il modulo AQ del CC-Moving-Lab essendo prevista la presenza degli strumenti trattati sul carrello. Per poter confrontare, però, tutti i dati raccolti dal modulo AQ, cioè anche le concentrazioni di NO_x e O₃, sarà necessario un ulteriore sviluppo del programma, una volta operativa tutta la strumentazione.

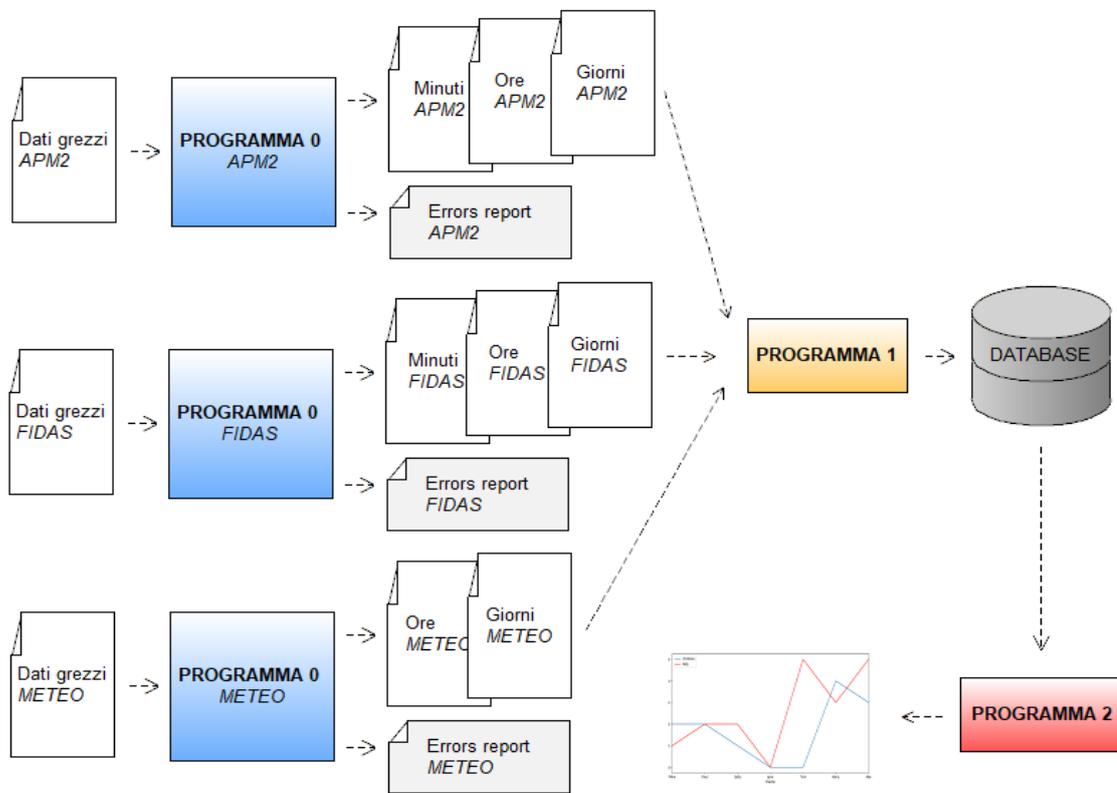


Figura 5.1. Schema generale input/output programmi.

Per ogni tipo di strumento (APM2, FIDAS e METEO) si è sviluppato un Programma 0 in grado di acquisire i file grezzi degli strumenti e di effettuare le medie orarie e giornaliere dei dati, riportandole nei file Excel di output. Il Programma 0 restituisce inoltre un file report di testo che riporta gli errori individuati all'interno delle serie di dati.

I file in uscita dal Programma 0 possono essere quindi inseriti all'interno del Programma 1, che raccoglie tutti i dati dei diversi strumenti e li riporta all'interno del database

annuale, che è composto da diversi fogli relativi agli intervalli con passo del minuto, orario e giornaliero.

Infine, grazie al Programma 2, è possibile sviluppare grafici che permettono il confronto dei dati registrati dagli strumenti. Nei seguenti paragrafi si descrive in dettaglio il funzionamento di ogni programma, che è stato poi sfruttato per ottenere i risultati discussi nel capitolo 6 - *Elaborazione dati e casi studio*.

5.1 Programma 0

Si analizzano di seguito nel primo paragrafo i programmi 0 degli strumenti APM2 e FIDAS e nel secondo quello relativo alla stazione meteo.

5.1.1 APM2 e FIDAS

Viste le similitudini presenti all'interno dei programmi realizzati per gli strumenti APM2 e FIDAS, si riportano i dettagli degli script di entrambi in questo capitolo. Le parti differenziate verranno riportate in colonne separate, mentre il testo non diviso indica le prescrizioni valide per entrambi.

5.1.1.1 FASE 0: DEFINIZIONI

La prima parte del programma è destinata al settaggio dei parametri modificabili. È necessario, infatti, che l'operatore definisca in questa area le seguenti voci:

APM2

```
#FASE 0: DEFINIZIONI -----  
data_col = [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10,  
11]  
file_names = ['file_name.csv',  
'file_name.csv']  
file_toremove = 'file_name.xlsx'  
#-----
```

FIDAS

```
#FASE 0: DEFINIZIONI -----  
data_col = [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9,  
10]  
file_names = ['file_name.txt',  
'file_name.txt']  
file_toremove = 'file_name.xlsx'  
#-----
```

- | | |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> - <i>file_names</i> = lista dei nomi dei file che si intende processare, da inserire con estensione (.csv) - <i>file_toremove</i> = nome dell'eventuale file di filtraggio manuale. Nel caso in cui non si voglia eliminare nessun range di date, dovrà essere inserito 'no' come nome del file. - <i>data_col</i> = lista delle colonne del file grezzo che devono essere mediate | <ul style="list-style-type: none"> - <i>file_names</i> = lista dei nomi dei file che si intende processare, da inserire con estensione (.txt) - <i>file_toremove</i> = nome dell'eventuale file di filtraggio manuale. Nel caso in cui non si voglia eliminare nessun range di date, dovrà essere inserito 'no' come nome del file. - <i>data_col</i> = lista delle colonne del file grezzo che devono essere mediate |
|--|--|

I file che dovranno essere processati (riportati all'interno di *file_names*) sono composti nelle prime due colonne dai dati relativi alla data e all'ora della misurazione, mentre nelle colonne successive si hanno i parametri che lo strumento è in grado di misurare. Per i dettagli delle singole voci si rimanda al capitolo 4.2 - *Strumenti e accorgimenti emersi durante la fase di precollaudo*.

APM2

Tabella 5.1. Dettagli delle colonne del file grezzo APM2.

Column	Name	Unit
0	Date	[mm/dd/yyyy]
1	Time	[hh:mm:ss]
2	Type	[-]
3	D/N	[-]
4	Flush	[mV]
5	PM2.5	[µg/m³]
6	PM10	[µg/m³]
7	Motorspeed	[%]
8	Volume Flow	[l/m]
9	Photometer T	[°C]
10	Air pressure	[hPa]
11	Outdoor T	[°C]

FIDAS

Tabella 5.2. Dettaglio delle colonne del file grezzo FIDAS.

Column	Name	Unit
0	Date	[mm/dd/yyyy]
1	Time	[hh:mm:ss]
2	Comment	[-]
3	PM1	[µg/m³]
4	PM2.5	[µg/m³]
5	PM4	[µg/m³]
6	PM10	[µg/m³]
7	PMtot	[µg/m³]
8	Cn	[P/cm³]
9	Rel. H weather station	[%]

5. Programma sviluppato per le analisi dati

12	Rel. Humidity	[%]	10	T weather station	[°C]
13	Event	[-]	11	p weather station	[mbar]
14	Notice	[-]	12	Status flow	[0/1] (0=no error)
			13	Status coincidence	[0/1] (0=no error)
			14	Status pump	[0/1] (0=no error)
			15	Status weather station	[0/1] (0=no error)
			16	Status IADS	[0/1] (0=no error)
			17	Status channel deviation	[0/1] (0=no error)
			18	Status T(LED)	[0/1] (0=no error)
			19	Status operation mode	[0/1] (0=no error=auto)
			20	Operation mode	[0=scope; 1=auto; 2=manual; 3=idle; 4=calib; 5=offset]
			21	PM1-ambient	[µg/m³]
			22	PM2.5-ambient	[µg/m³]
			23	PM4-ambient	[µg/m³]
			24	PM10-ambient	[µg/m³]
			25	PMtot-ambient	[µg/m³]

5. Programma sviluppato per le analisi dati

26	PM1-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
27	PM2.5-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
28	PM4-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
29	PM10-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
30	PMtot-classic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
31	PM thoracic	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
32	PM alveo	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
33	PM respirable	[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]
34	Flowrate	[l/min]
35	Velocity	[m/s]
36	Coincidence	[%]
37	Pump output	[%]
38	T(IADS)	[$^{\circ}\text{C}$] (318=not activated)
39	Channel deviation	[raw channels]
40	T(LED)	[$^{\circ}\text{C}$]
41	External sensor T	[$^{\circ}\text{C}$] (-40=not activated)
42	External sensor H	[%]
43	External sensor p	[mbar] (700=not activated)

Il file di filtraggio manuale (*file_toremove*) è un file excel esterno che deve essere aggiornato dall'operatore. È pensato per escludere range di date e orari dalle operazioni successive, nel momento in cui viene riscontrato un errore o una condizione ambientale per cui si ritiene che le misurazioni fatte dallo strumento in quell'intervallo di tempo non siano attendibili. Questo file ha la struttura riportata in *Tabella 5.3*.

Tabella 5.3. Esempio di file di filtraggio manuale.

	A	B	C	D	E
1	Date_From	Time_From	Date_To	Time_To	Problem
2	18/01/2020	00.00.00	20/01/2020	22.30.00	Problem X
3	10/02/2020	08.30.00	15/02/2020	10.15.00	Problem Y
4	22/02/2020	20.30.00	23/02/2020	07.40.00	Problem Z
5					

Al suo interno si riportano, in ogni riga, i range di date che si desidera eliminare dalla serie di dati. In particolare, dovranno essere indicati la data (nella colonna A - *Date_From*) e l'ora (nella colonna B - *Time_From*) iniziali e la data (nella colonna C - *Date_To*) e l'ora (nella colonna D - *Time_To*) finali dell'intervallo temporale che si intende rimuovere. Nella colonna *Problem* deve essere indicato il motivo di tale scelta. Le date all'interno di questi range non verranno considerate nelle operazioni successive.

5.1.1.2 FASE 1: ACQUISIZIONE DATI

In questa fase, è presente un primo ciclo nel quale, per ogni file da processare, viene acquisito il file completo, per mantenere in memoria una versione completa del file iniziale, e una seconda versione contenente solo le colonne di interesse. Questi dati vengono convertiti in liste, rispettivamente *list_complete* e *data_list* e verranno utilizzati per tutte le successive operazioni.

FIDAS Prima di procedere con il ciclo successivo, viene effettuata una modifica del formato delle prime due colonne, vale a dire data e ora, da AM/PM a 24h.

All'interno del ciclo di acquisizione dei file vengono inoltre effettuate le seguenti operazioni:

Se il file input che si sta processando è il primo di quelli inseriti nella *FASE 0*, il programma acquisisce la prima riga del file, che è costituita dai titoli delle diverse colonne, e la salva nella lista *header*. Successivamente viene copiata nella lista *header1* e vengono effettuate delle modifiche su entrambi.

APM2

In particolare, *header* rappresenta la lista dei titoli del foglio dei minuti, mentre *header1* del foglio delle ore e dei giorni. Infatti, in *header1* viene aggiunta una colonna (%_value) che servirà per inserire la percentuale di copertura temporale dei dati, vale a dire la percentuale di dati contenuti nell'ora o nel giorno di riferimento rispetto a una copertura oraria o giornaliera completa. In questa lista viene, inoltre, eliminata la colonna *Event*, in quanto nelle media orarie perde di significato il dato. Le liste risultano quindi come segue:

Tabella 5.4. Titoli delle liste del file output dell'APM2.

<i>header</i>	<i>header1</i>
Date	Date
Time	Time
D/N	D/N
Flush(mV)	Flush(mV)
PM2.5(ug/m3)	PM2.5(ug/m3)
PM10(ug/m3)	PM10(ug/m3)
Motorspeed (%)	Motorspeed (%)
Volume Flow (l/m)	Volume Flow (l/m)
Photometer Temp. (°C)	Photometer Temp. (°C)
Air Pressure (hPa)	Air Pressure (hPa)
Outdoor Temp. (°C)	Outdoor Temp. (°C)
Rel.Humidity(%)	Rel.Humidity(%)
Event	%_value
Comment	Comment
Date	Date

FIDAS

In particolare, *header* rappresenta la lista dei titoli del foglio dei minuti, mentre *header1* del foglio delle ore e dei giorni. In entrambe le liste viene aggiunta una colonna finale (*Comment*) per le note riguardanti gli eventuali errori presenti. In *header1* viene inoltre aggiunta una colonna (%_value) che servirà per inserire la percentuale di copertura temporale dei dati, vale a dire la percentuale di dati contenuti nell'ora o nel giorno di riferimento rispetto a una copertura oraria o giornaliera completa. Le liste risultano quindi come segue:

Tabella 5.5. Titoli delle liste del file output del FIDAS.

<i>header</i>	<i>header1</i>
Date	Date
Time	Time
PM 1	PM 1
PM 2.5	PM 2.5
PM 4	PM 4
PM 10	PM 10
PM tot	PM tot
Cn	Cn
rH	rH
T	T
p	p
Comment	%_value
	Comment

Viene inoltre creato il file output excel nella cartella 0_OUTPUT, rinominato in funzione del primo e dell'ultimo dato presenti all'interno del file iniziale. Il formato del nome del file output è:

<u>APM2</u>		<u>FIDAS</u>
<i>dal_dd1_mm1_yyyy1_al_dd2_mm2_</i>		<i>dal_dd1_mm1_yyyy1_al_dd2_mm2_</i>
<i>yyyy2_APM2.xlsx</i>		<i>yyyy2_FIDAS.xlsx</i>

dove *dd1 mm1* e *yyyy1* sono giorno, mese e anno della prima data, mentre *dd2 mm2* e *yyyy2* dell'ultima.

Vengono infine creati i 3 fogli di calcolo all'interno del file output excel (*minute*, *hourly*, *daily*) e stampati nella prima riga i titoli (*header* nel primo foglio e *header1* nel secondo e nel terzo).

Se, invece, il file input che si sta processando non è il primo di quelli inseriti nella *FASE 0*, il programma aggiunge i dati presenti nel file alle liste *list_complete* e *data_list* già esistenti.

5.1.1.3 FASE 2: ELABORAZIONE

Una volta concluso il ciclo e salvati quindi tutti i dati da processare nelle liste *list_complete* e *data_list*, viene creato il file output di testo nella cartella 0_OUTPUT, nel quale verrà riportato un report delle operazioni svolte e un dettaglio degli errori individuati durante il processo.

Il formato del nome del file output è:

<u>APM2</u>		<u>FIDAS</u>
<i>APM2_errors_report.txt</i>		<i>FIDAS_errors_report.txt</i>

Vengono immediatamente stampati sul file output di testo il titolo, i file di input che verranno processati e il nome del file output excel. Un esempio viene riportato di seguito:

APM2

```
***   APM2 ERRORS REPORT   ***  
  
Input file:  
20138_dal_2020_01_14_al_2020_01_21_APM2C_temporaneamente.CSV  
20103_dal_2020_01_21_al_2020_02_29.csv  
  
Output file:  
dal_2020_01_14_al_2020_02_29_APM2.xlsx  
-----
```

FIDAS

```
***   FIDAS ERRORS REPORT   ***  
  
Input file:  
DUSTMONITOR_11629_2020_01_corr_ora_il_27_01.txt  
DUSTMONITOR_11629_2020_02.txt  
  
Output file:  
dal_2020_01_01_al_2020_02_29_FIDAS.xlsx  
-----
```

5.1.1.3.1 Filtraggio manuale

Nel caso in cui nella FASE 0 non si sia indicato ‘no’ alla voce *file_toremove*, il programma salva i dati relativi al file indicato in una lista (*list_file_toremove*). Vengono inoltre salvate in una lista separata (*date_time_data_list*) le date e gli orari della lista completa di dati grezzi (*data_list*).

Successivamente, per ogni riga della lista *list_file_toremove*, cioè per ogni range di date indicate nel file di filtraggio manuale, viene generata una lista (*list_toremove*) di date/ore tra le due date indicate come inizio e fine dell’intervallo temporale per cui si è avuto un problema. All’interno dello stesso ciclo, viene individuato l’indice che le date da rimuovere (*list_toremove*) hanno all’interno della lista iniziale di dati (*data_list*), se sono presenti. In questo modo è possibile rendere vuote le colonne di dati contenute all’interno di questi range indesiderati e segnare l’errore o il problema per il quale è stata fatta questa scelta nella colonna ‘*Comment*’. Si riporta un esempio del risultato che si ottiene (Tabella 5.6).

5. Programma sviluppato per le analisi dati

Tabella 5.6. Esempio di rimozione di dati grazie al filtraggio manuale. Nella colonna 'Comment' viene riportato l'errore che ha provocato la scelta della rimozione del determinato intervallo di tempo.

	A	B	C	D	E	F	L	M	N
1	Date	Time	D/N	Flush(mV)	PM2.5(ug/m3)	PM10(ug/m3)	Rel.Humidity(%)	Event	Comment
4949	17/01/2020	23:58:00	20138	907.00	17.30	27.30	79.90	PM 2.5	
4950	17/01/2020	23:59:00	20138	907.00	17.30	29.40	80.40	PM 10	
4951	18/01/2020	00:00:00	20138	907.00	17.30	29.40	80.40	PM 10	
4952	18/01/2020	00:01:00	20138					PM 2.5	Problem X
4953	18/01/2020	00:02:00	20138					PM 2.5	Problem X
4954	18/01/2020	00:03:00	20138					PM 10	Problem X
4955	18/01/2020	00:04:00	20138					PM 10	Problem X
4956	18/01/2020	00:05:00	20138					PM 2.5	Problem X
4957	18/01/2020	00:06:00	20138					PM 2.5	Problem X
4958	18/01/2020	00:07:00	20138					PM 10	Problem X

Una volta eseguito questo processo per tutti i range da rimuovere, viene stampato sul file output di testo se l'operazione di rimozione dei range di date da filtraggio manuale è stata eseguita e in riferimento a quale file.

```
-----  
Removing data ranges:  
Done with file "file_name.xlsx"  
-----
```

Nel caso in cui venga inserito 'no' nella *FASE 0* in *file_toremove*, verrà stampato il seguente messaggio:

```
-----  
Removing data ranges:  
Not done because no file inserted  
-----
```

Si ha quindi una fase nella quale viene convertito il formato dei dati contenuti nella lista di dati grezzi iniziale (*data_list*). Viene sostituita infatti la virgola “,” col punto “.” come separatore decimale.

5.1.1.3.2 Diagnostica

Successivamente i dati in input vengono sottoposti alla fase di DIAGNOSTICA.

In questa fase, vengono valutati gli errori che possono essere presenti nella serie di dati. La prima verifica che viene eseguita è l'ordine cronologico delle date/ore. Se viene individuata una riga la cui riga precedente non è antecedente in termini cronologici, ma è successiva, si registra la riga come *chronological_error*. Questa verifica viene effettuata su tutta la serie temporale di dati presente, prima di procedere con qualsiasi altro

controllo. Nel caso in cui siano presenti uno o più *chronological_error* il programma viene interrotto e segnala l'errore sia nella console, che nel file output di testo *file_report*. In questo caso sarà necessario valutare i dati per individuare il motivo di tale errore e correggerli manualmente, prima di poter proseguire con le operazioni di media. Si riportano gli esempi di console e file output di testo rispettivamente.

```
WARNING - chronological_error: 27/01/2020 08:02:00
WARNING - chronological_error: 11/02/2020 13:00:00
```

Error messages		
DATE	TIME	ERROR_TYPE
27/01/2020	08:02:00	chronological_error
11/02/2020	13:00:00	chronological_error

Nel caso in cui non sia presente un *chronological_error*, si valutano tutti i possibili errori che possono verificarsi. Questi verranno salvati all'interno della stringa *str_errors*, che sarà poi riportata nella colonna "Comment" del file output excel e nella sezione "Error messages" del file output di testo.

Viene inizialmente verificato che non siano presenti salti temporali, ovvero che ogni riga non sia a un passo maggiore di 2 minuti per l'*APM2* (1 minuto per il *FIDAS*) da quella precedente. In caso contrario viene aggiunto alla stringa di errore *str_errors* l'errore *time_warp* e viene segnalata sulla console.

```
TIME WARP 27/01/2020 13:59:00
TIME WARP 01/02/2020 00:00:00
```

Come spiegato successivamente, nel file output di testo si avrà una sezione specifica con i dettagli sulla lunghezza del salto temporale.

Gli ulteriori parametri di controllo che vengono verificati e i rispettivi tag di errore sono elencati di seguito:

<u>APM2</u>		<u>FIDAS</u>
- D/N:	Avviso	variazione
	"serial_number_change"	
		- PM + Cn: Avviso valore negativo
		"PM_negative_value"

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> - Flush: Avviso salto superiore al 10% rispetto a cella precedente “flush_error” - PM2.5/PM10: Avviso valore negativo “PM_negative_value” - Motorspeed: No avvisi - Volume Flow: +/- 10% rispetto a 3.3 con esclusione dei Flush “volume_flow_error” - Photometer Temp: +/- 10% rispetto a 40°C “photometer_temp_error” - Notice: Acquisizione di tutti gli errori segnalati nella colonna notice | <ul style="list-style-type: none"> - PM + Cn: Avviso valore nan “PM_nan_value” - Status flow: Avviso quando è uguale a 1 “flow_error” - Status flow: +/- 10% rispetto a 4.8 “volume_flow_error” - Status coincidence: Avviso quando è uguale a 1 “coincidence_error” - Status pump: Avviso quando è uguale a 1 “pump_error” - Status weather station: Avviso quando è uguale a 1 “weather_station_error” - Status IADS: Avviso quando è uguale a 1 “IADS_error” - Status channel deviation: Avviso quando è uguale a 1 “channel_deviation_error” - Status T(LED): Avviso quando è uguale a 1 “T_LED_error” - Status operation mode: Avviso quando è uguale a 1 “operation_mode_error” |
|--|---|

Ogni volta che viene identificata una di queste anomalie, il rispettivo tag di errore viene aggiunto alla lista *str_errors*.

Non appena sono stati verificati tutti i parametri di controllo per ogni riga, vengono stampati sul file output di testo tutti gli errori riscontrati, se presenti.

I dati relativi alle righe che presentano un errore verranno quindi eliminate, in quanto la misura riportata potrebbe non essere attendibile. Se fosse però presente solo un *time_warp*, verrà segnalato, ma non comporterà una cancellazione della riga. Questo

errore, infatti, si presenta quando si ha un salto temporale nella serie di dati, ma non implica che ci sia stato un errore durante la misurazione.

Nel file output di testo è inoltre presente una sezione (Time warp details), che fornisce dettagli in merito all'errore `time_warp`. In particolare, indica l'intervallo di tempo in cui si è verificato il salto temporale.

APM2 Un'ulteriore sezione (Serial number change details) fornisce dettagli in merito all'errore `serial_number_change`, indicando il momento di modifica del numero di serie dello strumento e i numeri di serie coinvolti nel cambio.

Un esempio delle diverse sezioni è riportato di seguito.

APM2

```
-----
Error messages

DATE          TIME          ERROR_TYPE
14/01/2020    13:31:00     photometer_temp_error
14/01/2020    13:32:00     flush_error photometer_temp_error
14/01/2020    13:33:00     photometer_temp_error
21/01/2020    09:39:00     time_warp serial_number_change flush_error
photometer_temp_error
21/01/2020    09:41:00     flush_error photometer_temp_error
21/01/2020    09:42:00     photometer_temp_error
21/01/2020    09:44:00     photometer_temp_error
21/01/2020    09:46:00     photometer_temp_error
21/01/2020    09:48:00     photometer_temp_error
21/01/2020    10:43:00     flush_error
11/02/2020    14:31:00     time_warp
11/02/2020    14:58:00     time_warp flush_error
11/02/2020    15:00:00     flush_error
-----
Time warp details

from 21/01/2020 09:31:00 to 21/01/2020 09:39:00
from 11/02/2020 11:04:00 to 11/02/2020 14:31:00
from 11/02/2020 14:45:00 to 11/02/2020 14:58:00
-----
Serial number change details

from 21/01/2020 09:31:00 20138 to 21/01/2020 09:39:00 20103
-----
```

FIDAS

```

-----
Error messages

DATE          TIME          ERROR_TYPE
27/01/2020    08:02:00      PM1_nan_value PM2.5_nan_value
volume_flow_error
27/01/2020    08:03:00      PM4_nan_value PM10_nan_value PMtot_nan_value
27/01/2020    13:59:00      time_warp PM1_nan_value operation_mode_error
27/01/2020    14:00:00      PM1_nan_value PM2.5_nan_value PM4_nan_value
01/02/2020    00:00:00      time_warp
11/02/2020    10:18:00      time_warp PM1_nan_value PM2.5_nan_value
11/02/2020    10:23:00      PM1_nan_value PM2.5_nan_value PM4_nan_value
11/02/2020    13:03:00      PM1_nan_value PM2.5_nan_value PM4_nan_value
11/02/2020    13:06:00      PM10_nan_value PMtot_nan_value
26/02/2020    13:10:00      time_warp
-----

Time warp details

from 27/01/2020 08:03:00 to 27/01/2020 13:59:00
from 27/01/2020 14:03:00 to 01/02/2020 00:00:00
from 11/02/2020 00:34:00 to 11/02/2020 10:18:00
from 26/02/2020 13:07:00 to 26/02/2020 13:10:00
-----

```

5.1.1.3.3 Medie orarie e giornaliere

Una volta concluse le analisi degli errori presenti, si passa alla sezione in cui vengono effettuate le operazioni vere e proprie sui dati, vale a dire la media oraria e giornaliera dei dati grezzi in ingresso.

APM2

Fornendo l'APM2 misure con passo di 2 minuti, si è reputato necessario, inoltre, un raddoppiamento dei dati per andare a coprire i salti temporali nei minuti mancanti. Questa scelta è stata dettata dal fatto che si è deciso di definire il database finale con passo del minuto, quindi l'operazione eviterebbe la presenza di dati discontinui all'interno del database stesso. Le operazioni di media giornaliera e oraria

FIDAS

Diversamente dall'APM2, non è necessario effettuare operazioni sulla serie temporale di dati grezzi iniziale, in quanto lo strumento ha una frequenza di misurazione di 1 minuto ed è quindi già compatibile con il formato del database finale.

vengono comunque svolte sui dati iniziali originali, cioè quelli con passo dei 2 minuti. L'ipotesi che viene quindi fatta è che il valore dei parametri misurati nei minuti mancanti rimanga costante rispetto al minuto precedente.

Si è proceduto definendo tre liste diverse, una per il passo dei minuti, una per quello delle ore e una per quello dei giorni, *list_mm*, *list_hh* e *list_dd*, rispettivamente.

APM2 Come precedentemente anticipato, è necessario proseguire in maniera differente per le serie minuti, ore e giorni. Nel caso dell'APM2, il programma effettua prima le medie orarie e giornaliere e, successivamente, modifica la lista dei minuti secondo il criterio appena descritto.

Le medie orarie e giornaliere vengono eseguite in due step separati. In prima fase, infatti, vengono processati data e orario attraverso la funzione *date_time_mean(index_mean, list_out)*. Mentre, solo successivamente, vengono mediati i dati veri e propri con la funzione *data_mean(index_mean, list_out)*. La prima fase attraverso *date_time_mean(index_mean, list_out)* permette di creare le due serie temporali (giornaliera e oraria), modificando i parametri in ingresso. *Index_mean* e *list_out* saranno "1" e "list_hh" rispettivamente, nel caso delle medie orarie, e "0" e "list_dd", nel caso di quelle giornaliere. La funzione è quindi in grado di creare la corretta serie temporale sia oraria, che giornaliera. Confronta infatti, riga per riga, le prime due colonne della lista di dati grezzi iniziale *data_list* e salva una volta sola le date e le rispettive ore, nel caso della lista delle ore *list_hh*, e le sole date, nel caso della lista dei giorni *list_dd*. I formati di date e orari in uscita sono i seguenti:

lista delle ore *list_hh*: dd/mm/yyyy hh:00:00

lista dei giorni *list_dd*: dd/mm/yyyy 00:00:00

La funzione, mentre vengono lette le diverse righe, è in grado di leggere e salvare tutte le note presenti all'interno della colonna 'Comment' dei dati iniziali (*data_list*) e riportarle, solo se non già presenti, nella riga di output di riferimento (oraria o giornaliera). In questo

modo, saranno raccolti all'interno di ogni riga oraria o giornaliera tutti gli errori individuati nei minuti di quell'intervallo specifico.

La seconda fase, tramite la funzione *data_mean(index_mean, list_out)*, permette di creare le medie orarie e giornaliere dei dati contenuti nelle colonne in *data_col*, definito nella FASE 0. Queste colonne sono quelle che contengono i dati numerici che devono essere mediati, non devono essere considerate infatti le colonne di Date, Time, D/N o Comment. La funzione opera per colonne, media quindi su tutte le ore o tutti i giorni un parametro alla volta. Per ogni parametro quindi, leggendo la lista *data_list* di dati grezzi iniziali, vengono acquisite le colonne di Date e Time di una riga in un unico formato datetime e vengono confrontate con le righe successive. Per effettuare la media oraria, fino a quando giorno, mese, anno e ora della prima data acquisita coincidono con le stesse voci delle righe successive, i valori in quelle righe del parametro considerato vengono aggiunte ad una lista di valori (*list_tomean*), sui quali verrà applicata successivamente la media. Nel caso di media giornaliera il processo è il medesimo, ma vengono considerati solo giorno, mese e anno, non più il valore orario. Mentre vengono salvati i valori da mediare nella lista *list_tomean* è possibile che siano presenti valori in formato *NoneType* derivanti dal processo di filtraggio manuale, per il quale sono stati annullati, o a causa degli errori automatici rilevati nella fase di diagnostica. In questi casi la cella con valore *NoneType* non verrà considerata per la determinazione della media.

Prima che vengano salvati i valori mediati, si verifica che la media sia stata effettuata su un numero sufficiente di dati, vale a dire almeno il 90% della copertura temporale oraria o giornaliera.

APM2

Come già sottolineato (§4.2.1), lo strumento ha una frequenza di acquisizione dei dati ogni 2 minuti, ma ogni ora circa effettua una misurazione aggiuntiva.

La copertura temporale completa oraria corrisponde quindi a 31 valori, mentre

FIDAS

Come già sottolineato (§4.2.2), lo strumento ha una frequenza di acquisizione dei dati di 1 minuto.

La copertura temporale completa oraria corrisponde quindi a 60 valori, mentre quella giornaliera 1440. Nel caso in cui venga riscontrata una percentuale di dati

5. Programma sviluppato per le analisi dati

quella giornaliera 744. Nel caso in cui venga riscontrata una percentuale di dati inferiore al 90% di 60 (per la media oraria) e di 1440 (per la media giornaliera), sarà riportato nella colonna ‘Comment’ l’errore *insufficient_temporal_coverage* e i parametri nella riga di riferimento verranno sostituiti da celle *NoneType*.

quella giornaliera 744. Nel caso in cui venga riscontrata una percentuale di dati inferiore al 90% di 31 (per la media oraria) e di 744 (per la media giornaliera), sarà riportato nella colonna ‘Comment’ l’errore *insufficient_temporal_coverage* e i parametri nella riga di riferimento verranno sostituiti da celle *NoneType*.

In ogni caso nella colonna ‘%_value’ viene riportata la percentuale di valori sui quali viene effettuata la media. Se non viene riscontrato un errore nella copertura temporale, si procede con il salvataggio del valore mediato nella cella di riferimento nelle liste output *list_hh* e *list_dd*.

Nella lista di output (*list_hh* e *list_dd*) l’errore *insufficient_temporal_coverage* sarà seguito dall’eventuale nota già presente nella serie di dati, in modo tale da poter comprendere quale è il motivo della mancanza dei valori. Infatti, l’errore di copertura temporale si può presentare a seguito di un’eliminazione dei dati dovuta al filtraggio manuale, come mostrato in *Tabella 5.7*, o a causa di altri errori riscontrati automaticamente dallo strumento e analizzati nella fase di diagnostica (*Tabella 5.8*).

Tabella 5.7. Esempio di errore legato al filtraggio manuale.

	A	B	C	D	L	M	N
1	Date	Time	D/N	Flush(mV)	Rel.Humidity(%)	%_value	Comment
80	17/01/2020	19:00:00	20138	912.65	59.44	100.00	
81	17/01/2020	20:00:00	20138	909.94	64.90	100.00	
82	17/01/2020	21:00:00	20138	909.61	74.73	100.00	
83	17/01/2020	22:00:00	20138	908.87	77.37	100.00	
84	17/01/2020	23:00:00	20138	907.26	79.88	100.00	
85	18/01/2020	00:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
86	18/01/2020	01:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
87	18/01/2020	02:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
88	18/01/2020	03:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
89	18/01/2020	04:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
90	18/01/2020	05:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
91	18/01/2020	06:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
92	18/01/2020	07:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
93	18/01/2020	08:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
94	18/01/2020	09:00:00	20138			0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X

5. Programma sviluppato per le analisi dati

Tabella 5.8. Esempio di errori riscontrati dallo strumento o rilevati nella fase di diagnostica.

	A	B	C	L	
1	Date	Time	PM1	%_value	Comment
635	27/01/2020	13:00:00		0.00	insufficient_temporal_coverage time_warp PM1_nan_value PM2.5_nan_value
636	27/01/2020	14:00:00		1.67	insufficient_temporal_coverage PM1_nan_value PM2.5_nan_value
637	01/02/2020	00:00:00	34.39	98.33	time_warp
638	01/02/2020	01:00:00	35.64	100.00	
639	01/02/2020	02:00:00	31.03	100.00	
640	01/02/2020	03:00:00	30.24	100.00	

Una volta eseguite le medie orarie e giornaliere viene riportato nel file output di testo un approfondimento degli errori dovuti all'insufficiente copertura temporale. Si hanno nello specifico due sezioni distinte, una per il foglio di riferimento orario e una per quello giornaliero.

```

-----
Hourly coverage errors (coverage <90%)

DATE          TIME          ERROR_TYPE
14/01/2020    13:00:00     insufficient_temporal_coverage 41.94 %
18/01/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
18/01/2020    01:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
18/01/2020    02:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
18/01/2020    03:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
18/01/2020    05:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
20/01/2020    22:00:00     insufficient_temporal_coverage 48.39 %
21/01/2020    09:00:00     insufficient_temporal_coverage 67.74 %
10/02/2020    08:00:00     insufficient_temporal_coverage 51.61 %
-----

Daily coverage errors (coverage <90%)

DATE          TIME          ERROR_TYPE
14/01/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 43.41 %
18/01/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
19/01/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
20/01/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 6.18 %
10/02/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 35.35 %
11/02/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
12/02/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %

```

5.1.1.3.4 Raddoppiamento minuti (solo APM2)

APM2 Come anticipato nel paragrafo precedente, la serie di dati dei minuti che viene riportata nel primo foglio del file output excel necessita una revisione durante la quale viene effettuata una copia dei dati presenti per passare da una frequenza ogni 2 minuti ad una ogni minuto. Durante questa fase, infatti, viene analizzata la lista dei dati grezzi iniziale *data_list* e per ogni riga *i*-esima, nel caso in cui la

riga successiva non sia ad un passo di 1 minuto, viene inserita una copia della riga i -esima tra quella successiva e la riga stessa. In questo caso verranno poi modificate le prime due colonne della riga inserita, in modo tale che si abbia la giusta sequenza temporale.

5.1.1.3.5 Stampa file output excel

In questa fase si ha un primo passaggio nel quale vengono eliminate le righe superflue della lista oraria e di quella giornaliera, prima di effettuare la stampa.

Successivamente, il programma stampa attraverso la funzione *print_list* i risultati ottenuti in formato *float* sul file output excel.

Il file output excel è composto di tre fogli distinti (*minute*, *hourly*, *daily*) nei quali sono riportati rispettivamente i dati relativi ai parametri dei dati grezzi iniziali con frequenza temporale del minuto, dell'ora e del giorno.

5.1.1.3.6 Chiusura file

Infine, vengono chiusi il file excel output e il file excel di testo, che saranno reperibili nella cartella *0_OUTPUT*, con i nomi e i formati descritti nei paragrafi precedenti.

In *Figura 5.2* si riporta il flow chart completo dei due programmi descritti in questo capitolo (Programma 0 - APM2 e Programma 0 - FIDAS).

5. Programma sviluppato per le analisi dati

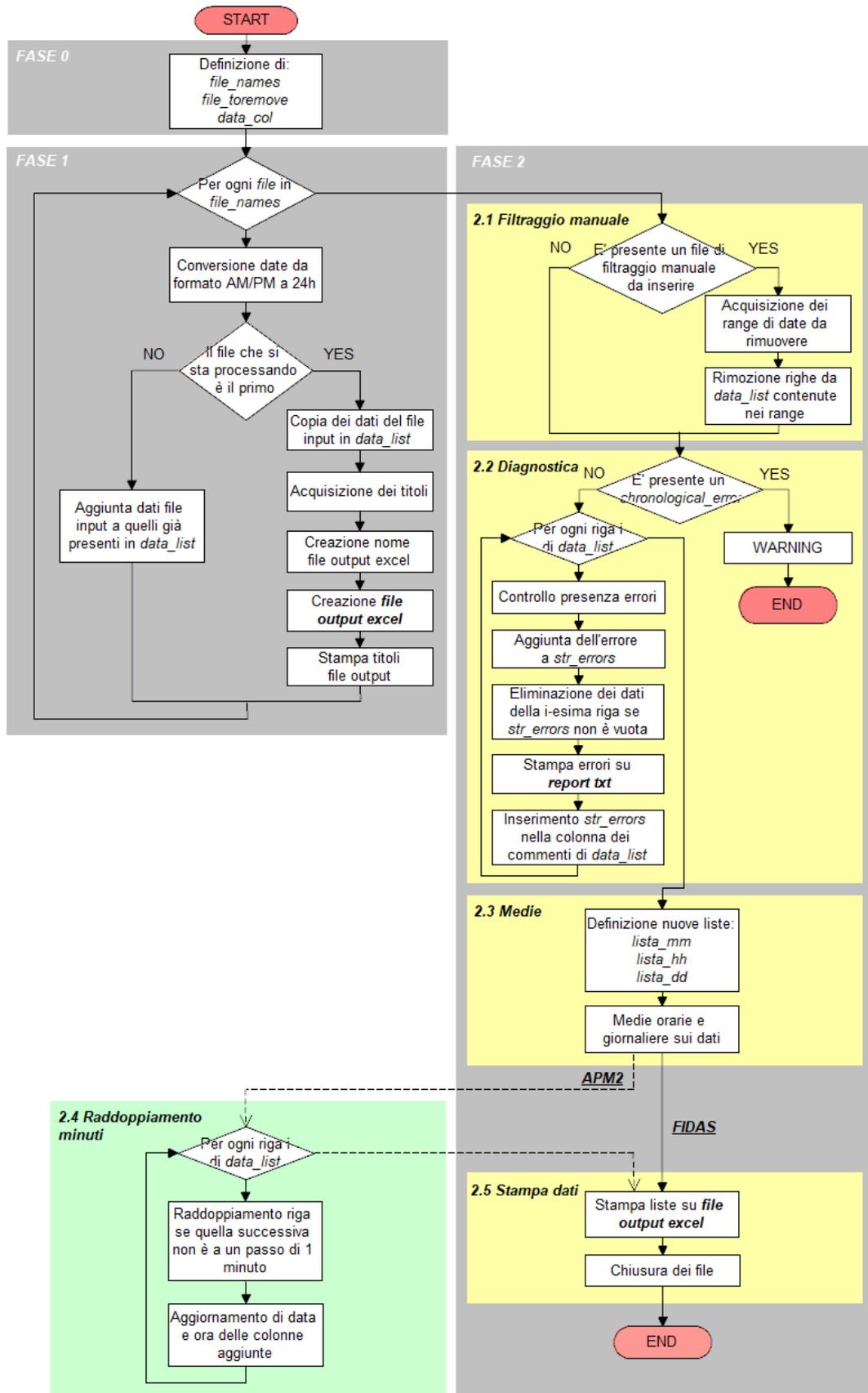


Figura 5.2. Flow chart Programma 0 – APM2 e FIDAS.

5.1.2 METEO

5.1.2.1 FASE 0: DEFINIZIONI

La prima parte del programma è destinata al settaggio dei parametri modificabili. È necessario, infatti, che l'operatore definisca in questa area le seguenti voci:

```
#FASE 0: DEFINIZIONI -----
data_col = [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9]
file_names = ['file_name.txt', 'file_name.txt']
file_toremove = 'file_name.xlsx'
#-----
```

- *file_names* = lista dei nomi dei file che si intende processare, da inserire con estensione (.txt)
- *file_toremove* = nome dell'eventuale file di filtraggio manuale. Nel caso in cui non si voglia eliminare nessun range di date, dovrà essere inserito 'no' come nome del file.
- *data_col* = lista delle colonne del file grezzo che devono essere mediate

I file che dovranno essere processati (riportati all'interno di *file_names*) sono composti nelle prime due colonne dai dati relativi alla data e all'ora della misurazione, mentre nelle colonne successive si hanno i parametri che lo strumento è in grado di misurare.

Il file di filtraggio manuale (*file_toremove*) è un file excel esterno che deve essere aggiornato dall'operatore. È pensato per escludere range di date e orari dalle operazioni successive, nel momento in cui venga riscontrato un errore o una condizione ambientale per cui si ritiene che le misurazioni fatte dallo strumento in quell'intervallo di tempo non siano attendibili. Questo file ha la seguente struttura (Tabella 5.9).

Tabella 5.9. Esempio di file di filtraggio manuale.

	A	B	C	D	E
1	Date_From	Time_From	Date_To	Time_To	Problem
2	18/01/2020	00.00.00	20/01/2020	22.30.00	Problem X
3	10/02/2020	08.30.00	15/02/2020	10.15.00	Problem Y
4	22/02/2020	20.30.00	23/02/2020	07.40.00	Problem Z
5					

Al suo interno si riportano, in ogni riga, i range di date che si desidera eliminare dalla serie di dati. In particolare, dovranno essere indicati la data (nella colonna A - *Date_From*) e l'ora (nella colonna B - *Time_From*) iniziali e la data (nella colonna C - *Date_To*) e l'ora (nella colonna D - *Time_To*) finali dell'intervallo temporale che si

intende rimuovere. Nella colonna *Problem* deve essere indicato il motivo di tale scelta. Le date all'interno di questi range non verranno considerate nelle operazioni successive.

5.1.2.2 FASE 1: ACQUISIZIONE DATI

In questa fase, è presente un primo ciclo nel quale, per ogni file da processare, viene acquisito il file completo, per mantenere in memoria una versione completa del file iniziale, e una seconda versione contenente solo le colonne di interesse. Questi dati vengono convertiti in liste, rispettivamente *list_complete* e *data_list* e verranno utilizzati per tutte le successive operazioni.

Non appena i dati vengono salvati all'interno delle liste, si ha una conversione del formato in cui è espressa la direzione del vento, da coordinate ad angoli in gradi.

All'interno del ciclo di acquisizione dei file da processare vengono effettuate le seguenti operazioni:

Se il file input che si sta processando è il primo di quelli inseriti nella *FASE 0*, il programma genera i titoli delle colonne e li salva nella lista *header*. Successivamente viene copiata nella lista *header1* e vengono effettuate delle modifiche. In particolare, *header* rappresenta la lista dei titoli del foglio delle ore, mentre *header1* del foglio dei giorni. In entrambe le liste viene aggiunta una colonna finale (*Comment*) per le note riguardanti gli eventuali errori presenti. In *header1* è inoltre presente una colonna (*%_value*) che servirà per inserire la percentuale di copertura temporale dei dati, vale a dire la percentuale di dati contenuti nel giorno di riferimento rispetto a una copertura giornaliera completa. Le liste risultano quindi come segue:

Tabella 5.10. Titoli delle liste orarie e giornaliere del file output.

<i>header</i>		<i>header1</i>	
Date	[mm/dd/yyyy]	Date	[mm/dd/yyyy]
Time	[hh:mm:ss]	Time	[hh:mm:ss]
Temp	[°C]	Temp	[°C]
RH	[%]	RH	[%]
Wind Speed	[m/s]	Wind Speed	[m/s]
Wind Dir	[-]	Wind Dir	[-]
Max Speed	[m/s]	Max Speed	[m/s]

Press	[hPa]	Press	[hPa]
Precip	[mm/h]	Precip	[mm/h]
Solar Rad	[W/m ²]	Solar Rad	[W/m ²]
Comment	[-]	%_value	[%]
		Comment	[-]

Viene inoltre creato il file output excel nella cartella 0_OUTPUT, rinominato in funzione del primo e dell'ultimo dato presenti all'interno del file iniziale. Il formato del nome del file output è:

dal_dd1_mm1_yyyy1_al_dd2_mm2_yyyy2_METEO.xlsx

dove *dd1 mm1* e *yyyy1* sono giorno, mese e anno della prima data, mentre *dd2 mm2* e *yyyy2* dell'ultima.

Vengono infine creati i 3 fogli di calcolo all'interno del file output excel (*minute*, *hourly*, *daily*) e stampati nella prima riga i titoli (*header* nel primo e nel secondo foglio e *header1* nel terzo). Il primo foglio in questo caso rimarrà vuoto, in quanto la stazione meteo effettua misurazioni con intervallo orario e non dei minuti. Il primo foglio viene comunque mantenuto per avere in uscita lo stesso formato per tutti gli strumenti. In questo modo, sarà possibile inserire i file in uscita dal Programma 0 in modo corretto all'interno del Programma 1 per l'elaborazione del database.

Invece, se il file input che si sta processando non è il primo di quelli inseriti nella FASE 0, il programma aggiunge i dati presenti nel file alle liste *list_complete* e *data_list* già esistenti.

5.1.2.3 FASE 2: ELABORAZIONE

Una volta concluso il ciclo e salvati quindi tutti i dati da processare nelle liste *list_complete* e *data_list*, viene creato il file output di testo nella cartella 0_OUTPUT, nel quale verrà riportato un report delle operazioni svolte e un dettaglio degli errori individuati durante il processo.

Il formato del nome del file output è:

METEO_errors_report.txt

5. Programma sviluppato per le analisi dati

Vengono immediatamente stampati sul file output di testo il titolo, i file di input che verranno processati e il nome del file output excel. Un esempio viene riportato di seguito:

```

***   METEO ERRORS REPORT   ***

Input file:
meteo_dal_2020_01_al_2020_02.txt

Output file:
dal_2020_01_01_al_20_03_01_METEO.xlsx
-----

```

5.1.2.3.1 Filtraggio manuale

Nel caso in cui nella FASE 0 non si sia indicato ‘no’ alla voce *file_toremove*, il programma salva i dati relativi al file indicato in una lista (*list_file_toremove*). Vengono inoltre salvate in una lista separata (*date_time_data_list*) le date e gli orari della lista completa di dati grezzi (*data_list*).

Successivamente, per ogni riga della lista *list_file_toremove*, cioè per ogni range di date indicate nel file di filtraggio manuale, viene generata una lista (*list_toremove*) di date/ore tra le due date indicate come inizio e fine dell’intervallo temporale per cui si è avuto un problema. All’interno dello stesso ciclo, viene individuato l’indice che le date da rimuovere (*list_toremove*) hanno all’interno della lista iniziale di dati (*data_list*), se sono presenti. In questo modo è possibile rendere vuote le colonne di dati contenute all’interno di questi range indesiderati e segnare l’errore o il problema per il quale è stata fatta questa scelta nella colonna ‘*Comment*’. Si riporta un esempio del risultato che si ottiene (Tabella 5.11).

Tabella 5.11. Esempio di rimozione di dati grazie al filtraggio manuale. Nella colonna ‘*Comment*’ viene riportato l’errore che ha provocato la scelta della rimozione del determinato intervallo di tempo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Date	Time	Temp	RH	Wind Speed	Wind Dir	Max Speed	Press	Precip	Solar Rad	Comment
406	17/01/2020	21:00:00	7.90	62.00	0.40	315.00	1.80	1010.20	0.20	0.00	
407	17/01/2020	22:00:00	7.30	67.00	0.40	247.50	2.70	1009.90	0.00	0.00	
408	17/01/2020	23:00:00	7.30	68.00	0.00	247.50	1.30	1009.80	0.00	0.00	
409	18/01/2020	00:00:00									Problem_X
410	18/01/2020	01:00:00									Problem_X
411	18/01/2020	02:00:00									Problem_X
412	18/01/2020	03:00:00									Problem_X
413	18/01/2020	04:00:00									Problem_X
414	18/01/2020	05:00:00									Problem_X
415	18/01/2020	06:00:00									Problem_X
416	18/01/2020	07:00:00									Problem_X

Una volta eseguito questo processo per tutti i range da rimuovere, viene stampato sul file output di testo se l'operazione di rimozione dei range di date da filtraggio manuale è stata eseguita e in riferimento a quale file.

```
-----  
Removing data ranges:  
Done with file "file_name.xlsx"  
-----
```

Nel caso in cui venga inserito 'no' nella *FASE 0* in *file_toremove*, verrà stampato il seguente messaggio:

```
-----  
Removing data ranges:  
Not done because no file inserted  
-----
```

5.1.2.3.2 Diagnostica

Successivamente i dati in input vengono sottoposti alla fase di DIAGNOSTICA.

In questa fase, vengono valutati gli errori che possono essere presenti nella serie di dati. La prima verifica che viene eseguita è l'ordine cronologico delle date/ore. Se viene individuata una riga la cui riga precedente non è antecedente in termini cronologici, ma è successiva, si registra la riga come *chronological_error*. Questa verifica viene effettuata su tutta la serie temporale di dati presente, prima di procedere con qualsiasi altro controllo. Nel caso in cui siano presenti uno o più *chronological_error* il programma viene interrotto e segnala l'errore sia nella console, che nel file output di testo *file_report*. In questo caso sarà necessario valutare i dati per individuare il motivo di tale errore e correggerli manualmente, prima di poter proseguire con le operazioni di media. Si riportano gli esempi di console e file output di testo rispettivamente.

```
|WARNING - chronological_error: 27/01/2020 08:02:00  
|WARNING - chronological_error: 11/02/2020 13:00:00
```

```
-----  
Error messages
```

DATE	TIME	ERROR_TYPE
27/01/2020	08:02:00	chronological_error
11/02/2020	13:00:00	chronological_error

```
-----
```

5. Programma sviluppato per le analisi dati

Nel caso in cui non sia presente un *chronological_error*, si valutano tutti i possibili errori che possono verificarsi. Questi verranno salvati all'interno della stringa *str_errors*, che sarà poi riportata nella colonna "Comment" del file output excel e nella sezione "Error messages" del file output di testo.

Viene inizialmente verificato che non siano presenti salti temporali, ovvero che ogni riga sia a un passo maggiore di 1 ora da quella precedente. In caso contrario viene aggiunto alla stringa di errore *str_errors* l'errore *time_warp* e viene segnalata sulla console.

Ogni volta che viene identificata una di queste anomalie, il rispettivo tag di errore viene aggiunto alla lista *str_errors*.

Se non è presente l'errore cronologico *chronological_error*, vengono sostituiti i valori NaN all'interno della serie di dati con celle in formato *NoneType*, per poter sfruttare in maniera corretta le funzioni successive. Questa condizione si può verificare soprattutto nella colonna "Wind Dir", nelle righe per le quali si ha una velocità del vento nulla e quindi non viene registrato nessun valore di direzione. In questo caso, infatti, si avranno celle vuote anche nel file output excel, ma non devono essere ricondotte a errori per la motivazione appena descritta. Come riportato in *Tabella 5.12*, si avrà infatti la cella in corrispondenza della colonna "Wind Dir" vuota, ma nessuna nota nella colonna dei commenti (*Comment*).

Tabella 5.12. Esempio del risultato della sostituzione dei valori NaN con NoneType.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
1	Date	Time	Temp	RH	Wind Speed	Wind Dir	Max Speed	Press	Precip	Solar Rad	Comment
181	08/01/2020	12:00:00	4.30	73.00	0.00		0.00	1019.00	0.00	198.00	
182	08/01/2020	13:00:00	6.60	67.00	0.00		0.00	1018.70	0.00	343.00	
183	08/01/2020	14:00:00	7.50	64.00	0.00	247.50	1.80	1018.60	0.00	280.00	
184	08/01/2020	15:00:00	9.00	59.00	0.40	270.00	2.70	1018.50	0.00	256.00	
185	08/01/2020	16:00:00	9.10	58.00	0.40	202.50	1.80	1018.30	0.00	147.00	
186	08/01/2020	17:00:00	8.20	60.00	0.00	202.50	1.30	1018.20	0.00	31.00	
187	08/01/2020	18:00:00	6.70	68.00	0.40	202.50	1.80	1018.50	0.00	0.00	

Non appena sono stati verificati tutti i parametri di controllo per ogni riga, vengono stampati sul file output di testo tutti gli errori riscontrati, se presenti. Se non si hanno errori, cioè se la stringa *str_errors* è vuota, viene stampato sul file output di testo il messaggio "No errors", come segue:

```
-----  
Error messages
```

```
DATE           TIME           ERROR_TYPE  
No errors  
-----
```

Nel file output di testo è inoltre presente una sezione (Time warp details), che fornisce dettagli in merito all'errore `time_warp`, cioè indica l'intervallo di tempo in cui si è verificato il salto temporale.

Un esempio di questa sezione è riportato di seguito.

```
-----  
Time warp details
```

```
from 27/01/2020 08:03:00 to 27/01/2020 13:59:00  
from 27/01/2020 14:03:00 to 01/02/2020 00:00:00  
from 11/02/2020 00:34:00 to 11/02/2020 10:18:00  
from 26/02/2020 13:07:00 to 26/02/2020 13:10:00  
-----
```

Anche in questo caso, nella condizione in cui non si abbiano errori, verrà stampato il messaggio "No errors" in questa sezione.

```
-----  
Time warp details
```

```
No Errors  
-----
```

5.1.2.3.3 *Medie giornaliere*

Una volta concluse le analisi degli errori presenti, si passa alla sezione in cui vengono effettuate le operazioni vere e proprie sui dati.

Si è proceduto definendo tre liste diverse, una per il passo dei minuti, una per quello delle ore e una per quello dei giorni, `list_mm`, `list_hh` e `list_dd`, rispettivamente.

Le medie giornaliere vengono eseguite in due step separati. In prima fase, infatti, vengono processati data e orario attraverso la funzione `date_time_mean(index_mean, list_out)`. Mentre, solo successivamente, vengono mediati i dati veri e propri con la funzione `data_mean(index_mean, list_out)`.

La prima fase attraverso *date_time_mean(index_mean, list_out)* permette di creare la serie temporale giornaliera. *Index_mean* e *list_out* saranno “0” e “list_dd” rispettivamente. La funzione confronta, riga per riga, le prime due colonne della lista di dati grezzi iniziale *data_list* e salva una volta sola le date presenti. I formati delle date in uscita sono i seguenti:

lista dei giorni list_dd: dd/mm/yyyy 00:00:00

La funzione, mentre vengono lette le diverse righe, è in grado di leggere e salvare tutte le note presenti all’interno della colonna ‘Comment’ dei dati iniziali (*data_list*) e riportarle, solo se non già presenti, nella riga di output di riferimento giornaliera. In questo modo, saranno raccolti all’interno di ogni riga tutti gli errori individuati nei minuti di quell’intervallo specifico.

La seconda fase, tramite la funzione *data_mean(index_mean, list_out)*, permette di creare le medie giornaliere dei dati contenuti nelle colonne in *data_col*, definito nella FASE 0. Queste colonne sono quelle che contengono i dati numerici che devono essere mediati, non devono essere considerate infatti le colonne di Date, Time o Comment. La funzione opera per colonne, media quindi su tutti i giorni un parametro alla volta. Per ogni parametro quindi, leggendo la lista *data_list* di dati grezzi iniziali, vengono acquisite le colonne di Date e Time di una riga in un unico formato *DateTime* e vengono confrontate con le righe successive. Per effettuare la media giornaliera, fino a quando giorno, mese, anno della prima data acquisita coincidono con le stesse voci delle righe successive, i valori in quelle righe del parametro considerato vengono aggiunte ad una lista di valori (*list_tomean*), sui quali verrà applicata successivamente la media. Mentre vengono salvati i valori da mediare nella lista *list_tomean* è possibile che siano presenti valori in formato *NoneType* derivanti dal processo di filtraggio manuale, per il quale sono stati annullati, o a causa degli errori automatici rilevati nella fase di diagnostica. In questi casi la cella con valore *NoneType* non verrà considerata per la determinazione della media.

Prima che vengano salvati i valori mediati, si verifica che la media sia stata effettuata su un numero sufficiente di dati, vale a dire almeno il 90% della copertura temporale giornaliera. In questo caso, lo strumento ha una frequenza di acquisizione dei dati di 1 ora. La copertura temporale completa giornaliera corrisponde quindi a 24 valori. Nel caso in cui venga riscontrata una percentuale di dati inferiore al 90% di 24, sarà riportato nella

5. Programma sviluppato per le analisi dati

colonna ‘Comment’ l’errore *insufficient_temporal_coverage* e i parametri nella riga di riferimento verranno sostituiti da celle *NoneType*. In ogni caso nella colonna ‘%_value’ viene riportata la percentuale di valori sui quali viene effettuata la media. Se non viene riscontrato un errore nella copertura temporale, si procede con il salvataggio del valore mediato nella cella di riferimento nella lista output *list_dd*.

Nella lista di output (*list_dd*) l’errore *insufficient_temporal_coverage* sarà seguito dall’eventuale nota già presente nella serie di dati, in modo tale da poter comprendere quale è il motivo della mancanza dei valori, come ad esempio a seguito di un’eliminazione dei dati dovuta al filtraggio manuale, come mostrato in *Tabella 5.13*.

Tabella 5.13. Esempio di errore legato al filtraggio manuale.

	A	B	C	D	E	J	K	L
1	Date	Time	Temp	RH	Wind Speed	Solar Rad	%_value	Comment
16	15/01/2020	00:00:00	4.63	62.71	0.25	60.00	100.00	
17	16/01/2020	00:00:00	5.40	60.42	0.24	75.83	100.00	
18	17/01/2020	00:00:00	5.81	59.79	0.36	60.00	100.00	
19	18/01/2020	00:00:00					0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
20	19/01/2020	00:00:00					0.00	insufficient_temporal_coverage Problem_X
21	20/01/2020	00:00:00					4.17	insufficient_temporal_coverage Problem_X
22	21/01/2020	00:00:00	3.79	52.21	0.24	46.29	100.00	
23	22/01/2020	00:00:00	4.63	56.67	0.36	73.42	100.00	

Una volta eseguite le medie giornaliere viene riportato nel file output di testo un approfondimento degli errori dovuti all’insufficiente copertura temporale.

```
-----
Daily coverage errors (coverage <90%)

DATE          TIME          ERROR_TYPE
18/01/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
19/01/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
20/01/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 4.17 %
10/02/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 37.50 %
11/02/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
12/02/2020    00:00:00     insufficient_temporal_coverage 0.00 %
```

5.1.2.3.4 Stampa file output excel

In questa fase si ha un primo passaggio nel quale vengono eliminate le righe superflue della lista giornaliera, prima di effettuare la stampa.

Successivamente, il programma stampa attraverso la funzione *print_list* i risultati ottenuti in formato *float* sul file output excel.

Il file output excel è composto da tre fogli distinti (*minute*, *hourly*, *daily*), come per FIDAS e APM2. In questo caso però, come precedentemente annunciato, il primo foglio sarà vuoto, in quanto la stazione meteo non riporta i parametri misurati con passo dei minuti, ma delle ore. I dati grezzi iniziali nel caso del METEO, infatti, vengono riportati nel secondo foglio, quello con passo temporale orario. I parametri riferiti al passo giornaliero sono invece stampati nel terzo foglio.

5.1.2.3.5 Chiusura file

Infine, vengono chiusi il file excel output e il file excel di testo, che saranno reperibili nella cartella 0_OUTPUT, con i nomi e i formati descritti nei paragrafi precedenti.

5.2 PROGRAMMA 1

Il Programma 1 è stato sviluppato con lo scopo di inserire tutti i dati precedentemente elaborati all'interno di un database annuale. Può essere impiegato, infatti, contemporaneamente per tutti e tre gli strumenti trattati nei Programma 0. I dati di input saranno i file output excel del Programma 0, mentre come output viene prodotto un database annuale con i valori dei parametri processati, con la stessa struttura dei Programma 0, quindi sarà composto da tre fogli, uno con passo di 1 minuti, uno orario e uno giornaliero. Nel caso in cui invece un database sia già presente, i dati inseriti verranno semplicemente aggiunti a quelli già esistenti. In entrambi i casi nel database si hanno in ordine i valori dell'APM2, del FIDAS e infine del METEO.

5.2.1 FASE 0: DEFINIZIONI

La prima fase è destinata alla definizione dei parametri modificabili. È necessario, infatti, che l'operatore definisca in questa area le seguenti voci:

```
#FASE 0: DEFINIZIONI -----  
file_names = ['file_name.xlsx', 'file_name.xlsx']  
existing_database = ''  
year = '2020'  
#-----
```

- *file_names* = lista dei nomi dei file che si intende processare, da inserire con estensione (.xlsx).

Il numero di file che si vogliono inserire all'interno del programma è arbitrario. Non è necessario processare un file per ogni strumento (APM2, FIDAS o METEO), ma possono essere inseriti anche più file che si riferiscono a periodi diversi di un singolo strumento.

- *existing_database* = nome dell'eventuale database già presente.

Nel caso in cui il database sia nuovo, quindi non siano presenti valori a cui devono essere aggiunti quelli di input, dovrà essere indicata una stringa vuota (') in questa voce (come riportato sopra). Se invece i dati che si vogliono processare devono essere inseriti all'interno di un database già esistente, dovrà essere indicato qui il nome di tale file, con estensione (.xlsx).

- *year* = stringa del valore dell'anno di cui si vuole creare il database.

Questa voce dovrà essere riempita solo nel caso in cui il database sia nuovo e quindi *existing_database* sia una stringa vuota.

5.2.2 FASE 1: ACQUISIZIONE DATI ED ELABORAZIONE

La parte più corposa di questo programma si compone di un ciclo che viene effettuato per tutti i file presenti nella lista *file_names*.

Vengono salvati i dati contenuti all'interno del file nella lista *data_list*. In questo caso sarà quindi una lista composta da tre liste (la prima per i minuti, la seconda per le ore e la terza per i giorni).

Il file in uscita dal Programma 0, come spiegato nei capitoli precedenti, vengono salvati con il formato: *dal_dd1_mm1_yyyy1_al_dd2_mm2_yyyy2_instrument.xlsx*, dove *instrument* può assumere i valori APM2, FIDAS o METEO, a seconda dello strumento analizzato. A seconda quindi del valore di *instrument*, vengono salvati 3 valori all'interno

della lista *step*, che serviranno a individuare le colonne per la stampa dei valori nel database.

Successivamente, si hanno due vie diverse, a seconda della tipologia di database e del file input che si sta analizzando. La prima viene intrapresa nel caso in cui la variabile *existing_database* sia una stringa vuota e il file processato il primo della lista *file_names*. La seconda, invece, negli altri casi, cioè se si ha un database esistente, e quindi *existing_database* riporta il nome di tale file, oppure se il file che si sta analizzando in quello specifico ciclo non è il primo della lista *file_names*. Queste due sezioni diverse vengono descritte in maniera più approfondita nelle seguenti sezioni.

5.2.2.1 Condizione di database nuovo

Nella condizione in cui la variabile *existing_database* sia una stringa vuota e il file processato il primo della lista *file_names* è necessario creare le serie temporali di date che saranno presenti all'interno del database. Infatti, in questo caso, a seconda del valore inserito all'interno della stringa *year* verranno create le liste col passo dei minuti, delle ore e dei giorni e salvate all'interno di una lista complessiva *date_time_list*, che le conterrà tutte.

In particolare, la serie temporale dei minuti avrà i seguenti estremi:

01/01/*year* 00:00:00 31/12/*year* 23:59:00

Vengono quindi stampate le liste di serie temporali nei rispettivi fogli.

In questa sezione vengono anche creati il nome del database e stampati i titoli nei diversi fogli del file output. Il formato del nome del file database avrà il seguente formato:

*DATABASE**dal_dd1mm1yyyy1_al_dd2mm2yyyy2.xlsx*

dove *dd1 mm1* e *yyyy1* sono giorno, mese e anno della prima data, mentre *dd2 mm2* e *yyyy2* dell'ultima contenute all'interno del database.

5.2.2.2 Condizione di database esistente

La seconda condizione non comporta una creazione di liste di date per il database, perché già esistenti. Si può verificare in due occasioni:

- A) Il file che si sta processando nel ciclo non è il primo di quelli inseriti nella lista *file_names*. Una volta creata la lista di date del database per il primo file, non sarà necessario crearla nuovamente per quelli successivi.
- B) La stringa *existing_database* non è vuota, ma riporta il nome del database in cui si vogliono inserire i dati. In questo caso, le seguenti operazioni verranno effettuate anche sul primo file della lista *file_names*, in quanto la lista di date del database sarà già presente e non dovrà essere creata.

In queste due occasioni verranno, infatti, acquisite le liste di date *date_time_list* già esistenti. In particolare, nel caso A) saranno quelle riportate all'interno del file creato durante il processo riguardante il primo file della lista *file_names*, mentre nel caso B) saranno quelle del file riportato nella variabile *existing_database*, inserita nella FASE 0.

5.2.2.3 Collocazione dati nel database

Una volta acquisite le liste di date all'interno della lista *date_time_list*, che sarà quindi composta a sua volta da 3 liste (minuti, ore, giorni), si passa all'analisi del file di input per la sua corretta collocazione all'interno del database.

Per ogni riga presente nel file in ingresso, viene identificato l'indice che la data/ora di quella riga ha all'interno delle liste complete di date, minuti, ore e giorni (cioè le tre liste della lista *date_time_list*). Si stampa quindi in tutti i tre fogli del database tutta la riga presente nel file in ingresso alla posizione dettata dall'indice appena individuato. Quest'indice permette di individuare la riga alla quale devono essere stampati i valori nel database, mentre per la colonna si farà riferimento al valore presente all'interno della lista *step*, individuata precedentemente in funzione dello strumento di cui stiamo stampando i dati.

Nella fase conclusiva di questo programma vengono quindi chiusi i file e salvato il database nella cartella 1_OUTPUT.

5.3 Programma 2

Il Programma 2 è stato sviluppato con lo scopo di permettere l'elaborazione di grafici, che agevolassero i confronti e le valutazioni dei dati ottenuti. I dati di input sono i file di database ottenuti attraverso il Programma 1, mentre come output vengono ottenuti i plot dei grafici richiesti. Come file di database, nello specifico del capitolo 6 - *Elaborazione dati e casi studio*, sono stati utilizzati sia quello del CC-Green-Roof che quelli relativi alle campagne di misura suburbane e rurali.

5.3.1 FASE 0: DEFINIZIONI

La prima fase è destinata alla definizione del file del quale si desidera ottenere elaborazioni grafiche. È necessario, infatti, che l'operatore definisca in questa area le seguenti voci:

```
#FASE 0: DEFINIZIONI -----
file = 'file_name.xlsx'
sheetname = 'sheet_name'
#-----
```

- *file* = nome del file che si intende processare, da inserire con estensione (.xlsx). Può essere inserito anche il percorso del file, come suggerito di seguito:

```
file = r'C:\Users\UserA\Desktop\Cartela\file_name.xlsx'
```

- *sheetname* = nome del foglio di lavoro del *file* che si intende utilizzare. Nel caso in cui si vogliano utilizzare tutti sarà necessario inserire in questa voce la variabile *None*.

5.3.2 FASE 1: ACQUISIZIONE DATI

Durante la fase di acquisizione dati viene salvato in un DataFrame il contenuto del file excel del database, inserito nella voce *file* nel paragrafo precedente. Si salvano poi successivamente i fogli di lavoro in due DataFrame diversi, *df_hh* e *df_dd*, per le ore e i giorni rispettivamente. Questa azione non viene riportata nel programma per i fogli

relativi ai minuti, in quanto non sono stati sfruttati per ottenere grafici visto l'elevato numero di dati che rendono i risultati non apprezzabili. Comunque, nel caso in cui si volessero utilizzare è possibile farlo, eseguendo gli stessi passaggi riportati sotto per gli altri due fogli di lavoro.

```
#FASE 1: ACQUISIZIONE DATI -----  
df = pd.read_excel(file, sheet_name=sheetname)  
df_hh=df['Hourly']  
df_dd=df['Daily']  
datetime_hh=pd.to_datetime(df_hh[df_hh.columns[0]]).dt.strftime('%d-%m-%Y  
h%H')  
datetime_dd=pd.to_datetime(df_dd[df_hh.columns[0]]).dt.strftime('%d-%m-%Y  
h%H')  
#-----
```

Successivamente sono state raccolte le voci relative a date e orari dei fogli orari e giornalieri in due serie di dati, *datetime_hh* e *datetime_dd*, rispettivamente, in modo tale da poterli sfruttare con più facilità e convertirli nel formato desiderato per la stampa.

5.3.3 FASE 2: ELABORAZIONE DATI

Questa seconda fase del Programma 2 varia a seconda del grafico desiderato e dei confronti che si intende effettuare. Nello specifico, nel capitolo 6 - *Elaborazione dati e casi studio*, il programma ha permesso di ottenere gli andamenti orari e giornalieri delle concentrazioni di PM2.5 e PM10, con gli eventuali confronti dell'intensità di pioggia e della velocità del vento. Sono stati analizzati, inoltre, i delta di concentrazione tra le stazioni urbana e suburbane/rurali. Grazie al programma, è stato possibile anche effettuare analisi delle concentrazioni in funzione dei singoli giorni della settimana e/o dell'andamento giornaliero dei diversi giorni.

6 Elaborazione dati e casi studio

Come già anticipato, il presente lavoro di tesi si inserisce all'interno del contesto del progetto del modulo AQ del CC-Moving-Lab condotto dal gruppo di ricerca di Sicurezza Ambientale del DIATI del Politecnico di Torino. Lo scopo principale di questo elaborato è quello di effettuare un'analisi spaziale della qualità dell'aria, mettendo a confronto diversi strumenti nei contesti urbano, suburbano e rurale, sfruttando il programma elaborato nel capitolo 5 - *Programma sviluppato per le analisi dati*. In questo modo, non essendo ancora ultimato il secondo elemento del CC-Moving-Lab, è possibile effettuare un'analisi preliminare per poter comprendere quali saranno le sue potenzialità e i suoi vantaggi in termini di flessibilità, soprattutto per le misure in luoghi dove non sono già presenti stazioni fisse. In particolare, nella prima parte di questo capitolo si analizzano i dati raccolti in ogni singola campagna effettuata da aprile 2019 ad oggi attraverso l'APM2 (§4.2.1). Mentre nella seconda sono riportati confronti tra tutte le diverse campagne intraprese. Nelle considerazioni che verranno fatte, è importante ricordare che le campagne di misura hanno avuto durata differente, sono state effettuate in periodi dell'anno diversi e, quindi, la serie di dati relativa ad ogni stazione è caratterizzata da potenziali condizioni al contorno diverse, sia in termini meteorologici che di stabilità atmosferica.

Questo studio si struttura secondo le campagne riportate in *Tabella 6.2* e rappresenta un'evoluzione delle analisi e delle elaborazioni fatte nella Tesi di Dottorato dell'Ing. Matteo Bo [11], nella quale è stata trattata la SRISCIATA SUBURBANA ESTIVA.

6. Elaborazione dati e casi studio

Le campagne esterne effettuate si sono basate sull'utilizzo di due diversi APM2 (§4.2.1), dei quali in *Tabella 6.2* sono riportati i numeri seriali per ogni periodo di utilizzo.

Tabella 6.1. Dettagli CC-Green-Roof Politecnico di Torino.

Campagna	Strumenti	Posizione	Quota m s.l.m.	Coordinate
CC-Green-Roof	APM2A/APM2B/FIDAS	Politecnico di Torino	272	45.063577, 7.660141

Tabella 6.2. Dettagli campagne suburbane e rurali.

Campagna	Periodo		Strumento	Posizione	Quota m s.l.m.	Coordinate
INCENDI	03/04/2019	05/04/2019	APM2B - 20103	Cantalupa	454	44.940285, 7.332634
	05/04/2019	11/04/2019	APM2B - 20103	Frossasco 1	374	44.933521, 7.350967
	11/04/2019	13/05/2019	APM2B - 20103	Frossasco 2	318	44.922775, 7.374560
STRISCIATA SUBURBANA ESTIVA	03/06/2019	27/06/2019	APM2B - 20103	Volpiano	219	45.190025, 7.771652
	19/07/2019	03/09/2019	APM2B - 20103	Mazzè	255	45.289311, 7.940933
	04/09/2019	19/09/2019	APM2B - 20103	Montanaro	207	45.228619, 7.850982
STRISCIATA SUBURBANA INVERNALE	16/01/2020	28/03/2020	APM2A - 20075	Montanaro	207	45.228619, 7.850983
SAN GIORIO	06/05/2020	20/07/2020	APM2A - 20075	San Giorio di Susa	475	45.124620, 7.178423
SALBERTRAND	25/09/2020	02/11/2020	APM2B - 20103	Salbertrand	1006	45.070964, 6.887413

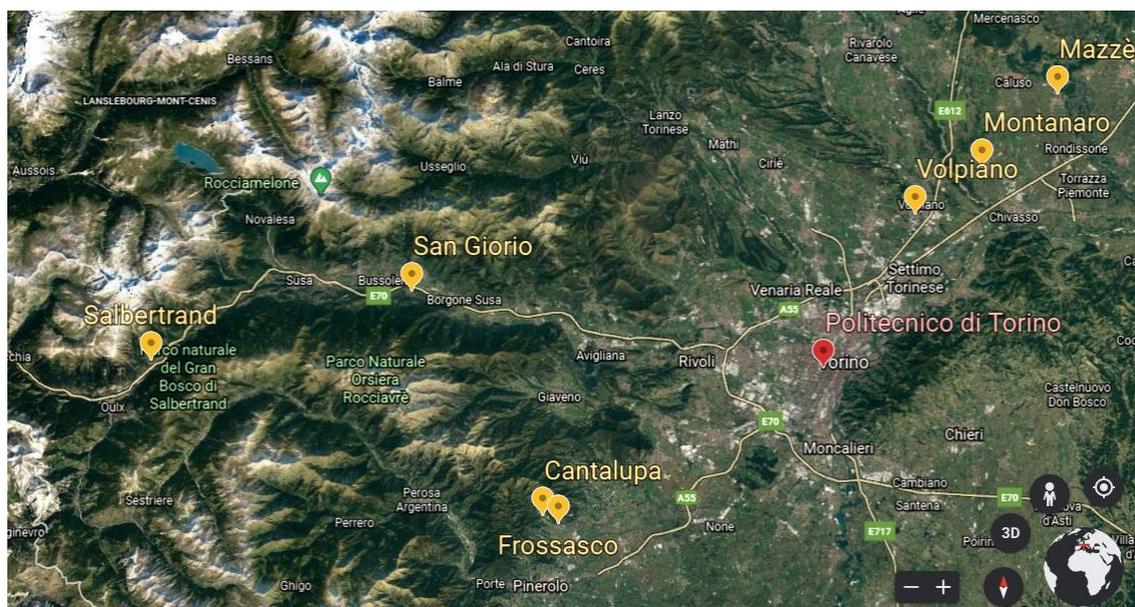


Figura 6.1. Inquadramento CC-Green-Roof Politecnico di Torino e campagne esterne (fonte: Google Earth).

6. Elaborazione dati e casi studio

Nel presente capitolo si riportano i risultati ottenuti confrontando i parametri registrati nel CC-Green-Roof del Politecnico di Torino (*Tabella 6.1*), quindi nel contesto urbano, con quelli delle campagne esterne riportate in *Tabella 6.2*, quindi in contesti suburbani e rurali. Si sottolinea il fatto che i dati riportati di precipitazione e velocità del vento sono solo quelli registrati dalla stazione meteo del CC-Green-Roof. L'utilizzo del modulo AQ permetterà, invece, il monitoraggio, tra le altre cose, delle condizioni meteorologiche locali del luogo scelto per la campagna di misure.

Per una maggiore chiarezza sugli strumenti utilizzati con i relativi periodi di riferimento si rimanda alla *Figura 6.2*, nella quale è schematizzata una linea temporale degli strumenti presenti nel CC-Green-Roof del Politecnico di Torino e di quelli nelle campagne esterne.

	CC-Green-Roof Politecnico		Campagne esterne	
18/09/2018	APM2A - 20075	METEO		
20/12/2018				
16/01/2019			FIDAS (demo)	
22/02/2019				
03/04/2019				APM2B - 20103 Cantalupa
05/04/2019				APM2B - 20103 Frossasco 1
11/04/2019				APM2B - 20103 Frossasco 2
11/04/2019				APM2B - 20103 Volpiano
13/05/2019				APM2B - 20103 Mazze
03/06/2019				APM2B - 20103 Montanaro
27/06/2019				
19/07/2019				
03/09/2019				
04/09/2019				
10/12/2019				
14/01/2020	APM2C			
14/01/2020	APM2B - 20103	FIDAS	APM2A - 20075 Montanaro	
21/01/2020				
21/01/2020				
16/01/2020				
28/03/2020			APM2A - 20075 San Giorio	
06/05/2020				
17/07/2020	(APM2B mandato in riparazione)		APM2A - 20075 Alessandria (indoor)	
17/07/2020				
20/07/2020				
21/07/2020				
22/07/2020				
23/07/2020				
23/07/2020	APM2A - 20075		APM2B - 20103 Salbertrand	
25/09/2020				
02/11/2020				
ora				

Figura 6.2. Linea temporale degli strumenti utilizzati nel CC-Green-Roof del Politecnico di Torino e nelle campagne esterne.

6.1 Campagna di Cantalupa e Frossasco

Questa campagna di misure fa riferimento ad un'area rurale, sottoposta a particolari condizioni che si instaurano a seguito di un evento specifico, vale a dire un incendio. È stata condotta dal gruppo di ricerca di Sicurezza Ambientale del DIATI del Politecnico di Torino dal 05/04/2019 al 13/05/2019 presso i comuni di Frossasco (TO) e Cantalupa (TO). L'implementazione di questo monitoraggio deriva dalla richiesta dei suddetti comuni di verificare l'eventuale peggioramento della qualità dell'aria a seguito dell'incendio avvenuto presso l'azienda Kastamonu (ex Annovati) l'08/03/2019 e dichiarato estinto il 09/04/2019. In *Figura 6.3* sono riportate le posizioni delle diverse campagne di misura effettuate rispetto al luogo in cui è divampato l'incendio. Sono state monitorate, quindi, le concentrazioni di particolato aerodisperso PM_{2.5} e PM₁₀ attraverso l'analizzatore APM2 (§4.2.1). In particolare, per tutta la campagna analizzata in questo paragrafo, è stato utilizzato l'analizzatore APM2A (numero di serie 20075) presso il CC-Green-Roof del Politecnico di Torino, mentre l'APM2B (numero di serie 20103) ha monitorato i parametri di qualità dell'aria della zona rurale.

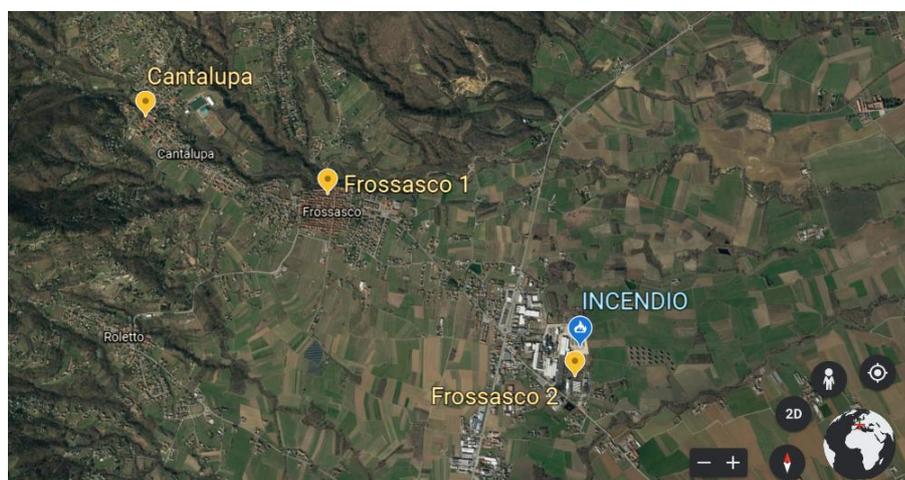


Figura 6.3. Inquadramento campagne di misura rispetto alla zona in cui è divampato l'incendio (fonte: Google Earth).

La prima campagna di misure è quella di Cantalupa. L'APM2 in questo caso è stato posizionato presso un terrazzo dell'edificio del Comune di Cantalupa, lontano da specifiche sorgenti inquinanti dirette, isolato e non accessibile ad altre persone. Si riportano di seguito i risultati ottenuti attraverso il programma sviluppato.

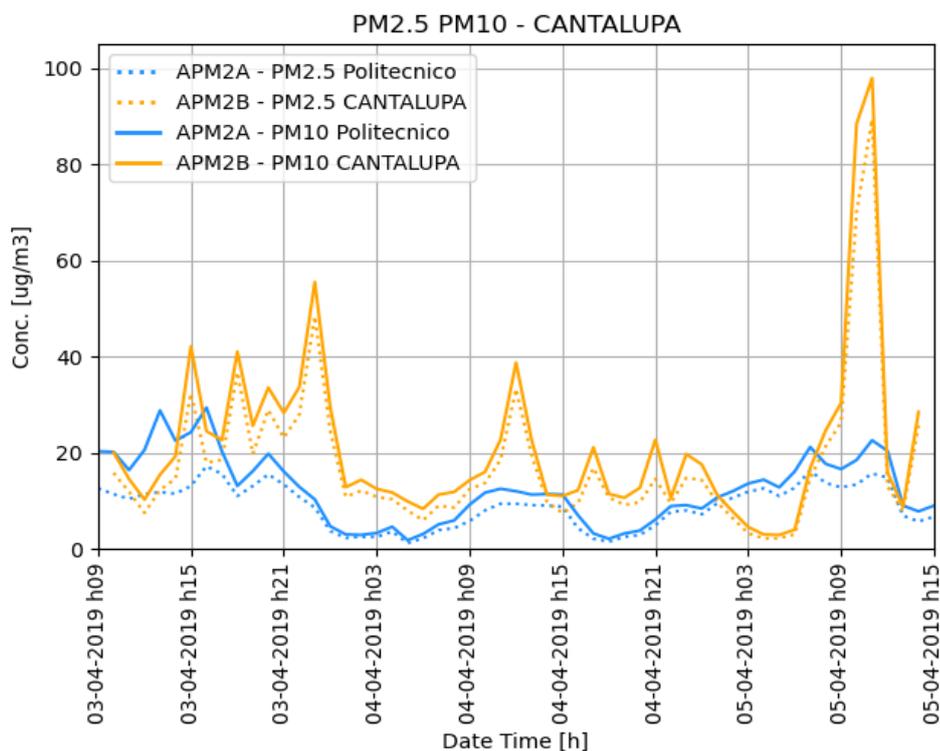


Figura 6.4. Andamento delle medie orarie di PM2.5 e PM10, confronto tra la stazione urbana del CC-Green-Roof del Politecnico e la stazione rurale di Cantalupa.

L'APM2 restituisce una misura ogni due minuti, ma per poter apprezzare in maniera migliore l'andamento delle concentrazioni, si riporta in *Figura 6.4* il trend delle medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 nelle due stazioni. Si osserva come, nonostante Cantalupa sia una stazione in area rurale registra concentrazioni più elevate del Politecnico in area urbana. L'incendio presente a Frossasco contribuisce sicuramente a questo aumento delle concentrazioni e le diverse oscillazioni durante il giorno possono essere legate alle attività antropiche e alle variazioni classiche dell'altezza di miscelazione durante la giornata. Il picco del 05/04/2019 rilevato tra le 10 e le 14 è stato confermato da testimonianze locali di presenza di fumi. In questo caso la brezza di valle caratteristica del mattino può aver contribuito al trasporto delle particelle aerodisperse dal sito in cui è divampato l'incendio verso la stazione in esame, che si trova a quote più elevate (*Tabella 6.2* e *Figura 6.3*).

Successivamente l'APM2 è stato trasferito nel Comune di Frossasco. In questo caso la campagna è stata divisa in due fasi: una prima (Frossasco 1) ha visto l'impiego dello strumento presso un balcone della sede del Comune di Frossasco, mentre la seconda

(Frossasco 2) è stata realizzata nel cortile dell'azienda DV Rubber s.a.s., in posizione più ravvicinata rispetto alla zona dell'incendio.

Siccome questa campagna ricopre un periodo temporale più esteso rispetto a Cantalupa, in *Figura 6.5* si riporta l'andamento delle medie giornaliere, invece di quelle orarie. Sono presenti, inoltre, nel grafico i fenomeni di precipitazione registrati dalla stazione meteo del CC-Green-Roof. Si osserva come ad ogni fenomeno di pioggia sia associata una diminuzione nelle concentrazioni di particolato atmosferico.

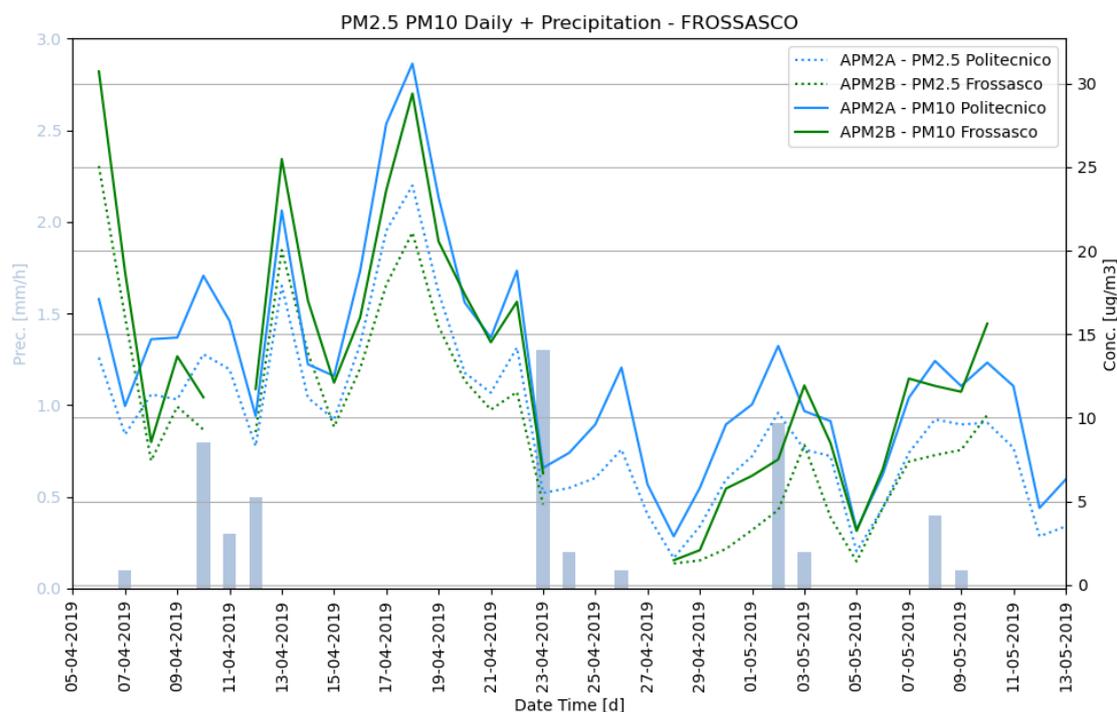


Figura 6.5. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra la stazione urbana del CC-Green-Roof del Politecnico e la stazione rurale di Frossasco con precipitazioni.

Grazie al metodo di acquisizione delle misure dell'APM2, che restituisce un valore ogni 2 minuti, è stato possibile approfondire l'andamento delle concentrazioni nelle diverse ore della giornata. In particolare, essendo la campagna di Frossasco sufficientemente lunga, si sono rappresentate le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 mediate su ogni giorno della settimana. L'andamento riportato in *Figura 6.6* mostra le oscillazioni tipiche di una zona urbana come quella del Politecnico durante la giornata. La stabilità atmosferica e le emissioni, infatti, contribuiscono al picco che si registra nella mattina, che tende, invece, a diminuire nel pomeriggio, quando l'altezza di miscelazione

raggiunge il suo massimo. L'andamento delle concentrazioni a Frossasco non presenta un trend dominante come la stazione nell'area urbana, se non il picco che si registra il sabato. Questo è dovuto ad alcune misurazioni effettuate durante la campagna Frossasco 1, che hanno riportato concentrazioni di PM superiori a 100-130 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Grafico in APPENDICE I). Questi valori registrati verso le ore 10, come per la campagna di Cantalupa, a distanza di un giorno possono essere ricondotti al medesimo fenomeno. La brezza di valle caratteristica della zona può aver contribuito al trasporto delle particelle aerodisperse dal sito in cui è divampato l'incendio incendio verso la stazione in esame, che si trova a quote più elevate.

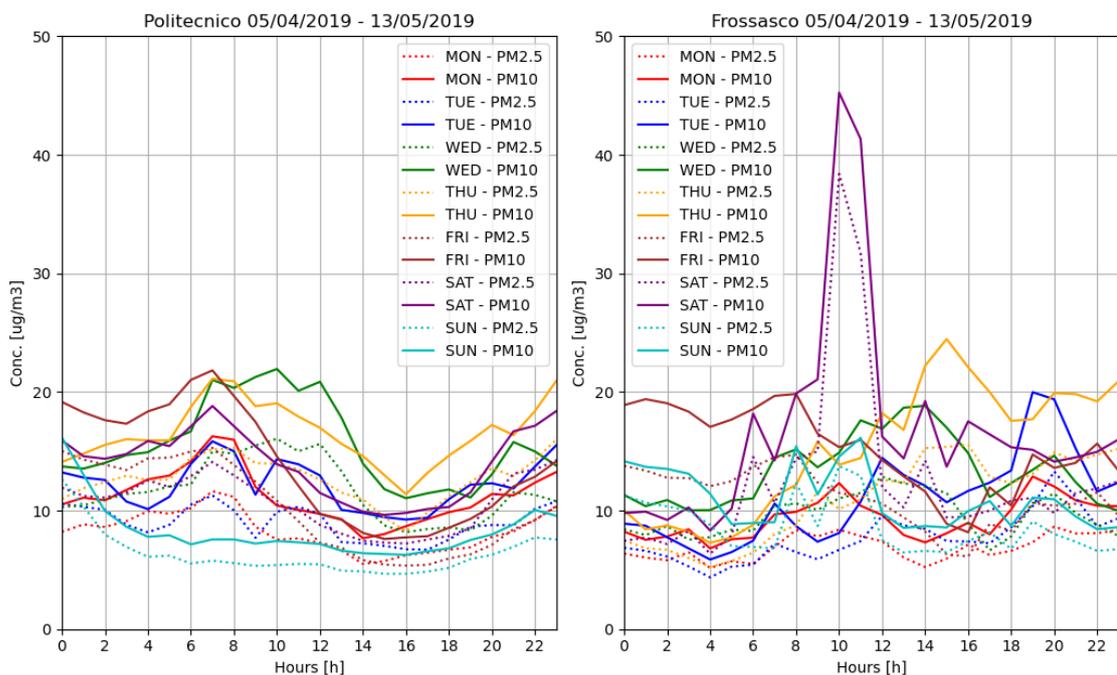


Figura 6.6. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 mediate sulle diverse ore e i diversi giorni della settimana, confronto tra la stazione urbana del CC-Green-Roof del Politecnico e la stazione rurale di Frossasco.

Analizzando solo la campagna Frossasco 2, il picco non è presente e la giornata di sabato ha un andamento assimilabile agli altri giorni della settimana in questa stazione. Il grafico in riferimento alla sola campagna Frossasco 2 è riportato in APPENDICE I.

A seguito delle campagne condotte, studi precedenti [58] a questo lavoro di tesi hanno riscontrato un problema durante le misure nella stazione Frossasco 2. Tra il 23/04/2019 e il 27/04/2019 l'APM2 ha registrato valori del voltaggio del fotometro (Flush) superiori a 4000 mV e quindi fuori dal range di funzionamento indicato dalla casa produttrice,

probabilmente legati a un'anomalia elettrica. Lo strumento potrebbe aver risentito di questo evento, in quanto il Flush, parametro strettamente legato all'invecchiamento dello strumento, registrato dopo l'anomalia aveva valori superiori a quelli misurati in precedenza. Questo fenomeno di picco si presenta nuovamente l'11/05/2019, anche se con minore intensità (1900 mV). Per i motivi appena descritti, sono stati invalidati i dati registrati durante i periodi di tempo (23/04-27/04 e 11/05) in cui lo strumento non funzionava correttamente. Questo spiega i salti temporali relativi alla stazione di Frossasco presenti in *Figura 6.5*.

Successivamente sono state effettuate le differenze tra le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 del CC-Green-Roof del Politecnico e quelle delle stazioni rurali (*Figura 6.7*). Lo stesso è stato riportato in APPENDICE I in riferimento alle medie giornaliere, solo per le stazioni Frossasco 1 e Frossasco 2, in quanto l'intervallo temporale ristretto di Cantalupa non lo permetteva.

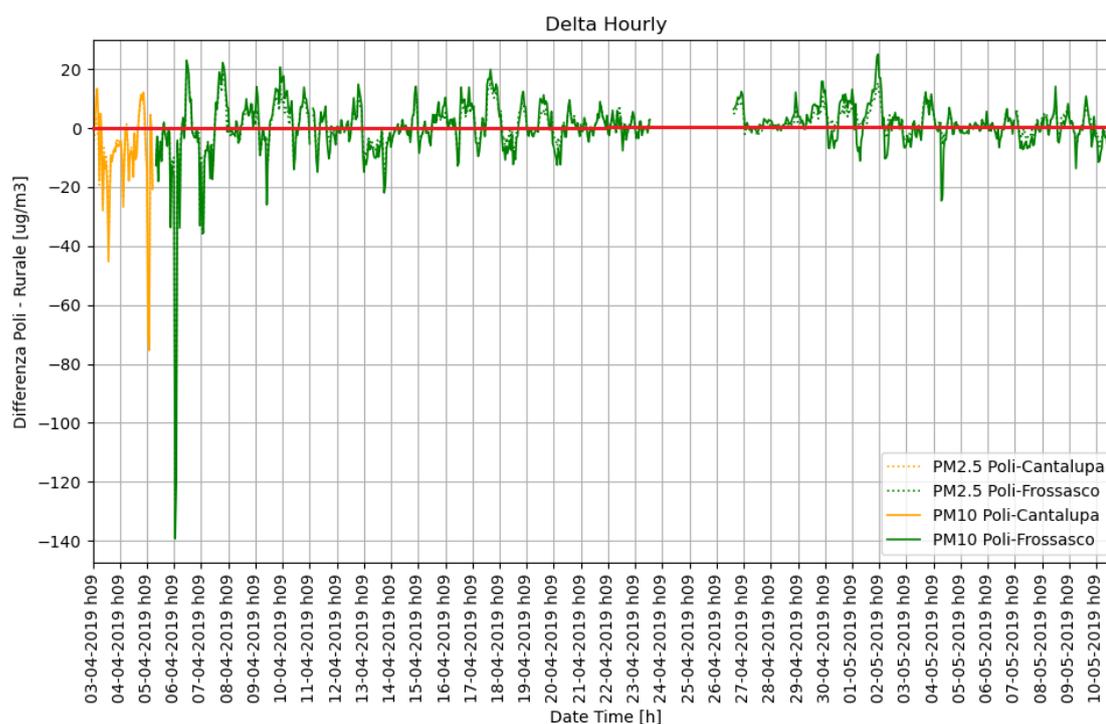


Figura 6.7. Differenza tra le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 del CC-Green-Roof del Politecnico e quelle delle stazioni rurali.

In *Figura 6.7* si nota come la differenza sia principalmente negativa nel primo periodo e quindi che le concentrazioni a Cantalupa sono fortemente maggiori del Politecnico.

Successivamente il delta tende a stabilizzarsi intorno allo 0, oscillando tra $-20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e $+20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, suggerendo una diminuzione della concentrazione di particolato influenzata probabilmente anche dalla progressiva estinzione dell'incendio.

6.2 Strisciata suburbana estiva

La campagna di misure riportata in questo paragrafo riprende i dati analizzati dall'Ing. Matteo Bo nella sua Tesi di Dottorato [11], nella quale, tra le altre cose, è stato valutato l'effetto dell'inquinamento dei PM nelle aree suburbane fuori Torino. Le aree per effettuare le misure sono state individuate, in funzione delle condizioni al contorno, nella zona Nord-Est dell'area urbana di Torino, a distanza progressivamente sempre più elevata dal centro. I punti di interesse per il presente lavoro di tesi della strisciata suburbana si trovano, come riportato in *Figura 6.1*, in un'area pianeggiante della Pianura Padana, paralleli all'autostrada A4, nei cimiteri dei comuni di Volpiano, Montanaro e Mazzè. Quest'ultimo rappresenta il punto finale della strisciata in quanto le condizioni al contorno della Pianura Padana iniziano ad essere diverse a distanze più elevate da Torino. Le campagne sono state condotte cronologicamente partendo dalla stazione di Volpiano per proseguire a distanze sempre crescenti dall'area urbana del Politecnico. Nel periodo in cui lo strumento era allocato a Montanaro, dal 27/06/2019 al 15/07/2019, a causa di un guasto non sono stati salvati i dati misurati. Per questo motivo, dopo la campagna di Mazzè, lo strumento è stato ricollocato a Montanaro per effettuare una seconda campagna. Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Nei grafici riportati in *Figura 6.8* e *Figura 6.9* sono presenti i confronti degli andamenti dei PM_{2.5} e PM₁₀ nell'ambiente urbano del Politecnico e in quelli suburbani delle stazioni esterne. I valori riportati si riferiscono alle medie giornaliere, mentre quelle orarie sono allegate in APPENDICE II, dove si trovano sia i grafici della campagna di misurazione completa, da giugno a settembre 2019, che quelli delle singole stazioni.

Sono riportati, inoltre, nel primo (*Figura 6.8*) le precipitazioni e nel secondo (*Figura 6.9*) le velocità del vento del periodo di riferimento registrate dalla stazione meteo del CC-Green-Roof. Si osserva come, agli eventi di principale entità, soprattutto delle piogge, corrispondano generalmente i decrementi di concentrazione più accentuati. Nel caso del

6. Elaborazione dati e casi studio

vento, nonostante non si notino fenomeni fortemente prevalenti rispetto agli altri, in corrispondenza dei picchi più alti si osservano diminuzioni di concentrazione.

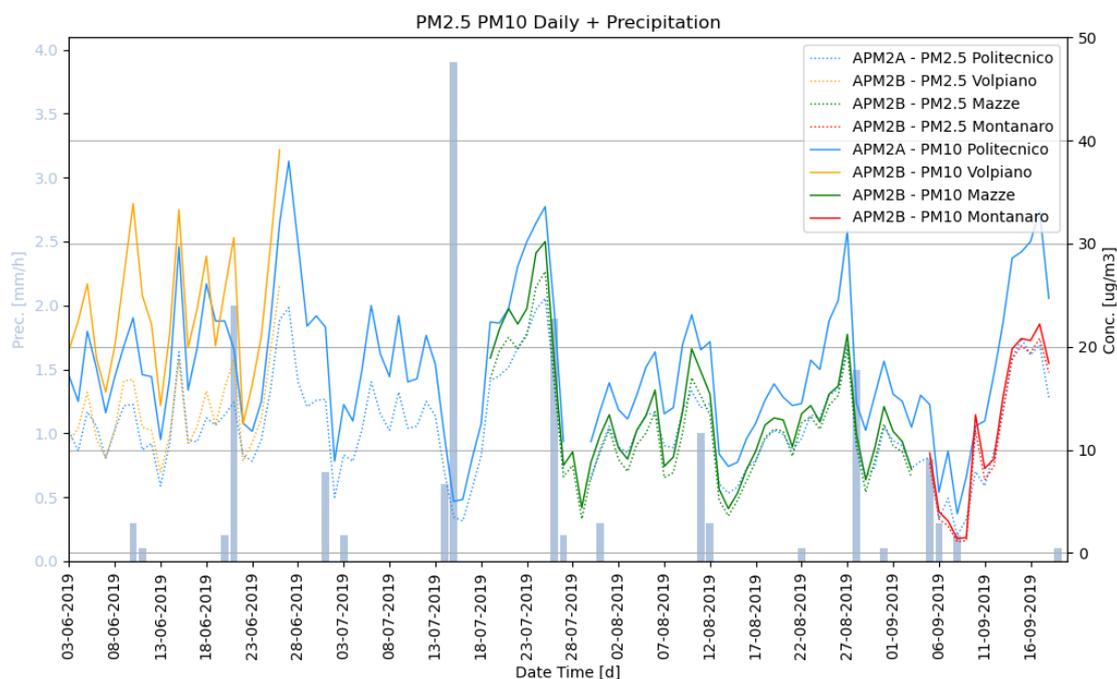


Figura 6.8. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra le stazioni suburbane e l'area urbana del Politecnico di Torino con le precipitazioni.

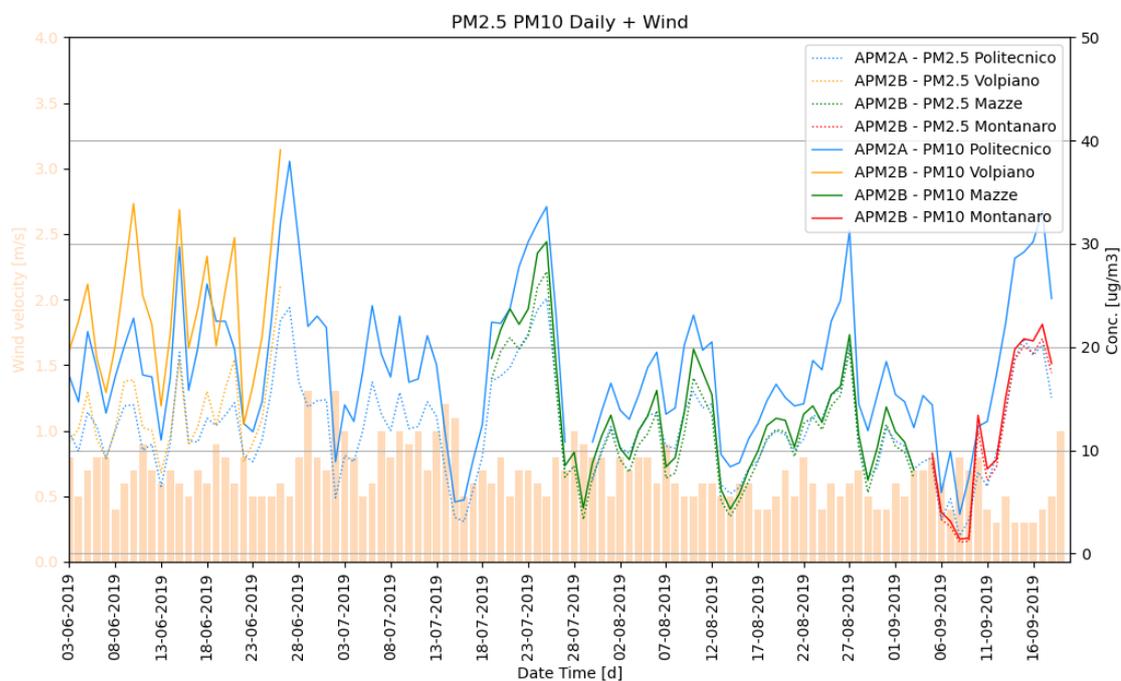


Figura 6.9. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra le stazioni suburbane e l'area urbana del Politecnico di Torino con la velocità del vento.

Una volta rappresentati i grafici delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 delle singole stazioni (riportati in APPENDICE II sia con le medie orarie che giornaliere), si è scelto di rappresentare il delta di concentrazione tra l'area urbana e quelle suburbane. Effettuando, infatti, le differenze tra le concentrazioni registrate al Politecnico e quelle nelle stazioni suburbane, si ottiene il grafico in *Figura 6.10*, nel quale i PM2.5 sono indicati dalla linea punteggiata, mentre i PM10 da quella continua.

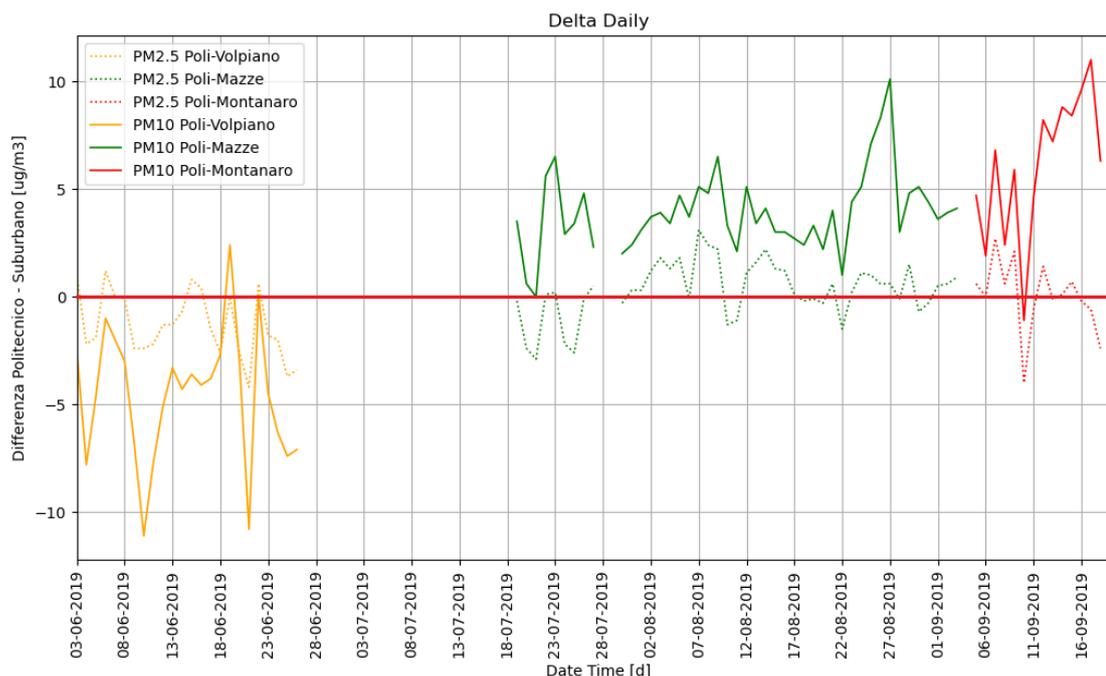


Figura 6.10. Differenza tra le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 del CC-Green-Roof del Politecnico e quelle delle stazioni suburbane.

Si nota (*Figura 6.10*) che la differenza tra le concentrazioni urbana e suburbana di PM2.5 oscilla sempre intorno a 0, sottolineando una distribuzione delle concentrazioni di questa frazione di particolato aerodisperso sostanzialmente equivalente. Al contrario, il delta di PM10 è più elevato e ciò implica valori di concentrazione più disomogenei tra l'area urbana e quelle suburbane. In particolare, nelle stazioni di Mazzè e Montanaro le concentrazioni di PM10 sono principalmente inferiori a quelle del Politecnico, registrando un delta positivo, come ci si aspetta in zone suburbane. A Volpiano, invece, sono state registrate concentrazioni di PM10 maggiori dell'area urbana. Questo potrebbe essere dovuto ad alcune condizioni al contorno che non sono state valutate nel momento dell'installazione dello strumento [11], come la presenza a circa 400 m di un'area di

deposito di sabbia, ghiaia e materiali inerti di un'azienda che si occupa di escavazioni e movimento terra. Quello di Volpiano, inoltre, è un cimitero più frequentato rispetto a Mazzè e Montanaro e la necessità di posizionare lo strumento vicino all'area di parcheggio per motivi di alimentazione ha probabilmente inciso sulla concentrazione di particolato aerodisperso, a causa del passaggio delle persone. Il delta della stazione di Montanaro, nonostante abbia un andamento positivo, presenta un picco negativo (come anche verificabile nei grafici di andamento delle medie orarie e giornaliere delle concentrazioni consultabile in APPENDICE II) che potrebbe essere dovuto alle attività agricole che vengono effettuate in zona e che comportano un rilascio di particolato primario.

Si è quindi proceduto con un'analisi degli andamenti medi della settimana nelle diverse stazioni di misura. È stata effettuata la media della serie di dati a disposizione per ogni campagna su ogni giorno della settimana (*Figura 6.11*). Si deve quindi considerare che ogni curva ottenuta è stata mediata su un periodo differente, visto che in ogni stazione le misure non sono state condotte per la stessa durata di tempo.

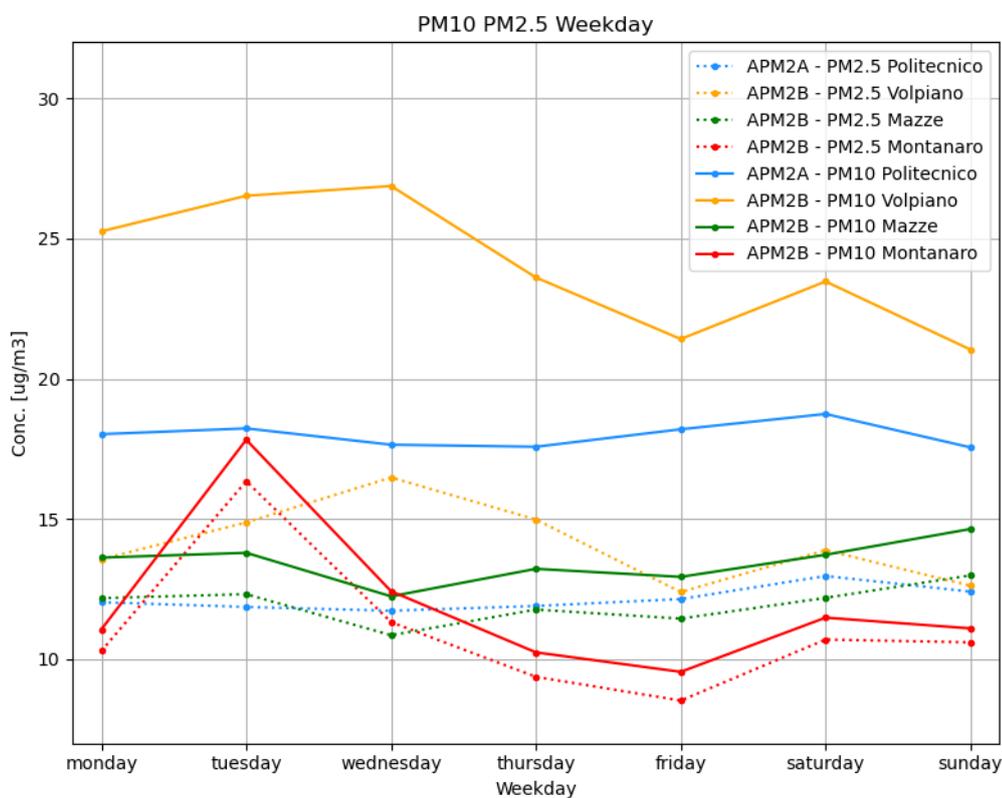


Figura 6.11. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 nella settimana.

Gli andamenti nei diversi giorni della settimana confermano quanto prima analizzato. Volpiano presenta concentrazioni superiori a quelle misurate nella stazione urbana del Politecnico, mentre Mazzè e Montanaro hanno valori inferiori. Il picco del martedì di Montanaro è riconducibile all'incremento di concentrazione, già discusso, causato probabilmente dalle attività agricole.

6.3 Strisciata suburbana invernale

Questa campagna di misure si riferisce alla stazione di Montanaro, già discussa nella strisciata suburbana estiva. Per i dettagli sul periodo della campagna di misura e sulla posizione della stazione si rimanda alla *Tabella 6.2* e alla *Figura 6.1*.

Seguendo lo stesso approccio descritto nel paragrafo precedente per la STRISCIATA SUBURNANA ESTIVA, sono stati ottenuti i grafici in *Figura 6.12* e *Figura 6.13*, nei quali sono presenti i confronti degli andamenti dei PM2.5 e PM10 nell'ambiente urbano del Politecnico e in quello suburbano della stazione esterna. I valori riportati si riferiscono alle medie giornaliere, mentre quelle orarie sono allegate in APPENDICE III. Sono riportati, inoltre, nel primo (*Figura 6.12*) le precipitazioni e nel secondo (*Figura 6.13*) le velocità del vento del periodo di riferimento registrate dalla stazione meteo del CC-Green-Roof. Si osserva come per ogni decremento importante di concentrazione di particolato aerodisperso sia presente un fenomeno rilevante di precipitazioni o di elevate velocità del vento. A seguito degli eventi meteorologici, però, si registra una rapida risalita delle concentrazioni ai livelli precedenti. Questo, però, non avviene più nel periodo di marzo 2020, nel quale, a seguito dei fenomeni naturali di rimozione, non si ristabiliscono le concentrazioni elevate del periodo precedente. Si ha un decremento sia nelle concentrazioni di PM2.5, che di PM10 e questo può essere ricondotto alle misure adottate per il contenimento e la gestione dell'emergenza epidemiologica da Covid-19, che hanno previsto una repentina sospensione delle principali attività antropiche che sono normalmente causa di inquinamento atmosferico.

6. Elaborazione dati e casi studio

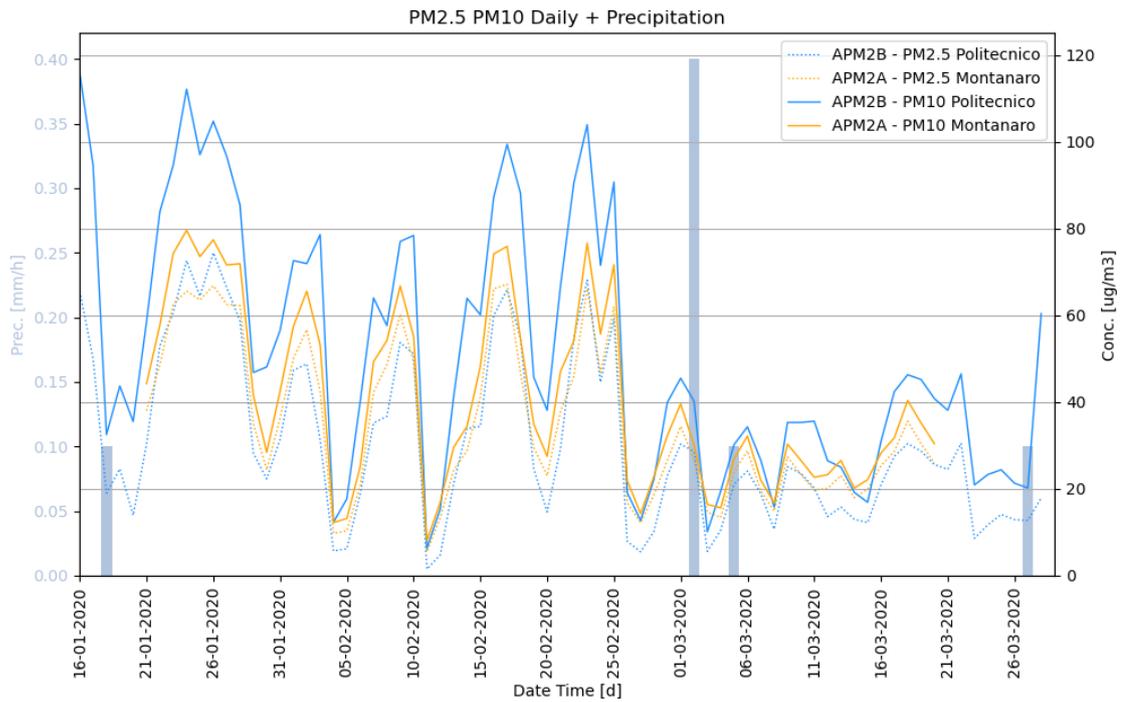


Figura 6.12. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra la stazione suburbana di Montanaro e l'area urbana del Politecnico di Torino con le precipitazioni.

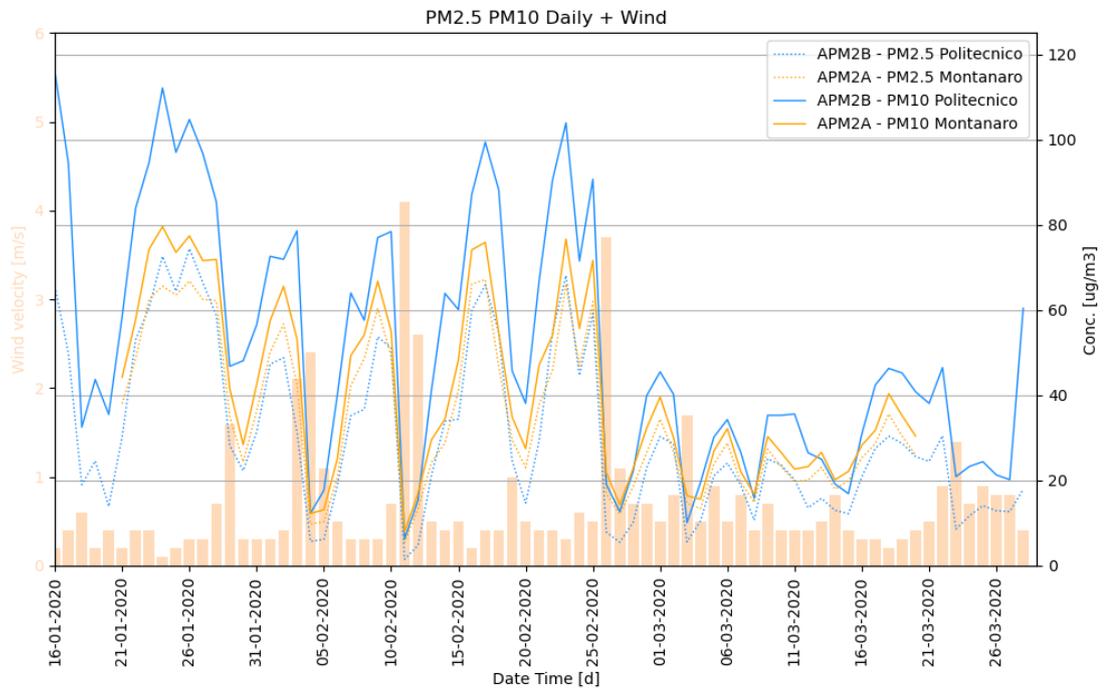


Figura 6.13. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra la stazione suburbana di Montanaro e l'area urbana del Politecnico di Torino con la velocità del vento.

Il solo grafico delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 è riportato in APPENDICE III. Successivamente, si è scelto di rappresentare il delta di concentrazione tra l'area urbana e quella suburbana. Effettuando, infatti, le differenze tra le concentrazioni registrate al Politecnico e quelle alla stazione di Montanaro, si ottiene il grafico in *Figura 6.11*, nel quale i PM2.5 sono indicati dalla linea punteggiata, mentre i PM10 da quella continua.

Osservando il grafico (*Figura 6.11*) si conferma un delta pressoché nullo per quanto riguarda i PM2.5, mentre i PM10 registrano variazioni più significative, come registrato nella STRISCIATA SUBURBANA ESTIVA. Da marzo 2020, però, si osserva un decremento nel delta dei PM10. Questo può essere ricondotto alla diminuzione registrata (*Figura 6.12 e Figura 6.13*) a causa dalle misure adottate per il contenimento e la gestione dell'emergenza epidemiologica da Covid-19. I PM10 sono diminuiti, infatti, in entrambe le stazioni, ma la diminuzione del delta suggerisce un più forte decremento nell'area urbana del Politecnico. Montanaro, essendo un'area suburbana, registrava un'attività antropica già più bassa dell'area urbana, quindi, nel momento di interruzione delle attività, la maggiore diminuzione di concentrazione dovuta all'arresto delle principali sorgenti si è registrata al Politecnico.

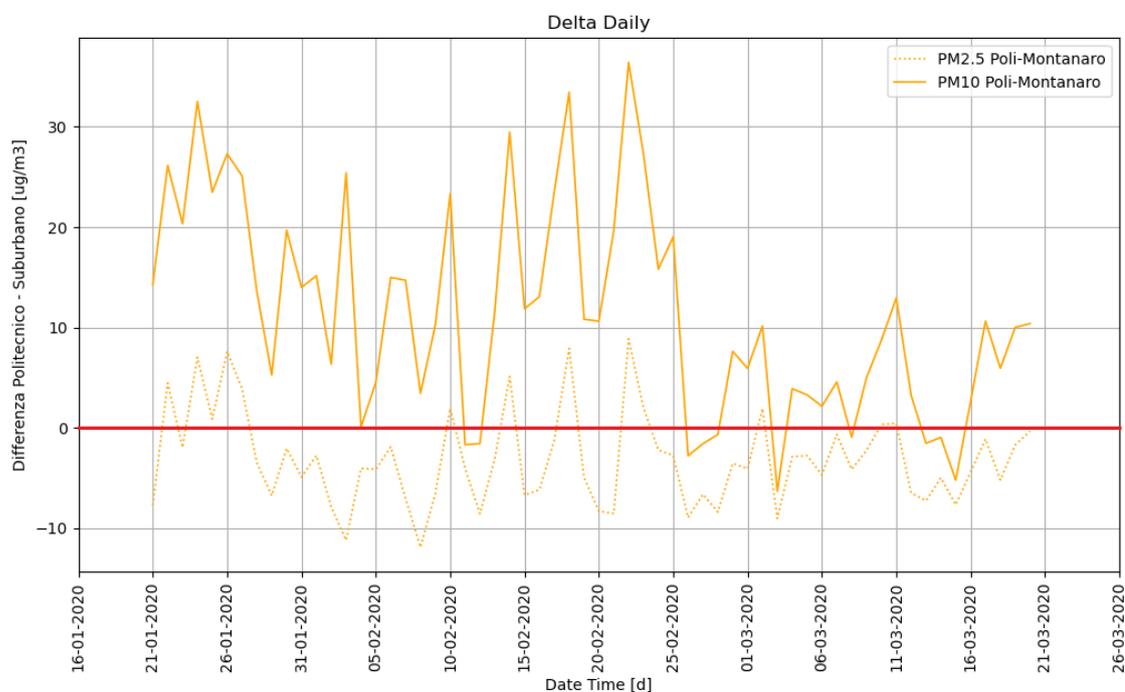


Figura 6.14. Differenza tra le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 del CC-Green-Roof del Politecnico e quelle della stazione suburbana di Montanaro.

Si è quindi proceduto con un'analisi degli andamenti medi della settimana nelle diverse stazioni di misura. È stata effettuata la media della serie di dati a disposizione su ogni giorno della settimana (*Figura 6.15*). Si registra un minimo il mercoledì, mentre la domenica e il lunedì risultano rappresentare i periodi di concentrazioni più elevate, sia nel contesto urbano, che in quello suburbano. Per la discussione di questo aspetto si rimanda al capitolo sui confronti tra le diverse campagne di misura (§6.6).

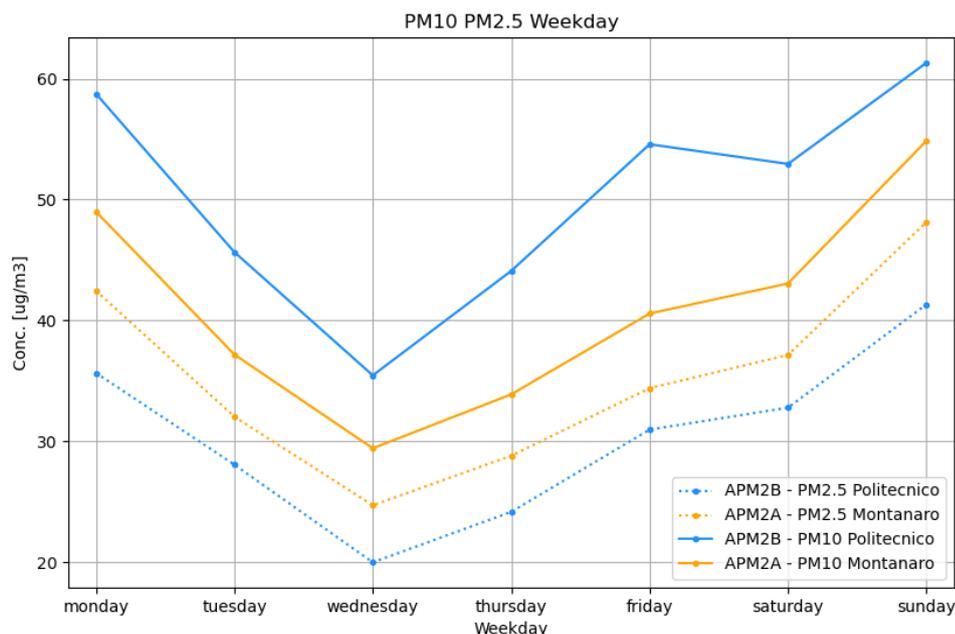


Figura 6.15. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 nella settimana.

6.4 Campagna di San Giorio

La campagna di misure riportata in questo paragrafo è stata condotta dal 06/05/2020 al 20/07/2020 nell'area rurale del comune di San Giorio di Susa. Per i dettagli sul periodo della campagna di misura e sulla posizione della stazione si rimanda alla *Tabella 6.2* e alla *Figura 6.1*.

Nei grafici in *Figura 6.16* e *Figura 6.17* sono presenti i confronti degli andamenti dei PM2.5 e PM10 nell'ambiente urbano del Politecnico e in quello rurale della stazione

esterna. I valori riportati si riferiscono alle medie giornaliere, mentre quelle orarie sono allegare in APPENDICE IV. Il picco iniziale riconoscibile nei trend delle concentrazioni di questa stazione, e visibile anche nei grafici di andamento orario in appendice, è riconducibile ad un evento di polveri sahariane registrato in quei giorni. Sono riportati, inoltre, nel primo (*Figura 6.16*) le precipitazioni e nel secondo (*Figura 6.17*) le velocità del vento del periodo di riferimento registrate dalla stazione meteo del CC-Green-Roof. In questo caso, si osserva come per i decrementi più importanti di concentrazione di particolato aerodisperso sia presente un fenomeno rilevante di precipitazione. Il vento non sembra dare contributi rilevanti in questa campagna di misure, non essendoci fenomeni fortemente prevalenti rispetto agli altri.

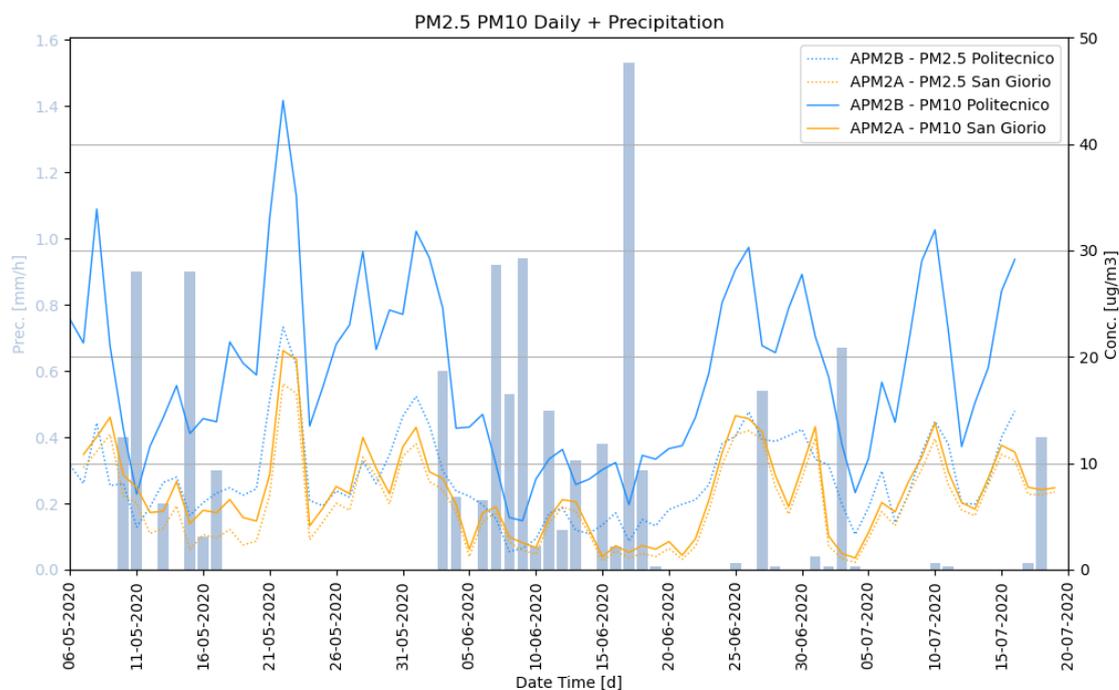


Figura 6.16. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra la stazione rurale di San Giorio e l'area urbana del Politecnico di Torino con le precipitazioni.

6. Elaborazione dati e casi studio

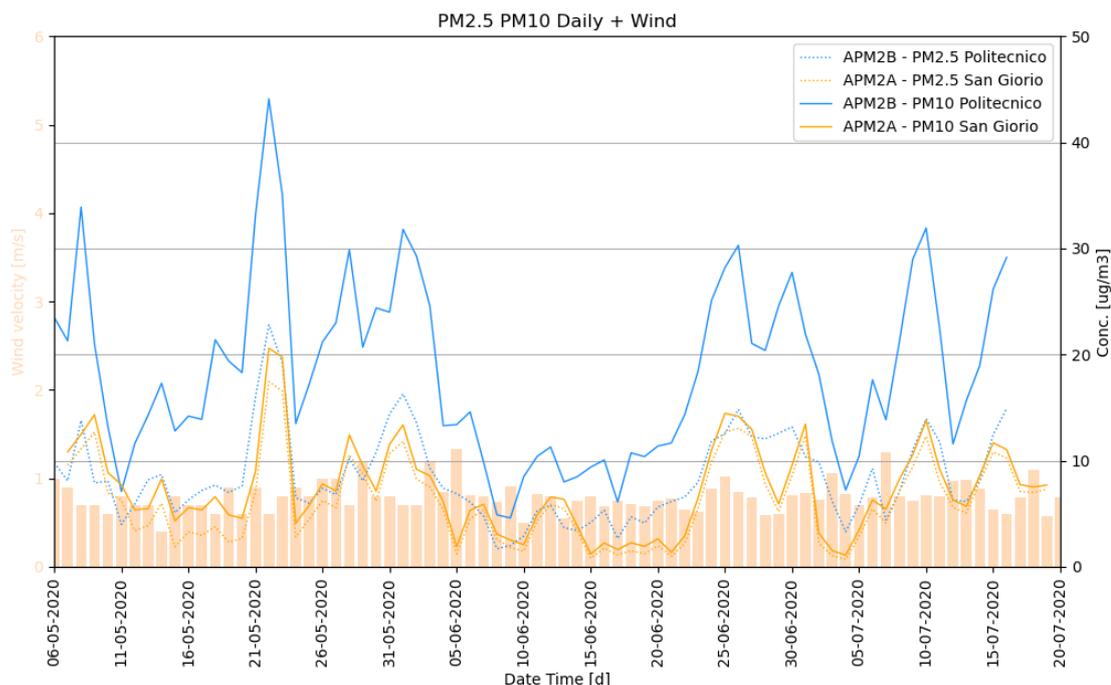


Figura 6.17. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra la stazione rurale di San Giorio e l'area urbana del Politecnico di Torino con la velocità del vento.

Il solo grafico delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 è riportato in APPENDICE IV. Successivamente, si è scelto di rappresentare il delta di concentrazione tra l'area urbana e quella rurale. Effettuando, infatti, le differenze tra le concentrazioni registrate al Politecnico e quelle alla stazione di San Giorio, si ottiene il grafico in *Figura 6.18*, nel quale i PM2.5 sono indicati dalla linea punteggiata, mentre i PM10 da quella continua.

Osservando il grafico (*Figura 6.18*) si conferma un delta pressoché nullo per quanto riguarda i PM2.5, mentre i PM10 registrano variazioni più significative, come registrato nelle precedenti campagne di misura. Essendo il delta quasi sempre positivo, le concentrazioni di entrambe le frazioni a San Giorio risultano principalmente inferiori a quelle del Politecnico, come ci si aspetta in zone rurali rispetto a quelle urbane. Nel periodo centrale della figura e in corrispondenza dell'11/05/2020 si nota una forte riduzione soprattutto del delta di concentrazione di PM10. Durante questi intervalli temporali, infatti, si sono verificati intensi eventi di pioggia (*Figura 6.16*) nell'area del Politecnico di Torino, che hanno inciso sulla riduzione della frazione grossolana di particolato aerodisperso.

6. Elaborazione dati e casi studio

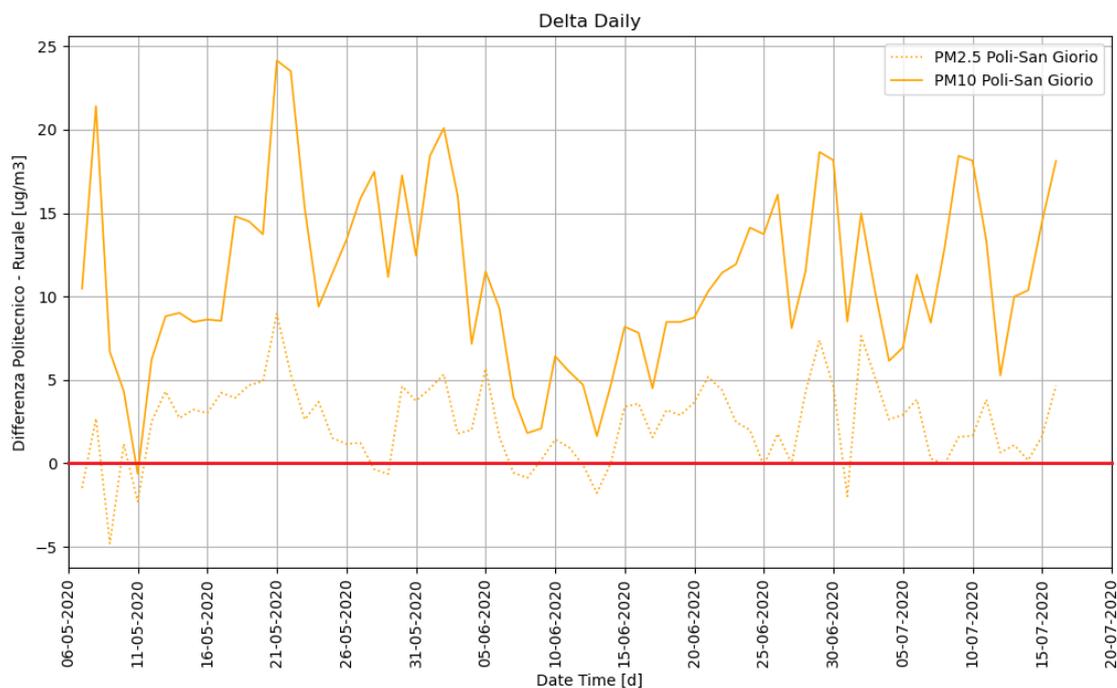


Figura 6.18. Differenza tra le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 del CC-Green-Roof del Politecnico e quelle della stazione rurale di San Giorio.

Si è quindi proceduto con un'analisi degli andamenti medi della settimana nelle diverse stazioni di misura. È stata effettuata la media della serie di dati a disposizione su ogni giorno della settimana (Figura 6.19).

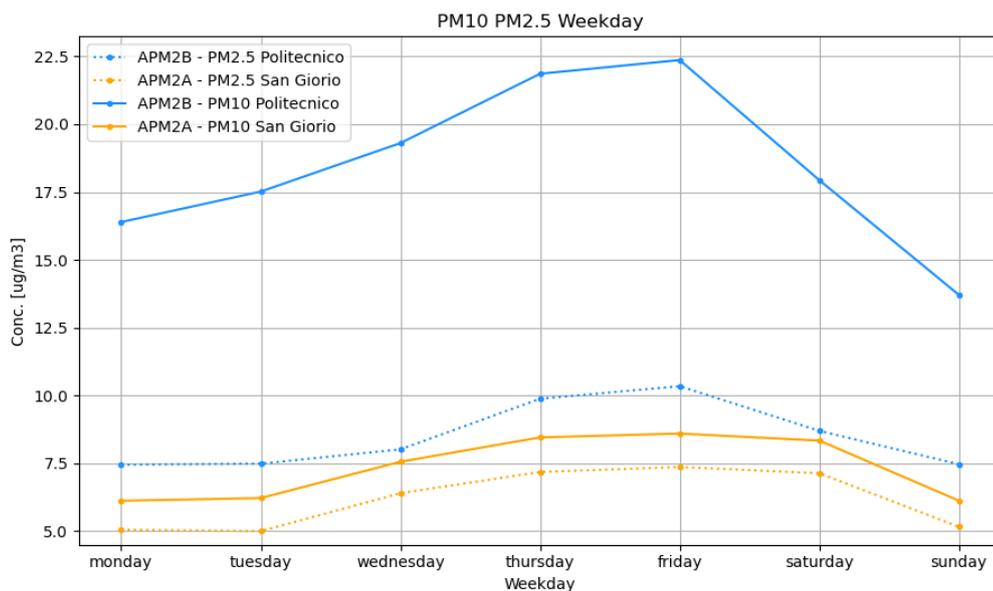


Figura 6.19. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 nella settimana.

Si osserva lo stesso andamento di entrambe le frazioni durante la settimana. Le concentrazioni minori si registrano tra sabato, domenica e i primi giorni della settimana, mentre giovedì e venerdì si hanno i picchi più rilevanti. Per le valutazioni in merito a questo aspetto si rimanda al capitolo sui confronti tra le diverse campagne di misura (§6.6). Si nota, inoltre, che i valori di concentrazione di PM10 nella stazione di Salbertrand sono nell'ordine di grandezza di quelli di PM2.5. Da altri studi condotti in parallelo [59] è emerso che l'APM2A (numero di serie 20075) ha riscontrato una sottostima dei valori di concentrazione di PM10. Si suppone che questo sia dovuto ad un probabile evento dannoso nel quale è stato coinvolto lo strumento nel passaggio da Montanaro a San Giorio, in quanto in quest'ultima campagna si è verificata l'anomalia, che nella precedente non era emersa. A conferma di questo, in *Figura 6.20* è riportato l'andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 degli strumenti APM2A, APM2B e FIDAS di una settimana di settembre 2020, nella quale i tre strumenti sono stati posizionati contemporaneamente nel CC-Green-Roof del Politecnico per verificare la qualità delle misure.

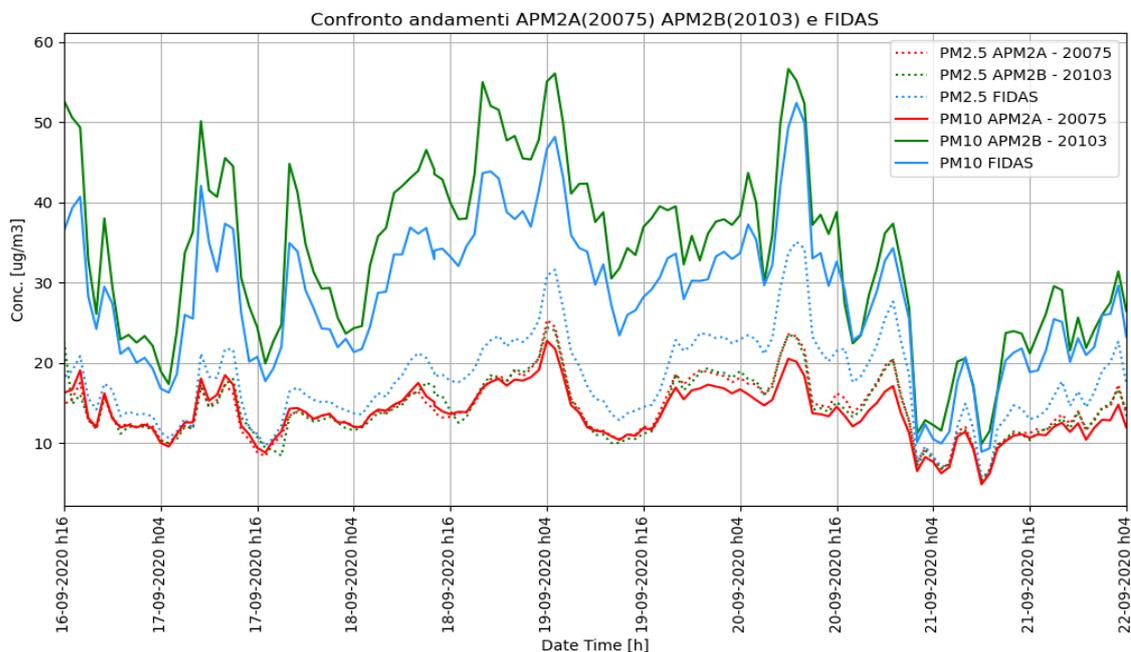


Figura 6.20. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 di APM2A, APM2B e FIDAS.

Si osserva come per i PM2.5 i tre strumenti rilevino valori in linea gli uni con gli altri. Al contrario, la frazione grossolana misurata dall'APM2A ha visibilmente concentrazioni di

ordine di grandezza diverso da quelle registrate dall'APM2B e dal FIDAS. Infatti, mentre l'APM2B ha un delta medio di pochi $\mu\text{g}/\text{m}^3$ rispetto al FIDAS, che può essere legato alle caratteristiche degli strumenti e ai diversi metodi di acquisizione del dato, l'APM2A registra una differenza di concentrazione media rispetto al FIDAS pari a $15.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, valore tutt'altro che trascurabile.

Grazie al metodo di acquisizione delle misure dell'APM2, che restituisce un valore ogni 2 minuti, è stato possibile approfondire l'andamento delle concentrazioni nelle diverse ore della giornata. Si sono rappresentate, quindi, le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 mediate su ogni giorno della settimana. Si precisa che gli assi delle ordinate (*Figura 6.21*) tra il grafico a) e b) hanno lo stesso range di valori. Mentre nel grafico c) è stato effettuato uno zoom per riconoscere le oscillazioni di San Giorio, che sono comprese in un intervallo ristretto. Per una maggiore chiarezza, in *Figura 6.22* è riportato l'andamento delle concentrazioni nelle ore della giornata, senza fare distinzione di giorno. L'andamento di entrambe le figure (*Figura 6.21* e *Figura 6.22*) mostra le oscillazioni tipiche di una zona urbana come quella del Politecnico durante la giornata. La stabilità atmosferica e le emissioni, infatti, contribuiscono al picco che si registra nella mattina, che tende, invece, a diminuire nel pomeriggio, quando l'altezza di miscelazione raggiunge il suo massimo. Nell'andamento delle concentrazioni a San Giorio si osserva che il picco di concentrazione, seppur molto lieve in termini di concentrazione, è spostato verso sera. Questo fenomeno potrebbe essere legato a questioni di sorgente, ma necessita di ulteriori studi che approfondiscano le condizioni al contorno. In questo periodo non si registrano mediamente incrementi al mattino dovuti alla classica brezza di valle, che normalmente trasporta gli inquinanti dalle aree urbane verso quelle a quote più elevate.

6. Elaborazione dati e casi studio

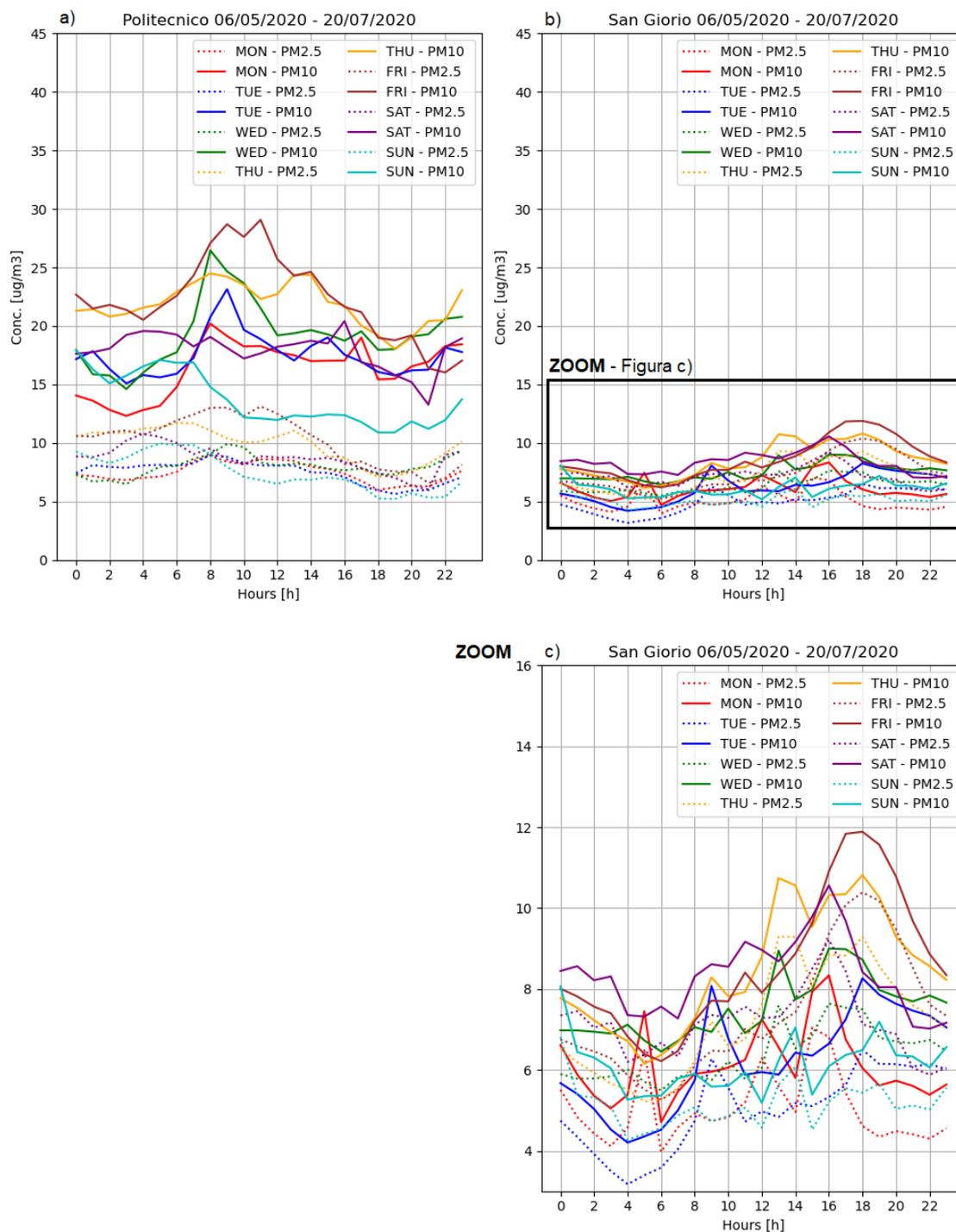


Figura 6.21. Andamento delle concentrazioni di PM_{2.5} e PM₁₀ mediate sulle diverse ore e i diversi giorni della settimana, confronto tra la stazione urbana del CC-Green-Roof del Politecnico (a) e la stazione rurale di San Giorio (b, c).

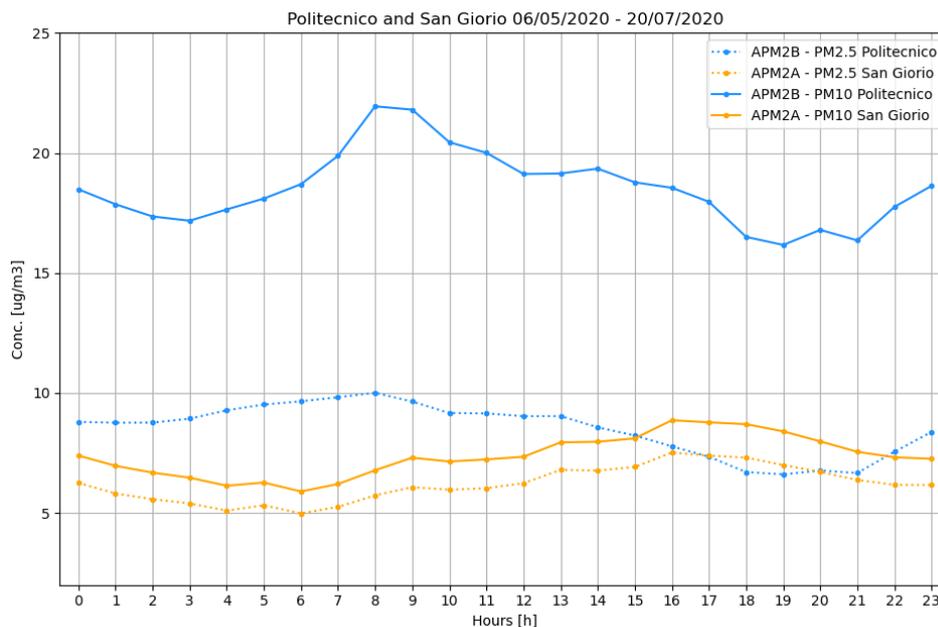


Figura 6.22. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 mediate sulle diverse ore della giornata, confronto tra la stazione urbana del CC-Green-Roof del Politecnico e la stazione rurale di San Giorio.

6.5 Campagna di Salbertrand

La campagna di misure riportata in questo paragrafo è stata condotta dal 25/09/2020 al 02/11/2020 nell'area rurale del comune di Salbertrand. Per i dettagli sul periodo della campagna di misura e sulla posizione della stazione si rimanda alla *Tabella 6.2* e alla *Figura 6.1*. Durante il periodo della campagna l'APM2 presente nel CC-Green-Roof del Politecnico di Torino era il modello A (numero di serie 20075), mentre il B (numero di serie 20103) è stato utilizzato nella stazione rurale. Visti i problemi riscontrati all'APM2A, già citati nel paragrafo precedente, che comportano una sottostima dei PM10 da parte dello strumento, è stato deciso di confrontare i valori di concentrazione nella stazione rurale (APM2B) con quelli registrati dal FIDAS nel CC-Green-Roof.

Nei grafici in *Figura 6.23* e *Figura 6.24* sono presenti i confronti degli andamenti dei PM2.5 e PM10 nell'ambiente urbano del Politecnico e in quello rurale della stazione esterna. I valori riportati si riferiscono alle medie giornaliere, mentre quelle orarie sono allegate in APPENDICE V. Sono riportati, inoltre, nel primo (*Figura 6.23*) le precipitazioni e nel secondo (*Figura 6.24*) le velocità del vento del periodo di riferimento registrate dalla stazione meteo del CC-Green-Roof. In questo caso, si osserva come per i

6. Elaborazione dati e casi studio

decrementi più importanti di concentrazione di particolato aerodisperso sia presente un fenomeno più o meno rilevante di precipitazione e/o di vento.

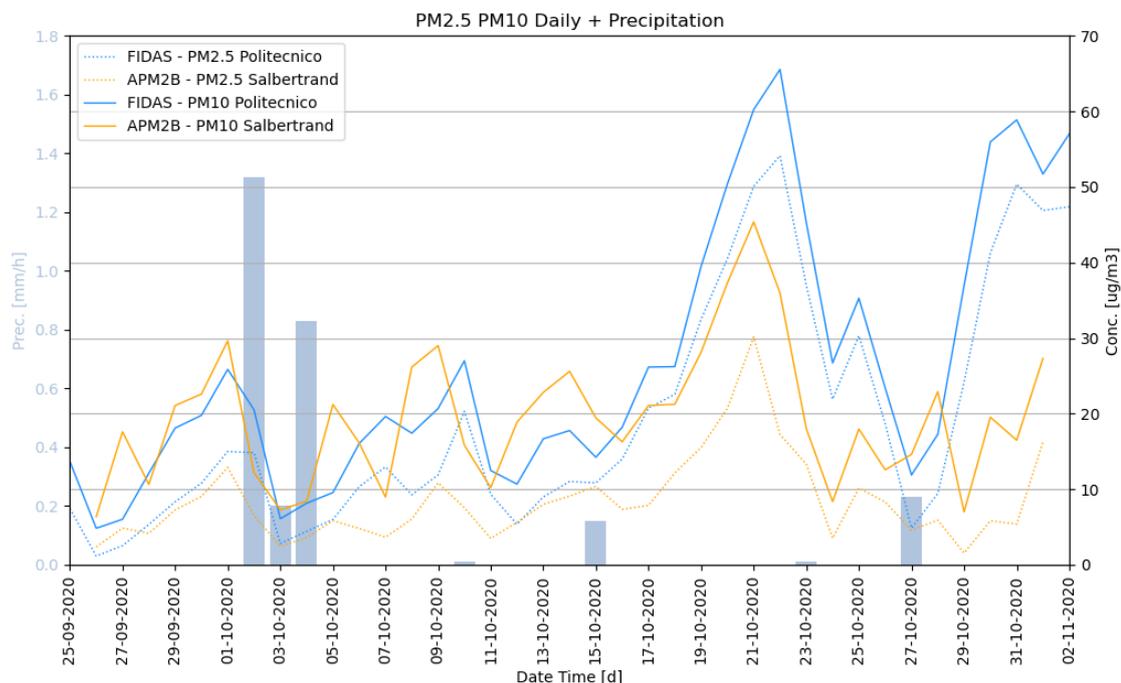


Figura 6.23. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra la stazione rurale di Salbertrand e l'area urbana del Politecnico di Torino con le precipitazioni.

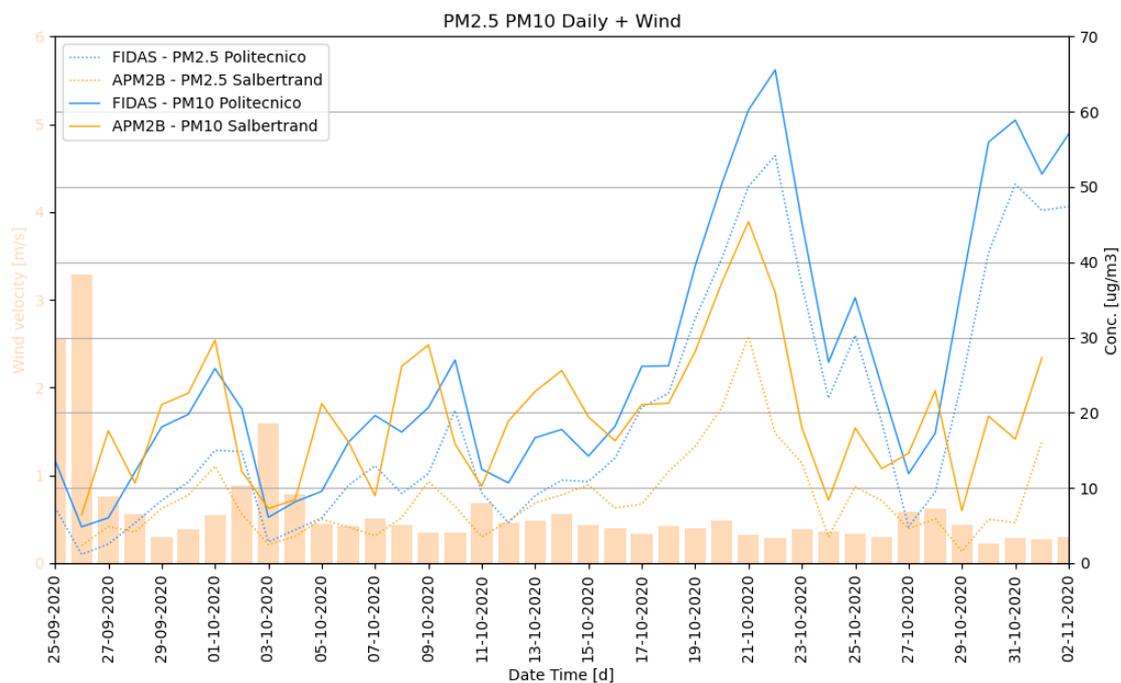


Figura 6.24. Andamento delle medie giornaliere di PM2.5 e PM10, confronto tra la stazione rurale di Salbertrand e l'area urbana del Politecnico di Torino con la velocità del vento.

Il solo grafico delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 è riportato in APPENDICE V. Successivamente, si è scelto di rappresentare il delta di concentrazione tra l'area urbana e quella rurale. Effettuando, infatti, le differenze tra le concentrazioni registrate al Politecnico e quelle alla stazione di Salbertrand, si ottiene il grafico in *Figura 6.25*, nel quale i PM2.5 sono indicati dalla linea punteggiata, mentre i PM10 da quella continua.

Osservando il grafico (*Figura 6.25*) si conferma un delta pressoché nullo per quanto riguarda i PM2.5 nel periodo iniziale, come registrato nelle precedenti campagne di misura, mentre successivamente si hanno picchi causati da un incremento di concentrazione della frazione fine nella stazione del CC-Green-Roof più rapido di quella a Salbertrand, come si può osservare in *Figura 6.23* e *Figura 6.24*. Anche il delta di PM10 segue lo stesso andamento. Questo incremento potrebbe essere dovuto alla variabilità delle attività di cantiere presenti in zona o a particolari condizioni meteorologiche, che in assenza anche di eventi piovosi o ventosi e in concomitanza con l'inizio del periodo di accensione dei riscaldamenti centralizzati, hanno portato ad un innalzamento delle concentrazioni nell'area urbana del Politecnico.

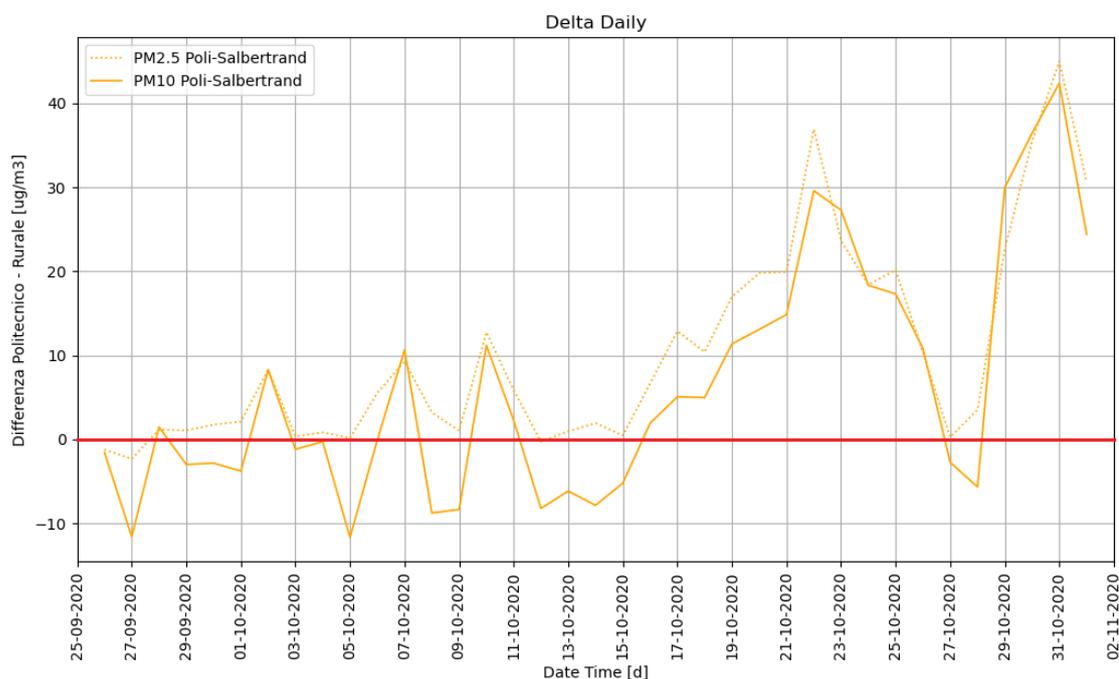


Figura 6.25. Differenza tra le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 del CC-Green-Roof del Politecnico e quelle della stazione rurale di Salbertrand.

Si è quindi proceduto con un'analisi degli andamenti medi della settimana nelle diverse stazioni di misura. È stata effettuata la media della serie di dati a disposizione su ogni giorno della settimana (*Figura 6.26*). Si osserva, nella stessa stazione, il medesimo andamento di entrambe le frazioni durante la settimana. Al Politecnico si registrano i picchi di concentrazione tra giovedì e venerdì, mentre nella stazione di Salbertrand il picco è spostato verso mercoledì-giovedì. Per le valutazioni in merito a questo aspetto si rimanda al capitolo sui confronti tra le diverse campagne di misura (§6.6).

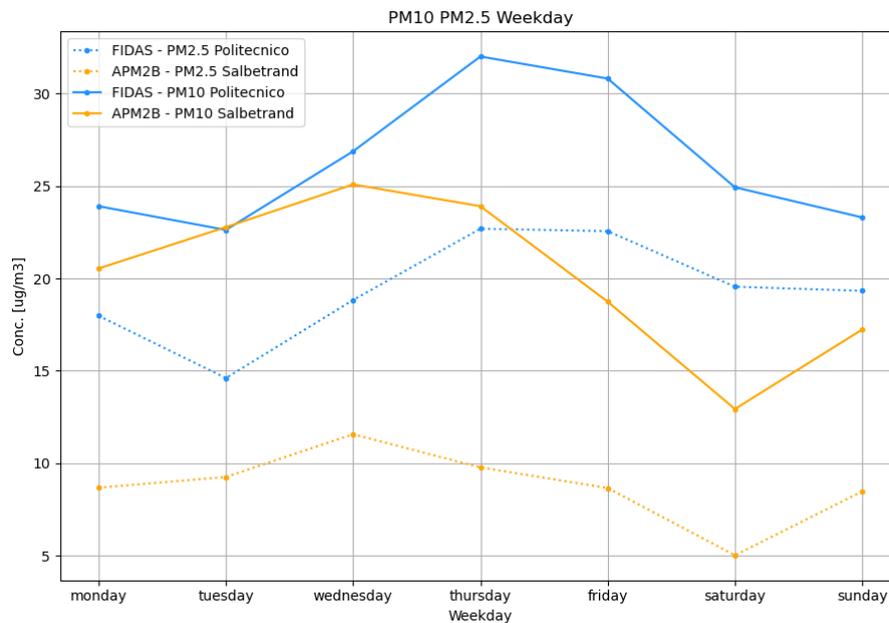


Figura 6.26. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 nella settimana.

Grazie al metodo di acquisizione delle misure dell'APM2, che restituisce un valore ogni 2 minuti, è stato possibile approfondire l'andamento delle concentrazioni nelle diverse ore della giornata. Si sono rappresentate (*Figura 6.27*), quindi, le medie orarie delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 mediate su ogni giorno della settimana. Per una maggiore chiarezza, in *Figura 6.28* è riportato l'andamento delle concentrazioni nelle ore della giornata, senza fare distinzione di giorno. L'andamento di entrambe le figure (*Figura 6.27* e *Figura 6.28*) mostra le oscillazioni tipiche di una zona urbana come quella del Politecnico durante la giornata. La stabilità atmosferica e le emissioni, infatti, contribuiscono al picco che si registra nella mattina, che tende, invece, a diminuire nel pomeriggio, quando l'altezza di miscelazione raggiunge il suo massimo. Le

concentrazioni a Salbertrand, invece, benché abbiano valori inferiori a quelli dell'area urbana nel resto della giornata, presentano due picchi di concentrazione di PM10 preponderanti. Mentre il secondo potrebbe essere influenzato dalla brezza di monte e di valle presente nella zona, il primo è legato ad attività antropiche locali. Quest'ultimo raggiunge concentrazioni superiori a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ come media su tutti i giorni, ma le medie di lunedì e martedì raggiungono anche $60\text{-}70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Questo è dovuto alla posizione dello strumento in un'area non distante dalla quale sono presenti numerose zone di deposito di materiali inerti di aziende che si occupano di scavi e vendita di ghiaie e sabbie. Il forte incremento che si registra la mattina è quindi causa della movimentazione dei materiali in corrispondenza dei turni di lavoro, che generano una considerevole risospensione di particolato primario in atmosfera.

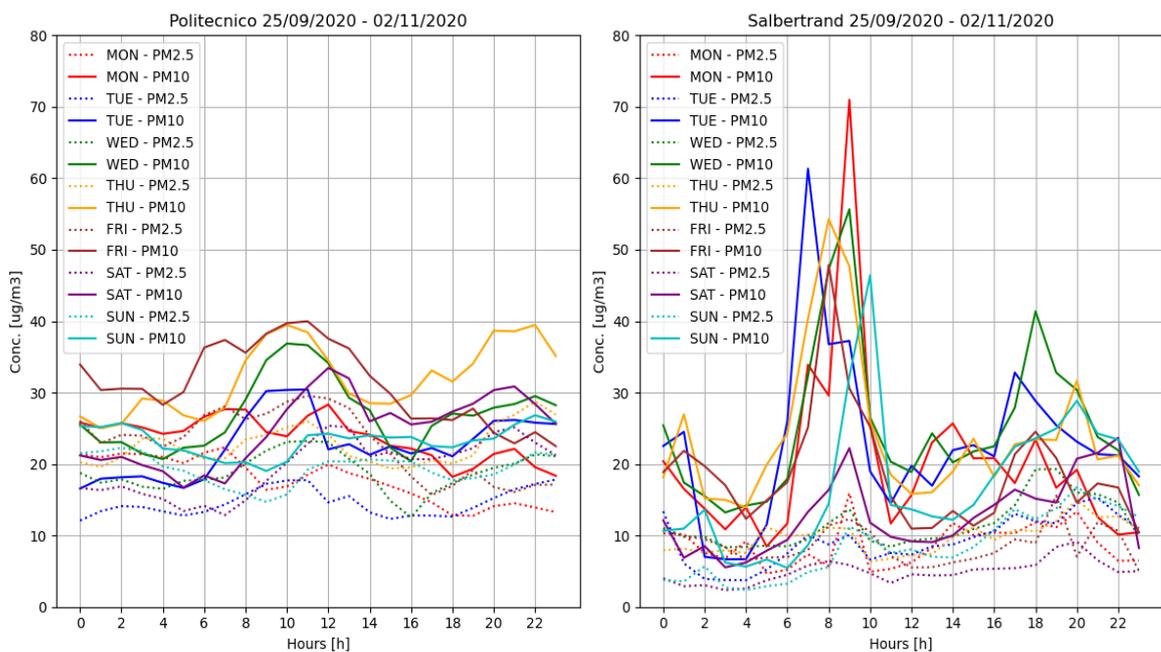


Figura 6.27. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 mediate sulle diverse ore e i diversi giorni della settimana, confronto tra la stazione urbana del CC-Green-Roof del Politecnico e la stazione rurale di Salbertrand.

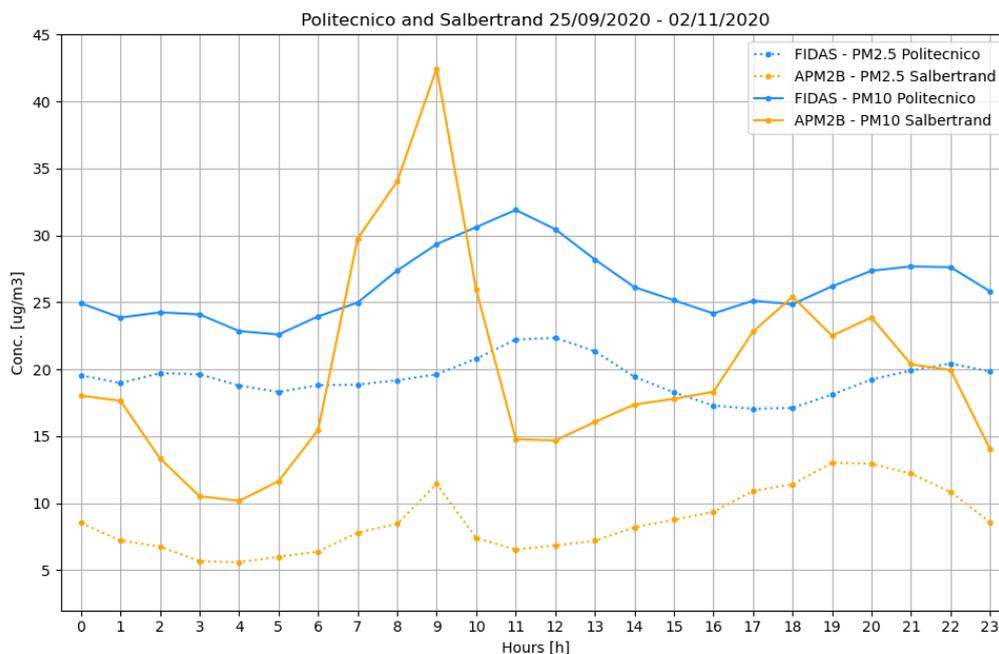


Figura 6.28. Andamento delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 mediate sulle diverse ore della giornata, confronto tra la stazione urbana del CC-Green-Roof del Politecnico e la stazione rurale di Salbertrand.

6.6 Considerazioni e confronti tra le diverse campagne di misura

Come precedentemente sottolineato, nel confrontare le diverse campagne di misura è importante ricordare che hanno avuto durata differente, sono state effettuate in periodi dell'anno diversi e, quindi, la serie di dati relativa ad ogni stazione è caratterizzata da potenziali condizioni al contorno diverse, sia in termini meteorologici che di stabilità atmosferica.

Gli andamenti delle concentrazioni di PM2.5 e PM10 nella settimana (*Figura 6.29*) hanno riportato diverse configurazioni. Si sottolinea che gli assi delle ordinate non sono tutti equivalenti, ma sono stati impostati per ogni stazione in modo tale da poter apprezzare nel miglior modo le oscillazioni. In quasi tutte le campagne di misura le concentrazioni in area urbana e in quella suburbana/rurale di riferimento, sebbene con valori differenti, presentano lo stesso trend settimanale.

6. Elaborazione dati e casi studio

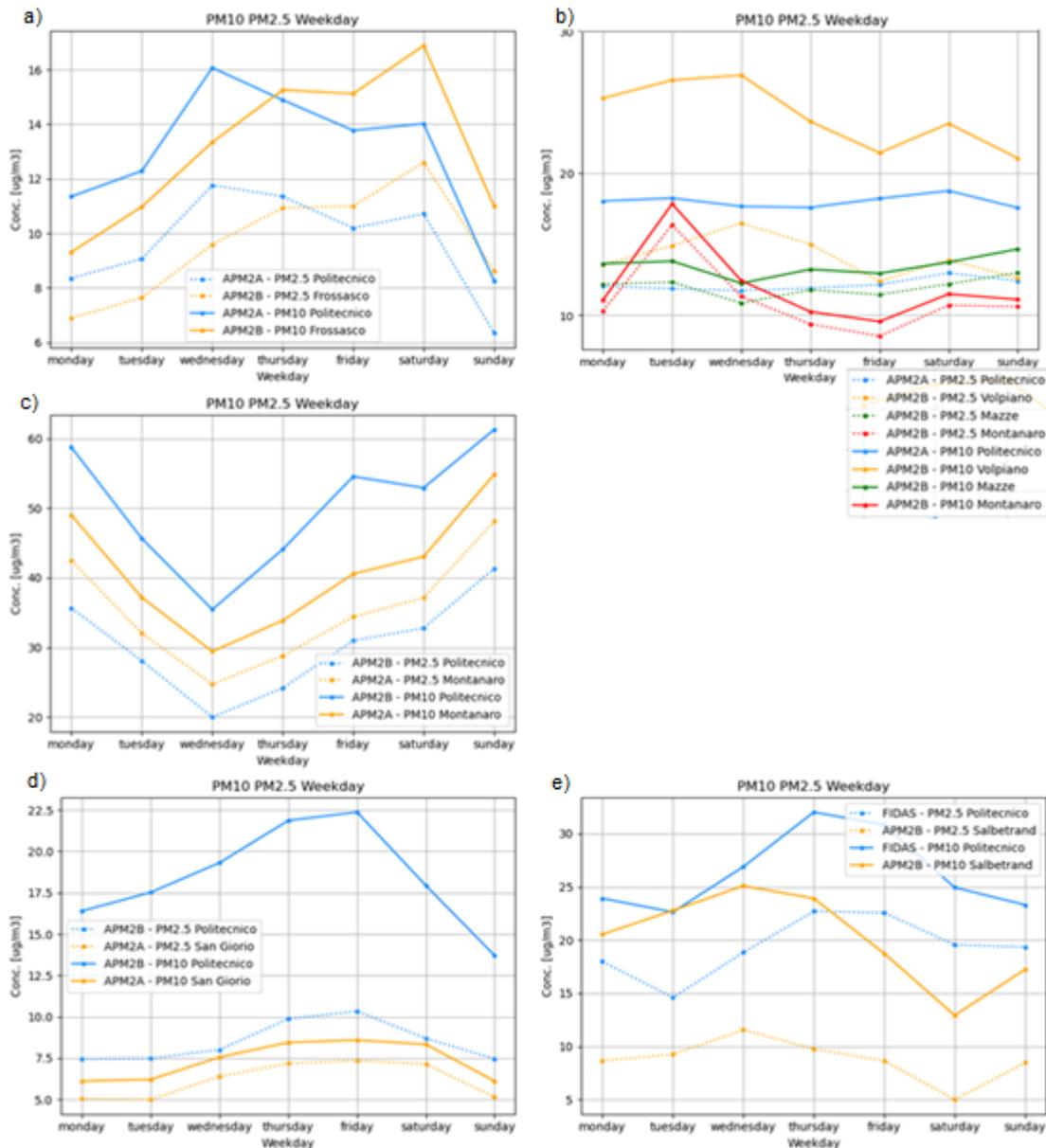


Figura 6.29. Andamento delle concentrazioni di PM_{2.5} e PM₁₀ nella settimana di tutte le campagne di misura: a) Frossasco e Cantalupa; b) Strisciata suburbana estiva; c) strisciata suburbana invernale; d) San Giorio; e) Salbertrand.

Le maggiori differenze si notano a Montanaro (Figura 6.29-b), a causa dei picchi probabilmente riconducibili alle attività agricole della zona, e a Volpiano (Figura 6.29-b), vista la posizione dello strumento vicino a cumuli di materiale inerte, come già descritto nel paragrafo 6.2 - Strisciata suburbana estiva. Negli altri casi, invece, si osservano trend pressoché equivalenti tra le due diverse stazioni e ciò porta a supporre che l'andamento nei diversi giorni della settimana non sia condizionato dal contesto

urbano piuttosto che suburbano/rurale. A Frossasco (*Figura 6.29-a*), San Giorio (*Figura 6.29-d*) e Salbertrand (*Figura 6.29-e*) si sono registrate concentrazioni inferiori durante il fine settimana rispetto ai giorni lavorativi, mentre a Montanaro (*Figura 6.29-c*) il minimo si ha il mercoledì. Le prime tre campagne sono state condotte in primavera 2019, estate 2020 e autunno 2020 rispettivamente. Montanaro invece è stata intrapresa tra gennaio e marzo 2020. L'andamento registrato a Montanaro potrebbe essere frutto della maggiore stabilità atmosferica caratteristica del periodo invernale, durante il quale la ridotta radiazione solare in termini di tempo e intensità rallenta i processi di abbattimento del particolato aerodisperso provocando una prolungata permanenza dei PM in aria. Le concentrazioni registrate in uno specifico giorno non sarebbero quindi frutto delle emissioni dello stesso, ma le attività antropiche caratteristiche dei giorni lavorativi andrebbero ad influenzare i valori delle misurazioni del fine settimana e viceversa. Questo aspetto, però, è influenzato da diversi fattori e non sufficientemente giustificato con i dati disponibili per questo lavoro di tesi, che si riferiscono a campagne di pochi mesi l'una, ma potrebbe essere oggetto di studi futuri.

In *Figura 6.30* sono state riportate tutte le medie orarie delle concentrazioni di PM_{2.5} e PM₁₀ del CC-Green-Roof del Politecnico e quelle delle stazioni suburbane/rurali. Valori positivi del delta indicano concentrazioni maggiori nell'area urbana rispetto alle stazioni esterne, mentre valori inferiori a zero individuano i periodi temporali nei quali si sono registrate concentrazioni maggiori nelle aree suburbane/rurali.

6. Elaborazione dati e casi studio

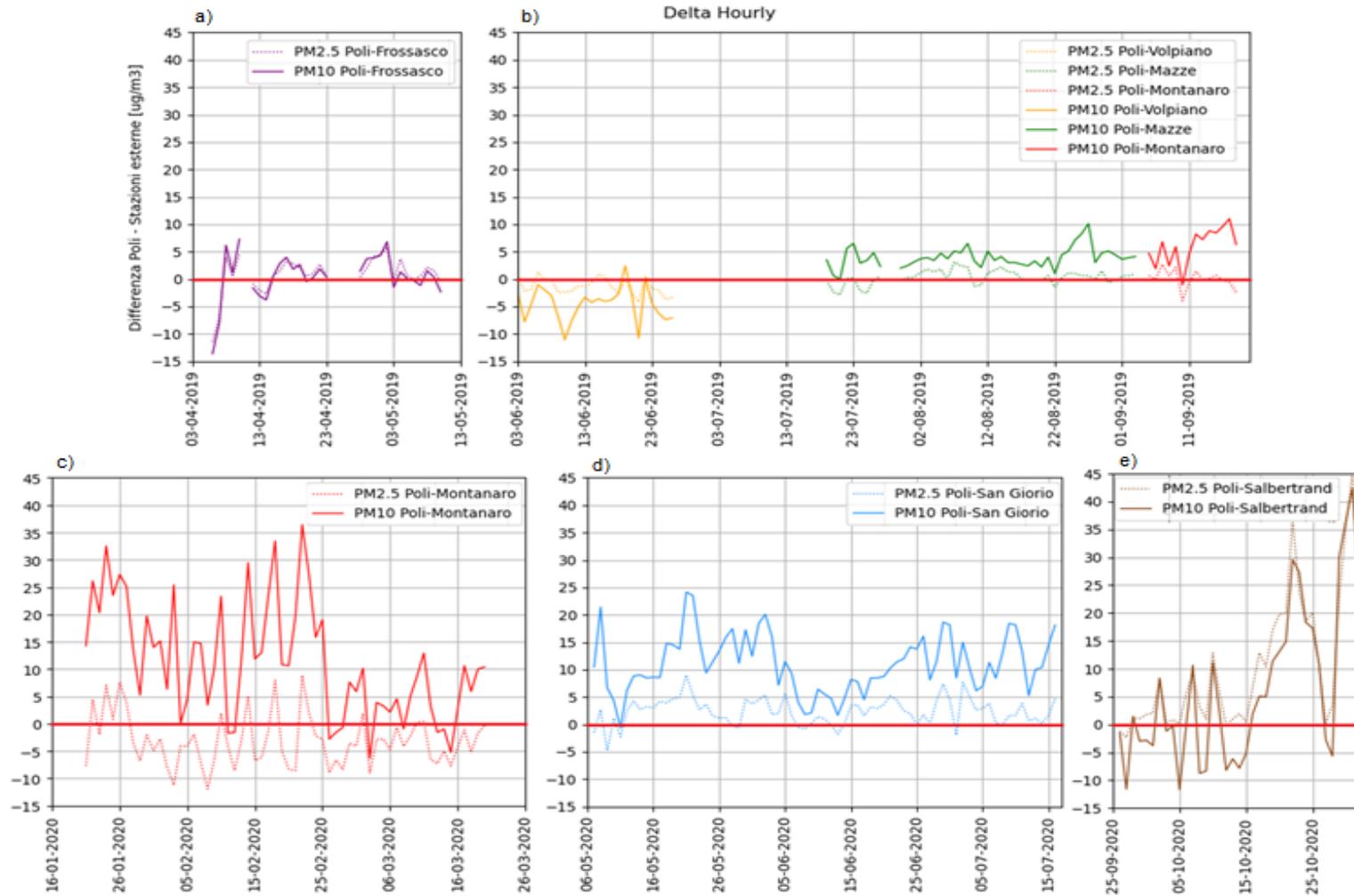


Figura 6.30. Differenza tra le medie orarie delle concentrazioni di PM_{2.5} e PM₁₀ del CC-Green-Roof del Politecnico e quelle delle stazioni suburbane/rurali: a) Frossasco e Cantalupa; b) Striscia suburbana estiva; c) striscia suburbana invernale; d) San Giorio; e) Salbertrand.

Escludendo la fine della campagna di Salbertrand, nella quale si è registrato un incremento di PM_{2.5} più repentino nell'area urbana rispetto a quella rurale, si può affermare che il delta di concentrazione della frazione fine di particolato aerodisperso oscilla sempre intorno a zero. Questo indica una distribuzione della concentrazione di PM_{2.5} sostanzialmente equivalente tra la zona urbana e suburbana/rurale. La concentrazione di questa frazione, infatti, è influenzata dalle condizioni orografiche e meteorologiche della Pianura Padana, che favoriscono un accumulo non indifferente della stessa su tutta l'area, e dalla natura dei PM_{2.5} che ne rende l'abbattimento tramite i meccanismi di rimozione più difficoltoso rispetto ai PM₁₀. Durante la campagna di Montanaro (*Figura 6.30-c*) si raggiungono perfino concentrazioni di PM_{2.5} maggiori rispetto al CC-Green-Roof. Questo è probabilmente legato al fatto che in inverno le condizioni meteorologiche e di stabilità atmosferica provocano forti incrementi delle concentrazioni di inquinanti, ma il delta negativo registrato indica che l'effetto che si ha è principalmente sulla stazione di Montanaro. La condizione per cui si verifica questo fenomeno potrebbe essere anche conseguenza della posizione di Montanaro rispetto al Politecnico. La prima, infatti, è in direzione Nord-orientale rispetto a Torino, quindi più esposta alle elevate concentrazioni invernali che si registrano in Pianura Padana.

Al contrario, i delta di PM₁₀ sono spesso elevati, in quanto questa frazione di particolato è influenzata dalla presenza di traffico nelle aree urbane, essendo generato dall'usura dell'asfalto o da fenomeni di risospensione. Delta considerevoli di PM₁₀ vengono registrati soprattutto a Salbertrand (*Figura 6.30-e*), a causa dei fenomeni citati nel precedente capitolo, a San Giorio (*Figura 6.30-d*), dove lo strumento era collocato in contesto rurale senza particolari condizioni al contorno o attività locali che ne aggravassero i valori, e a Montanaro nella campagna invernale (*Figura 6.30-e*). In quest'ultimo caso è interessante osservare come nella stessa stazione ma nel periodo estivo (*Figura 6.30-b*) il delta di PM₁₀ sia molto inferiore. Le durate di queste due campagne sono diverse, ma è comunque possibile individuare un trend confrontabile. Come già discusso, la stabilità atmosferica e le condizioni meteo-climatiche del periodo invernale provocano generalmente un incremento di concentrazioni di particolato aerodisperso. L'innalzamento delle concentrazioni rispetto alla stagione estiva, infatti, viene registrato in entrambe le stazioni, ma, essendo Montanaro un'area molto meno antropizzata, l'aumento delle concentrazioni di particolato a causa delle emissioni

caratteristiche di questo periodo stagionale viene registrato in maniera più importante nella stazione urbana del CC-Green-Roof.

7 Conclusioni

Il presente elaborato rientra all'interno della tematica di interesse attuale e rilevante dell'inquinamento atmosferico. In particolare, questo lavoro di Tesi si è inserito a supporto del progetto del Modulo AQ del CC-Moving-Lab, che è in fase di completamento da parte del gruppo di ricerca di Sicurezza Ambientale, grazie ai fondi ricevuti dal Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI) del Politecnico di Torino attraverso l'iniziativa "Dipartimenti di Eccellenza 2018-2022" del MIUR.

In merito alla strumentazione oggetto di analisi sono stati riassunti e aggiornati gli aspetti definiti negli studi precedenti a questo sull'allestimento del modulo AQ del CC-Moving-Lab (§4.1). Una volta ultimato, sarà in grado di monitorare PM, NO_x, O₃ e condizioni meteorologiche del sito in cui verrà posizionato, attraverso le modalità indicate dalle norme tecniche. A tal scopo verranno impiegati due analizzatori ottici, un campionatore gravimetrico, un analizzatore a chemiluminescenza, un analizzatore a fotometria ultravioletta, una sonda per i gas e una stazione meteo. Sono state analizzate le caratteristiche degli strumenti appena citati (§4.2), con particolare attenzione ad accorgimenti e criticità nell'installazione e gestione degli strumenti, emerse durante la partecipazione alla fase di precollaudo, ed è stato descritto il loro impiego nelle campagne di misura dall'estate 2019 a novembre 2020. Alcune delle apparecchiature che faranno parte del modulo AQ, infatti, sono già state ampiamente sfruttate in maniera stabile e continuativa nel laboratorio a cielo aperto del CC-Green-Roof del Politecnico di Torino, dove sono attualmente operative, e in maniera intermittente nelle campagne di misura fuori dall'area urbana di Torino.

In ottica del futuro utilizzo del modulo AQ e per trattare le serie di dati grezzi già registrati dagli strumenti attivi, è emersa la necessità di sviluppare un sistema in grado di elaborare i file grezzi degli strumenti e processarli in modo tale da ricavare output chiari, uniformi e facilmente confrontabili. Per questo motivo è stato sviluppato un programma tramite il linguaggio di programmazione Python (§1), che tratta i dati in uscita dagli strumenti APM2, FIDAS e stazione meteo, essendo questi gli strumenti attualmente attivi sul CC-Green-Roof e quindi sfruttabili per la scrittura del programma in maniera ottimale, accurata e specifica per ognuno. Siccome nel modulo AQ saranno presenti anche gli analizzatori di NO_x e O₃, se si vorrà sfruttare il programma realizzato, sarà necessario in futuro, una volta operativa tutta la strumentazione, sviluppare un'integrazione di queste parti. Nello specifico, la prima parte del sistema redatto, il Programma 0 (§5.1), è in grado di acquisire i file grezzi degli strumenti e di effettuare le medie orarie e giornaliere dei dati, riportandole nel file excel di output. Permette filtraggi manuali da parte dell'operatore ed esegue processi di diagnostica automatici che depurano i dati da eventuali anomalie o insufficienti coperture temporali, migliorando in maniera intelligente la qualità del dato. Restituisce, inoltre, un file report di testo che segnala gli errori individuati all'interno delle serie di dati, riconducibili a malfunzionamenti di specifiche parti dello strumento o ad anomalie e salti temporali causati dalle condizioni al contorno. Questo report contribuisce in maniera importante alla comprensione da parte dell'operatore delle cause di valori inaspettati riscontrati ed ha, infatti, lo scopo di ottimizzare l'analisi delle serie di dati e delle valutazioni che possono emergere a riguardo. Il Programma 1 (§5.2) permette di inserire i file processati nel Programma 0 all'interno di un database comune, che mantiene il dettaglio di frequenza temporale dei minuti, oraria e giornaliera. Infine, tramite il Programma 2 (§5.3), è possibile realizzare grafici che permettano il confronto dei dati e stimolino in maniera più diretta la discussione dei risultati ottenuti.

Successivamente, è stato sfruttato il programma sviluppato per effettuare un'analisi spaziale dei parametri di qualità dell'aria, mettendo a confronto diversi strumenti in vari contesti. In particolare, sono stati confrontati i dati raccolti dagli strumenti collocati nel CC-Green-Roof del Politecnico (APM2, FIDAS e stazione meteo), in contesto urbano, e quelli collezionati nelle campagne di misura effettuate dall'estate 2019 a novembre 2020. Queste campagne fanno riferimento a contesti suburbani (nel caso della strisciata

suburbana estiva e invernale, quindi nelle località di Volpiano, Montanaro e Mazzè) e rurali (campagne di Cantalupa e Frossasco, San Giorio e Salbertrand) e sono state condotte attraverso l'analizzatore ottico di particolato APM2.

La campagna di Cantalupa e Frossasco (§6.1), condotta in zona rurale a seguito di un incendio, ha avuto lo scopo di valutare in che modo l'evento avesse modificato la qualità dell'aria nelle aree dei due comuni. Soprattutto nel primo periodo, in cui l'incendio non era stato ancora dichiarato estinto, sono stati registrati mediamente valori di PM_{2.5} e PM₁₀ maggiori del Politecnico, con alcuni picchi di concentrazione nella mattina. La brezza di valle caratteristica del mattino può aver contribuito al trasporto di particelle aerodisperse dal sito in cui è divampato l'incendio verso le stazioni in esame, che si trovano a quote più elevate. Successivamente, grazie alla progressiva estinzione dell'incendio, è stato registrato un delta di concentrazione tra il Politecnico e la zona rurale stabilizzato intorno a valori nulli.

La strisciata suburbana estiva (§6.2) è la campagna di misura durante la quale sono stati raccolti i dati misurati nelle zone di Volpiano, Montanaro e Mazzè. I valori di concentrazione di PM₁₀ nelle stazioni di Mazzè e Montanaro sono principalmente inferiori a quelle del Politecnico, come ci si aspetta in zone suburbane, dove le emissioni dovute alle attività antropiche sono inferiori. A Volpiano, però, sono state registrate concentrazioni di PM₁₀ maggiori dell'area urbana, presumibilmente a causa di alcune condizioni al contorno che non sono state valutate nel momento dell'installazione dello strumento, come la presenza a circa 400 m di un'area di deposito di sabbia, ghiaia e materiali inerti di un'azienda che si occupa di escavazioni e movimento terra. Il delta di concentrazione di PM₁₀ tra il Politecnico e Montanaro, nonostante abbia un andamento positivo, presenta un picco negativo, riscontrato anche negli andamenti delle medie orarie e giornaliere, che potrebbe essere dovuto ad eventi legati alle attività agricole che vengono effettuate in zona e che comportano un rilascio di particolato primario.

La stazione di Montanaro è stata monitorata anche nel periodo invernale (§6.3), durante il quale si è registrato un elevato delta di concentrazione dei PM₁₀ tra il Politecnico e la zona rurale. Da marzo 2020, però, si osserva un decremento in questo delta di concentrazione. Ciò può essere ricondotto alle misure adottate per il contenimento e la gestione dell'emergenza epidemiologica da Covid-19. I PM₁₀ sono diminuiti, infatti, in

entrambe le stazioni, ma la diminuzione del delta suggerisce un più forte decremento nell'area urbana del Politecnico. Montanaro, essendo un'area suburbana, registrava un'attività antropica già più bassa dell'area urbana, quindi, nel momento di interruzione delle attività, la maggiore diminuzione di concentrazione dovuta all'arresto delle principali sorgenti si è registrata al Politecnico.

Durante la campagna di San Giorio (§6.4) si sono riscontrate delle anomalie nelle concentrazioni di PM10, che riportavano valori parecchio bassi rispetto alle altre campagne condotte. Grazie alla collaborazione con studi condotti in parallelo, infatti, è emerso che l'APM2 utilizzato per questa campagna di misura ha riscontrato una sottostima dei valori di concentrazione di PM10. Si suppone che questo sia dovuto ad un probabile evento dannoso nel quale è stato coinvolto lo strumento nel passaggio da Montanaro a San Giorio, in quanto in quest'ultima campagna si è verificato l'evento, che nella precedente non era emerso.

Visti i problemi riscontrati, l'ultima campagna di misura, nella zona rurale di Salbertrand (§6.5), è stata condotta attraverso un diverso modello di APM2, in particolare quello che era presente nel laboratorio del CC-Green-Roof. Per questo motivo, i dati dell'area rurale sono stati confrontati con l'altro analizzatore ottico di particolato presente al Politecnico, FIDAS. Le concentrazioni a Salbertrand benché abbiano valori inferiori a quelli dell'area urbana nel resto della giornata, presentano un picco preponderante nei valori di PM10, che superano nettamente quelli del Politecnico. Questo è dovuto alla posizione dello strumento in un'area non distante dalla quale sono presenti numerose zone di deposito di materiali inerti di aziende che si occupano di scavi e vendita di ghiaie e sabbie. Il forte incremento che si registra la mattina è quindi causa della movimentazione dei materiali in corrispondenza dei turni di lavoro, che generano una considerevole risospensione di particolato primario in atmosfera.

Infine, sono stati condotti confronti tra le diverse campagne di misura (§6.6), in merito alle quali è importante ricordare che hanno avuto durata differente, sono state effettuate in periodi dell'anno diversi e, quindi, la serie di dati relativa ad ogni stazione è caratterizzata da potenziali condizioni al contorno diverse, sia in termini meteorologici che di stabilità atmosferica. In tutte le stazioni sono stati confermati importanti eventi di rimozione del particolato aerodisperso in presenza di fenomeni rilevanti di precipitazione

o di notevoli velocità del vento. Grazie all'elevata risoluzione temporale degli strumenti è stato possibile valutare l'andamento medio delle concentrazioni di PM10 e PM2.5 nella giornata con passo orario. In tutti i confronti si può osservare un andamento oscillatorio della stazione del Politecnico tipico della zona urbana. La stabilità atmosferica e le emissioni, infatti, contribuiscono al picco che si registra nella mattina, che tende, invece, a diminuire nel pomeriggio, quando l'altezza di miscelazione raggiunge il suo massimo. Nelle zone suburbane e rurali, ad eccezione dei casi citati in cui sono emerse specifiche sorgenti emissive locali, questo andamento è meno accentuato. Sono stati apprezzati, inoltre, gli andamenti delle concentrazioni medie dei diversi giorni della settimana. Nelle campagne condotte nelle finestre temporali primaverile 2019, estiva 2020 e autunnale 2020 si sono confermati trend di concentrazioni maggiori nei giorni lavorativi rispetto al fine settimana, durante il quale le attività antropiche sono generalmente ridotte. La campagna di Montanaro, intrapresa tra gennaio e marzo 2020, ha riportato, invece, un netto minimo nella giornata di mercoledì. Questo potrebbe essere frutto della maggiore stabilità atmosferica caratteristica del periodo invernale, durante il quale la ridotta radiazione solare in termini di tempo e intensità rallenta i processi di abbattimento del particolato aerodisperso provocando una prolungata permanenza dei PM in aria. Questo aspetto, però, è influenzato da diversi fattori e non sufficientemente giustificabile con i dati a disposizione per questo lavoro di tesi, che si riferiscono a campagne di pochi mesi l'una. Necessiterebbe, quindi, di ulteriori studi e approfondimenti.

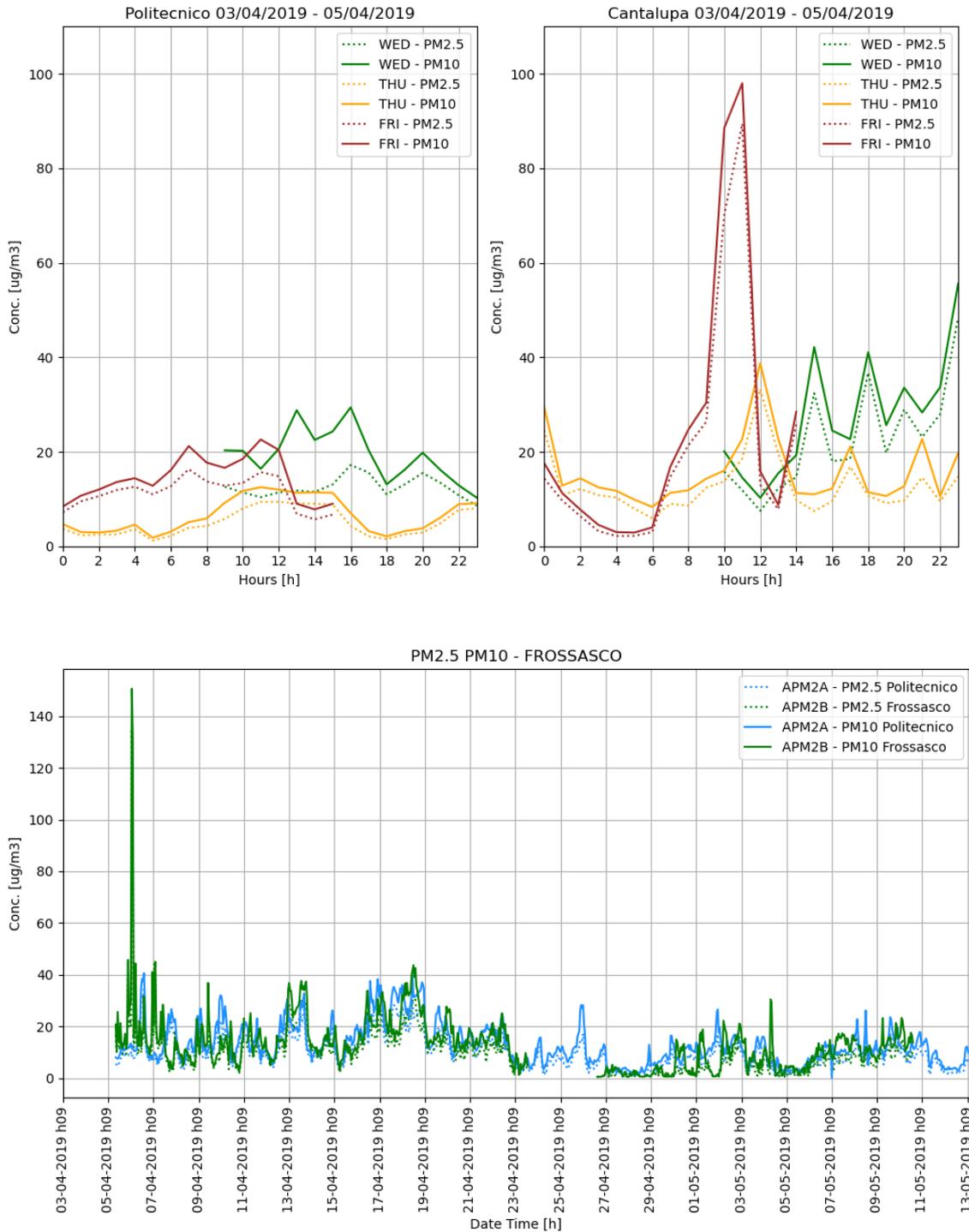
Mentre i delta di concentrazione di PM10 tra il Politecnico e le zone oggetto di misurazioni sono già stati discussi per le singole stazioni di misura e presentano comunque concentrazioni diverse tra le aree urbana e suburbane/rurali, il delta riferito ai PM2.5 registra valori che oscillano sempre intorno a zero. Questo indica una distribuzione della concentrazione di PM2.5 sostanzialmente equivalente tra la zona urbana e suburbana/rurale. La concentrazione di questa frazione, infatti, è influenzata dalle condizioni orografiche e meteorologiche della Pianura Padana, che favoriscono un accumulo non indifferente della stessa su tutta l'area, e dalla natura dei PM2.5 che ne rende l'abbattimento tramite i meccanismi di rimozione più difficoltoso rispetto ai PM10. Durante la campagna di Montanaro si raggiungono perfino concentrazioni di PM2.5 maggiori rispetto al Politecnico. Questo potrebbe essere infatti ricondotto alla posizione

di Montanaro in direzione Nord-orientale rispetto a Torino, più esposta quindi alle elevate concentrazioni invernali che si registrano in Pianura Padana.

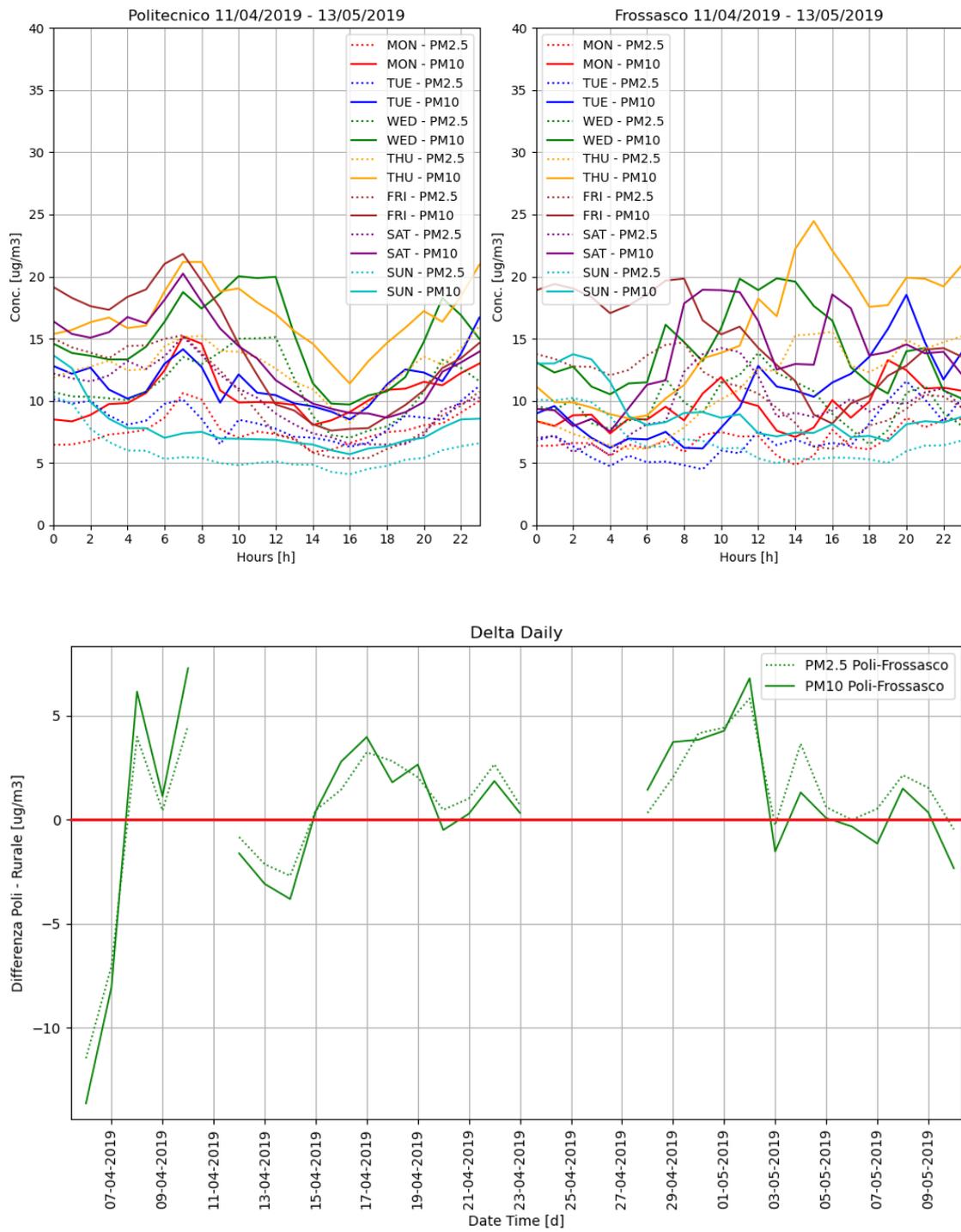
Viste le osservazioni fatte sui risultati ottenuti, emerge la complessità dell'individuazione dei contributi che le diverse sorgenti possono avere sull'inquinamento atmosferico e la coesistenza di fattori che concorrono a determinare le dinamiche degli inquinanti all'interno dell'atmosfera. A tal proposito, risultano di particolare interesse le stazioni mobili come il Modulo AQ del CC-Moving-Lab, per effettuare studi approfonditi e sito specifici in aree che non vengono normalmente monitorate dalle stazioni delle agenzie regionali e nazionali. Il Modulo AQ del CC-Moving-Lab fornirà, quindi, un contributo essenziale in termini di flessibilità e frequenza temporale del dato per il monitoraggio dei parametri relativi alla qualità dell'aria

APPENDICI

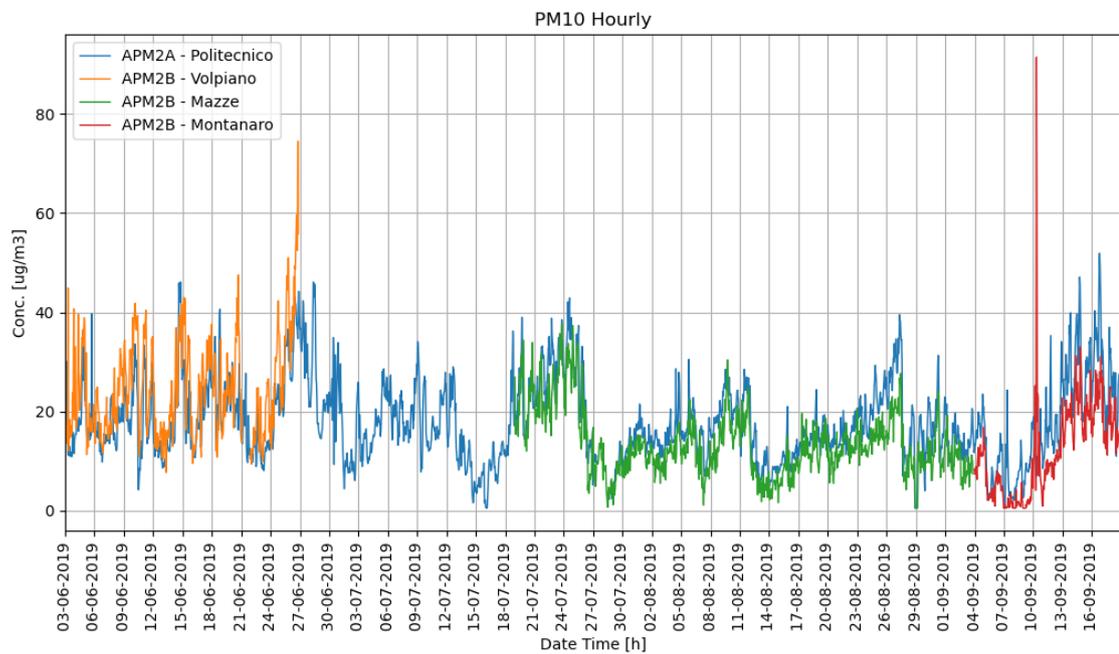
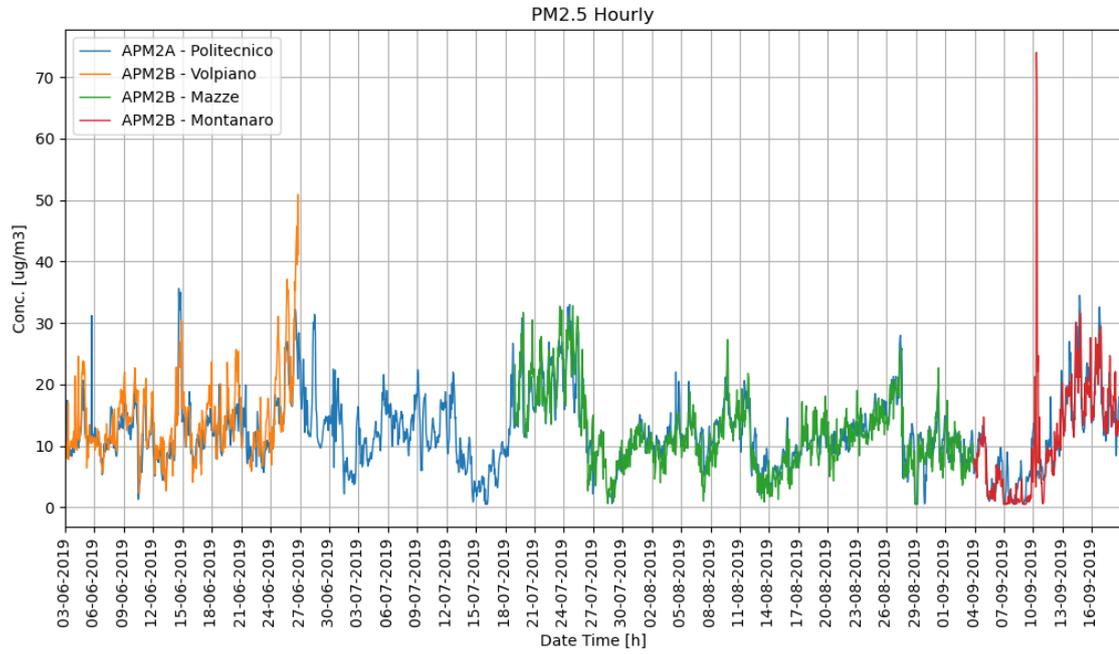
APPENDICE I – Cantalupa e Frossasco

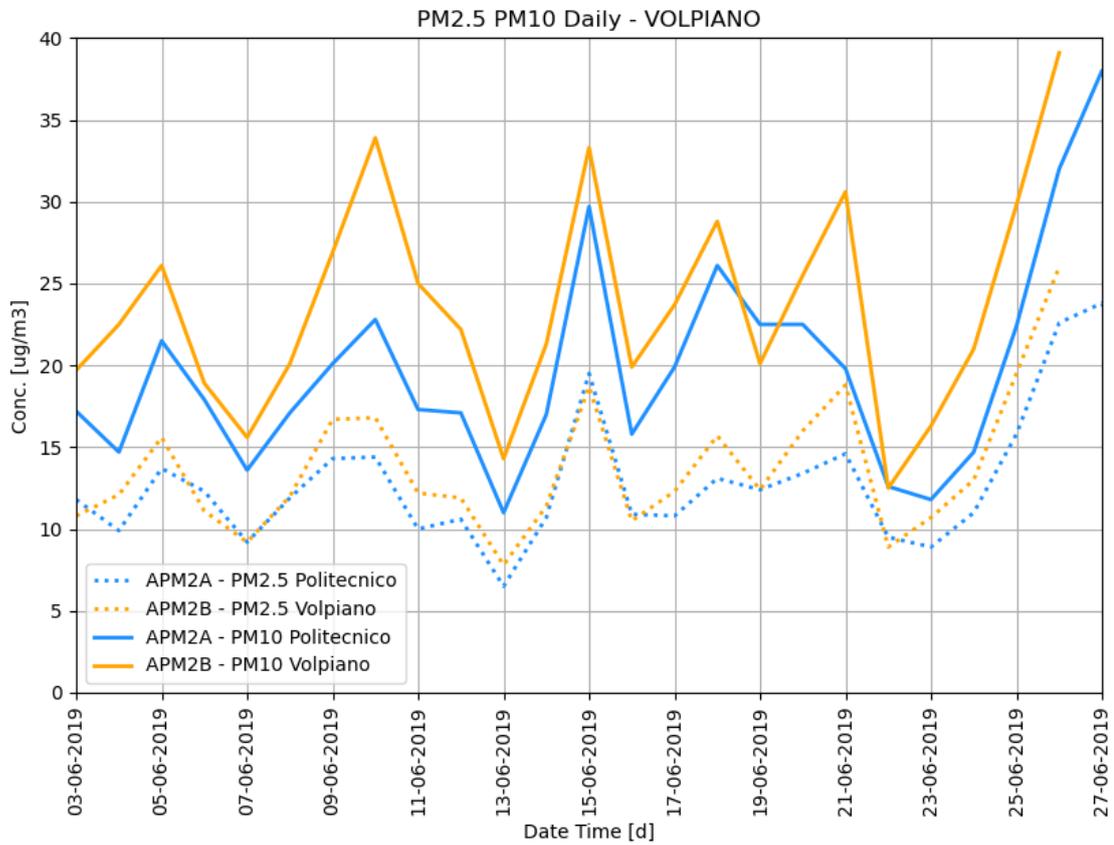
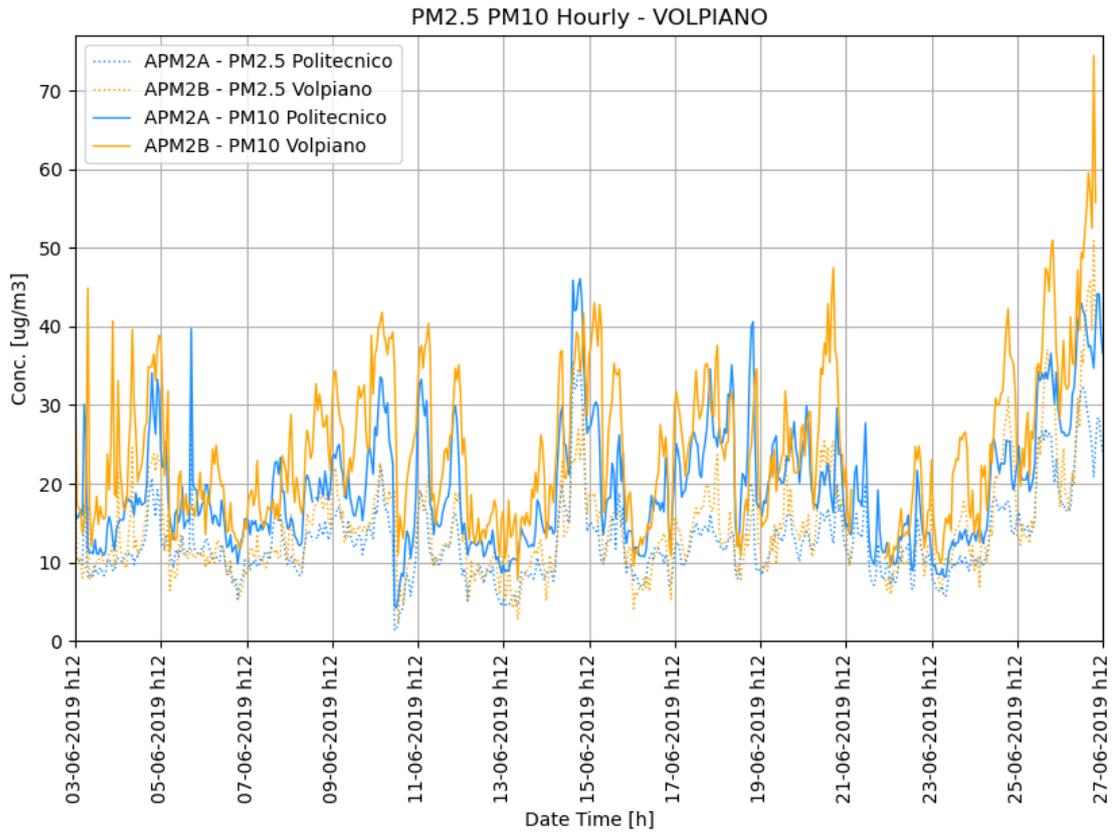


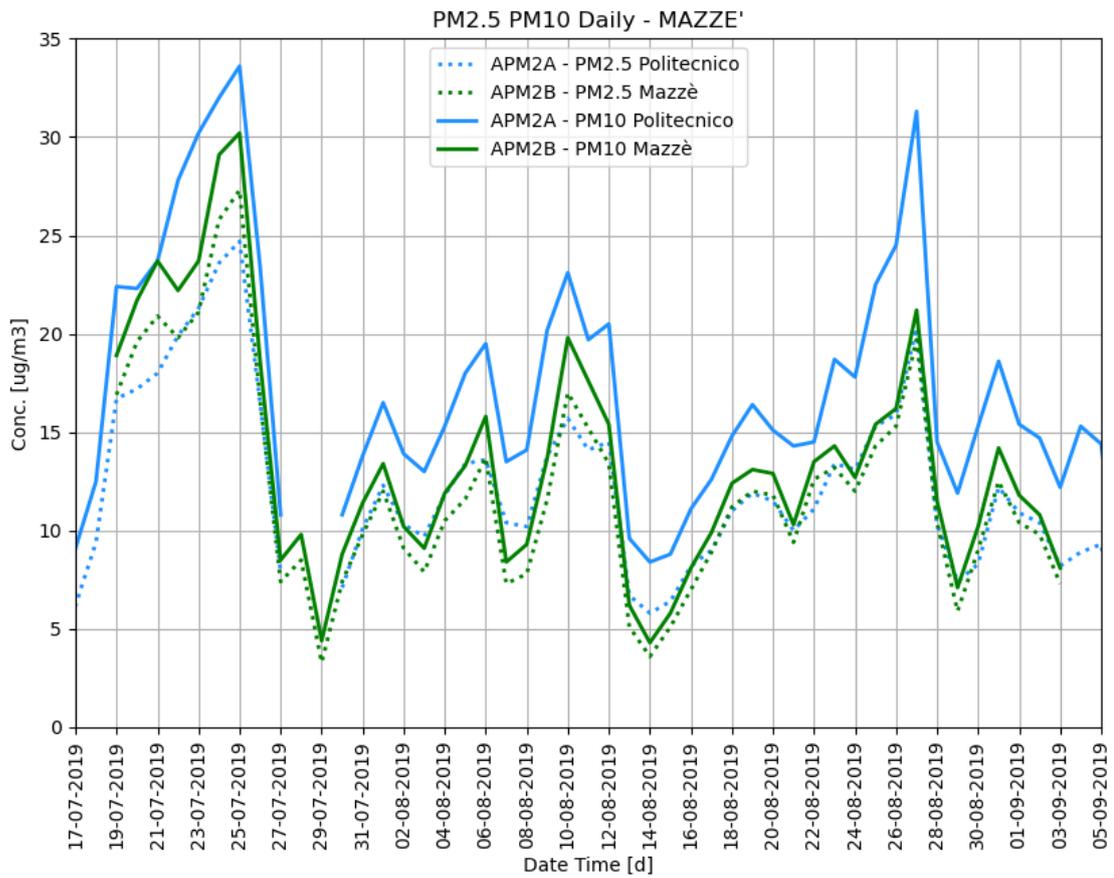
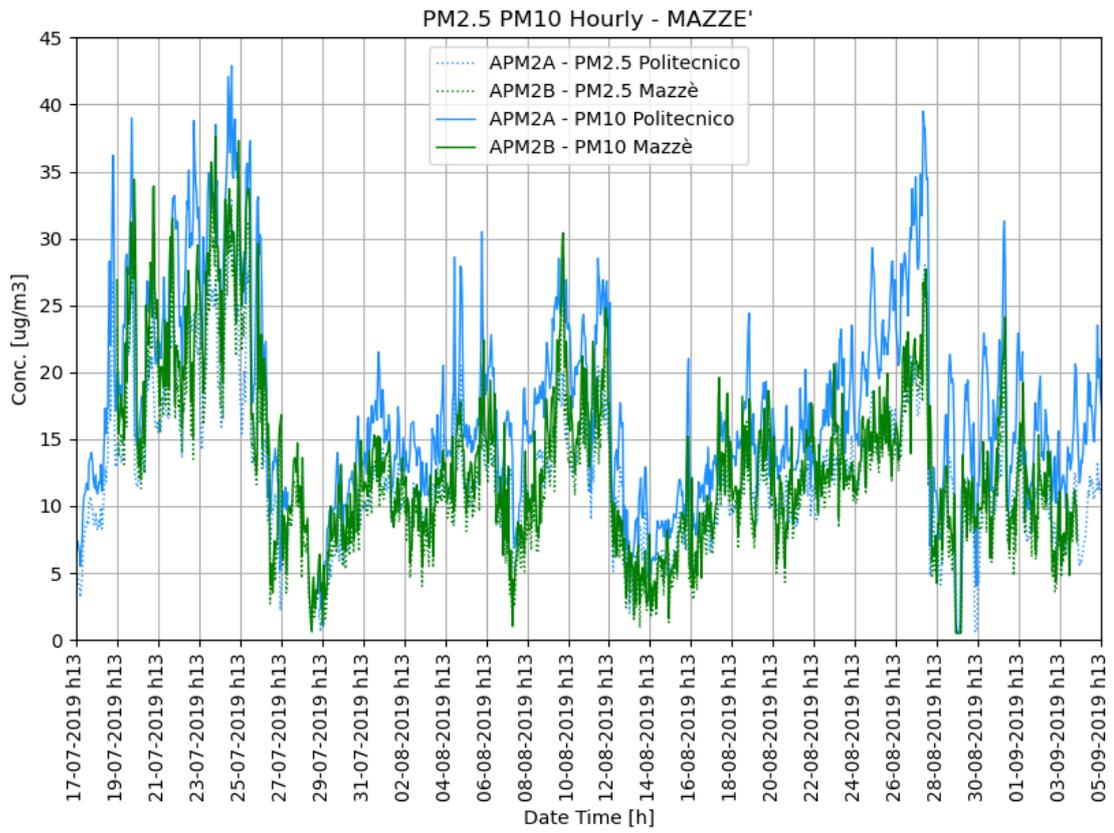
Appendici

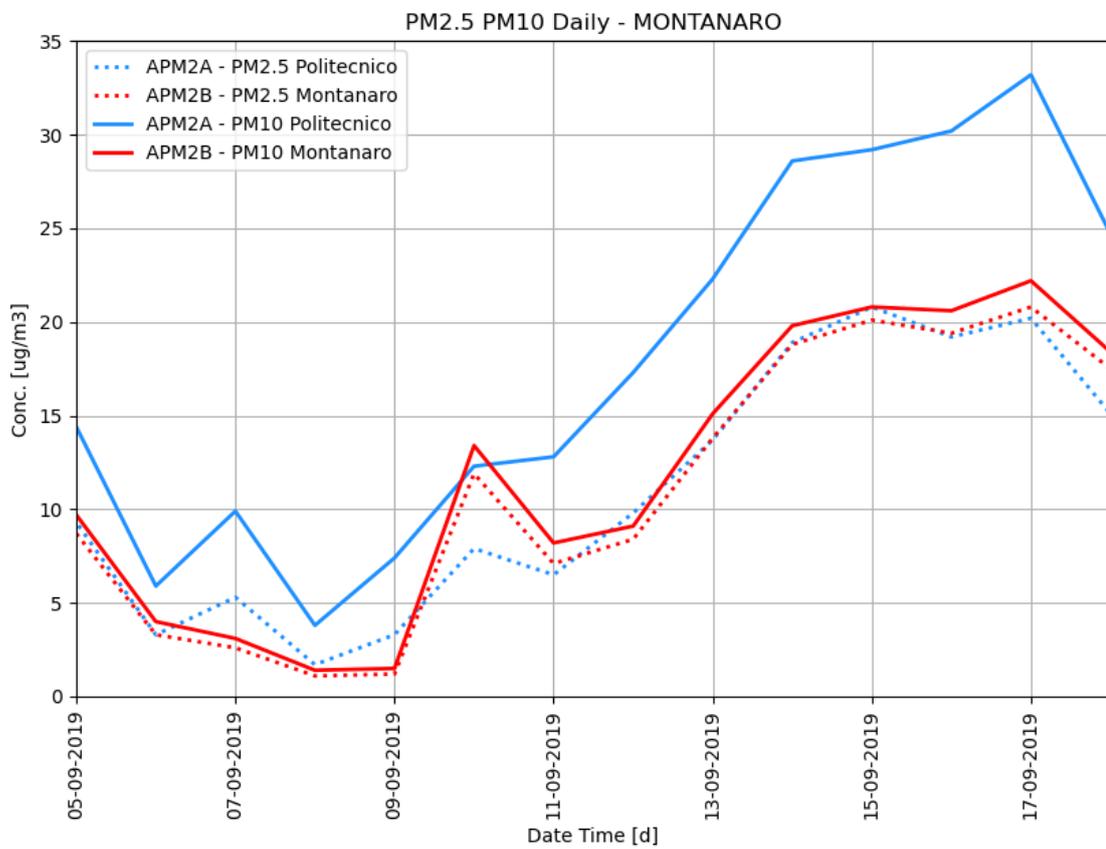
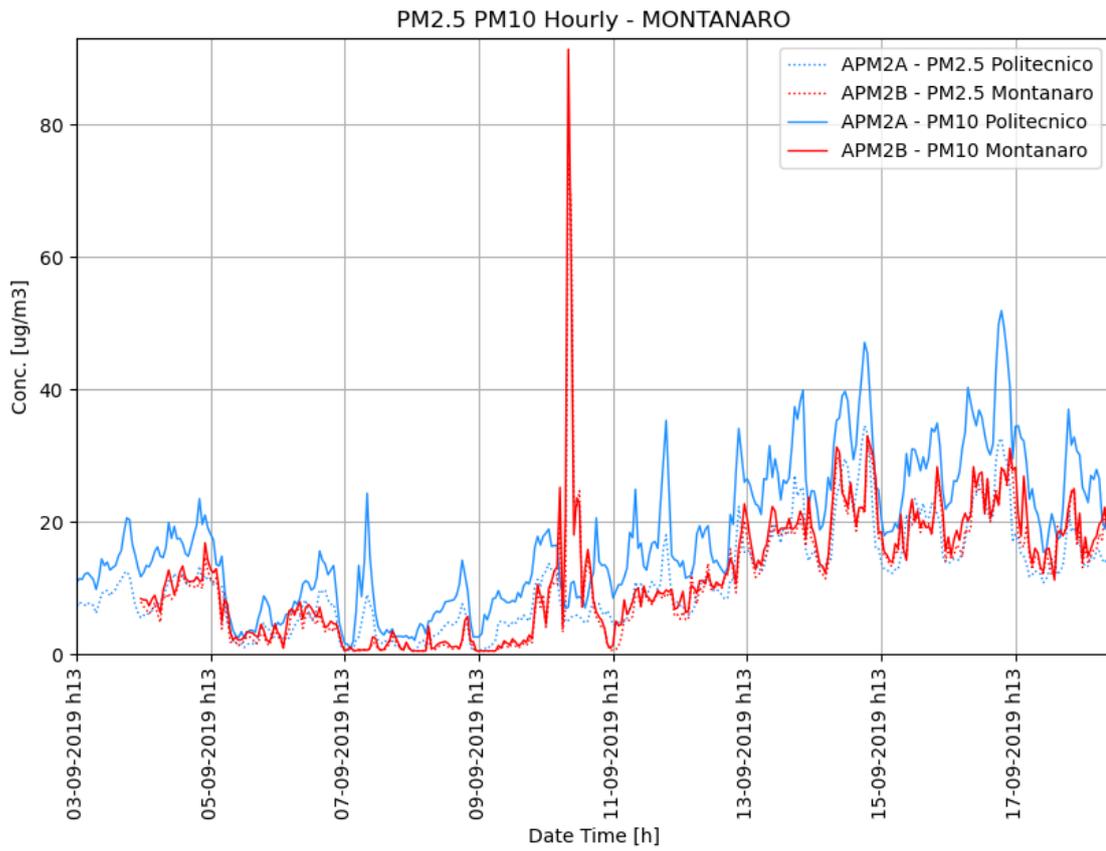


APPENDICE II – Strisciata suburbana estiva

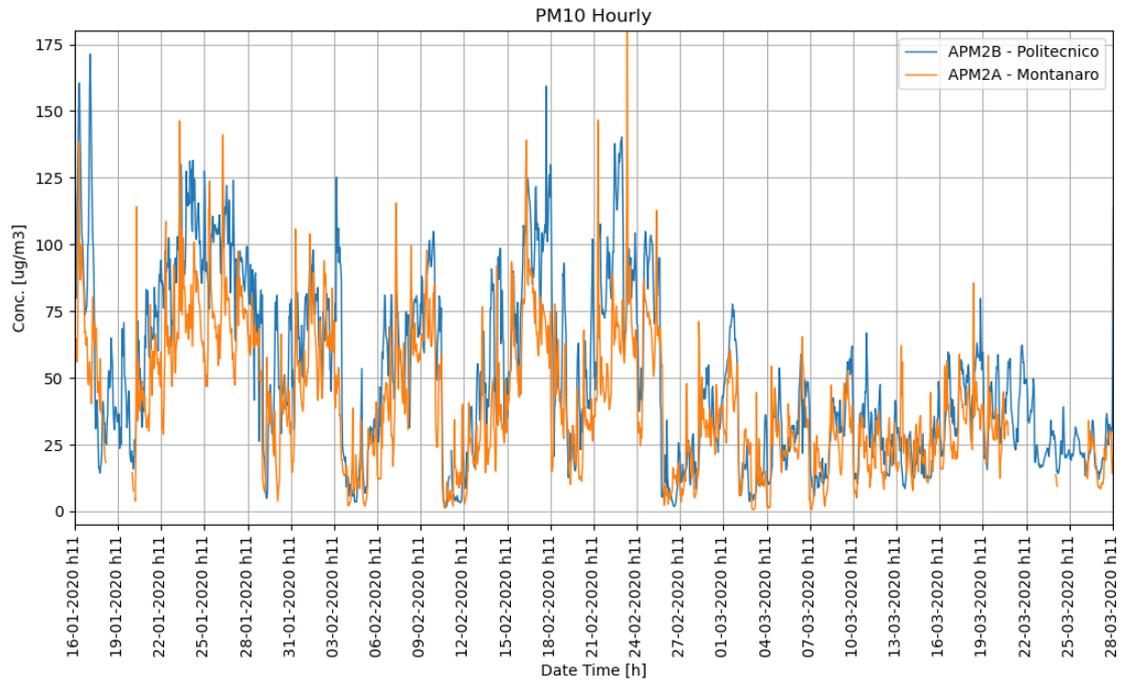
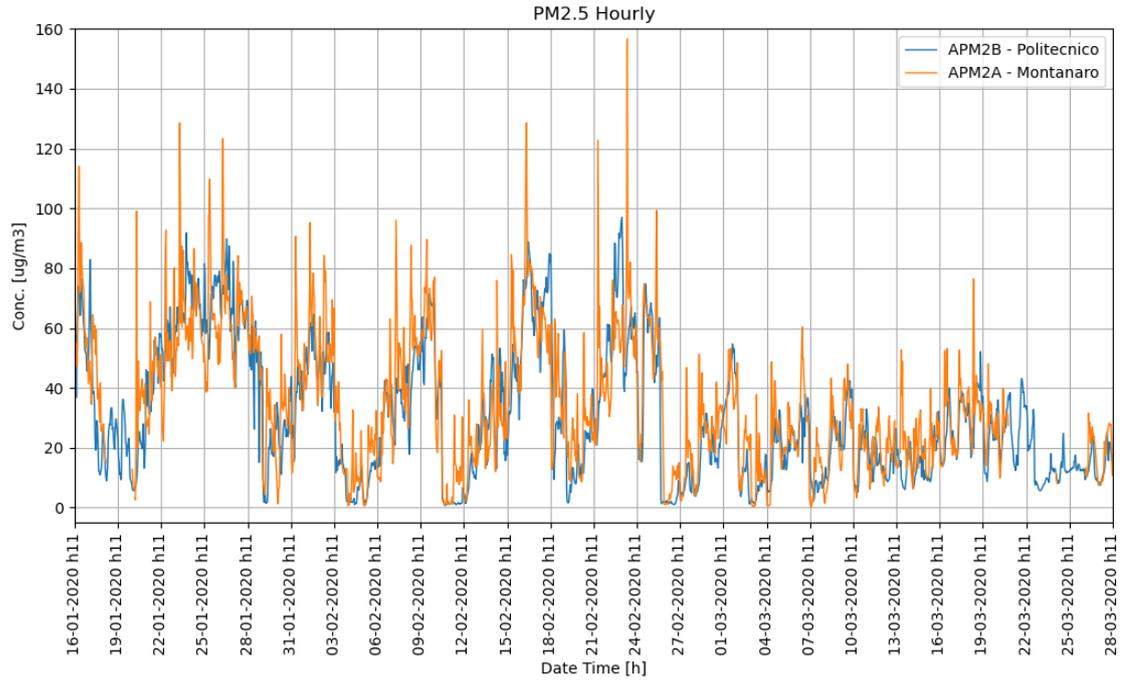


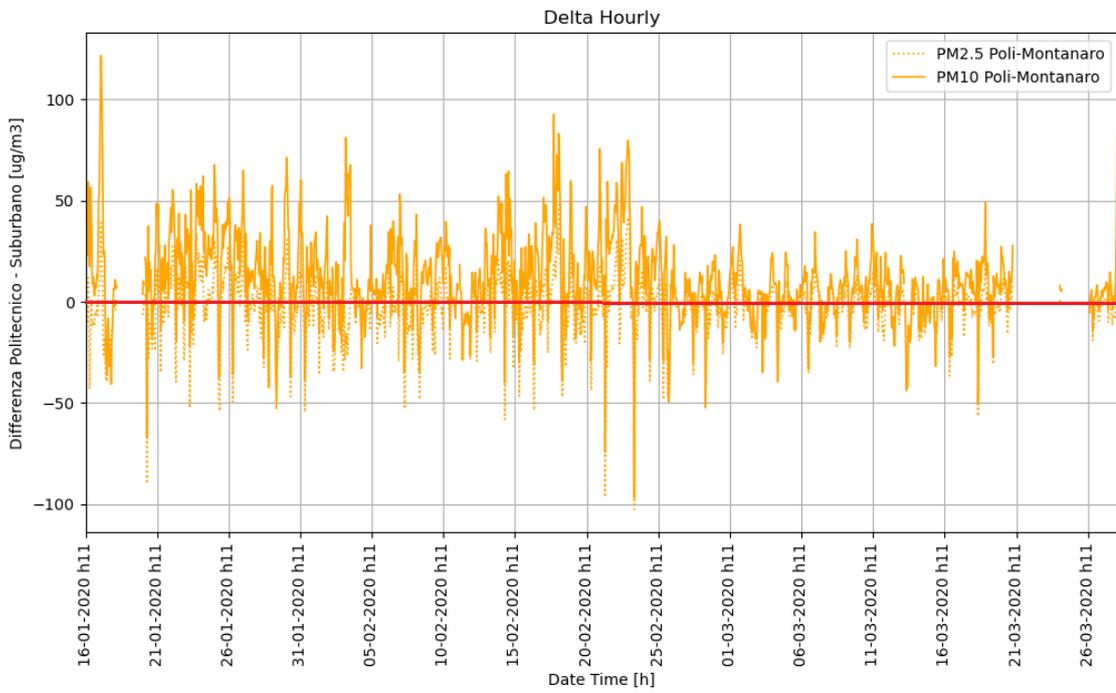
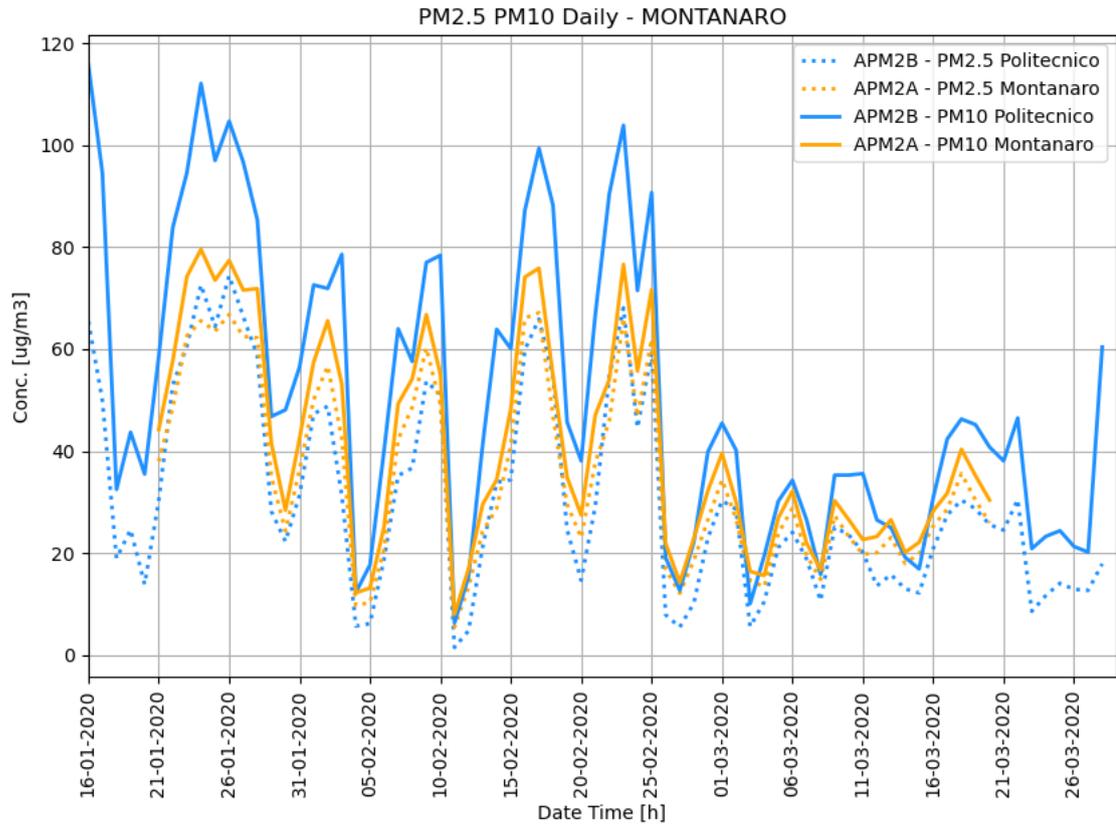




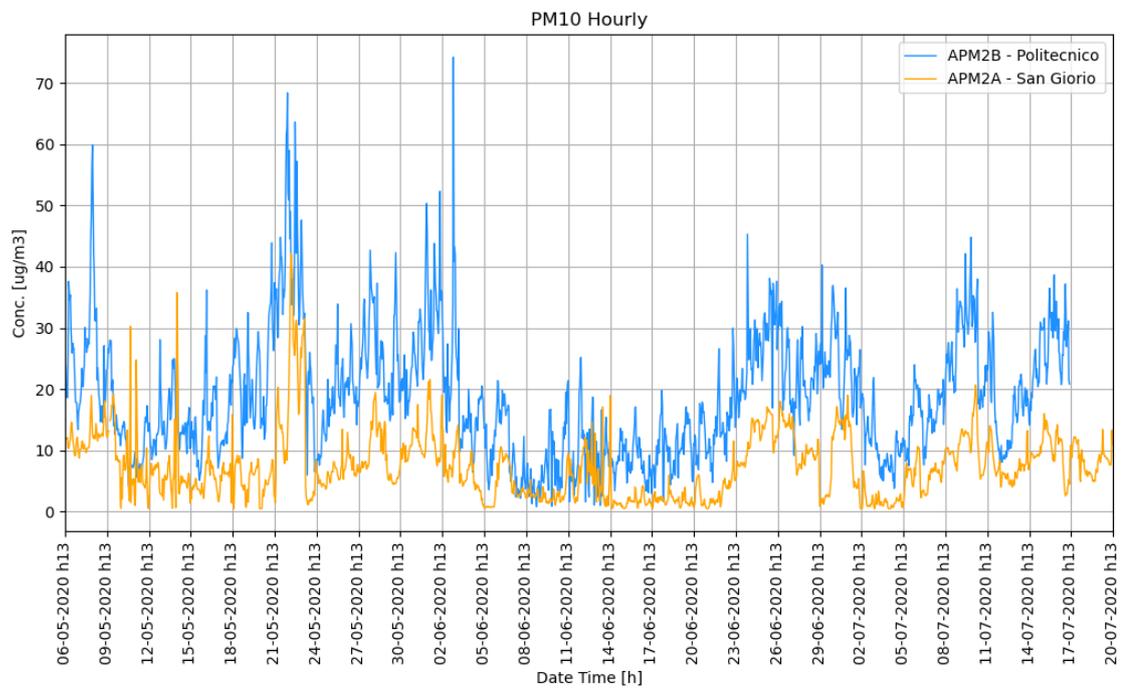
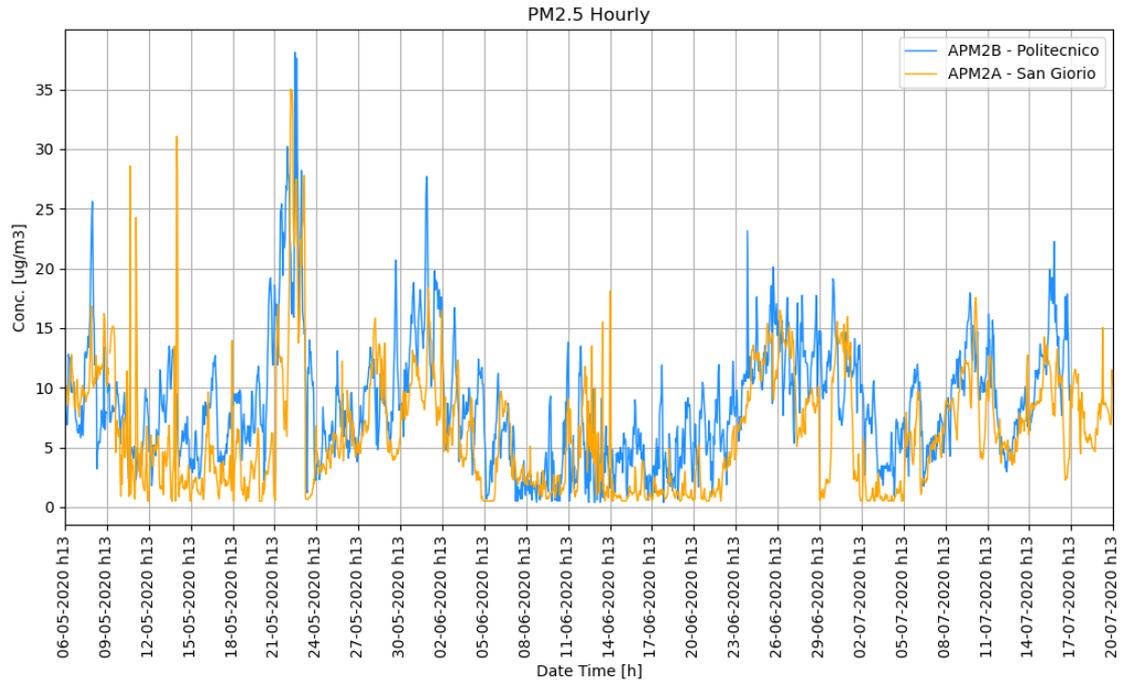


APPENDICE III – Strisciata suburbana invernale

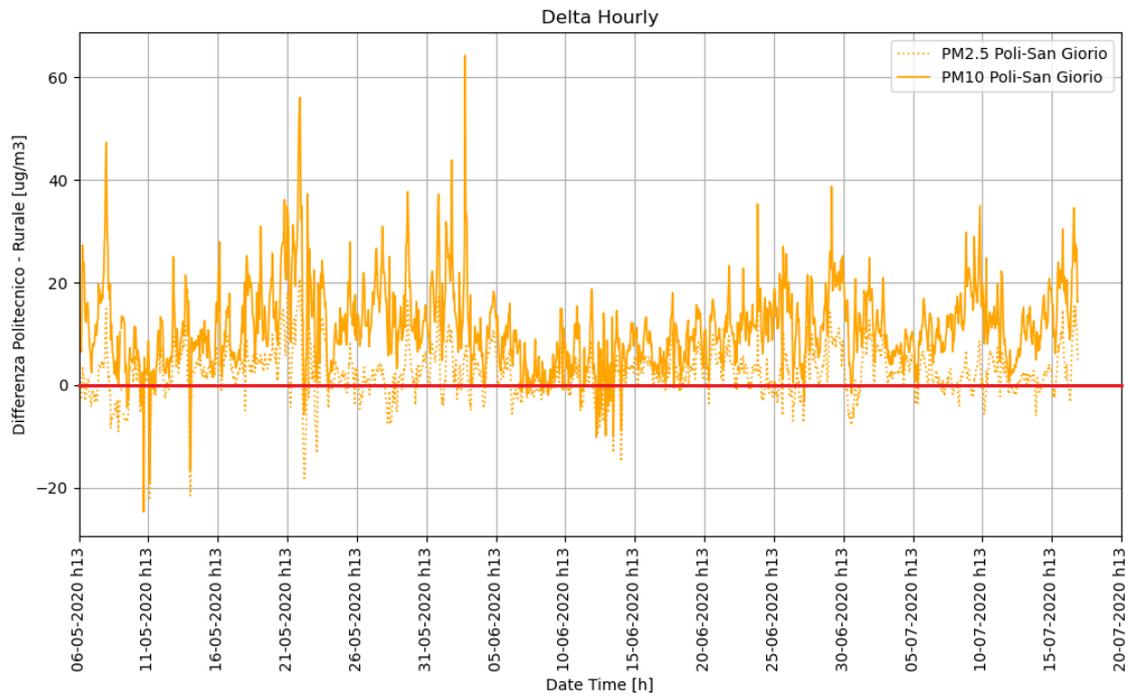
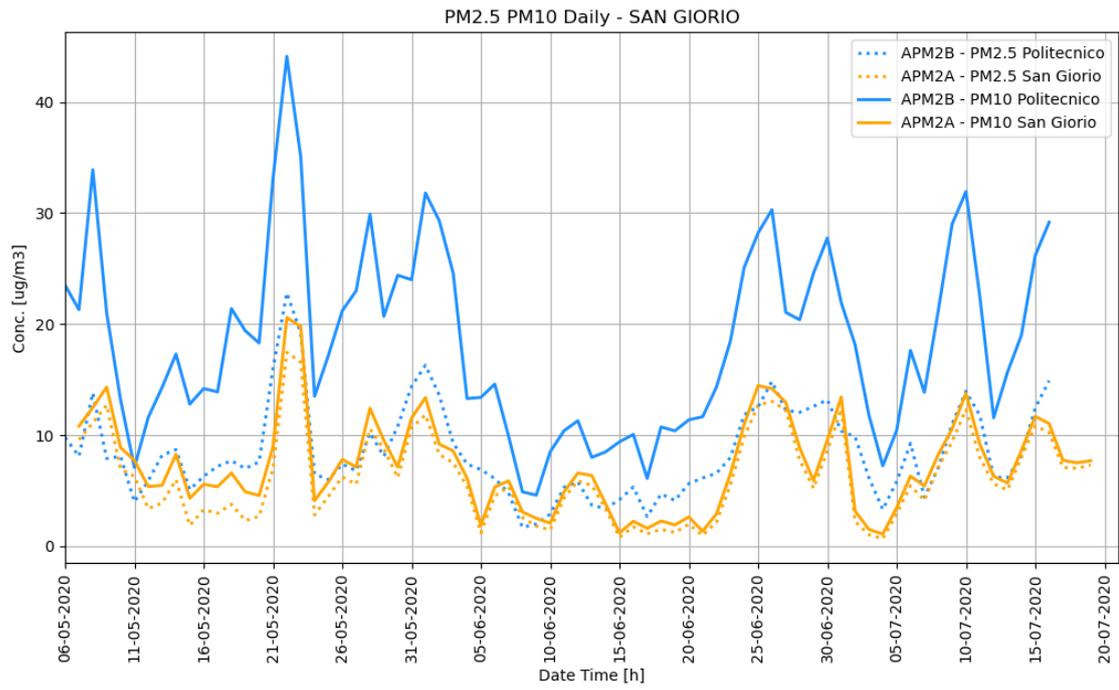




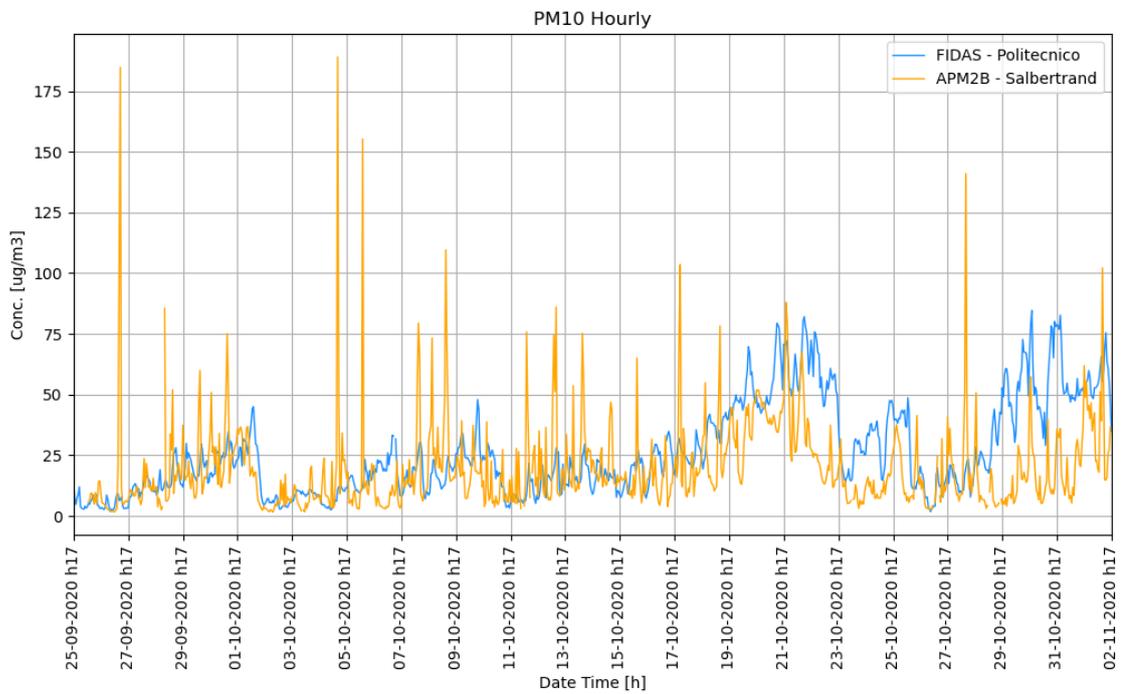
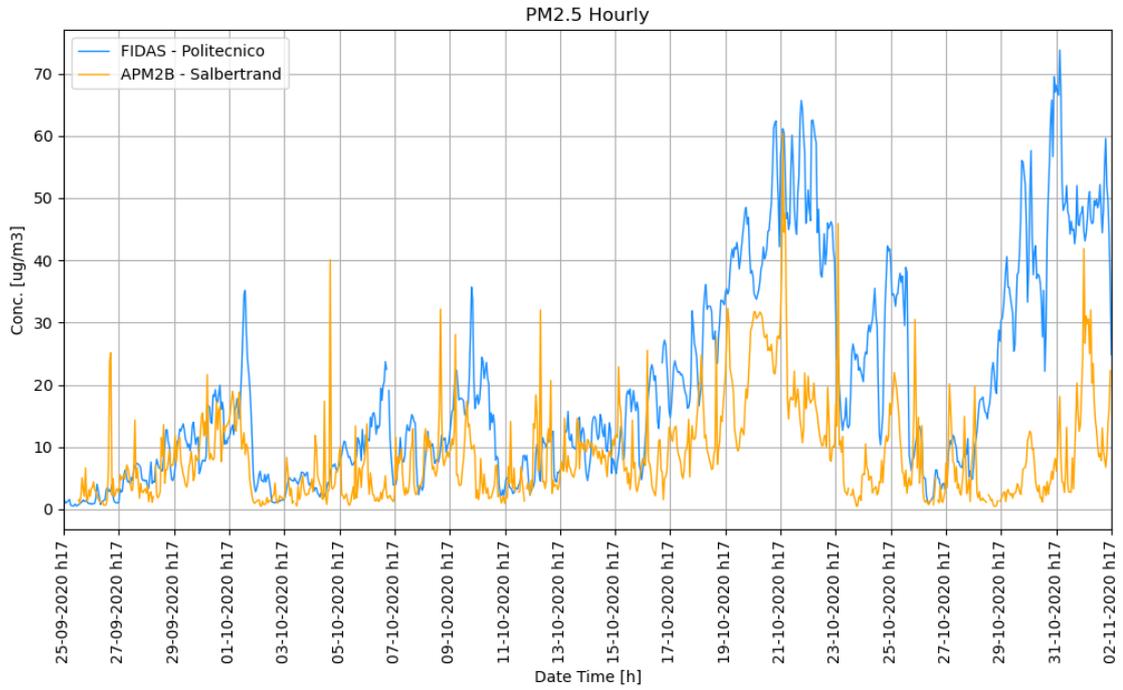
APPENDICE IV – San Giorio



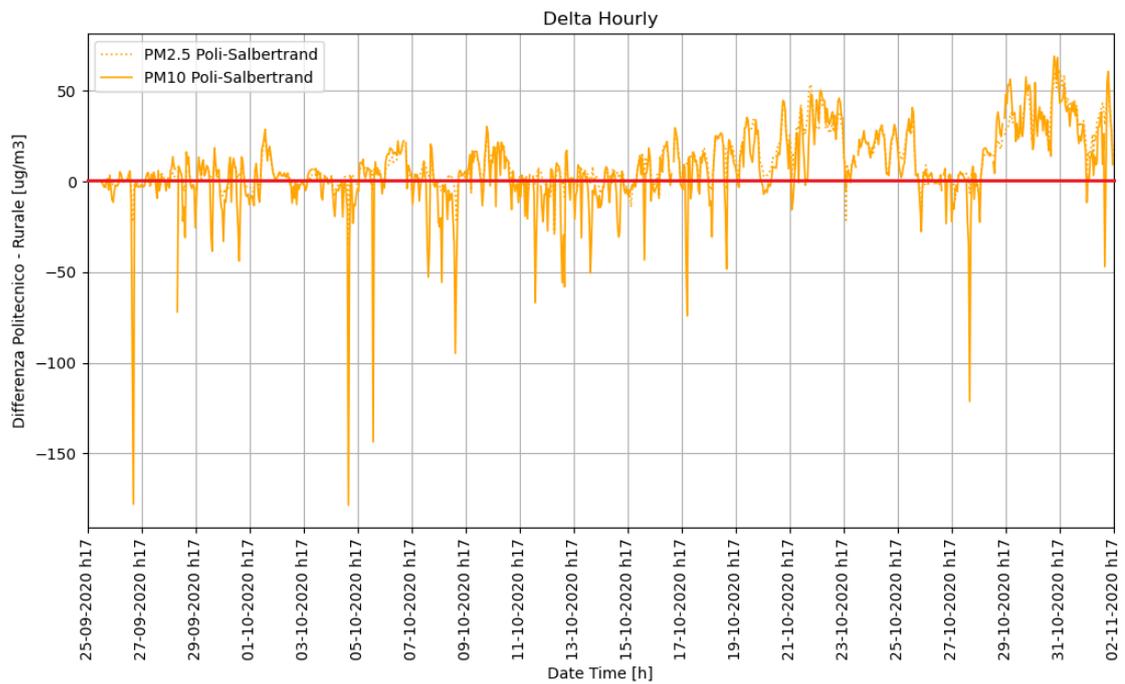
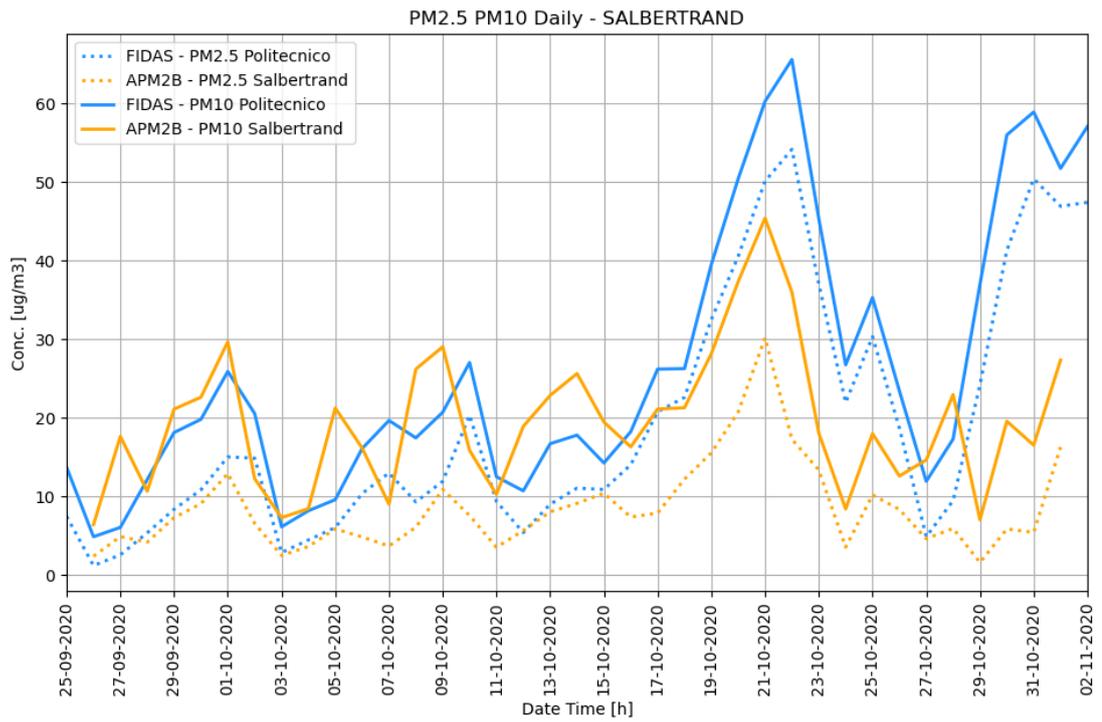
Appendici



APPENDICE V – Salbertrand



Appendici



RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] World Health Organization, *Personal interventions and risk communication on air pollution*, Ginevra, Svizzera, 2020.
- [2] Health Effects Institute, *State of Global Air 2020*, Boston (MA), 2020.
- [3] United Nations, «Department of Economic and Social Affairs - Sustainable Development,» [Online]. Available: <https://sdgs.un.org/goals>.
- [4] World Health Organization. [Online]. Available: <https://www.who.int/news/item/02-05-2018-9-out-of-10-people-worldwide-breathe-polluted-air-but-more-countries-are-taking-action>.
- [5] cmcc, «La sostenibilità ai tempi del Covid-19. L'aria che respiriamo, il clima che viviamo,» 18 11 2020. [Online]. Available: <https://www.cmcc.it/it/articolo/la-sostenibilita-ai-tempi-del-covid-19-laria-che-respiriamo-il-clima-che-viviamo>.
- [6] L. Setti, F. Passarini, G. De Gennaro, A. Di Gilio, P. Jolanda, P. Buono, G. Fornari, M. G. Perrone, A. Piazzalunga, P. Barbieri, E. Rizzo e A. Miani, *POSITION PAPER: Relazione circa l'effetto dell'inquinamento da particolato atmosferico e la diffusione di virus nella popolazione*, 2020.
- [7] S. Steinle, S. Reis e C. E. Sabel, «Quantifying human exposure to air pollution—Moving from static monitoring to spatio-temporally resolved personal exposure assessment,» *Science of the Total Environment*, vol. 443, pp. 184-193, 2013.

-
- [8] J. H. Seinfeld e S. N. Pandis, *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*, Wiley-Interscience, 2006.
- [9] European Environment Agency, *Air quality in Europe - 2019 report*, Luxembourg, 2019.
- [10] ARPA Lombardia, «Qualità dell'aria - Progetto Bacino Padano,» [Online]. Available: <https://www.arpalombardia.it/Pages/Aria/Aria-Progetti/Progetto-Bacino-Padano.aspx>.
- [11] M. Bo, *Study of aerosols air pollution assessments in indoor and outdoor environments based on measuring and modelling approaches*, Politecnico di Torino, 2020.
- [12] «ISPRA - Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, "Qualità dell'aria", cap.3,» [Online].
- [13] «Legislazione sulla qualità dell'aria in Europa,» *Agenzia europea dell'ambiente*, 2013.
- [14] «European Commission - Clean Air,» [Online]. Available: https://ec.europa.eu/environment/air/index_en.htm.
- [15] «ARPA Veneto,» [Online]. Available: <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/aria>.
- [16] «ARPA Marche,» [Online]. Available: <https://www.arpa.marche.it/inquadramento-normativo>.
- [17] F. Formisano, *Metodologia di Misurazioni Indicative della qualità dell'aria: analisi della strumentazione di valutazione dei gas e confronto sperimentale della strumentazione in moving lab*, Politecnico di Torino, 2018.
- [18] R. G. Barry, R. J. Chorley e M. C. Serreze, *Atmosphere, Weather and Climate*, Taylor & Francis Group, 2009.

-
- [19] J. R. Holton, P. H. Haynes, M. E. McIntyre, A. R. Douglass, R. B. Rood e L. Pfister, «Stratosphere-troposphere exchange,» *Reviews of Geophysics*, pp. 403-439, 1995.
- [20] N. Bartolini, *Dinamiche di formazione, nuova formazione ed emissione di particelle ultrafini nel contesto urbano*, Politecnico di Torino, 2019.
- [21] I. Levy, U. Dayan e Y. Mahrer, «Differing atmospheric scales of motion and their impact on air pollutants,» *International Journal of Climatology*, vol. 30, n. 4, pp. 612-619, 2010.
- [22] A. Nugent, D. DeCou, S. Russell e C. Karamperidou, *Atmospheric Processes and Phenomenon*, Alison Nugent.
- [23] R. F. Weiner e R. A. Matthews, *Environmental Engineering*, 2003.
- [24] M. Czarnecka e J. Nidzgorska-Lencewicz, «Impact of weather conditions on winter and summer air quality,» *International Agrophysics*, vol. 25, pp. 7-12, 2011.
- [25] C. Paganelli, «Fondazione Osservatorio Meteorologico Milano Duomo,» 31 gen 2018. [Online]. Available: <https://www.fondazioneomd.it/single-post/2018/01/31/inversione-termica-di-cosa-si-tratta>.
- [26] X. Querol, M.-C. Minguillón e V. Mar, *Particulate Matter: Environmental Monitoring & Mitigation*, Future Science Ltd, 2013.
- [27] «Qualità dell'aria,» Città metropolitana di Torino, [Online]. Available: <http://www.cittametropolitana.torino.it/cms/ambiente/qualita-aria/rete-monitoraggio/stazioni-monitoraggio/pm10>.
- [28] M. C. Donato, «Il Particolato aerodisperso: le particelle ultrafini e i loro strumenti di misura. Analisi caso studio,» 2019.
- [29] «Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare,» [Online]. Available: <https://www.minambiente.it/pagina/gli-inquinanti>.
- [30] E. Molinaroli e M. Masiol, *Particolato atmosferico e ambiente mediterraneo. Il caso delle polveri sahariane*, 2006.

-
- [31] Y. Wu, J. Liu, J. Zhai, L. Cong, Y. Wang, W. Ma, Z. Zhang e C. Li, «Comparison of dry and wet deposition of particulate matter in near-surface waters during summer,» *PloS ONE*, vol. 13, n. 6, 2018.
- [32] I. Lagzi, R. Mészáros, G. Gelybò e A. Leelossy, *Atmospheric chemistry*, Hungary, Eotvos Lorànd University, 2013.
- [33] N. A. Marley e J. S. Gaffney, «Introduction to Urban Aerosols and Their Impacts,» in *Urban Aerosols and Their Impacts*, Washington, DC, ACS Symposium Series, American Chemical Society, 2005.
- [34] Y. Zhu, W. C. Hinds, S. Kim, S. Shen e C. Sioutas, «Study of ultrafine particles near a major highway with heavy-duty diesel traffic,» *Atmospheric Environment*, vol. 36, pp. 4323-4335, 2002.
- [35] D. Campbell-Lendrum e A. Prüss-Ustün, «Climate change, air pollution and noncommunicable diseases,» *Bulletin of the World Health Organization*, pp. 160-161, 2019.
- [36] F. Karagulian, C. A. Belis, C. F. C. Dora, A. M. Prüss-Ustün, S. Bonjour, H. Adair-Rohani e M. Amann, «Contributions to cities' ambient particulate matter (PM): A systematic review of local source contributions at global level,» *Atmospheric Environment*, vol. 120, pp. 475-483, 2015.
- [37] F. Amato, M. Pandolfi, E. A., Q. X., A. Alastuey, P. J., N. Perez e P. Hopke, «Quantifying road dust resuspension in urban environment by multilinear engine: a comparison with PMF2,» *Atmospheric Environment*, vol. 43, pp. 2770-2780, 2009.
- [38] C. Belis, F. Karagulian, L. Bo e P. Hopke, «Critical review and meta-analysis of ambient particulate matter source apportionment using receptor models in Europe,» *Atmospheric Environment*, vol. 69, pp. 94-108, 2013.
- [39] EPA-United States Environmental Protection Agency, «Ground-level Ozone Basics,» [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#effects>.

-
- [40] J. Fishman, C. E. Watson, J. C. Larson e J. A. Logan, «Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data,» *Journal of Geophysical Research*, vol. 95, pp. 3599-3617, 1990.
- [41] ARPAE Emilia-Romagna. [Online]. Available: https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=118&idlivello=204.
- [42] European Environment Agency, «Nitrogen oxides,» [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/themes/air/air-quality/resources/glossary/nitrogen-oxides>.
- [43] World Health Organization, «Air pollution: Health impacts,» [Online]. Available: <https://www.who.int/airpollution/ambient/health-impacts/en/>.
- [44] WHO/Europe, *Review of evidence on health aspects of air pollution – REVIHAAP project: final technical report*, 2013.
- [45] A. Tsuda, F. S. Henry e J. P. Butler, «Particle transport and deposition: basic physics of particle kinetics,» 2013, p. 1437–1471.
- [46] ARPAE Emilia-Romagna, «Ossidi di azoto,» [Online]. Available: https://www.arpae.it/cms3/documenti/_cerca_doc/aria/ossidi_azoto.pdf.
- [47] ARPAE Emilia-Romagna, «Ozono - Effetti sulla salute,» [Online]. Available: https://www.arpae.it/dettaglio_generale.asp?id=121&idlivello=193.
- [48] Politecnico di Torino. [Online]. Available: https://www.diat.polito.it/focus/cambiamenti_climatici/cc_lab/cc_moving_lab.
- [49] Comde-Derenda GmbH, *Instruction Manual Air Pollution Monitor 2 (APM-2)*, <https://www.comde-derenda.com/>.
- [50] Palas GmbH, *Fine dust measurement device Fidas 200*, <https://www.palas.de/en/>.
- [51] Ecotech Pty Ltd, *Serinus 40 Oxydes of Nitrogen Analyser*, <https://www.ecotech.com/>.

-
- [52] Ecotech Pty Ltd, *Serinus 10 Ozone Analyser*, <https://www.ecotech.com/>.
- [53] Umwelttechnik MCZ GmbH, *Sequential Particulate Sampler MicroPNS Type LVS16*, <https://www.mcz.de/>.
- [54] Sartec - Saras Ricerche e Tecnologie Srl, *Sonda campionamento inquinanti gassosi*, <https://www.sartec.it/>.
- [55] Davis Instruments, *Vantage Pro2 and Vantage Pro2 Plus Stations*, <https://www.davisinstruments.com/vantage-pro2/tech-specs/>.
- [56] Python. [Online]. Available: <https://www.python.it/>.
- [57] TIOBE. [Online]. Available: <https://www.tiobe.com/tiobe-index/>.
- [58] *Resoconto problema fotometro APM2B avvenuto durante la campagna di misura presso Frossasco (11 aprile - 13 maggio)*, 2019.
- [59] D. Mecca, *Particolato aerodisperso e CC-Green-Roof-Lab: Sviluppo di uno strumento di gestione ed elaborazione del database delle acquisizioni urbane presso il Politecnico di Torino*, Politecnico di Torino, 2020.
- [60] G. Fileccia, *Andamento del particolato aerodisperso in correlazione agli incendi boschivi*, Politecnico di Torino, 2018.