

POLITECNICO DI MILANO

Corso di laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio



**LA CONCENTRAZIONE NUMERICA DI PARTICOLATO FINE
ATMOSFERICO NELLA CITTA' DI MILANO**

Relatore: Prof. Ing. Giovanni Lonati

Tesi di laurea di: Sangalli Daniela matricola n. 720937

ANNO ACCADEMICO 2009 - 2010

INDICE

Sommario	3
Abstract	4
1. Introduzione	5
2. Il particolato atmosferico	6
2.1 Definizioni.....	6
2.2 Presenza in atmosfera di particolato fine ed ultrafine nelle aree urbane.....	13
2.3 Origine del particolato atmosferico.....	18
2.3.1 Eventi di nucleazione.....	22
2.4 Meccanismi di rimozione del particolato atmosferico.....	25
2.5 Composizione chimica del particolato.....	26
2.6 Misura del particolato fine.....	30
2.6.1 Impattore gravimetrico.....	30
2.6.2 OPC e DMPS.....	31
2.6.3 Campionatori CPC.....	31
2.6.4 Analizzatori automatici.....	32
2.7 Effetti del particolato atmosferico.....	33
2.7.1 Effetti sulla salute umana.....	33
2.7.1.1. Effetti sulla salute umana del particolato fine e ultrafine.....	33
2.7.2 Effetti sul clima e sul microclima.....	41
2.7.3 Effetti sugli ecosistemi, su piante e animali.....	42
2.7.4 Effetti sulla visibilità.....	43
2.8 Cenni normativi.....	44
2.8.1 Linee guida OMS e legislazione europea.....	44
2.8.1.1. Milano:i sindaci contro le polveri sottili.....	47
2.8.2 Confronto tra limiti normativa e PM10 misurato nei capoluoghi lombardi.....	47
3. Materiali e metodi	52
3.1 Strumento di misura: ELPI - Impattore elettrico a bassa pressione.....	52
3.2 Siti e periodi di rilevamento.....	55
3.3 Caratterizzazione del periodo di rilevamento degli inquinanti atmosferici.....	57
3.4 Caratterizzazione meteorologica dei periodi di rilevamento.....	57
3.5 Scopo dell'analisi dei dati.....	58
4. Risultati e discussione	59
4.1 Evoluzione giornaliera delle concentrazioni numeriche di particolato.....	59
4.2 Confronto fra diversi siti di campionamento e fra le campagne di misura effettuate nel 2008 e nel 2009 per il sito Pascal.....	63
4.3 Eventi di nanoparticolato e ultrafine.....	69
4.4 Studio della correlazione con altri inquinanti.....	78
4.4.1 PM ₁₀ e PM _{2,5}	79

4.4.2 NO _x , O ₃ , SO ₂ e CO	80
4.5 Correlazione con i parametri meteorologici	86
4.5.1 Inquadramento meteorologico dell'area di studio	86
4.5.2 Radiazione solare, temperatura, umidità e velocità del vento.....	89
4.5.3 Precipitazione.....	93
4.6 Analisi dei giorni di pioggia.....	96
4.6.1 Caratteristiche e misure delle piogge	96
4.6.2 Meccanismi di rimozione del particolato attraverso deposizione umida e distribuzione granulometrica del particolato durante gli eventi piovosi.....	97
4.6.3 Analisi dei dati e obiettivi	99
4.6.3.1 Studio meteorologico	100
4.6.3.2 Eventi di pioggia	106
5. Conclusioni	127
ALLEGATI.....	130
I. Analisi giorno per giorno	130
II. Confronto fra concentrazioni di particolato e concentrazioni di altri inquinanti.....	159
BIBLIOGRAFIA.....	162

Sommario - Il presente lavoro fornisce un'analisi delle concentrazioni numeriche di particolato fine atmosferico presenti nell'area milanese, mettendo a confronto un sito di fondo urbano ubicato in Via Pascal e un sito di traffico localizzato in Viale Marche, lungo la circonvallazione esterna di Milano. Sono state effettuate delle campagne di misura che hanno raccolto dati di concentrazione nell'intervallo dimensionale 0,007-10 μm suddiviso in 12 classi dimensionali con una risoluzione al minuto. I dati di concentrazione totale di particelle e la loro distribuzione granulometrica sono stati elaborati ed analizzati giorno per giorno per individuarne andamenti giornalieri caratteristici sia per quanto riguarda i giorni feriali sia per quelli del fine settimana. L'analisi ha inoltre consentito di riconoscere l'associazione di picchi di concentrazione con eventi di traffico intenso che si sono verificati nei giorni di rilevamento. Successivamente, sia in termini di concentrazione numerica totale di particelle sia di singole classi granulometriche, è stata effettuata l'analisi della correlazione fra la concentrazione numerica di particolato e quella degli altri inquinanti atmosferici (NO_x , CO, SO_2 , O_3 , $\text{PM}_{2,5}$ e PM_{10}) e fra la concentrazione numerica di particolato ed i principali parametri meteorologici. Per quanto riguarda i parametri meteorologici è stato infine approfondito lo studio degli eventi precipitativi registrati durante il periodo di campionamento, al fine di determinare l'esistenza di un effettivo contributo in termini di diminuzione delle concentrazioni numeriche di particolato dovuto all'effetto di dilavamento dell'atmosfera. I risultati mostrano come nell'area urbana oggetto di studio l'evoluzione giornaliera delle concentrazioni numeriche di particolato rifletta l'andamento delle emissioni dovute al traffico e come le concentrazioni numeriche siano ben correlabili con i parametri inquinanti caratteristici di fonti primarie, quali ossidi di azoto e monossido di carbonio. Le concentrazioni in massa di PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ e in numero di particolato non risultano invece avere una buona correlazione. Per quanto riguarda i parametri meteorologici l'analisi ha evidenziato una buona correlazione con la velocità del vento: all'aumento della velocità si registra una diminuzione delle concentrazioni numeriche soprattutto per quanto riguarda le granulometrie più fini in quanto le particelle più grossolane sono soggette a fenomeni di risospensione. Infine, dall'analisi degli eventi di precipitazione che si sono verificati nel periodo di studio, in cui si è tenuto conto del regime emissivo dovuto al traffico, emerge che esiste un effettivo effetto di dilavamento dell'atmosfera durante gli eventi di pioggia. L'entità della diminuzione delle concentrazioni numeriche rispetto ai giorni in cui non si verificano eventi di precipitazione è strettamente legata all'intensità della precipitazione e alle ore del giorno in cui si verifica l'evento: le precipitazioni più intense nelle ore notturne hanno dato luogo alle massime riduzioni, mentre precipitazioni più deboli che si sono verificate a cavallo delle ore di punta di traffico del mattino hanno dato luogo a riduzioni meno consistenti. In generale, l'abbattimento delle concentrazioni numeriche sembra interessare in maniera più rilevante le granulometrie maggiori.

Abstract – In the last years several epidemiological studies were carried out about particulate matter effects on human health. The aerosol number concentrations seems to play a predominant role. International standards shifted the attention from PM₁₀ also to PM_{2.5} even if the number concentration is still not considered. In industrialized areas, the highest contribution to the fine and ultrafine particles comes from anthropogenic activities, namely from emissions of industrial combustion processes and traffic-related emissions. For this reason it is important to estimate the total particle number emission and to understand the evolution of the particle size distribution near these emission points. The objective of the present study was to investigate the daily patterns of the aerosol particle number size distribution and the correlations between particle number and mass concentrations, between particle number concentrations and other atmospheric pollutants, and between particle number concentrations and meteorological parameters. The measurements of particle size distributions of 0,007-10 µm took place in the city of Milan, in two different sites: via Pascal, that can be considered an urban background site, and Viale Marche, a traffic site. The temporal variation of the particle number concentration was seen to follow the traffic density. The highest total particle number concentration were observed during workdays and the lower concentrations occurred during weekends. The correlation between particle mass and number concentration is weak, indicating that mass based standards may not be effective in controlling ultrafine particles. The number concentration particles correlated strongly with the concentrations of NO_x and CO, suggesting that motor vehicle emissions constituted the main source of fine particles. Furthermore, correlations between particle number concentration and meteorological data (such as temperature, relative humidity, solar radiation, wind speed) were studied. Good correlation are observed only in the case of wind speed parameter. Finally, five rain events have been analyzed in detail in order to verify whether the rain precipitation does result in a washout effect of the atmosphere, affecting both the particle concentration levels and the aerosol size distributions. A decrease in the number of the aerosol has been observed during the events. However, the amount of decrease strongly depends on the precipitation intensity and on events start and end hours: the decrease was higher when the precipitation was intense and the events occurred during night time, while it was lower when the precipitation was weak and the events occurred during the morning traffic rush hours. In general, it has been observed that the number of large particles decreases more considerably than small particles.

1. Introduzione

Negli ultimi vent'anni il particolato è diventato l'inquinante oggetto di maggior attenzione, ed è tenuto costantemente sotto controllo dalla rete delle centraline che esegue il monitoraggio dell'inquinamento atmosferico. Molti studi si sono concentrati sull'inquinamento da particolato (particulate matter o PM) volti a capirne struttura, composizione, origine, tossicità e conseguenze sulla salute umana, in quanto rappresenta un importante problema di sanità pubblica in tutto il mondo. Gli effetti sulla salute umana sono stati ampiamente studiati ed è stata dimostrata una correlazione fra aumento della concentrazione in atmosfera e incremento delle patologie polmonari e cardiovascolari, dei ricoveri ospedalieri e della mortalità, anche se i meccanismi con i quali il particolato inficia la salute non sono ancora oggi del tutto chiari. Per questa ragione è uno degli inquinanti più monitorati al mondo. I dati riguardano principalmente il PM10 ma l'attenzione dei ricercatori si sta spostando sulle granulometrie più fini che, oltre a possedere una maggiore capacità di penetrazione nelle vie respiratorie, sono caratterizzate da superfici specifiche più elevate che conferiscono loro la capacità di adsorbire composti chimici tossici quali IPA (idrocarburi policiclici aromatici) e metalli pesanti presenti in atmosfera. Sono oggi oggetto di studio le relazioni dose-effetto, il ruolo delle fonti antropiche e le metodologie di misura idonee e standardizzabili al fine della formulazione degli standard.



Figura 1 – Inquinamento atmosferico sulla Pianura Padana. Foto da satellite (2003).

2. Il particolato atmosferico

2.1 Definizioni

Con il termine *particolato* (particulate matter, PM) o *polveri totali sospese* (PTS) si fa riferimento all'insieme di particelle disperse in atmosfera, solide e liquide, con diametro compreso tra qualche nanometro (nm) e decine/centinaia di micrometri (μm).

Il particolato è costituito da una complessa miscela di sostanze, di natura organica o inorganiche, presenti allo stato solido o liquido che, a causa delle loro piccole dimensioni, restano sospese in atmosfera per tempi più o meno lunghi; tra queste troviamo sostanze diverse come sabbia, ceneri, polveri, fuliggine, sostanze silicee di varia natura, sostanze vegetali, composti metallici, fibre tessili naturali e artificiali, sali, elementi come il carbonio o il piombo, ecc.

In base alla natura e alle dimensioni delle particelle possiamo distinguere (Marconi A.,1996):

- **aerosol**, costituiti da particelle solide o liquide sospese in aria di diametro inferiore a 1 micron;
- **foschie**, date da goccioline con diametro inferiore a 2 micron;
- **esalazioni**, costituite da particelle solide con diametro inferiore ad 1 micron e rilasciate solitamente da processi chimici e metallurgici;
- **fumo**, dato da particelle solide di solito con diametro inferiore ai 2 micron e trasportate da miscele di gas;
- **polveri** (vere e proprie), costituite da particelle solide con diametro fra 0,25 e 500 micron;
- **sabbie**, date da particelle solide con diametro superiore ai 500 micron.

Le particelle aerodisperse in atmosfera presentano forme irregolari, perciò sono descritte facendo riferimento al diametro aerodinamico equivalente (d_{ae}), definito come il diametro di una particella sferica avente densità unitaria e un comportamento aerodinamico uguale a quello della particella considerata nelle medesime condizioni di temperatura, pressione e umidità relativa. Il concetto di diametro aerodinamico equivalente è utile ai fini della classificazione del particolato in categorie. In tal senso si può ricorrere ai seguenti termini:

PTS (particelle totali sospese): sono le particelle di dimensioni tali da restare in sospensione per un tempo sufficiente ad essere campionate con un sistema di campionamento rispondente a specifiche caratteristiche geometriche in relazione a determinati flussi di prelievo. In pratica sono le particelle con diametro aerodinamico inferiore a $100\mu\text{m}$.

PM₁₀: è la frazione di particolato raccolta da un sistema di campionamento tale per cui le particelle con diametro aerodinamico uguale a 10 µm sono campionate con efficienza del 50%.

PM_{2,5}: è la frazione di particolato raccolta da uno specifico sistema di campionamento tale per cui le particelle con diametro aerodinamico uguale a 2,5 µm sono campionate con efficienza del 50%; rappresentano circa il 60% del PM₁₀.

Spesso il termine particolato è usato come sinonimo di *aerosol*; gli aerosol sono una sospensione di materiale solido o liquido, con bassa velocità di sedimentazione, in un mezzo gassoso (nel nostro caso l'aria). In questo contesto, la differenza tra i due termini riguarda l'acqua, che non viene considerata quando si parla di particolato. Da qui in avanti nel presente elaborato i due termini saranno utilizzati come sinonimi.

E' convenzione, inoltre, suddividere il particolato atmosferico in funzione del diametro aerodinamico nelle seguenti frazioni:

- **ultrafine**: diametro aerodinamico compreso tra 0,01 e 0,1 µm; generalmente queste particelle sono costituite dai prodotti della nucleazione omogenea dei vapori sovrasaturi (SO₂, NH₃, NO_x e prodotti della combustione) e tendono a diminuire in presenza di crescenti concentrazioni di granulometrie più elevate che fungono da elementi di rimozione sia direttamente dell'ultrafine per diffusione e impatto, che dei precursori gassosi per adsorbimento.
- **fine**: diametro aerodinamico compreso tra 0,1 e 2,5 µm; la loro formazione avviene per coagulo di particelle ultrafini e attraverso i processi di conversione gas-particella - processo di nucleazione eterogenea - oppure per condensazione di gas su particelle preesistenti nell'intervallo di accumulazione. I maggiori costituenti di queste particelle nelle aree industrializzate sono i solfati, i nitrati, lo ione ammonio, il carbonio elementare e quello organico; a questi si aggiungono particelle di origine biologica come spore fungine, lieviti, batteri ecc.
- **coarse** (grossolana): diametro aerodinamico compreso tra 2,5 e 100 µm; essenzialmente prodotte da processi meccanici (erosione, risospensione meccanica o eolica, macinazione), esse contengono elementi presenti nel suolo e nei sali marini; essendo inoltre relativamente grandi

esse tendono a sedimentare in tempi di poche ore o minuti, ritrovandosi spesso vicino alle sorgenti di emissione in funzione della loro altezza.

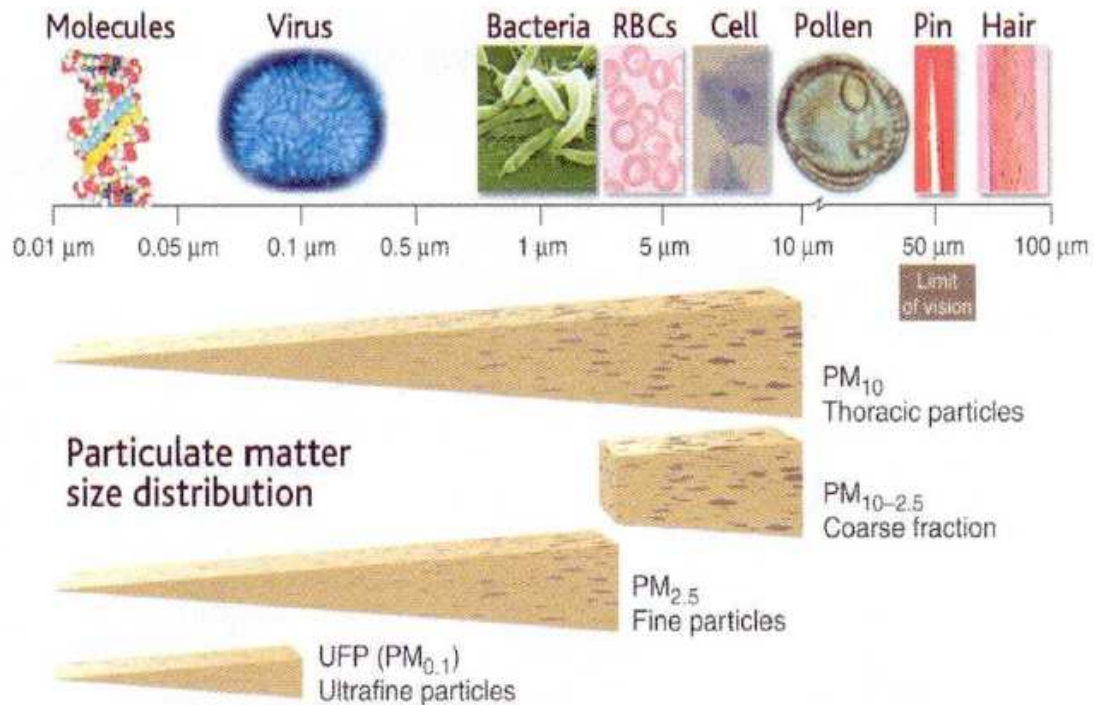


Figura 2 – Dimensioni del particolato (fonte: Science 307:1857–1861, News Focus, 2005).

La distribuzione dimensionale del particolato si può descrivere con un modello trimodale che consiste nella somma di tre funzioni log-normali. I tre intervalli dimensionali sono:

- Zona dei nuclei ($dp < 0,1 \mu\text{m}$);
- Zona dei nuclei giganti o zona di accumulazione ($0,1 < dp < 1 \mu\text{m}$);
- Zona delle particelle grandi ($dp > 1 \mu\text{m}$).

Si ha quindi una moda dei nuclei, una moda di accumulazione e una moda delle particelle grandi.

Vi è anche un'altra distinzione delle particelle: particelle con diametro aerodinamico maggiore di $2,5 \mu\text{m}$ vengono identificate come "coarse particles" (particelle grandi), mentre quelle con diametro inferiore a $2,5 \mu\text{m}$ prendono il nome di "fine particles" (particelle fini). All'interno del range delle particelle fini sono presenti la moda di accumulazione e la moda dei nuclei. Le particelle grandi e fini differiscono per composizione chimica, meccanismi di produzione, trasformazioni subite in atmosfera e processi di rimozione. Inoltre mostrano differente tossicità ed effetti diversi sulla salute

umana. Le distribuzioni dimensionali in numero sono caratterizzate da picchi nel range dimensionale delle particelle ultrafini. Questo range può essere diviso in due regioni:

- Regione di enucleazione, formata dalle particelle con dimensioni inferiori a 0,01 μm ;
- Regione dei nuclei di Aitken, formata dalle particelle con dimensioni comprese fra 0,01 e 0,1 μm .

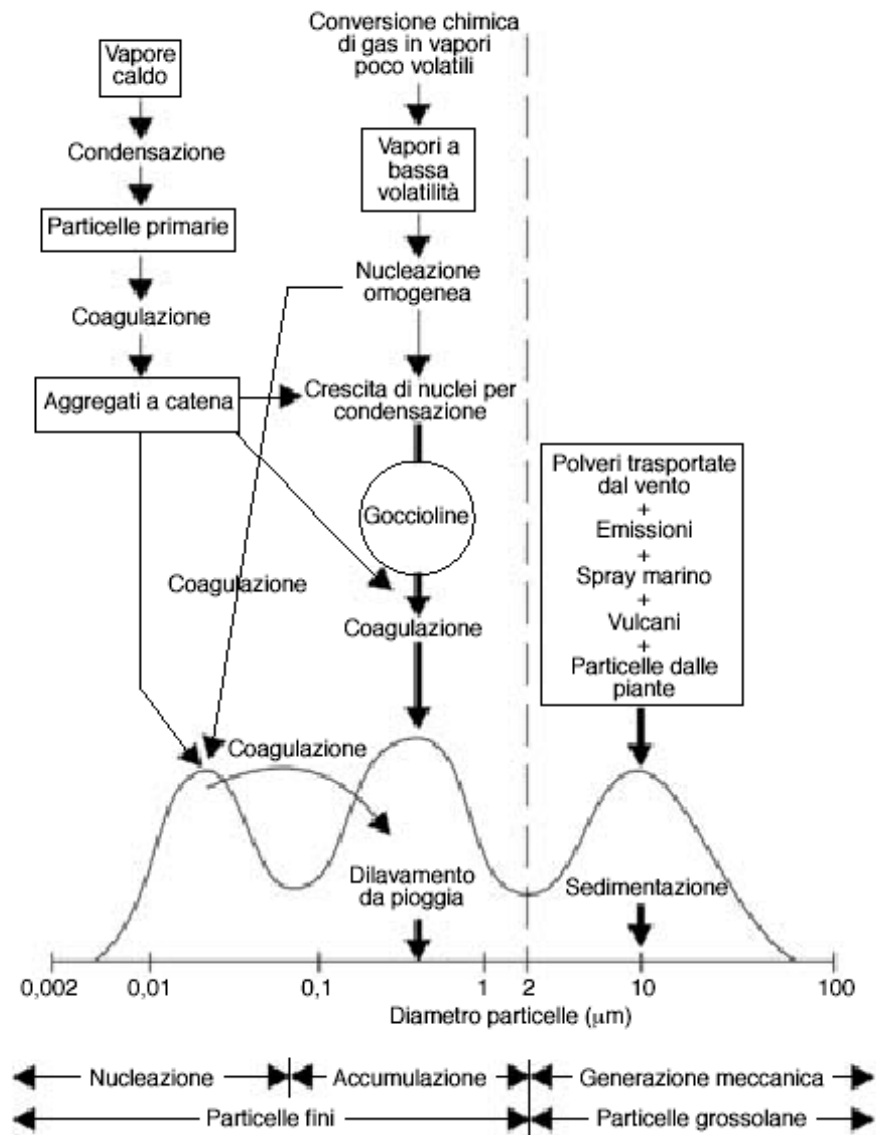


Figura 3 – Rappresentazione schematica della distribuzione dimensionale in termini di massa o volume delle particelle aerodisperse, dell'origine e della reazione dinamica tra le particelle e il mezzo in cui sono sospese (Marconi A., 2003).

Le particelle fini con d_{ae} minore di $1 \mu\text{m}$ hanno una concentrazione in atmosfera compresa tra 10 e $10.000 \text{ particelle}/\text{cm}^3$, mentre quelle che superano $1 \mu\text{m}$ di diametro hanno un concentrazione minore di $10 \text{ particelle}/\text{cm}^3$. Le particelle con $d_{ae} < 2,5 \mu\text{m}$ rappresentano numericamente oltre il 95% delle particelle totali; quelle di dimensioni maggiori, in particolare con d_{ae} tra 5 e $50 \mu\text{m}$, essendo più pesanti, rappresentano invece la maggior parte della massa del particolato presente in ambiente urbano. Se si considera la massa complessiva delle particelle, prevalgono quindi le classi di dimensione intermedia e maggiore. Come si vede in Figura 4(c), la massa totale delle particelle più fini è addirittura trascurabile. Tenendo invece conto del numero delle particelle, le particelle con diametro inferiore a $0.1 \mu\text{m}$ sono quelle più rilevanti. In questo caso trascurabile è il numero delle particelle a massa maggiore, come si vede in Figura 4(a). Considerando infine la superficie complessiva delle particelle (Figura 4(b)), la classe predominante è quella intermedia.

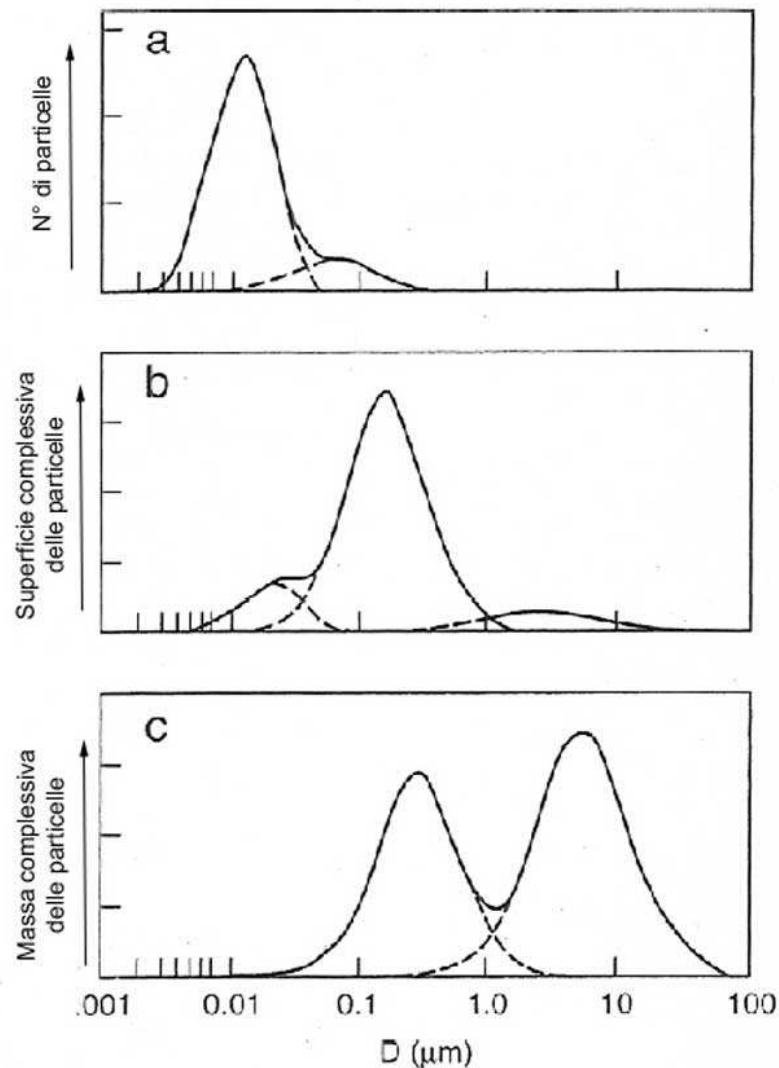


Figura 4 – Numero, superficie e massa complessiva delle particelle per classe dimensionale.

Le dimensioni delle particelle rappresentano il parametro più importante per la descrizione del loro comportamento e della loro origine; la composizione chimica, la rimozione, ed il tempo di residenza nell'atmosfera sono tutte caratteristiche correlate con le dimensioni delle particelle (Marconi A., 2003).

Il processo principale di genesi delle particelle fini dell'aerosol atmosferico è la **nucleazione**; grazie ad essa si originano particelle di dimensioni maggiori a partire da quelle fini e dai radicali presenti in fase gassosa presenti in atmosfera, che si aggregano per costituire particelle più grandi. Alcuni studi hanno messo in evidenza come l'acido solforico sia la principale specie gassosa che funge da iniziatore del processo di nucleazione, aggregandosi con l'acqua prima e con l'ammoniaca poi, così da formare cluster che, a loro volta favoriscono la formazione delle particelle più grandi (Raes *et al*, 2000).

Le particelle derivanti dalla nucleazione possono condensare e produrre particelle di dimensioni maggiori. La **condensazione** inizia quando l'equilibrio si sposta verso la fase aerosol e coinvolge principalmente le particelle con diametro compreso tra 0.1 μm e 1 μm .

Un altro fenomeno che porta all'accrescimento delle particelle dell'aerosol atmosferico è la **coagulazione**, che coinvolge sia particelle solide che liquide, le quali interagiscono con quelle prodotte dalla nucleazione. Il risultato di questa interazione porta ad un accrescimento ulteriore delle loro dimensioni. La coagulazione può interessare anche i prodotti derivanti da reazioni omogenee che avvengono nell'atmosfera (Raes *et al*, 2000).

Un'altra classificazione prende in considerazione la distinzione tra particolato di origine primaria e secondaria sulla base dei processi che lo hanno generato: le particelle primarie sono quelle che vengono emesse come tali dalle sorgenti naturali ed antropiche, mentre le secondarie si originano da una serie di reazioni chimiche e fisiche in atmosfera.

A questa si aggiunge una classificazione che fa riferimento alle sorgenti naturali o antropiche da cui derivano. Negli ambienti interessati da una forte urbanizzazione le particelle aerodisperse derivano essenzialmente dai processi di combustione dei sorgenti mobili, come veicoli a motore, e da sorgenti fisse, come gli impianti per la produzione di energia (USEPA,1999).

Nelle tabelle seguenti sono riportate sinteticamente le principali sorgenti di PM fine e grossolano naturali ed antropiche.

Tabella 1 – Sorgenti di particolato fine.

Sorgenti di particolato fine ($d < 2.5 \mu\text{m}$)			
Sorgenti antropiche		Sorgenti naturali	
<u>Primario</u>	<u>Secondario</u>	<u>Primario</u>	<u>Secondario</u>
Uso di combustibili fossili	Ossidazione di SO_2	Spray marino	Ossidazione di SO_2 e H_2S emessi da incendi e vulcani
Emissioni di autoveicoli	Ossidazione di NO_x	Erosione di rocce	Ossidazione di NO_x prodotto da suolo e luce
Polveri volatili	Emissione di NH_3 da agricoltura e allevamento	Incendi boschivi	Emissione di NH_3 da animali selvatici
Usura di pneumatici e freni	Ossidazione di idrocarburi emessi dagli autoveicoli		Ossidazione di idrocarburi emessi dalla vegetazione

Tabella 2 – Sorgenti di particolato grossolano.

Sorgenti antropiche	Sorgenti naturali
<u>Primario</u>	<u>Primario</u>
Particelle volatili dall'agricoltura	Erosione delle rocce
Spargimento di sale	Spray marino
Usura del manto stradale	Frammenti di vegetali ed animali

In generale si può affermare che la composizione del PM è molto variabile e dipende da molti fattori che includono sorgenti, condizioni climatiche, situazione topografica ecc.

2.2 Presenza in atmosfera di particolato fine ed ultrafine nelle aree urbane

Le misure di particolato in aria ambiente sono riferite di norma alla concentrazione in massa in quanto si tratta dell'indicatore utilizzato dalla legislazione europea per la definizione dei valori limite di qualità dell'aria. Negli ultimi anni è però fortemente cresciuto a livello scientifico l'interesse per la misura della concentrazione numerica. Una serie di recenti studi ha infatti evidenziato che anche tale parametro può avere rilevanza in termini di impatto sulla salute, tanto che il Regolamento CE 715/2007 ha previsto che venga definito uno standard emissivo per i veicoli in termini di numero di particelle entro l'entrata in vigore della norma Euro VI.

Negli ultimi anni un numero crescente di studi ha riportato valori di concentrazione di polveri ultrafini espressi come numero di particelle; nella maggior parte dei casi, nei quali è stata riportata la distribuzione della dimensione delle polveri, è stato rilevato che le polveri ultrafini rappresentavano la parte più cospicua in termini di concentrazione numerica. In un'indagine europea condotta ad Erfurt, in Germania, il numero di particelle è risultato costituito per il 73% dalla componente ultrafine, nonostante le stesse contribuissero solo all'1% della concentrazione in massa.

Tipiche presenze di particelle ultrafini in aree caratterizzate sono le seguenti: $10\text{-}10^3$ particelle cm^{-3} in aree rurali e marine, 10^4 particelle cm^{-3} in aree urbane e 10^6 particelle cm^{-3} ai bordi delle strade trafficate (Lighty, 2000).

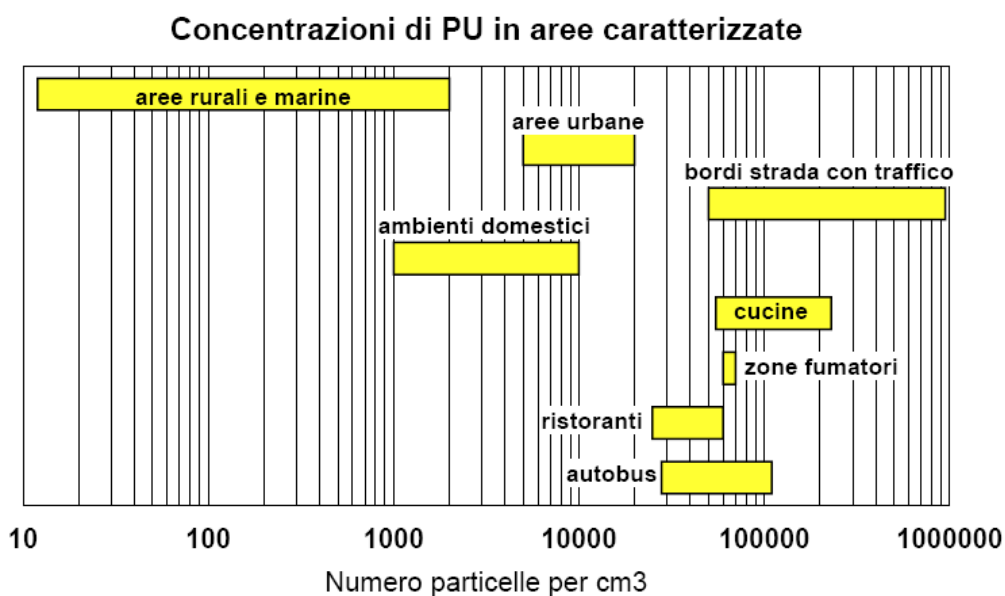


Figura 5 – Presenza di particolato ultrafine in aree caratterizzate.

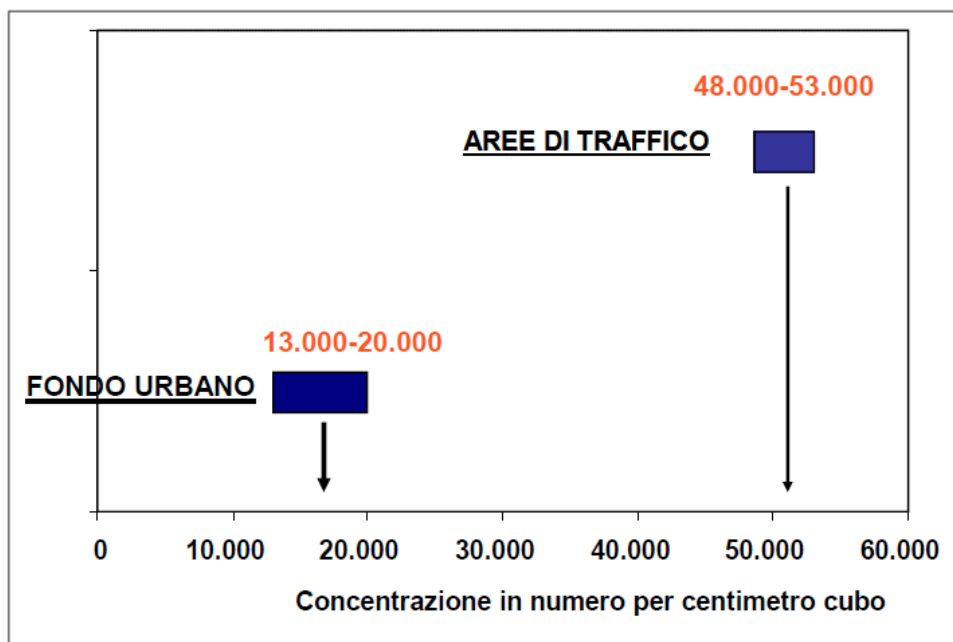


Figura 6 – Numero di particelle ultrafini in aree lombarde urbane.

Nello studio ULTRA (De Hartog et al, 2001) i livelli di concentrazione numerica di polveri ultrafini sono risultati compresi tra i 17309 per cm^3 ad Amsterdam ed i 21228 per cm^3 ad Erfurt. Altri studi riportano valori di fondo compresi tra 10000 e 50000 per cm^3 con valori di picco, nelle ore in cui il traffico veicolare è più elevato, fino a 400000 per cm^3 (Oberdoster et al., 2001). Recenti indagini eseguite in Australia hanno fatto rilevare livelli di concentrazione numerica media di polveri ultrafini per cm^3 oscillanti tra $0.8 \cdot 10^3$ e $5 \cdot 10^4$, con concentrazioni di punta sino a $1.8 \cdot 10^5$.

Per quanto riguarda l'Italia, in un sito di fondo urbano ubicato nella città di Milano si è determinato un valore medio annuale di circa 10^8 particelle/ m^3 nel periodo 2003–2006, con riferimento all'intervallo dimensionale 0,3-30 μm (Beccaceci et al. 2007). Nel caso di un sito urbano da traffico della città di Roma è stato invece determinato un valore medio di $4,6 \cdot 10^{10}$ particelle/ m^3 , nel periodo aprile 2001– marzo 2002, e di $3,1 \cdot 10^{10}$ particelle/ m^3 nel corso dell'anno 2006 (Marconi et al. 2007); questi ultimi dati sono quasi due ordini di grandezza superiori a quelli determinati a Milano, in quanto sono relativi a particelle con diametro aerodinamico superiore a 0.01 μm .

Attualmente, tranne che per la città di Roma, in Italia non sono disponibili serie temporali di significativa durata. Nella stazione di rilevamento romana dell'Istituto Superiore di Sanità sono state infatti misurate le concentrazioni di polveri fini (PM10 e PM2.5) e ultrafini fin dal 2001 (Figura 7). Benché nel corso del periodo di monitoraggio sia stata osservata una continua

diminuzione della concentrazione numerica di particelle ultrafini, i valori assoluti restano ancora elevati se confrontati con quelli riscontrati in altre città del nord Europa e in considerazione dei potenziali effetti sanitari negativi associati alle particelle ultrafini. L'andamento delle concentrazioni medie di PM10 e PM2.5 nel corso degli anni 2000 è rimasto invece relativamente stabile, malgrado la diminuzione delle emissioni primarie e di precursori del particolato atmosferico registrata dalle stime modellistiche. D'altro canto, questa situazione è risultata comune a molte delle maggiori città europee, come è stato evidenziato anche dall'Agenzia Europea per l'Ambiente.

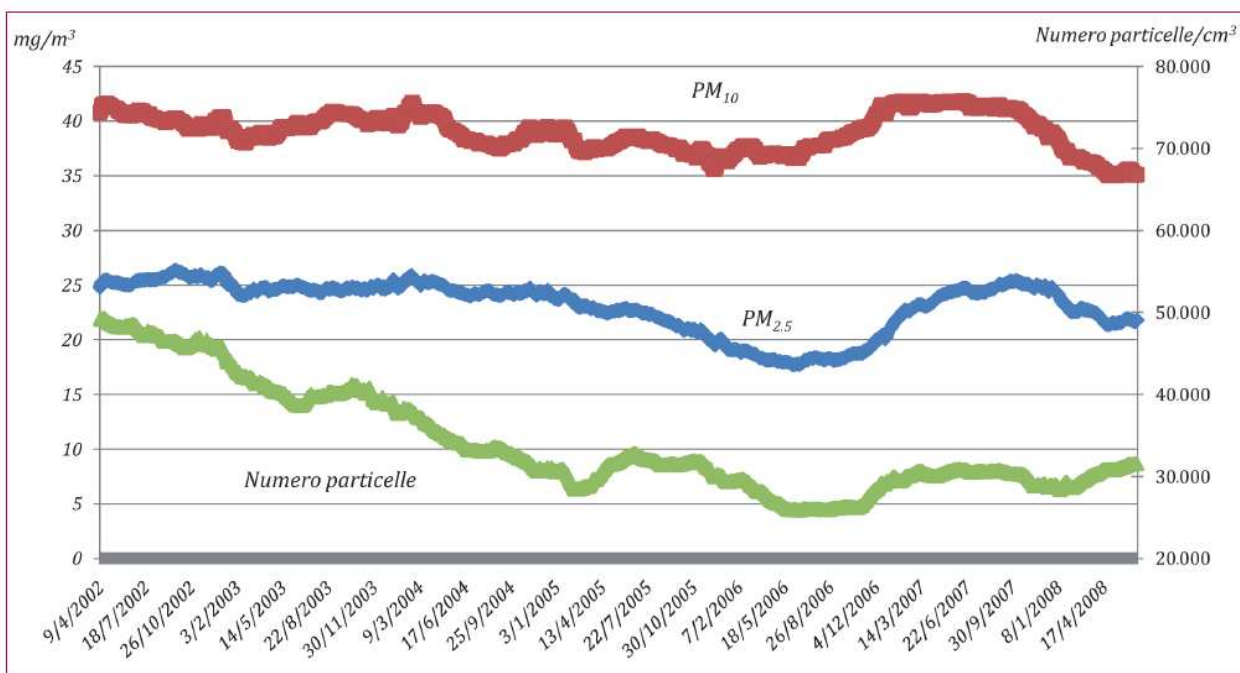


Figura 7 – Concentrazioni di polveri fini (PM10 e PM2,5) e ultrafini presso la stazione di rilevamento dell’ISS (Roma, 2002-08).

A partire da Aprile 2001, accanto alla determinazione della concentrazione di massa del PM10 e del PM2.5 è iniziato il monitoraggio in continuo del numero di particelle nell'ambito del progetto “Health Effects of Air Pollution on Susceptible Subpopulations-Traditional Air Pollutants, Ultrafine Particles and Myocardial Infarction: Data Base and Health Assessment (HEAPSS)”, finanziato dall’UE che aveva come obiettivo la raccolta di dati sulla concentrazione del numero di particelle ultrafini nell’aria di diverse città europee utilizzando un protocollo comune di analisi. I risultati ottenuti mostrano come questo parametro, dominato dalle particelle inferiori a 0,1 µm, sia correlato con l’intensità dei flussi di traffico (come evidenziato anche nell’articolo di Pohjola et al., Figura 8) e con la concentrazione di CO e di NO_x, con livelli significativamente più elevati durante la stagione fredda, che possono raggiungere concentrazioni sulle 24 ore superiori a 10⁵ particelle/cm³.

Durante l'arco della giornata si osserva un aumento delle concentrazioni durante le ore del mattino e della sera, prevalentemente associato alle punte di traffico. Risultati analoghi sono stati ottenuti in studi americani (Hudda et al., 2010 e Singh et al., 2006) in cui si sono analizzate le concentrazioni numeriche di particolato nell'area della California (Figura 9 e Figura 10).

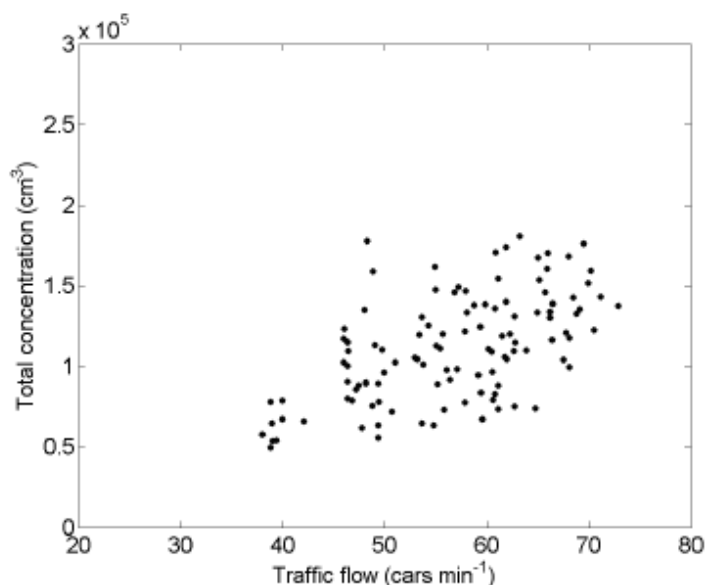


Figura 8 – Concentrazione numerica di particolato in funzione del flusso di traffico (Pohjola et al., Helsinki, 2007).

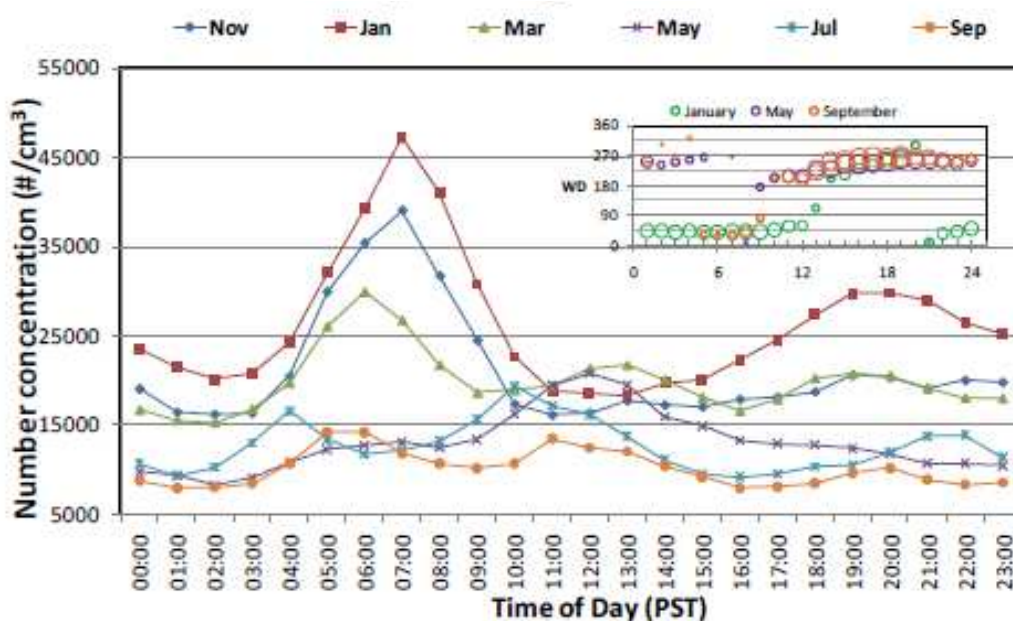


Figura 9 – Confronto fra concentrazioni numeriche registrate in diversi mesi dell'anno in un sito della California, 2008-2009. Nel riquadro in alto è riportato un grafico con la direzione del vento (Hudda et al., 2010).

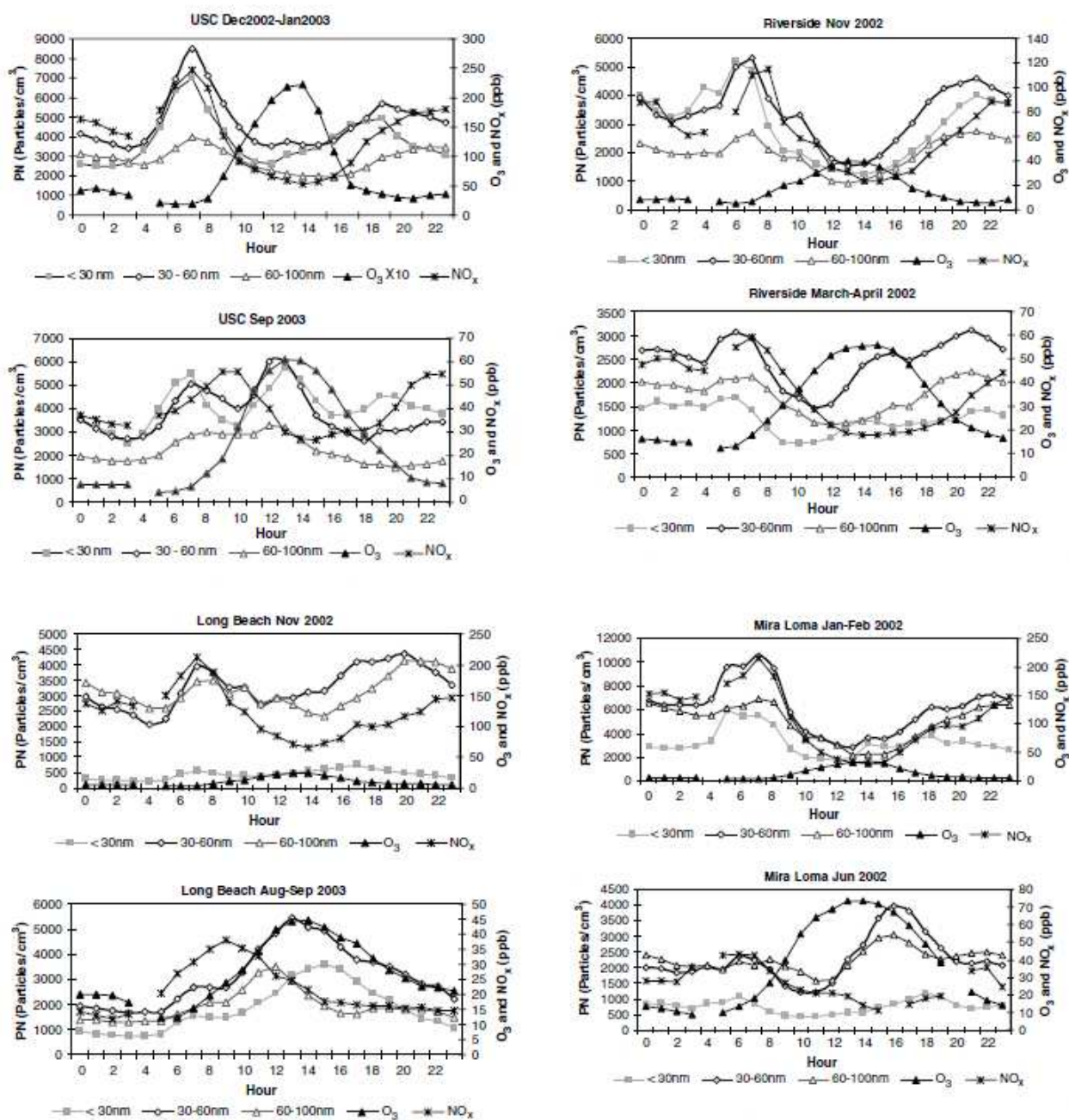


Figura 10 – Andamento giornaliero delle concentrazioni numeriche di classi aggregate di particolato, NO_x e O₃ in diversi siti della California e diversi periodi dell’anno. I siti presentano differenti caratteristiche: USC, sito urbano localizzato in centro a Los Angeles, Riverside si trova all’interno di un campus universitario, Long Beach è un sito di traffico e Mira Loma si trova in prossimità di una strada utilizzata in prevalenza da mezzi pesanti diesel (Singh et al., 2006).

2.3 Origine del particolato atmosferico

Come già precedentemente detto, il particolato può essere suddiviso anche in base ai processi che lo hanno generato; grazie a questa seconda metodologia il particolato atmosferico è suddiviso in particolato primario e secondario.

Il *particolato primario* è costituito da particelle, sia fini che grossolane, originatesi direttamente da processi meccanici di erosione, dilavamento e rottura di particelle più grandi, da processi di evaporazione dello spray marino in prossimità delle coste, da processi di combustione ed è emesso in atmosfera direttamente nella sua forma finale da sorgenti identificabili. Esso sarà dunque molto concentrato nell'aria immediatamente circostante il suo punto di emissione.

Al contrario, il *particolato secondario* è costituito dagli aerosol, contenenti quasi esclusivamente particelle fini, dal diametro inferiore a 1 μm , che si generano dalla conversione dei gas in particelle solide. Il particolato secondario, infatti, si forma grazie a processi di condensazione di sostanze a bassa tensione di vapore, precedentemente formatesi attraverso evaporazione ad alte temperature, o grazie a reazioni chimiche tra inquinanti primari allo stato gassoso presenti in atmosfera (Brasseur *et al*, 1999).

La composizione del particolato dipende dall'area di provenienza e dalla tipologia di sorgente di emissione (Facchini M., 2001).

Le sorgenti di PM sono riunite sotto due grandi categorie: le sorgenti naturali e quelle antropiche.

Sorgenti naturali sono ad esempio le particelle di roccia e di suolo erose, sollevate o risospese dal vento, il materiale organico e le ceneri derivanti da incendi boschivi o da eruzioni vulcaniche, le piante (pollini e residui vegetali), le spore, lo spray marino, i resti degli insetti ecc;

Sorgenti antropiche sono invece legate principalmente all'uso di combustibili fossili (produzione di energia, riscaldamento domestico), alle emissioni degli autoveicoli, all'usura dei pneumatici, dei freni e del manto stradale, a vari processi industriali (raffinerie, processi chimici, operazioni minerarie, cementifici), allo smaltimento di rifiuti (inceneritori) ecc. Grandi quantità di polveri si possono inoltre originare in seguito a varie attività agricole.

Tra le sorgenti secondarie citate, le principali fonti urbane di emissione di polveri nelle aree urbane sono principalmente due: traffico veicolare e impianti di riscaldamento civili.

Tutti i mezzi di trasporto emettono polveri fini. In particolare i motori diesel e i ciclomotori emettono un quantitativo di polveri, per km percorso, maggiore rispetto ai veicoli a benzina, riconosciuti comunque responsabili della produzione di una certa quantità di questo inquinante. Altrettanto certo è il legame fra la cilindrata del veicolo e la quantità del particolato prodotto: più potente è il veicolo e maggiore è la quantità di particolato prodotto. L'incrocio di queste due osservazioni fa sì che i mezzi commerciali pesanti siano i maggiormente inquinanti, seguiti dai commerciali leggeri e dalle automobili. Una fonte di minore importanza è legata all'usura di freni, pneumatici, manto stradale e frizioni, nonché al risollevarsi delle frazioni depositate sulla carreggiata dovuto allo stesso traffico.

Particolarmente critici per quanto concerne le emissioni di polveri sono gli impianti alimentati a combustibili solidi e liquidi (gasolio, olio combustibile, carbone e legna). Poco rilevanti le emissioni di polveri dagli impianti alimentati con combustibili gassosi (metano, GPL).

Le fonti di inquinamento industriali sono sempre meno presenti all'interno delle aree urbane, anche se gli inquinanti emessi da camini di altezza elevata possono essere trasportati dagli agenti meteorologici anche su grandi distanze. Parte dell'inquinamento "di fondo" riscontrato in una determinata città può dunque provenire da un'industria situata a diversi km di distanza dal centro urbano.

Secondo gli inventari di emissione del PM disponibili dal 2000, sviluppati dall'International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA) e dagli Stati Membri della Commissione Europea per il programma CAFE (Amann et al., 2005), il trasporto e il riscaldamento domestico contribuiscono rispettivamente al 29% e 28% del totale delle emissioni primarie di PM10 e rispettivamente al 34% e 36%, del totale delle emissioni primarie del PM2.5 nei 15 paesi che appartenevano all'Unione Europea prima del maggio 2004.

Nell'area urbana milanese il contributo decisamente prevalente alla formazione del PM10 è dovuto al traffico auto veicolare con una percentuale stimata pari al 70%, il contributo della combustione non industriale (riscaldamento) è pari al 12%, mentre tutte le altre fonti contribuiscono in modo decisamente modesto.

Emissioni in provincia di Milano

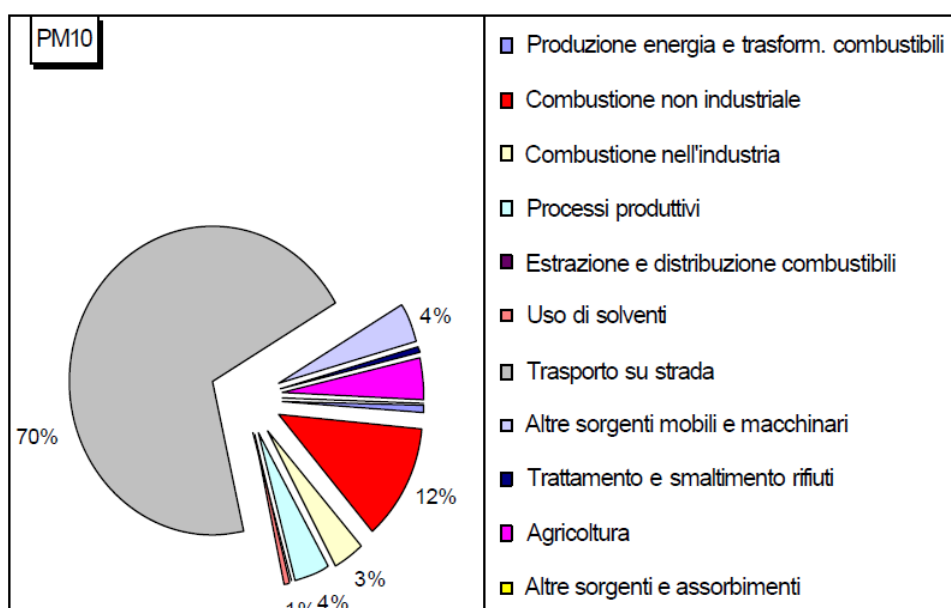


Figura 11 – Stima delle emissioni di PM10 a Milano (fonte: Inventario delle emissioni INEMAR, 2001).

Allargando l'analisi a tutto il territorio lombardo, il contributo percentuale delle emissioni di particolato atmosferico del traffico autoveicolare rimane ancora prevalente anche se la percentuale scende e si avvicina al 50%, poiché aumenta il contributo della combustione non industriale (25%) e assumono un'importanza maggiore le emissioni dei processi produttivi (15%).

Emissioni in Lombardia

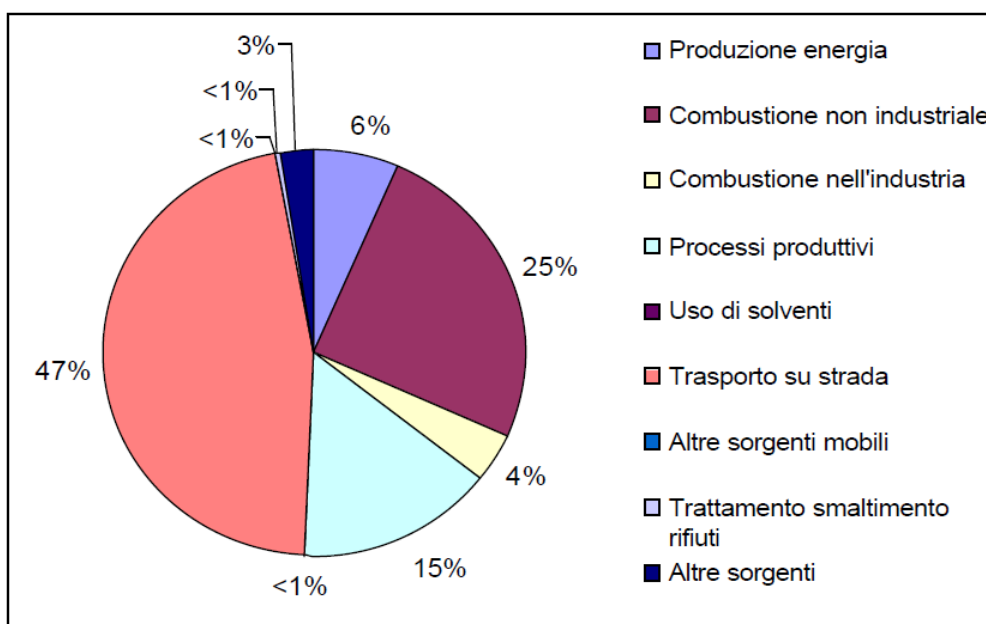


Figura 12 – Stima delle emissioni di PM10 in Lombardia (fonte: Inventario delle emissioni INEMAR, 2001).

Per quanto riguarda le polveri ultrafini, esse possono derivare dalle emissioni prodotte dal traffico veicolare, dall'utilizzo di combustibili utilizzati nelle diverse tipologie di impianti per il riscaldamento, oltre che dall'industria petrolifera ed in altri processi industriali, compresi gli impianti di incenerimento e di trattamento dei rifiuti. Le emissioni prodotte dai processi di combustione sono però di gran lunga le maggiori responsabili della produzione di polveri ultrafini (30% ca. per le emissioni da fonti stazionarie e 40% ca. per quelle prodotte dal traffico veicolare). Le particelle ultrafini formate nella combustione variano in funzione del tipo di combustibile e crescono mediante coagulazione e condensazione. Il picco predominante è, nella distribuzione in massa, a circa 200 nm; nella distribuzione in numero la maggior parte delle sorgenti mostrano il picco sotto i 100 nm. Molte di queste sorgenti hanno una tipica distribuzione bimodale con un picco nell'intervallo della nucleazione tra 20 e 60 nm. Interessante notare che spesso si verifica (per tutte le tipologie di emissioni, stazionarie, mobili, altro) una scomparsa di nanoparticelle quando sono presenti alte concentrazioni di particelle più grandi. Le emissioni di particelle ultrafini possono infatti incrementare dopo rimozione della frazione coarse e fine.

Si stima che ogni giorno vengono immesse nell'aria circa 10 milioni di tonnellate di particolato (Air Quality Guidelines Europe" 2nd edition, 2000); di queste, le particelle grossolane sono dovute soprattutto a fenomeni naturali, mentre quelle più fini derivano per lo più da attività antropiche.

A livello globale, le masse di particolato prodotte per cause naturali sono preponderanti (circa il 94%) rispetto a quelle prodotte dalle attività umane; tuttavia le sorgenti antropiche sono in grado di immettere in atmosfera una maggior quantità di particelle contenenti sostanze tossicologicamente rilevanti per la salute e per l'ambiente. Inoltre queste ultime tendono a concentrarsi spazialmente, cioè rendono alcune zone maggiormente a rischio rispetto ad altre: ne sono un tipico esempio i centri urbani e industriali.

Molti studi provano infatti che la concentrazione tipica di particelle antropogeniche presente in un'atmosfera urbana può rappresentare un serio rischio per la salute dell'uomo (Sesana, 2004; Raes et al., 1999).

Una volta immesse in atmosfera, le particelle vanno incontro ad un'evoluzione a opera di diversi meccanismi, quali condensazione, evaporazione, coagulazione e attivazione, ma la loro concentrazione in aria, che in genere, in condizioni di aria pulita, è dell'ordine di 1-1,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, viene comunque limitata dalla naturale tendenza alla deposizione per effetto della gravità e/o per

deposizione secca o umida (Hemond *et al*, 2000). La **deposizione secca** è il trasferimento diretto alla superficie terrestre e procede senza l'intervento delle precipitazioni. La **deposizione umida**, al contrario, comprende tutti i processi che comportano il trasferimento alla superficie terrestre in forma acquosa (come pioggia, neve o nebbia).

Inoltre la permanenza in atmosfera è fortemente condizionata dalla natura dei venti, dalle precipitazioni e dalle dimensioni delle particelle. In quest'ultimo caso le particelle con un diametro superiore a 50 μm , visibili in aria, sedimentano piuttosto velocemente causando fenomeni di inquinamento su scala molto ristretta, mentre le più piccole possono rimanere in sospensione per molto tempo; alla fine gli urti casuali e la reciproca attrazione le fanno collidere e riunire assieme raggiungendo così dimensioni tali da acquistare una velocità di caduta sufficiente a farle depositare al suolo. Il trasporto a lunga distanza, invece, è governato principalmente dall'azione del vento. Si è osservato che particelle con diametro minore di 10 μm sono capaci di coprire distanze superiori ai 5000 km, soprattutto sopra regioni marine. Tale fenomeno è stato osservato analizzando campioni di aerosol raccolti lungo le coste dell'Atlantico occidentale, in cui è stata trovata polvere proveniente dal deserto del Sahara (Brasseur *et al*, 1999).

2.3.1 Eventi di nucleazione

Le polveri fini però non sono dovute soltanto ad attività antropiche di immissione diretta, ma sono anche il risultato del processo, attivato dalla radiazione solare, di trasformazione delle sostanze dalla fase gassosa a quella solida. Tale sorgente di formazione di nuove particelle è detta "nucleazione".

Aitken (1897) è stato il primo a riportare l'evidenza della formazione di nuove particelle in atmosfera; solo l'odierno sviluppo della tecnologia ha permesso di ottenere misurazioni quantitative tramite strumenti per la misura di distribuzioni dimensionali di particelle con diametro fino a 3 nm (McMurry, 2000). Molti studi condotti in troposfera, in particolare vicino alle nubi ed al confine con la tropopausa, hanno rivelato un elevato numero di particelle di aerosol con diametro tra 3-15 nm (Kheil and Wendisch, 2001; Weber *et al.*, 2001; Twohy *et al.*, 2002). Nello strato limite continentale sono stati osservati frequenti eventi di nucleazione: ad esempio la formazione di particelle ultrafini rilevate a pochi nanometri di diametro e loro successiva crescita fino a circa 100 nm in un periodo di 1 – 2 giorni. Il fenomeno della nucleazione era finora stato ritenuto significativo solo in aree remote del pianeta ma non in aree inquinate.

Ricercatori dell'Istituto di Scienze dell'Atmosfera e del Clima (ISAC) del Cnr di Bologna, in collaborazione con i colleghi dell'Università finlandese di Kuopio, del Research Centre Karlsruhe di Garmisch e del Ford Research Centre Aachen (Germania) hanno condotto un esperimento internazionale nell'ambito del progetto Europeo QUEST per studiare il contributo del processo di nucleazione alla formazione di polveri fini in un'area caratterizzata da elevati livelli di inquinamento. Presso la base sperimentale ISAC-CNR di San Pietro Capofiume nella Pianura Padana sono state eseguite misure al suolo e con un aereo ultraleggero a diverse quote che hanno permesso di determinare la distribuzione dimensionale e la notevole velocità di crescita, in numero e dimensione, delle nuove particelle. I risultati ottenuti hanno dimostrato che il processo di formazione di particelle fini da precursori gassosi, attivato dalla radiazione solare, ha un ruolo importante nella produzione in atmosfera di particolato fine, soprattutto nella stagione primaverile, ma in generale in tutto il periodo compreso fra la primavera e l'autunno, periodo in cui la radiazione solare è intensa. La frequenza degli episodi di formazione di nuove particelle è infatti superiore al 50% nel periodo Marzo – Ottobre (Figura 13).

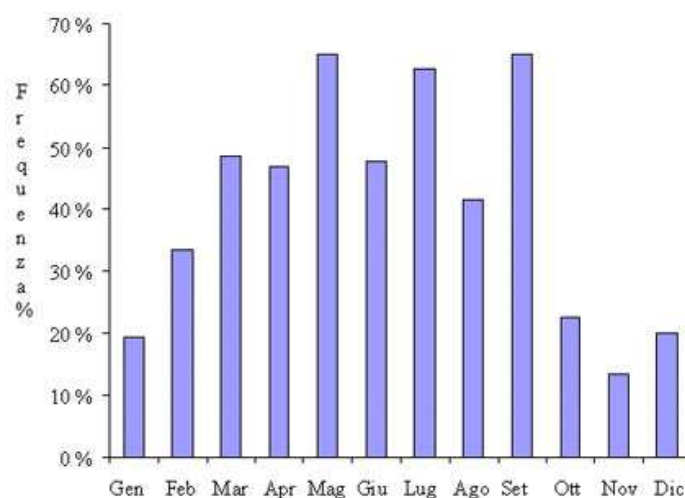


Figura 13–Frequenza degli episodi di formazione di nuove particelle nella Pianura Padana.

La Figura 14 mostra un classico esempio di evento di nucleazione in Val Padana: il grafico descrive la variazione osservata durante il giorno (asse delle ascisse) delle dimensioni delle particelle di aerosol in atmosfera (asse delle ordinate) e della loro abbondanza in numero (scala di colore).

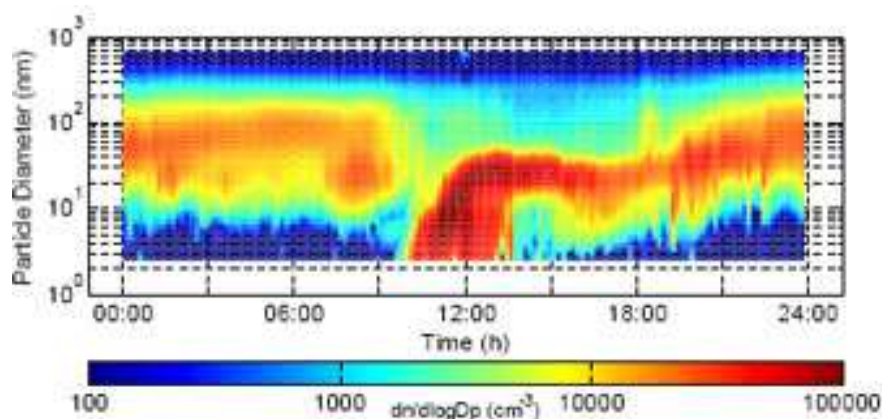


Figura 14 – Esempio di evento di nucleazione in Val Padana: variazione giornaliera delle dimensioni delle particelle di aerosol in atmosfera e della loro abbondanza in numero (Hamed et al., 2007).

Durante le prime ore del mattino ha inizio il processo di formazione di particelle di aerosol: si osservano infatti nuove particelle piccolissime (ca. 3 nm in diametro) ed in numero elevato (10^6 particelle cm^{-3}) che si accrescono poi in dimensioni nelle ore successive fino a raggiungere diametri di 100-200 nm. Questi nuovi risultati suggeriscono che gli eventi di nucleazione hanno un ruolo più importante di quanto fino ad ora stimato in quanto non solo le particelle si producono ad elevate concentrazioni ma si accrescono molto rapidamente e hanno un tempo di vita in atmosfera significativo.

2.4 Meccanismi di rimozione del particolato atmosferico

Le particelle che popolano l'atmosfera vengono continuamente rimosse mediante tre tipi di meccanismi, oggetto di studio della dinamica degli aerosol:

- la *coagulazione*, che avviene quando due particelle collidono e formano un minor numero di particelle più grandi;
- la *sedimentazione*, che è il processo secondo il quale ogni particella tende a cadere sotto l'azione della gravità. Questo fenomeno riguarda le particelle più grandi, visto che quelle più piccole tendono a restare sospese sotto l'azione dei venti e delle correnti convettive. Nel cadere, le particelle raggiungono una velocità costante, detta *velocità limite*, corrispondente al raggiungimento dell'equilibrio fra la forza peso, l'attrito viscoso dell'atmosfera e la spinta di Archimede.
- il *dilavamento-washout* – è la rimozione di particelle dovuta a pioggia e a neve. Inizialmente, alcuni nuclei permettono la condensazione del vapor d'acqua; molti di essi, poi, si fondono con gocce di pioggia in caduta, e così trasportano a terra gli aerosol che contengono. Un efficace metodo di rimozione per dilavamento è, ad esempio, la caduta di fiocchi di neve. Essi, essendo più grandi, offrono maggiore superficie al contatto ed hanno, di conseguenza, maggiori probabilità di lavare via le particelle. Inoltre, avendo una velocità limite più bassa, hanno maggior tempo di permanenza in atmosfera, e questo aumenta le possibilità di contatto.

2.5 Composizione chimica del particolato

Il particolato atmosferico, in generale, contiene solfati, nitrati, ammonio, materiali organici, specie cristalli, sali marini, ioni idrogeno e acqua. Di queste specie, il solfato, l'ammonio, il carbonio organico e alcuni metalli di transizione predominano nelle particelle fini, che sono legate principalmente a fonti secondarie. Tuttavia, nella frazione fine si trovano anche composti di origine primaria, come il carbonio elementare, alcuni metalli e gli IPA (Facchini MV, 2001).

Al contrario, i materiali cristalli (silicio, calcio, magnesio, alluminio, ferro ecc.) e le particelle organiche biogeniche (polline, spore, frammenti di piante) fanno parte solitamente della frazione grossolana, che deriva principalmente da fonti primarie.

Gli ioni inorganici solubili in acqua costituiscono uno dei maggiori componenti del particolato atmosferico: Cl^- , NO_3^- , Na^+ , Mg^{2+} e Ca^{2+} predominano nel particolato grossolano, invece, SO_4^{2-} e NH_4^+ si trovano preferibilmente nel particolato fine (Van Dingenen et al, 2004).

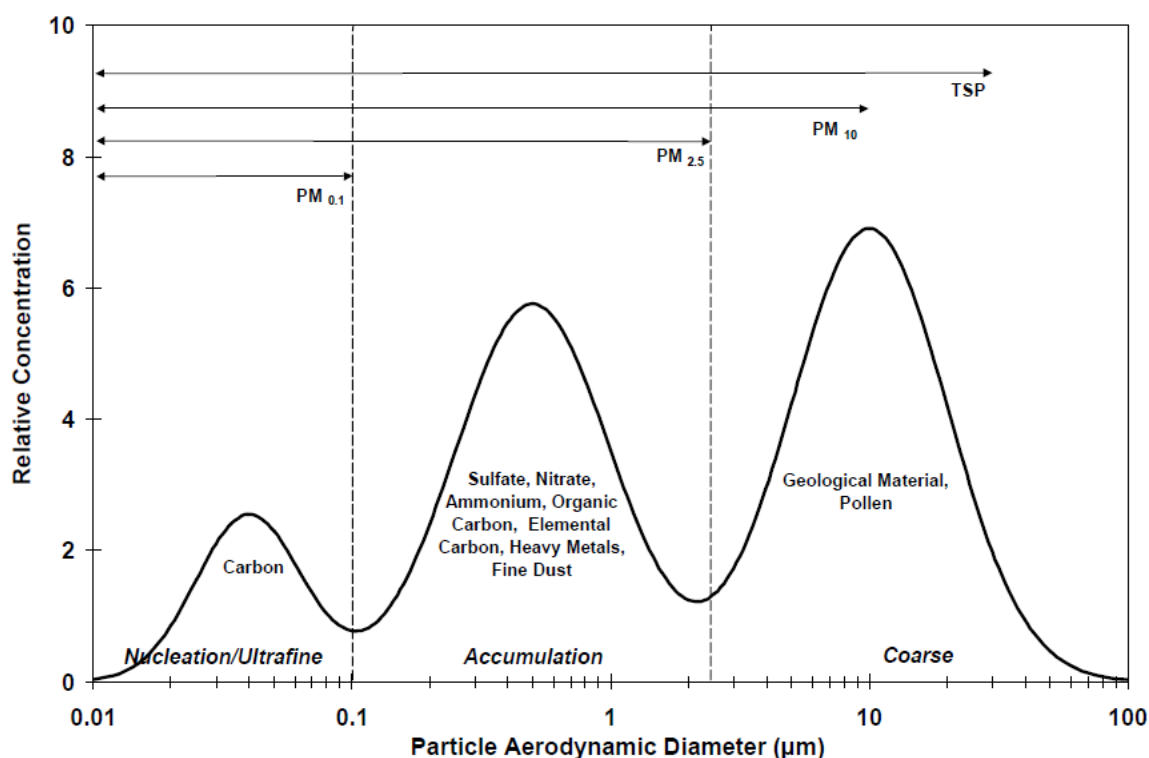


Figura 15 – Distribuzione granulometrica in massa del particolato con indicazione dei componenti chimici principali per ciascuna moda.

La composizione chimica del particolato dipende dall'area di provenienza e dalla tipologia delle sorgenti di emissione dominanti, cioè dal tipo di insediamenti della zona, e, poiché le particelle

possono rimanere sospese nell'aria per parecchi giorni e quindi trasportate anche a grandi distanze, il loro carico in una città dipende non solo dalle fonti locali ma anche dalla quota trasportata.

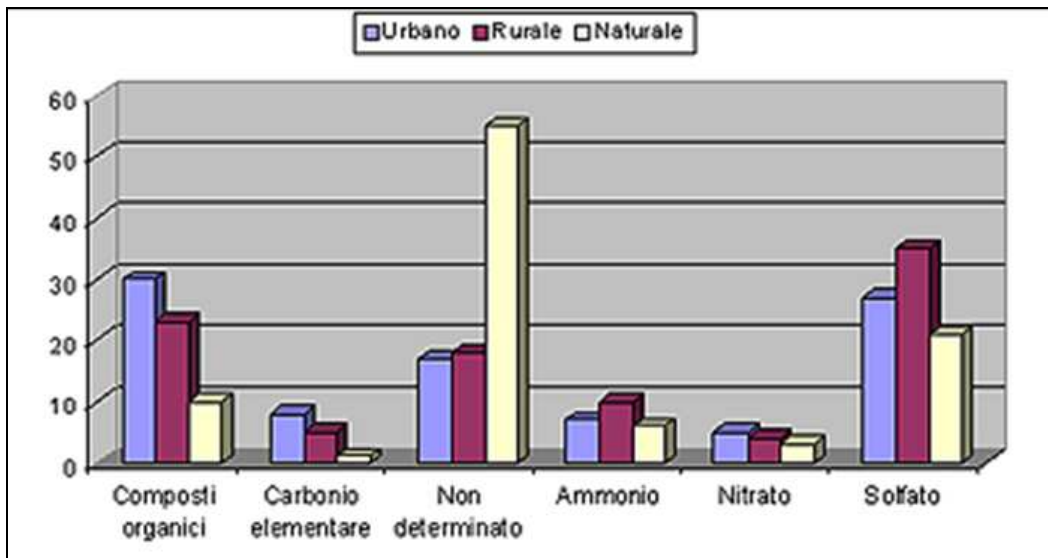


Figura 16 – Composizione del materiale particolato.

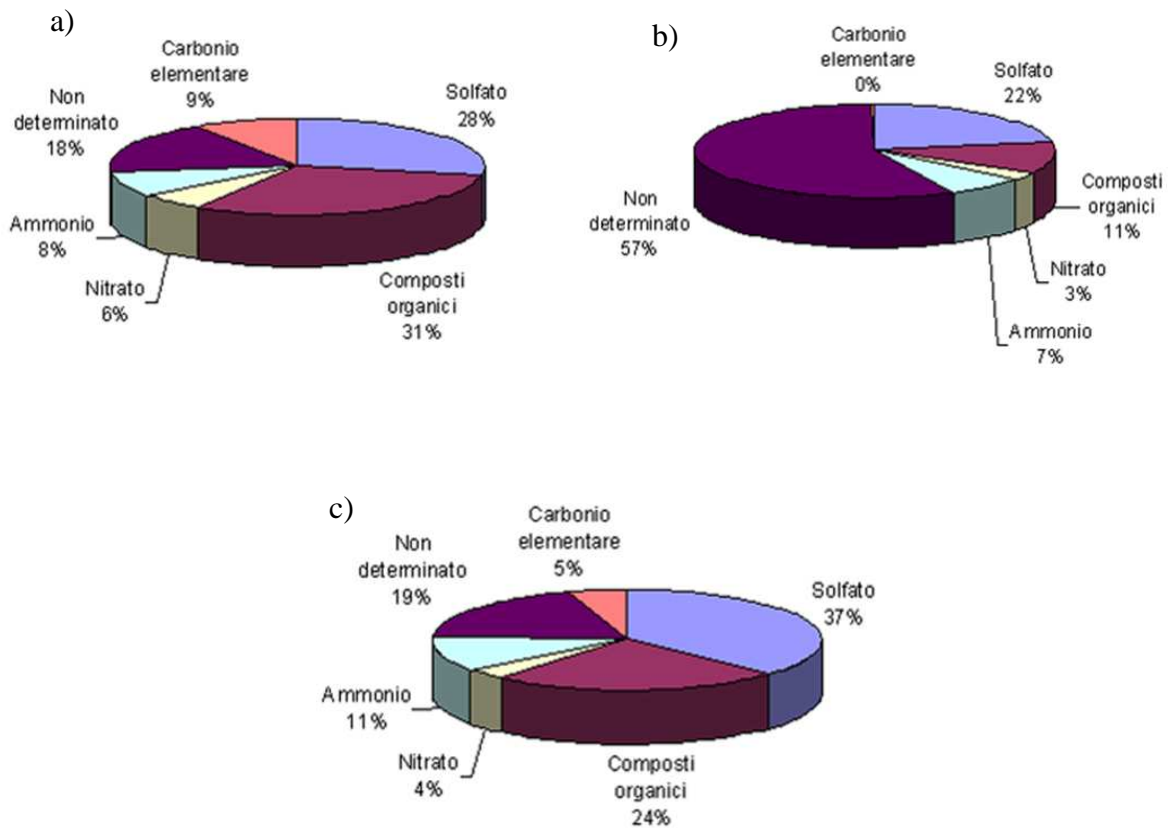


Figura 17 – Composizione percentuale particolato di origine urbana(a), naturale(b) e rurale(c) (fonte: Ministero dell’Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 2003).

Stando alle recenti ricerche condotte in campo internazionale e facendo riferimento anche agli studi recenti sulla qualità dell'aria nell'area milanese, in rapporto al particolato atmosferico (progetto PUMI18) si sono ormai acquisite alcune informazioni essenziali sulla differente composizione del particolato grossolano (PM 10) e fine (PM2.5).

Dal confronto tra la composizione del PM10 e PM2.5 (Figura 18) emerge una presenza costante ed importante e del tutto simile del carbonio organico in percentuale (tra il 42 - 45%). La parte inorganica delle polveri (mineral dust, Al, Ca, K, Fe, Si, Ti, ecc.) a minore valenza tossicologica è maggiormente presente nel PM10; nel PM2,5 i solfati ed i nitrati di ammonio rappresentano oltre il 40% del particolato raccolto mentre la parte inorganica minerale è pressoché trascurabile. Da qui la tendenza a valutare con crescente interesse frazioni più fini rispetto al PM10, in particolare il PM2,5 e, cercando di superare le crescenti difficoltà di determinazione, anche il PM1, il PM0,1 ed il numero di particelle.

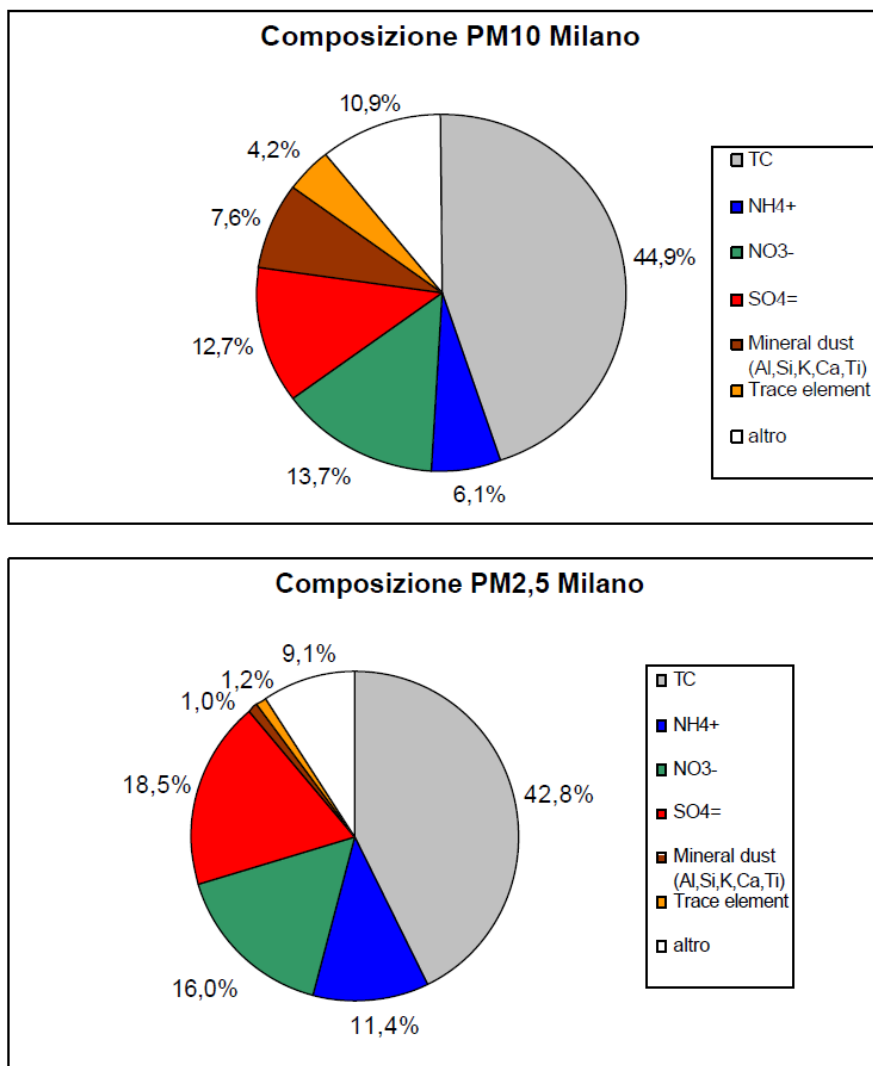


Figura 18 – Composizione del particolato atmosferico a Milano.

Il contenuto della componente organica a maggior valenza tossicologica (IPA, inquinanti organici persistenti in forma particellare o supportati da particelle ecc.) e inorganica di pari interesse (come metalli pesanti e fibre di amianto) sono contenuti prevalentemente nel PM_{2,5}.

Le prime serie di dati sperimentali del progetto PUMI evidenziano che la massa del PM_{2,5} è mediamente il 63% di quella del PM₁₀. In particolare gli IPA contenuti nel PM_{2,5} costituiscono oltre il 90% del totale.

I pochi studi disponibili sulla composizione chimica delle particelle ultrafini indicano il carbonio organico quale specie dominante (30-75%); in funzione del quadro emissivo e delle condizioni meteorologiche, ad esso si aggiungono carbonio elementare (3-15%), nitrati (1-20%), solfati (1-20%) e ossidi di elementi metallici (10-20%). I processi di formazione secondaria fotochimica potrebbero cambiare questo quadro in modo significativo a seguito della condensazione di sostanze organiche su nuclei di altra natura.

2.6 Misura del particolato fine

I principali strumenti utilizzati si distinguono in contatori di particelle e strumenti che effettuano oltre alla conta delle particelle anche una separazione delle particelle campionate in diverse classi granulometriche. Per ottenere la distribuzione granulometrica in massa ci si basa sul diametro aerodinamico equivalente, nel caso invece della distribuzione granulometrica in termini di numero delle particelle si fa riferimento al diametro di mobilità elettrica equivalente. Il diametro aerodinamico equivalente è definito come il diametro di una particella sferica di densità unitaria che ha le stesse caratteristiche inerziali della particella in esame. Nel seguito saranno descritti alcuni strumenti di più comune impiego: impattori gravimetrici, OPC e DMPS, CPC e analizzatori automatici. Per la descrizione dell'ELPI si rimanda al paragrafo 3.1.

2.6.1 Impattore gravimetrico

Per la classificazione granulometrica del particolato viene sfruttato il principio dell'impatto inerziale. Questi strumenti, costituiti da una serie di piatti paralleli esposti a flussi sempre più veloci per il restringimento delle sezioni di passaggio del gas, sono in grado di raccogliere per inerzia particelle sempre più fini. Ciascuno stadio dell'impattore a cascata raccoglie una propria classe granulometrica. Il recupero del particolato depositato sui piatti di raccolta consente inoltre anche una successiva analisi chimica.

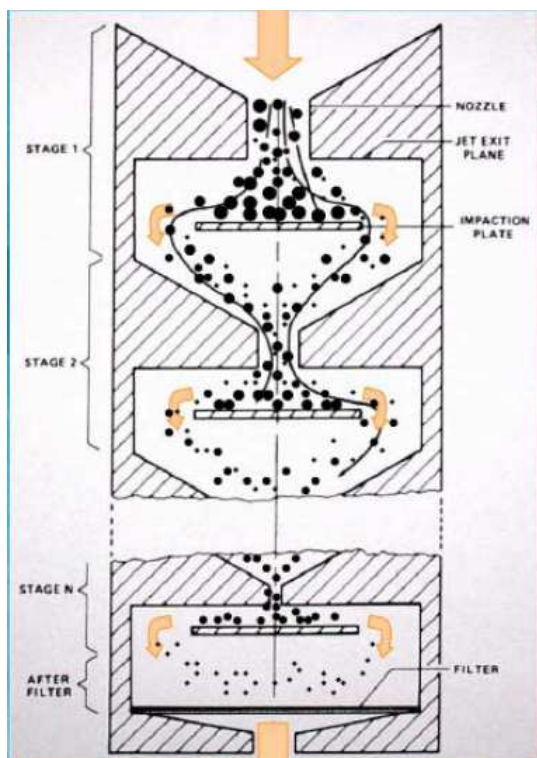


Figura 19 – Schema di un impattore a cascata (Zanini, 2006).

2.6.2 OPC e DMPS

Per determinare la dimensione delle particelle i sistemi più diffusi sono gli OPC (optical particle counter) e i DMPS (Differential Mobility Particle Sizer). I sistemi OPC sfruttano le proprietà ottiche delle particelle: un fascio di luce laser investe il campione d'aria aspirato in continuo all'interno del sistema e un diodo rileva la luce diffusa dalle particelle che attraversano il fascio laser; ogni impulso rilevato corrisponde al passaggio di una particella. Dall'altezza dell'impulso si risale poi alla dimensione della particella stessa. La grandezza rilevata è il diametro ottico della particella e il sistema è in grado di rilevare particelle con dimensioni superiori a qualche centinaio di nanometri. Il DMPS è costituito da due cilindri sui quali è applicata una differenza di potenziale. L'aria campione passa attraverso i due cilindri e le particelle cariche vengono attratte alle pareti. In relazione alla loro mobilità elettrica, alla velocità del flusso dell'aria campione e alla tensione applicata ai cilindri, le particelle possono raggiungere un'apertura posta all'estremità dei cilindri e possono quindi essere selezionate in base al loro diametro di mobilità. Le particelle selezionate entrano poi in un ambiente saturo di vapori, dove avviene la condensazione delle goccioline sulle particelle stesse. Le particelle vengono infine investite da un fascio laser e contate da un rilevatore di impulsi luminosi, come negli OPC. L'accoppiamento di un DMPS e di un OPC consente di determinare la distribuzione dimensionale delle particelle aerodisperse in tutto il loro intervallo di esistenza.

2.6.3 Campionatori CPC

Il CPC (Condensation Particle Counter) viene usato per misurare particelle di aerosol molto piccole attraverso strumenti ottici dopo la crescita delle particelle per condensazione di un fluido di lavoro (butanolo o vapore acqueo) sulle particelle stesse. Il gas aspirato viene prima saturato con il vapore del fluido di lavoro e in seguito raffreddato. L'aria fluisce continuamente all'interno dello strumento, guidata verso l'uscita da un depressore. Passa prima all'interno di un serbatoio di alcool riscaldato, dove si satura con il vapore dell'alcool. In base alla temperatura del saturatore, il tempo di residenza cresce finché l'aria non si satura con il vapore. Dopodiché l'aerosol entra nel condensatore, costituito da un tubo mantenuto a una bassa temperatura dal raffreddamento delle pareti. Nel tubo condensatore il vapore di gas saturo si raffredda per conduzione e convezione, raggiungendo una supersaturazione dell'alcool. In base al grado di supersaturazione, le particelle di una certa dimensione crescono per condensazione del vapore dell'alcool fino a dimensioni di qualche micrometro. Queste "gocce" sono poi contate dal rilevatore ottico OPC.

2.6.4 Analizzatori automatici

Nel controllo ambientale quotidiano, quasi in tempo reale, non è possibile utilizzare il metodo gravimetrico per la misura del PM10 perché occorre un'operazione di condizionamento in ambiente controllato prima e dopo il campionamento per almeno 48 ore. Nelle misure di questo tipo si ricorre quindi ad analizzatori automatici. I sistemi più diffusi sono due: assorbimento di raggi beta o microbilancia a vibrazione. Nei sistemi ad assorbimento a raggi beta l'aria campione passa attraverso un filtro a nastro o a membrana che trattiene il particolato. Prima del campionamento il filtro viene sottoposto a un fascio di raggi beta emessi da una piccola sorgente radioattiva. La stessa operazione viene effettuata dopo il campionamento. La polvere raccolta sul filtro assorbe la radiazione beta e pertanto il rapporto fra l'intensità del fascio registrata prima e dopo il campionamento è legata alla quantità di polvere raccolta. Noto il volume di aria campionata si risale alla concentrazione di polvere. Gli analizzatori automatici a raggi beta devono effettuare almeno un'ora di campionamento per raccogliere sul filtro una quantità di polvere sufficiente per provocare un'attenuazione del fascio beta misurabile con una certa precisione.

I sistemi con microbilancia a vibrazione hanno il filtro posto all'estremità di un elemento messo in vibrazione continua. La frequenza di vibrazione varia in funzione della massa di polvere che nel tempo si accumula sul filtro. La variazione di frequenza è quindi correlata con la massa di polvere raccolta. Noto il volume d'aria campionata, si risale alla concentrazione di massa del particolato. Questo sistema è così sensibile che è in grado di determinare la concentrazione di massa del PM10 anche ogni minuto. Per ragioni di stabilità la bilancia a vibrazione è mantenuta a una temperatura di 50°C. Questo causa l'evaporazione del materiale particolato più volatile che, in certe condizioni, rappresenta fino al 50% della massa di polvere totale, provocando una sottostima delle concentrazioni di PM10. Pertanto questi sistemi, pur essendo precisi sono pochi accurati. Per evitare sottostime vengono utilizzati dei coefficienti di correzione oppure viene previsto un sistema che cerca di valutare la perdita del materiale volatile: per un breve periodo sul filtro riscaldato viene fatta circolare aria pulita; la perdita di materiale campionato nel ciclo precedente viene misurata e sommata alla massa di polvere raccolta al ciclo successivo.

2.7 Effetti del particolato atmosferico

2.7.1 Effetti sulla salute umana

Il particolato atmosferico è tra i principali fattori di rischio ambientale per la salute. Il sistema maggiormente attaccato dal particolato è quello respiratorio e il fattore di maggior rilievo per lo studio degli effetti è la dimensione delle particelle in quanto da essa dipende la capacità di penetrazione nelle vie respiratorie; in tal senso si distinguono tre frazioni:

- **frazione inalabile**: include tutte le particelle che riescono a entrare dalle narici e dalla bocca;
- **frazione toracica**: comprende le particelle che riescono a passare attraverso la laringe e ad entrare nei polmoni durante l'inalazione, raggiungendo la regione tracheo-bronchiale (inclusa la trachea e le vie cigliate);
- **frazione respirabile**: include le particelle sufficientemente piccole da riuscire a raggiungere la regione alveolare, incluse le vie aeree non cigliate e i sacchi alveolari.

Il PM10 e il PM2,5 sono assimilabili rispettivamente alle frazioni toracica e respirabile.

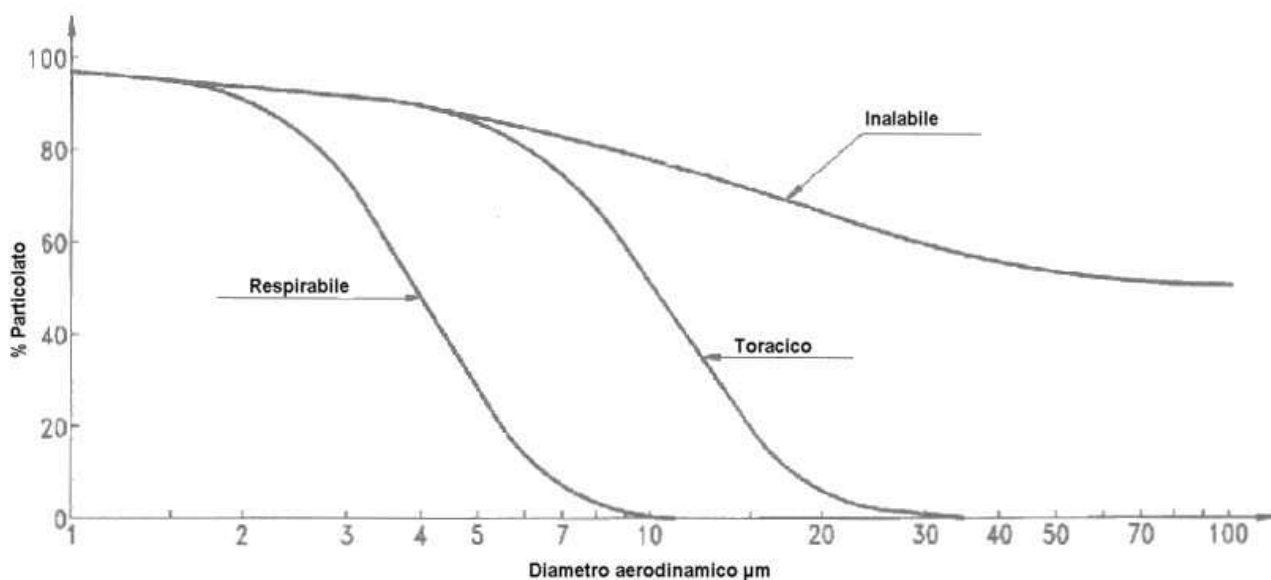


Figura 20 – Frazione di particolato respirabile, toracico e inalabile in funzione del diametro aerodinamico.

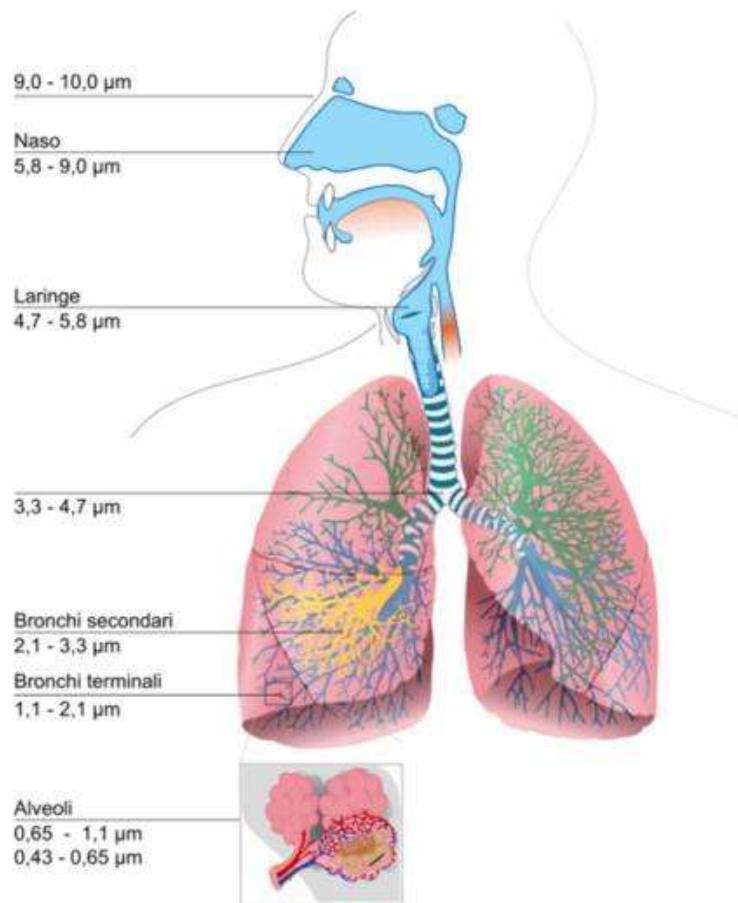


Figura 21 – Profondità di penetrazione del particolato nel sistema respiratorio in funzione della granulometria.

Il particolato che si deposita nel tratto superiore dell'apparato respiratorio (cavità nasali, faringe e laringe) può generare vari effetti irritativi come infiammazione e secchezza del naso e della gola, effetti molto più gravi se le particelle hanno assorbito sostanze acide come il biossido di zolfo, gli ossidi di azoto, ecc. (Brunekreef B. *et al*, 2005). Inoltre per la particolare struttura della superficie, le particelle possono anche adsorbire dall'aria sostanze chimiche cancerogene, che una volta entrate nei tratti respiratori, prolungando i tempi di residenza, ne accentuano gli effetti.

Le particelle più piccole penetrano nel sistema respiratorio a varie profondità e possono trascorrere lunghi periodi di tempo prima che vengano rimosse, per questo sono le più pericolose. Queste, infatti, possono raggiungere gli alveoli polmonari dando luogo ad un possibile assorbimento nel sangue con conseguente intossicazione o aggravare, inoltre, le malattie respiratorie croniche come l'asma, la bronchite e l'enfisema (Kunzli N. *et al*, 2005).

L'evidenza degli effetti sulla salute indotti da un'esposizione al particolato è fornita da due tipi di studi:

- **studi di tipo epidemiologico**, che mirano a individuare le possibili associazioni tra concentrazioni di particelle presenti in atmosfera ed effetti quali mortalità, effetti acuti, effetti su soggetti sensibili (bambini e anziani) ecc;
- **studi di tipo tossicologico**, in maggioranza di natura sperimentale, che hanno invece l'obiettivo di individuare e comprendere i meccanismi biologici attraverso i quali l'esposizione alle particelle può provocare effetti nocivi sull'uomo.

L'esistenza di una stretta correlazione fra inquinamento da polveri e incidenza di malattie (riduzione della funzionalità polmonare, asma, bronchiti croniche etc.), ospedalizzazioni e tassi di mortalità nelle aree urbane è confermata da numerosi studi epidemiologici.



Figura 22 – Piramide degli effetti sanitari attribuibili all'inquinamento dell'aria.

Uno studio di grande rilievo (Künzli et al., 2000) ha calcolato una stima dell'impatto sanitario in Austria, Francia e Svizzera ed ha attribuito al PM10 di origine antropogenica più di 40 000 decessi l'anno. Nel Regno Unito, uno studio eseguito dal Committee on the Medical Effects of Air Pollutants (1998) ha calcolato che 8.100 decessi e 10.500 ricoveri l'anno per malattie respiratorie in

aree urbane erano dovuti ad esposizione a PM10. Anche l'Italia è stata tra i paesi in cui è stato effettuato uno studio di valutazione di impatto sanitario dell'inquinamento dell'aria. Oltre alla partecipazione di varie città italiane ai progetti europei, il Ministero dell'Ambiente ha commissionato all'OMS Ufficio Regionale per l'Europa una valutazione sull'impatto sanitario dell'inquinamento atmosferico. Usando il PM10 come inquinante di riferimento, lo studio ha stimato che nelle otto maggiori città italiane analizzate nel 1998 circa 3.500 decessi (pari al 4,7% di tutti i decessi osservati nella popolazione di oltre trenta anni) e molte altre patologie erano attribuibili a livelli di PM10 superiori a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Martuzzi et al., 2002). In altre parole, circa 3.500 decessi si sarebbero potuti prevenire se la media annua delle concentrazioni di PM10 fosse stata pari a $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e si sarebbero potuti evitare migliaia di ricoveri per cause respiratorie e cardiovascolari e decine di migliaia di casi di bronchite acuta e asma fra i bambini.

Tabella 3 – Esiti sanitari attribuibili a concentrazioni di PM10 superiori ai $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ nelle più grandi città italiane (Fonte: Martuzzi et al., 2002).

Esiti sanitari	Casi attribuibili al PM ₁₀
Tutte le cause di morte (esclusi incidenti) (≥ 30 anni)	3 472
Ricoveri ospedalieri per malattie respiratorie	1 887
Ricoveri ospedalieri per malattie cardiovascolari	2 710
Bronchite acuta (< 15 anni)	31 524
Peggioramento degli attacchi d'asma (< 15 anni)	29 730
Peggioramento degli attacchi d'asma (> 15 anni)	11 360
RADs (> 20 anni)	2 702 461
Sintomi respiratori	10 409 836

Tabella 4 – Effetti di breve termine sulla salute dovuti a un aumento di concentrazione di PM10 pari a $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (fonte: WHO, 2004).

Health outcome	Estimated percentage increase in risk per $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM ₁₀ (95% confidence interval)
All-cause mortality	0.6 (0.4–0.8)
Mortality from respiratory diseases	1.3 (0.5–2.0)
Mortality from cardiovascular diseases	0.9 (0.5–1.3)
Hospital admissions for respiratory disease, people age 65 years and over	0.7 (0.2–1.3)
Cough, children aged 5–15 years with chronic symptoms	0.0 (–1.3–1.1)
Medication use, children aged 5–15 years with chronic symptoms	0.5 (–1.9–2.9)

Una stima della riduzione nella speranza di vita dovuta all'inquinamento dell'aria in Italia è stata calcolata nell'ambito del programma CAFE (Amann et al., 2005). Lo studio ha stimato per l'anno 2000 una perdita di 9 mesi di vita attribuibile alle polveri sottili in Italia (paragonata a una perdita di 8.6 mesi in Europa). Di seguito si riporta una tabella con la stima dei miglioramenti conseguibili nel 2020 a seguito dell'implementazione della normativa vigente:

Tabella 5 – Stima della diminuzione dei danni arrecati alla salute dal PM in Europa ottenibili attraverso l'implementazione della corrente legislazione.

Health end-point	Units (1000s)	2000	2020	Difference
EU				
Mortality – long-term exposure	Life years lost	3001	1900	1101
Mortality – long-term exposure	No. premature deaths	288	208	80
Infant mortality	Cases	0.6	0.3	0.3
Chronic bronchitis	Cases	136	98	37
Respiratory hospital admissions	Cases	51	33	19
Cardiac hospital admissions	Cases	32	20	12
Restricted activity	Days	288 292	170 956	117 336
Respiratory medication use, children	Days	3510	1549	1961
Respiratory medication use, adults	Days	22 990	16 055	6935
Lower respiratory symptoms, children	Days	160 349	68 819	91 529
Lower respiratory symptoms, adults with chronic disease	Days	236 498	159 723	76 773

2.7.1.1 Effetti sulla salute umana del particolato fine e ultrafine

Negli ultimi anni sono stati svolti o si stanno svolgendo studi epidemiologici finalizzati a indagare gli effetti dell'esposizione all'aerosol fine ed ultrafine, a breve e a lungo termine. Dai dati emerge in generale che il fattore di rischio (rischio relativo fra campioni esposti e non esposti) è apprezzabilmente superiore a uno per le popolazioni esposte al particolato fine e soprattutto al nanoparticolato. Nella valutazione degli effetti sanitari l'applicazione di elaborati metodi statistici permette di eliminare gli effetti confondenti (abitudine al fumo, preesistenza di affezioni polmonari non imputabili alle polveri, ruolo di altri inquinanti etc.).

L'obiettivo principale della ricerca in campo medico è volta a individuare i meccanismi con cui avvengono i danni alla salute indotti dalle polveri, al fine di identificare le classi dimensionali ed i costituenti del pulviscolo attivi biologicamente (B.J. Turpin, 1999).

I meccanismi ipotizzati per spiegare i danni che il particolato ultrafine può causare alla salute sono vari e strettamente connessi con le caratteristiche chimiche e fisiche delle particelle e dei loro costituenti. A causa della capacità di penetrazione negli alveoli polmonari e dell'enorme rapporto superficie/massa, è possibile che tali particelle inibiscano l'azione dei macrofagi alveolari, che hanno il ruolo di ripulire il tessuto polmonare dalle sostanze estranee inalate. È inoltre possibile che i macrofagi, per la presenza di un sovraccarico di particolato ultrafine, nel tentativo di distruggere il materiale, aumentino la produzione di mediatori citotossici (specie reattive ossigenate, enzimi e tossine), portando ad un aumento della suscettibilità alle infezioni, con infiammazioni e danni polmonari. Un ulteriore danno ai tessuti deriva dal fatto che il particolato ultrafine è in grado di adsorbire acidi forti, come l'acido solforico (derivante da ossidi di zolfo presenti in atmosfera), danneggiando i tessuti degli alveoli. La presenza di metalli (ferro, manganese, vanadio o nichel derivati dalla combustione o platino, palladio e rodio presenti nei convertitori catalitici dei veicoli a motore), sulla superficie delle particelle, aumenta l'irritazione dei tessuti e ne permette il trasferimento alle cellule. In aggiunta il loro effetto catalitico favorisce la formazione in loco di sostanze ossidanti dannose per i tessuti.

In seguito alla deposizione del particolato nei polmoni, la risposta dell'organismo dipenderà dalla composizione del pulviscolo atmosferico e da come i composti vengono veicolati nei fluidi polmonari. Una larga porzione di pulviscolo organico ultrafine è solubile in acqua. Questo fatto ha importanti implicazioni nel determinare l'entità dell'esposizione ed i meccanismi tossicologici dato che l'acqua costituisce il 90% dei fluidi che circolano nei polmoni. Mentre i materiali insolubili sono internalizzati dalle cellule fagocitiche, la frazione solubile può alterare la composizione del fluido polmonare ed essere assorbita dai tessuti o entrare direttamente nel sistema linfatico e circolatorio. In particolare il carbonio organico dimostra di avere una specifica attività nei fluidi organici presenti all'interno degli alveoli. La solubilità nei liquidi polmonari, la reattività, la capacità di formare radicali liberi, la concentrazione di endotossine, l'igroscopicità del particolato sono proprietà del pulviscolo organico che sono considerate importanti per la comprensione delle conseguenze sulla salute umana.

È interessante analizzare la situazione sia dal punto di vista degli epidemiologi che da quello dei tossicologi. Dai dati epidemiologici emergono elementi che portano a ritenere che le concentrazioni associate a effetti negativi siano sensibilmente più basse rispetto a quanto emerge da studi tossicologici in laboratorio, che in compenso non sono ancora in grado di individuare l'effettivo meccanismo attraverso cui le concentrazioni di particolato molto fine possono causare seri danni alla salute.

Dalle ricerche tossicologiche basate sulla concentrazione di aerosol atmosferici emergono dati interessanti: alcuni animali cavia sottoposti ad un'atmosfera concentrata di particolato fine hanno manifestato alterazione dell'elettrocardiogramma e disordini del ritmo cardiaco che sono risultati fatali. Studi tossicologici effettuati su un gruppo di idrocarburi policiclici aromatici hanno confermato che questi causano tumori della pelle nei topi e cancro mammari nei ratti. Nell'atmosfera urbana questa classe di composti, che risultano adsorbiti sulla fase particellare e in gran parte sulla frazione delle particelle fini ed ultrafini, è presente con livelli sufficientemente alti (0.01 – 1.0 µg/g di aerosol). La non approfondita conoscenza dei meccanismi biologici di azione sulla salute ostacola però lo sviluppo di strategie di controllo efficaci sull'inquinamento atmosferico e gli studi tossicologici tradizionali, che utilizzano aerosol generati in laboratorio con componenti di pulviscolo noti, non sono ancora in grado di determinare nel dettaglio i meccanismi o gli agenti causali responsabili degli effetti osservati.

Allo stato attuale varie sono quindi le ipotesi che cercano di spiegare la tossicità del particolato atmosferico. Secondo una prima ipotesi la tossicità potrebbe derivare dall'accumulazione di materiale solido nel rivestimento epiteliale dei polmoni (effetti associati alla frazione più fine); una seconda ipotesi individua i responsabili della tossicità in certi costituenti chimici come i metalli di transizione; infine un'ipotesi alternativa assume che i danni risultino dall'attivazione dei macrofagi polmonari derivante dagli ossidanti solubili in acqua (perossidi organici) che sono trasportati in profondità negli alveoli polmonari associati con il particolato.

È probabile che i componenti metallici dell'aerosol primario siano importanti agenti catalitici e portino ad un aumento della produzione di mediatori con attività infiammatoria. In particolare è importante la dose di metalli solubili, nello specifico la prima serie dei metalli di transizione, che sono in grado di produrre specie ossigenate molto reattive.

Come si è visto le ipotesi formulate marcano la sfasatura fra studi epidemiologici e studi tossicologici poiché questi ultimi si sono soffermati finora sul particolato fine e non sull'ultrafine. La caratterizzazione chimica del particolato ultrafine costituisce quindi un campo di ricerca estremamente importante, e quello che si sa attualmente è che la composizione media delle polveri ultrafini in atmosfera urbana contiene attorno al 50% di carbonio organico (con valori medi di 0.3 mg m^{-3}) e meno del 10% di carbonio elementare (0.05 mg m^{-3}) (L.S. Hughes et Al., 1998). Le attuali conoscenze portano a concludere che l'aerosol urbano sia formato da una complessa miscela di aerosol recente e datato che proviene da una varietà di sorgenti puntuali di combustione ad alta temperatura e che sia in grado di causare risposte fisiopatologiche.

Osservazioni effettuate su diverse distribuzioni di aerosol forniscono le seguenti informazioni: gli aerosol di accumulazione recente sono conservati dopo l'emissione nell'ambiente, la loro distribuzione dimensionale ($0.1 - 0.3 \mu\text{m}$) non cambia di molto nel trasporto su scala urbana ed è caratterizzata dalla presenza di traccianti elementari che differenziano le fonti e l'accumulazione è fortemente condizionata dall'umidità relativa. L'aerosol contiene metalli pesanti che hanno lunghi tempi di residenza e sono depositati nel tratto respiratorio umano.

Una chiara associazione fra aumento della mortalità ed episodi di forte inquinamento determinato dall'inversione termica è stata riscontrata negli anni passati (Londra 1952 e 1956, New York 1963, etc.) e dagli studi epidemiologici è ormai evidente una correlazione fra affezioni respiratorie ed inquinamento atmosferico. Mentre, attraverso l'introduzione di norme e di controlli e di tecnologie più raffinate, sono state ridotte le emissioni di polveri sospese e le emissioni associate di SO_2 e di NO_x , non altrettanto proporzionalmente risulta diminuita la casistica di malattie e mortalità che risultano associate con l'inquinamento derivante da polveri ultrafini. Inoltre studi effettuati su serie storiche, condotti in città con differenti climi e popolazioni, dimostra l'inesistenza di una soglia sotto alla quale non si osservano effetti, e come tali effetti siano comunque correlati in tempi brevi con variazioni della concentrazione di inquinanti in atmosfera.

Le proprietà chimiche e fisiche del particolato ed in particolare della frazione misurabile più piccola del particolato (nanoparticelle), ritenuta la più probabile causa degli effetti sulla salute, sono oggetto degli studi più recenti; risulta quindi, dal punto di vista epidemiologico, statisticamente significativa la correlazione fra il particolato fine ma ancora più significativa la correlazione con l'ultrafine (EPA, 1999).

In merito all'epidemiologia sull'inquinamento da polveri l'ufficio generale per l'Europa dell'Organizzazione Mondiale della Sanità (OMS), in occasione della conferenza londinese dei ministri per l'ambiente e la salute del giugno del 1999, ha pubblicato uno studio sui costi esterni (cioè costi non pagati da chi inquina ma dall'intera società) dell'inquinamento atmosferico dovuto al traffico stradale svolto in collaborazione fra i ministri dell'ambiente di Francia, Svizzera ed Austria. Il documento si occupa della relazione inquinamento-epidemiologia-economia, in altre parole delle conseguenze economiche dei danni alla salute derivanti dall'esposizione della popolazione all'inquinamento atmosferico determinato dalla circolazione dei veicoli a motore, sovrapponendo la mappa del PM10 alla mappa della popolazione. È stato scelto come indicatore il PM10, perché il particolato è considerato una sintesi degli inquinanti presenti in aria. Nel documento viene posto l'accento sulla necessità in futuro di ripetere lo studio usando indicatori più raffinati come il PM2,5 e ancora meglio il PM1, quando i paesi europei saranno in grado di monitorare in modo sistematico anche queste frazioni più fini di particolato. I risultati dello studio individuano fattori di rischio relativo superiori ad uno per le popolazioni esposte a concentrazioni superiori a $7,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ sia per effetti letali che per varie affezioni respiratorie, in particolare viene osservato un fattore di 1,306 per le bronchiti nella fascia d'età sotto i 15 anni. Altri risultati della ricerca sono che il traffico stradale è responsabile di oltre il 30% della concentrazione totale del PM 10, che il 50% della popolazione è esposta a concentrazioni comprese fra 20 e $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e che i costi esterni annuali individuali medi derivanti dal traffico ammontano approssimativamente a 350 Euro. Nell'agosto del 2000 l'OMS ha replicato in Italia lo studio del 1999, ponendo sotto osservazione otto città italiane con popolazione superiore a 400.000 abitanti (Torino, Genova, Milano, Bologna, Firenze, Roma, Napoli e Palermo), corrispondenti al 15% della popolazione italiana. I risultati conseguiti, relativamente ai fattori di rischio, risultano analoghi a quelli dello studio trilaterale. Nelle otto città campione la concentrazione media annuale nel 1998-99 risulta superiore a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$: da un minimo di 44,4 (Palermo) ad un massimo di 53,8 (Torino). Le proiezioni dello studio portano inoltre a prevedere la riduzione di 5500 morti per anno se si riuscisse a far scendere il PM10 a $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

2.7.2 Effetti sul clima e sul microclima

Il particolato atmosferico assorbe e/o riflette le radiazioni provenienti dal Sole in funzione della dimensione e composizione chimica delle particelle che lo compongono, e della lunghezza d'onda della radiazione stessa. Esso ha quindi un'influenza diretta sul bilancio energetico terrestre, a cui è

legato il clima, e l'effetto complessivo dipenderà dal quantitativo relativo di energia luminosa riflessa verso lo spazio (backscattering) rispetto a quella assorbita.

Inoltre le particelle di PM possono agire indirettamente a favore di un raffreddamento del pianeta in quanto fungono da nuclei di condensazione per le nuvole, aumentandone la probabilità di formazione; infatti se da un lato esse riflettono la luce solare (riflessione più efficiente rispetto a quella degli oceani e delle terre emerse) portando ad un raffreddamento della superficie della Terra, dall'altro possono avere però anche un ruolo nei fenomeni d'assorbimento della radiazione infrarossa terrestre, contribuendo positivamente al riscaldamento della Terra.

Il particolato ha effetti anche sul microclima urbano: infatti, nei centri urbani l'inquinamento dell'aria contribuisce all'effetto "isola di calore", creato dall'elevata cementificazione delle città, inibendo la perdita di radiazioni ad onde lunghe durante la notte. Oltre a questo, il particolato presente su città di grandi dimensioni può ridurre anche di più del 15% la quantità di radiazione solare che raggiunge il suolo, effetto evidente soprattutto quando il Sole è basso sull'orizzonte perché il cammino percorso dalla luce attraverso l'aria inquinata aumenta al ridursi dell'altezza del Sole. Quindi, a una data quantità di particolato, l'energia solare sarà ridotta in modo più intenso in città poste ad alte latitudini e nei periodi invernali.

Rispetto alle zone rurali circostanti, l'umidità relativa delle città è generalmente più bassa del 2-8%; ciò è dovuto al fatto che le città sono più calde e che le acque meteoriche scorrono via rapidamente, ma nonostante ciò sulle città le nubi e la nebbia si formano frequentemente grazie alle attività umane che nelle aree urbane producono grandi quantità di particelle che fungono da nuclei di condensazione, favorendo appunto la formazione di nubi e nebbie, e, quando i nuclei igroscopici sono numerosi il vapor d'acqua condensa rapidamente su di essi, a volte anche in situazioni di sottosaturazione, determinando così un aumento delle precipitazioni sulle città dovuto proprio al particolato atmosferico (Lutgens et al, 1995).

2.7.3 Effetti sugli ecosistemi, su piante e animali

Il particolato atmosferico, in seguito a deposizione secca o umida, può contribuire ai processi di acidificazione (associata in particolare ad H_2SO_4 e HNO_3) e di eutrofizzazione (associata ai sali nitrati) degli ecosistemi terrestre e acquatico.

L'acidificazione dei suoli può portare al rilascio di elementi tossici come l'alluminio provocando seri danni alle piante e alle varie forme di vita acquatica. Inoltre si hanno effetti diretti sulla vegetazione in relazione ad un'azione acida e ossidante delle particelle, che porta al danneggiamento dei tessuti vegetali. A questi se ne aggiungono altri le cui ricerche condotte finora riguardano soltanto gli effetti da polveri specifiche: ad esempio, le polveri provenienti dai forni per cemento, che interagendo con la nebbia o la pioggia, formano una spessa crosta sulla superficie fogliare che funge da scudo per la luce solare interferendo con la fotosintesi ed inibendo lo sviluppo della pianta.

Il clima e l'inquinamento atmosferico, interagendo tra loro, degradano il patrimonio artistico, architettonico ed archeologico, ed è stato osservato che i danni ai materiali sono legati soprattutto alla composizione chimica e allo stato fisico dell'inquinante. Un primo danno indiretto è causato dall'annerimento dei materiali dovuto alla sedimentazione del particolato il quale può, inoltre, fungere da serbatoio di acidi provocando corrosioni. I processi corrosivi si intensificano con l'aumento dell'umidità in atmosfera; infatti, il particolato funge da nuclei di condensazione per le goccioline di acqua nelle quali si dissolvono molti gas che aumentano l'acidità delle deposizioni.

Il particolato inoltre danneggia i circuiti elettrici ed elettronici, intacca il valore artistico degli edifici e delle opere d'arte e riduce la durata dei tessuti.

2.7.4 Effetti sulla visibilità

La visibilità è definita come la più grande distanza, in una certa direzione, alla quale viene visto e identificato un oggetto scuro alla luce del giorno, o una fonte di luce non focalizzata nella notte (Samara, Kouimtzis et al, 2003).

La diminuzione della visibilità atmosferica è provocata dalla riflessione della radiazione solare ad opera del particolato in particolare delle particelle di dimensioni nell'ordine della lunghezza d'onda del visibile. Il particolato dei fumi e delle esalazioni, oltre a provoca una diminuzione della visibilità atmosferica, diminuisce anche la luminosità assorbendo o riflettendo la luce solare. Negli ultimi 50 anni si è notata una diminuzione della visibilità del 50% ed il fenomeno risulta tanto più grave quanto più ci si avvicina alle grandi aree abitative ed industriali.

2.8 Cenni normativi

2.8.1 Linee guida OMS e legislazione europea

Considerata la mancanza di un valore soglia al di sotto del quale non si osservano effetti avversi sulla salute, nessun valore di concentrazione specifico per il PM è stato proposto dall'OMS nelle linee guida sulla qualità dell'aria (WHO Regional Office for Europe, 2000). Effetti avversi per la salute sono stati osservati a livelli non lontani dai valori di concentrazione naturali, cioè a circa $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Se esiste un valore soglia per il PM, esso si trova perciò nell'intervallo inferiore dei valori di concentrazione attualmente osservati nei paesi europei (WHO Regional Office for Europe, 2003). A causa della continua produzione di evidenza scientifica l'OMS sta attualmente revisionando le linee guida sulla qualità dell'aria. Nella Direttiva 1999/30/EC (Unione Europea, 1999) venivano introdotti due differenti limiti per il PM₁₀ per la protezione della salute umana: un limite per la media giornaliera e uno per quella annuale. In una prima fase (da raggiungere entro il 1 gennaio 2005), il limite di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$, calcolato come media giornaliera, non doveva essere superato per più di 35 volte in un anno, mentre la media annuale (un obiettivo meno stringente) non doveva superare il limite di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. In una seconda fase (da raggiungere entro il 1 gennaio 2010) il limite di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ non dovrebbe essere superato per più di sette volte in un anno, mentre la media annuale, come consigliato dall'OMS per la tutela della salute, non dovrebbe superare il limite di $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tabella 6 – Valori limite di particolato (PM₁₀) per la protezione della salute umana.

	Periodo di mediazione	Valore limite	Data alla quale il valore limite deve essere rispettato
FASE 1			
1. Valore limite per la protezione della salute umana	24 ore	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM ₁₀ da non superare più di 35 volte per anno civile	1° gennaio 2005
2. Valore limite per la protezione della salute umana	Anno civile	$40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM ₁₀	1° gennaio 2005
FASE 2			
1. Valore limite di per a protezione della salute umana	24 ore	$50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM ₁₀ da non superare più di 7 volte per anno civile	1° gennaio 2010
2. Valore limite per la protezione della salute umana	Anno civile	$20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM ₁₀	1° gennaio 2010

Con il recepimento della nuova Direttiva 2008/50/CE i nuovi valori limite per il materiale particolato fine (seconda fase) che avrebbero dovuto entrare in vigore dal 1° gennaio 2010, saranno abrogati e saranno sostituiti da altri indici maggiormente indicativi dell'esposizione media della popolazione umana. Con 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, che ad oggi deve ancora essere recepita nell'ordinamento nazionale, l'Unione Europea ha inteso aggiornare e riunire in un solo testo i cinque strumenti giuridici relativi alla qualità dell'aria integrando gli ultimi sviluppi in ambito medico e scientifico, nonché le esperienze più recenti acquisite dagli stati membri sulla gestione della qualità dell'aria.

I principali elementi di novità introdotti dalla nuova direttiva riguardano:

- L'abolizione della fase 2 per il PM10 (che sarebbe dovuta entrare in vigore l'1/1/2010);
- Un valore limite annuale per il PM10 di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ al 1 gennaio 2010 con un 20% di tolleranza senza una specifica data di scadenza. Questo significa in realtà un valore limite di $48 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Un valore limite del PM10 per le 24 ore di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ con 35 eccedenze annuali, ma con il 50% di tolleranza senza una specifica scadenza.
- La possibilità per gli stati membri di chiedere una deroga per le zone o agglomerati dove non è possibile conformarsi ai valori limite del PM10 “per le caratteristiche di dispersione specifiche del sito, per le condizioni climatiche avverse, o per l'apporto di inquinanti transfrontalieri”, fino all'11 giugno 2011, purché dimostri che sono state adottate tutte le misure del caso per rispettare le scadenze.
- Viene introdotto un valore obiettivo di PM2.5 pari a $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da raggiungere dal 1 gennaio 2010 e un valore limite di $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, destinato a scendere con una percentuale annua fino a raggiungere nel 2020 il livello di $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Viene stabilito un obiettivo nazionale di riduzione dell'esposizione (IEM – indicatore esposizione media) rispetto ad un anno di riferimento (2008-2010) per arrivare a ridurre fino al 20% la media del PM 2.5 nel 2020. Tale riduzione non deve essere perseguita nei luoghi dove la media annuale di PM 2.5 è già di $8,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ o inferiore.
- Viene stabilito un obbligo nazionale per il PM2,5 di concentrazione dell'esposizione media (IEM) per l' anno 2015 di 20mg m^{-3} .

- Misurazioni nei siti di fondo a prescindere dalla concentrazione per il PM_{2,5}. Si tratta di informazioni essenziali per valutare i livelli più elevati nelle zone più inquinate (come il fondo urbano, i siti connessi ad attività industriali, i siti relativi al traffico), determinare il possibile contributo dato da inquinanti atmosferici trasportati su lunghe distanze e contribuire all'analisi della ripartizione tra le varie fonti.

A seguito dell'entrata in vigore della nuova direttiva UE sulla qualità dell'aria, che autorizza gli Stati membri a chiedere una proroga di durata limitata per l'adeguamento alle norme in materia di PM₁₀ entrate in vigore nel 2005, l'Italia ha presentato due notifiche riguardanti circa 80 zone situate in 17 regioni e province autonome. La Commissione ha tuttavia respinto gran parte delle richieste in quanto le zone non soddisfacevano tutte le condizioni previste dalla direttiva. Nella maggioranza dei casi l'Italia non era in grado di dimostrare che l'azione intrapresa avrebbe garantito il rispetto dei valori limite UE (concentrazione giornaliera di 50 µg/m³, che non può essere superata più di 35 volte per anno civile) entro il termine della proroga fissato per il giugno 2011. Se l'Italia non si adegnerà alle norme europee in materia di polveri sottili nei tempi previsti la Commissione UE si rivolgerà alla Corte di giustizia europea per avviare una procedura di infrazione per violazione delle direttive comunitarie.

L'inquinamento atmosferico continua a causare ogni anno più di 350.000 morti premature in Europa. In Italia in molti centri urbani per ogni 10.000 abitanti, più di 15 persone muoiono prematuramente solo a causa del particolato. E' importante che gli Stati membri continuino a prendere sul serio le norme europee di qualità dell'aria e adottino i provvedimenti necessari per ridurre le emissioni (Janez Potočnik, 2010).

Anche se la concentrazione in massa è un consolidato indicatore della tossicità alla base degli standard attuali, alcuni recenti studi mettono in relazione anche il numero e la dimensione delle particelle con gli effetti sulla salute evidenziando la possibilità che le nanoparticelle (soprattutto carbonio elementare, metalli di transizione e biossido di metallo), penetrando attraverso le vie respiratorie e oltrepassando il tessuto epiteliale degli alveoli, attraverso il sistema linfatico e quello sanguigno raggiungano altri organi, quali cervello, fegato e reni (vedi paragrafo 2.7.1.1). Hanno quindi effetti sulla salute umana diversi da quelli accertati per le polveri fini e grossolane e le misure adottate per il PM₁₀ e PM_{2,5} potrebbero non essere sufficienti a salvaguardare la salute umana per quanto riguarda questi aspetti.

2.8.1.1 Milano: i Sindaci contro le polveri sottili

I Comuni della Pianura Padana il 19 febbraio 2010 hanno sottoscritto a Milano un'alleanza bipartisan contro le polveri sottili. In quest'ottica un'ottantina di sindaci del Nord d'Italia hanno deciso di proclamare contemporaneamente lo stop alle auto. A loro si sono subito accodate alcune grandi città come Napoli e Firenze. Questa decisione ha un valore storico, perché per la prima volta 80 comuni si riuniscono per combattere l'inquinamento atmosferico.

Il blocco del traffico rappresenta un messaggio di sensibilizzazione nei confronti dei cittadini ma anche del Parlamento e del governo affinché adottino misure a breve termine di carattere strutturale. Il coordinamento dei sindaci della Valpadana contro lo smog si è costituito con l'obiettivo di condividere buone pratiche ambientali e di sottoscrivere una piattaforma di interventi da sottoporre al governo: come l'esonero dal patto di stabilità per gli investimenti contro l'inquinamento, maggiori risorse e procedure più rapide per la realizzazione di nuove metropolitane e ferrovie urbane.

Per reperire risorse è stato proposto un lieve rincaro ai pedaggi di autostrade e tangenziali, da applicare solo ai veicoli più inquinanti o in alternativa esteso a tutti i mezzi tranne che a quelli ecologici, da redistribuire ai Comuni per finanziare il trasporto pubblico. Davanti a una mobilitazione corale dei sindaci del Nord contro l'inquinamento, anche il governo ha deciso di lanciare un segnale. I ministeri dell'Ambiente, dello Sviluppo Economico e delle Politiche Agricole hanno annunciato un nuovo piano nazionale anti-smog, che a marzo 2010 sarà discusso con le Regioni e gli enti locali.

2.8.2 Confronto tra limiti imposti dalla normativa e PM10 misurato nei capoluoghi lombardi

Nella Figura 22 sono rappresentati i valori medi annuali dal 2002 al 2008 rilevati da stazioni di "background urbano" dei capoluoghi di provincia. Tali stazioni sono quelle che meglio rappresentano il valor medio cittadino in quanto non influenzate da sorgenti dirette e quindi meglio rappresentative dell'esposizione media della popolazione. Nel grafico si osserva una tendenza alla diminuzione, in particolare negli ultimi due anni. Va sottolineato che la variabilità tra anni è particolarmente influenzata dalle condizioni meteorologiche: il 2008, infatti, è stato un anno caratterizzato da una meteorologia più favorevole alla dispersione degli inquinanti rispetto ad alcuni anni precedenti. Il limite annuale del PM10 (pari a $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) è comunque stato superato in alcuni capoluoghi lombardi (Milano, Monza, Lodi, Brescia e Sondrio), mentre il limite giornaliero (pari a $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ da non superare più di 35 giorni all'anno) è stato rispettato solo a Varese, come si evince dalla Figura 23.

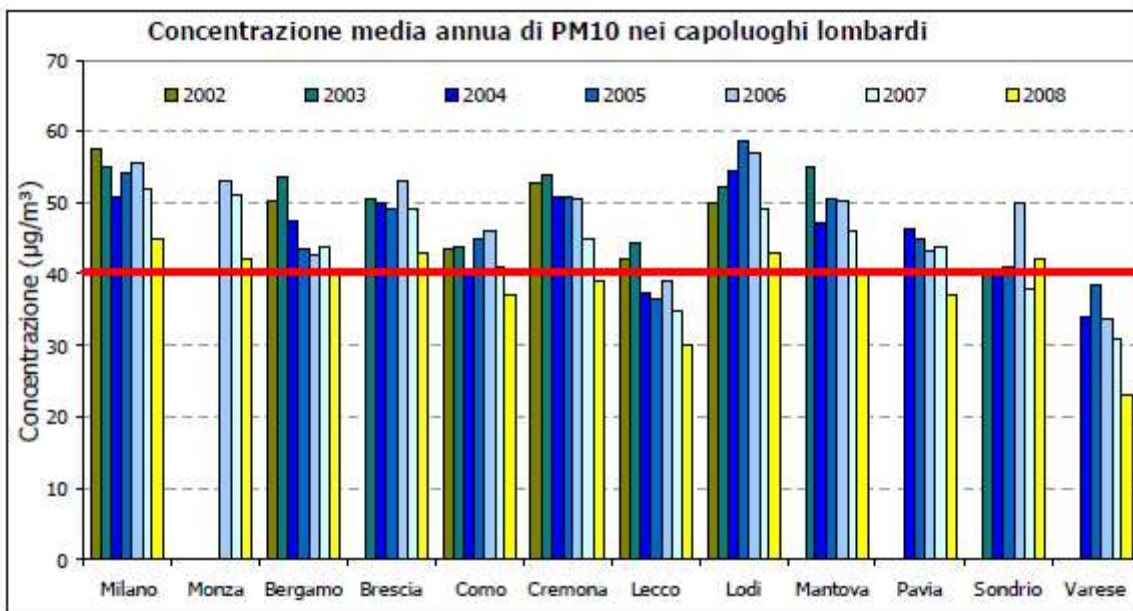


Figura 23 – Valori medi annuali di PM10 misurati nell’anno 2008 nei capoluoghi lombardi. La linea rossa rappresenta il valore limite stabilito dalla normativa (fonte: ARPA).

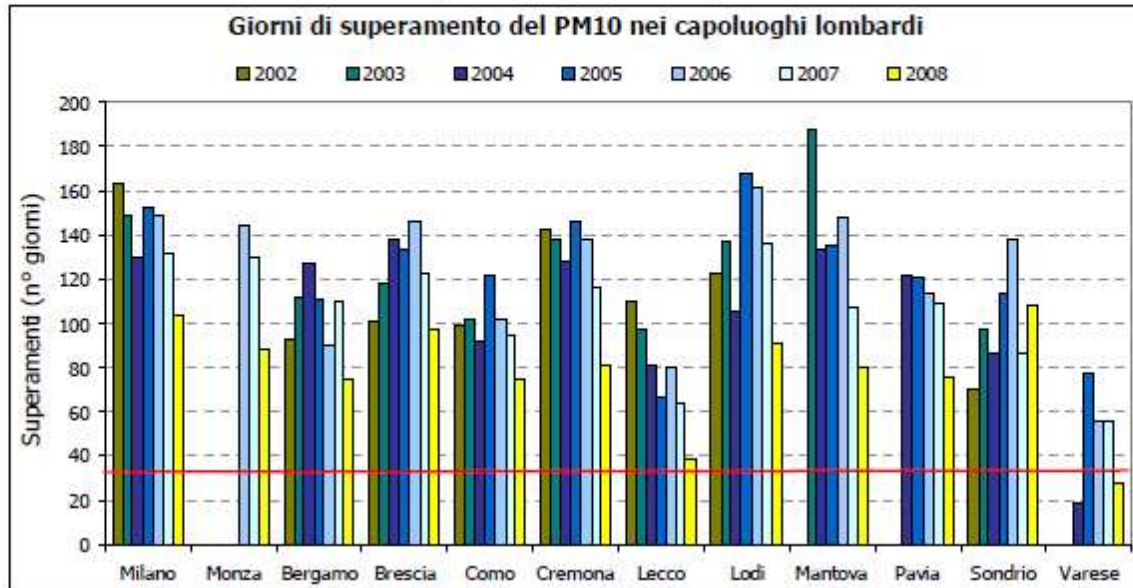


Figura 24 – Numero di giorni in cui è stato superato il limite giornaliero stabilito per il PM10 (50 µg/m³) nei capoluoghi lombardi nell’anno 2008. La linea rossa rappresenta il numero massimo consentito di superamenti giornalieri (35 all’anno).

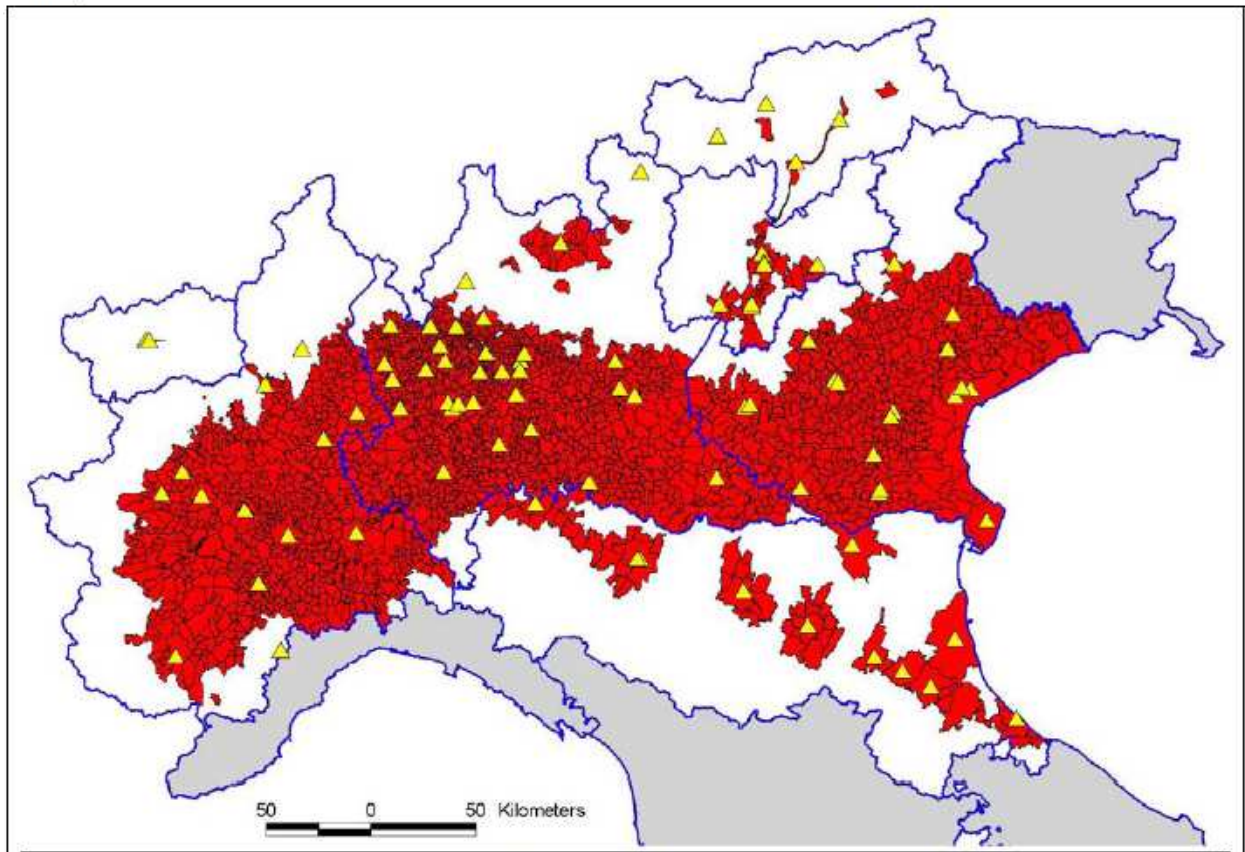


Figura 25 – Mappa dei comuni dove si è registrato il superamento del valore limite sulla media giornaliera del PM10 (più di 35 giorni con media giornaliera maggiore di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) – anno 2005. I triangoli gialli sono le stazioni di misura.

Bisogna però tener presente il contesto morfologico e meteorologico della pianura padana. Il Bacino Padano, chiuso dalle montagne su tre lati, rappresenta dal punto di vista della qualità dell'aria una sorta di catino chiuso in cui le emissioni di inquinanti si distribuiscono, ma faticano a disperdersi. Ciò determina condizioni meteorologiche particolarmente sfavorevoli per la qualità dell'aria: i venti medi sono tra i più bassi d'Europa (spesso nella pianura lombarda e piemontese, inferiore ad 1 m/s); frequentemente si instaurano condizioni di alta pressione associata a stabilità atmosferica (il numero di giorni con condizioni di tempo anticiclonico è sempre maggiore di 100 all'anno); l'inversione termica, che limita la dispersione degli inquinanti, è molto frequente durante l'inverno, con gli inquinanti che possono disperdersi in altezza solo fino a pochi metri dal suolo.

La realtà socioeconomica del Bacino Padano è peraltro sicuramente importante: la densità abitativa, nelle aree di pianura e nei fondovalle è elevata, le attività antropiche sono rilevanti e contribuiscono in modo significativo alla produzione della ricchezza del Paese. La popolazione del bacino rappresenta più del 40% della popolazione italiana ed il prodotto interno lordo dell'area rende conto

di più della metà dell'intero PIL nazionale, con una realtà produttiva basata soprattutto su piccole e medie imprese, con la conseguente necessità di mobilità.

Ciò nonostante, la situazione delle emissioni di inquinanti nel Bacino Padano rapportata alla popolazione o al PIL, è tra le più virtuose in Europa e i margini di miglioramento sono pertanto ancora più impegnativi: le emissioni pro-capite e pro unità di PIL delle regioni del Bacino Padano, e in particolare della Lombardia (Tabella 7), di SO₂, NO_x, CO, PM10, PM2.5, CO₂ equivalenti sono inferiori a quelle della media europea (sia a 15 che a 27 Stati) e inferiori o paragonabili a quelle degli stati più avanzati.

Tabella 7 – Emissioni pro capite e pro unità di PIL.

Emissioni pro capite e pro unità di PIL								
	Inquinanti normati dalla Direttiva 2008/50/CE					Altri inquinanti		
	SO ₂	NO _x	CO	PM10	PM2.5	NH ₃	NM ₁₀ VOC	CO ₂ eq
Differenza % Lombardia - Media UE 27 PRO CAPITE	-88%	-26%	-33%	-51%	-46%	28%	7%	-27%
Differenza % Lombardia - Media UE 15 PRO CAPITE	-75%	-28%	-30%	-43%	-39%	26%	7%	-30%
Differenza % Lombardia - Media UE 27 PRO Unità PIL	-91%	-46%	-51%	-64%	-61%	-8%	-22%	-47%
Differenza % Lombardia - Media UE 15 PRO Unità PIL	-79%	-40%	-42%	-53%	-50%	3%	-12%	-42%

In relazione alle concentrazioni di inquinanti misurate, in tutte le Regioni del Bacino si è operato secondo quanto previsto dalle direttive, attuando programmi e piani di risanamento, che, insieme all'evoluzione delle emissioni dovute alla legislazione nazionale e comunitaria vigente, hanno permesso almeno per alcuni inquinanti, di ottenere una riduzione anche significativa delle concentrazioni rilevate. Le concentrazioni misurate di PM10 e ozono sono, d'altra parte, ancora superiori ai limiti di qualità dell'aria previsti dalle normative europee in ampie aree del bacino. Superamenti più localizzati si registrano anche per il biossido d'azoto.

Peraltro anche la composizione del particolato, con importante presenza di particolato secondario, e l'alta correlazione tra le stazioni di rilevamento confermano come il problema sia di bacino. Percentualmente non contano infatti molto le punte emissive locali, quanto la concentrazione di background particolarmente elevata e diffusa in modo omogeneo su tutto il territorio della pianura. Anche in molte stazioni della pianura, lontano da fonti di emissioni dirette, le concentrazioni medie

annue di PM10 superano $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ e si registrano più di 70 superamenti giornalieri della media di $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. D'altra parte, sebbene già siano state ottenute importanti riduzioni delle emissioni e delle concentrazioni e siano previsti dalle Regioni del Bacino ulteriori importanti programmi di intervento, con risultati emissivi pro-capite e pro-unità di PIL confrontabili ai migliori interventi a livello europeo, la sfida per il raggiungimento dei valori limiti del PM10 è davvero impegnativa. Si stima che, considerata la tipicità delle condizioni meteorologiche del bacino, rispetto alla situazione del 2003 siano necessarie riduzioni delle emissioni di PM10 e dei suoi precursori nell'area di bacino tra il 30% e il 50% per conseguire il limite sulla media annua e tra il 50% ed il 70% per conseguire il limite sulla media giornaliera.

3. Materiali e metodi

3.1 Strumento di misura: ELPI - Impattore elettrico a bassa pressione

Lo strumento ELPI (acronimo di Electrical Low-Pressure Impactor), che lavora ad una pressione di 100 mbar, è un impattore costituito da dodici stadi, ciascuno dei quali è definito da un diametro di taglio, che corrisponde alla dimensione delle particelle raccolte con un'efficienza del 50%, il cui valore è decrescente nella direzione del flusso delle particelle. Nella Tabella 8 sono indicati gli intervalli dimensionali delle particelle associati a ogni singolo stadio.

L'ELPI è quindi in grado di misurare in tempo reale la concentrazione in numero di dodici classi dimensionali di particolato distribuite nell'intervallo di diametri aerodinamici 0,03-10 μm . Attraverso l'installazione del "filter stage", dopo l'ultimo stadio dell'impattore, l'intervallo dimensionale può essere esteso fino ai 7 nm. La somma dei valori del numero di particelle emesse in ciascuna classe può essere considerata equivalente all'emissione della frazione < 10 μm del particolato totale, nota comunemente come PM10.

Tabella 8 – Caratteristiche degli stadi dell'impattore ELPI.

STADIO	D _{50%} (μm)	D _i (μm)
12	9,98	-
11	4,02	6,334
10	2,41	3,113
9	1,61	1,970
8	0,955	1,240
7	0,618	0,768
6	0,385	0,488
5	0,264	0,319
4	0,157	0,203
3	0,093	0,121
2	0,055	0,072
1	0,028	0,039
Filtro	0,007	0,021

Prima di entrare nel dettaglio della descrizione del principio di funzionamento dello strumento si riporta in Figura 26 lo schema dei principali componenti dell'ELPI.



Figura 26 – Schema dei componenti dell’ELPI (Manuale ELPI, Dekati).

L’ELPI è costituito da tre unità principali: un caricatore unipolare, un impattore elettrico a cascata a bassa pressione ed un elettrometro multi-canale (Figura 27).

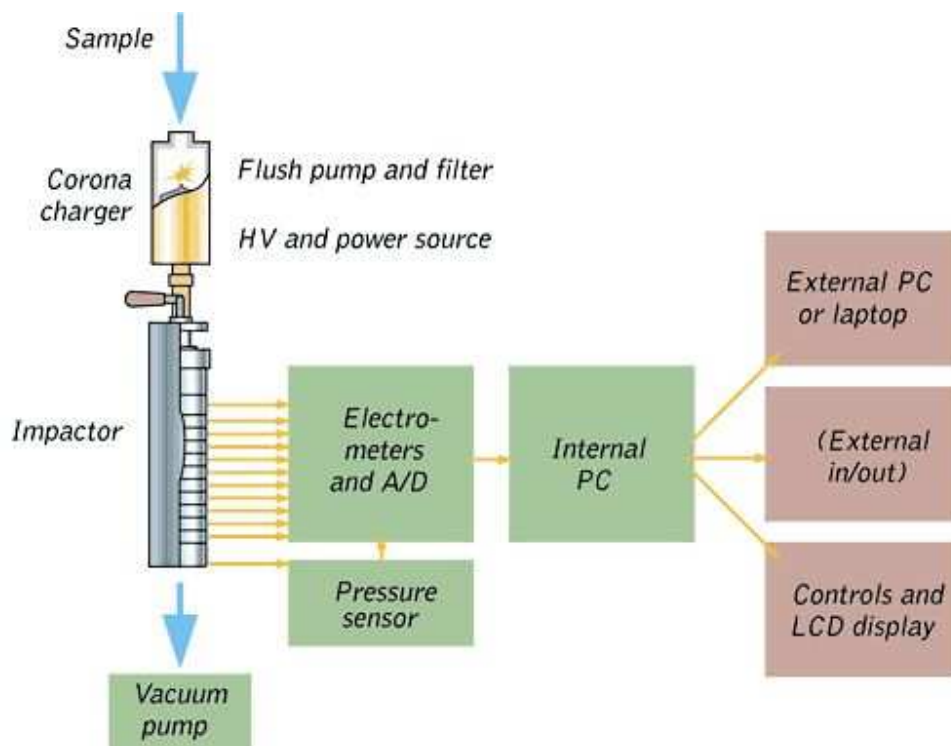


Figura 27 – Principali componenti di ELPI (Manuale ELPI, Dekati).

Il flusso campionato passa attraverso un caricatore unipolare positivo (charger), dove le particelle vengono caricate elettricamente da un flusso di ioni prodotti da una scarica a corona, impostato a 1 μA . La corrente è il parametro più importante per il corretto funzionamento del Charger, dato che il voltaggio può variare di poco (± 1 kV) dal suo valore impostato (5 kV). In seguito le particelle caricate vengono classificate dimensionalmente in un impattore a bassa pressione, costituito da 12 stadi. L'impattore inerziale classifica le particelle in base al loro diametro aerodinamico. Gli stadi dell'impattore sono elettricamente isolati ed ognuno di questi è individualmente connesso ad un elettrometro amplificatore di corrente. Le particelle caricate in uno specifico stadio dell'impattore producono un effetto di corrente, che viene registrato dal corrispondente canale dell'elettrometro. Il valore di corrente di ogni canale è proporzionale al numero di particelle raccolte, quindi alla concentrazione di particelle appartenenti ad un particolare intervallo dimensionale. In seguito i valori di corrente sono convertiti in una distribuzione dimensionale, in base a relazioni funzione della dimensione della particella. La maggior parte delle particelle di aerosol possiedono una carica elettrica naturale. In ELPI le particelle devono subire ulteriori stadi di carica, quindi prima che entrino nello strumento esse devono essere neutralizzate. Alcuni gas critici, come SO_2 , possono interagire con la zona ad alta energia creata dalla scarica a corona: l'interazione può dar luogo alla formazione di particelle ultrafini, causando artefatti di misurazione.

Durante il campionamento è possibile osservare la registrazione di correnti negative, specialmente negli stadi associati alle classi di granulometria inferiore; ciò può accadere se la dimensione media delle particelle è molto piccola ed è presente una bassissima concentrazione di particelle con diametro maggiore di $2,5 \mu\text{m}$, oppure se vi sono improvvisi cambiamenti nella concentrazione delle particelle campionate. Invece, se la carica originale delle particelle è negativa, il charger produrrà una sufficiente quantità di ioni positivi per la loro neutralizzazione per poi caricare normalmente le particelle.

Se la misura dell'impattore continua per lungo tempo o il campionamento è fatto per un'alta concentrazione di particelle, si possono avere effetti negativi sulle prestazioni dell'impattore, dovuti all'elevata quantità delle particelle raccolte. Tali effetti negativi sono imputabili ad un incremento dell'effetto di rimbalzo, anche se gli stadi sono stati preventivamente lubrificati.

Le distribuzioni dimensionali in numero e in massa sono ottenute indirettamente attraverso calcoli effettuati dal software ELPIVI. Il software fornisce un'interfaccia grafica per controllare le impostazioni dello strumento e permette il salvataggio dei dati. Durante l'acquisizione il software

mostra in tempo reale la concentrazione delle particelle e la loro distribuzione dimensionale. I dati possono essere visualizzati come concentrazione in numero, o come grandezze da essa derivate quali la concentrazione in volume, area o massa, che vengono salvati in un file di testo ASCII.

L'ELPI è uno strumento è adatto per applicazioni che richiedono un ampio intervallo di dimensioni e brevi tempi di risposta, sia nel settore della qualità dell'aria sia in quello delle emissioni da fonti di combustione fissa e mobile (in particolare per la rilevazione di particelle emesse da motori diesel ed a gasolio) (*Baron e Willeke, 2005*).

3.2 Siti e periodi di rilevamento

Le campagne di misura della concentrazione numerica del particolato atmosferico sono state effettuate in due siti di rilevamento della città di Milano localizzati in:

- Pascal città studi, sito rappresentativo dei livelli di inquinamento di fondo urbano;
- Viale Marche, sulla circonvallazione milanese, sito influenzato dal traffico veicolare.



Figura 28 – Localizzazione dei siti di rilevamento.



Figura 29 – Centralina di via Pascal (sinistra) e centralina di Viale Marche (destra).

I dati raccolti riguardano sette campagne di misura effettuate negli anni 2008 e 2009 nei mesi di settembre, ottobre e novembre. I dati di concentrazione, riferiti a periodi diurni e notturni, sia durante giorni feriali sia festivi, hanno una risoluzione temporale al minuto. Nella Tabella 9 sono riportati nel dettaglio i periodi di campionamento e le stazioni di rilevamento utilizzate per il reperimento dei dati riguardanti gli inquinanti atmosferici ed i parametri meteorologici utilizzati nelle successive elaborazioni.

Tabella 9 – Caratteristiche delle campagne di misure effettuate.

ANNO	SITO	TIPOLOGIA SITO	PERIODO	PARAMETRI INQUINANTI	PARAMETRI METEOROLOGICI
2008	MARCHE	TRAFFICO	23-31 OTTOBRE	Stazione ARPA – Viale Marche	Stazione ARPA – Viale Marche
	PASCAL	FONDO URBANO	2-20 OTTOBRE	Stazione ARPA - Pascal città studi	Stazione ARPA - Lambrate
			7-14 NOVEMBRE		
2009	PASCAL	FONDO URBANO	21-25 SETTEMBRE	Stazione ARPA - Pascal città studi	Stazione ARPA - Lambrate
			28 SETT – 2 OTTOBRE		
			5 – 9 OTTOBRE		
			14 OTT – 2 NOVEMBRE		

3.3 Caratterizzazione del periodo di rilevamento degli inquinanti atmosferici

Per tale caratterizzazione sono stati utilizzati i dati provenienti dalle centraline ARPA di Pascal città studi e di Viale Marche. Gli inquinanti presi in considerazione sono stati:

- NO_x (NO, NO₂), O₃, SO₂, PM10 e PM2,5 per il sito Pascal, città studi;
- NO_x (NO, NO₂), CO per il sito di viale Marche.

Lo scopo è stato quello di valutare una possibile correlazione fra concentrazioni numeriche di particolato e le concentrazioni degli inquinanti monitorati dalle centraline ARPA.

Dai dati orari a disposizione è stato individuato il giorno tipo rappresentativo di ogni inquinante di interesse che è stato poi messo a confronto con il giorno tipo ricavato dai dati di particolato.

3.4 Caratterizzazione meteorologica dei periodi di rilevamento

Le variabili meteorologiche influenzano notevolmente i livelli di inquinamento presenti, regolando infatti la velocità con cui gli inquinanti vengono trasportati e si disperdono in aria (ad es. velocità del vento, flussi turbolenti di origine termica o meccanica) o portati al suolo (rimozione da parte della pioggia) e definendo il volume in cui gli inquinanti si disperdono. Inoltre esse determinano la velocità di alcune reazioni chimiche che portano alla formazione in atmosfera degli inquinanti secondari, quale ad esempio l'ozono.

Per ogni giorno del periodo campionato sono stati considerati i seguenti parametri meteorologici al fine di valutarne la possibile correlazione con le concentrazioni numeriche di particolato:

- Radiazione globale;
- Temperatura;
- Umidità relativa;
- Velocità del vento;
- Precipitazione.

A tale scopo sono stati utilizzati i dati provenienti dalla stazione meteorologica dell'ARPA di Milano Lambrate per il sito Pascal e la stazione meteorologica dell'ARPA di Milano viale Marche per il sito di Viale Marche.

3.5 Scopo dell'analisi dei dati

Lo studio dei dati di particolato si è articolato in:

- Analisi dei livelli di concentrazione numerica totale di particelle;
- Analisi della distribuzione granulometrica del numero totale di particelle;
- Studio della correlazione tra concentrazione numerica di particolato e parametri inquinanti;
- Studio della correlazione tra concentrazione numerica di particolato e parametri meteorologici;
- Studio approfondito degli eventi piovosi registrati nel periodo di studio.

Le analisi hanno avuto l'obiettivo di mettere a confronto due siti, uno di fondo urbano e uno di traffico, individuando l'andamento del giorno tipo feriale e festivo, e di ricercare possibili correlazioni fra concentrazione numerica di particolato e la concentrazione dei principali inquinanti atmosferici (NO, NO₂, CO, O₃, SO₂, PM_{2,5} e PM₁₀) e fra concentrazione numerica di particolato e parametri meteorologici (temperatura, radiazione solare, umidità, velocità del vento, pioggia). In particolare è stato studiato nel dettaglio l'effetto di dilavamento dell'atmosfera in relazione ad alcuni eventi precipitativi che si sono verificati durante le campagne di misura oggetto di studio.

4. Risultati e discussione

Per ogni giorno di rilevamento è stata analizzata l'evoluzione della concentrazione numerica di particolato nel tempo e la relativa distribuzione granulometrica. I dati a disposizione sono stati analizzati separatamente in riferimento all'anno e al sito di campionamento. Una ulteriore distinzione ha portato ad analizzare separatamente:

- Giorni feriali;
- Giorni del fine settimana;
- Giorni che hanno ospitato eventi precipitativi.

Considerata la ciclicità dell'andamento giornaliero, per le analisi successive riguardanti lo studio della correlazione con altri inquinanti e con i parametri meteorologici, sono stati considerati i "giorni tipo", ossia i profili giornalieri di concentrazione ottenuti dalla media dei valori orari di un determinato periodo (anno 2008 o 2009, giorni feriali o giorni del fine settimana).

4.1 Evoluzione giornaliera delle concentrazioni numeriche di particolato

Per ogni giorno è stata condotta l'analisi dell'andamento del profilo delle concentrazioni numeriche di particolato individuando i contributi di ciascuna classe granulometrica sia in termini assoluti sia percentuali, e calcolando il diametro medio geometrico dato da:

$$M_g = \exp\left(\sum_{i=1}^n f_i \ln d_{p,i}\right) \quad (1)$$

dove n è il numero delle classi granulometriche, f_i la frazione in peso di ogni classe e $d_{p,i}$ il diametro rappresentativo della classe (è stato utilizzato il valore centrale), che fornisce una indicazione sintetica sulle caratteristiche della distribuzione granulometrica.

Più in dettaglio, le dodici classi dimensionali fornite dallo strumento di misura sono poi state aggregate in quattro classi rappresentative: PM0.05, PM0.1-PM0.05, PM1-PM0.1 e PM10-PM1. In particolare, per la classe PM0,05 sono stati aggregati i dati relativi agli ultimi due stadi dell'ELPI (range 0,007-0,055 μm), per la classe PM0.1-PM0.05 i dati degli stadi 3 e 4 (range delle particelle 0,055-0,093 μm), per la classe PM1-PM0.1 quelli degli stadi 5, 6, 7 e 8 (range 0,157-0,955 μm) e infine per la classe PM10-PM1 le concentrazioni numeriche degli stadi 9, 10, 11 e 12 μm (range 0,955-9,98 μm).

Si riporta come esempio l'analisi condotta per il giorno 6 ottobre 2008 relativa al sito Pascal (i grafici ottenuti per l'intero periodo di studio sono riportati in allegato).

Nonostante le caratteristiche di fondo urbano del sito di misura, il profilo di concentrazione numerica delle particelle mostrato in Figura 30 segue l'andamento del traffico, con un picco al mattino dalle ore 8 alle ore 9, seguito da una diminuzione delle concentrazioni e da una risalita dalle ore 17. I valori di concentrazione minori si registrano tra le 12 e le 16 in concomitanza di più elevati valori di radiazione e temperatura, grazie ai quali si realizza un innalzamento dello strato di rimescolamento e quindi un aumento del volume in cui gli inquinanti possono disperdersi.

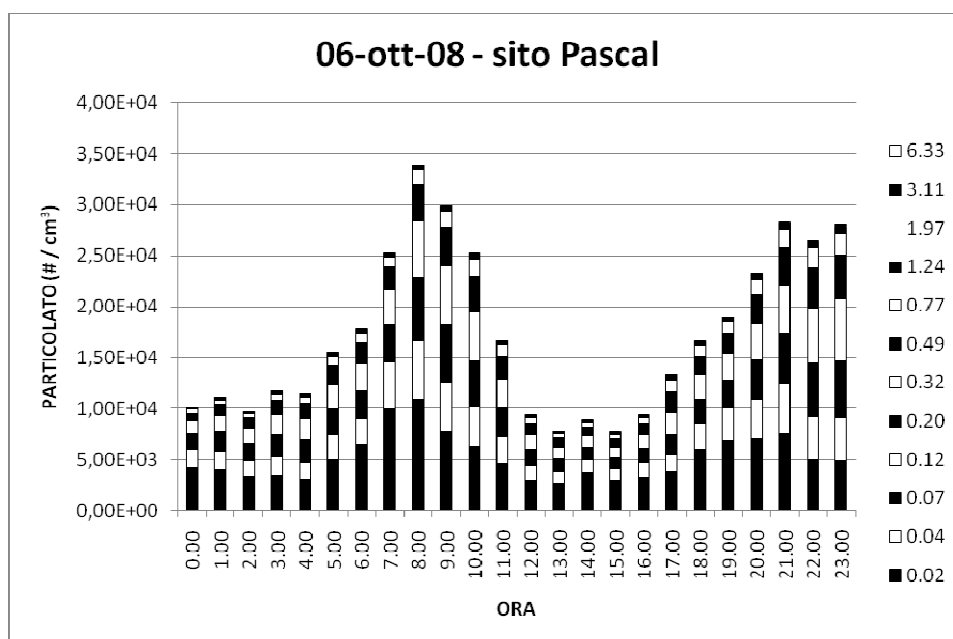


Figura 30 – Evoluzione giornaliera della concentrazione numerica totale di particolato del giorno 6 ottobre, anno 2008, sito Pascal.

Nel grafico di Figura 31 si riporta invece il contributo percentuale alla concentrazione numerica di particolato dato dalle 12 classi granulometriche fornite dallo strumento ELPI. E' possibile osservare che, senza sostanziali variazioni nell'arco della giornata, oltre il 90% della concentrazione numerica è riconducibile alle classi di granulometria inferiore a 0,32 µm (prime sei classi fornite dall'ELPI) e che la sola prima classe (diametro inferiore a 0,02 µm) contribuisce mediamente per circa il 30%, con contributi compresi tra il 20% ed il 40%.

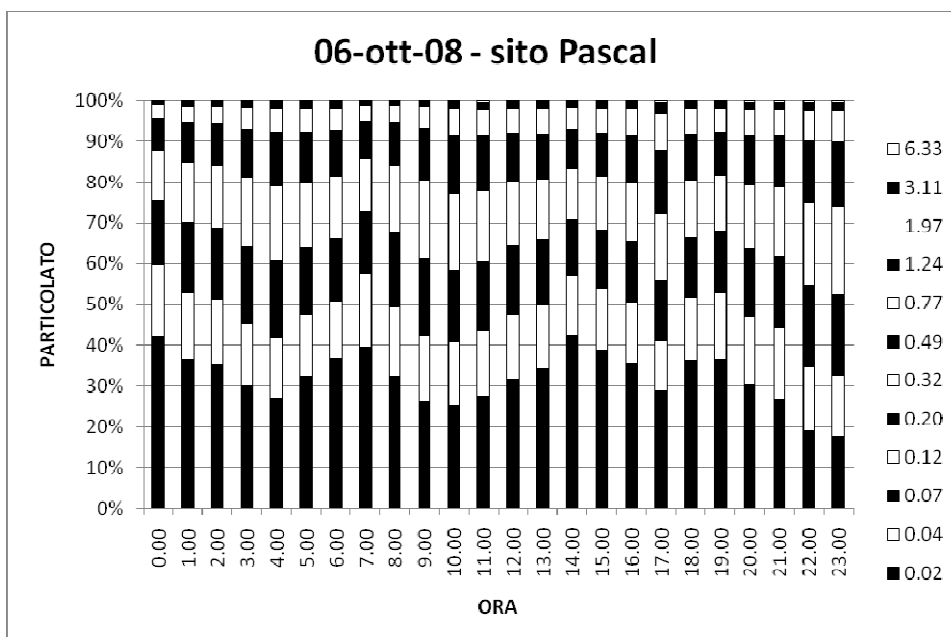


Figura 31 – Evoluzione giornaliera del contributo delle 12 classi granulometriche fornite da ELPI alla concentrazione numerica di particolato del giorno 6 ottobre 2008, sito Pascal.

In Figura 32 viene visualizzata l'evoluzione giornaliera del diametro medio geometrico.

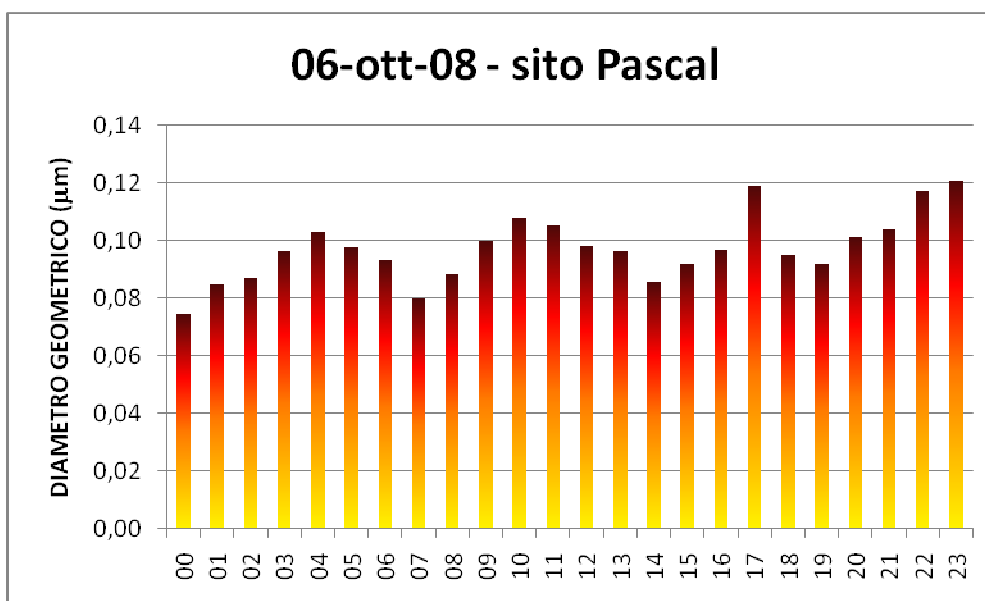


Figura 32 – Evoluzione giornaliera del diametro medio geometrico per il giorno 6 ottobre 2008, sito Pascal.

Il diametro medio geometrico diminuisce in corrispondenza del picco mattutino delle ore sette. Quando il diametro medio geometrico diminuisce significa che il numero di particelle delle classi granulometriche inferiori presenti in atmosfera è aumentato (Franz et al., 2000; Morawska et al., 1998). Le particelle di granulometria inferiore, costituite da nanoparticelle e particelle ultrafini,

sono comunemente prodotte da processi di combustione e, durante il ciclo di guida dei veicoli, vengono emesse in numero maggiore durante le fasi di accelerazione e decelerazione (Wehner et al., 2002; Donaldson et al., 2005). Il comportamento registrato, ossia la diminuzione del diametro medio geometrico nell'ora di punta del traffico del mattino, potrebbe quindi essere spiegato dal fatto che i veicoli in città non sono guidati a velocità costante ma sono frequenti accelerazioni e decelerazioni, in particolar modo nelle ore di punta, responsabili di un maggior rilascio in atmosfera di particelle a granulometria inferiore.

Alle ore 17 l'aumento del diametro medio geometrico potrebbe invece essere dovuto a una concomitanza di due fattori: da una parte un ridotto apporto di particelle più fini di particolato a causa di una diminuzione del traffico e dall'altro dall'azione del vento. Nel giorno considerato infatti si osservano valori di velocità del vento maggiori di 2 m/s dalle ore 13 alle ore 15 (con un picco di velocità di 2,5 m/s alle 14) che nelle ore successive scemano fino a raggiungere valori prossimi a 1 m/s alle 17. Il vento può avere effetti diversi in relazione alla granulometria del particolato: per particelle sub micrometriche prevale nettamente l'effetto di diluizione, mentre per le particelle di dimensioni maggiori diluizione e risospensione hanno un effetto comparabile. Solo eventi estremamente intensi (vale a dire con intensità maggiore di 2 m/s), producono una riduzione generalizzata della concentrazione numerica di tutte le classi (Lollobrigida et al., 2008). Quindi, alle ore 17, si assiste a una diminuzione delle concentrazioni numeriche delle particelle di granulometria inferiore a opera del vento debole, mentre le particelle a granulometria maggiore sono soggette a fenomeni di risospensione. Nelle ore precedenti, invece, il vento forte fa sì che si abbia una riduzione generalizzata di tutte le granulometrie. Venti intensi, con velocità maggiore di 2 m/s sono poco frequenti nel sito considerato, il che spiegherebbe come mai l'andamento del diametro medio geometrico osservato dalle ore 13 alle ore 17 non si registri sistematicamente in tutti i giorni di rilevamento ma sia da considerare un caso particolare.

In Figura 33 le 12 classi dell'ELPI sono state aggregate e ridotte a quattro classi rappresentative: PM_{0,05}, PM_{0,1-PM0,05}, PM_{1-PM0,1}, PM_{10-PM1}. Il contributo percentuale della classe PM_{10-PM1} (sempre in termini di numero di particelle) alla concentrazione numerica è talmente irrisorio da non essere visibile nel grafico. La quasi totalità della concentrazione numerica è rappresentata da particolato di granulometria inferiore a 1 µm e i contributi dell'ultrafine e del nanoparticolato risultano all'incirca pari all'80% e al 50% rispettivamente.

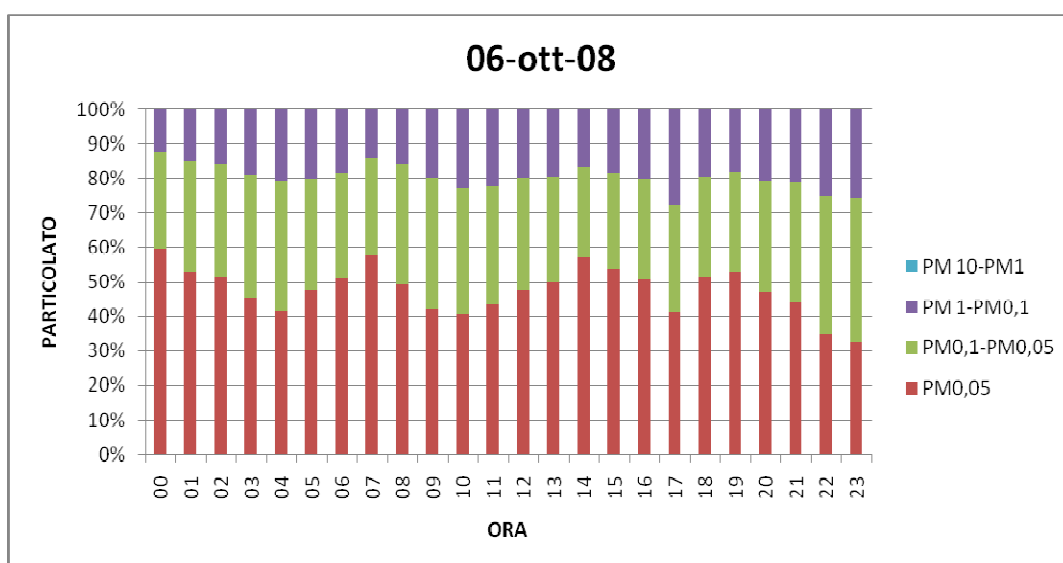


Figura 33 – Evoluzione giornaliera del contributo % delle classi PM0.05, PM0.1-PM0.05, PM1-PM0.1, PM10-PM1 alla concentrazione numerica totale per il giorno 6/10/08, sito Pascal.

4.2 Confronto fra diversi siti di campionamento e fra le campagne di misura effettuate nel 2008 e nel 2009 per il sito Pascal

Nella Figura 34 e Figura 35 è mostrato il confronto fra il giorno tipo ottenuto dalle concentrazioni numeriche di particolato registrate nel sito di fondo urbano di via Pascal e il giorno tipo delle concentrazioni numeriche di particolato relative al sito di traffico di Viale Marche. I principali parametri statistici del giorno tipo nei due siti sono riassunti nella Tabella 10.

Tabella 10 – Riassunto delle statistiche di base dei due siti.

SITO	GIORNO	CONCENTRAZIONE MEDIA [$\#/cm^3$]	DEV.ST. [$\#/cm^3$]	MINIMO [$\#/cm^3$]	MASSIMO [$\#/cm^3$]
<u>PASCAL</u> fondo urbano	Feriale	$1,8 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^4$
	Weekend	$1,5 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^4$
<u>MARCHE</u> traffico	Feriale	$2,6 \cdot 10^4$	$1,3 \cdot 10^4$	$4,8 \cdot 10^3$	$6,5 \cdot 10^4$
	Weekend*	$2,8 \cdot 10^4$	$7,9 \cdot 10^3$	$4,3 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$

*Le statistiche si riferiscono ai dati di un solo fine settimana.

Per il sito di via Pascal la base di dati disponibile è sufficientemente ampia per valutare sia l'andamento nel giorno feriale sia durante la fine della settimana; per il sito di Viale Marche, invece, i dati disponibili si riferiscono essenzialmente ai giorni feriali e per il fine della settimana sono disponibili solo i dati di un fine settimana e pertanto nella Figura 35 si riporta semplicemente l'andamento giornaliero senza indicare gli intervalli di variazione delle concentrazioni orarie.

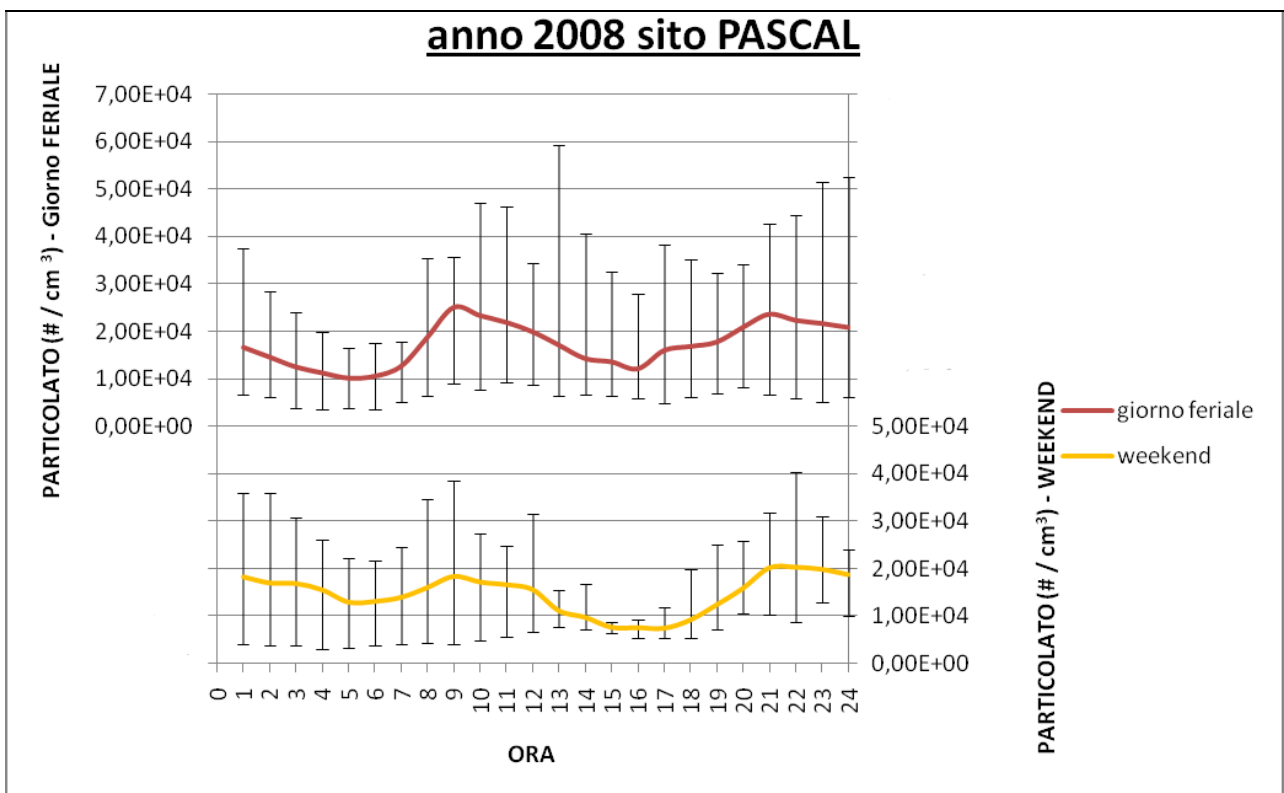


Figura 34 – Andamento delle concentrazioni numeriche di particolato per un giorno tipo feriale e del fine settimana del sito Pascal, anno 2008. Le barre verticali rappresentano il minimo e il massimo delle concentrazioni orarie registrate.

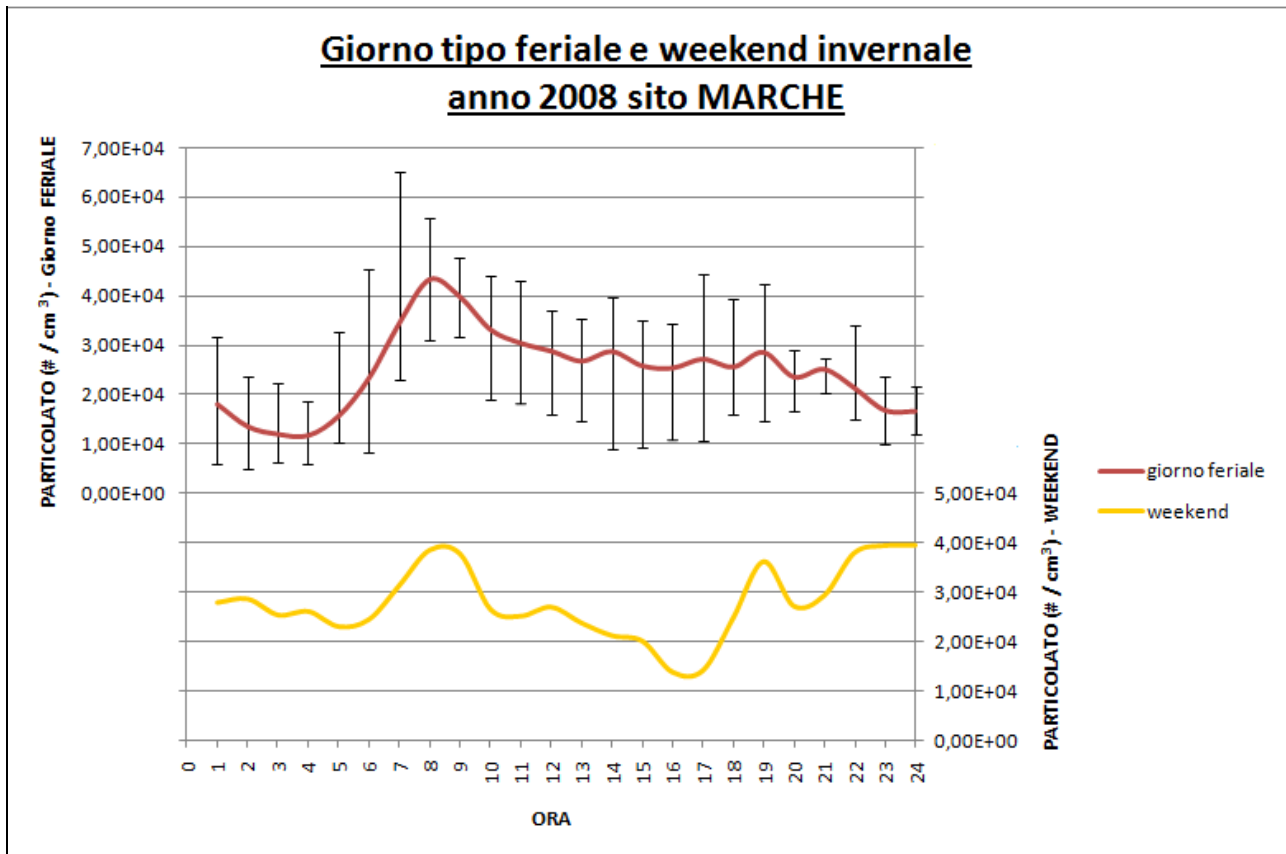


Figura 35 – Giorno tipo feriale e del fine settimana delle concentrazioni numeriche di particolato, sito di Viale Marche, anno 2008. Le barre verticali rappresentano il minimo e il massimo delle concentrazioni numeriche orarie registrate. Per il giorno tipo del fine settimana non vengono riportate in quanto è presente il dato di un solo fine settimana.

L'andamento delle concentrazioni numeriche di particolato del sito Pascal è caratterizzato da due picchi, il primo tra le ore 8 e le ore 9 il secondo tra le ore 20 e le ore 21, con livelli di concentrazione dell'ordine di 25000 e 23000 particelle/cm³ ed un rapporto tra la concentrazione di picco e la media giornaliera rispettivamente pari a 1,5 e 1,3. Mentre il picco mattutino cade in corrispondenza della punta di traffico che si registra nelle vie limitrofe al sito, quello serale si discosta dall'ora di punta del traffico, che si registra intorno alle 19; l'andamento crescente della concentrazione a partire dalle 16 appare più probabilmente legato all'effetto congiunto delle emissioni del traffico serale, della diminuzione dell'altezza dello strato rimescolato e dei fenomeni di coagulazione e di condensazione del particolato favoriti dall'abbassamento serale della temperatura. La variabilità oraria massima registrata si verifica in corrispondenza dell'ora 12-13. Essa è da imputare a un fenomeno particolare che si verifica nel sito: a quell'ora infatti spesso staziona nei pressi dello strumento di misura il mezzo adibito alla raccolta dei rifiuti. Il sito Pascal, anche se viene considerato un sito di fondo urbano, si trova vicino a un'area di parcheggio di veicoli all'interno del campus universitario del Politecnico di Milano; non deve quindi stupire se

l'andamento giornaliero delle concentrazioni numeriche di particolato risulta legato alle emissioni di traffico, che risultano comunque contenute rispetto a quelle osservabili in un sito di traffico, quale quello di Viale Marche.

L'andamento giornaliero festivo appare caratterizzato dall'assenza del picco mattutino e da valori pomeridiani più bassi (inferiori a 10^4 particelle/cm³) rispetto al giorno feriale. Effettuando un test t per le medie per verificare se sussiste una differenza statisticamente significativa tra le concentrazioni numeriche registrate durante i giorni feriali e quelli del fine settimana, si ottiene un p-value pari a 0,02. Considerando un livello di significatività pari a 0,05, l'ipotesi nulla di uguaglianza delle medie viene rifiutata a favore dell'ipotesi alternativa secondo la quale le medie sono diverse. Si può quindi concludere che esiste una differenza significativa fra le concentrazioni.

Analizzando invece l'andamento delle concentrazioni numeriche di particolato relativo al sito di Viale Marche, posto sulla circonvallazione milanese, si nota come l'andamento delle concentrazioni nelle ore pomeridiane si mantenga sempre superiore alla soglia delle 20000 particelle/cm³ raggiungendo un picco di oltre 40000 particelle/cm³ durante le ore di punta del traffico mattutino (dalle ore 7 alle ore 9), con un rapporto tra la concentrazione di picco e la media giornaliera di 1,7. Questo andamento delle concentrazioni può essere interpretato come una costante presenza di traffico durante tutto l'arco delle ore diurne che diviene più intenso nelle ore di punta del mattino. Non esistono differenze statisticamente significative fra le concentrazioni numeriche di particolato che si sono osservate nei giorni feriali e nell'unico fine settimana disponibile. Infatti l'esecuzione del test t ha dato come risultato un p-value pari a 0,08 che, considerando un livello di significatività pari a 0,05, porta ad accettare l'ipotesi nulla di uguaglianza delle medie delle concentrazioni. Avendo a disposizione i dati di concentrazione di un solo fine settimana, non è possibile dare validità generale al risultato, ossia concludere che non vi siano differenze statisticamente significative tra le concentrazioni numeriche di particolato osservate nel fine settimana e nei giorni feriali per il sito Marche, in quanto potrebbe essersi trattato di un caso particolare.

E' possibile mettere in luce alcune analogie e differenze tra i due siti:

- il livello delle concentrazioni notturne risulta analogo (concentrazioni comprese fra 10000 e 20000 particelle/cm³);
- l'aumento delle concentrazioni al mattino inizia prima nel sito di Viale Marche rispetto al sito Pascal e il picco viene raggiunto prima (alle ore 8 per Marche e alle ore 9 per Pascal);

- in termini assoluti il picco del mattino è due volte quello di Pascal e il rapporto massimo/minimo della concentrazione nell'ora di picco risulta pari a 4 per il sito Pascal e a 1,8 per il sito di Viale Marche;
- il rapporto picco mattutino/media giornaliera risulta pari a 1,5 per Pascal e a 1,7 per Marche, valori non molto alti che indicano che in entrambi i casi il rapporto è legato alla caratteristica del sito (domina la media);
- per quanto riguarda la variabilità oraria delle concentrazioni, nel sito di Viale Marche vengono raggiunte punte che raggiungono 65000 particelle/cm³ mentre nel sito Pascal, escludendo l'ora 12-13 che registra delle concentrazioni anomale (della cui causa si è già accennato in precedenza), i massimi valori si aggirano intorno alle 50000 particelle/cm³. Il coefficiente di variazione calcolato ora per ora del giorno tipo (Figura 36) risulta più elevato per il sito Pascal rispetto al sito Marche per tutto l'arco delle ore diurne, mentre è minore nelle ore notturne. Le ore che presentano una variabilità delle concentrazioni numeriche maggiore sono le ore 13 e 17 per il sito Pascal e le ore notturne per quanto riguarda il sito di Viale Marche. Il coefficiente di variazione nelle ore di punta (ora 8 per il sito Marche e ora 9 per il sito Pascal) risulta lievemente maggiore nel caso del sito di fondo urbano (0,3 contro 0,2). Per entrambi i siti il coefficiente di variazione dell'ora di punta del traffico del mattino è tra quelli più bassi che si osservano durante tutto il giorno.

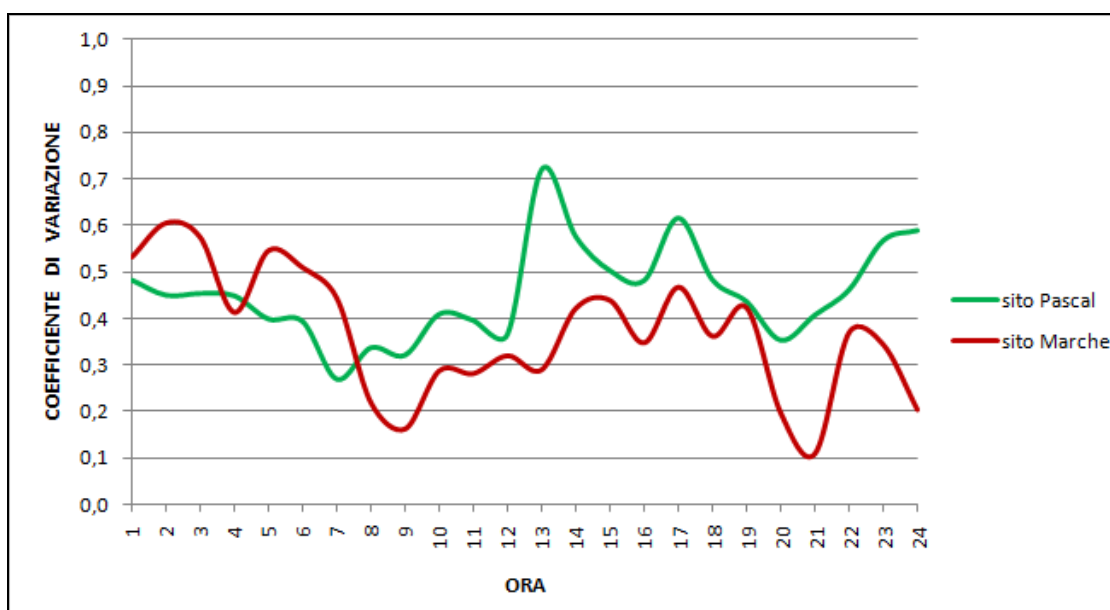


Figura 36 – Andamento del coefficiente di variazione per le concentrazioni numeriche del giorno tipo, sito Pascal e Viale Marche, anno 2008.

Il confronto fra i due anni può essere effettuato solamente per quanto riguarda il sito di fondo urbano in quanto non sono disponibili dati raccolti sul sito di Viale Marche nel 2009. Si riportano nella figura seguente il giorno tipo feriale e del fine settimana relativo all'anno 2009.

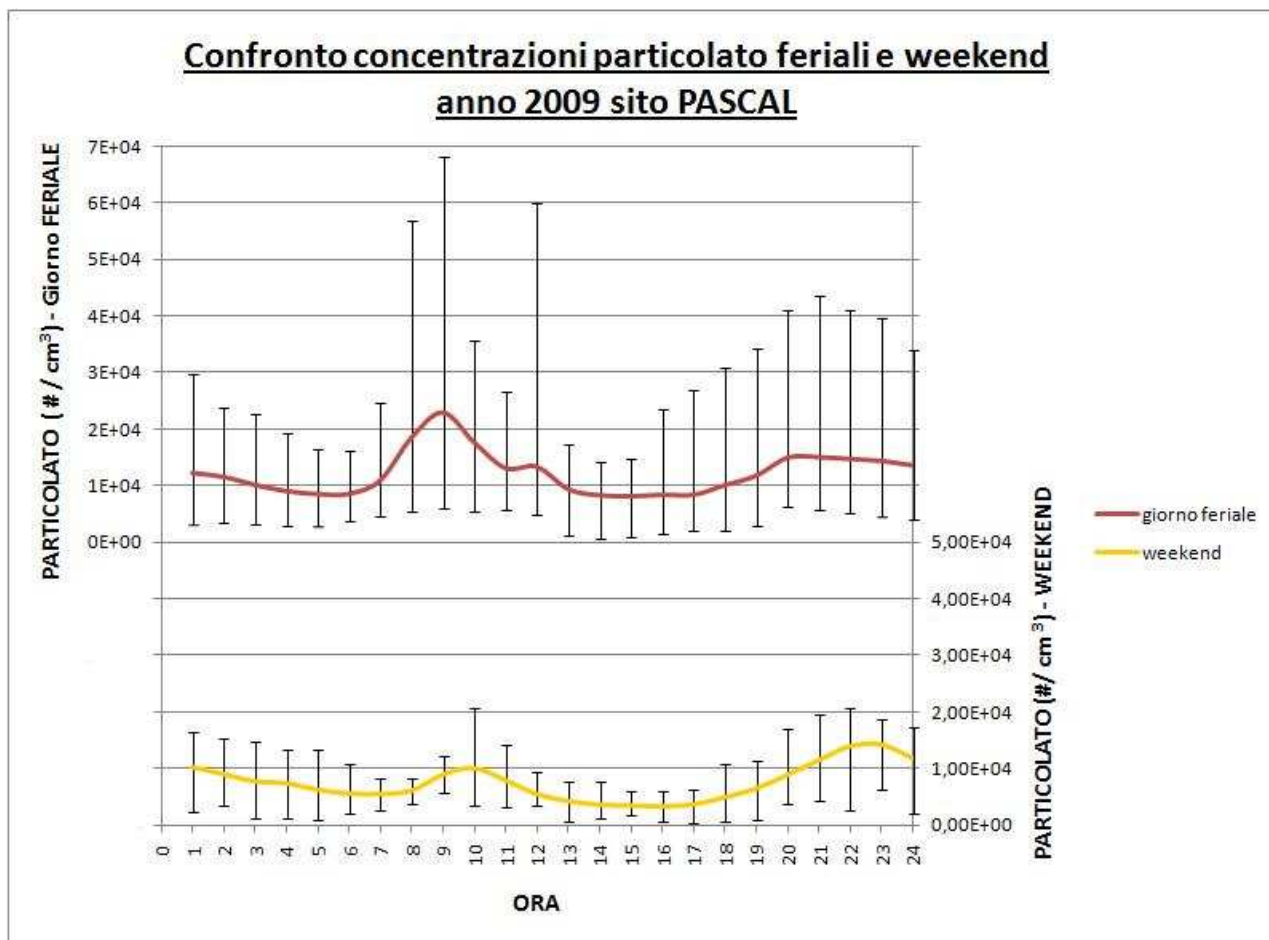


Figura 37 – Giorno tipo feriale e del fine settimana, anno 2009, sito Pascal.

Dal confronto tra la Figura 34 e la Figura 37 non si nota un'apprezzabile differenza nei profili di concentrazione. Gli andamenti delle concentrazioni numeriche di particolato seguono l'andamento del traffico in entrambi gli anni: presentano un picco al mattino e risalgono poi in corrispondenza della ripresa del traffico intorno alle ore 17 del pomeriggio, registrando i valori minimi durante la notte. Anche per quanto riguarda il giorno tipo del fine settimana gli andamenti sono simili.

Per quanto riguarda i valori di concentrazione invece, è stato anche in questo caso effettuato un test statistico per stabilire se fra le concentrazioni numeriche di particolato misurate negli anni 2008 e 2009 ci sia una differenza statisticamente significativa. L'applicazione del test t per due campioni ha dato come risultato un p-value di $7,7 \cdot 10^{-5}$ per quanto riguarda i giorni feriali e un p-value pari a

$2,5 \cdot 10^{-8}$ per i giorni del fine settimana. Considerando un livello di significatività pari a 0,05, l'ipotesi nulla di uguaglianza delle medie viene rifiutata a favore dell'ipotesi alternativa secondo la quale le medie sono diverse in entrambi i casi. Nella tabella seguente vengono riportate le statistiche di base riferite alle concentrazioni numeriche di particolato registrate nei due anni.

Tabella 11 – Statistiche di base delle campagne di misura effettuate negli anni 2008 e 2009.

SITO	GIORNO	CONCENTRAZIONE MEDIA [$\#/cm^3$]	DEV.ST. [$\#/cm^3$]	MINIMO [$\#/cm^3$]	MASSIMO [$\#/cm^3$]
<u>PASCAL 2008</u> fondo urbano	Feriale	$1,8 \cdot 10^4$	$9,5 \cdot 10^3$	$3,5 \cdot 10^3$	$5,9 \cdot 10^4$
	Weekend	$1,5 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^4$
<u>PASCAL 2009</u> fondo urbano	Feriale	$1,2 \cdot 10^4$	$8,1 \cdot 10^3$	$6,2 \cdot 10^2$	$6,8 \cdot 10^4$
	Weekend	$7,5 \cdot 10^3$	$5,0 \cdot 10^3$	$4,5 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^4$

4.3 Eventi di nanoparticolato e ultrafine

Come già descritto nel paragrafo 2.3.1 le particelle fini possono essere prodotte anche attraverso il fenomeno della nucleazione a partire dalla trasformazione di alcune sostanze (quali acido solforico, vapor d'acqua, ammoniaca) dalla fase gassosa a quella solida tramite un processo attivato dalla radiazione solare. La formazione di nanoparticelle è stata osservata in un'ampia varietà di ambienti dalle zone artiche alle zone urbane. Dopo che le particelle sono prodotte per nucleazione, la condensazione dell'acido solforico, dell'ammoniaca e del vapor d'acqua può contribuire alla crescita delle particelle. Campagne di misura effettuate negli Stati Uniti mostrano che vi è correlazione tra gli eventi di nanoparticelle e le concentrazioni di SO_2 . Woo et al. hanno osservato tre tipi di eventi di nanoparticelle e particolato ultrafine, nel range caratteristico di 3-10, 10-35 e 35-45 nm in un sito di Atlanta, dove si verificano un elevato numero di eventi nel periodo primaverile/estivo. Prima di tutti gli eventi caratterizzati da elevate concentrazioni di SO_2 sono state osservate elevate concentrazioni di NO_x . Al contrario, Watson et al. hanno osservato eventi di nanoparticelle durante la primavera e l'estate associati a basse concentrazioni di SO_2 .

Nello studio condotto da Watson et al. nel sito di Fresno (California) sono stati individuati quattro tipi di eventi: evento di nucleazione, evento fotochimico, evento di traffico e evento da riscaldamento domestico (Figura 38). Gli eventi di nucleazione e fotochimici sono frequenti durante il periodo primaverile/estivo, gli eventi di traffico si registrano durante tutto l'anno, mentre gli eventi da riscaldamento domestico si osservano esclusivamente nel periodo invernale.

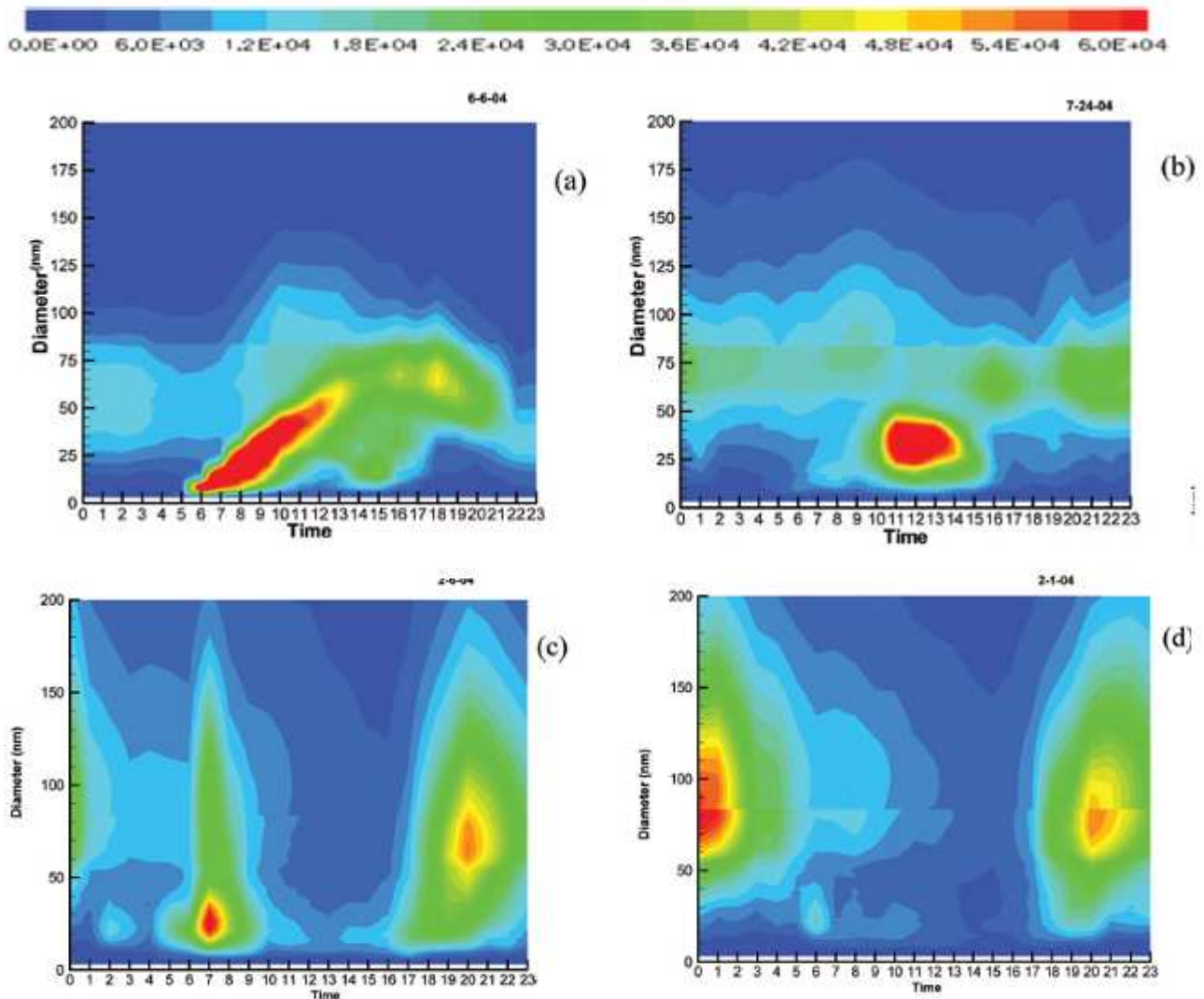


Figura 38 – Variazione giornaliera della distribuzione granulometrica con diametri sulle asse delle ordinate, ore del giorno sull'asse delle ascisse e la scala cromatica che rappresenta la concentrazione numerica delle particelle di particolato per a) evento di nucleazione (osservato domenica 6/6/04), b) evento fotochimico (sabato 24/7/04) c) evento di traffico e di riscaldamento domestico (venerdì 6/2/04) e d) evento di riscaldamento domestico (domenica 1/2/04). La discontinuità che si osserva in corrispondenza del diametro 80 nm è dovuta alle differenze delle risposte del nano-SMPS e dello standard SMPS (Watson et al., 2006).

L'evento di nucleazione (Figura 38 a) mostra la tipica crescita "banana-like" osservata anche nei siti di Atlanta e Pittsburgh. Particelle nel range 3-10 nm appaiono attorno alle ore 6, raggiungono il picco di concentrazione massima alle 7 e crescono rapidamente in numero e dimensione dalle 7 alle 12. Verso mezzogiorno la maggior parte delle particelle scompare e la moda dei diametri è di 50 nm. L'evento non è associato a un aumento delle concentrazioni di inquinanti tipici di emissioni da traffico quali NO_x e CO e non è quindi classificabile come un evento di traffico. In compenso a partire dalle ore 6, ora d'inizio dell'evento, si registra una crescita dei valori di radiazione solare, temperatura e O_3 e una diminuzione dell'umidità relativa. La forte radiazione solare rende disponibile il radicale ossidrilico OH che ossida l' SO_2 disponibile a SO_3 .

In Figura 38 b viene invece mostrato un evento fotochimico pomeridiano che si verifica dalle 10 alle 15 coinvolgendo particelle con diametro nel range di 10-30 nm. La forma tipica è quella di una bolla, invece che la tipica forma "banana-like" dell'evento precedente. La dimensione delle particelle è maggiore rispetto a quella dell'evento di nucleazione, ma minore rispetto a quella delle emissioni primarie. L'evento è accompagnato da elevati valori di radiazione e O_3 , che seguono l'andamento delle particelle con diametro compreso fra 10 e 30 nm, ma da basse concentrazioni degli inquinanti primari. Gli eventi di nucleazione e fotochimici spesso si verificano nell'arco della stessa giornata. Altri eventi che spesso ricorrono insieme, ma nel periodo invernale, sono gli eventi di traffico e gli eventi da riscaldamento domestico (Figura 38 c). Alte concentrazioni di particelle di diametro compreso fra 10-30 nm vengono osservate all'ora di punta del traffico, durano un paio d'ore e poi scompaiono all'aumentare della quota dello strato di rimescolamento. Alla sera le particelle aumentano nuovamente a partire dalle ore 17 e raggiungono il picco alle ore 20 con una moda dei diametri pari a 63 nm. Al mattino l'evento è classificabile come un evento di traffico in quanto l'aumento delle particelle di diametro comprese fra 10 e 30 nm è accompagnato dall'aumento delle emissioni di NO_x e CO. Alla sera, le particelle di diametro nel range 10-30 nm raggiungono il picco di concentrazione prima delle particelle nel range 50-84 nm. L'andamento del profilo delle concentrazioni della classe di particolato 50-84 nm corrisponde all'andamento del profilo di CO. L'andamento degli NO_x è invece simile all'andamento della classe di particolato 10-30 nm. In Figura 38 d è infine mostrato un evento che accade in una domenica del periodo invernale in cui non è presente l'evento di traffico ma solo l'evento da riscaldamento domestico. In questo caso le concentrazioni di particolato della classe 10-30 nm sono molto più basse rispetto alle concentrazioni della classe 50-84 nm. Quindi l'evento da riscaldamento domestico è associato alle particelle di diametro comprese fra 50-84 nm. Le concentrazioni di O_3 rimangono basse durante tutto l'arco dell'evento.

E' stata eseguita un'analisi di tutti i giorni a disposizione al fine di ricercare eventuali eventi che si fossero verificati nel periodo di studio e associarli ai tipi di eventi individuati da Watson et al.

Nella maggior parte dei giorni non è stato osservato nessun evento con una concentrazione numerica superiore a $4,5 \cdot 10^4$ particelle/cm³. Nel sito Pascal è stato osservato un solo giorno nel quale le concentrazioni hanno superato tale soglia, mentre nel sito di viale Marche gli eventi osservati hanno raggiunto anche punte di concentrazione che superano i $6 \cdot 10^4$ particelle/cm³.

In Figura 40 è mostrato un evento di traffico registrato il 16 ottobre 2008 nel sito Pascal. Elevate concentrazioni numeriche di particolato nell'intervallo dimensionale tra 50 e 100 nm sono state registrate dalle otto del mattino fino alle ore undici. Le principali caratteristiche dell'evento sono riportate in tabella.

Tabella 12 – Caratteristiche dell'evento registrato il 16.10.08, sito Pascal. Con prima si intende l'ora precedente alla crescita delle concentrazioni numeriche di particelle, con durante l'ora di massima concentrazione numerica durante l'evento.

ORA	N 0,02 – 0,04 µm #/cm ³		N 0,02 – 0,49 µm #/cm ³		Vento m/s	T °C	Radiazione solare W/m ²	NO _x ppb	O ₃ µg/m ³
	prima	durante	prima	durante				prima/durante	prima/durante
8-11	3,8+03	1,0+04	1,1+04	3,8+04	0,05	15	71	-	12/12

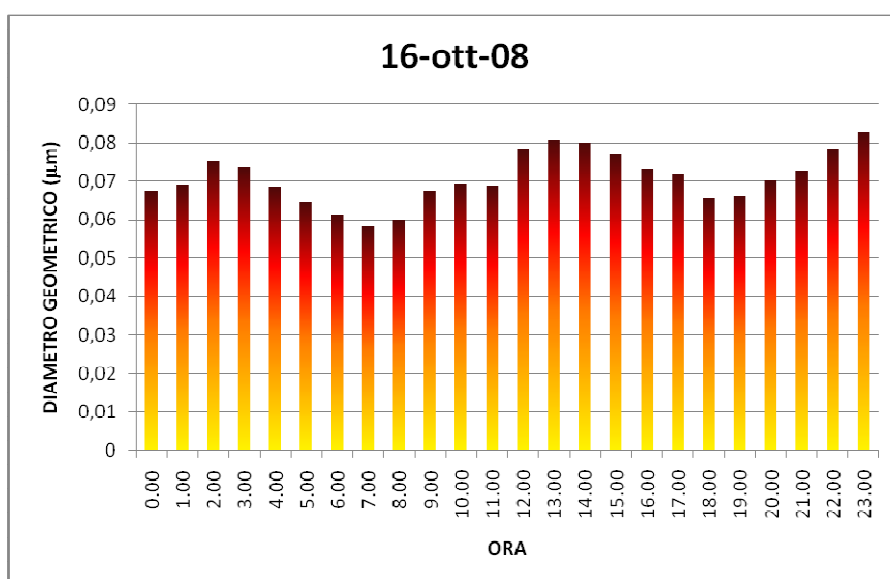


Figura 39- Evoluzione giornaliera del diametro medio geometrico, 16/10/08, sito Pascal.

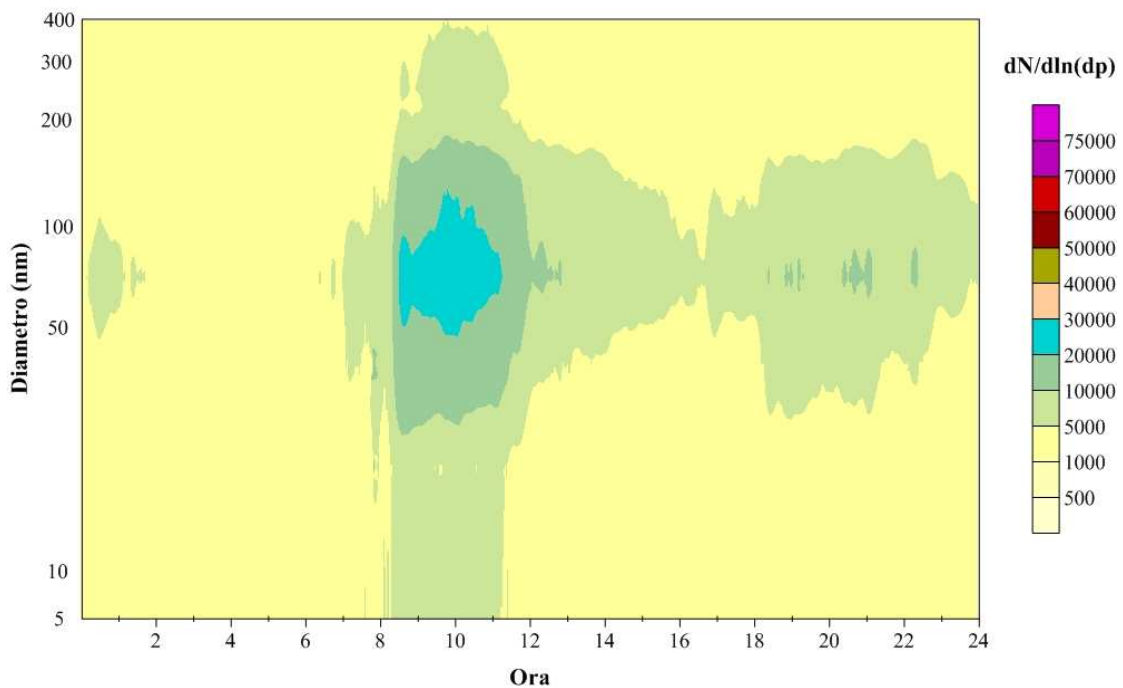
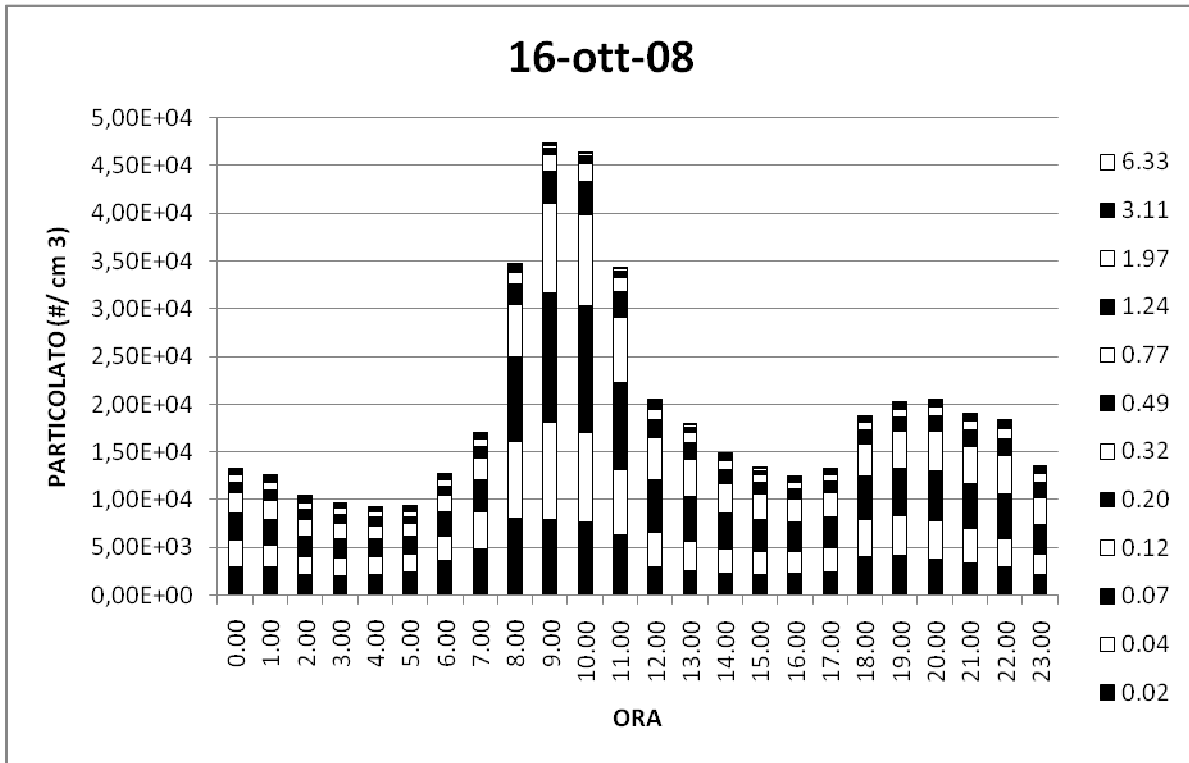


Figura 40 – in alto: andamento del profilo di concentrazione numerica di particolato; in basso: variazione osservata durante il giorno (asse delle ascisse) delle dimensioni delle particelle di aerosol in atmosfera (asse delle ordinate) e della loro abbondanza in numero (scala di colore) per l'evento di traffico registrato il giorno 16.10.08, sito Pascal.

Il numero totale delle particelle (Figura 40 in alto) nelle ore notturne ha un valor medio pari a $1 \cdot 10^4$ particelle/cm³. Alle ore 7 le concentrazioni iniziano ad aumentare fino a raggiungere il picco (con concentrazioni superiori alle $4 \cdot 10^4$ particelle/cm³) nelle ore 9 e 10. Nelle ore successive, in cui si assiste all'aumentare dello strato di rimescolamento, il numero delle particelle inizia a diminuire fino a raggiungere il minimo alle ore 16 e inizia nuovamente ad aumentare dalle ore 17, mantenendo comunque concentrazioni inferiori alle $2 \cdot 10^4$ particelle/cm³ per tutto il resto della giornata. L'incremento delle particelle è accompagnato da un aumento soprattutto delle particelle con diametro compreso fra 30 e 150 nm (con una prevalenza delle particelle nel range 50-100 nm), mentre il contributo delle particelle a granulometria maggiore rimane pressoché invariato.

Il profilo del diametro medio geometrico (Figura 39) registra i valori minimi in corrispondenza delle ore 7-9, ore di più intenso traffico, che coincidono con l'inizio dell'evento. Nelle ore successive, dalle ore 9 alle 11, il diametro medio geometrico aumenta a causa di una diminuzione delle emissioni di particelle più fini dovute al traffico, mantenendosi comunque a livelli bassi rispetto a quelli osservati nel resto della giornata.

Una corrispondenza tra un aumento dei valori di concentrazione degli ossidi di azoto e un aumento delle concentrazioni di particolato è un chiaro indicatore del contributo dovuto al traffico (Watson et al., 2006). Per il giorno in esame non sono disponibili dati di concentrazione di NO_x, in ogni caso in tutti gli altri giorni appartenenti al periodo di studio il picco delle concentrazioni numeriche di particolato che si registra al mattino è sempre accompagnato da un aumento delle concentrazioni di inquinanti caratteristici di fonti primarie, come appunto gli NO_x. Anche lo studio della correlazione riportato nel paragrafo 4.4.2 evidenzia una forte correlazione tra le due variabili. Un altro indicatore dell'evento di traffico è l'aumento delle frazioni più fini del particolato che passano da un valore di $1 \cdot 10^4$ a un valore pari a $4 \cdot 10^4$ particelle/cm³. E' quindi ragionevole supporre che si tratti di un evento di traffico.

Un evento di traffico può essere osservato anche nel sito Pascal, anche se è considerato un sito di fondo urbano, in quanto esso si trova, come già detto in precedenza, all'interno del campus universitario del Politecnico di Milano vicino ad un'area di parcheggio di veicoli.

Nello studio di Watson et al. nell'ora di punta del traffico vengono osservate alte concentrazioni di particelle di diametro compreso fra 10-30 nm, mentre nel sito indagato le elevate concentrazioni si osservano per particelle di diametro compreso fra 50 e 100 nm. Questo potrebbe essere dovuto a una differente composizione del parco veicolare statunitense e italiano.

Nella Figura 41 sono invece mostrati eventi registrati nel giorno feriale 29/10/2008 nel sito Marche.

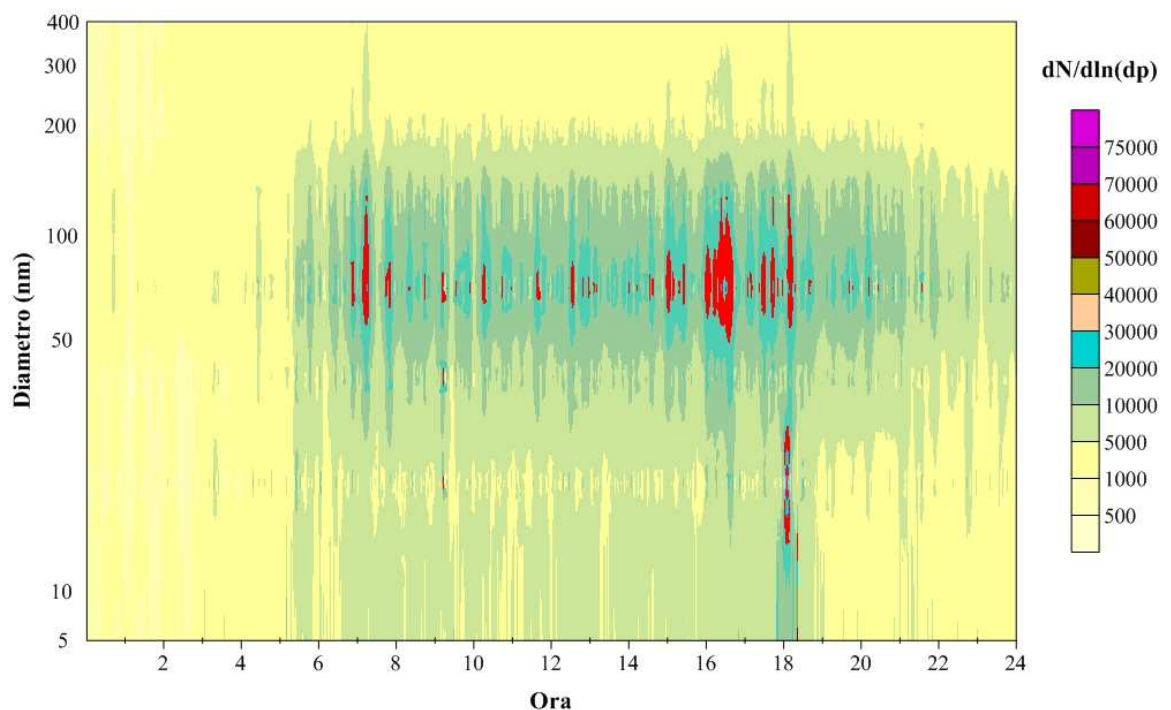
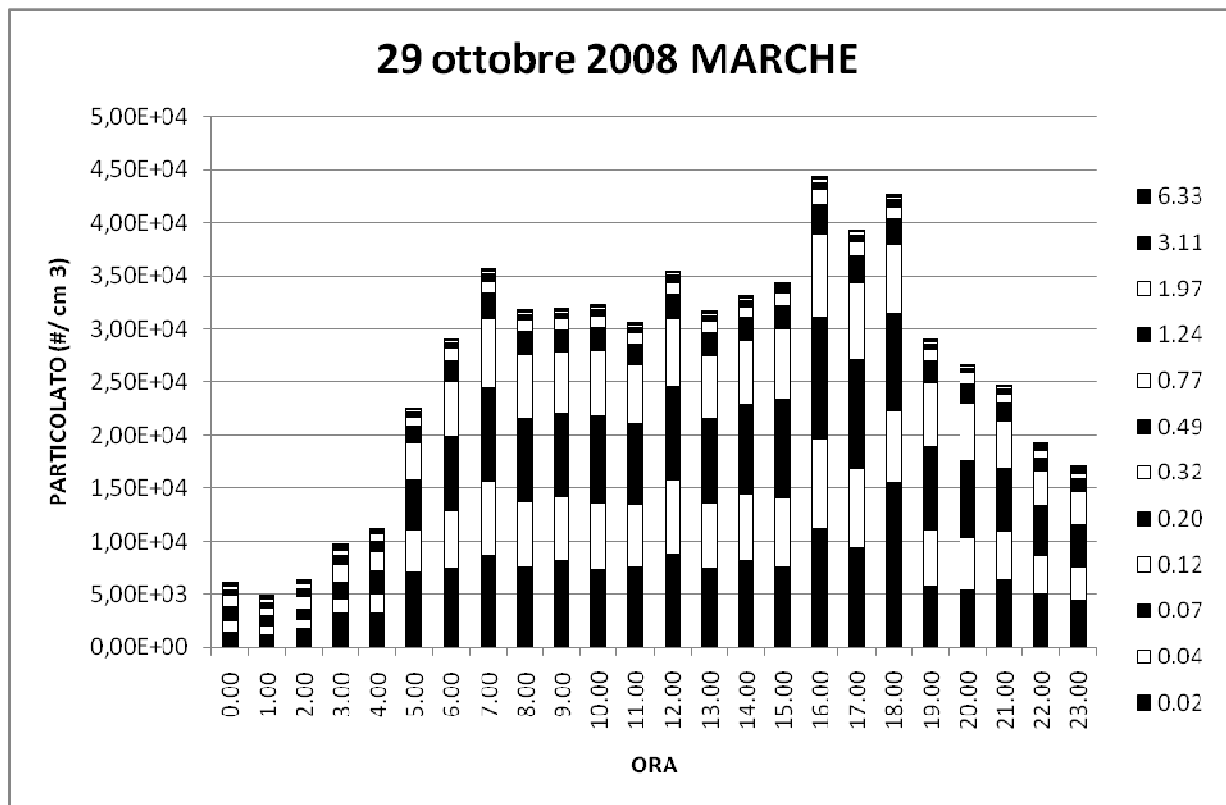


Figura 41 – In alto: andamento del profilo di concentrazione numerica di particolato; in basso: variazione osservata durante il giorno (asse delle ascisse) delle dimensioni delle particelle di aerosol in atmosfera (asse delle ordinate) e della loro abbondanza in numero (scala di colore) per gli eventi di traffico registrato il 29.10.08, sito Viale Marche.

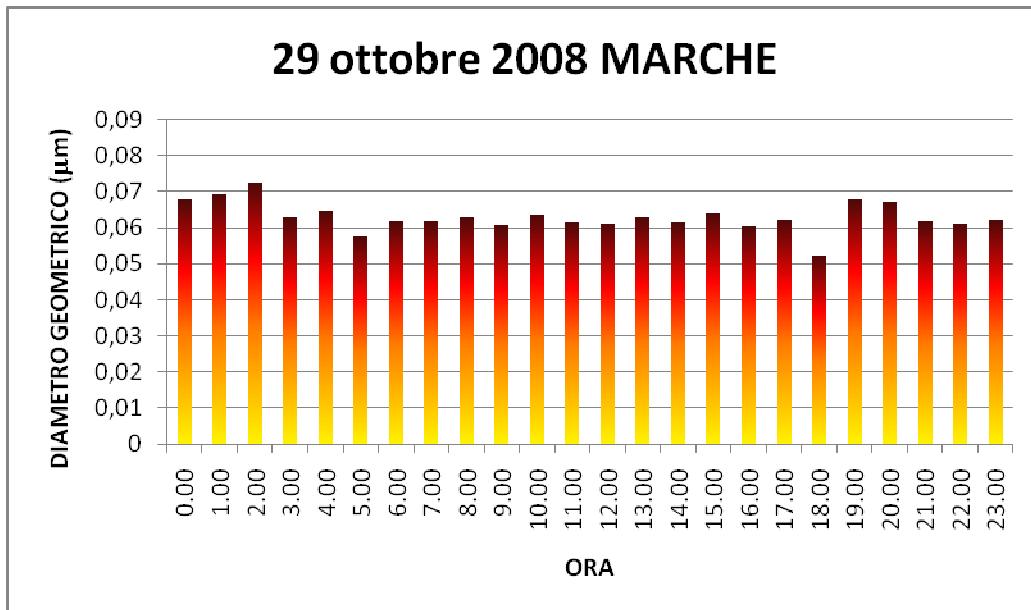


Figura 42 – Evoluzione del diametro medio geometrico per il giorno 29/10/08, sito Marche.

Il sito di Viale Marche, trovandosi in prossimità della circonvallazione di Milano, è più direttamente esposto alle emissioni da traffico veicolare ed è inoltre interessato da volumi di traffico maggiori, che determinano, in generale, livelli di concentrazioni numeriche di particolato più elevate rispetto al sito di via Pascal (come evidenziato nel precedente paragrafo 4.2).

Il grafico di Figura 41 mostra l'andamento delle concentrazioni numeriche di particolato totale durante il giorno: le concentrazioni notturne si attestano intorno a valori pari a $5 \cdot 10^3$ particelle/cm³; alle ore 5 le concentrazioni raddoppiano e continuano ad aumentare fino alle ore 7-8; dopodiché le concentrazioni si mantengono più o meno costanti fino alle ore 15; dalle 16 alle 18 vi è un altro picco di concentrazioni che supera le $4 \cdot 10^4$ particelle/cm³; successivamente le concentrazioni iniziano a scendere fino ai valori minimi notturni. L'aumento delle concentrazioni è dovuto in particolare all'aumento delle concentrazioni delle granulometrie inferiori (range 0,007-0,157 µm).

Il diametro medio geometrico (Figura 42) raggiunge i valori minimi alle 5 e alle 18 in corrispondenza dell'ora del mattino in cui si assiste a un raddoppio delle concentrazioni e dell'ultima ora diurna di elevate concentrazioni, dopo la quale inizia la ridiscesa. Il massimo del diametro medio geometrico viene raggiunto nelle ore notturne in assenza di emissioni derivanti dal traffico.

Nel giorno in questione potrebbe essere identificato un unico grande evento che inizia alle ore 6 e termina alle ore 24, comprendendo l'intero arco delle ore diurne. All'interno del grande evento possono però essere individuati tre principali sottoeventi caratterizzati da concentrazioni numeriche più intense alle ore 7, 16-17 e 18 le cui caratteristiche sono riportate in tabella.

Tabella 13 - Caratteristiche degli eventi registrati il 29.10.08, sito Marche. Con prima si intende l'ora precedente alla crescita delle concentrazioni numeriche di particelle, con durante l'ora di massima concentrazione numerica durante l'evento.

ORA	N 0,02 – 0,04 µm #/cm ³		N 0,02 – 0,49 µm #/cm ³		Vento m/s	T °C	CO mg/m ³	NO _x ppb
	prima	durante	prima	durante			prima/durante	prima/durante
	7	7,5+03	8,6+03	2,1+04	2,6+04	1,5	13	1,4/1,7
16-17	7,5+03	1,1+04	2,6+04	3,2+04	3,0	15	1,8/2,1	127/161
18	9,4+03	1,6+04	2,9+04	2,6+04	2,5	15	2,2/2,4	165/175

In tutti e tre i casi è possibile osservare come all'aumento delle concentrazioni numeriche di particolato nell'intervallo granulometrico 50-100 nm corrisponda un contemporaneo aumento delle concentrazioni di CO e NO_x (Tabella 13 e Figura 43) Anche in questo caso dunque gli eventi possono essere classificati come eventi di traffico.

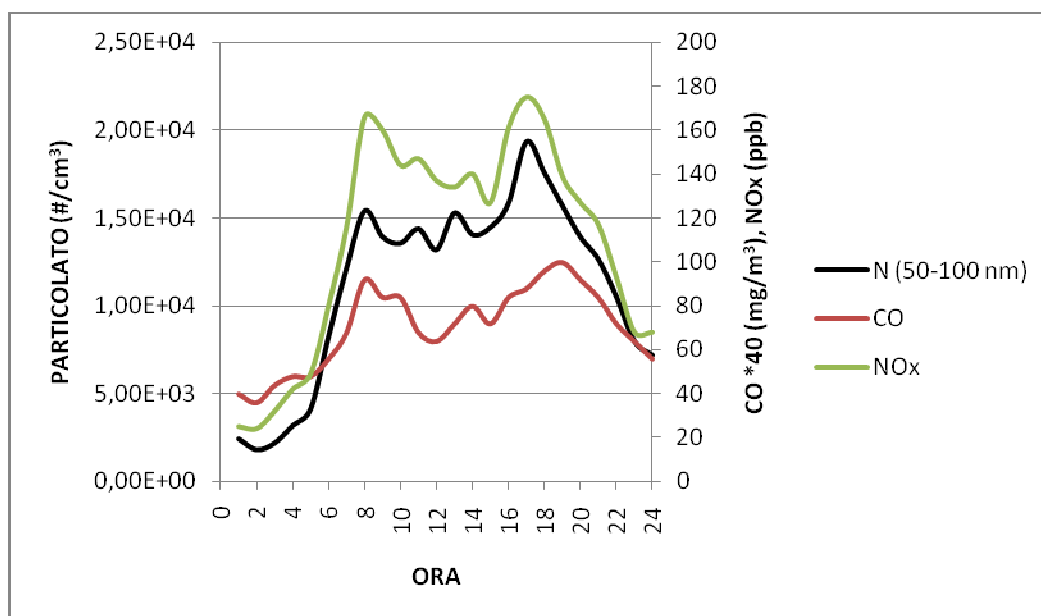


Figura 43 – Andamenti delle concentrazioni di N(50-100 nm), CO e NOx per il giorno 29 ottobre 2008, sito Marche.

4.4 Studio della correlazione con altri inquinanti

Molti inquinanti in atmosfera sono legati tra loro da correlazioni che possono essere dovute sia alle loro emissioni dalle stesse sorgenti che ai processi atmosferici (chimici e fisici) a cui sono soggetti. Lo studio della covarianza di tali fattori aiuta a capire come una variazione della concentrazione di un inquinante o di un fattore ambientale (come ad es. fattori meteorologici) sia associata a un cambiamento nella concentrazione di un altro inquinante.

Per valutare una possibile correlazione tra concentrazione numerica di particolato e altri parametri inquinanti e fra concentrazione numerica di particolato e parametri meteorologici è stato calcolato il coefficiente di correlazione. Date due variabili statistiche X e Y, l'indice di correlazione di Pearson (ρ_{xy}) è definito come la loro covarianza σ_{xy} divisa per il prodotto delle deviazioni standard (σ_x, σ_y) delle due variabili.

Nel caso di coefficiente positivo si parla di correlazione diretta e si distingue poi fra correlazione debole, moderata e forte in base al valore assunto dal coefficiente di correlazione:

- $0 < \rho_{xy} < 0,3$ correlazione debole;
- $0,3 < \rho_{xy} < 0,7$ correlazione moderata;
- $\rho_{xy} > 0,7$ correlazione forte.

Attraverso i modelli di regressione lineare si esprimono le concentrazioni di PM (e più in generale di qualsiasi variabile ambientale) come somma lineare dei prodotti tra coefficienti di regressione e variabili ambientali correlate con tali concentrazioni. Le variabili possono essere altri inquinanti (rappresentativi di particolari sorgenti) o fattori ambientali (come temperatura, vento, pioggia) legati a processi fisici a cui le particelle sono sottoposte. I coefficienti di regressione, trovati tramite la regressione, rappresentano l'importanza di alcune sorgenti o processi atmosferici; tali modelli permettono quindi di esprimere le variazioni delle concentrazioni di particolato attraverso poche variabili significative. Per valutare la bontà dell'adattamento (in inglese *fitting*) della regressione lineare stimata ai dati osservati si utilizza il coefficiente di determinazione R^2 , numero compreso fra 0 e 1 che misura la frazione della variabilità delle osservazioni spiegata tramite il modello lineare e che è pari al quadrato del coefficiente di correlazione.

Il particolato atmosferico può avere un'origine primaria (nei siti in analisi rappresentata in prevalenza dal traffico), o secondaria. Per analizzare quale dei due contributi prevalga sono stati presi in considerazione gli inquinanti NO_x e CO, traccianti del contributo primario dovuto al traffico, e O₃, rivelatore invece di un'origine fotochimica. I dati, disponibili con una risoluzione temporale oraria, sono stati elaborati al fine di ottenere il profilo di concentrazione medio del “giorno tipo” da poter confrontare con il profilo di concentrazione del “giorno tipo” relativo alle concentrazioni numeriche di particolato. È stata inoltre acquisita la concentrazione in massa del particolato PM10 e PM2,5 disponibile con risoluzione temporale giornaliera.

4.4.1 PM₁₀ e PM_{2,5}

Si riportano di seguito i coefficienti di correlazione e i grafici ottenuti per il sito Pascal per l'anno 2009 (i grafici per quanto riguarda i dati del 2008 sono analoghi).

Tabella 14 – Coefficienti di correlazione tra concentrazione in massa e numero di particolato.

Anno 2008		Anno 2009	
PM ₁₀ / PM [# / cm ³]	PM _{2,5} / PM [# / cm ³]	PM ₁₀ / PM [# / cm ³]	PM _{2,5} / PM [# / cm ³]
0.34	0.10	0.31	0.31

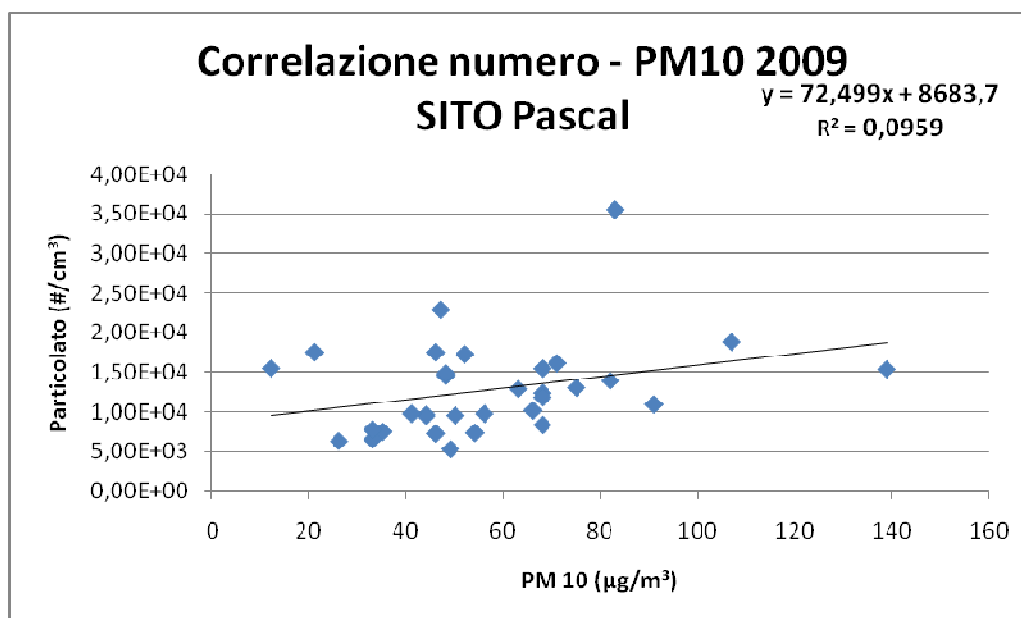


Figura 44 - Correlazione tra concentrazione numerica del particolato e concentrazione in massa del PM₁₀, sito Pascal, anno 2009.

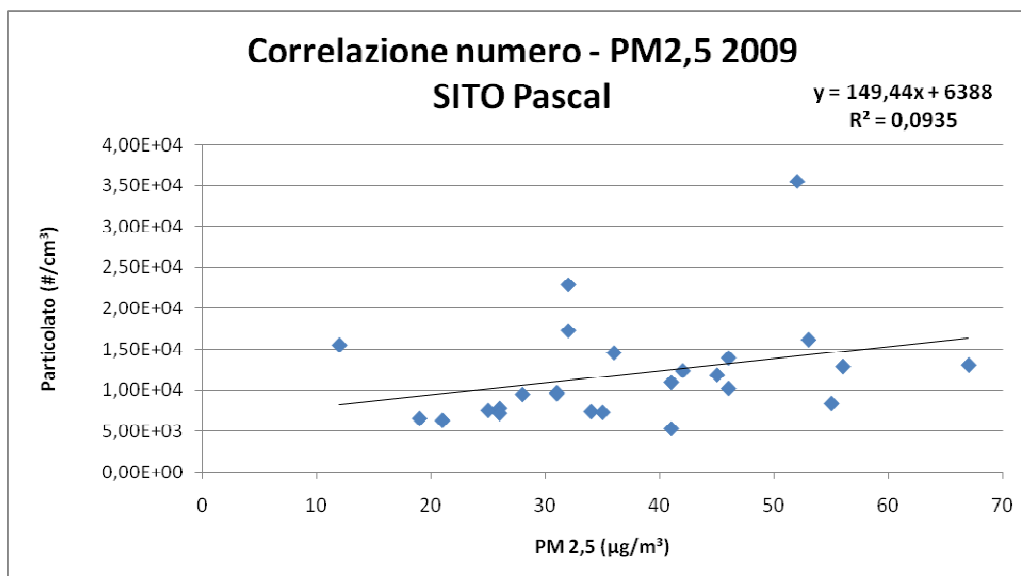


Figura 45 – Correlazione tra concentrazione numerica del particolato e concentrazione in massa del PM_{2,5}, sito Pascal, anno 2009.

Il valore dei coefficienti indica l'esistenza di una debole correlazione tra concentrazioni numeriche e concentrazioni in massa di particolato. I risultati sono in accordo con molti studi riportati in letteratura che hanno messo in evidenza la mancanza di correlazione tra massa e numero di particelle. Le particelle ultrafini, infatti, pur rappresentando l'80% del particolato totale contribuiscono alle concentrazioni in massa del PM10 solo per il 10% (Rodriguez et Al., 2007).

4.4.2 NO_x, O₃, SO₂ e CO

Nelle tabelle seguenti si riportano i coefficienti di correlazione tra concentrazione numerica di particolato e inquinati gassosi ottenuti per i siti e i periodi di campionamento oggetto di studio (sono stati evidenziati in rosso i valori superiori a 0,7 indicanti la presenza di una forte correlazione).

Tabella 15 – Coefficienti di correlazione tra particolato [#/cm³] e altri inquinanti.

SITO	ANNO	NO _x	NO ₂	NO	CO	O ₃	SO ₂
PASCAL	2008	0.65	0.59	0.62	-	-0.37	0.22
	2009	0.59	0.59	0.53	-	-0.24	0.16
MARCHE	2008	0.82	0.74	0.80	0.75	-	-

Analizzando il valore dei coefficienti si nota come la concentrazione numerica di particolato sia ben correlata con gli inquinanti derivanti da combustioni mobili, quali gli ossidi di azoto e il monossido di carbonio. I coefficienti assumono valori più alti nel caso del sito di viale Marche rispetto al sito di fondo urbano, superando la soglia di 0,7 indice di una forte correlazione.

Nel caso dell'ozono, invece, il coefficiente di correlazione, peraltro con valori non lontani da 0, è negativo; ciò significa che, tendenzialmente, ad alti valori di particolato corrispondono bassi valori delle concentrazioni di ozono.

Le indicazioni fornite dai valori del coefficiente di correlazione sono ben messe in evidenza anche dal confronto fra i giorni tipo delle concentrazioni numeriche di particolato e delle concentrazioni degli inquinanti. In particolare, l'andamento delle concentrazioni degli ossidi di azoto segue l'andamento del traffico registrando un picco al mattino, tra le ore 8 e le 9, e valori minimi durante la notte e il primo pomeriggio. Nella Figura 46 si vede poi come le concentrazioni degli inquinanti atmosferici associati al traffico veicolare si mantengano pressoché costanti dalle 17 alle 21 nel sito di Viale Marche (il che può essere interpretato come un flusso costante di traffico), mentre nel sito Pascal esse tendano a diminuire per poi aumentare nuovamente dalle ore 19 in poi (Figura 47).

Anche durante il fine settimana gli andamenti sono analoghi, con la registrazione dei valori minimi durante il pomeriggio a seguito dell'aumento della temperatura che provoca un innalzamento dello strato di rimescolamento con conseguente diminuzione delle concentrazioni degli inquinanti (Figura 48).

Infine, in Figura 49 viene mostrato come ad un aumento dei valori delle concentrazioni numeriche di particolato corrisponda una diminuzione delle concentrazioni di ozono (coefficiente di correlazione inversa). Il massimo delle concentrazioni di ozono viene raggiunto in corrispondenza di elevati valori di radiazione solare, intorno alle ore 16. Infatti la radiazione solare, insieme alla presenza degli inquinanti precursori (NO_2 e COV), sono il motore delle reazioni fotochimiche che portano alla formazione di O_3 .

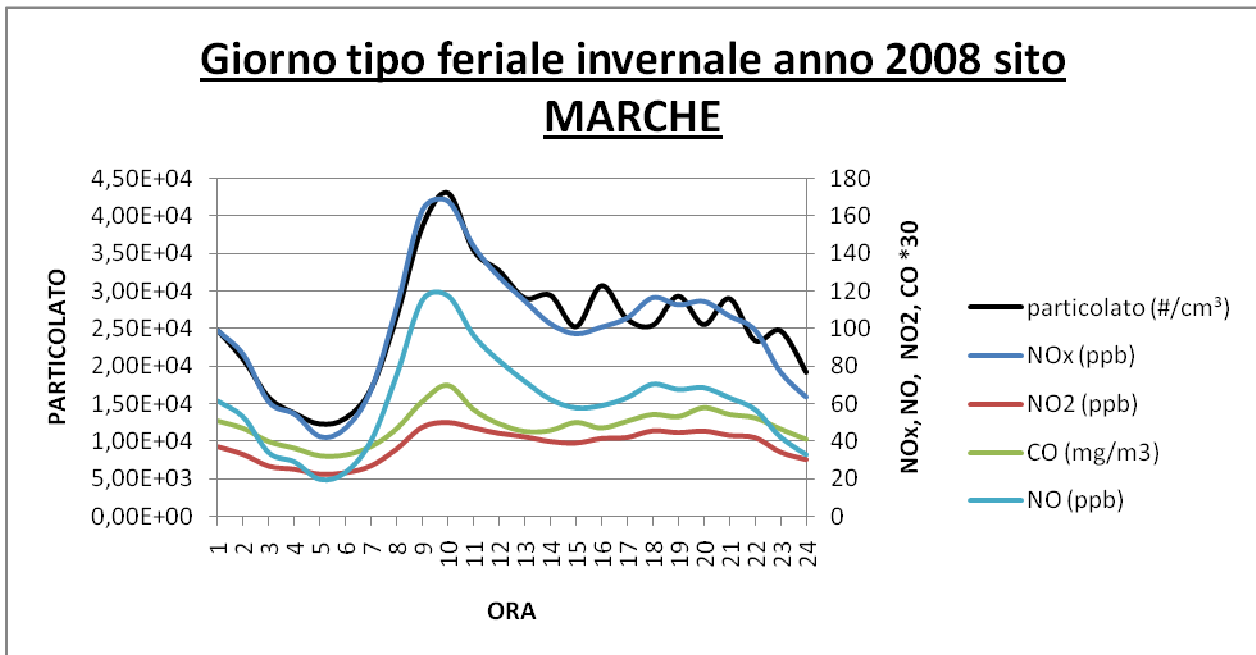


Figura 46 – Confronto giorni tipo feriali delle concentrazioni di particolato e altri inquinanti, anno 2008, sito di Viale Marche.

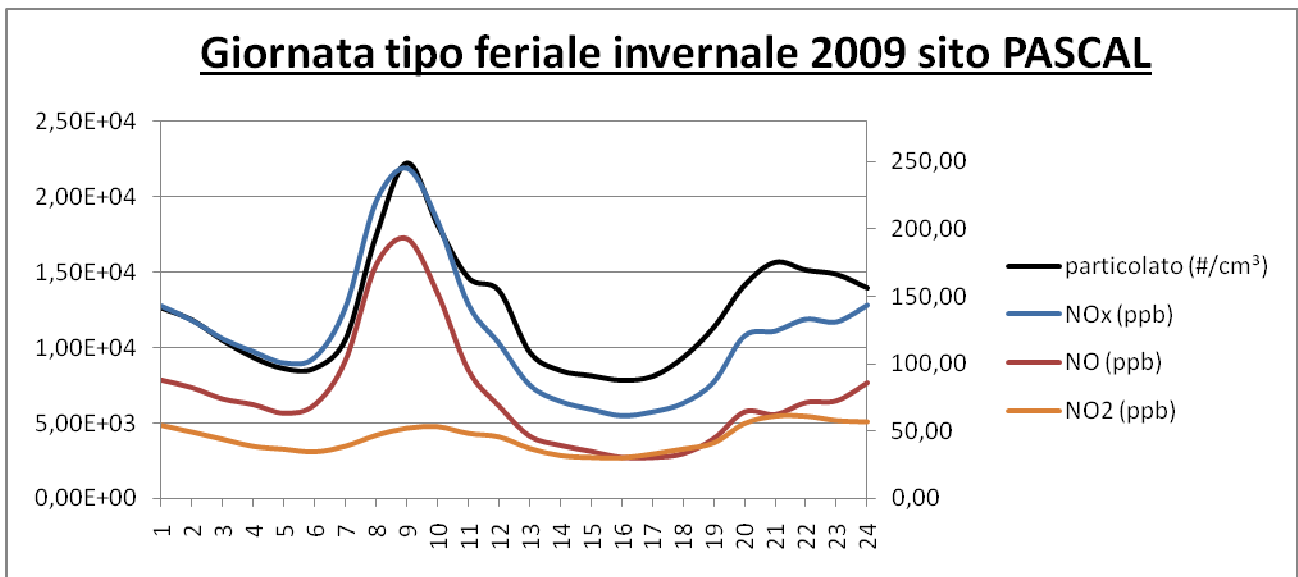


Figura 47 – Confronto gironi tipo feriali delle concentrazioni numeriche di particolato e altri inquinanti, anno 2009, sito Pascal.

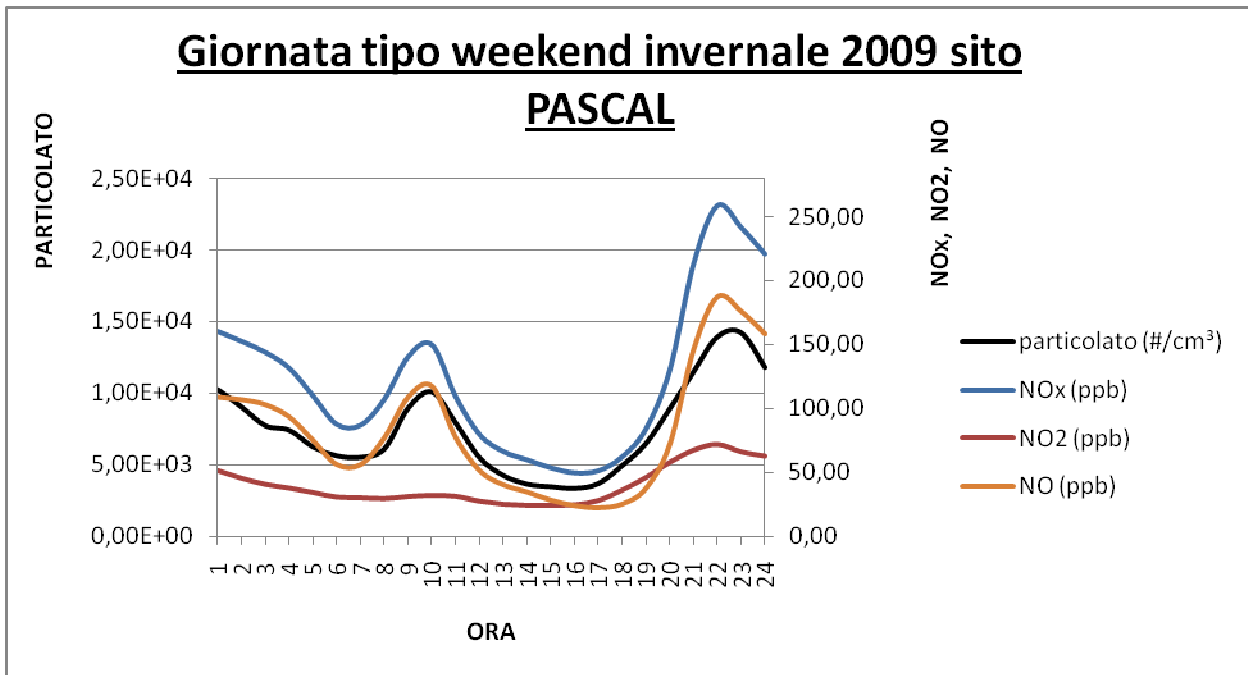


Figura 48 – Confronto tra il giorno tipo del fine settimana delle concentrazioni numeriche si particolato e il giorno tipo delle concentrazioni degli ossidi di azoto, anno 2009, sito Pascal.

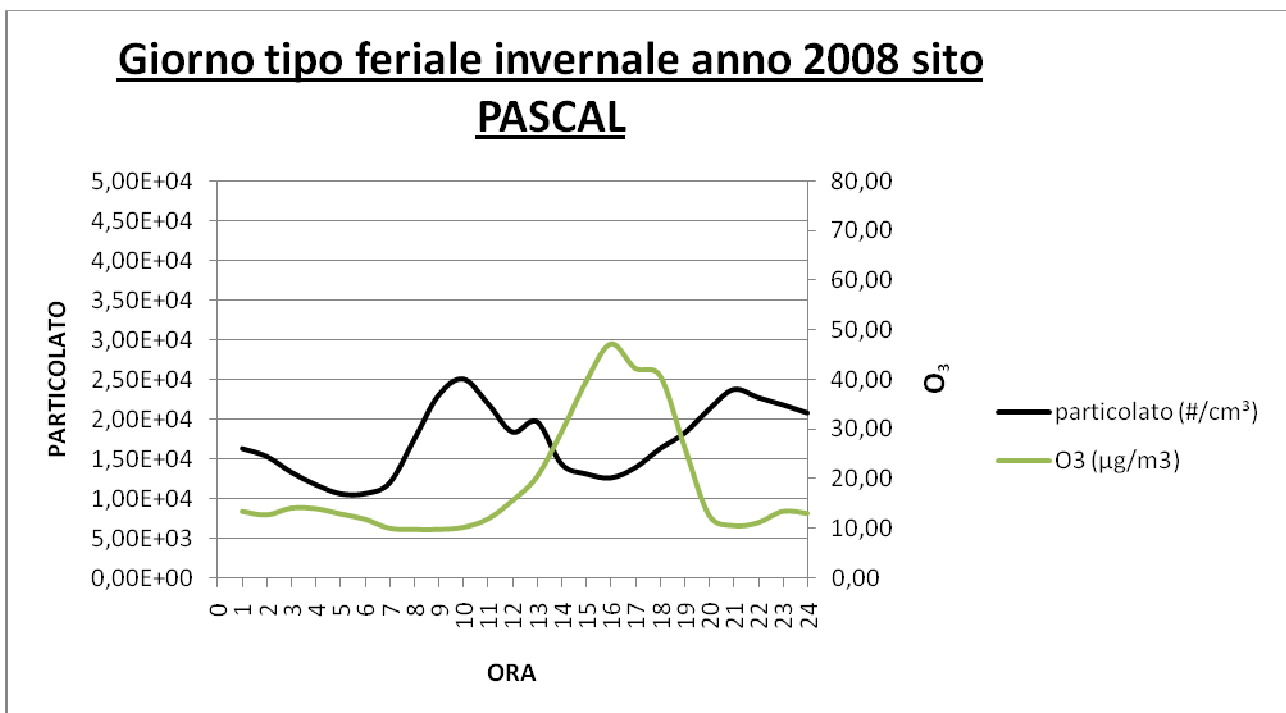


Figura 49 – Confronto fra il giorno tipo della concentrazione numerica di particolato e il giorno tipo delle concentrazioni di ozono, sito Pascal, anno 2008.

Per quanto riguarda la distribuzione granulometrica sono stati messi a confronto gli andamenti temporali delle concentrazioni del giorno tipo degli inquinanti con quelli di concentrazione del particolato per le quattro classi PM_{0,05}, PM_{0,1}-PM_{0,05}, PM₁-PM_{0,1} e PM₁₀-PM₁.

Sono riassunti in tabella i coefficienti di correlazione ottenuti.

Tabella 16 – Coefficienti di correlazione tra classi granulometriche di particolato e inquinanti, sito Marche, anno 2008. In rosso vengono evidenziati i valori che superano la soglia di 0,7.

	NO _x	NO ₂	NO	CO
PM_{0,05}	0.75	0.75	0.73	0.75
PM_{0,1}-PM_{0,05}	0.78	0.72	0.77	0.72
PM₁- PM_{0,1}	0.23	0.20	0.24	0.20
PM₁₀ – PM₁	0.03	0.01	0.04	0.01

Sia il valore dei coefficienti di correlazione superiori a 0,7 (evidenziati in rosso in tabella) che i grafici mettono in evidenza come le frazioni di dimensioni minori (PM_{0,05} e PM_{0,1}-PM_{0,05}) siano ben correlabili con gli inquinanti di origine primaria, in accordo con i risultati ottenuti nel progetto PARFIL (2008).

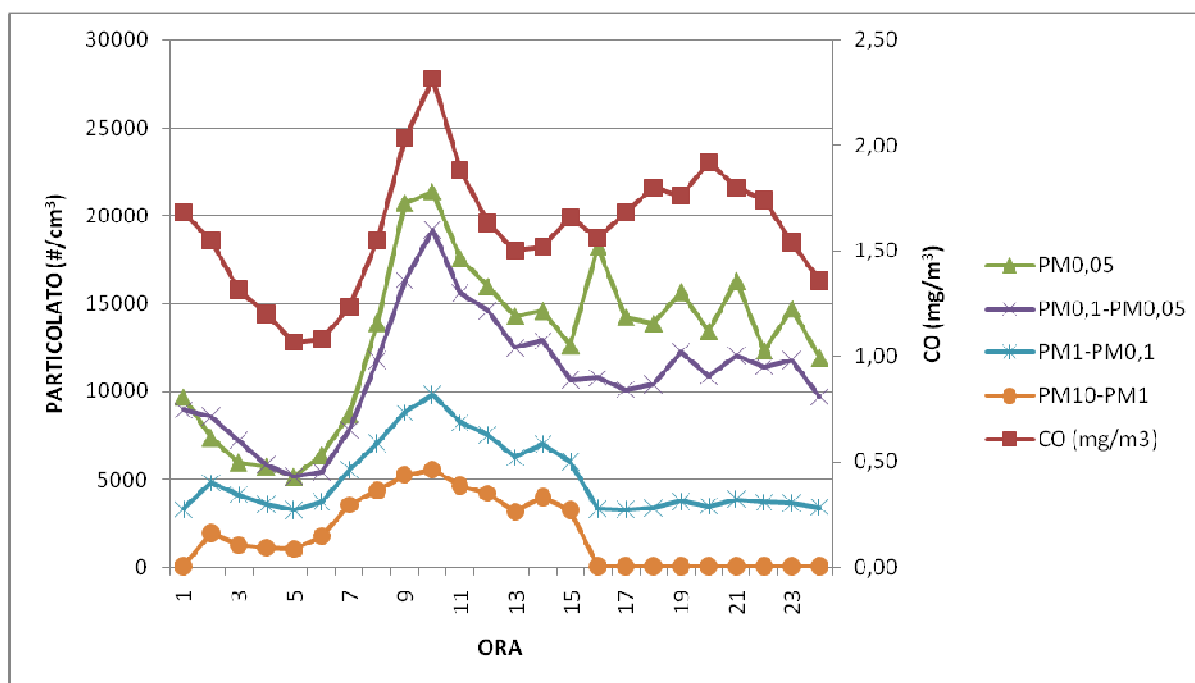


Figura 50 – Confronto fra giorno tipo delle concentrazioni di CO e giorni tipo per classi aggregate di particolato, sito Marche, anno 2008.

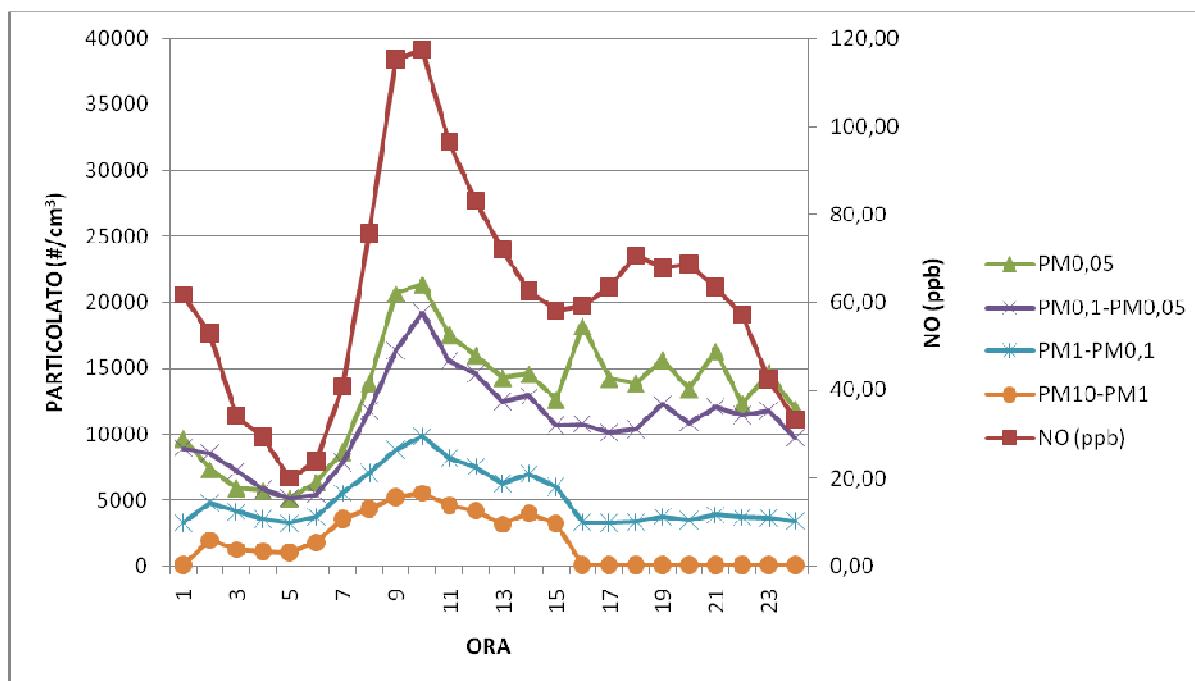


Figura 51 – Confronto fra giorno tipo delle concentrazioni di NO e giorni tipo per classi aggregate di particolato, sito Marche, anno 2008.

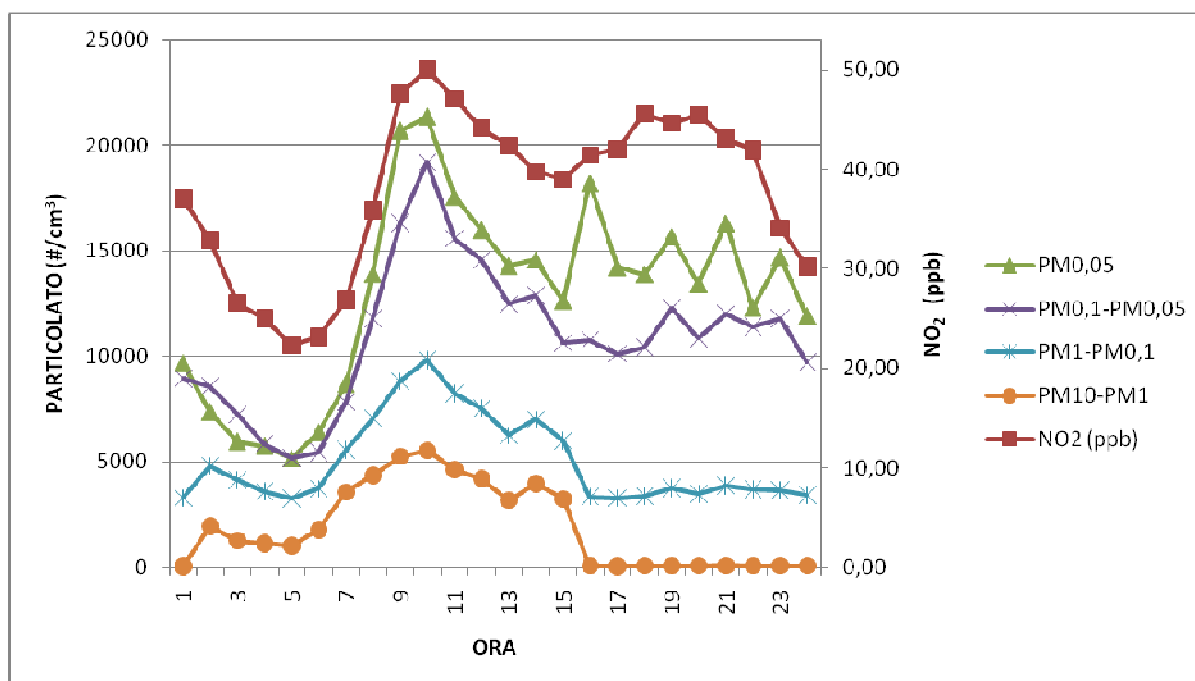


Figura 52 - Confronto fra giorno tipo delle concentrazioni di NO₂ e giorni tipo per classi aggregate di particolato, sito Marche, anno 2008.

4.5 Correlazione con i parametri meteorologici

4.5.1 Inquadramento meteorologico dell'area di studio

Milano è una città dell'area mediterranea situata nel lato occidentale del bacino della Val Padana, e il clima che tale posizione le conferisce è semi-continentale. Secondo la Classificazione dei climi di Köppen, Milano ha un clima tipicamente temperato delle medie latitudini.

Come in tutte le grandi città del mondo l'isola di calore cittadina rende le temperature più elevate rispetto alle campagne circostanti (in alcune notti le minime in inverno possono essere superiori anche di 2/3 °C). Infatti i quartieri centrali godono di minime lievemente più alte rispetto alle aree periferiche che risentono delle masse di aria fredda ed umida ristagnanti sulle campagne; inoltre i quartieri meridionali della città sono più frequentemente interessati dalla nebbia durante l'inverno, così che talvolta capita anche che in caso di nebbia fitta le zone centrali e meridionali della città siano più fredde (per quel che riguarda le temperature massime) anche di 2 °C rispetto alla campagna circostante. Le temperature minime in inverno risultano più alte che in periferia, ma in estate questa differenza tende ad attenuarsi.

Le temperature medie mensili di Milano Duomo, le cui medie storiche rappresentano bene il clima della città, vanno dai -2/+5 °C in gennaio ai +17/+29 °C in luglio. Le aree periferiche registrano temperature medie più basse (intorno ad 1 °C), specialmente per quanto riguarda i valori minimi notturni: tale differenza tra centro e periferia tende ad accentuarsi maggiormente nei mesi invernali. Milano, come del resto gran parte della Pianura Padana, soffre di scarsa ventilazione e questo favorisce il ristagno delle nebbie ma anche degli inquinanti.

Gli inverni milanesi sono freddi e molto umidi. Le estati sono in genere calde, afose e poco ventilate. L'estate milanese è però anche costellata da diversi temporali e sono possibili anche in piena estate giornate tiepide e temporalesche (condizioni normalmente legate a peggioramenti da ovest) che attenuano la calura: i mesi compresi tra giugno e agosto sono quindi discretamente piovosi. Nel complesso, le precipitazioni nell'area milanese sono moderatamente elevate e relativamente ben distribuite nel corso dell'anno: sono piovose anche le stagioni intermedie e specialmente il medio autunno e la primavera, ma gli inverni vedono una riduzione consistente delle precipitazioni con un minimo di 40 mm a febbraio. Risultano leggermente più scarse le precipitazioni nella periferia meridionale e maggiori in quella nord-occidentale. La media annuale delle precipitazioni è di 1000 mm.

La media nivometrica della città di Milano (cioè i cm totali medi neve di accumulo annuo) è di 26 cm annui (riferita al periodo a cavallo tra gli anni sessanta e gli anni ottanta); media che scende a 21 cm se si considera tutto il periodo che va dal 1950 al 2007; intorno alla città, lontane dall'isola di calore, la media nivometrica tende ad essere leggermente superiore. L'umidità è invece sempre molto elevata per tutto l'anno in special modo nei mesi invernali (quando arriva anche al 100%) e durante la notte in tutte le stagioni. Ciò nonostante i giorni di piogge stanno anch'essi diventando via via meno frequenti (così come il fenomeno della nebbia), anche se i totali pluviometrici annui non sono variati molto. Sono soprattutto le stagioni autunnali ad avere registrato un calo delle precipitazioni e della nebulosità. Le nebbie sono favorite sia dal cielo sereno, che consente il raffreddamento da irraggiamento, sia dal suolo superficialmente piuttosto umido, sia da configurazioni bariche invernali come i regimi altopressori con gradienti barici molto deboli.

Tabella 17 – Medie mensili riferite agli ultimi 30 anni, basate sui dati della stazione di Milano Linate (Clima Milano – medie climatiche).

Mese	T min	T max	Precip.	Giorni piovosi	Umidità	Vento	Eliofania
Gennaio	-2 °C	5 °C	64 mm	7.2	86 %	WSW 4 km/h	2 ore
Febbraio	0 °C	8 °C	63 mm	6.7	78 %	WSW 9 km/h	3 ore
Marzo	3 °C	13 °C	82 mm	7.9	71 %	WSW 9 km/h	5 ore
Aprile	7 °C	18 °C	82 mm	8.3	75 %	WSW 9 km/h	6 ore
Maggio	11 °C	22 °C	97 mm	8.1	72 %	SSW 9 km/h	7 ore
Giugno	15 °C	26 °C	65 mm	7.6	71 %	SSW 9 km/h	8 ore
Luglio	17 °C	29 °C	68 mm	5.8	71 %	SSW 9 km/h	9 ore
Agosto	17 °C	28 °C	93 mm	7.1	72 %	SSE 4 km/h	8 ore
Settembre	14 °C	24 °C	69 mm	5.2	74 %	WSW 4 km/h	6 ore
Ottobre	8 °C	18 °C	100 mm	6.8	81 %	SSW 4 km/h	4 ore
Novembre	4 °C	10 °C	101 mm	8.5	85 %	SSW 4 km/h	2 ore
Dicembre	-1 °C	5 °C	60 mm	6.3	86 %	SSW 4 km/h	2 ore

Il grafico rappresenta la probabilità che un giorno risulti piovoso prendendo i dati degli ultimi 30 anni della stazione di Milano-S.Leonardo.

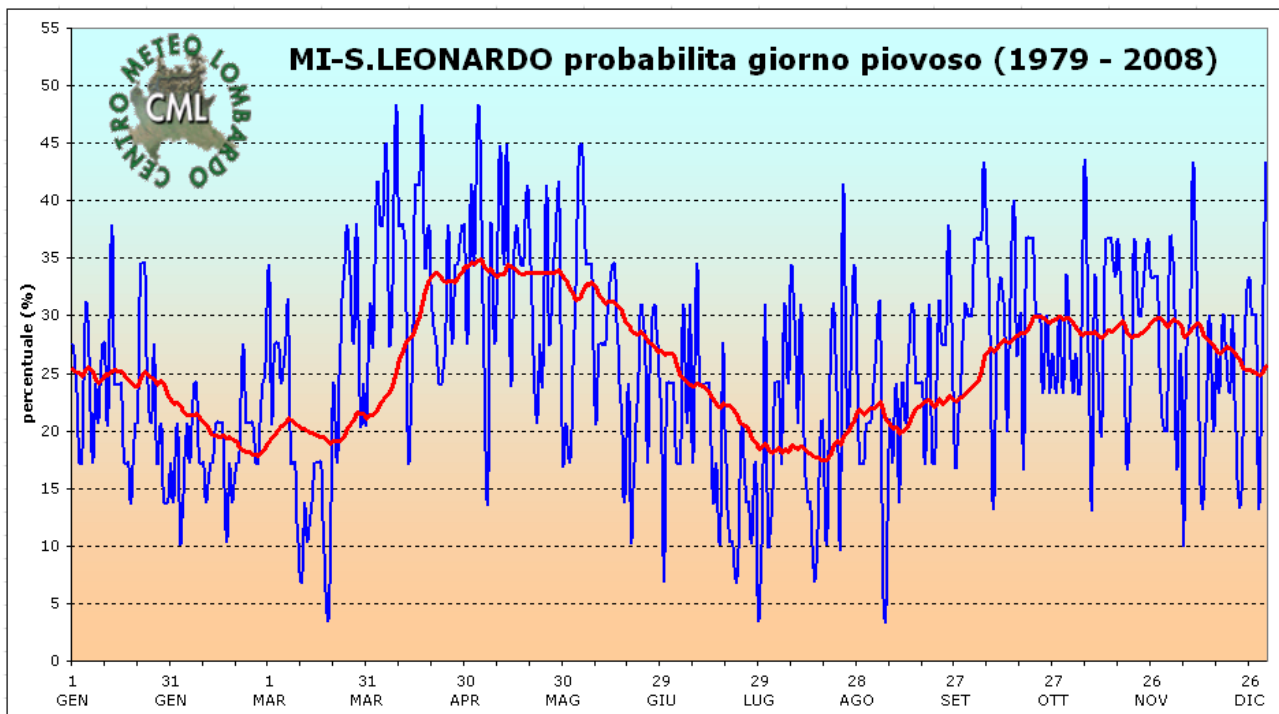


Figura 53 – Probabilità che un giorno risulti piovoso (dati ultimi 30 anni, stazione Milano – S. Leonardo).

Il grafico mette in evidenza che la Primavera è la stagione con il più alto rischio di incontrare una giornata piovosa. Infatti, da fine marzo alla prima decade di giugno la probabilità che un giorno sia piovoso è mediamente del 35-40% fino a toccare punte di circa il 50%. Nel primo mese della primavera si vede un rapido aumento delle probabilità che un giorno risulti piovoso, ovvero dal 3,7% al 48,2% del 17 aprile. La fase con il maggior rischio di incontrare giornate piovose è quella che approssimativamente si estende dalla prima decade di Aprile alla seconda decade di Maggio.

Successivamente con l'arrivo dell'estate si ha un progressiva riduzione del rischio che si verifichi una giornata di pioggia. I giorni con minor probabilità di risultare piovosi sono il 29 luglio e il 15 agosto e il 6 settembre (3,7%). La probabilità che un giorno sia piovoso nella stagione estiva si mantiene costante, poco sopra il 20%, nel periodo che va da metà giugno fino a metà luglio. Le due fasi con il minor rischio di pioggia si hanno intorno all'ultima decade di luglio e nella seconda decade di agosto. L'autunno vede una ripresa del rischio precipitativo che si riporta leggermente sopra il 30%, con punte talora superiori al 40%. Ciò è indice di buone probabilità che un giorno sia piovoso. Infatti l'autunno risulta esser la seconda stagione più umida.

L'inverno risulta esser una stagione con basse probabilità di incontrare un giorno con precipitazioni. La probabilità che un giorno sia piovoso nella stagione invernale si mantiene costante, poco sopra il 20%, fin quasi alla fine di Gennaio. In seguito si ha una netta riduzione del rischio di incontrare pioggia in corrispondenza del mese di Febbraio, che risulta essere il più secco dell'anno.

La curiosità più significativa è che il periodo temporale che registra il minor rischio precipitativo in assoluto appartiene, meteorologicamente parlando, all'estate e questo ha luogo attorno al 20 Agosto.

4.5.2 Radiazione solare, temperatura, umidità e velocità del vento

I coefficienti di correlazione ottenuti tra concentrazione numerica di particolato e parametri meteorologici per i due siti e i due anni di campionamento sono riportati in tabella.

Tabella 18 – Coefficienti di correlazione, sito Pascal e Marche, anno 2008 e 2009.

SITO	ANNO	Radiazione solare	Temperatura	Umidità	Velocità del vento
PASCAL	2008	-0.16	-0.10	0.27	-0.35
	2009	-0.19	-0.02	0.26	-0.30
MARCHE	2008	-	0.10	0.12	-0.23

I coefficienti di correlazione presentano valori molti bassi, indici di una scarsa correlazione tra concentrazioni numeriche di particolato e parametri meteorologici, quali radiazione solare e temperatura. Valori più elevati vengono raggiunti per quanto riguarda l'umidità e la velocità del vento, assumendo valori comunque inferiori a 0,5. Nel caso del sito di traffico di Viale Marche i coefficienti assumono valori ancora più bassi, in quanto il profilo delle concentrazioni è determinato dalle emissioni dovute al traffico e viene scarsamente influenzato dalle variazioni delle variabili meteorologiche che si susseguono durante il giorno.

Di seguito si riportano i grafici che mostrano il confronto fra i “giorni tipo” delle concentrazioni numeriche e dei parametri meteorologici.

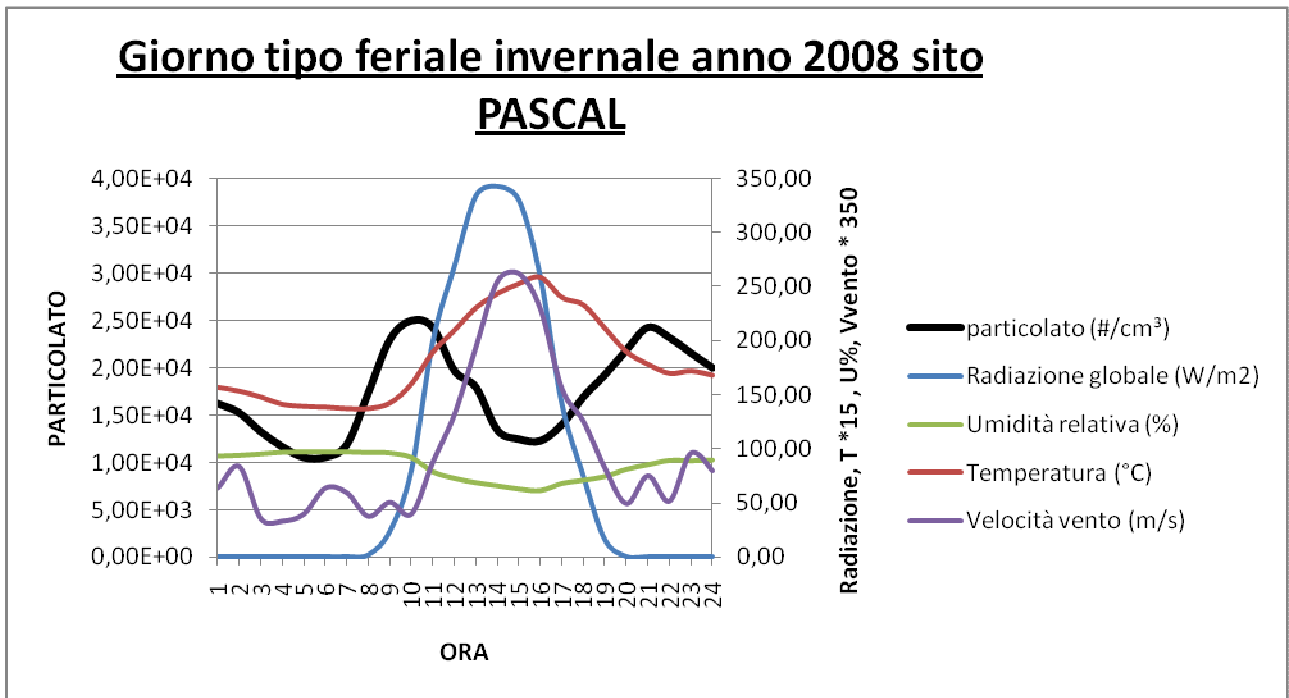


Figura 54 – Confronto fra giorno tipo feriale delle concentrazioni numeriche di particolato e parametri meteorologici di base, anno 2008, sito Pascal.

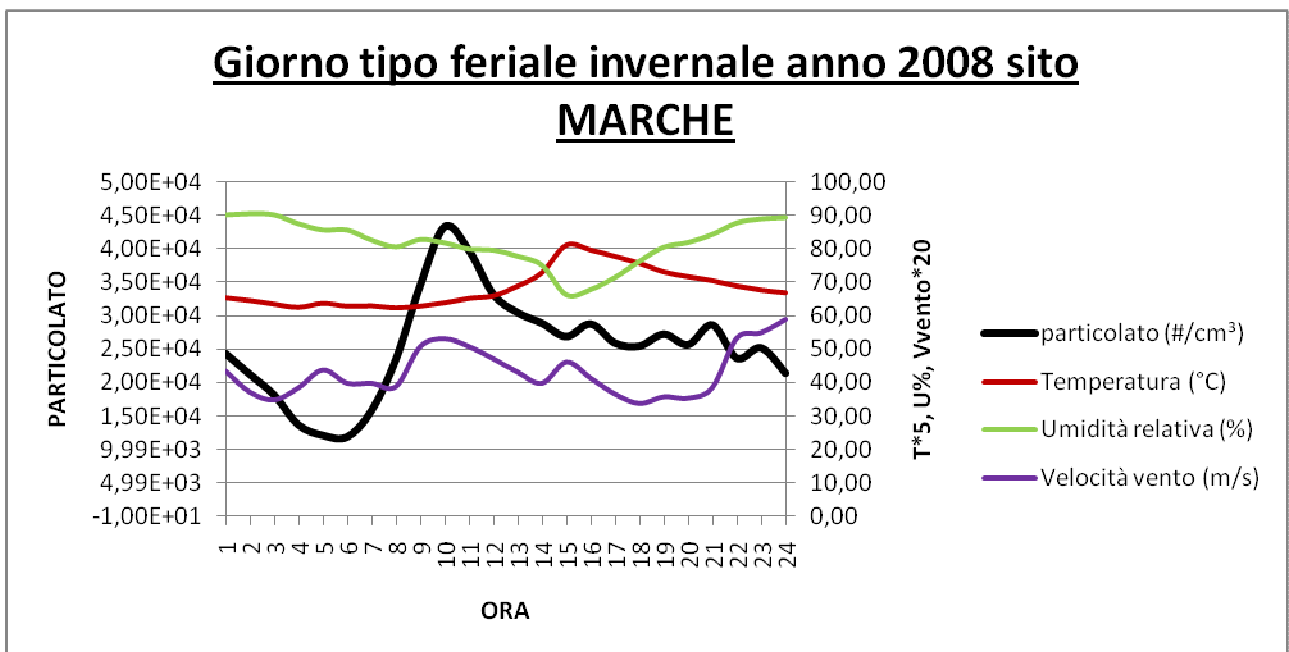


Figura 55 - Confronto fra giorno tipo feriale delle concentrazioni numeriche di particolato e parametri meteorologici di base, anno 2008, sito Marche.

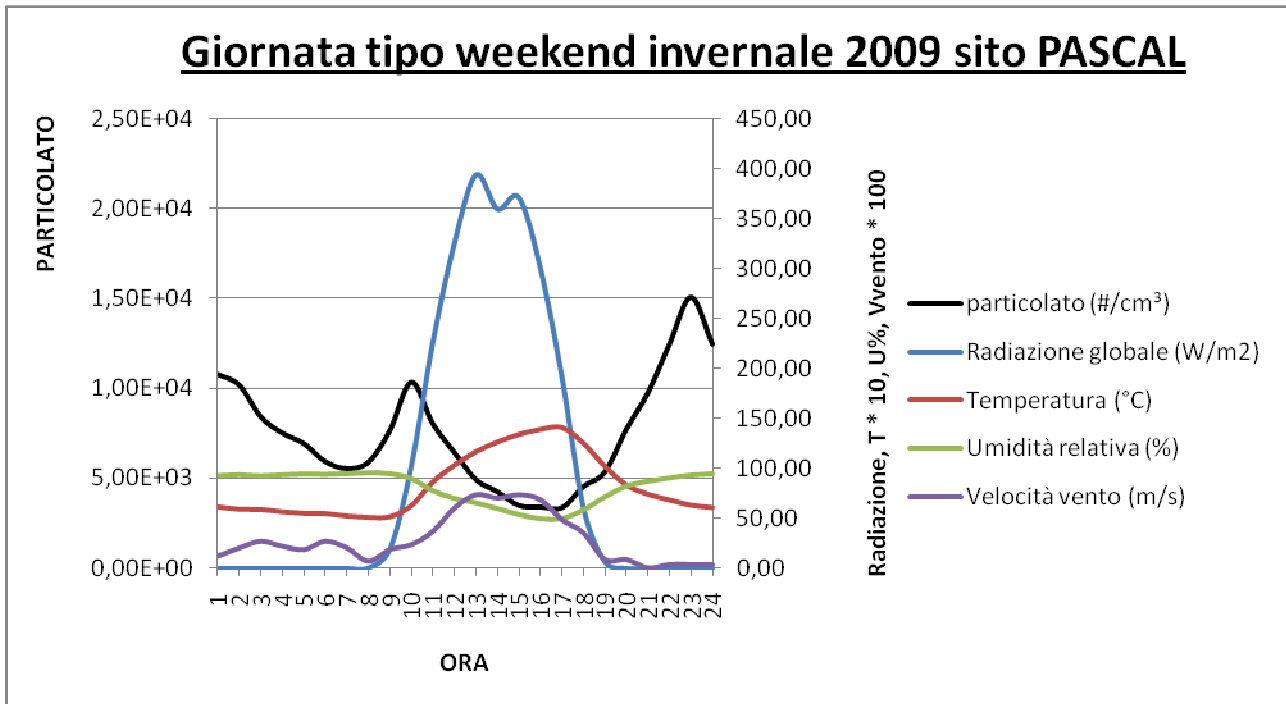


Figura 56 - Confronto fra giorno tipo del fine settimana delle concentrazioni numeriche di particolato e parametri meteorologici di base, anno 2009, sito Pascal.

Anche se quantitativamente le correlazioni sono molto deboli o pressoché assenti l'andamento delle concentrazioni mostra, almeno qualitativamente, una diminuzione delle concentrazioni numeriche di particolato in corrispondenza dell'aumento della radiazione solare, della temperatura e della velocità del vento che tendono ad aumentare durante le ore pomeridiane della giornata (dalle 11 alle 18). Bisogna però tener presente che durante queste ore si osserva anche una diminuzione della fonte primaria di particolato costituita dal traffico. L'effetto è più evidente nel sito di fondo urbano di via Pascal rispetto al sito di traffico di viale Marche in quanto meno influenzato dalle emissioni primarie dovute al traffico.

Durante le ore di massima insolazione, e conseguente aumento della temperatura, avvengono fenomeni di nucleazione delle particelle ultrafini, mentre durante il periodo notturno e le prime ore della mattina, a causa delle temperature più basse, il fenomeno prevalente è quello della condensazione su particelle preesistenti. Gli incrementi di temperatura tendono inoltre a far evaporare le componenti semivolatili che costituiscono il particolato.

In ambiente urbano un aumento della velocità del vento comporta una riduzione delle particelle sub-micrometriche, in parte per l'arrivo di aria meno inquinata dalle aree non antropizzate, in parte per la diluizione delle emissioni da sorgenti di inquinamento locali, mentre può favorire la

risospensione delle particelle grossolane. I coefficienti di correlazione calcolati per il mese di ottobre 2009, sito Pascal, evidenziano come la correlazione tra velocità del vento e dati di concentrazione numerica di particolato sia migliore per le classi PM0,05, PM0,1-PM0,05 e PM1-PM0,1 piuttosto che nel caso della classe PM10-PM1. E' stato analizzato il mese di ottobre 2009 in quanto i valori di velocità del vento registrati rappresentano bene i valori di velocità del vento di solito osservabili nell'area di Milano.

Tabella 19 – Coefficienti di correlazione, sito Pascal, ottobre 2009.

	Velocità del vento
PM0,05	-0.39
PM0,1-PM0,05	-0.56
PM1- PM0,1	-0.57
PM10 – PM1	-0.19

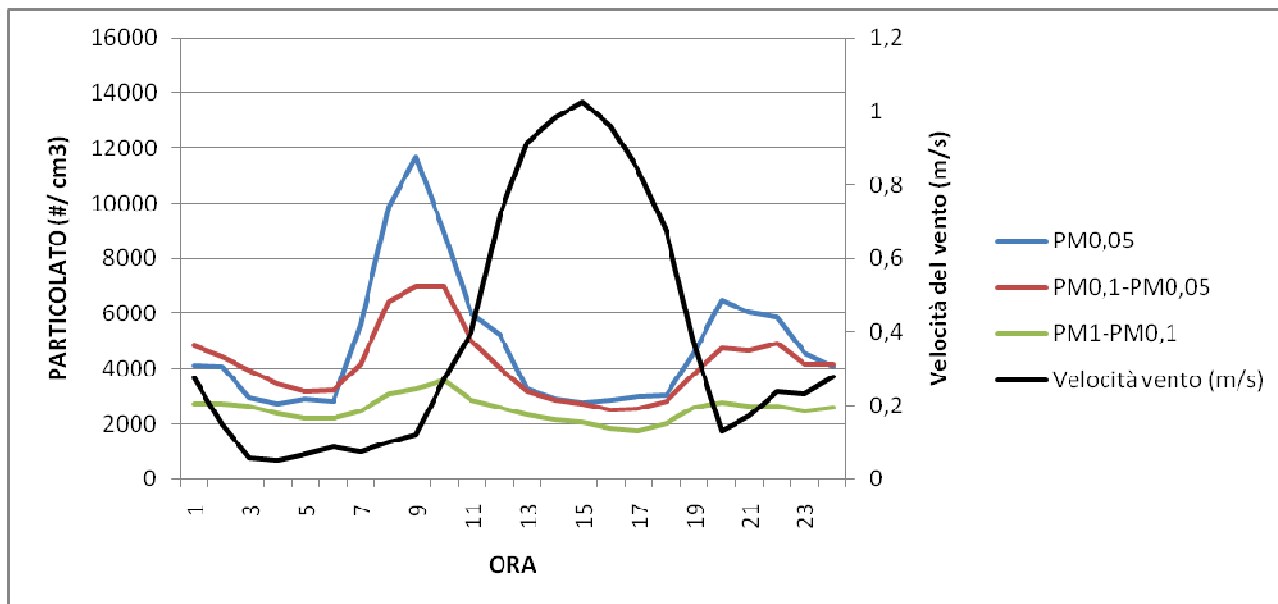


Figura 57 – Effetto di un aumento della velocità del vento sulle concentrazioni numeriche delle classi aggregate di particolato, mese di ottobre 2009, sito Pascal.

4.5.3 Precipitazione

Nel periodo considerato si sono verificati sette giorni piovosi, tutti durante le campagne di misura nel sito di via Pascal. Sono stati considerati come giorni piovosi quelli in cui il totale della precipitazione ha superato la soglia di 2,5 mm. Nei grafici seguenti l'andamento delle concentrazioni numeriche di particolato viene messo a confronto con l'altezza di precipitazione registrata durante gli eventi di pioggia presso la centralina meteorologica ARPA di Milano Lambrate, a poca distanza (< 1 km) dal sito di misura.

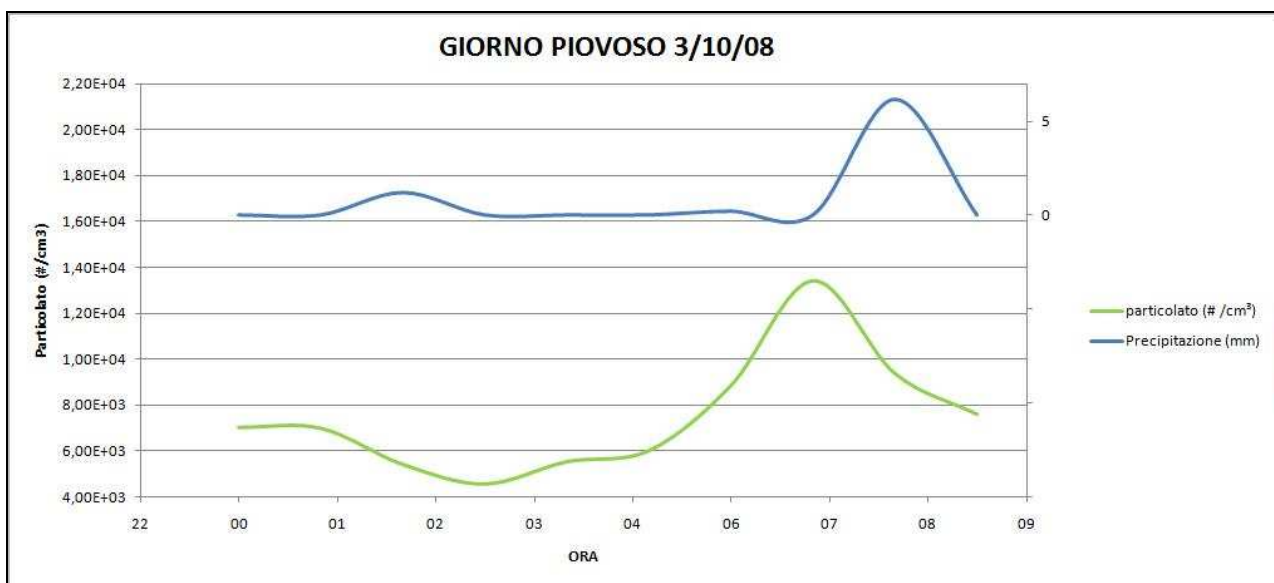


Figura 58 – Confronto fra concentrazione numerica di particolato e altezza di precipitazione per il giorno 3 ottobre 2008.

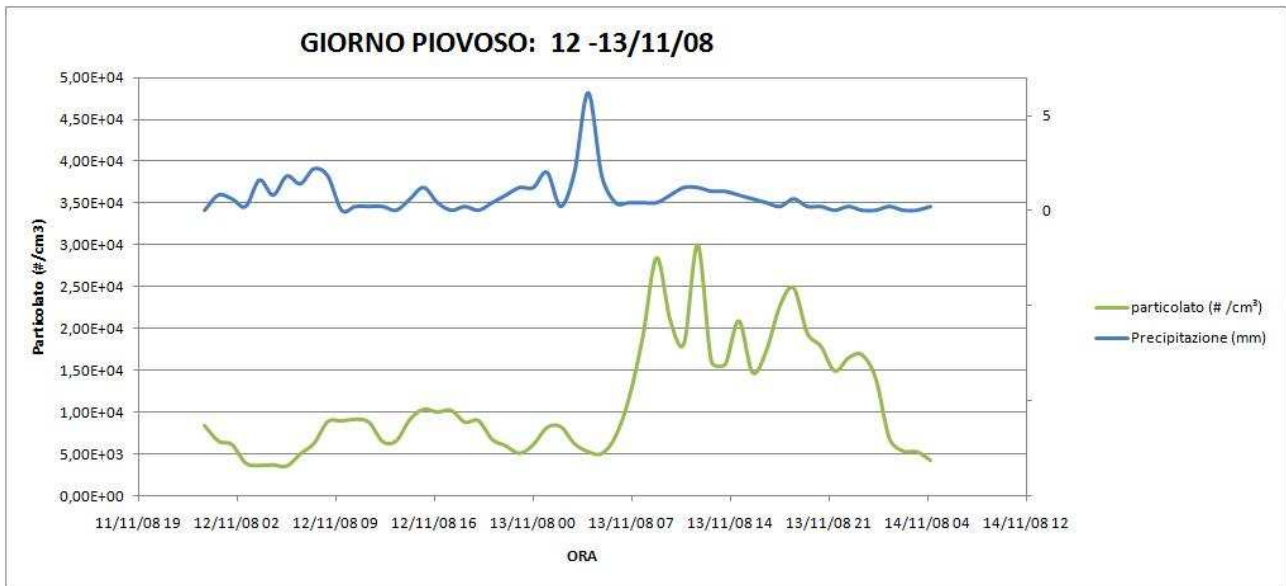


Figura 59 - Confronto fra concentrazione numerica di particolato e altezza di precipitazione per i giorni 12 e 13 novembre 2008.

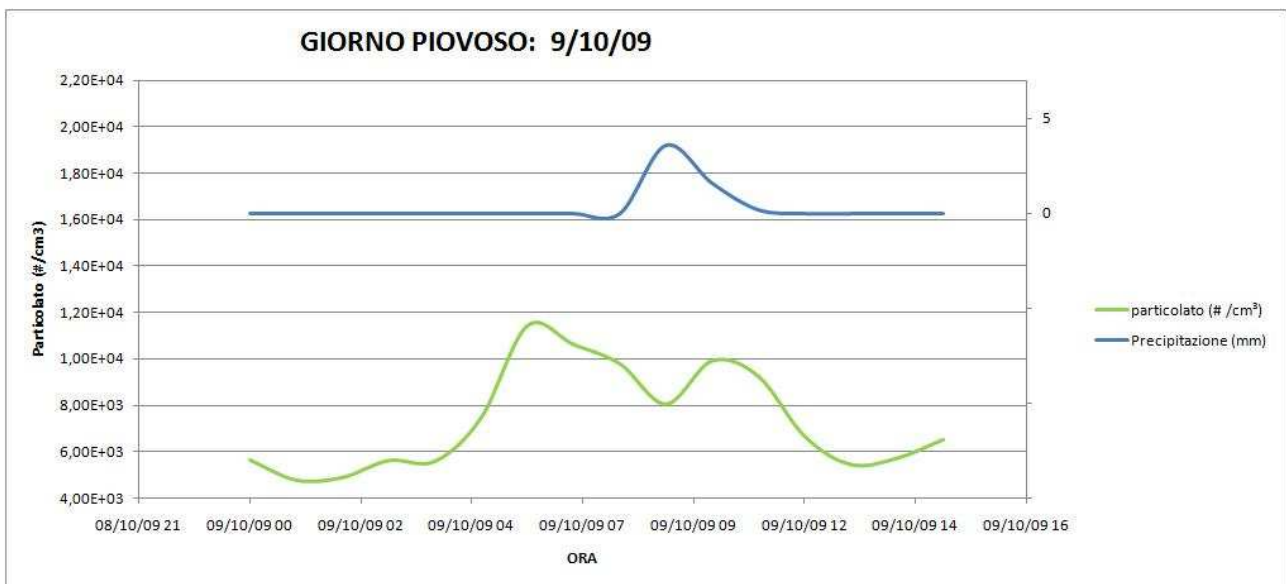


Figura 60 - Confronto fra concentrazione numerica di particolato e altezza di precipitazione per il giorno 9 ottobre 2009.

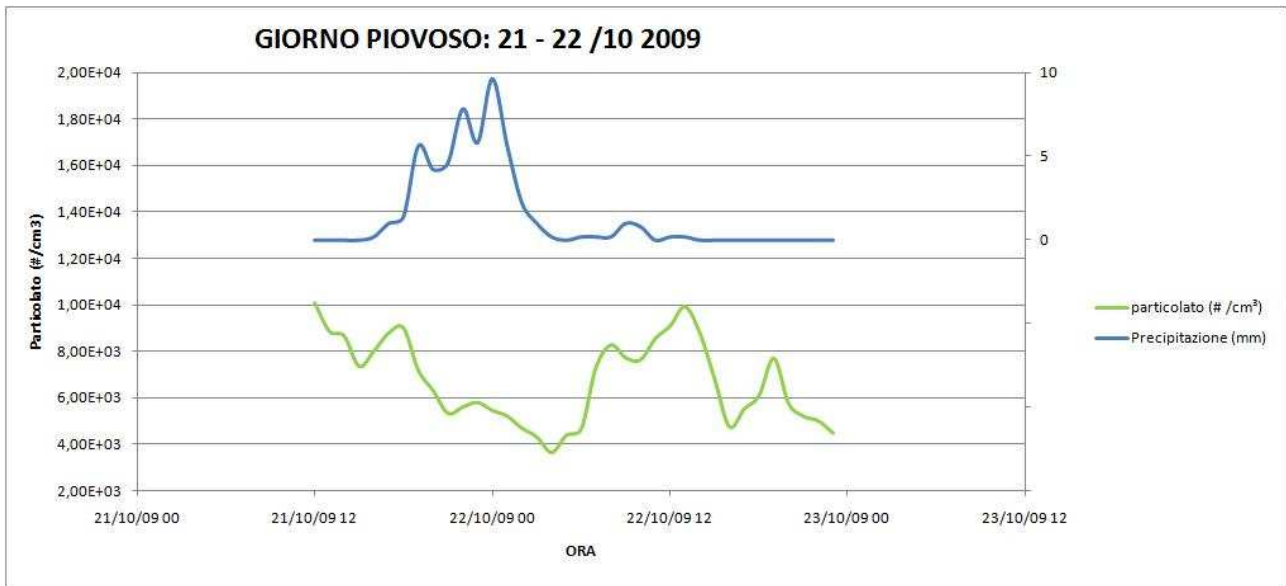


Figura 61 - Confronto fra concentrazione numerica di particolato e altezza di precipitazione per i giorni 21-22 ottobre 2009.

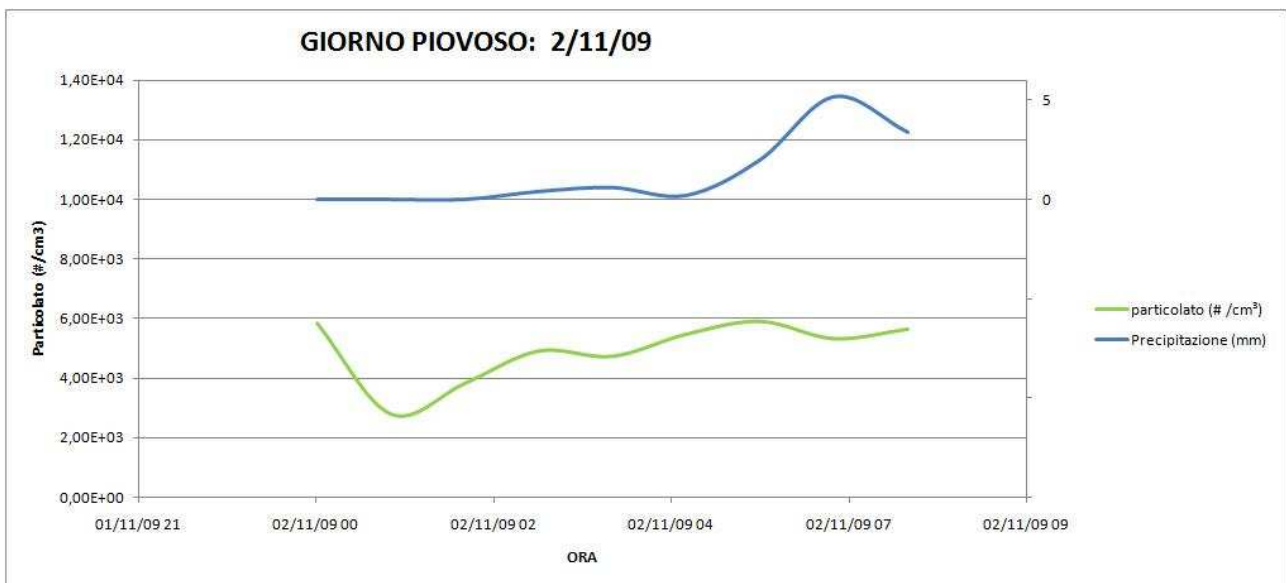


Figura 62 - Confronto fra concentrazione numerica di particolato e altezza di precipitazione per il giorno 2 novembre 2009.

Qualitativamente si nota una possibile correlazione tra andamenti delle concentrazioni di particolato e altezza di precipitazione. All'aumentare dell'altezza di pioggia registrata, infatti, si ha un calo delle concentrazioni di particolato. Il coefficiente di correlazione risulta pari a -0,3. Nel paragrafo 4.6 si riporta un'analisi dettagliata dei giorni di pioggia.

4.6 Analisi dei giorni di pioggia

4.6.1 Caratteristiche e misure delle piogge

Un evento piovoso è solitamente definito in base a tre caratteristiche:

- altezza;
- durata;
- intensità.

L'*altezza di una pioggia*, solitamente indicata con h e misurata in mm, è definita come lo spessore dello strato d'acqua che rimarrebbe al suolo se non vi fosse scorrimento, infiltrazione ed evaporazione; ad esempio, 10 mm di pioggia equivalgono a 10 litri d'acqua caduti su una superficie di 1 m^2 . Dalla conoscenza di questo valore, supposto costante per una determinata zona di area A , si può derivare il volume di acqua caduto ($hxA =$ afflusso idrometeorico).

La *durata di una pioggia* (T) è il tempo che intercorre tra l'inizio e la fine di un singolo evento.

L'*intensità di una pioggia* è l'altezza caduta nell'unità di tempo (dh/dT). Per una pioggia non breve il rapporto tra l'altezza h e la durata T esprime l'intensità media. In genere l'intensità si riporta all'ora: ad es. se in 10 minuti si registrano 10 mm di pioggia, si dice che la sua intensità è stata di 60 mm/ora. Moltiplicando l'intensità (dimensionalmente omogenea con una velocità) per la superficie investita dalla pioggia si ottiene una portata: $hxA/T =$ volume/tempo (portata dell'afflusso idrometeorico).

In base all'intensità le piogge sono classificate come:

- pioggia debole - fino a 2 mm in un'ora;
- pioggia moderata - tra 2 e 6 mm/h;
- pioggia forte - oltre i 6 mm/h;
- rovescio - oltre i 10 mm/h;
- nubifragio - oltre i 30 mm/h.

Le conseguenze di un episodio piovoso dipendono però non solo dall'intensità della precipitazione, ma anche dalla durata del fenomeno stesso: una pioggerellina debole ma continua potrebbe quindi lasciare al suolo lo stesso quantitativo di acqua di uno scroscio di pioggia breve ma intenso. Sotto questa luce si pone quindi l'attenzione a cosa si intende parlando di piogge forti o piogge

abbondanti: entrambe indicano precipitazioni in grado di fornire grosse quantità di pioggia ma le prime con episodi anche brevi ma intensi, le seconde con piogge deboli ma prolungate nel tempo. Le piogge forti si verificano in genere nei rovesci o temporali provocati dalle nubi cumuliformi con un vasto sviluppo lungo la verticale, mentre le piogge abbondanti accompagnano in genere le nubi stratiformi che si estendono orizzontalmente anche per centinaia di chilometri favorendo fasi piovose prolungate. Naturalmente non è escluso che piogge abbondanti e quindi prolungate possano essere anche di moderata o forte intensità anche per alcune ore: si tratta fortunatamente di un evento raro che può tuttavia portare a eventi alluvionali.

4.6.2 Meccanismi di rimozione del particolato attraverso deposizione umida e distribuzione granulometrica del particolato durante gli eventi piovosi

Nella Figura 63 si riportano schematicamente i differenti processi che contribuiscono alla rimozione di particolato per effetto della caduta delle gocce di pioggia: *rainout* e *washout*, che avvengono nella nube, *sweepout* e *occult deposition*, che avvengono durante la fase di caduta delle gocce di pioggia.

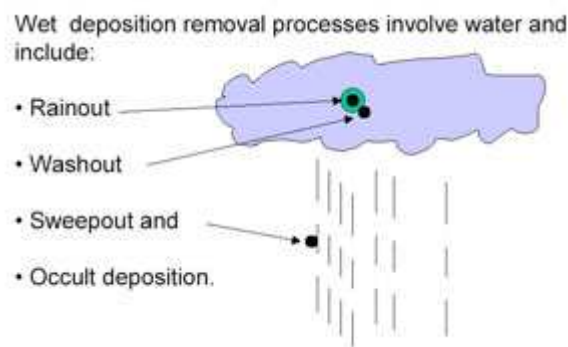


Figura 63 – Processi di rimozione umida del particolato.

Rainout: le particelle fungono da nucleo di condensazione per le goccioline della nube. Alcune di queste gocce aumentano di dimensioni fino a cadere (sedimentazione per gravità) sotto forma di gocce di pioggia. Le particelle (nuclei di condensazione) così depositate sono dilavate dall'atmosfera.

Washout: è la rimozione delle particelle da parte delle gocce di pioggia formatesi in precedenza. Le

particelle vengono inglobate in una goccia già esistente; la differenza con il rainout sta proprio nel fatto che in questo caso si è già formata una goccia di dimensioni sufficienti per cadere.

Sweep out: le particelle collocate sotto la nube possono impattare in una goccia che cade e sono depositate al suolo con la goccia stessa. Questo è probabilmente il meccanismo di deposizione umida meno efficiente.

Occult deposition: fa riferimento alla deposizione associata con le nubi che sono in contatto col terreno, come per esempio la nebbia o le nubi orografiche. L'efficienza d'impatto è la probabilità che una particella impatti in una superficie che intercetta un flusso, anziché essere deviata attorno all'oggetto. Gli aerosol più grandi presentano una maggiore probabilità di impatto su una superficie rispetto a particelle più piccole. L'efficienza di impatto delle goccioline d'acqua è maggiore di quella degli aerosol nei confronti dei quali agiscono da nuclei. Questo aumenta la probabilità per gli aerosol inglobati nelle gocce. L'efficienza d'"incollaggio", ovvero la probabilità che un oggetto che ha impattato contro una superficie non rimbalzi e non sia immediatamente risospeso, è maggiore per le gocce delle nuvole rispetto agli aerosol: le nubi che vengono a contatto con il suolo possono pertanto dare luogo ad un migliore tasso di deposizione per i piccoli aerosol.

Le precipitazioni rimuovono il particolato principalmente tramite processi di inglobamento dell'inquinante nelle nubi ("rainout") e di dilavamento atmosferico ("washout"): quest'ultimo può considerarsi largamente prevalente su scale spaziali ridotte, quali quelle locali dell'area di incidenza della sorgente, mentre il primo è attivo soprattutto nel trasporto e la deposizione a grandi distanze.

La diminuzione delle concentrazioni di particolato atmosferico a causa delle precipitazioni non si verifica in egual misura su tutte le granulometrie di particolato, ma alcune classi granulometriche (generalmente quelle maggiori) vengono rimosse con maggior efficienza. La precipitazione modifica quindi la distribuzione granulometrica del particolato atmosferico.

La distribuzione granulometrica del particolato atmosferico è strettamente connessa alle sorgenti di emissione e ai fenomeni meteorologici prevalenti durante il tempo di permanenza del particolato in atmosfera (Suzuki and Tsunogai, 1988; Ito, 1993).

La capacità del particolato atmosferico di assorbire acqua è una caratteristica di primaria importanza, ma il suo studio rappresenta un difficile compito (Kerminen, 1997).

Questa capacità ha importanti risvolti in quanto il contenuto di acqua nel particolato ne influenza la distribuzione granulometrica e la massa, l'acidità, la quantità di sostanze solubili in acqua, le proprietà di assorbimento e riflessione della luce, la reattività chimica, la capacità delle particelle di fungere da nuclei di condensazione e il tempo di permanenza in atmosfera. Perciò una variazione nella concentrazione di particolato può essere interpretata tanto come una delle cause della precipitazione oppure quanto come una delle sue conseguenze (Teller and Levin, 2006; Jirak and Cotton, 2006).

La capacità di assorbire acqua può essere molto variabile e dipende da particelle submicroniche costituite da una miscela di materiale organico e inorganico (Cocker et Al., 2001; Vakeva et Al., 2002; Aklilu et Al., 2006).

La distribuzione granulometrica influenza la dinamica del particolato, i processi di genesi, trasformazione e rimozione, il tempo di permanenza in atmosfera nonché le proprietà ottiche (Vakeva et Al, 2000; Huebert et Al, 1996).

4.6.3 Analisi dei dati e obiettivi

Come anticipato al paragrafo 4.5.3, nel periodo in esame sono presenti sette giorni piovosi: 3/10/08, 12 e 13/11/08, 9/10/09, 21 e 22/10/09, 2/11/09, tutti avvenuti durante le campagne di misura in via Pascal. L'obiettivo della presente analisi è stato quello di verificare se vi sia o meno un effettivo effetto di dilavamento dell'atmosfera durante gli eventi piovosi e di studiarne le conseguenti variazioni dei livelli di concentrazione della distribuzione granulometrica.

L'analisi dei giorni di pioggia è stata così strutturata: per prima cosa è stato effettuato uno studio meteorologico, atto a verificare che non ci siano stati apporti straordinari di particolato dovuti al trasporto da grande distanza nei giorni che hanno ospitato eventi precipitativi e che quindi le concentrazioni numeriche di particolato osservate siano da ricondurre a sorgenti locali, quali il traffico; in secondo luogo sono stati individuati gli eventi di precipitazione registrati durante i giorni di pioggia evidenziandone durata, intensità massima di precipitazione, ora di inizio e fine, ed è stata analizzata l'evoluzione oraria della distribuzione granulometrica di particolato per la durata degli eventi. Viene proposto un modello di regressione multipla per il calcolo della variazione oraria delle

concentrazioni numeriche delle classi nanoparticolato, ultrafine, PM1 e PM2,5 a partire dalla concentrazione numerica e intensità di pioggia dell'ora precedente, numero di ore precedenti di precipitazione e un fattore che tiene conto della sorgente traffico.

Sono poi stati condotti una serie di confronti per studiare le variazioni della distribuzione granulometrica delle concentrazioni numeriche durante un evento di pioggia tenendo in considerazione l'evoluzione del regime emissivo dovuto al traffico:

- confronto fra la variazione percentuale delle concentrazioni numeriche di particolato tra ora di fine evento e ora di inizio dell'evento, e lo stesso intervallo temporale sui dati di giorni secchi per ogni classe granulometrica;
- confronto fra la distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità e la distribuzione granulometrica della stessa ora nel giorno tipo secco;
- confronto fra la variazione percentuale tra ora di massima intensità e ultima ora secca dell'evento e le stesse ore nel giorno tipo secco.

4.6.3.1 Studio meteorologico

Lo studio meteorologico dei mesi che hanno ospitato eventi piovosi è mostrato in Tabella 20: le temperature sono tipiche dei mesi autunnali e l'umidità è all'incirca 80% per il mese di ottobre e attorno al 90% per il mese di novembre. Il mese più piovoso è stato ottobre 2009 con un totale di precipitazione di quasi 60 mm, mentre quello meno piovoso è stato ottobre 2008 con un totale di precipitazione quasi sette volte minore.

Tabella 20 - studio meteorologico dei mesi di ottobre e novembre 2008 e 2009 con dati di temperature massime, minime e medie, umidità relativa, precipitazione totale registrata e intensità del vento.

	Ottobre 2008	Novembre 2008	Ottobre 2009	Novembre 2009
T min (°C)	3	4,9	0,4	4
Tmax (°C)	21,9	15,2	24,0	12
Tmedia (°C)	13,4	8,9	10,5	8
Umidità relativa (%)	75,7	94,3	80	89,9
Precipitazione tot (mm)	8,2	40,4	58	12
Velocità vento (m/s)	0,8	0,3	0,4	0,3

L'analisi meteorologica dei giorni piovosi è stata condotta analizzando diversi parametri quali la temperatura, l'umidità, la velocità del vento e la precipitazione totale registrata (Tabella 21). L'umidità relativa è alta durante i giorni piovosi e l'intensità del vento può essere classificata, in accordo con la scala di Beaufort, come bava di vento, aggirandosi intorno a valori di 0,5 m/s, con il massimo valore pari a 0,8 m/s. La precipitazione totale registrata durante un giorno piovoso oscilla tra 5,4 e 31 mm.

Tabella 21 - valori dei parametri meteorologici dei giorni piovosi: temperatura massima, minima e media, umidità relativa, intensità del vento, precipitazione totale.

Data	Giorno					
	T _{min} (°C)	T _{max} (°C)	T _{media} (°C)	U _%	V _{vento} (m/s)	P _{tot} (mm)
3/10/08	8,7	13,9	11,3	78,7	0,4	7,6
12/11/08	7,7	9,4	8,5	99,9	0,8	16,6
13/11/08	7,3	9,1	8,3	99,1	0,3	23,4
9/10/09	15,7	18,6	17,1	87,4	0,3	5,4
21/10/09	5,0	8,7	6,7	88,9	0,5	31,0
22/10/09	5,6	9,6	7,1	98,7	0,5	21,4
2/11/09	7,1	8,6	7,7	97,1	0,3	11,8

Saranno analizzati in dettaglio solo i giorni di cui sono disponibili dati completi (12 – 13 novembre 2008 e 21 – 22 ottobre 2009).

Di seguito vengono analizzati i movimenti delle masse d'aria presenti nei due mesi che hanno ospitato gli eventi di precipitazione oggetto di studio.

Novembre 2008

La caratteristica del mese è stata la pressoché continua presenza di zone depressionarie sul continente o sul bacino mediterraneo, mentre non si è mai avuto un anticlone centrato sull'Europa centrale. Per un certo numero di giorni l'alta pressione atlantica si è estesa verso est, determinando marginalmente il tempo delle Alpi ma soprattutto al nord, dove le precipitazioni sono restate nettamente sotto la norma e il soleggiamento è risultato generalmente abbondante. L'apporto di umidità è stato causato principalmente da correnti sudorientali. Dopo il 20 del mese

aria molto fredda ha man mano interessato anche il sud delle Alpi, mentre verso il 28 una depressione di origine nordafricana ha raggiunto l'Italia del nord. La presenza dell'aria fredda ha fatto sì che le precipitazioni cadessero sottoforma di neve fino in pianura, almeno nella prima fase dell'evento. Dopo un temporaneo rialzo del limite delle neviccate per rimescolamento con l'aria di origine subtropicale, l'elevata intensità delle precipitazioni ha però di nuovo riportato la neve fino a basse quote.

Nella tabella sottostante è riportato giorno per giorno il tipo di massa d'aria presente.

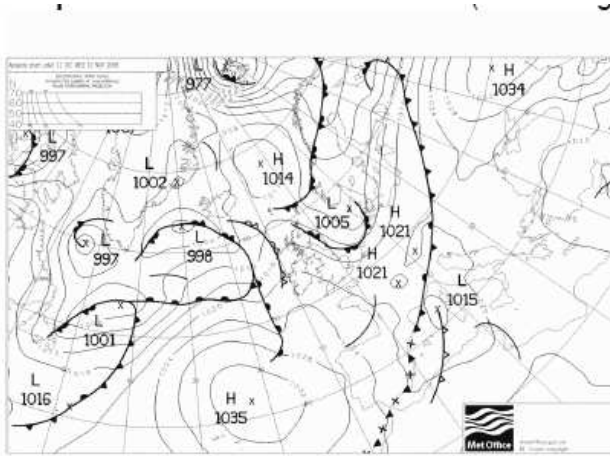
Tabella 22 – Indicazione delle masse d'aria che si sono susseguite nell'arco del mese di novembre 2008 nella penisola italiana.

GIORNI	TIPO DI MASSA D'ARIA
dall 1 al 4	subtropicale marittima continentalizzata
dal 5 al 10	polare marittima
dal 10 al 17	medie latitudini tipo marittima
dal 18 al 19	polare marittima continentalizzata
dal 20 al 21	medie latitudini tipo marittima
dal 22 al 23	polare marittima
il 24	medie latitudini
il 25	medie latitudini + subtropicale marittima
il 27	polare marittima continentalizzata + sub. marittima
il 28	subtropicale marittima
dal 29 al 30	medie latitudini

Le carte sinottiche della pressione al suolo e le immagini satellitari nell'infrarosso per i giorni 12-13 novembre 2008 sono riportate in Figura 64 e Figura 65 e quelle relative ai giorni 21-22 ottobre 2009 nella Figura 66 e Figura 67.

Mercoledì 12/11

Situazione Sinottica: formazione di un minimo sul Mar Ligure, perturbazione intensa.



Pressione al suolo e fronti il 12 Novembre alle 12 UTC

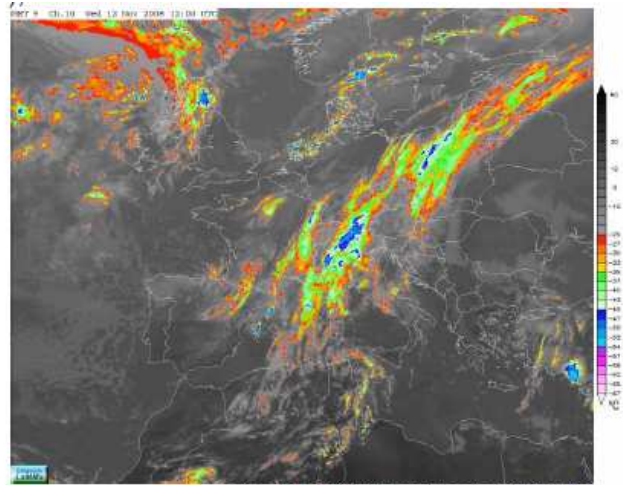
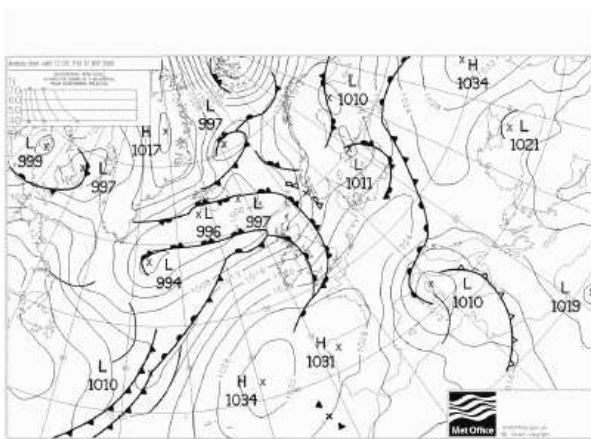


Immagine IRT del 12 Novembre alle 13:00 UTC

Figura 64 – Carta della pressione al suolo e immagine da satellite del 12/11/08 (fonte: consorzio LaMMA – Laboratorio di monitoraggio e modellistica ambientale per lo sviluppo sostenibile).

Giovedì 13/11

Situazione Sinottica: minimo barico tra coste della Toscana e Sardegna in spostamento verso sud.



Pressione al suolo e fronti il 13 Novembre alle 12 UTC



Immagine HRV-VIS del 13 Novembre alle 12 UTC

Figura 65 - Carta della pressione al suolo e immagine da satellite del 13/11/08 (fonte: consorzio LaMMA – Laboratorio di monitoraggio e modellistica ambientale per lo sviluppo sostenibile).

Ottobre 2009

L'andamento del mese dal punto di vista della circolazione atmosferica generale può essere riassunto in 5 fasi distinte. Fino al 7 è prevalsa una situazione anticiclonica con una fascia di alta pressione dapprima sul vicino Atlantico e poi sul Mediterraneo. Tra l'8 e l'11 l'Europa centrale è invece stata attraversata da alcune perturbazioni. È poi seguita una fase di una decina di giorni caratterizzati da correnti settentrionali o nordorientali, formatesi tra un anticiclone con centro sulle Isole Britanniche e una depressione sul Mediterraneo, e l'apporto di aria relativamente fredda da est che ha fatto scendere le temperature notturne a valori vicini a zero gradi. Un breve intermezzo perturbato attorno al 21 ho portato la seconda fase di precipitazioni. Dal 23 alla fine del mese la regione alpina è invece venuta a trovarsi di nuovo sotto una fascia di alta pressione che ha causato un sensibile rialzo delle temperature e tempo ben soleggiato. Gli ultimi giorni del mese sono però stati contrassegnati da una forte inversione termica, con l'accumulo di foschia a basse quote e localmente la formazione di qualche banco di nuvolosità bassa.

Mercoledì 21/10

Situazione Sinottica: un profondo minimo depressionario centrato ad ovest della Gran Bretagna determina una vasta saccatura che si estende fino al Mediterraneo centro occidentale e alle coste nord africane pilotando un sistema frontale in moto verso levante. La saccatura tende progressivamente ad espandersi a tutto il bacino del Mediterraneo determinando condizioni di tempo perturbato sull'Italia e sulla nostra regione.

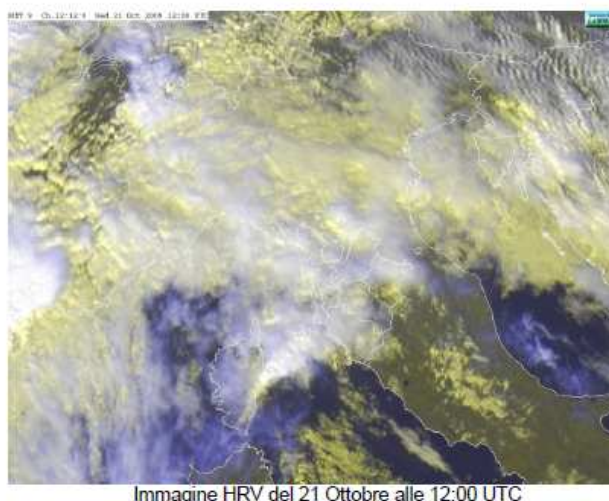
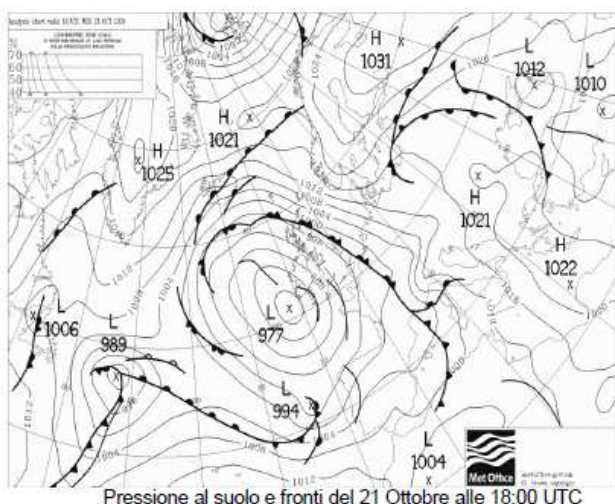


Figura 66 - Carta della pressione al suolo e immagine da satellite del 21/10/09 (fonte: consorzio LaMMA – Laboratorio di monitoraggio e modellistica ambientale per lo sviluppo sostenibile).

Giovedì 22/10

Situazione Sinottica: formazione di un minimo tra Baleari e coste spagnole in via di enucleazione e in rapido movimento verso levante che attiva fronti perturbati che investono in rapida successione la penisola italiana.

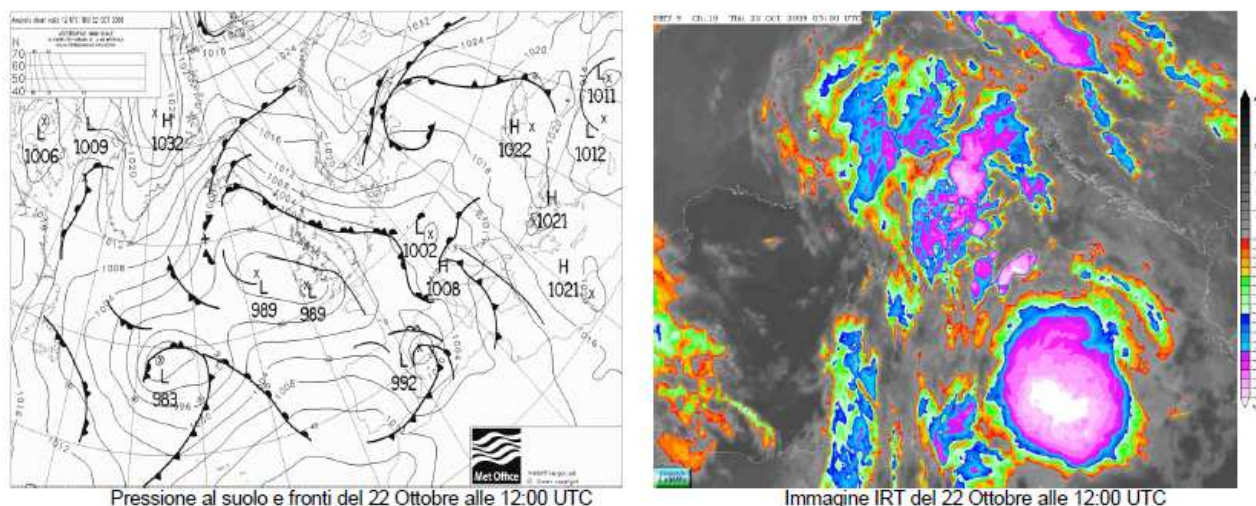


Figura 67 - Carta della pressione al suolo e immagine da satellite del 22/10/09 (fonte: consorzio LaMMa – Laboratorio di monitoraggio e modellistica ambientale per lo sviluppo sostenibile).

L'origine delle masse d'aria e la loro evoluzione sono in grado di spiegare il maggiore o minor numero di aerosol che raggiunge il punto di campionamento. Mentre la precipitazione è in atto non si verificano variazioni del tipo di massa d'aria presente sulla penisola italiana. Alla luce di questo le concentrazioni numeriche di particolato osservate sono da ricondurre a sorgenti locali, quali il traffico e il riscaldamento domestico. Nell'interpretazione dei risultati delle successive analisi si terrà conto di questo aspetto.

4.6.3.2 Eventi di pioggia

Nei giorni 12-13/11/08 e 21-22/10/09 si sono verificati cinque principali eventi piovosi, con precipitazione totale almeno pari a 2 mm, le cui caratteristiche sono riassunte in tabella.

Tabella 23 – Caratteristiche di ciascun evento piovoso (data, ora di inizio e fine, durata, precipitazione totale, precipitazione massima e intensità).

Data	Evento	Ora inizio	Ora fine	Δt (ora)	P_{tot} (mm)	R_{max} (mm/h)	Intensità
12/11/08	I	2	10	9	11,2	2,2	Moderata
12/11/08	II	16	18	3	2,2	1,2	Debole
12-13/11/08	III	22 del 12	22 del 13	25	25,6	6,2	Forte
21-22/10/09	IV	16 del 21	5 del 22	13	49,2	9,6	Forte
22/10/09	V	7	11	5	2,4	1,0	Debole

Gli eventi studiati hanno avuto una durata variabile compresa tra 3 e 25 ore. La massima intensità di pioggia registrata è stata di 9,6 mm/ora il 22 ottobre 2009. Gli eventi hanno ospitato precipitazioni che possono essere classificate come deboli, moderate e forti in accordo con la classificazione proposta nel paragrafo 4.6.1. Nei grafici seguenti è riportato il confronto fra l'altezza oraria di precipitazione registrata e l'andamento delle concentrazioni numeriche di particolato per ciascun evento.

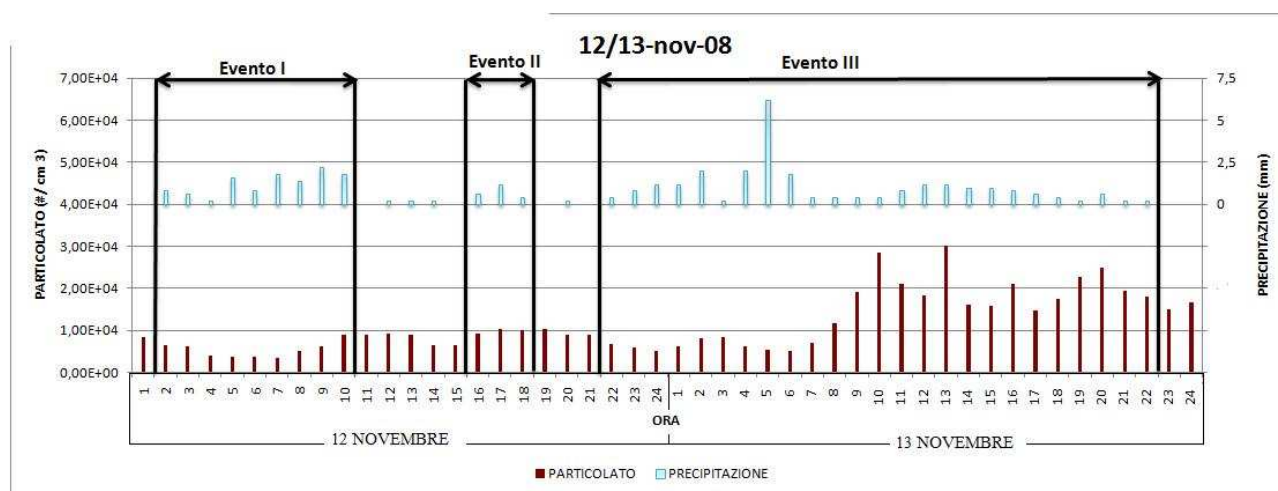


Figura 68 – Precipitazione registrata e andamento delle concentrazioni numeriche di particolato nei giorni 12 e 13 novembre 2008.

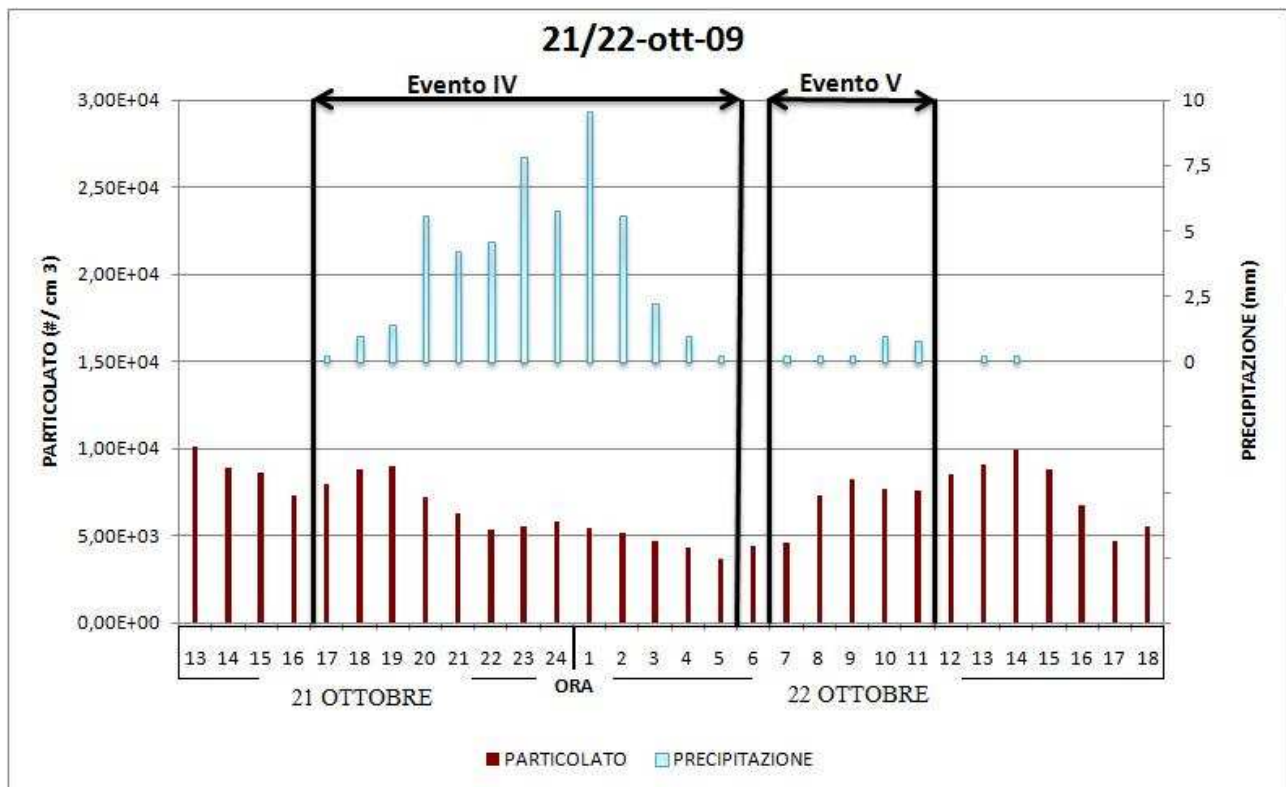


Figura 69 - Precipitazione registrata e andamento delle concentrazioni numeriche di particolato nei giorni 21 e 22 ottobre 2009.

Per ogni evento è stata analizzata l'evoluzione della concentrazione numerica totale di particolato, del diametro medio geometrico e della deviazione geometrica in riferimento a tre momenti: prima, durante e dopo l'evento piovoso. Durante l'evento si è inoltre distinto fra l'ora di massima precipitazione e i dati riferiti alle altre ore dell'evento esclusa l'ora di precipitazione massima. Viene poi riportato un grafico che mostra l'evoluzione oraria del profilo di variazione percentuale delle concentrazioni numeriche di particolato rispetto alla concentrazione di inizio evento per le diverse classi granulometriche. Dal grafico sono state escluse le ultime due classi granulometriche fornite dallo strumento in quanto le concentrazioni numeriche misurate sono molto basse e quindi le loro variazioni non sono state ritenute significative. Nell'interpretazione delle variazioni di concentrazioni osservate non sarà tenuto conto della variazione della quota dello strato di rimescolamento in quanto dallo studio della correlazione tra le concentrazioni numeriche di particolato e i parametri meteorologici, riportata nel paragrafo 4.5, la correlazione con la radiazione e la temperatura non è risultata significativa.

Tabella 24 – Principali caratteristiche della precipitazione e della distribuzione granulometrica del particolato registrate durante l’evento 1, ora di inizio 2, ora di fine 10, ora di massima precipitazione 9.

EVENTO 1		Precipitazione	Distribuzione granulometrica		
		Intensità (mm/ora)	N (#/cm ³)	Dg (µm)	σg
Prima		0	8400	0,05	2,7
Durante	Ora max	2,2	6280	0,05	2,8
	Altre ore	1,1 ± 0,6	5140 ± 512	0,07 ± 0,01	3,0 ± 0,1
Dopo		0	8940	0,05	2,7

Durante l’evento 1, che inizia alle due e termina alle dieci, si registra una diminuzione della concentrazione numerica totale di particolato rispetto all’ora precedente l’inizio dell’evento (come mostrato nella Tabella 24 e in Figura 68). Durante l’ora di massima intensità dell’evento le concentrazioni numeriche di particolato non sono le minime in assoluto, ma bisogna tener presente che essa si verifica in concomitanza con il picco di traffico del mattino (ore 9). Si ha quindi un apporto aggiuntivo di particolato che contrasta la diminuzione delle concentrazioni di particolato che si ha per effetto della precipitazione. Per quanto riguarda il diametro medio geometrico, esso rimane pressoché invariato con un lieve aumento durante le ore di precipitazione che escludono l’ora di intensità massima (Figura 70). Considerando che l’evento si verifica per la maggior parte durante le ore notturne questo potrebbe essere dovuto a un minor apporto di particolato di granulometrie inferiori dovute al traffico.

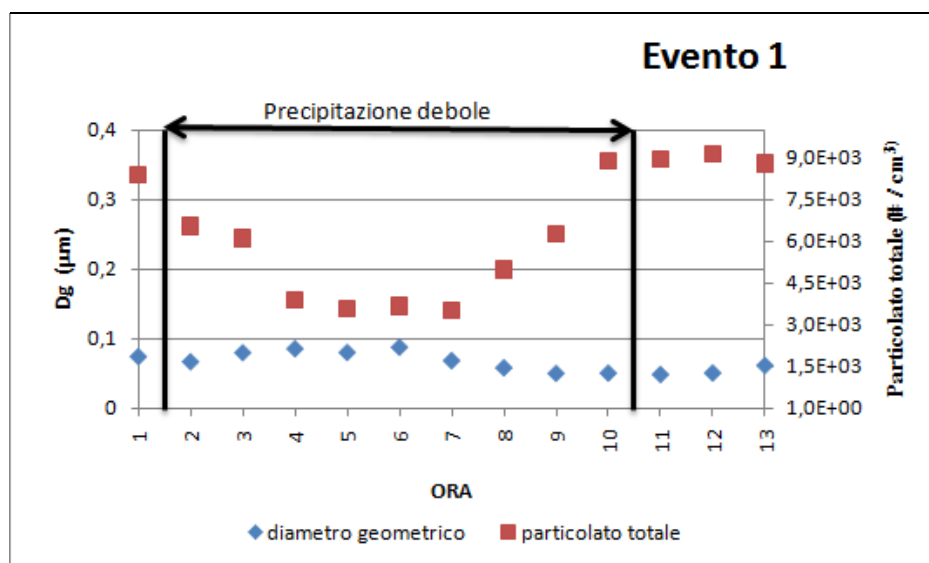


Figura 70 – Andamento temporale della concentrazione numerica totale di particolato e del diametro medio geometrico per l’evento 1, ore 9 ora di massima intensità di precipitazione.

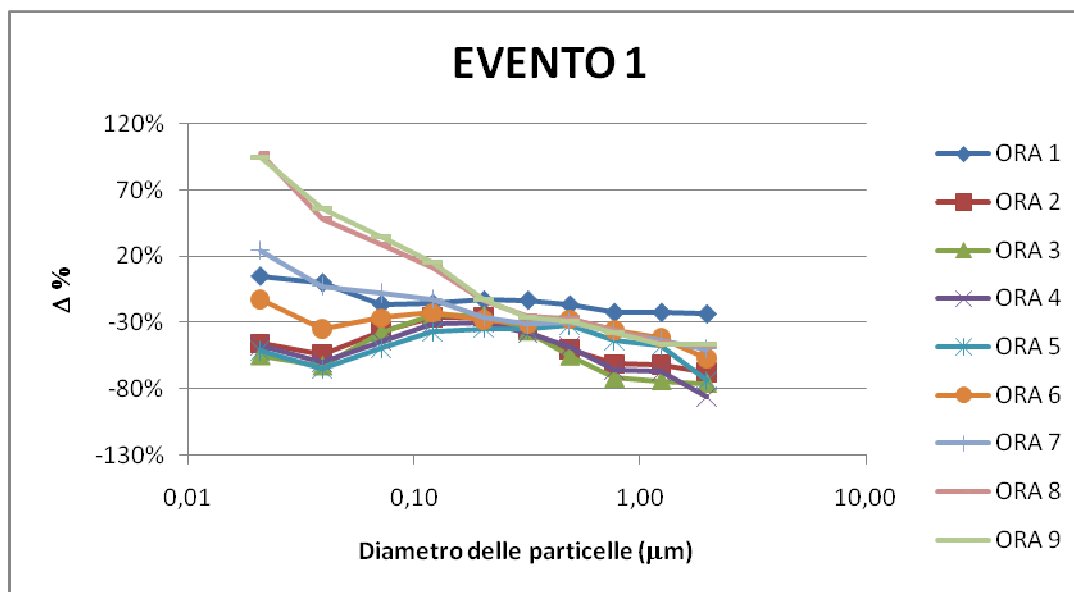


Figura 71 – Evoluzione temporale del profilo di variazione % delle concentrazioni di particolato rispetto alla concentrazione di inizio precipitazione per la durata dell’evento 1, inizio evento ore 2 fine ore 10, intensità moderata.

L’analisi dell’evoluzione temporale della distribuzione granulometrica evidenzia un aumento dell’abbattimento delle concentrazioni numeriche progressivo dalla prima ora di inizio evento fino alla quinta ora. Dalla sesta ora in poi, invece, si assiste a un’inversione di tendenza e il profilo di concentrazione inizia a salire, con un raddoppio delle concentrazioni numeriche rispetto all’ora di inizio evento. Questo comportamento può essere spiegato alla luce del regime emissivo: infatti, la sesta ora dell’evento corrisponde alle ore 6-7 del mattino, momento in cui si registra un aumento delle sorgenti emmissive dovuto al traffico, e le ultime ore dell’evento corrispondono alle ore di punta del traffico (8-9).

Tabella 25 - Principali caratteristiche della precipitazione e della distribuzione granulometrica del particolato registrate durante l’evento 2, ora di inizio 16, ora di fine 18, ora di massima precipitazione 17.

EVENTO 2	Precipitazione		Distribuzione granulometrica		
		Intensità (mm/ora)	N (#/cm ³)	Dg (μm)	σg
Prima		0	6560	0,05	2,8
Durante	Ora max	1,2	10300	0,06	2,7
	Altre ore	0,5 ± 0,1	9850 ± 598	0,05 ± 0,003	2,7 ± 0,1
Dopo		0	10200	0,06	2,7

Durante l'evento 2 che avviene dalle 16 alle 18 del pomeriggio, si verifica lo stesso comportamento evidenziato nelle ore finali dell'evento 1. L'aumento delle concentrazioni numeriche durante questo evento, tra l'altro di debole precipitazione con un effetto limitato alle sole granulometrie maggiori ed irrisorio sulla diminuzione delle concentrazioni numeriche complessive, appare determinato dall'aumento degli apporti della sorgente traffico, soprattutto per le granulometrie più fini.

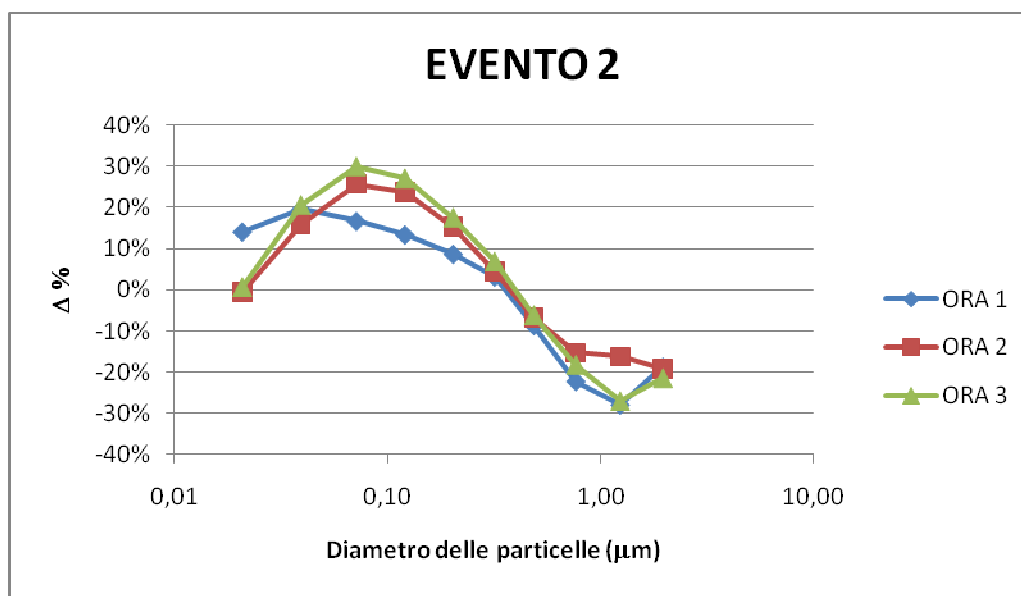


Figura 72 - Evoluzione temporale del profilo di variazione % delle concentrazioni di particolato rispetto alla concentrazione di inizio precipitazione per la durata dell'evento 2.

Tabella 26 - Principali caratteristiche della precipitazione e della distribuzione granulometrica del particolato registrate durante l'evento 3, ora di inizio 22 del 12/11, ora di fine 22 del 13/11, massima intensità ore 5.

EVENTO 3	Precipitazione		Distribuzione granulometrica		
		Intensità (mm/ora)	N (#/cm ³)	Dg (μm)	σg
Prima		0	8970	0,06	2,8
Durante	Ora max	6,2	5240	0,04	2,4
	A tre ore	0,8 ± 0,6	14900 ± 7720	0,05 ± 0,009	2,5 ± 0,2
Dopo		0	14900	0,06	2,6

Durante l'evento 3 che inizia alle ore 22 del 12 novembre e termina alle ore 22 del 13 novembre si registra una diminuzione della concentrazione numerica totale di particolato durante l'ora di massima intensità di precipitazione che corrisponde alle ore 5 del mattino. Per quanto riguarda l'aumento delle concentrazioni di particolato che si verifica durante le altre ore, bisogna tener presente l'elevata durata dell'evento in questione. Infatti durante l'arco delle 25 ore le concentrazioni medie sono sensibilmente influenzate dall'evoluzione del regime emissivo e dai picchi delle concentrazioni numeriche registrate durante le ore di punta mattutine e serali del traffico. Il diametro medio geometrico diminuisce durante l'evento, in quanto le concentrazioni numeriche delle particelle con diametro maggiore di $0,5 \mu\text{m}$ subiscono un decremento maggiore, come evidenziato nel grafico seguente.

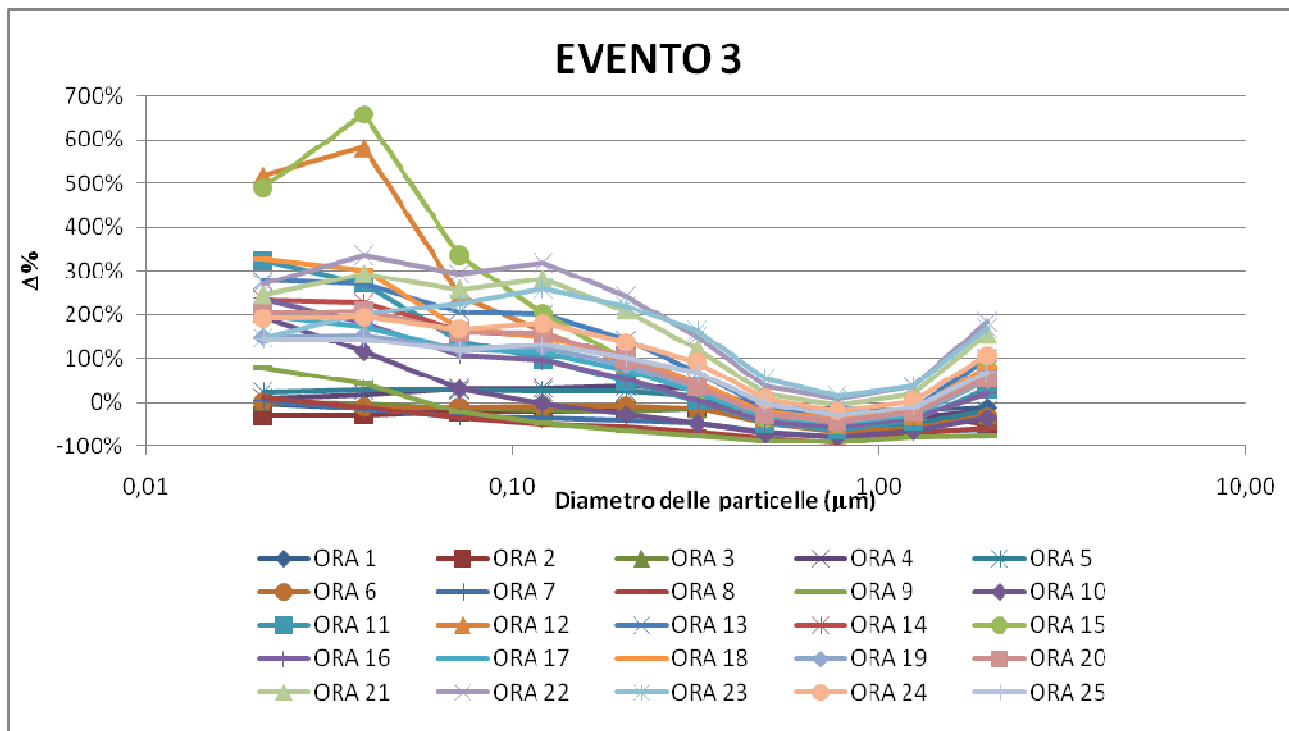


Figura 73 - Evoluzione temporale del profilo di variazione % delle concentrazioni di particolato rispetto alla concentrazione di inizio precipitazione per la durata dell'evento 3.

Gli andamenti dei profili di variazione possono essere suddivisi in quattro momenti: durante le ore notturne si assiste a una diminuzione delle concentrazioni rispetto all'ora di inizio evento (ore 22), dalla nona ora (ore 6 del mattino) il profilo inizia a salire fino a raggiungere il picco alla dodicesima ora (ore 9, punta di traffico del mattino). La decima e l'undicesima ora il profilo inizia a scendere

per poi iniziare nuovamente a salire in corrispondenza del traffico serale dalla diciottesima ora. La quindicesima ora ha un profilo “anomalo”, infatti viene registrato un picco di aumento delle concentrazioni numeriche non accompagnato da un picco di traffico. Questo comportamento anomalo viene registrato anche in altri giorni del periodo di studio e può essere attribuito a un apporto di particolato aggiuntivo dovuto al mezzo adibito alla raccolta dei rifiuti che staziona nei pressi dello strumento di misura del sito Pascal a quell’ora.

Tabella 27 - Principali caratteristiche della precipitazione e della distribuzione granulometrica del particolato registrate durante l’evento 4, ora di inizio 16 del 21/10, ora di fine 5 del 22/10, massima precipitazione ora 1.

EVENTO 4		Precipitazione	Distribuzione granulometrica		
		Intensità (mm/ora)	N (#/cm ³)	Dg (µm)	σg
Prima		0	7350	0,1	2,5
Durante	Ora max	9,6	5440	0,1	2,2
	Atre ore	3,3 ± 2,6	6140 ± 1750	0,1 ± 0,02	2,5 ± 0,3
Dopo		0	4370	0,1	2,5

L’evento 4 è l’evento caratterizzato da una maggiore intensità di precipitazione rispetto agli altri eventi. Si registra una diminuzione delle concentrazioni numeriche di particolato sia durante l’ora di massima intensità dell’evento che durante le altre ore (nonostante durante l’evento sia compreso il picco di traffico serale). Il diametro medio geometrico rimane invariato, infatti la diminuzione delle concentrazioni è pressoché costante per tutte le granulometrie come evidenziato dal grafico seguente. I dati relativi al primo stadio dell’ELPI sono stati eliminati in quanto non ritenuti affidabili dato che lo strumento di misura ha registrato correnti negative.

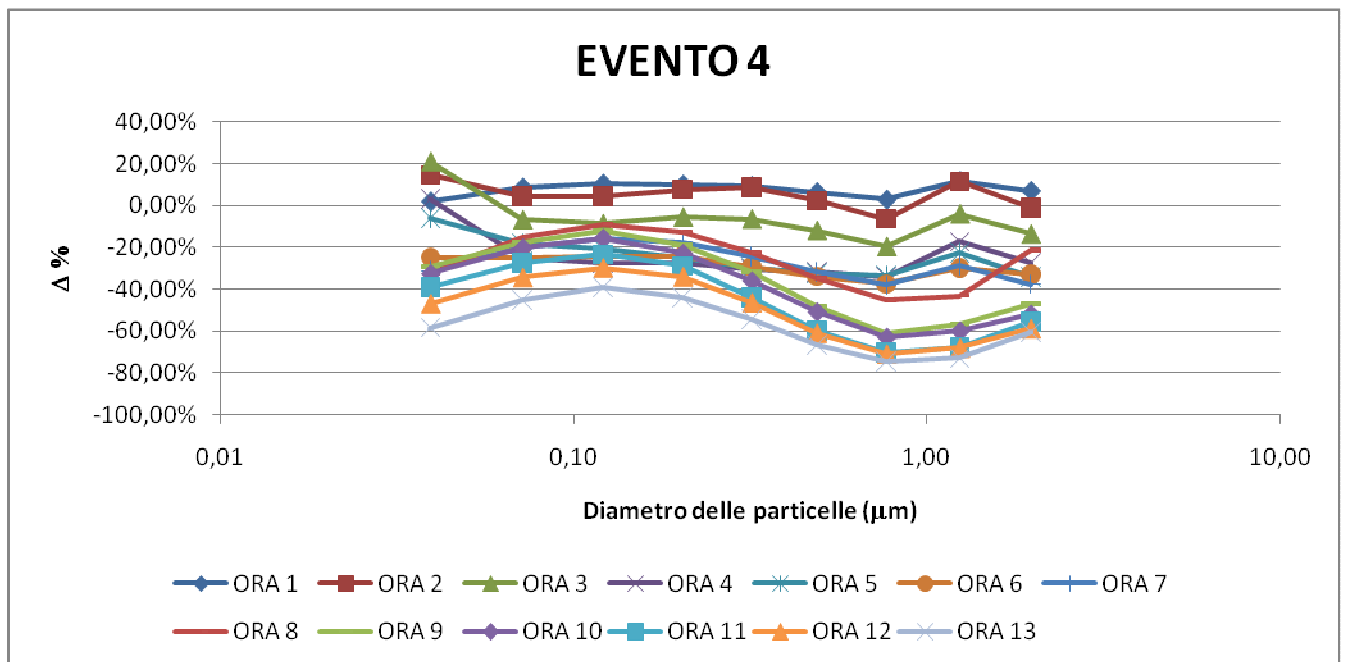


Figura 74 - Evoluzione temporale del profilo di variazione % delle concentrazioni di particolato rispetto alla concentrazione di inizio precipitazione per la durata dell'evento 4.

Il profilo della distribuzione granulometrica delle prime tre ore dell'evento risente inizialmente dell'effetto sorgente (picco di traffico serale); dalla quarta ora si assiste a una progressiva diminuzione delle concentrazioni (e quindi a una discesa del profilo di variazione percentuale) per l'effetto combinato della maggiore intensità della pioggia e delle minori emissioni del traffico che porta ai valori minimi del profilo di concentrazione (cioè al massimo abbattimento delle concentrazioni numeriche di particolato) in corrispondenza delle ultime ore dell'evento che si verificano durante il periodo notturno.

Tabella 28 - Principali caratteristiche della precipitazione e della distribuzione granulometrica del particolato registrate durante l'evento 5, ora di inizio 7, ora fine 11, massima intensità di precipitazione ore 10.

EVENTO 5		Precipitazione	Distribuzione granulometrica		
		Intensità (mm/ora)	N (#/cm ³)	Dg (μm)	σg
Prima		0	4370	0,1	2,5
Durante	Ora max	1,0	7720	0,08	2,5
	Atre ore	0,4 ± 0,3	6970 ± 1600	0,08 ± 0,006	2,5 ± 0,3
Dopo		0	8550	0,07	2,6

L'evento 5 intercorre nel periodo a cavallo del picco di traffico mattutino, dalle ore 7 alle ore 11. L'aumento delle concentrazioni numeriche di particolato osservato sia nell'ora di massima precipitazione che nelle altre ore di precipitazione è quindi da ricondurre a un aumento dell'apporto emissivo e a uno scarso effetto di abbattimento delle concentrazioni numeriche dovuto alla debole intensità dell'evento di precipitazione. Il diametro medio geometrico diminuisce lievemente durante l'evento in quanto le concentrazioni di particolato delle classi di granulometria inferiore aumentano in misura più rilevante rispetto alle concentrazioni delle classi di granulometria superiore, come evidenziato nel grafico seguente.

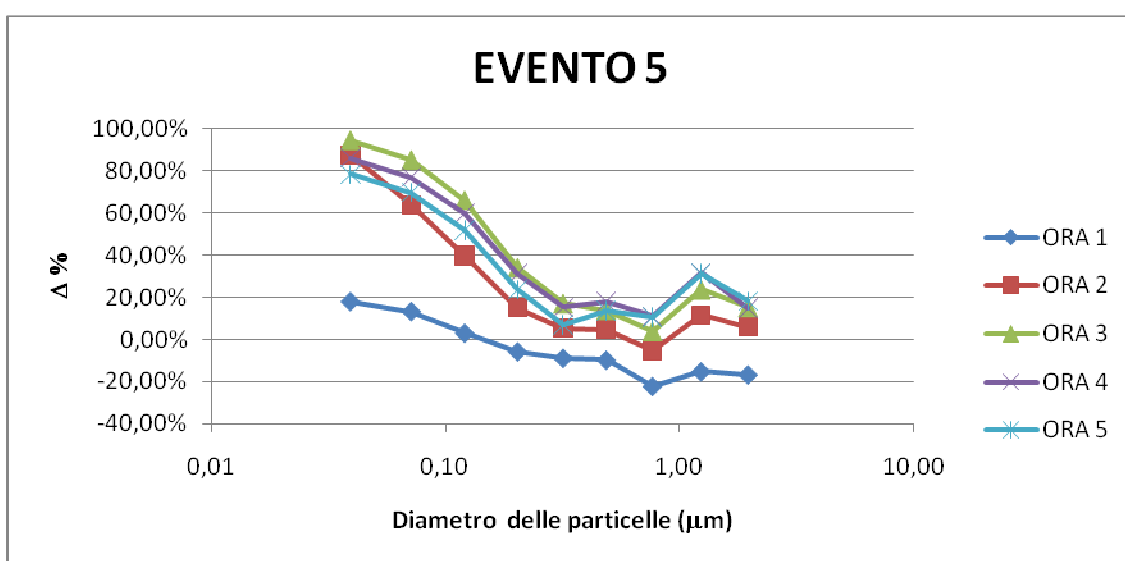


Figura 75 - Evoluzione temporale del profilo di variazione % delle concentrazioni di particolato rispetto alla concentrazione di inizio precipitazione per la durata dell'evento 5.

Il profilo di variazione delle concentrazioni tende a salire all'aumento dell'apporto emissivo dovuto al traffico, fino a raggiungere il massimo alla terza ora in corrispondenza del picco del traffico (ore 9). In seguito i profili iniziano a scendere. L'intensità della pioggia che caratterizza l'evento è debole e praticamente l'effetto della precipitazione risulta ininfluente eccetto che per la prima ora.

A partire dai dati dei cinque eventi piovosi registrati nel periodo di studio si è cercato un modello per il calcolo della variazione oraria della concentrazione numerica per le classi nano particolato (particelle di diametro < 50 nm), ultrafine (particelle di diametro < 100 nm), PM1 (particelle di

diametro < 1 µm) e PM2,5 (particelle di diametro < 2,5 µm). Le variabili indipendenti di cui si è tenuto conto sono:

- Numero ore precedenti di precipitazione (nopp);
- Intensità di precipitazione dell'ora precedente ($I_{prec,1h}$);
- Concentrazione numerica di particolato dell'ora precedente (C_{1h}).

I modelli di regressione multipla ottenuti sono indicati nella tabella seguente:

Tabella 29 – Modelli di regressione multipla per il calcolo della variazione oraria di concentrazione numerica durante un evento piovoso per le classi nano particolato, ultrafine, PM1 e PM2,5 e relativi coefficienti di determinazione.

	R ²
$\Delta_{nanoparticolato} = 0,014 \text{ nopp} - 0,035 I_{prec,1h} [\text{mm/h}] - 3,38 \cdot 10^{-5} C_{1h} [\#/cm^3] + 0,14$	0,14
$\Delta_{ultrafine} = 0,017 \text{ nopp} - 0,0042 I_{prec,1h} [\text{mm/h}] - 2,54 \cdot 10^{-5} C_{1h} [\#/cm^3] + 0,16$	0,14
$\Delta_{PM1} = 0,0019 \text{ nopp} - 0,018 I_{prec,1h} [\text{mm/h}] - 2,45 \cdot 10^{-5} C_{1h} [\#/cm^3] + 0,19$	0,15
$\Delta_{PM2,5} = 0,016 \text{ nopp} - 0,046 I_{prec,1h} [\text{mm/h}] - 2,56 \cdot 10^{-5} C_{1h} [\#/cm^3] + 0,28$	0,18

I coefficienti di determinazione dei modelli, che consentono di valutare la proporzione di variabilità della variabile dipendente spiegata dalle variabili esplicative considerate, presentano dei valori molto bassi. Ci sono delle variabili non considerate che risultano importanti. Dalle analisi e dai grafici precedenti è stato evidenziato come la sorgente emissiva di particolato dovuta al traffico giochi un ruolo chiave per l'interpretazione degli andamenti delle variazioni di concentrazione. Non avendo a disposizione dei dati di traffico specifici per i giorni e il sito in esame, si è provato a introdurre nel modello un dato di traffico rappresentativo dell'area di Milano. Sono stati utilizzati i flussi orari (veicoli/h) riferiti al traffico medio feriale dell'anno 2005 riportati nel Rapporto sulla mobilità urbana 2003-2005 redatto dall'Agenzia Mobilità e Ambiente. In Tabella 30 i modelli di regressione così ottenuti. Essi presentano un coefficiente di determinazione circa doppio rispetto ai precedenti anche se ancora relativamente basso. Ragionevolmente, l'utilizzo di dati del traffico riferiti ai giorni e all'area circostante il sito di misura potrebbe consentire una migliore capacità descrittiva dell'evoluzione oraria dei livelli di concentrazione durante gli eventi piovosi. Un'ulteriore variabile che potrebbe migliorare la prestazioni del modello regressivo è la dimensione delle gocce di precipitazione, di cui però non si hanno informazioni riferite alla campagna di misura oggetto di studio.

Tabella 30 - Modelli di regressione multipla che tengono conto della sorgente di emissione dovuta al traffico per il calcolo della variazione oraria di concentrazione numerica durante un evento piovoso per le classi nano particolato, ultrafine, PM1 e PM2,5 e relativi coefficienti di determinazione.

	R ²
Δ nanoparticolato = 0,011 nopp - 0,054 Iprec 1h - 5,22 10 ⁻⁵ C1h + 0,00086 traffico [veicoli/h] + 0,0069	0,28
Δ ultrafine = 0,015 nopp - 0,0022 Iprec 1h - 3,92 10 ⁻⁵ C1h + 0,00087 traffico [veicoli/h] + 0,027	0,34
Δ PM1 = 0,0017 nopp - 0,0035 Iprec 1h - 3,7 10 ⁻⁵ C1h + 0,00084 traffico [veicoli/h] + 0,076	0,37
Δ PM2,5 = 0,017 nopp - 0,0035 Iprec 1h - 3,56 10 ⁻⁵ C1h + 0,00074 traffico [veicoli/h] + 0,11	0,29

Le considerazioni finora svolte hanno messo in luce che l'analisi delle variazioni delle concentrazioni numeriche di particolato nei giorni di pioggia non può prescindere dal tener in considerazione l'evoluzione del regime emissivo. Per tener conto di questo aspetto vengono di seguito proposti dei confronti tra:

- la variazione percentuale della distribuzione granulometrica dell'ora di fine e inizio evento con lo stesso intervallo temporale di giorni secchi;
- la distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità dell'evento e la distribuzione granulometrica della stessa ora nel giorno tipo secco;
- la variazione percentuale della distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità e dell'ultima ora secca dell'evento e le stesse ore del giorno tipo secco.

Dal confronto fra il giorno secco e il giorno piovoso è possibile capire se gli aumenti di concentrazione numerica del particolato che si verificano in un giorno piovoso a causa del regime emissivo sono minori rispetto a quelli che si verificano in un giorno secco.

Nelle tabelle seguenti viene quindi presentato il confronto fra la variazione percentuale della distribuzione granulometrica dell'ora di fine e inizio evento con lo stesso intervallo temporale di giorni secchi, per i cinque eventi analizzati. In rosso vengono evidenziate le variazioni percentuali della distribuzione granulometrica tra inizio e fine evento dei giorni piovosi che risultano minori delle corrispondenti variazioni dei giorni secchi.

Tabella 31 - Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica fra l'ora di inizio e fine dell'evento e le stesse ore di giorni secchi per l'evento 1.

EVENTO 1: Inizio ore 2 fine ore 10 – Durata: 9 ore – Intensità: moderata		
	Giorno secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (μm)	$(C_{\text{fine},S} - C_{i,s})/C_{i,s}$	$(C_{\text{fine}} - C_i)/C_i$
0,007 - 0,028	0,23	1,08
0,0028 – 0,055	-	0,54
0,055 – 0,093	-0,22	0,31
0,093 – 0,157	-0,27	0,14
0,157 – 0,264	-0,34	-0,13
0,264 – 0,385	-0,32	-0,28
0,385 – 0,618	-0,20	-0,33
0,618 – 0,955	-0,01	-0,42
0,955 – 1,61	0,09	-0,49
1,61 – 2,41	-0,03	-0,43
2,41 – 4,02	-0,28	-0,26
4,02 – 9,98	0,09	-0,05

Tabella 32 - Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica fra l'ora di inizio e fine dell'evento e le stesse ore di giorni secchi per l'evento 2.

EVENTO 2: Inizio ore 16 fine ore 18 – Durata: 3 ore – Intensità: debole		
	Giorno secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (μm)	$(C_{\text{fine},S} - C_{i,s})/C_{i,s}$	$(C_{\text{fine}} - C_i)/C_i$
0,007 - 0,028	0,09	-0,16
0,0028 – 0,055	0,17	0,03
0,055 – 0,093	0,20	0,11
0,093 – 0,157	0,18	0,12
0,157 – 0,264	0,14	0,05
0,264 – 0,385	0,12	-0,03
0,385 – 0,618	0,14	-0,09
0,618 – 0,955	0,18	-0,17
0,955 – 1,61	0,23	-0,34
1,61 – 2,41	0,48	-0,27
2,41 – 4,02	7,88	10,41
4,02 – 9,98	-0,14	-0,33

Tabella 33 - Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica fra l'ora di inizio e fine dell'evento e le stesse ore di giorni secchi per l'evento 4.

EVENTO 4: Inizio ore 16 fine ore 5 – Durata: 13 ore – Intensità: forte		
	Giorno secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (µm)	(C_{fine,S} - C_{i,s})/C_{i,s}	(C_{fine} - C_i)/C_i
0,007 - 0,028	-0,69	-
0,0028 - 0,055	-0,37	-0,25
0,055 - 0,093	0,09	-0,34
0,093 - 0,157	0,46	-0,35
0,157 - 0,264	0,61	-0,46
0,264 - 0,385	0,57	-0,58
0,385 - 0,618	0,41	-0,72
0,618 - 0,955	0,37	-0,75
0,955 - 1,61	0,56	-0,75
1,61 - 2,41	0,46	-0,60
2,41 - 4,02	0,44	-0,67
4,02 - 9,98	0,12	-0,59

Tabella 34 - Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica fra l'ora di inizio e fine dell'evento e le stesse ore di giorni secchi per l'evento 5.

EVENTO 5: Inizio ore 7 fine ore 11 – Durata: 5 ore – Intensità: debole		
	Giorno secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (µm)	(C_{fine,S} - C_{i,s})/C_{i,s}	(C_{fine} - C_i)/C_i
0,007 - 0,028	1,02	-
0,0028 - 0,055	0,47	1,03
0,055 - 0,093	0,25	0,88
0,093 - 0,157	0,19	0,62
0,157 - 0,264	0,15	0,30
0,264 - 0,385	0,24	0,16
0,385 - 0,618	0,30	0,33
0,618 - 0,955	0,43	0,39
0,955 - 1,61	0,49	0,59
1,61 - 2,41	0,53	0,41
2,41 - 4,02	1,20	0,37
4,02 - 9,98	0,24	0,78

Per l'evento 3 non è stato possibile eseguire lo studio per il confronto della distribuzione granulometrica tra inizio e fine evento per mancanza di sufficienti dati di confronto.

Escludendo l'evento cinque, si osserva in generale una riduzione delle concentrazioni numeriche di particolato da fine a inizio evento per le granulometrie maggiori (nel range 0,385-10 μm). Confrontando i giorni secchi e il giorno piovoso si evidenzia un duplice comportamento: per gli eventi che accadono a cavallo del periodo di punta di traffico del mattino (evento 1 e 5) le variazioni di concentrazione del particolato risultano minori rispetto a quelle che si avrebbero in un giorno secco soltanto per le granulometrie maggiori; per gli eventi invece che si verificano a cavallo del periodo di punta di traffico serale (evento 2 e 4) l'effetto di abbattimento si osserva uniformemente per tutte le classi granulometriche, anche se in misura più marcata per le classi granulometriche maggiori. Nel caso dell'evento quattro, unico evento caratterizzato da precipitazione forte, l'abbattimento risulta più consistente rispetto agli altri eventi osservati caratterizzati da precipitazione debole.

Si riportano di seguito i grafici relativi al confronto fra la distribuzione granulometrica della concentrazioni numeriche di particolato dell'ora di massima precipitazione e la distribuzione granulometrica della stessa ora del giorno tipo secco del mese di appartenenza dell'evento.

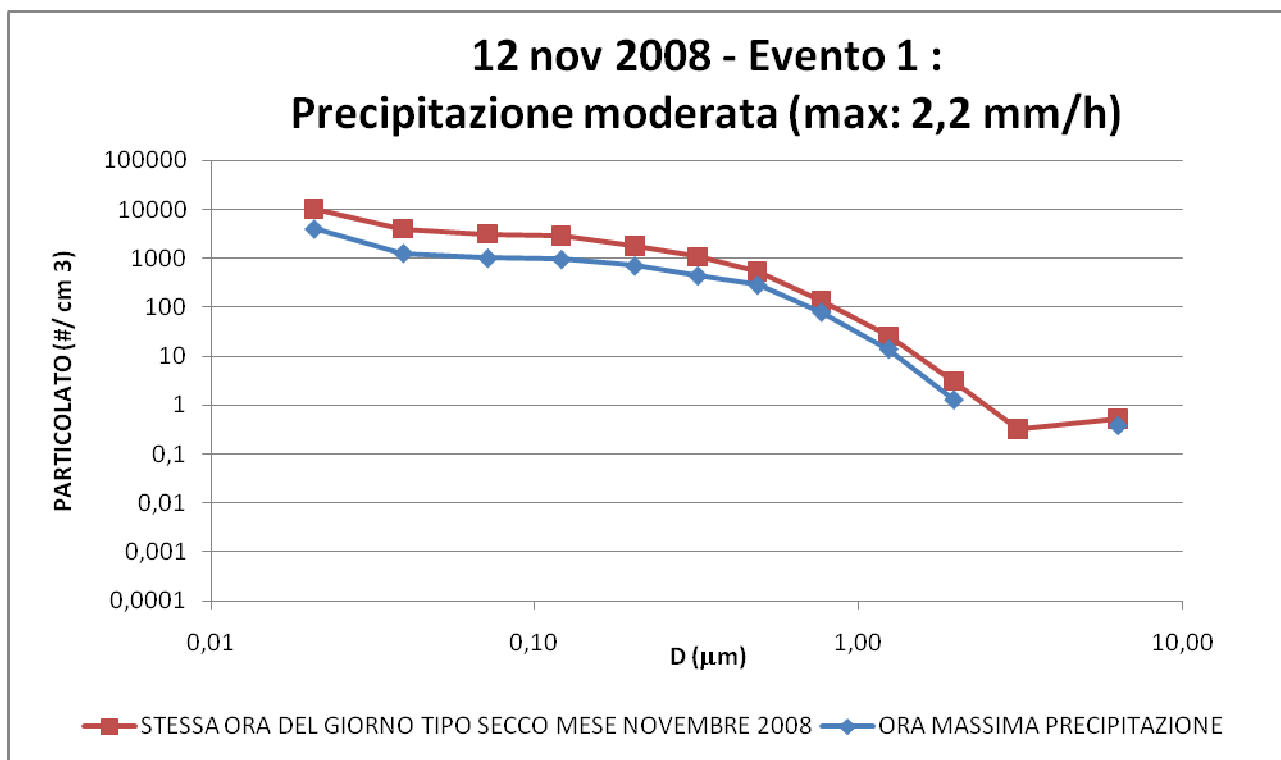


Figura 76 – Confronto fra la distribuzione granulometrica dell'ora di massima precipitazione (dalle ore 8 alle 9) e la distribuzione granulometrica della stessa ora nel giorno tipo secco. Durata della pioggia prima di raggiungere l'intensità massima: 7 ore.

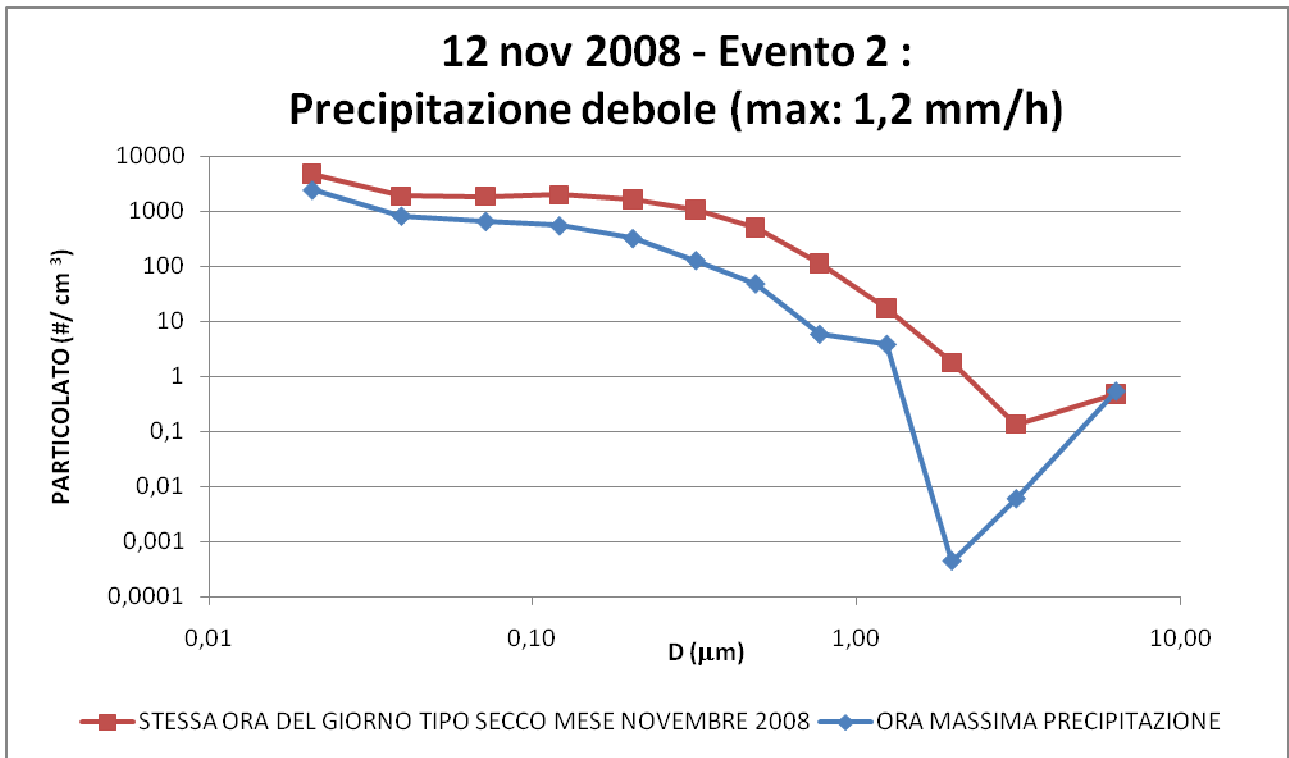


Figura 77 - Confronto fra la distribuzione granulometrica dell'ora di massima precipitazione (dalle ore 16 alle 17) e la distribuzione granulometrica della stessa ora nel giorno tipo secco. Durata della pioggia prima di raggiungere l'intensità massima: 1 ora.

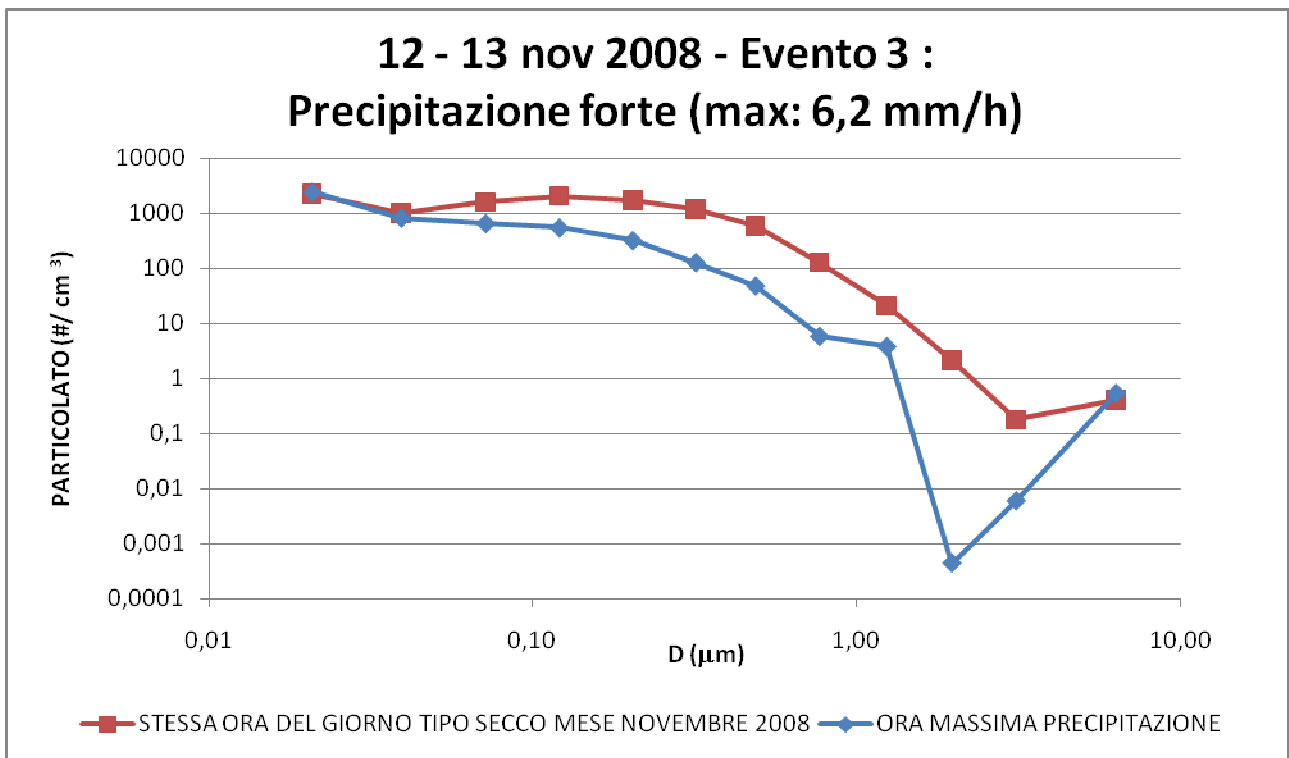


Figura 78 - Confronto fra la distribuzione granulometrica dell'ora di massima precipitazione (dalle ore 4 alle 5) e la distribuzione granulometrica della stessa ora nel giorno tipo secco. Durata della pioggia prima di raggiungere l'intensità massima: 7 ore.

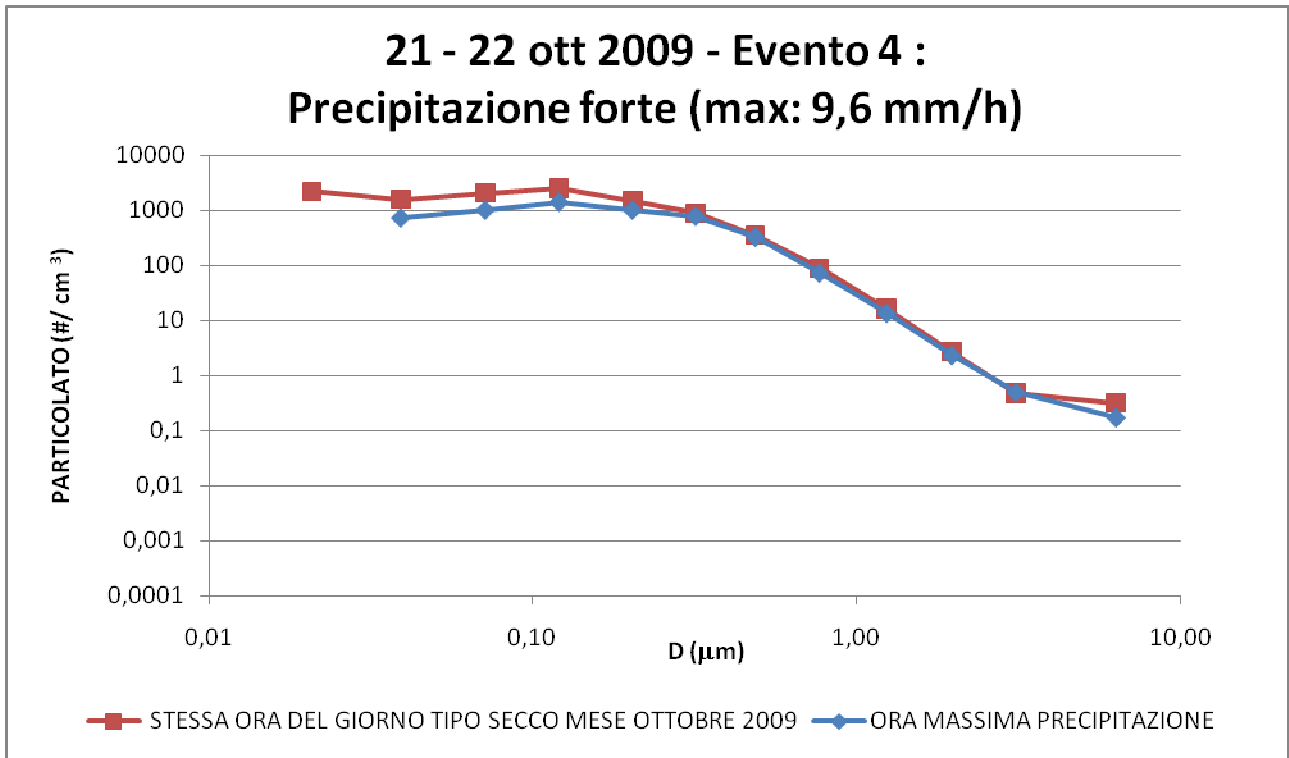


Figura 79 - Confronto fra la distribuzione granulometrica dell'ora di massima precipitazione (dalle ore 0 all' 1) e la distribuzione granulometrica della stessa ora nel giorno tipo secco. Durata della pioggia prima di raggiungere l'intensità massima: 8 ore.

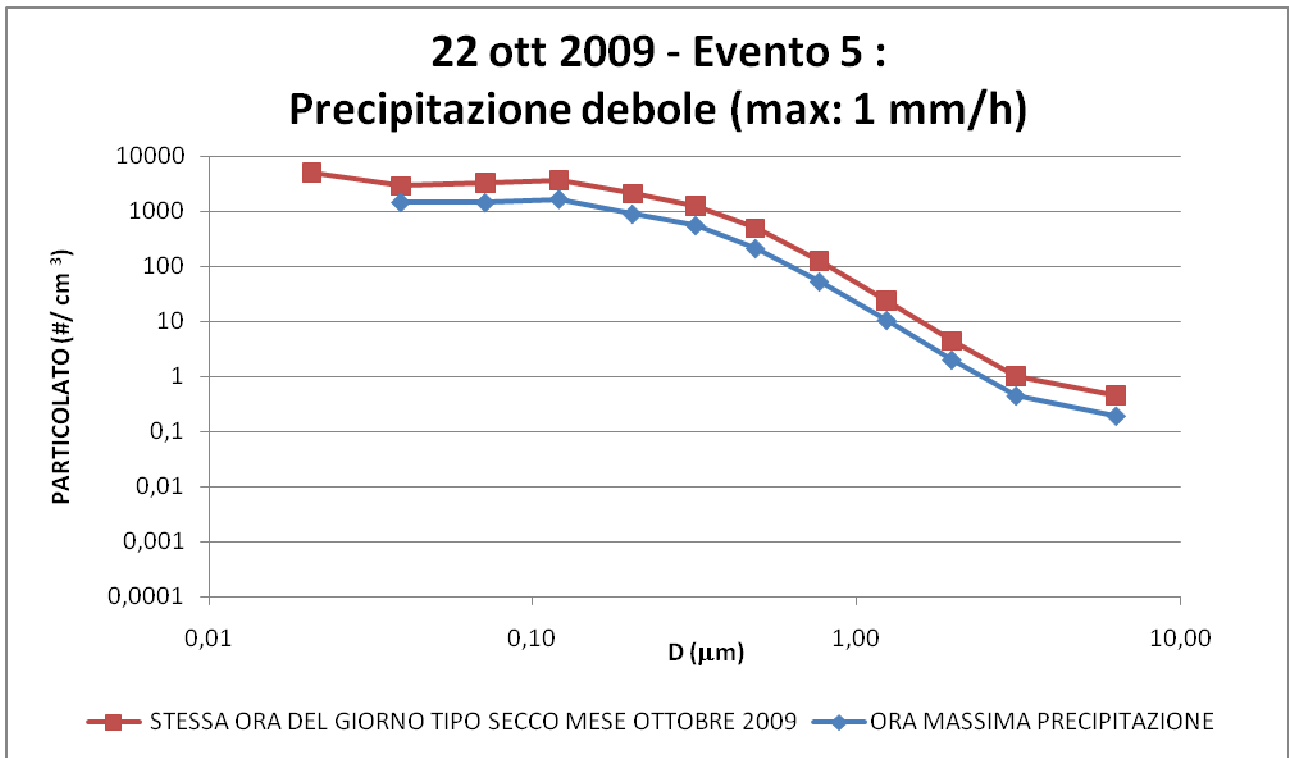


Figura 80 - Confronto fra la distribuzione granulometrica dell'ora di massima precipitazione (dalle ore 9 alle 10) e la distribuzione granulometrica della stessa ora nel giorno tipo secco. Durata della pioggia prima di raggiungere l'intensità massima: 3 ore.

Le concentrazioni numeriche di particolato risultano inferiori nell'ora di massima intensità rispetto alla stessa ora del giorno tipo secco per quasi tutti gli eventi a esclusione dell'evento quattro, in cui la riduzione viene osservata solamente alle granulometrie inferiori. La riduzione per gli altri eventi si registra invece per tutte le granulometrie. Nell'evento 2 e 3 si registra una riduzione più marcata delle granulometrie maggiori, anche se bisogna sottolineare che le concentrazioni numeriche in gioco sono basse (inferiori all'unità) quindi le riduzioni che si osservano sono meno significative che alle granulometrie inferiori. Le riduzioni sono minori nei casi in cui l'ora della precipitazione massima coincida con l'ora di punta del traffico mattutino (eventi 1 e 5), mentre sono più consistenti se l'ora di massima intensità è notturna (evento 3) o pomeridiana (evento 2).

Infine l'ultimo confronto riguarda la variazione della distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità e l'ultima ora secca dell'evento e le stesse ore del giorno tipo secco. Di seguito i risultati ottenuti per tutti gli eventi in esame. In rosso vengono sempre evidenziate le variazioni della distribuzione granulometrica tra ora di massima intensità e ora di inizio dell'evento dei giorni piovosi che risultano minori delle corrispondenti variazioni dei giorni secchi.

Tabella 35 – Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità e l'ultima ora secca dell'evento e le stesse ore del giorno tipo secco per l'evento 1.

EVENTO 1: precipitazione max 2,2 mm/h alle 8 dopo 7 ore di pioggia		
	Giorno tipo secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (μm)	$(C_{\text{max, gts}} - C_{\text{i, gts}}) / C_{\text{i, gts}}$	$(C_{\text{max, p}} - C_{\text{i, p}}) / C_{\text{i, p}}$
0,007 - 0,028	0,94	0,97
0,0028 - 0,055	0,41	0,48
0,055 - 0,093	-0,10	0,29
0,093 - 0,157	-0,25	0,12
0,157 - 0,264	-0,34	-0,13
0,264 - 0,385	-0,31	-0,25
0,385 - 0,618	-0,19	-0,27
0,618 - 0,955	-0,03	-0,36
0,955 - 1,61	0,09	-0,45
1,61 - 2,41	-0,01	-0,48
2,41 - 4,02	-0,24	-
4,02 - 9,98	0,06	0,17

Tabella 36 - Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità e l'ultima ora secca dell'evento e le stesse ore del giorno tipo secco per l'evento 2.

EVENTO 2: precipitazione max 1,2 mm/h alle 16 dopo 1 ora di pioggia		
	Giorno tipo secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (μm)	$(C_{\text{max, gts}} - C_{\text{i, gts}})/C_{\text{i, gts}}$	$(C_{\text{max, p}} - C_{\text{i, p}})/C_{\text{i, p}}$
0,007 - 0,028	1,11	-0,01
0,0028 - 0,055	1,12	0,16
0,055 - 0,093	0,68	0,26
0,093 - 0,157	0,15	0,24
0,157 - 0,264	-0,09	0,15
0,264 - 0,385	-0,23	0,04
0,385 - 0,618	-0,23	-0,07
0,618 - 0,955	-0,28	-0,15
0,955 - 1,61	-0,24	-0,16
1,61 - 2,41	-0,16	-0,19
2,41 - 4,02	4,91	1,47
4,02 - 9,98	-0,20	0,10

Tabella 37 - Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità e l'ultima ora secca dell'evento e le stesse ore del giorno tipo secco per l'evento 3.

EVENTO 3: precipitazione max 6,2 mm/h alle 4 dopo 7 ore di pioggia		
	Giorno tipo secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (μm)	$(C_{\text{max, gts}} - C_{\text{i, gts}})/C_{\text{i, gts}}$	$(C_{\text{max, p}} - C_{\text{i, p}})/C_{\text{i, p}}$
0,007 - 0,028	-0,74	0,13
0,0028 - 0,055	-0,73	-0,12
0,055 - 0,093	-0,56	-0,37
0,093 - 0,157	-0,32	-0,49
0,157 - 0,264	-0,11	-0,57
0,264 - 0,385	0,10	-0,68
0,385 - 0,618	0,16	-0,80
0,618 - 0,955	0,11	-0,91
0,955 - 1,61	0,06	-0,69
1,61 - 2,41	-0,34	-
2,41 - 4,02	-0,52	-0,12
4,02 - 9,98	-0,05	0,07

Tabella 38 - Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità e l'ultima ora secca dell'evento e le stesse ore del giorno tipo secco per l'evento 4.

EVENTO 4: precipitazione max 9,6 mm/h alle 0 dopo 8 ore di pioggia		
	Giorno tipo secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (μm)	$(C_{\text{max, gts}} - C_{\text{i, gts}}) / C_{\text{i, gts}}$	$(C_{\text{max, p}} - C_{\text{i, p}}) / C_{\text{i, p}}$
0,007 - 0,028	-0,3	-
0,0028 - 0,055	0,09	-0,29
0,055 - 0,093	0,57	-0,18
0,093 - 0,157	0,84	-0,12
0,157 - 0,264	0,70	-0,19
0,264 - 0,385	0,43	-0,32
0,385 - 0,618	0,16	-0,48
0,618 - 0,955	0,04	-0,61
0,955 - 1,61	0,09	-0,57
1,61 - 2,41	0,26	-0,47
2,41 - 4,02	0,04	-0,64
4,02 - 9,98	0,19	-0,40

Tabella 39 - Confronto fra la variazione della distribuzione granulometrica dell'ora di massima intensità e l'ultima ora secca dell'evento e le stesse ore del giorno tipo secco per l'evento 5.

EVENTO 5: precipitazione max 1 mm/h alle 9 dopo 3 ore di pioggia		
	Giorno tipo secco	Evento piovoso
Classe granulometrica (μm)	$(C_{\text{max, gts}} - C_{\text{i, gts}}) / C_{\text{i, gts}}$	$(C_{\text{max, p}} - C_{\text{i, p}}) / C_{\text{i, p}}$
0,007 - 0,028	2,15	-
0,0028 - 0,055	1,40	0,86
0,055 - 0,093	1,11	0,77
0,093 - 0,157	0,94	0,60
0,157 - 0,264	0,70	0,31
0,264 - 0,385	0,57	0,15
0,385 - 0,618	0,47	0,18
0,618 - 0,955	0,48	0,11
0,955 - 1,61	0,60	0,32
1,61 - 2,41	0,86	0,15
2,41 - 4,02	1,20	-0,04
4,02 - 9,98	0,59	0,61

Le riduzioni di concentrazione numerica tra ora di massima intensità e ora di inizio evento risultano più consistenti per gli eventi in cui la precipitazione è più intensa (evento 3 e evento 4), con punte di riduzione che arrivano a superare la quota del 90% (per la classe 0,618 – 0,955 μm dell'evento 3).

Dal confronto fra giorno piovoso e giorno secco emergono invece situazioni variegata legate all'intensità della precipitazione e all'ora in cui sopraggiunge la pioggia di intensità maggiore dell'evento. Nell'evento 1, le concentrazioni numeriche risultano minori che nel giorno secco solamente per le classi granulometriche da 0,385 a 2,41 μm . L'intensità della precipitazione che caratterizza l'evento è debole e l'ora di massima precipitazione coincide con le otto del mattino, ora di punta del traffico. La precipitazione di debole intensità non è quindi in grado di contrastare le emissioni di particolato di granulometria inferiore dovute al traffico nell'ora di punta.

L'evento 2 caratterizzato da precipitazione molto debole (con un'intensità minore dell'evento 1) e da una breve durata, registra una differenza rilevante rispetto al giorno tipo secco, solamente per le classi di granulometria inferiore. Alle ore 16 non vi è un significativo apporto aggiuntivo di particolato di queste granulometrie causato da traffico intenso e si osserva un minor incremento delle concentrazioni numeriche rispetto a quello che si ha nel giorno tipo secco. La causa dell'effetto della precipitazione sulle granulometrie inferiori andrebbe analizzata alla luce di informazioni sulla dimensione delle gocce di pioggia.

L'evento 3 registra una differenza per quanto riguarda le granulometrie intermedie. La pioggia è intensa e di conseguenza gli abbattimenti registrati sono importanti, dell'ordine del 70%.

L'evento 4, l'evento tra quelli registrati caratterizzato dall'intensità di precipitazione più elevata, è quello con valori di abbattimento migliori per tutte le granulometrie. L'abbattimento risulta più rilevante per quanto riguarda le granulometrie maggiori. Il fatto che a una maggiore intensità della precipitazione sia legato un maggior diametro delle gocce di pioggia, potrebbe essere una spiegazione del fenomeno osservato. Da sottolineare il fatto che mentre nel giorno piovoso si assiste a una diminuzione delle concentrazioni numeriche di particolato tra ora di massima intensità e ora di inizio dell'evento (segno delle variazioni negativo), nel giorno tipo secco si verifica invece un aumento delle concentrazioni numeriche riferite alle stesse ore (segno della variazione positivo).

L'evento 5, pur essendo caratterizzato da precipitazione debole, mostra delle concentrazioni numeriche inferiori rispetto al giorno tipo secco per tutte le granulometrie. Nell'ora di massima precipitazione però le concentrazioni risultano più elevate rispetto all'ora di inizio evento, in quanto la precipitazione massima si verifica in concomitanza dell'ora di punta del traffico del mattino.

In conclusione, le analisi svolte con riferimento agli eventi piovosi indicano che se si considera solo l'intervallo temporale in cui si verifica l'evento piovoso non sempre si osserva una riduzione delle concentrazioni numeriche di particolato tra ora di fine e ora di inizio evento perché non si tiene conto dell'evoluzione del regime emissivo che si verificherebbe anche in un giorno secco. Occorre quindi confrontare giorni secchi e giorni piovosi tenendo conto degli stessi intervalli temporali.

Da questi confronti emerge che nelle ore piovose si osservano concentrazioni numeriche di particolato minori delle corrispondenti ore dei giorni secchi. Per gli eventi che si verificano a cavallo delle ore di punta del traffico del mattino, l'effetto della precipitazione è minore e si traduce in un minor incremento delle concentrazioni numeriche di particolato tra fine e inizio evento rispetto a quello che si avrebbe nello stesso periodo in un giorno secco. L'effetto di riduzione (o comunque di minor incremento) riguarda tutte le granulometrie di particolato solamente nel caso di eventi di intensa precipitazione, mentre negli eventi più deboli si osserva una riduzione solamente in alcune granulometrie, probabilmente in relazione alle dimensioni delle gocce di pioggia. Questa affermazione non può essere verificata in quanto non si hanno a disposizione dati riguardanti la dimensione delle gocce di pioggia per gli eventi registrati nel periodo di studio.

5. Conclusioni

I dati di concentrazione numerica di particolato analizzati sono stati raccolti attraverso campagne di misura effettuate nei mesi di ottobre e novembre 2008 e settembre, ottobre e novembre 2009 in due siti della città di Milano: via Pascal, che può essere considerato un sito di fondo urbano anche se è localizzato all'interno del campus universitario del Politecnico di Milano vicino a un'area di parcheggio di veicoli, e Viale Marche, sito di traffico ubicato lungo la circonvallazione esterna di Milano. I dati sono stati rilevati attraverso l'utilizzo di un impattore a bassa pressione che ha permesso di ricavare dati di concentrazione numerica nell'intervallo dimensionale 0,007-10 μm suddividendoli in 12 classi dimensionali con una risoluzione temporale di un minuto. Per i dati degli altri inquinanti si sono utilizzati dati provenienti dalle centraline di ARPA Lombardia situate negli stessi siti; per i parametri meteorologici sono stati impiegati dati provenienti dalla centralina localizzata in Viale Marche ed a Lambrate per quanto riguarda il sito di via Pascal, ad una distanza minore di 1 km rispetto al sito stesso.

L'analisi dei dati evidenzia che l'andamento delle concentrazioni numeriche giornaliero è diverso per i due siti analizzati: il sito Pascal ha una concentrazione dell'ordine di 10^3 - 10^4 particelle/ cm^3 e presenta un andamento con due picchi, uno in corrispondenza dell'ora di maggior traffico del mattino, che si verifica alle ore 9, e uno alle 21. Il sito Marche presenta invece concentrazioni numeriche più elevate rispetto al sito Pascal nelle ore diurne, dell'ordine di 10^4 - 10^6 particelle/ cm^3 , con un picco al mattino sempre in corrispondenza dell'ora di maggior traffico (che si verifica alle 8) e che risulta pari al doppio del picco che si verifica al mattino in Pascal. Successivamente al picco le concentrazioni si mantengono comunque più elevate rispetto al sito Pascal, determinate dalla presenza costante di traffico durante tutto l'arco delle ore diurne. Le concentrazioni notturne, invece, risultano analoghe nei due siti.

L'analisi ha inoltre consentito di riconoscere l'associazione di picchi di concentrazione numeriche di particolato nell'intervallo dimensionale delle particelle ultrafini e più precisamente tra 50 e 100 nm, con eventi di traffico intenso che si sono verificati nei giorni di rilevamento. Eventi di altra natura, quali eventi fotochimici e di nucleazione, non sono stati evidenziati dall'analisi sistematica degli andamenti giornalieri della concentrazione di particelle, in quanto tali eventi sono solitamente più frequenti nella stagione primaverile/estiva, non compresa nelle campagne di misura effettuate.

Inoltre, tali eventi si apprezzano più facilmente in situazioni caratterizzate da livelli di concentrazione relativamente bassi, che difficilmente si riscontrano nelle aree urbane.

Lo studio della correlazione tra il numero di particelle e gli altri inquinanti ha evidenziato come le concentrazioni di particolato non siano correlabili con le concentrazioni in massa di PM10 e PM2,5. Alla luce di questi risultati, peraltro confermati in letteratura, gli attuali standard previsti dalla normativa, riferiti solamente alle concentrazioni in massa, non risultano esaustivi nella quantificazione dell'esposizione al particolato atmosferico ed alle particelle fini e ultrafini in particolare. Per quanto riguarda gli altri inquinanti, i coefficienti di correlazione più alti (con valori maggiori di 0,7) sono stati ottenuti fra la concentrazione numerica di particolato e inquinanti di origine primaria quali NO_x e CO, indicando che la maggior fonte di particelle fini nel periodo studiato è costituita dalle emissioni dei veicoli. Inoltre la correlazione risulta migliore per quanto riguarda le granulometrie più fini rispetto alle granulometrie maggiori.

La correlazione fra il numero di particolato ed i parametri meteorologici (temperatura, radiazione solare e umidità relativa) è molto debole o pressoché assente; una debole correlazione con la velocità del vento e la precipitazione si osserva solo per il sito di via Pascal. La velocità del vento ha un duplice effetto sulle concentrazioni numeriche di particolato: un effetto di diluizione sulle granulometrie inferiori e un effetto di risospensione sulle granulometrie maggiori, con conseguenti diminuzione ed aumento delle concentrazioni atmosferiche. Per il sito di traffico Marche i coefficienti di correlazione risultano inferiori rispetto al sito di fondo urbano, evidenziano come le concentrazioni numeriche registrate siano strettamente connesse alle emissioni da fonti primarie (prevalentemente emissioni da traffico) poco influenzabili dalle variabili meteorologiche del sito.

Infine l'analisi approfondita degli eventi di pioggia registrati nel periodo di studio nel sito Pascal ha portato a verificare che esiste un effetto di dilavamento dell'atmosfera provocato dalla precipitazione. Tale effetto, tuttavia, si traduce in variazioni delle concentrazioni numeriche di particolato che risentono fortemente dell'evoluzione del regime emissivo durante l'evento piovoso. Tenendo conto di questo aspetto si osserva generalmente una riduzione delle concentrazioni numeriche, la cui entità è però risultata strettamente legata all'intensità della precipitazione e all'ora di inizio e fine evento: eventi in cui la precipitazione è più intensa e che avvengono nel periodo notturno danno luogo alle massime riduzioni, mentre eventi che avvengono a cavallo dell'ora di punta di traffico del mattino e caratterizzati da precipitazione debole danno luogo alle minime riduzioni. Generalmente si osserva una maggiore riduzione delle concentrazioni numeriche delle

granulometrie maggiori anche se le caratteristiche di intensità dell'evento (debole, moderato, intenso), che ragionevolmente si ripercuotono anche sulle dimensioni delle gocce di pioggia, sembrano avere un'influenza sulle granulometrie rispetto alle quali vengono registrate le maggiori riduzioni di concentrazione numerica. Sarebbe auspicabile che nelle prossime campagne di misura si raccogliessero dati in riferimento alla dimensione delle gocce di pioggia in modo da approfondire l'argomento e avere eventuali conferme. Inoltre bisogna sottolineare che ai risultati raggiunti in merito agli episodi piovosi non può essere attribuita validità generale in quanto si sono analizzati solo cinque eventi per lo più con caratteristiche diverse. Sarebbe quindi necessario predisporre altre campagne di misura per raccogliere dati in riferimento a un numero statisticamente significativo di eventi, in modo da analizzarli e verificare se i risultati confermano quelli ottenuti in questo lavoro.

ALLEGATI

I. ANALISI GIORNO PER GIORNO

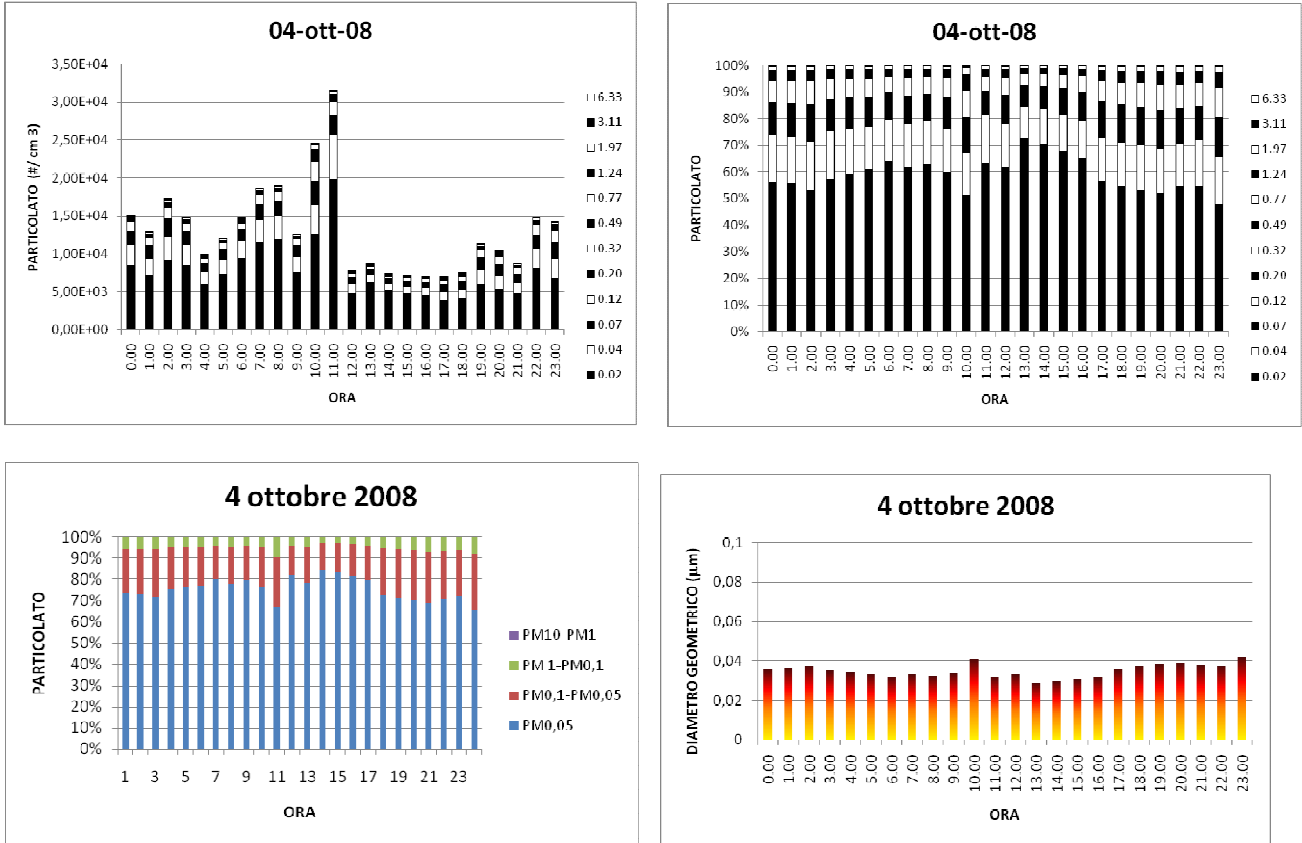
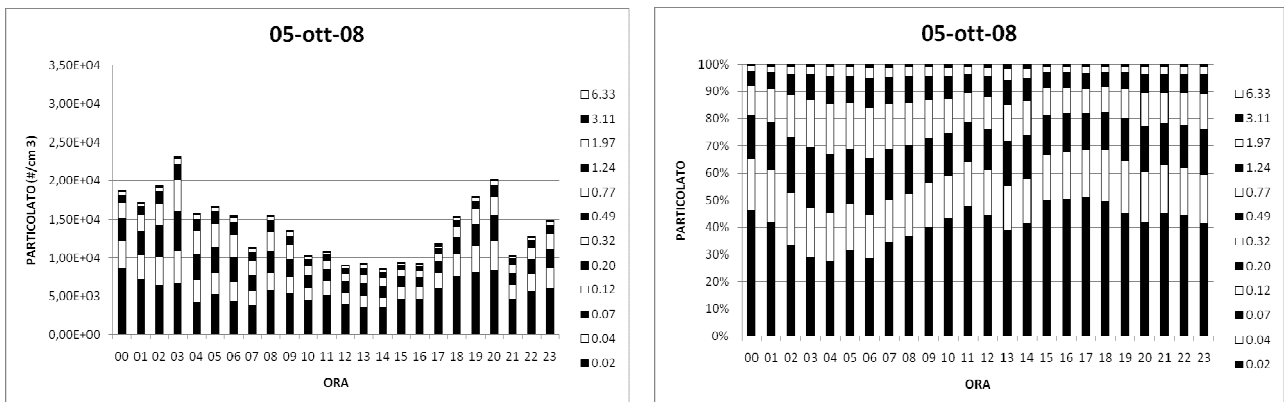


Figura 81 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno sabato 4 ottobre 2008, sito Pascal.



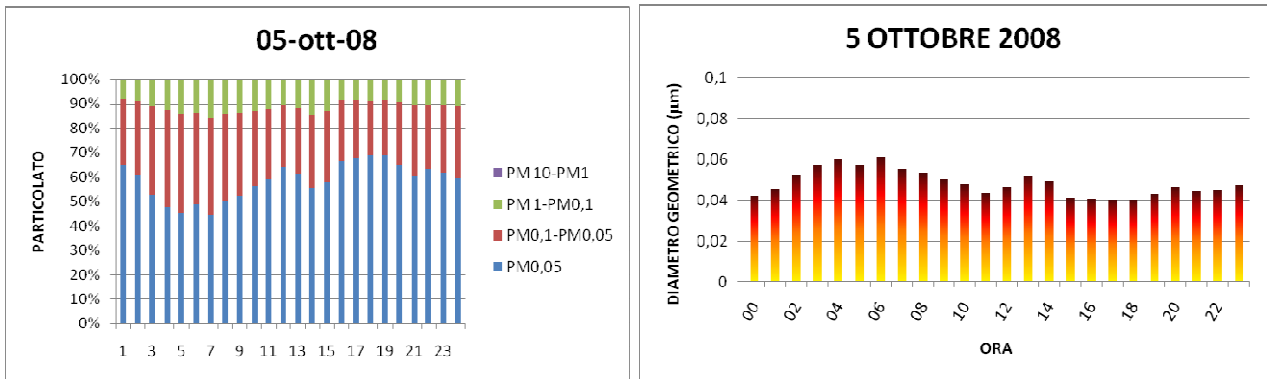


Figura 82 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno domenica 5 ottobre 2008, sito Pascal.

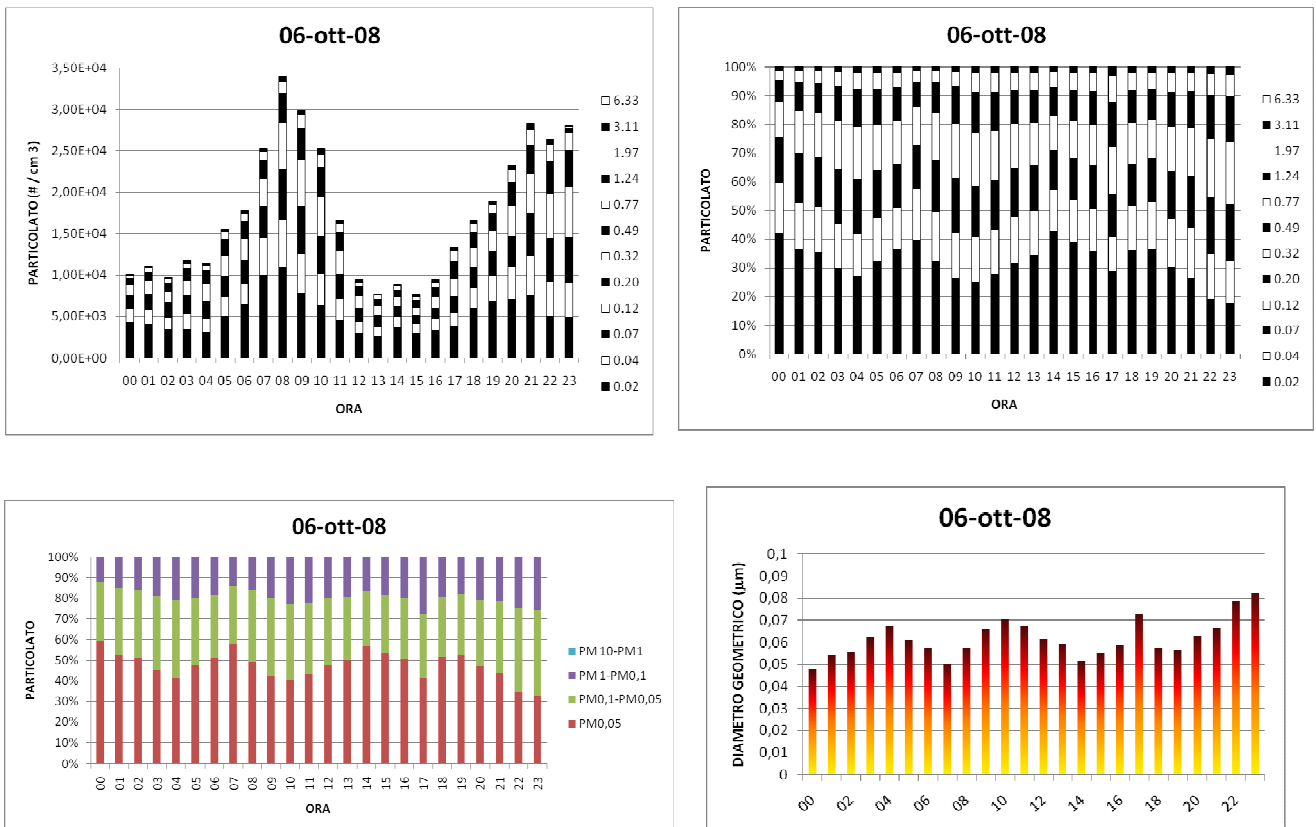


Figura 83 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno lunedì 6 ottobre 2008, sito Pascal.

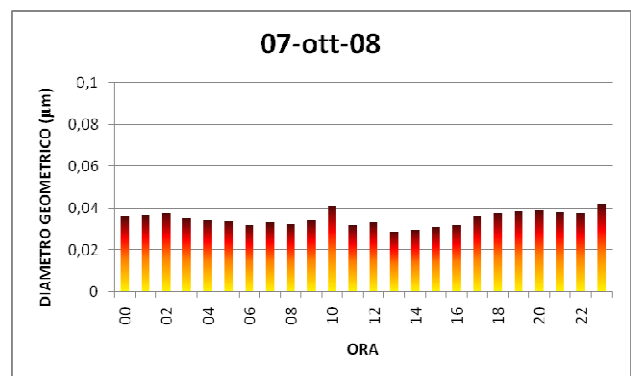
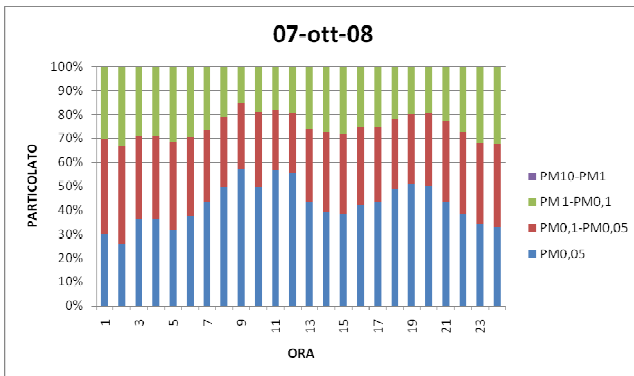
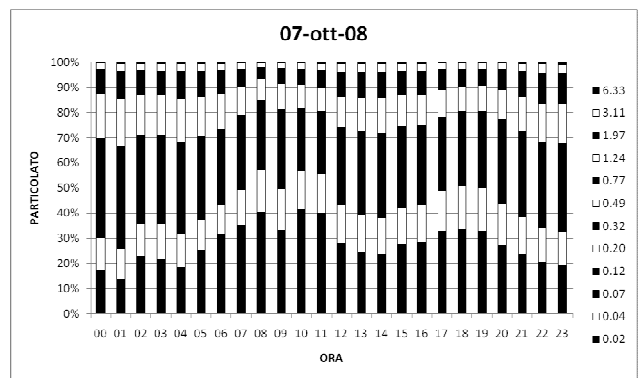
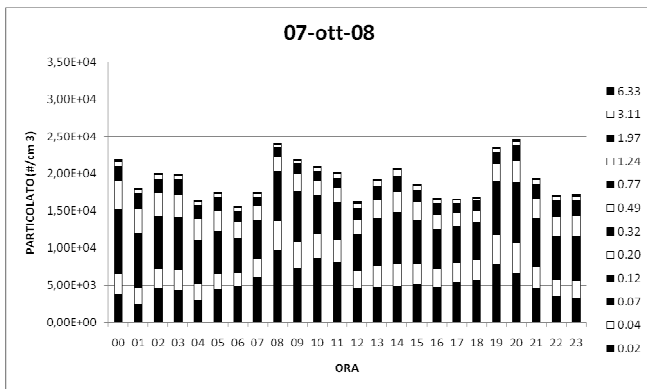
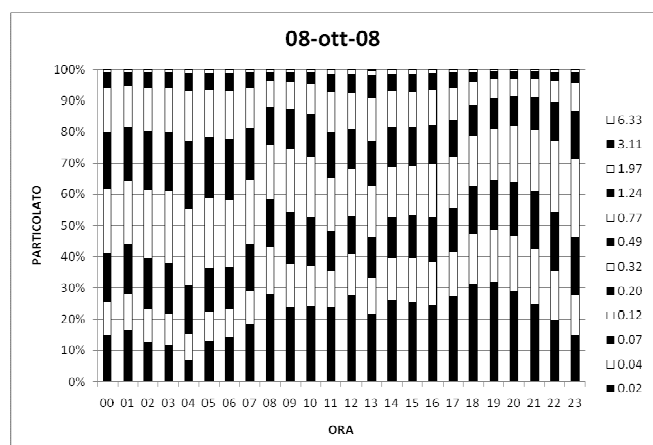
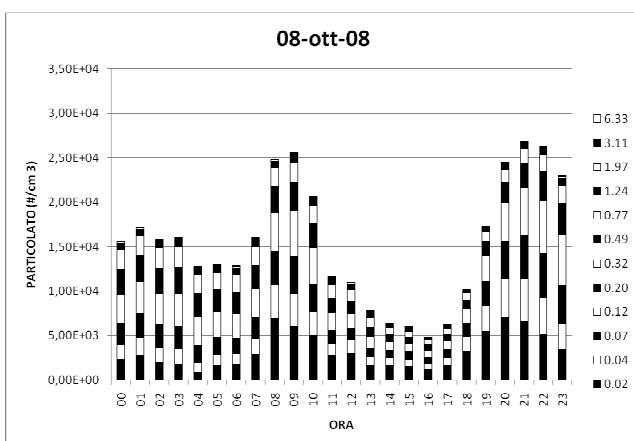


Figura 84 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno martedì 7 ottobre 2008, sito Pascal.



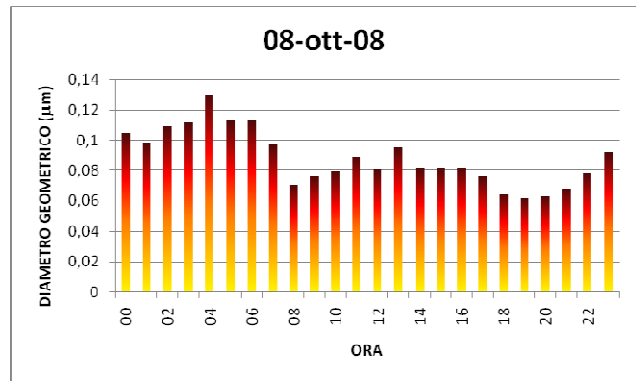
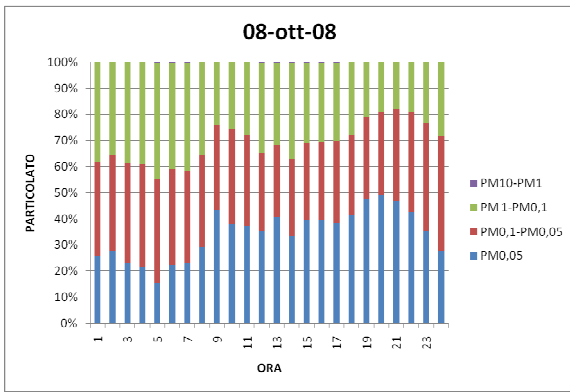


Figura 85 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 8 ottobre 2008, sito Pascal.

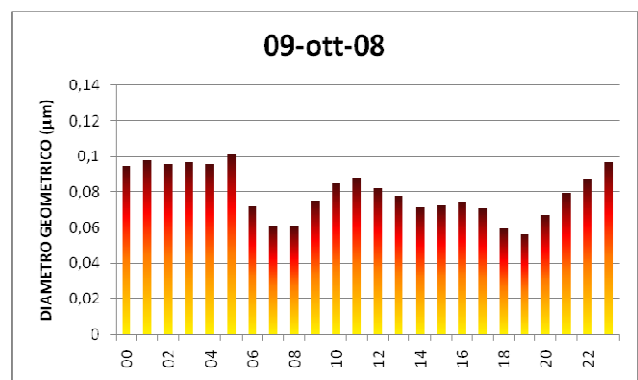
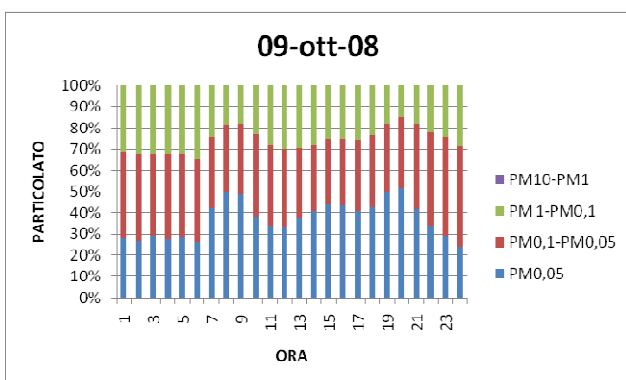
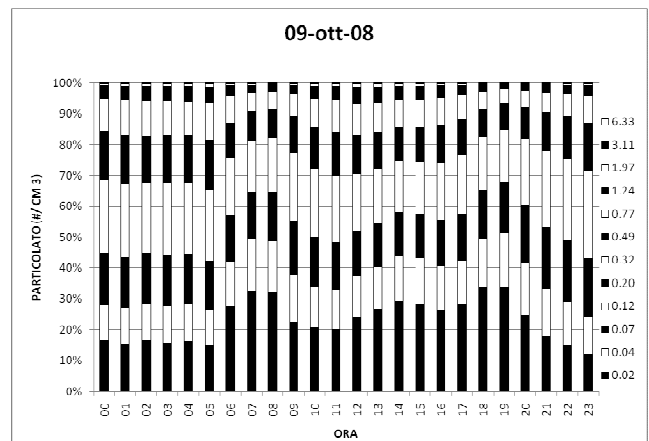
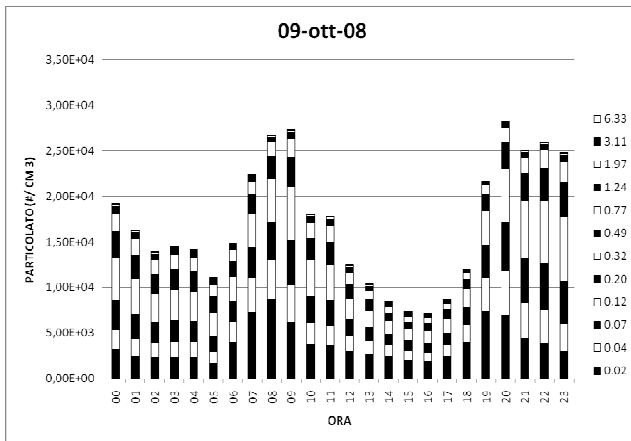


Figura 86 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 9 ottobre 2008, sito Pascal (giorno di pioggia).

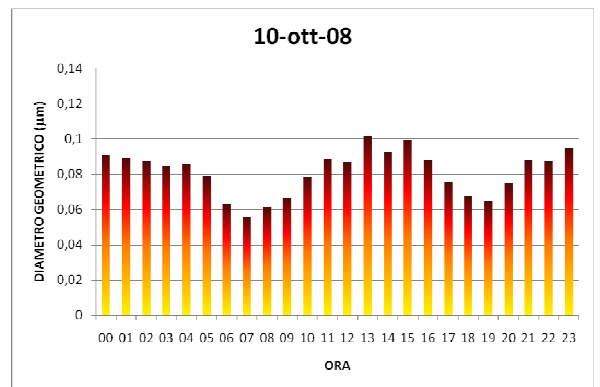
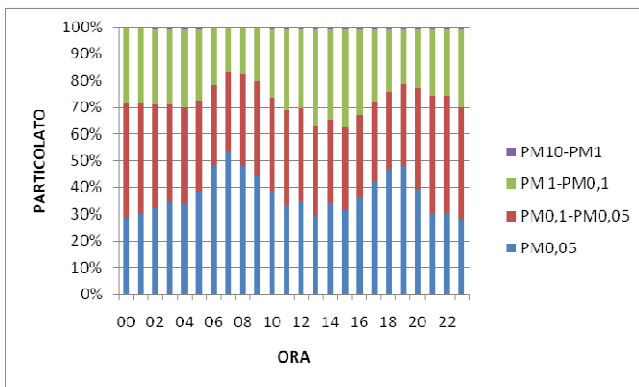
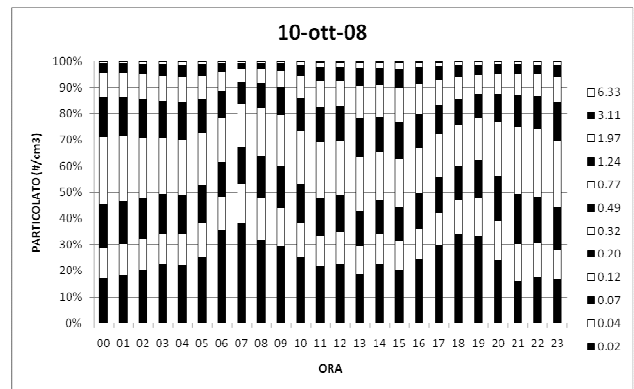
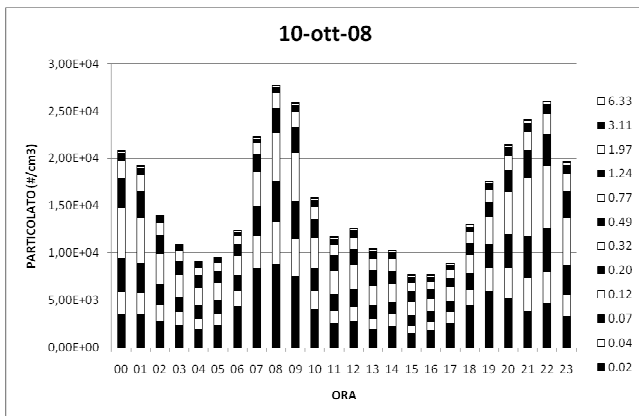
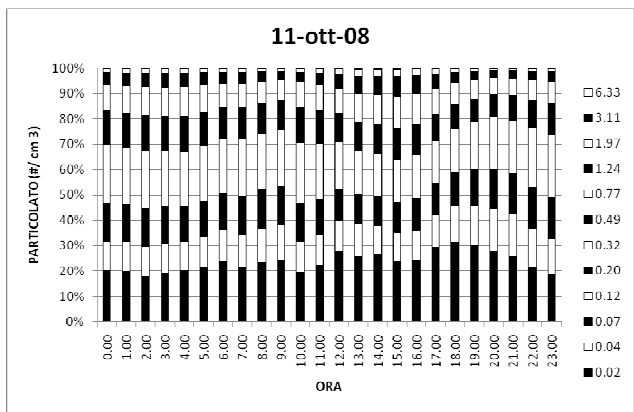
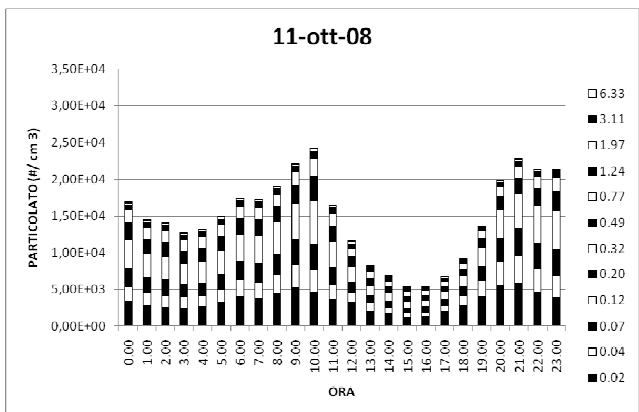


Figura 87 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno venerdì 10 ottobre 2008, sito Pascal.



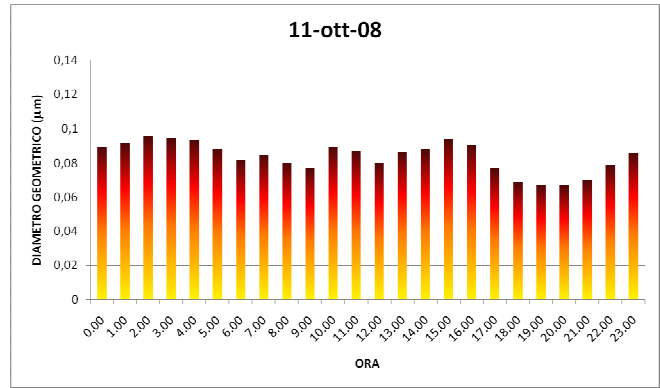
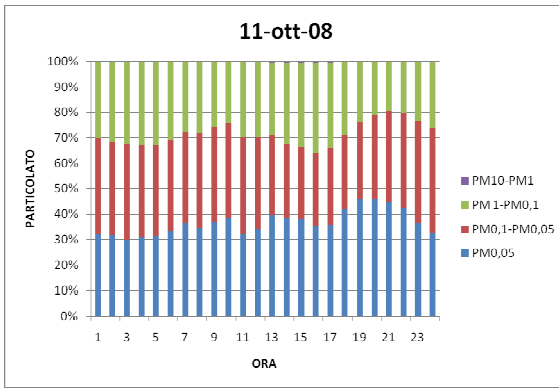


Figura 88 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno sabato 11 ottobre 2008, sito Pascal.

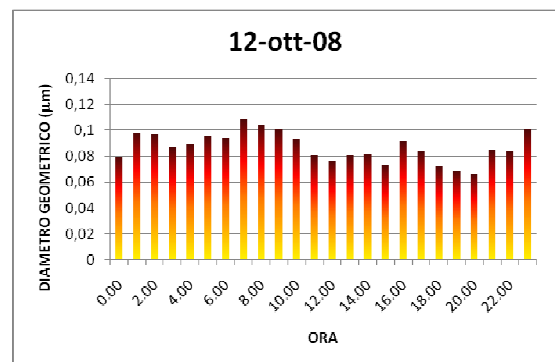
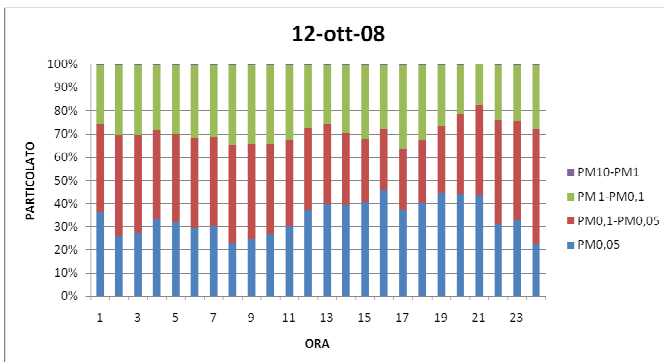
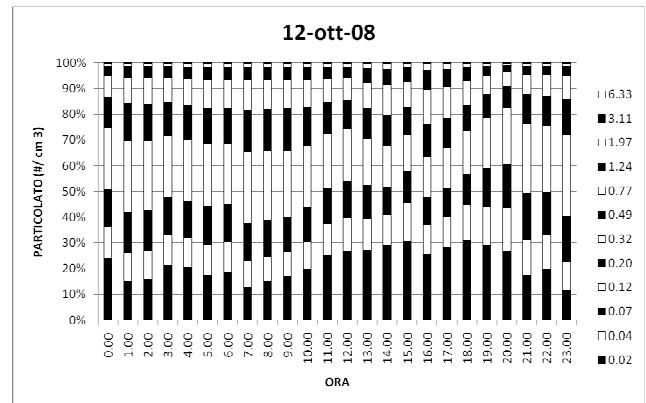
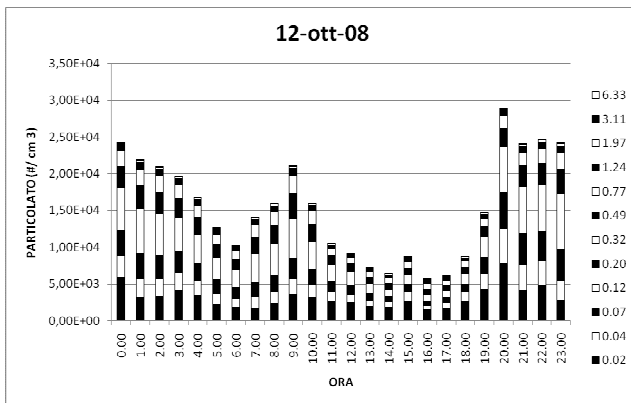


Figura 89 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno domenica 12 ottobre 2008, sito Pascal.

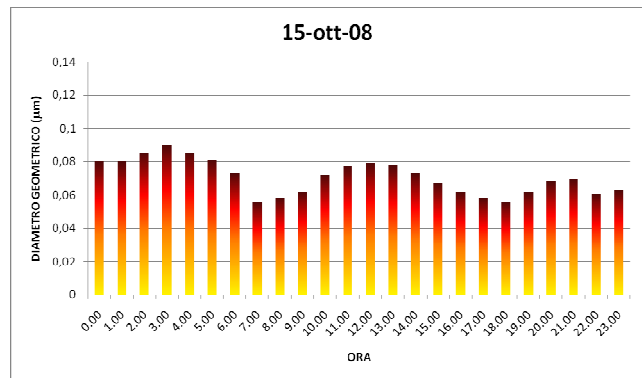
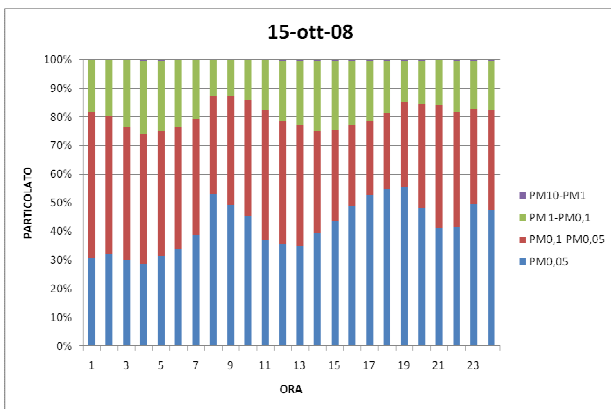
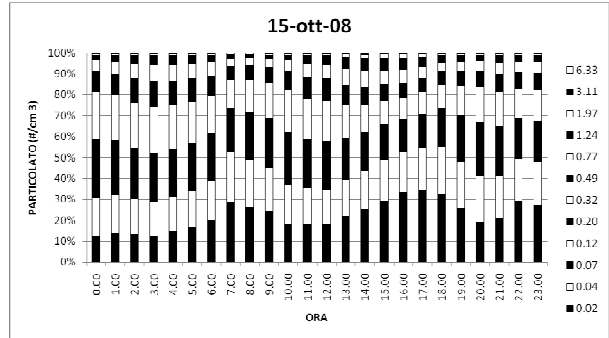
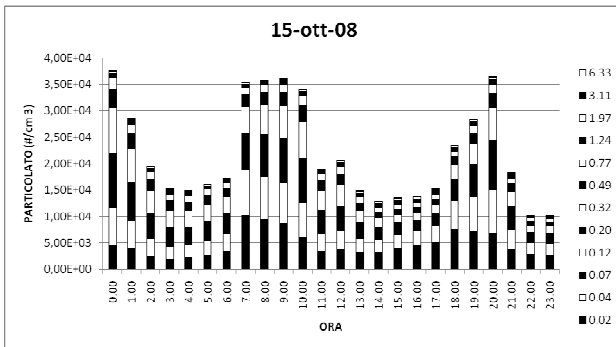
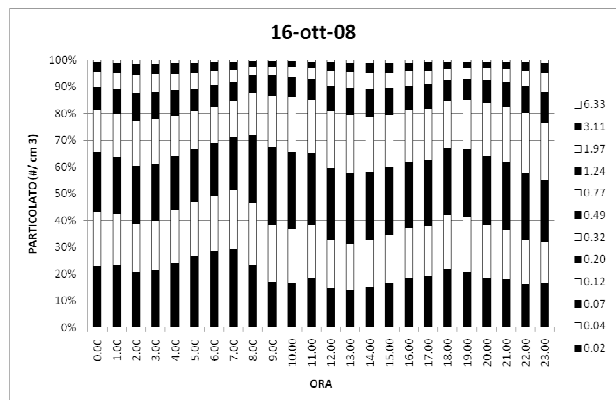
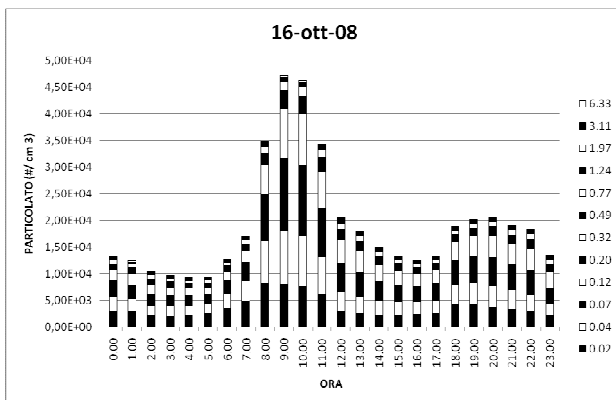


Figura 90 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 15 ottobre 2008, sito Pascal.



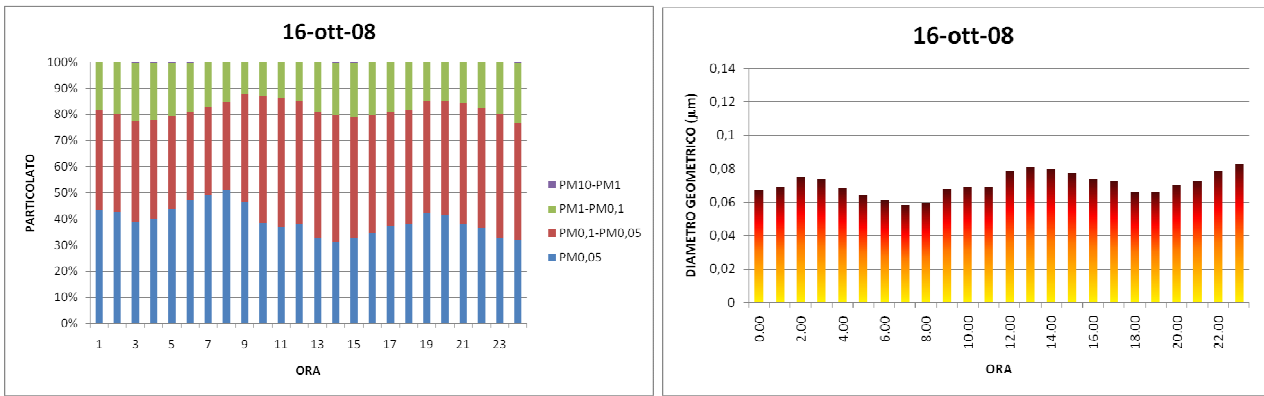


Figura 91 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 16 ottobre 2008, sito Pascal.

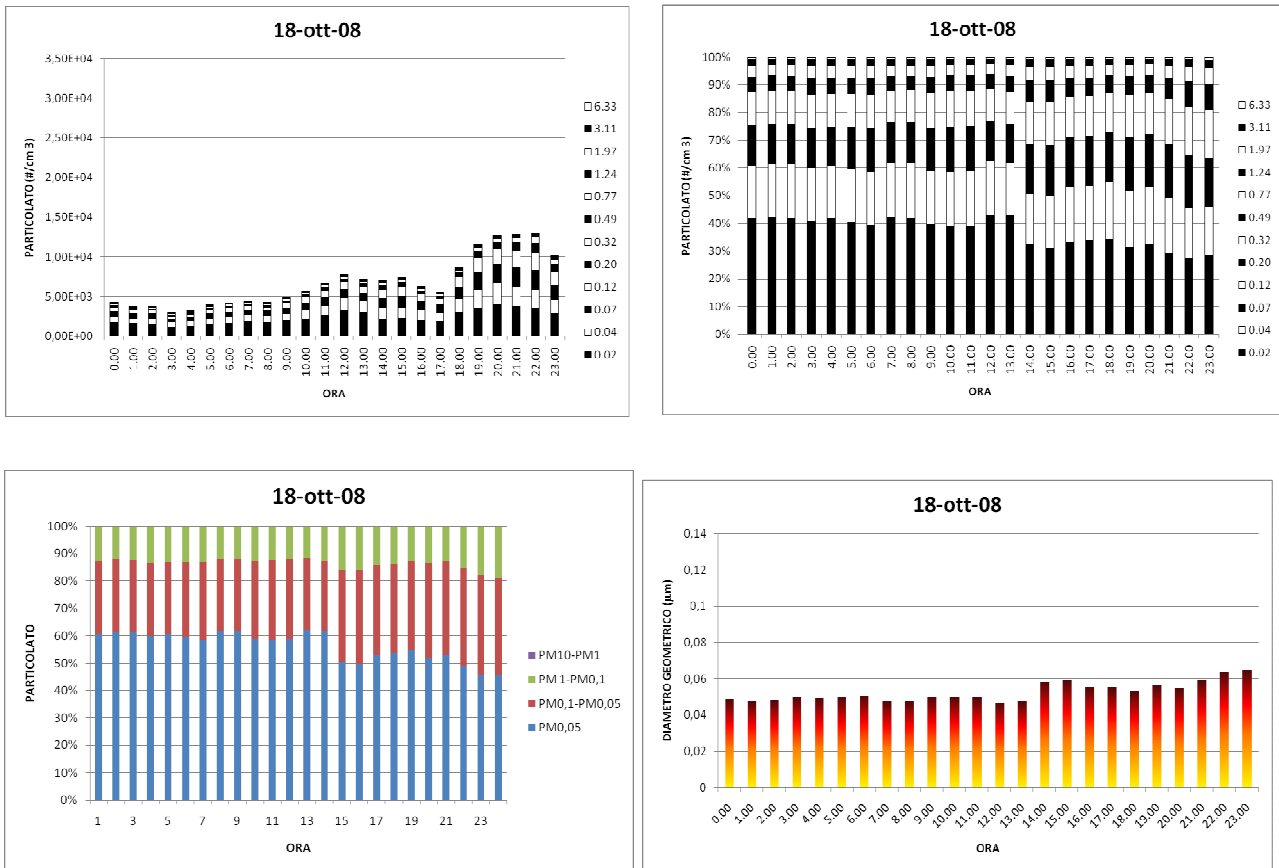


Figura 92 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno sabato 18 ottobre 2008, sito Pascal.

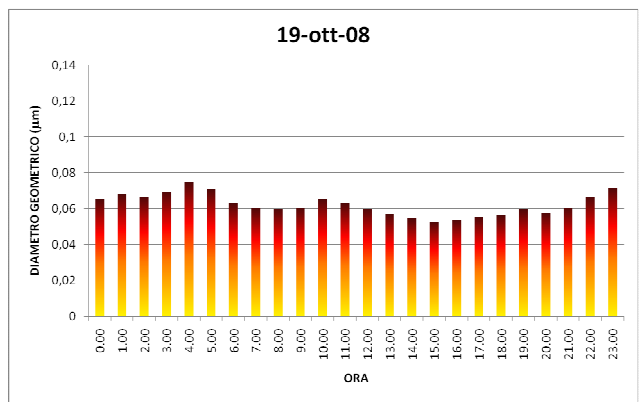
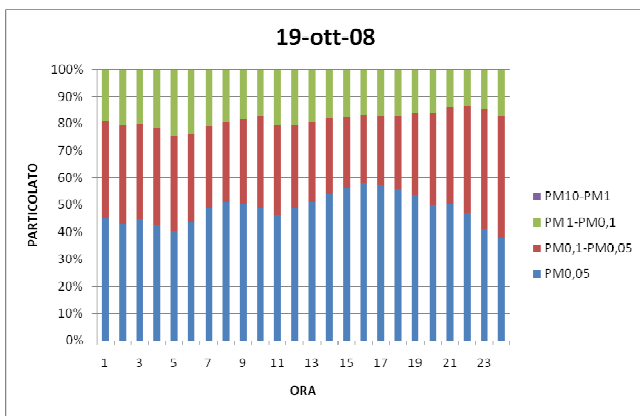
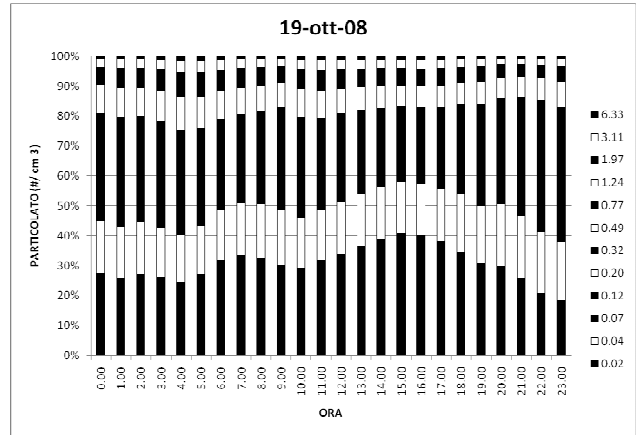
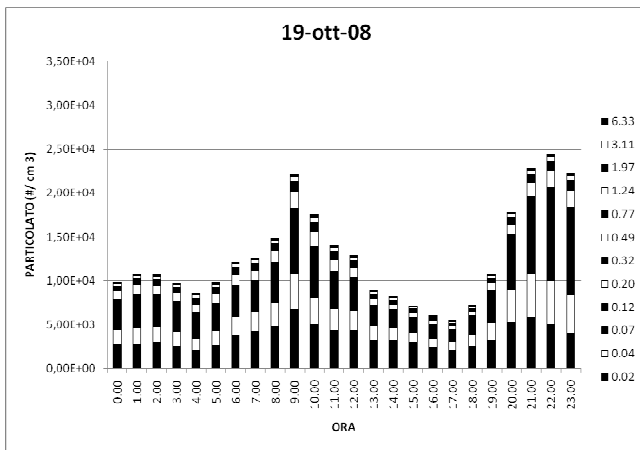
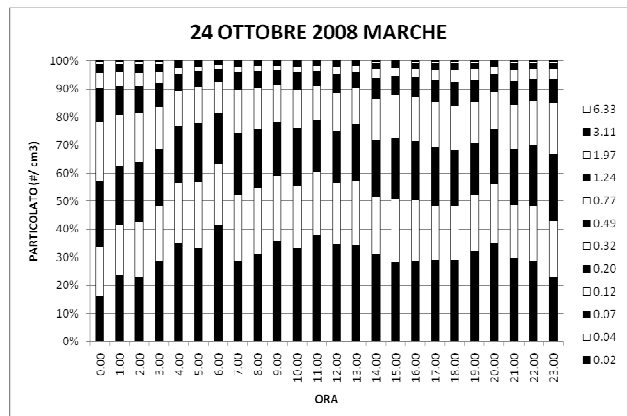
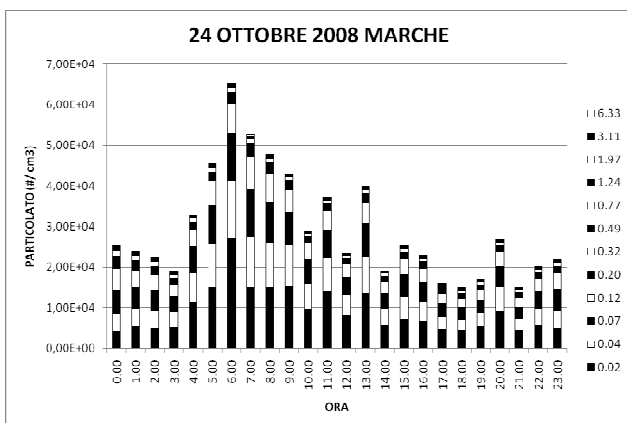


Figura 93 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno domenica 19 ottobre 2008, sito Pascal.



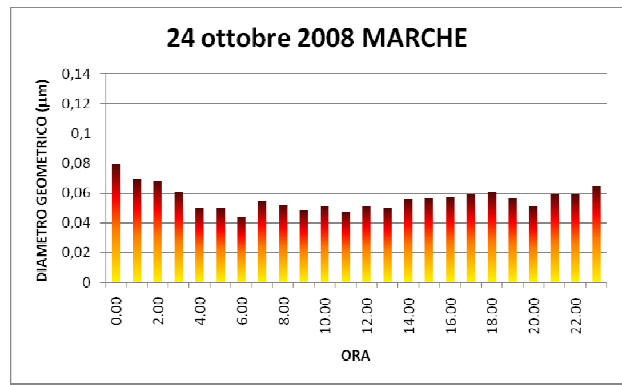
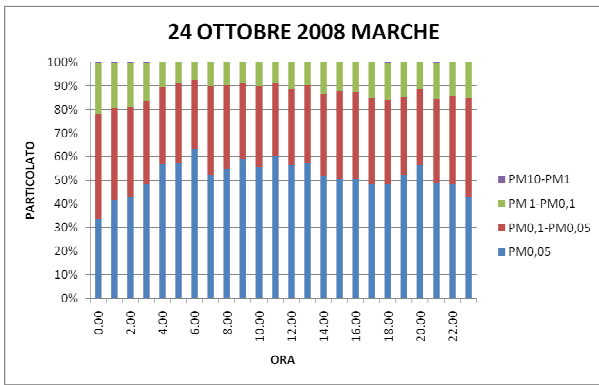


Figura 94 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno venerdì 24 ottobre 2008, sito Marche.

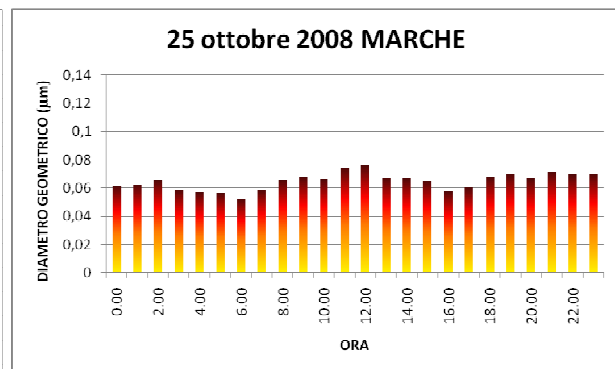
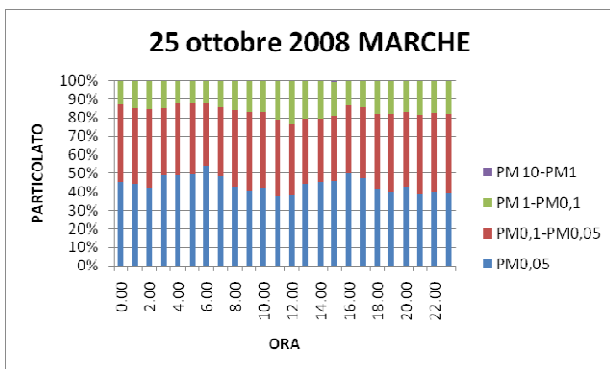
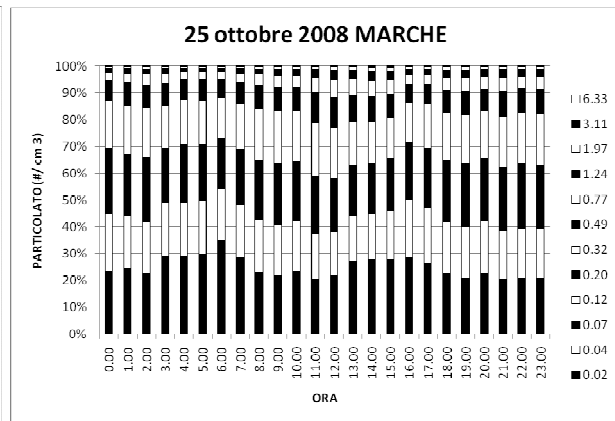
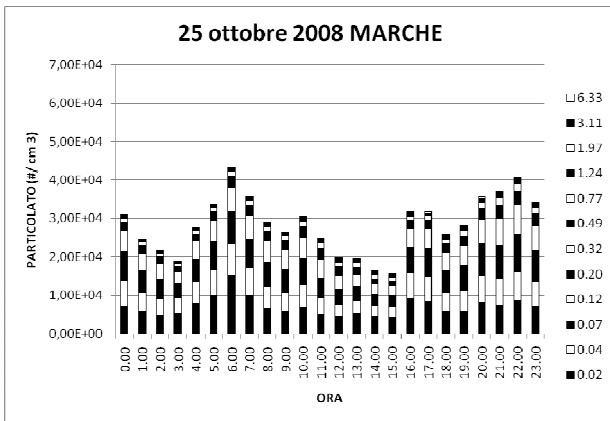


Figura 95 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno sabato 25 ottobre 2008, sito Marche.

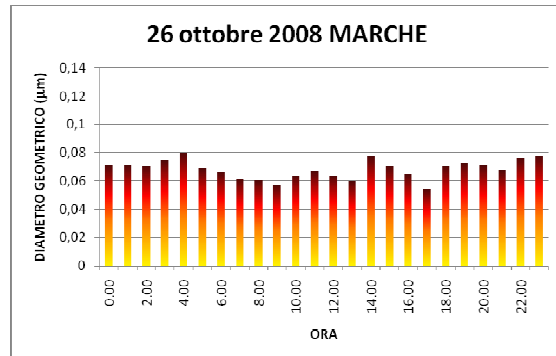
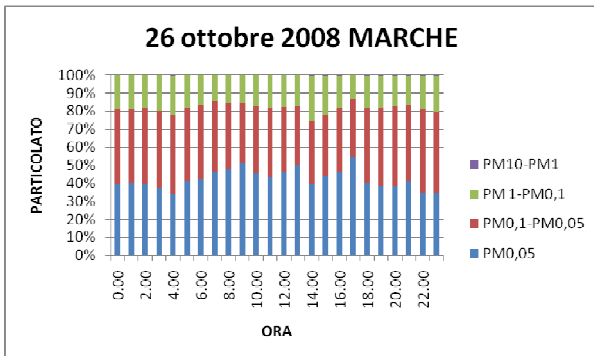
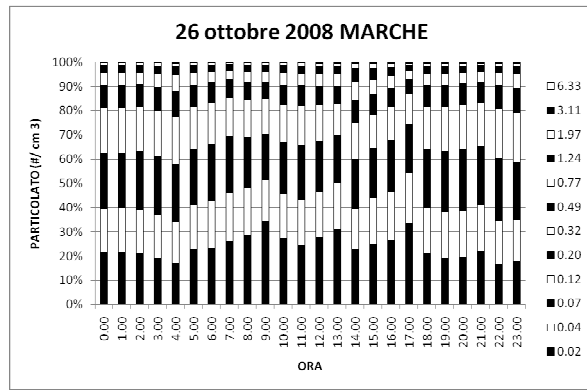
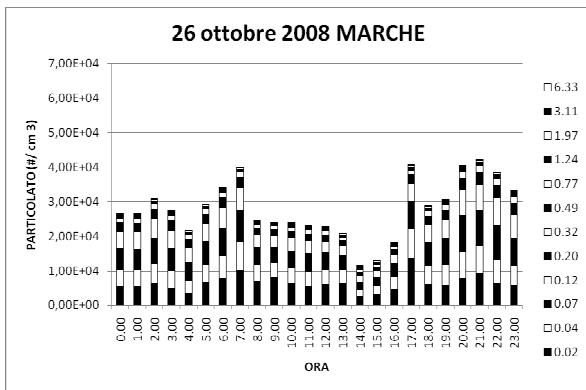
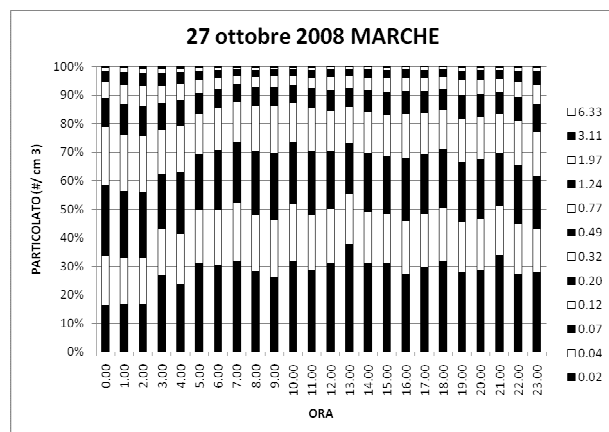
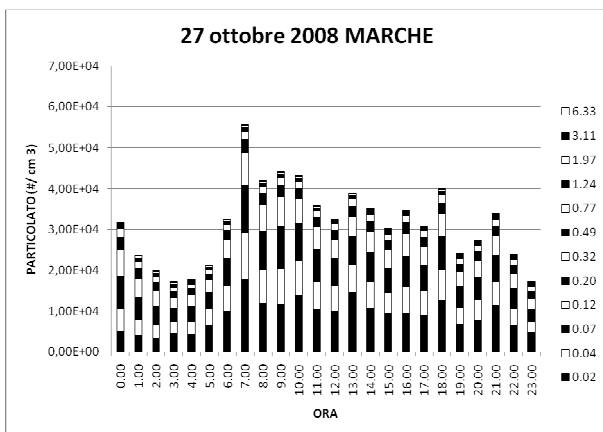


Figura 96 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno domenica 26 ottobre 2008, sito Marche.



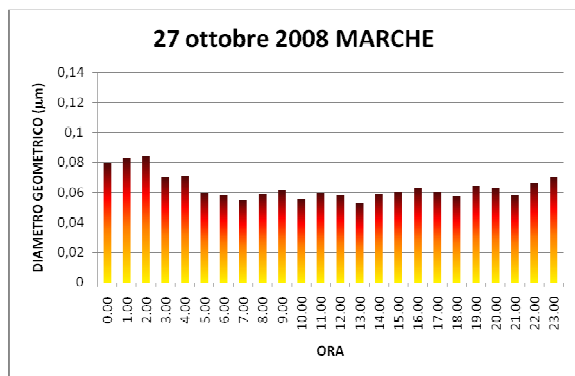
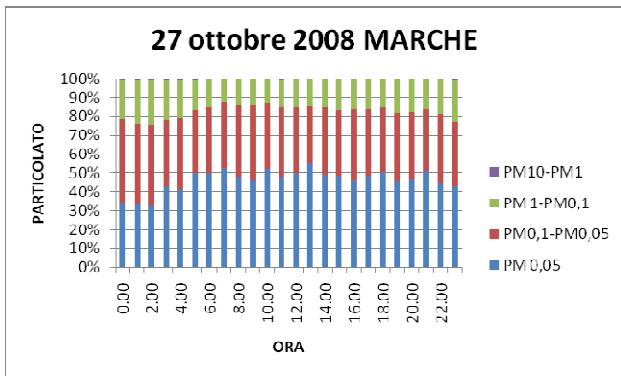


Figura 97 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno lunedì 27 ottobre 2008, sito Marche.

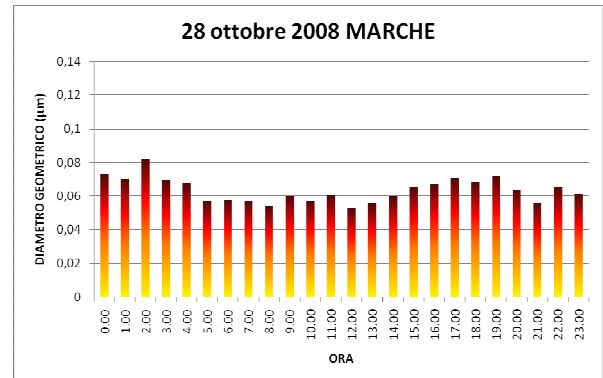
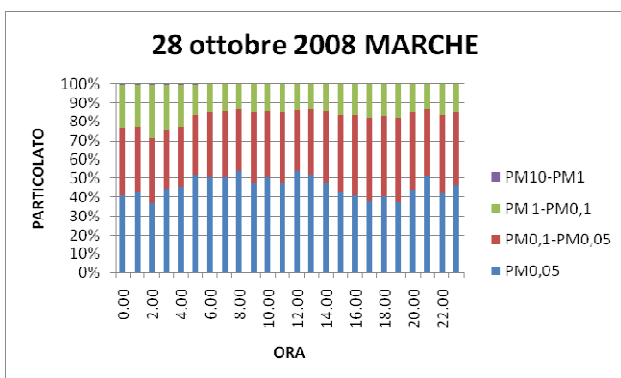
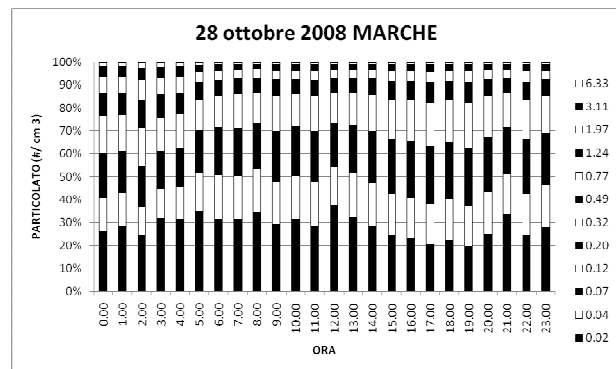
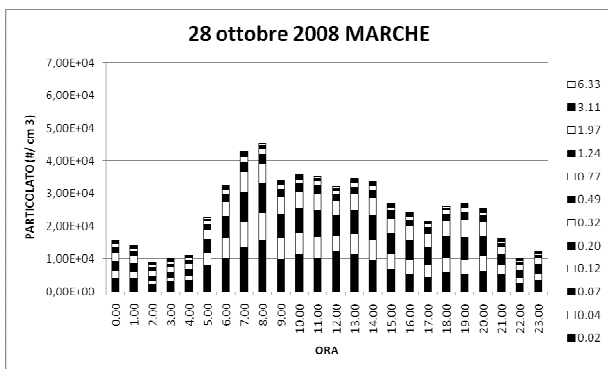


Figura 98 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno martedì 28 ottobre 2008, sito Marche.

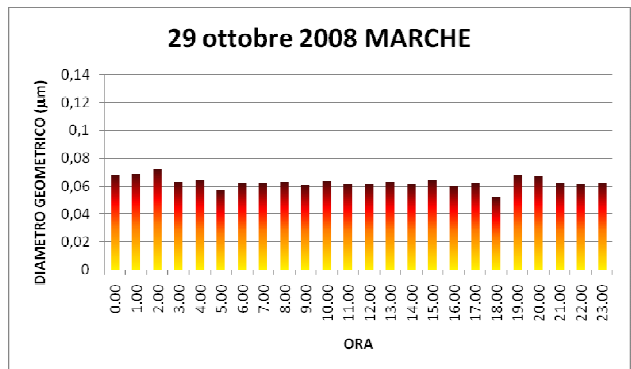
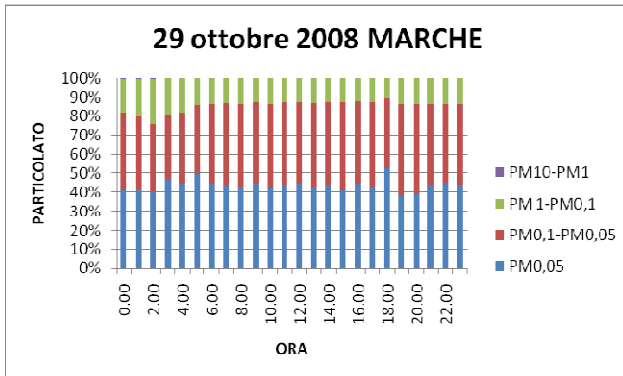
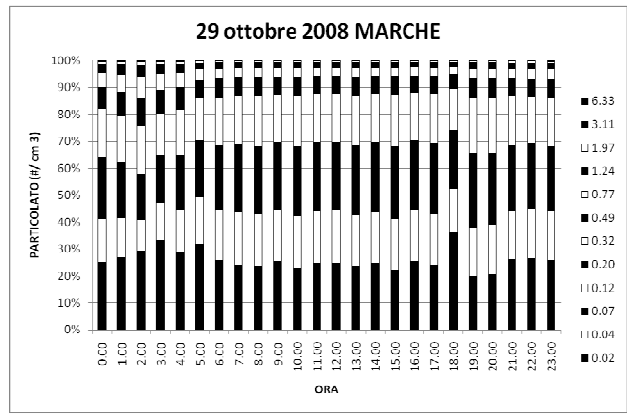
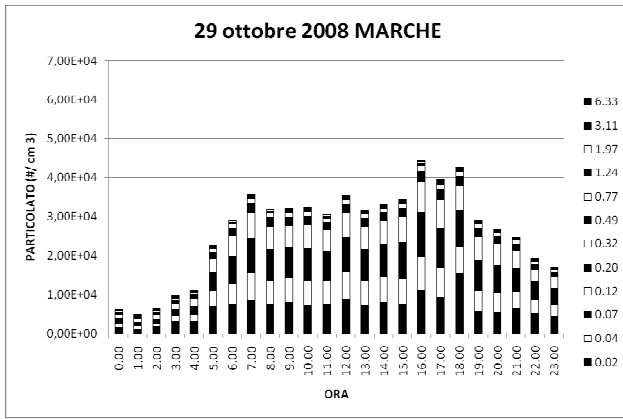
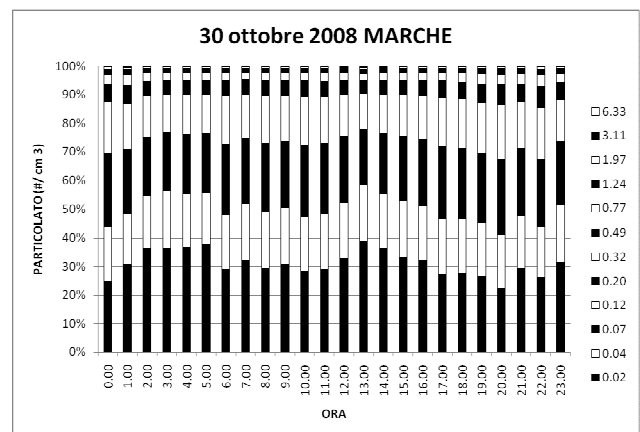
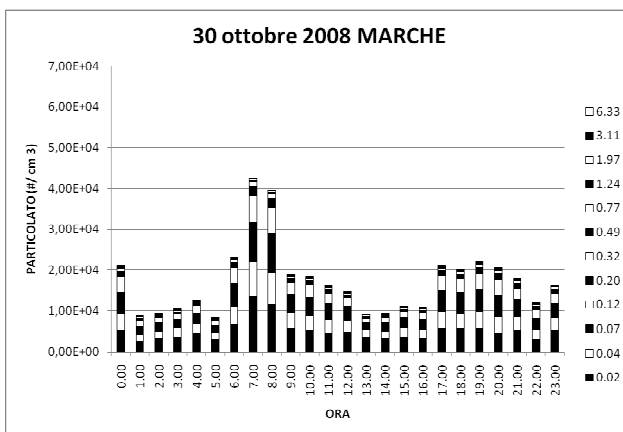


Figura 99 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 29 ottobre 2008, sito Marche.



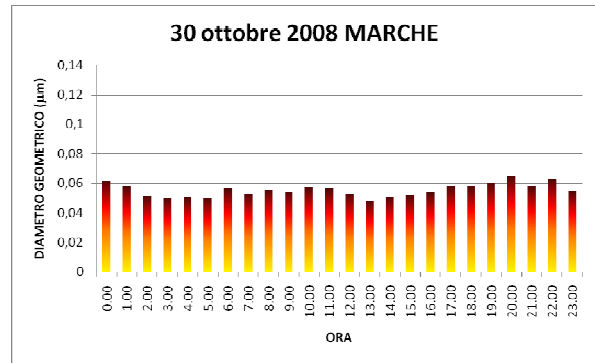
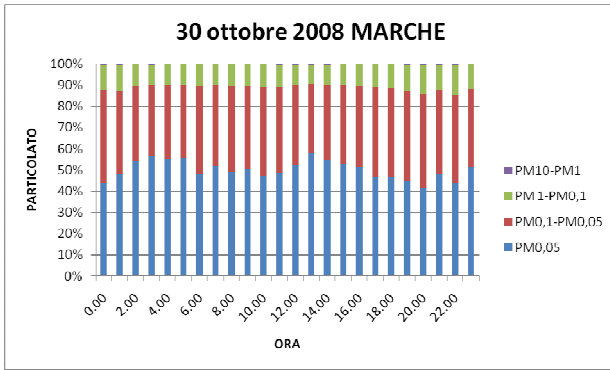


Figura 100 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 30 ottobre 2008, sito Marche.

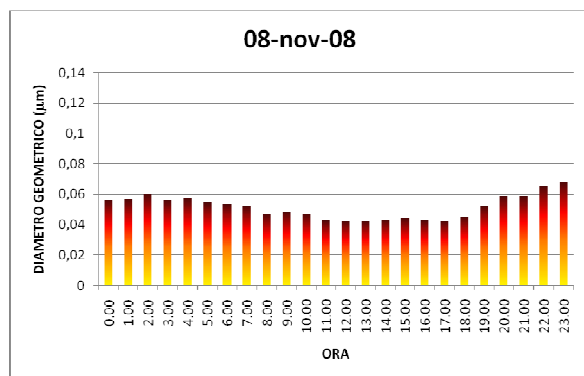
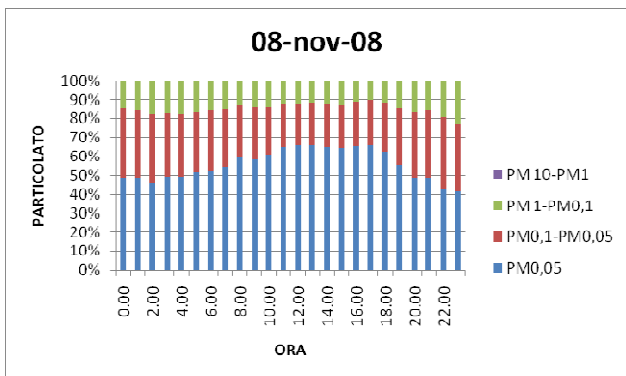
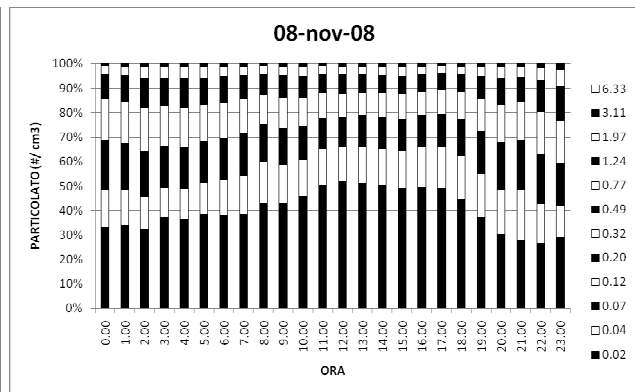
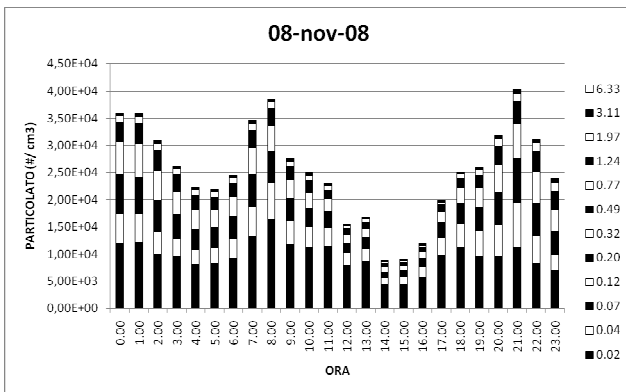


Figura 101 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno sabato 8 novembre 2008, sito Pascal.

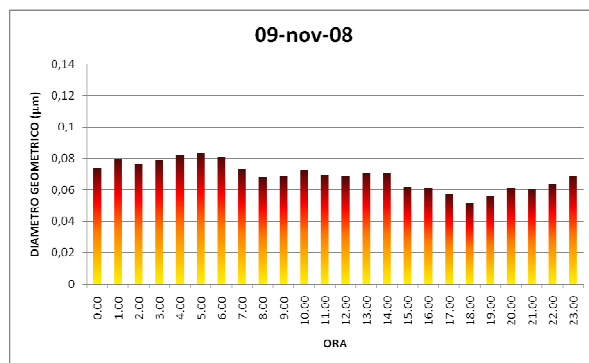
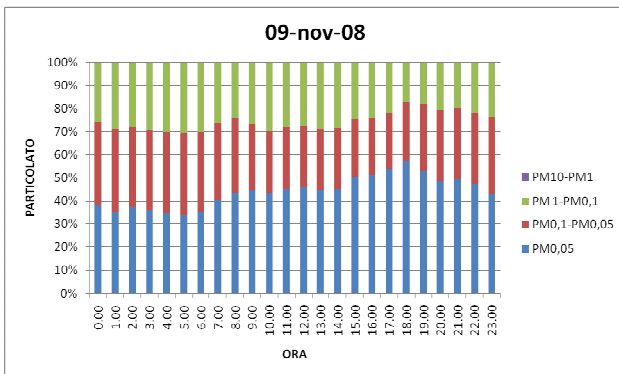
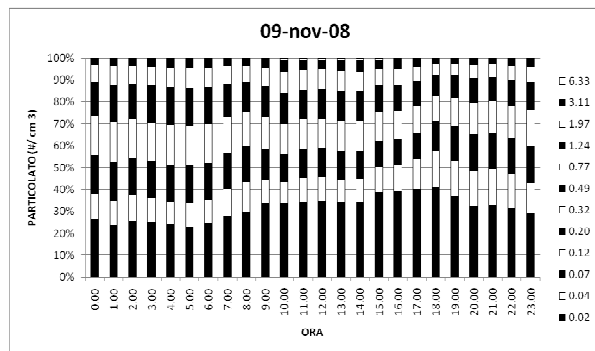
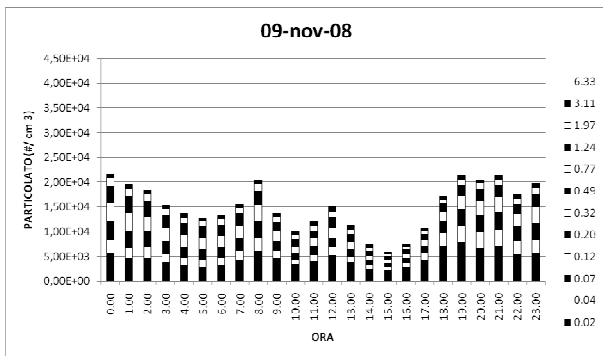
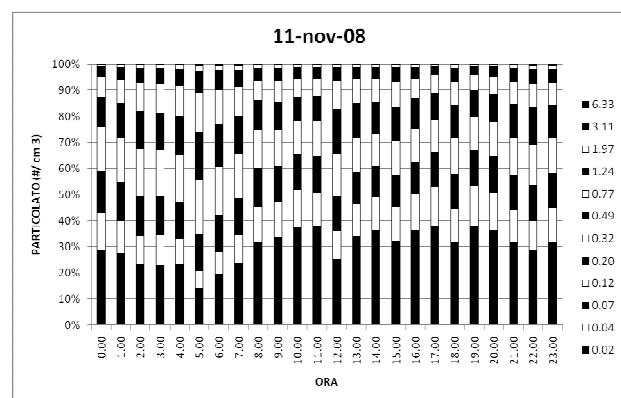
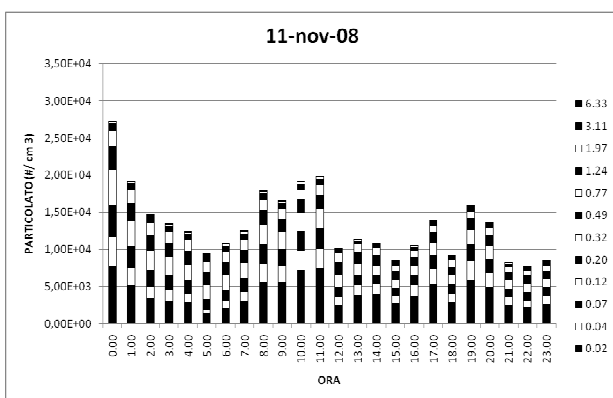


Figura 102 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno domenica 9 novembre 2008, sito Pascal.



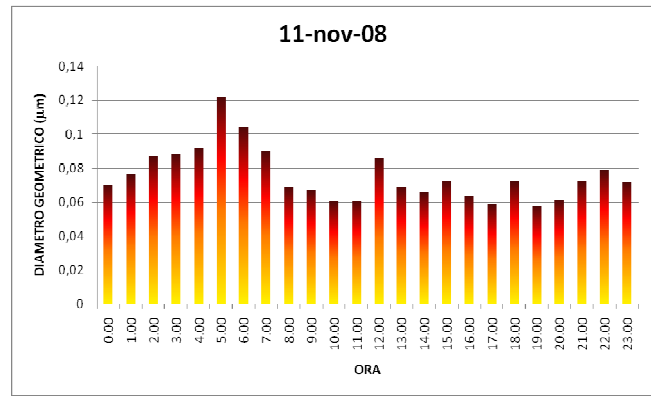
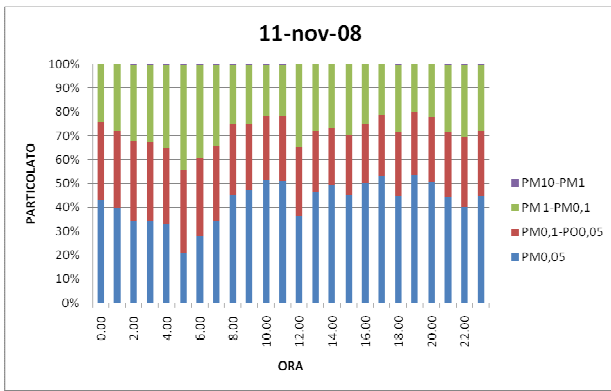


Figura 103 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno martedì 11 novembre 2008, sito Pascal.

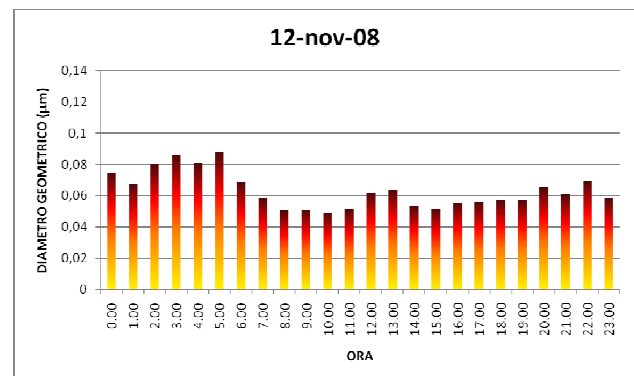
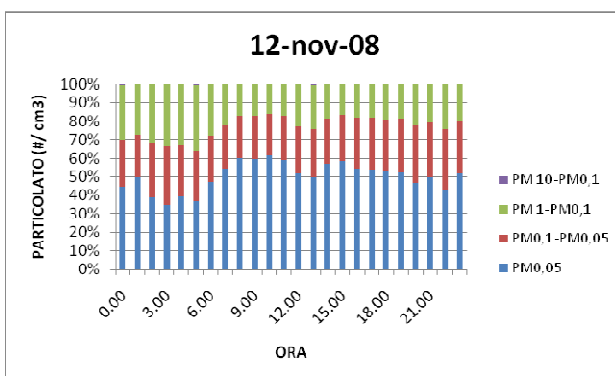
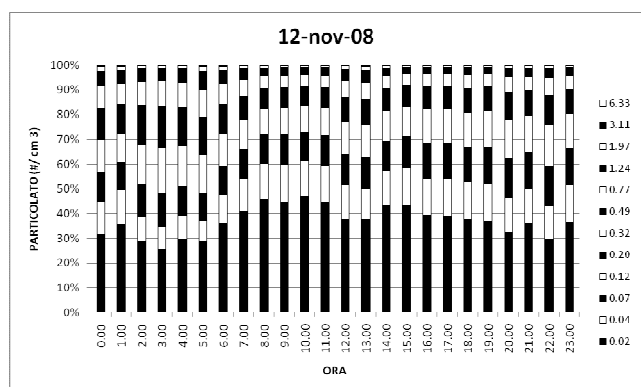
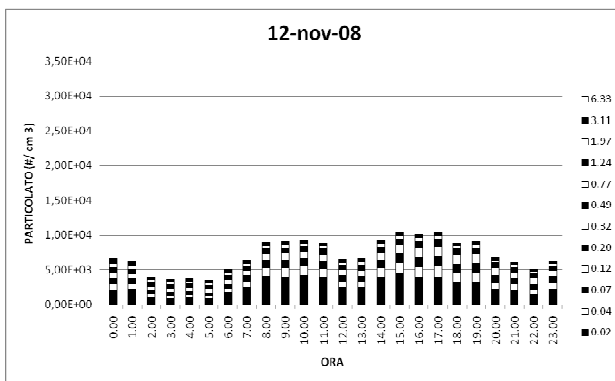


Figura 104 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 12 novembre 2008, sito Pascal (giorno di pioggia).

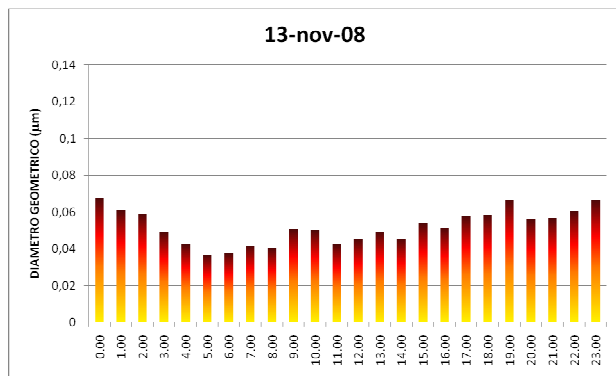
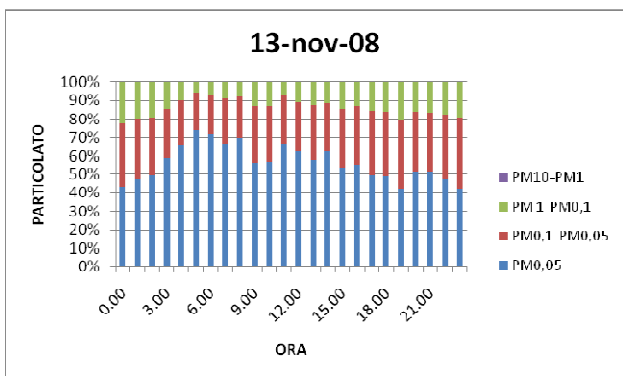
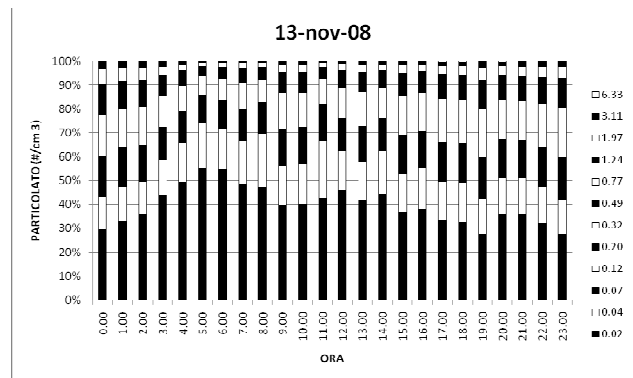
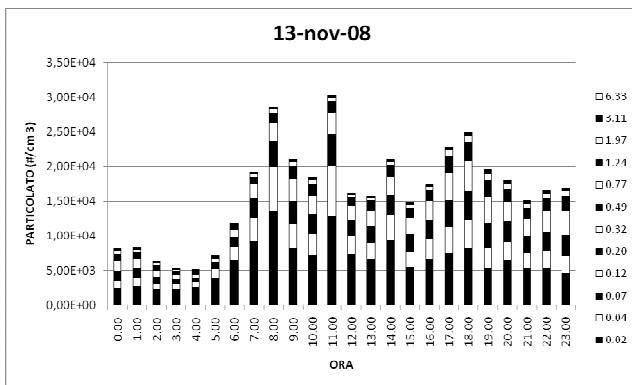
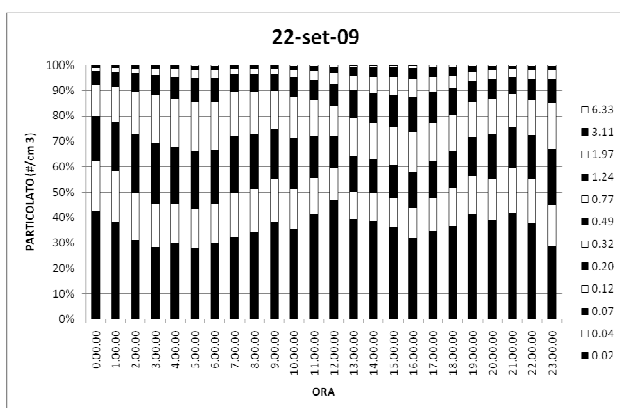
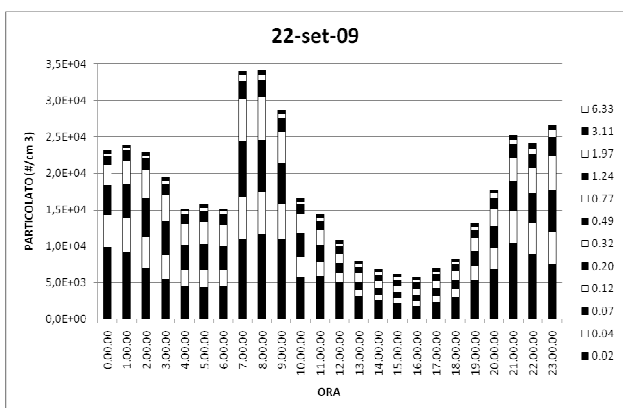


Figura 105 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 13 novembre 2008, sito Pascal (giorno di pioggia).



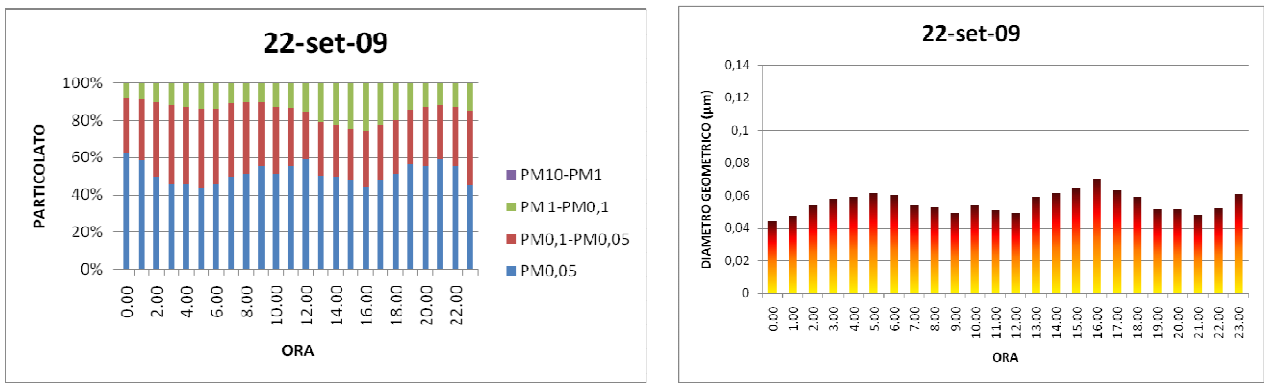


Figura 106 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno martedì 22 settembre 2009, sito Pascal.

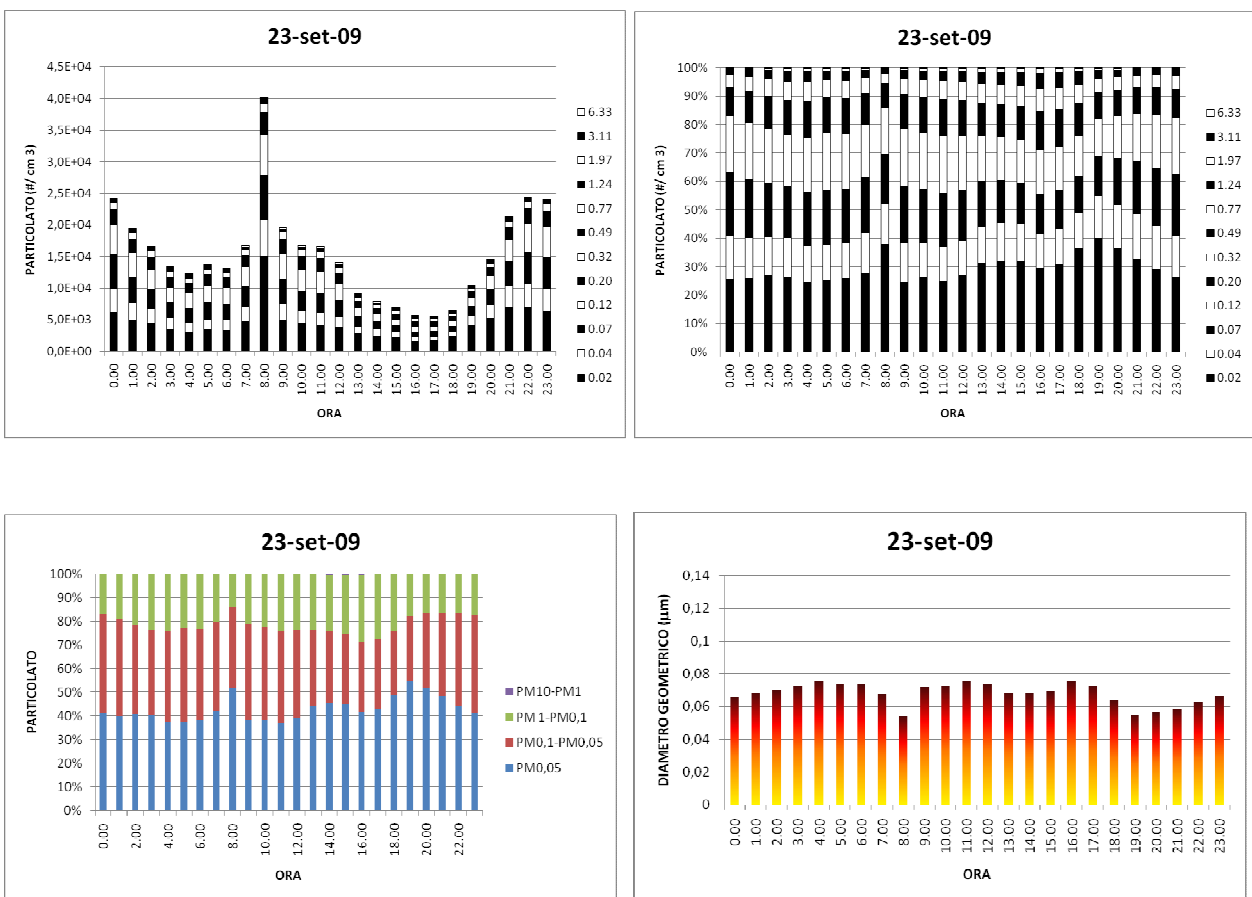


Figura 107 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 23 settembre 2009, sito Pascal.

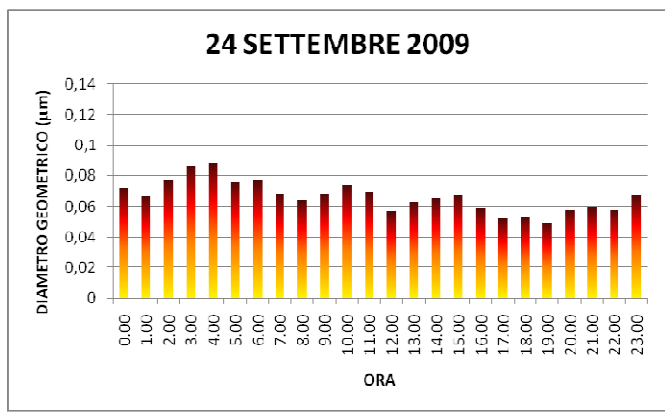
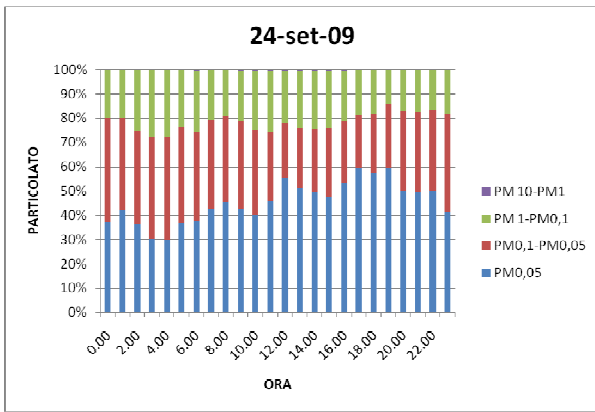
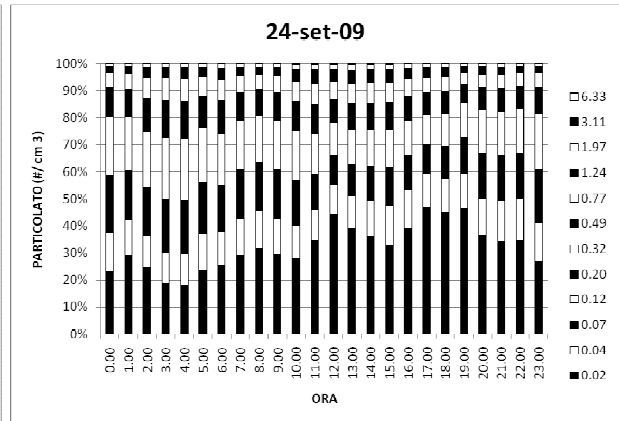
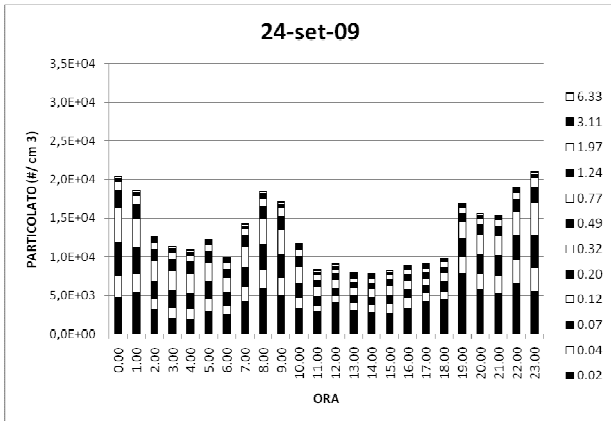
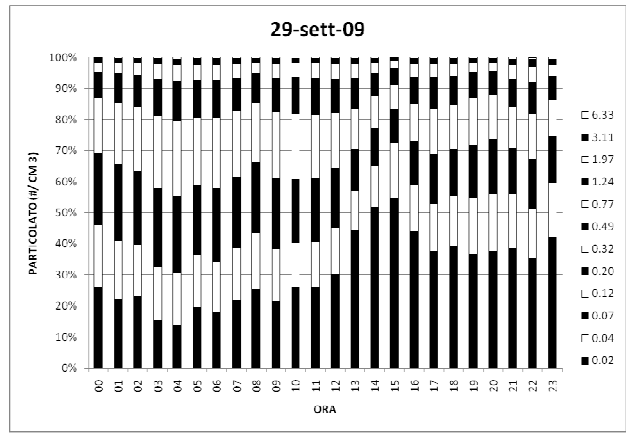
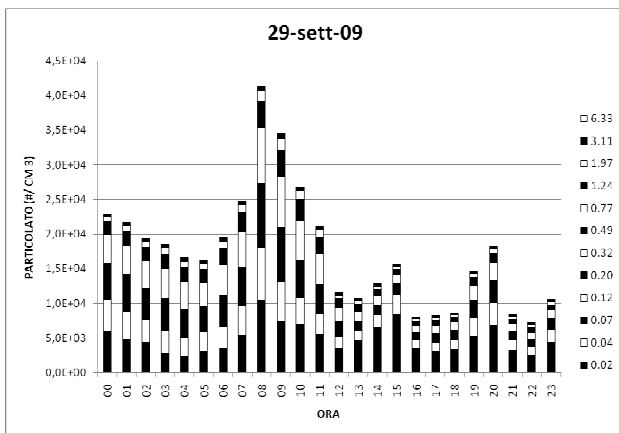


Figura 108 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 24 settembre 2009, sito Pascal.



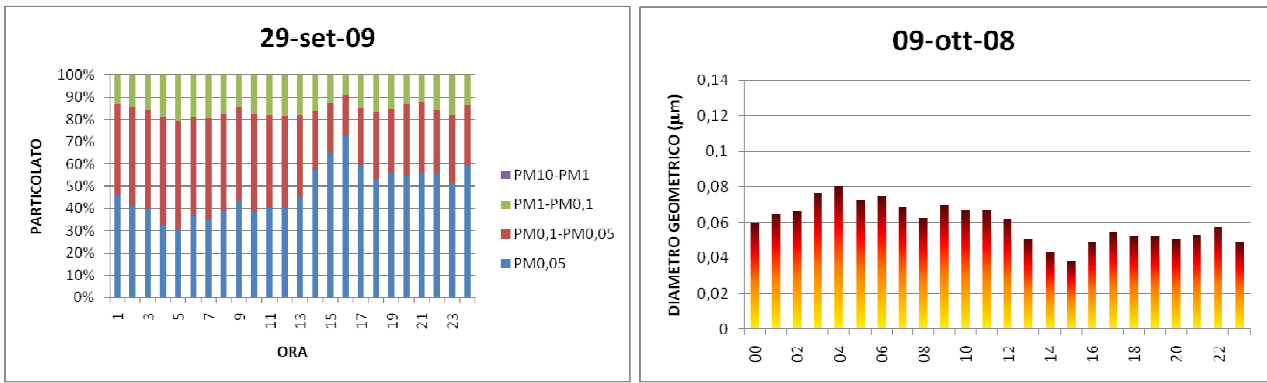


Figura 109 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno martedì 29 settembre 2009, sito Pascal.

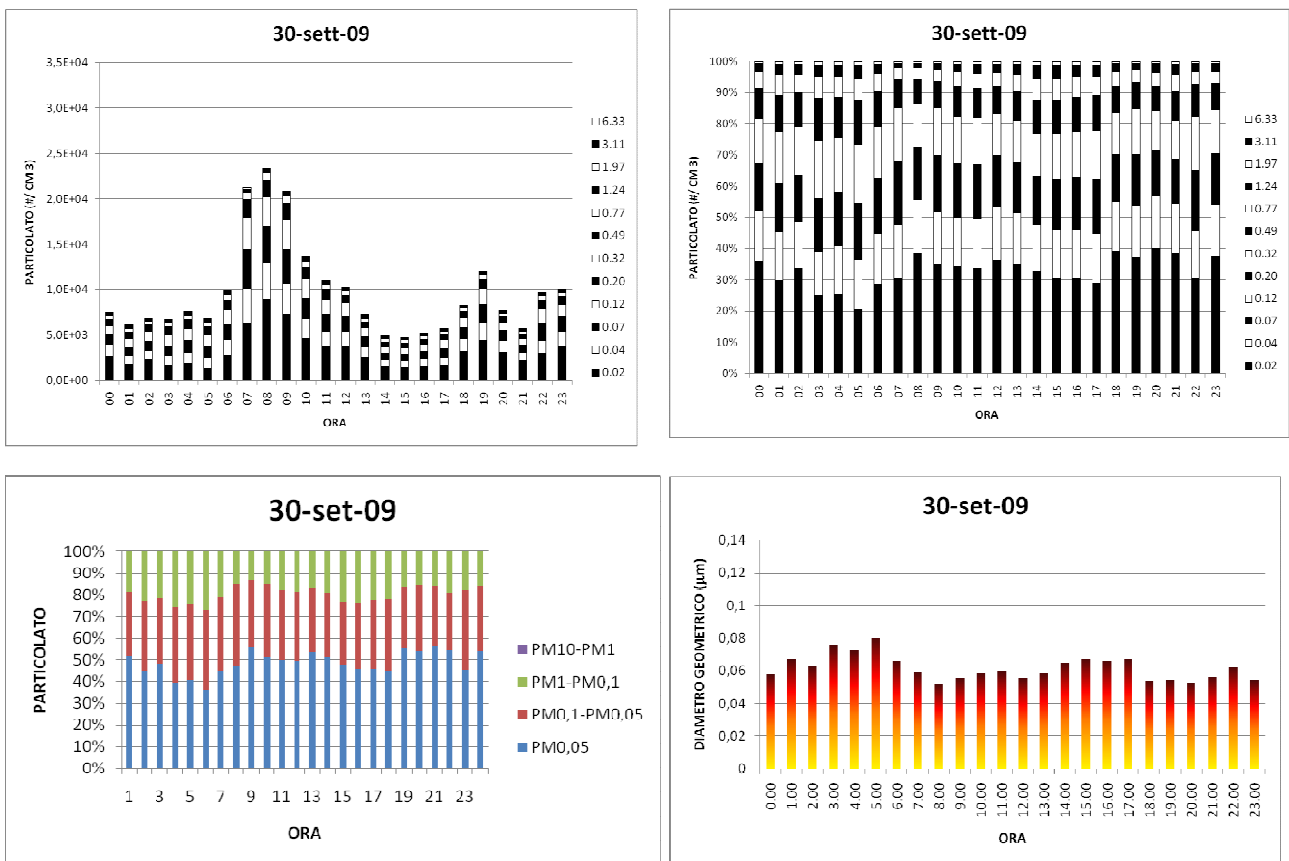


Figura 110 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 30 settembre 2009, sito Pascal.

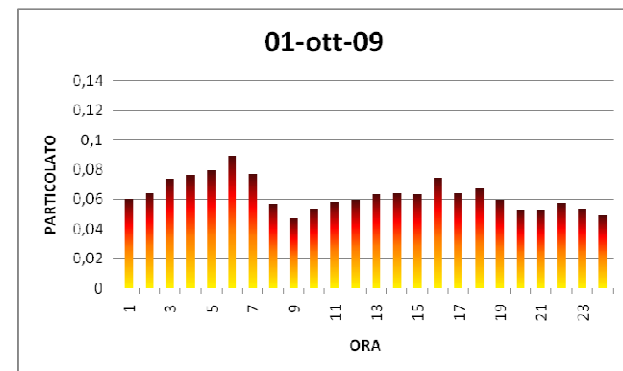
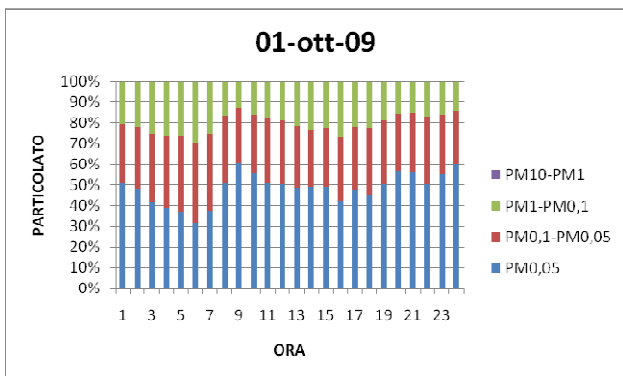
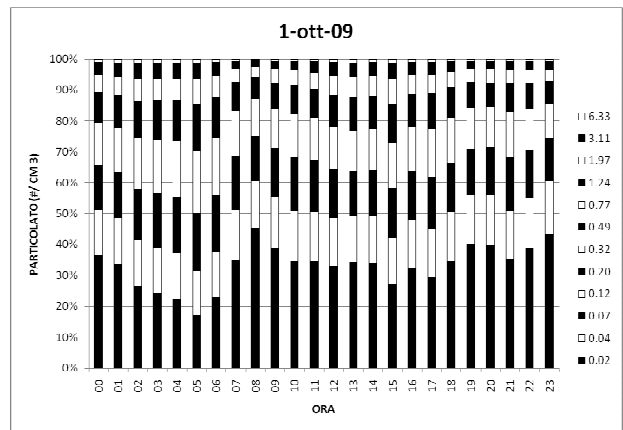
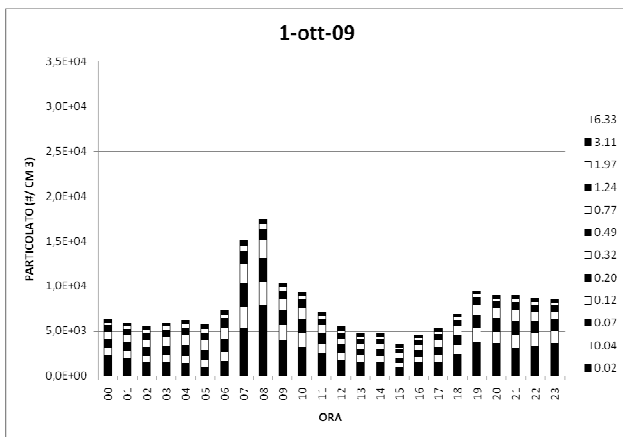
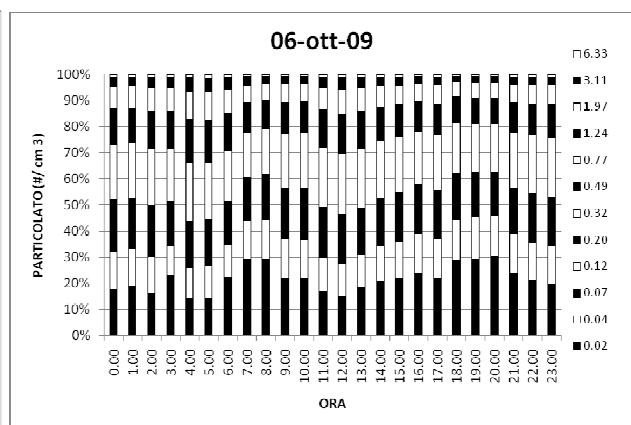
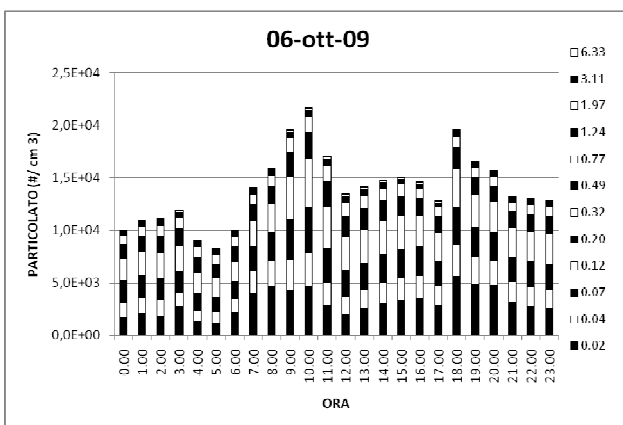


Figura 111 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 1 ottobre 2009, sito Pascal.



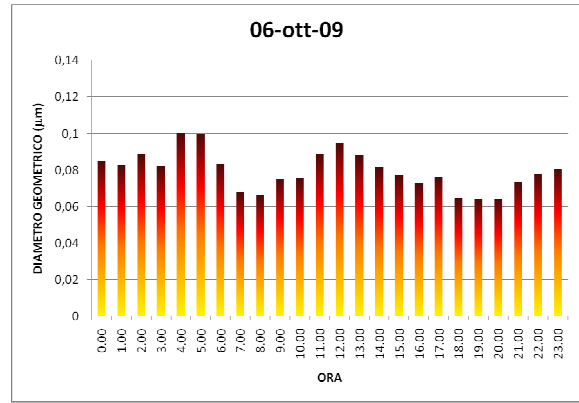
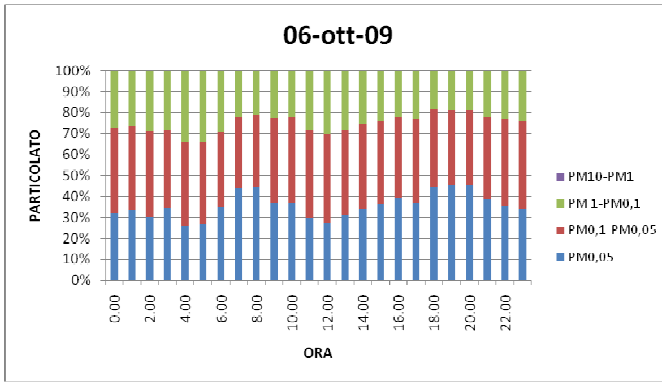


Figura 112 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno martedì 6 ottobre 2009, sito Pascal.

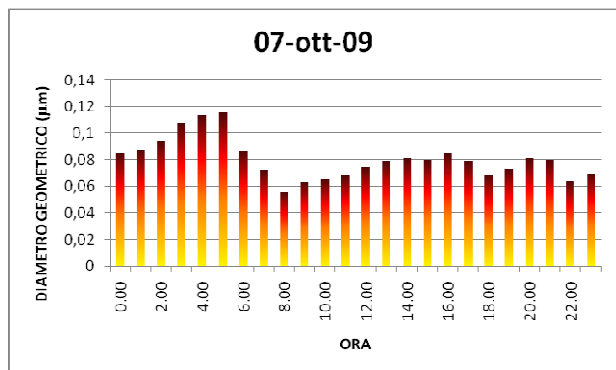
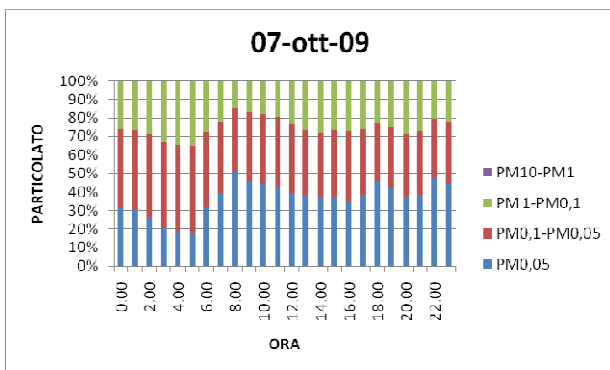
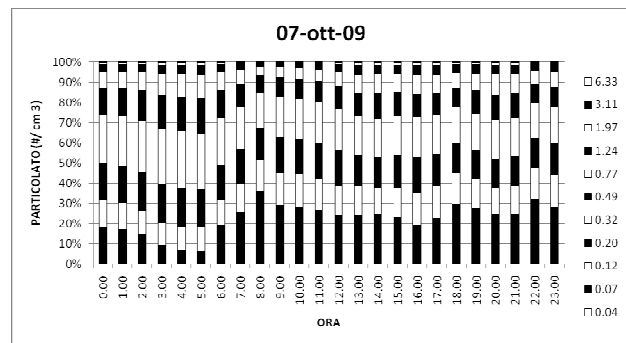
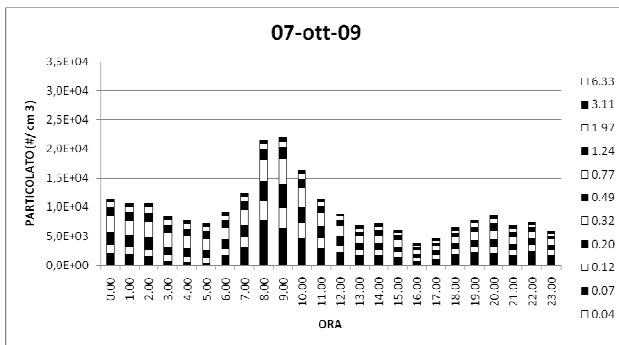


Figura 113 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 7 ottobre 2009, sito Pascal.

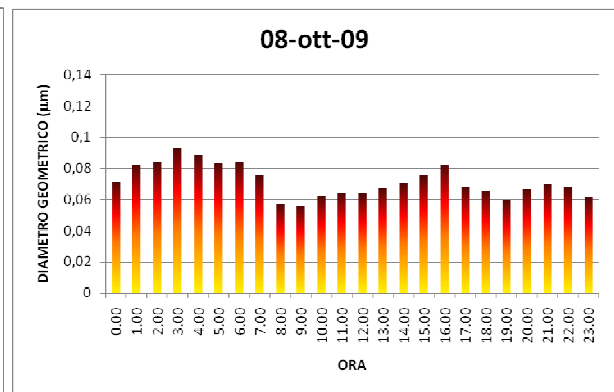
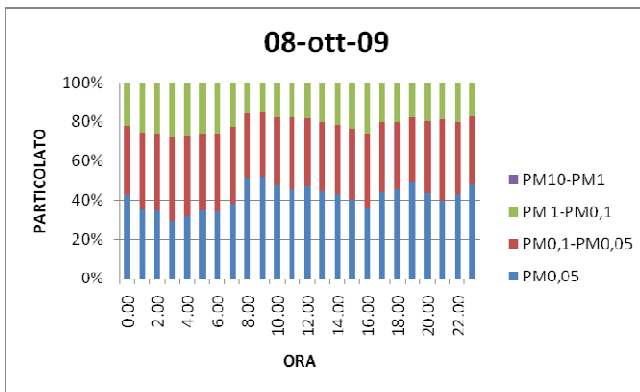
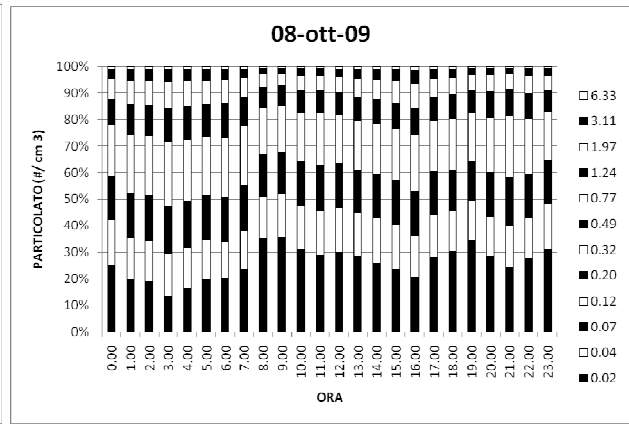
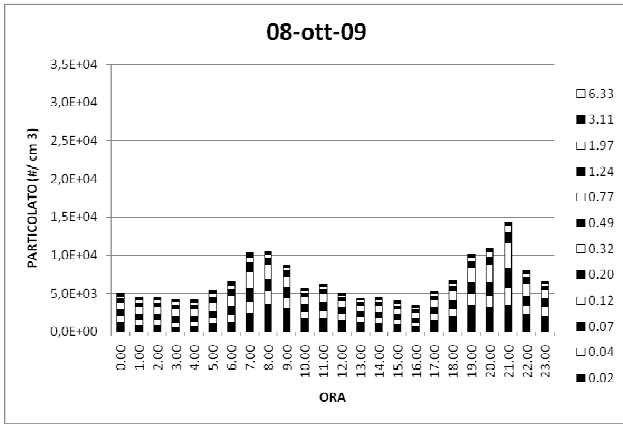
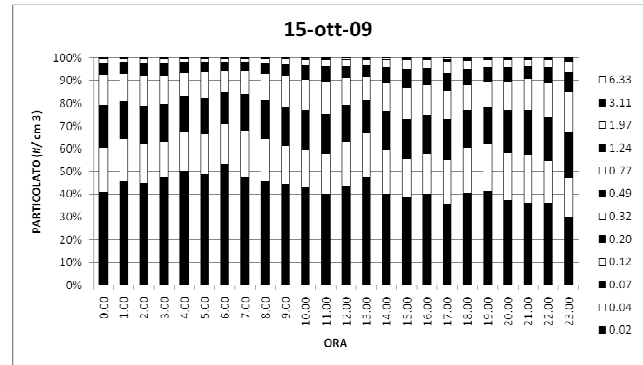
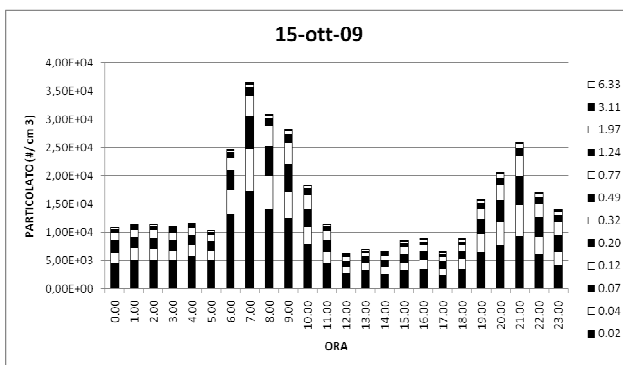


Figura 114 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 8 ottobre 2009, sito Pascal.



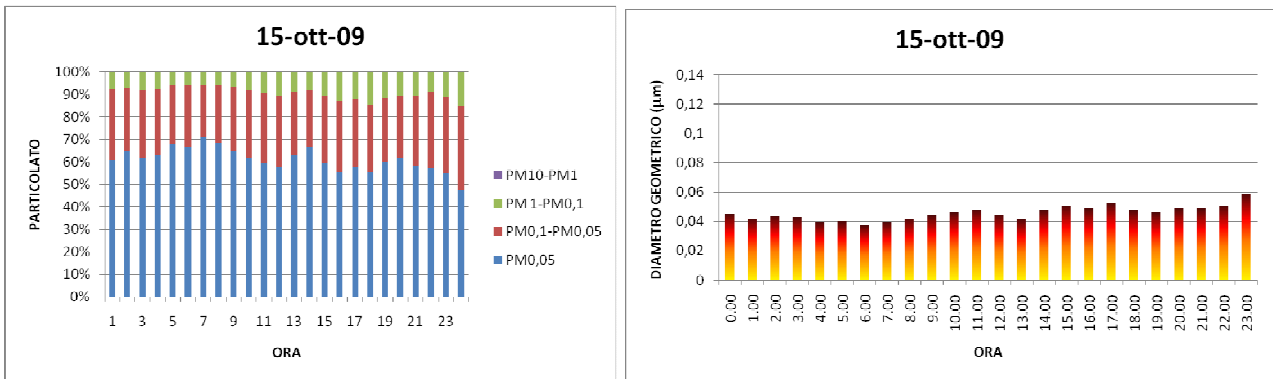


Figura 115 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 15 ottobre 2009, sito Pascal.

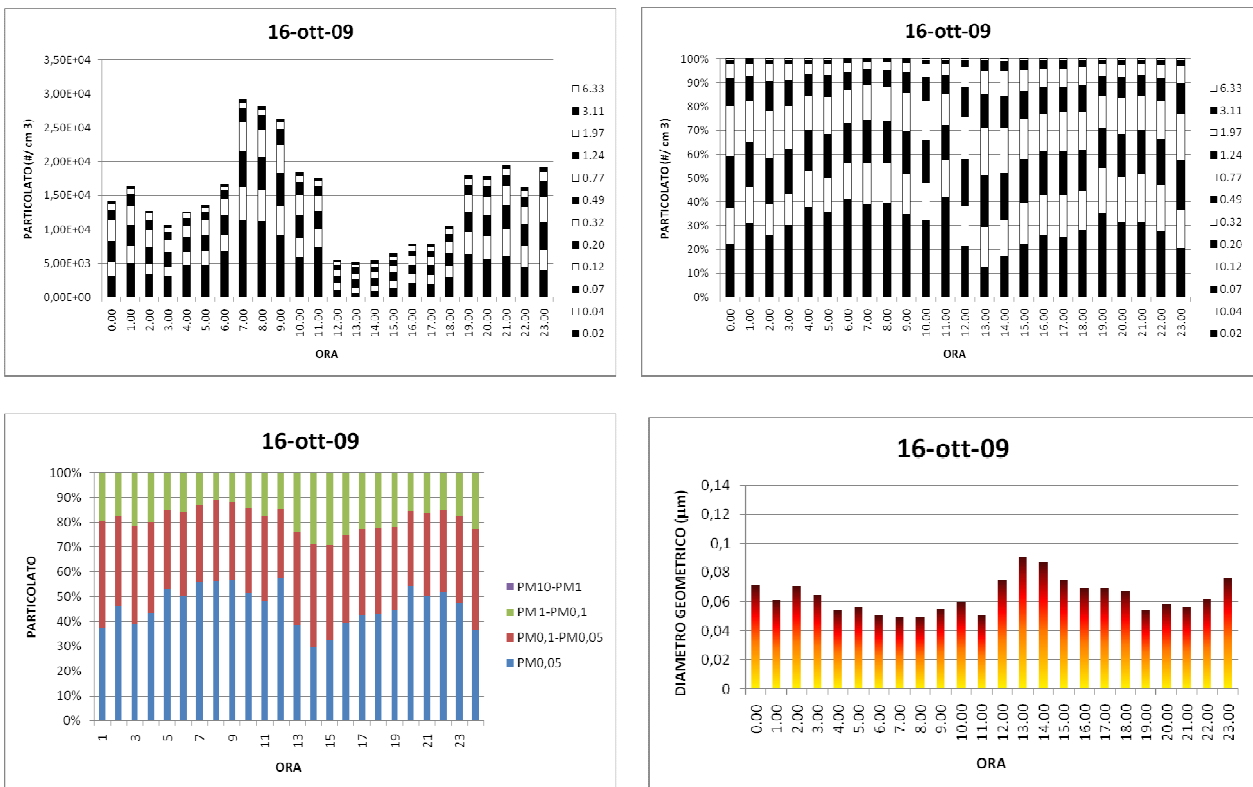


Figura 116 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno venerdì 16 ottobre 2009, sito Pascal.

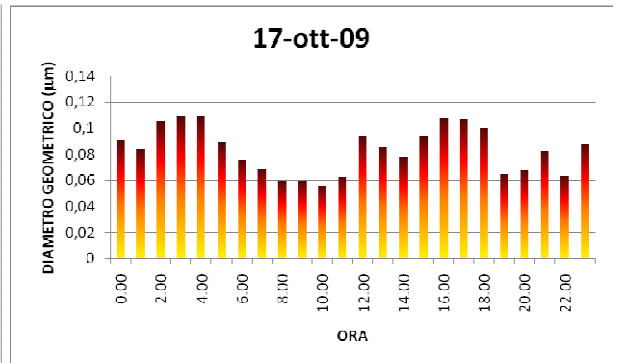
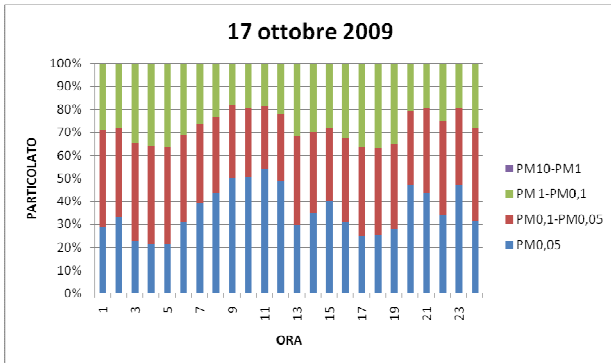
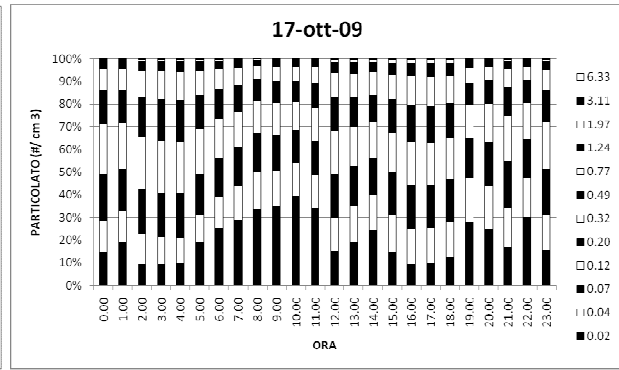
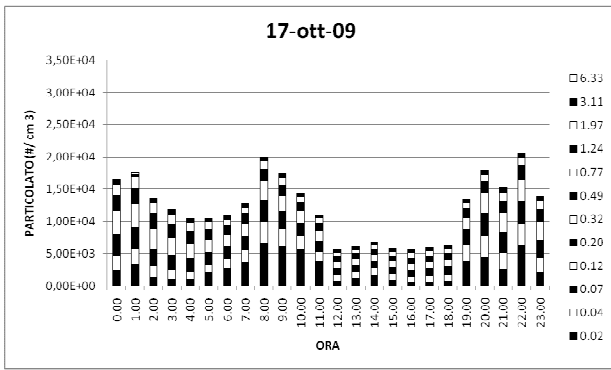
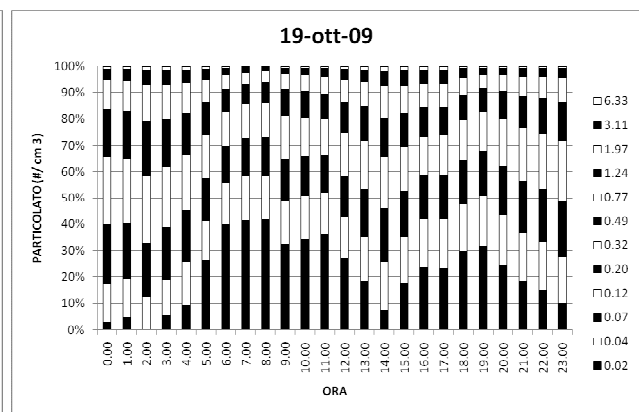
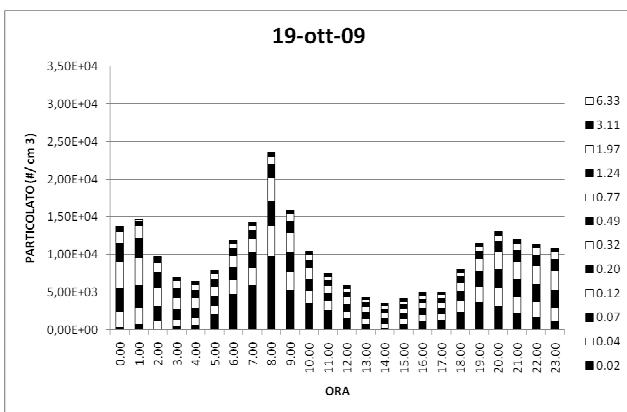


Figura 117 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno sabato 17 ottobre 2009, sito Pascal.



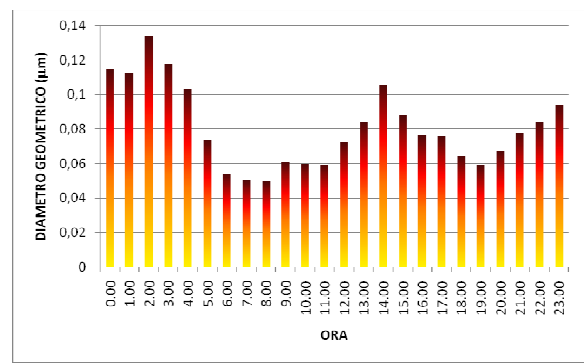
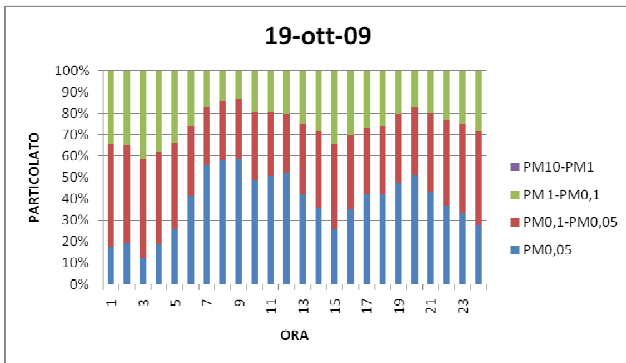


Figura 118 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno lunedì 19 ottobre 2009, sito Pascal.

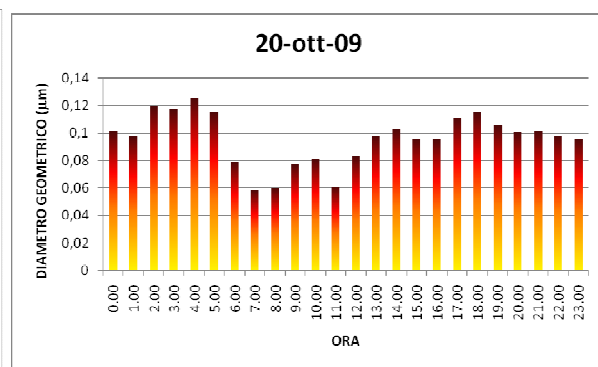
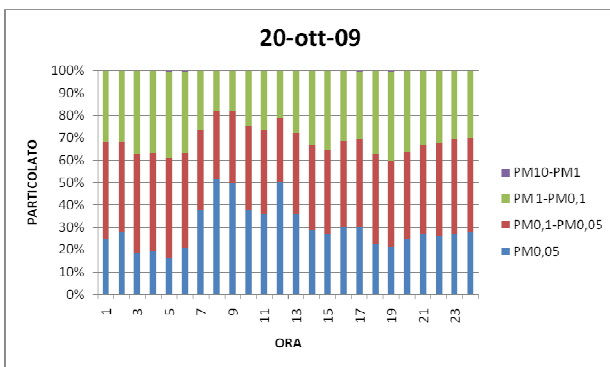
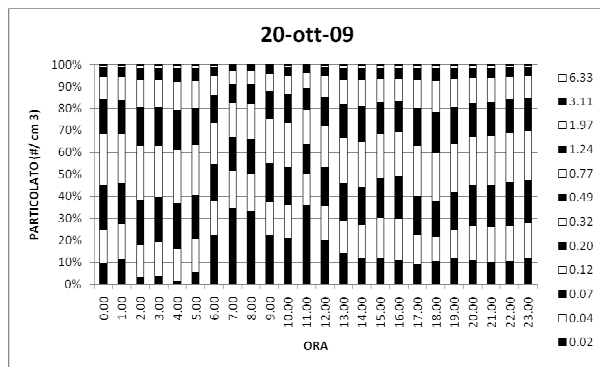
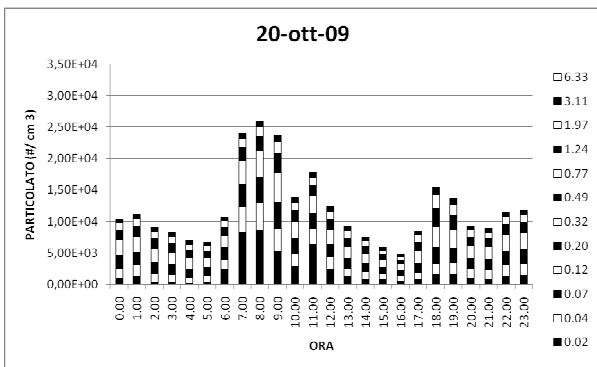


Figura 119 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno martedì 20 ottobre 2009, sito Pascal.

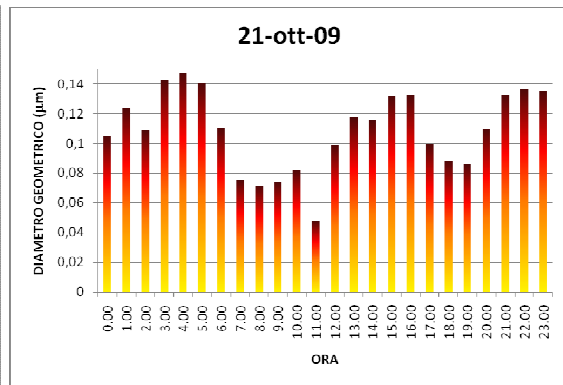
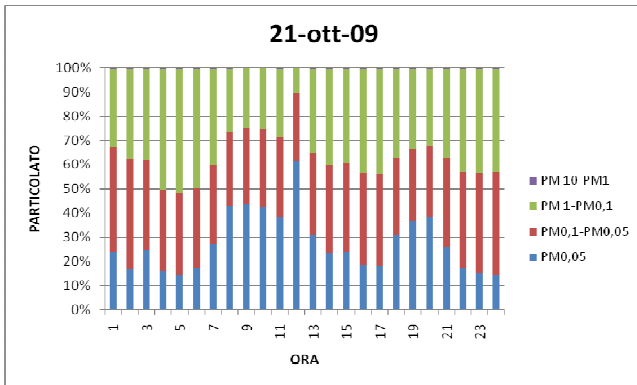
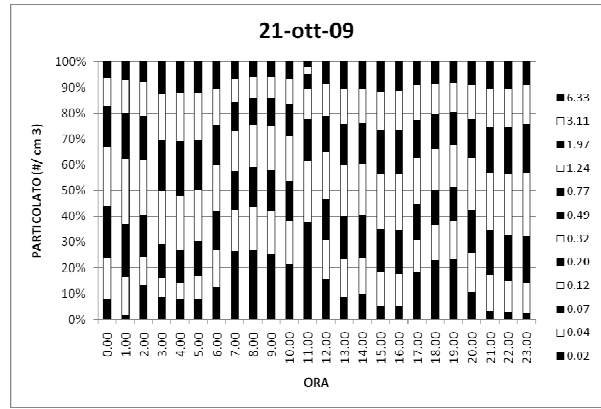
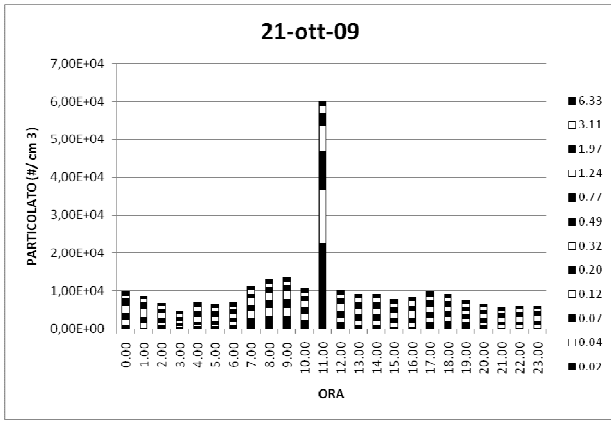
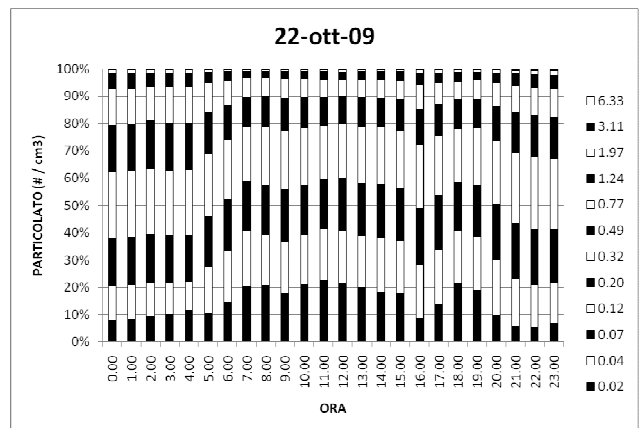
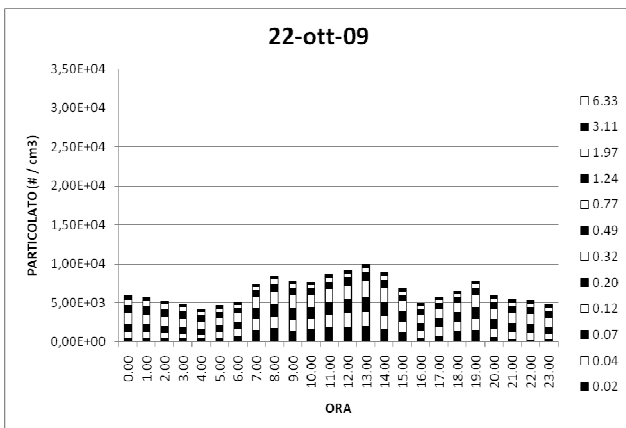


Figura 120 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 21 ottobre 2009, sito Pascal (giorno di pioggia).



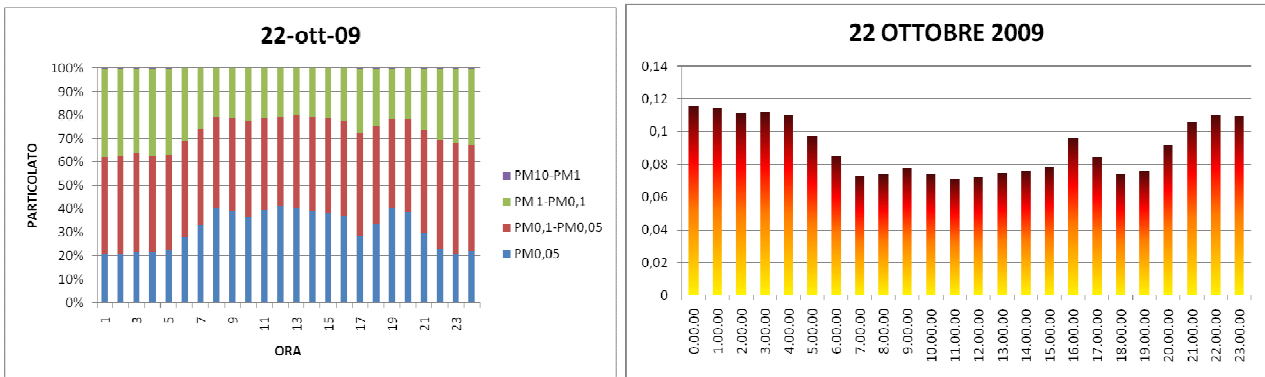


Figura 121 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 22 ottobre 2009, sito Pascal (giorno di pioggia).

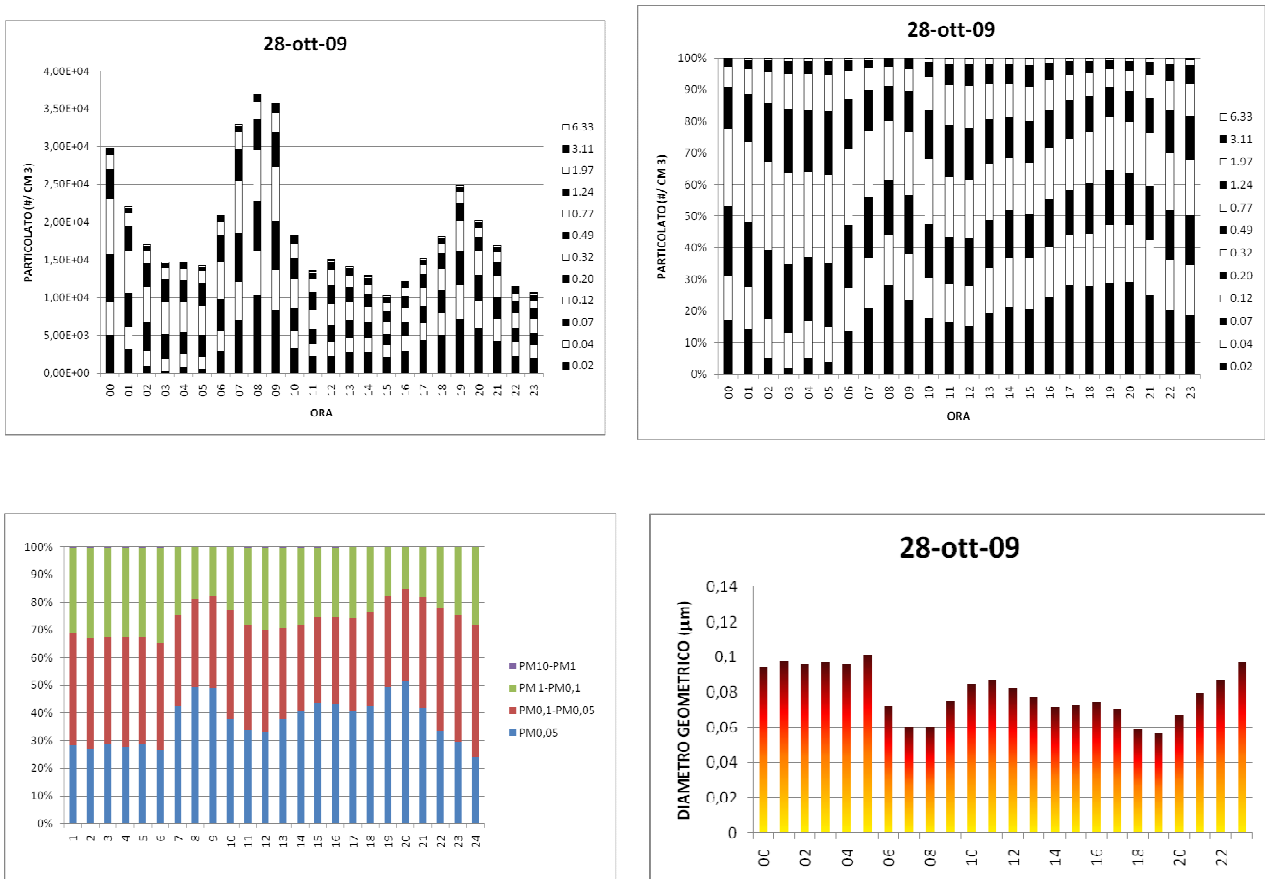


Figura 122 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno mercoledì 28 ottobre 2009, sito Pascal.

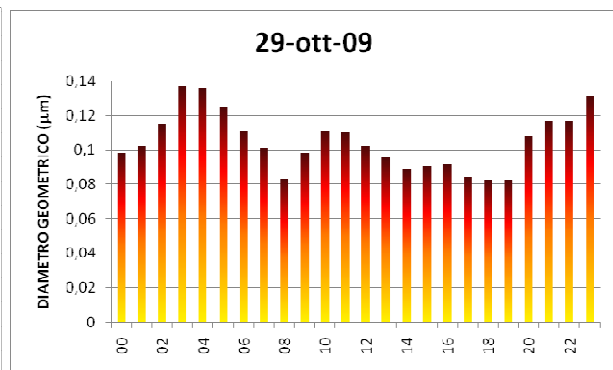
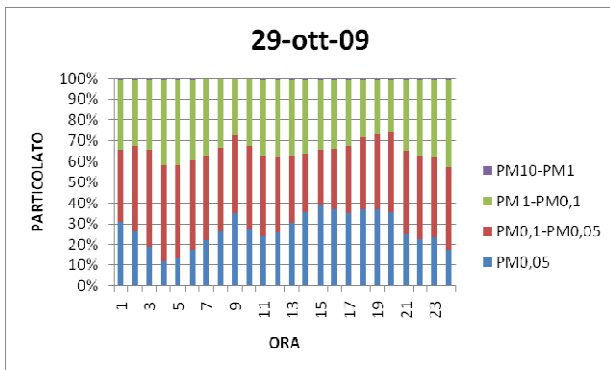
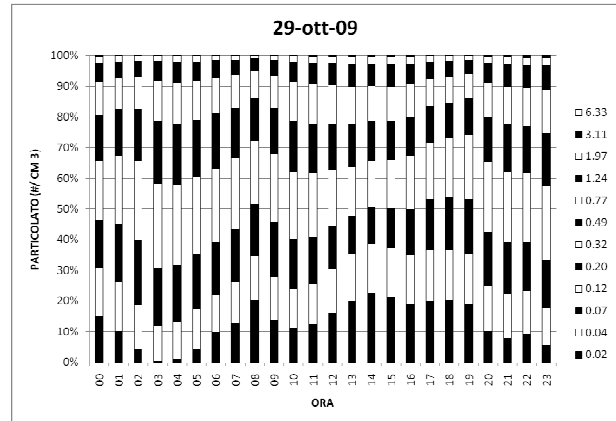
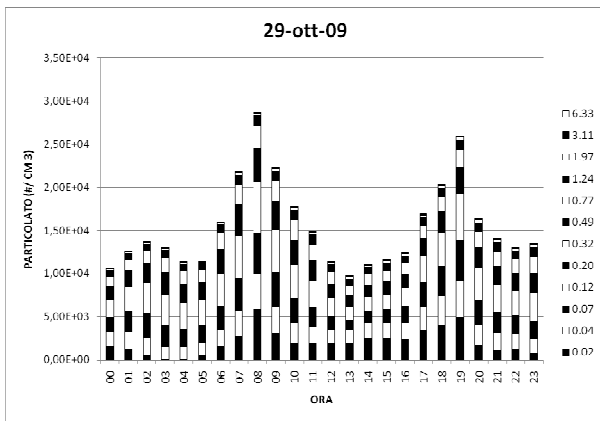


Figura 123 - Andamento del profilo di concentrazione numerica totale di particolato, evoluzione giornaliera della distribuzione % dei contributi di ogni stadio dell'ELPI e dei contributi di classe aggregate di particolato e andamento del diametro medio geometrico per il giorno giovedì 29 ottobre 2009, sito Pascal.

II. CONFRONTO FRA CONCENTRAZIONI DI PARTICOLATO E CONCENTRAZIONI DI ALTRI INQUINANTI

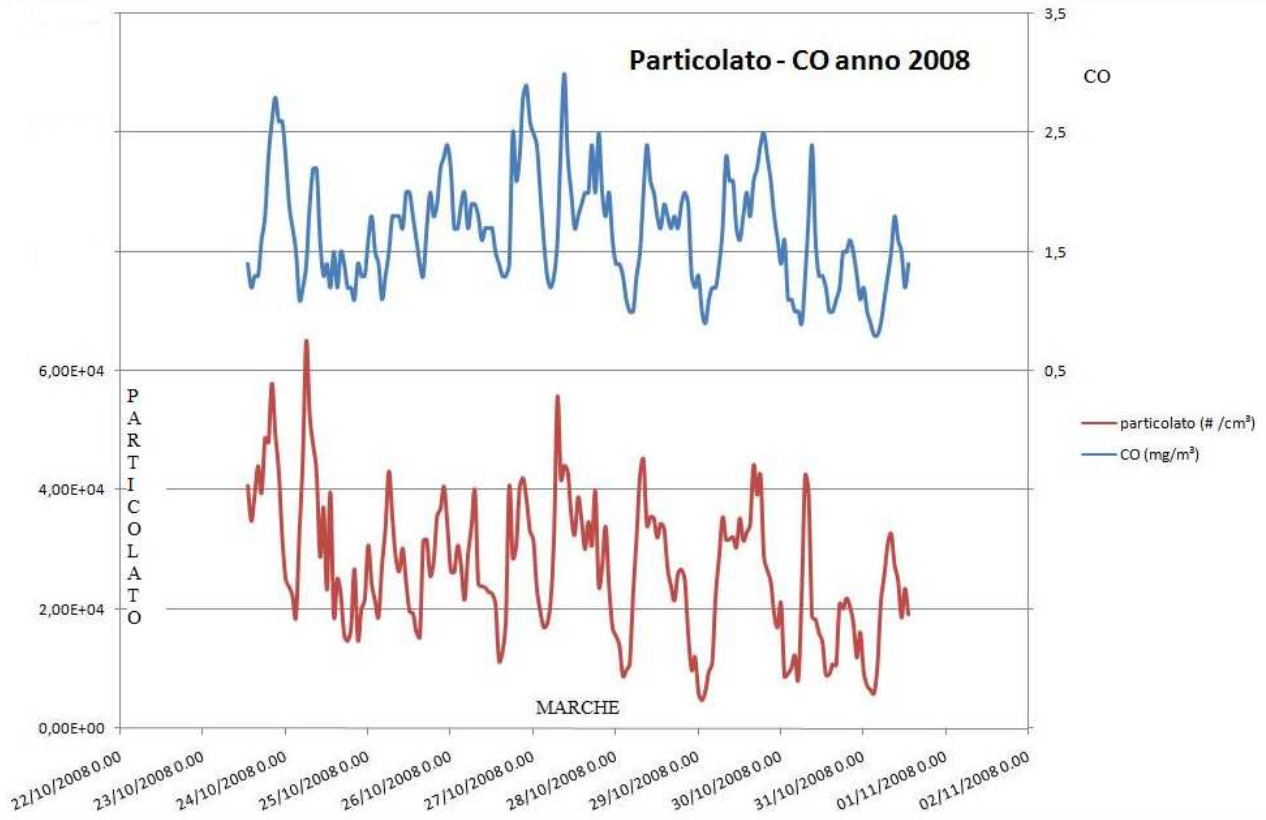


Figura 124 – Confronto fra concentrazioni numeriche di particolato e CO, anno 2008, sito Marche.

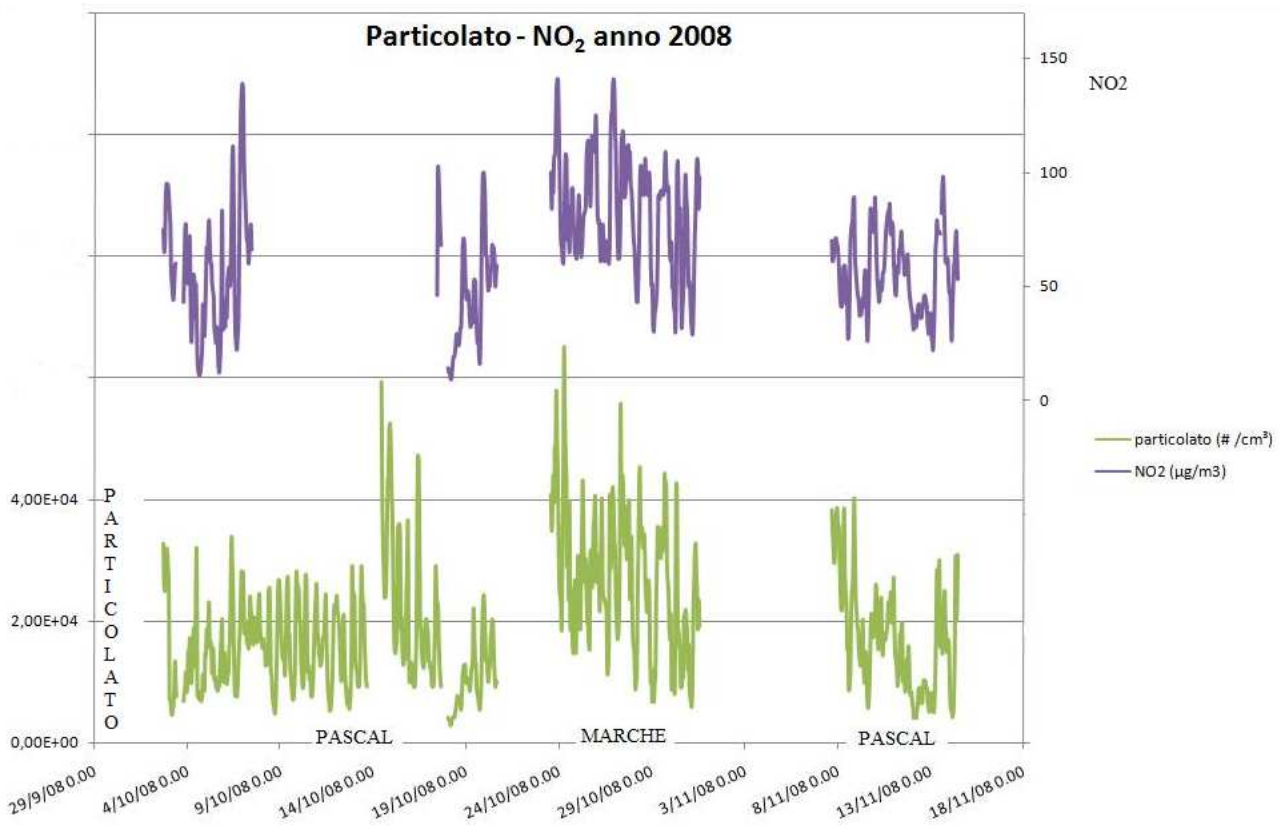


Figura 125 – Confronto fra la concentrazioni numerica di particolato e NO₂ per i siti di Pascal e Marche, anno 2008.

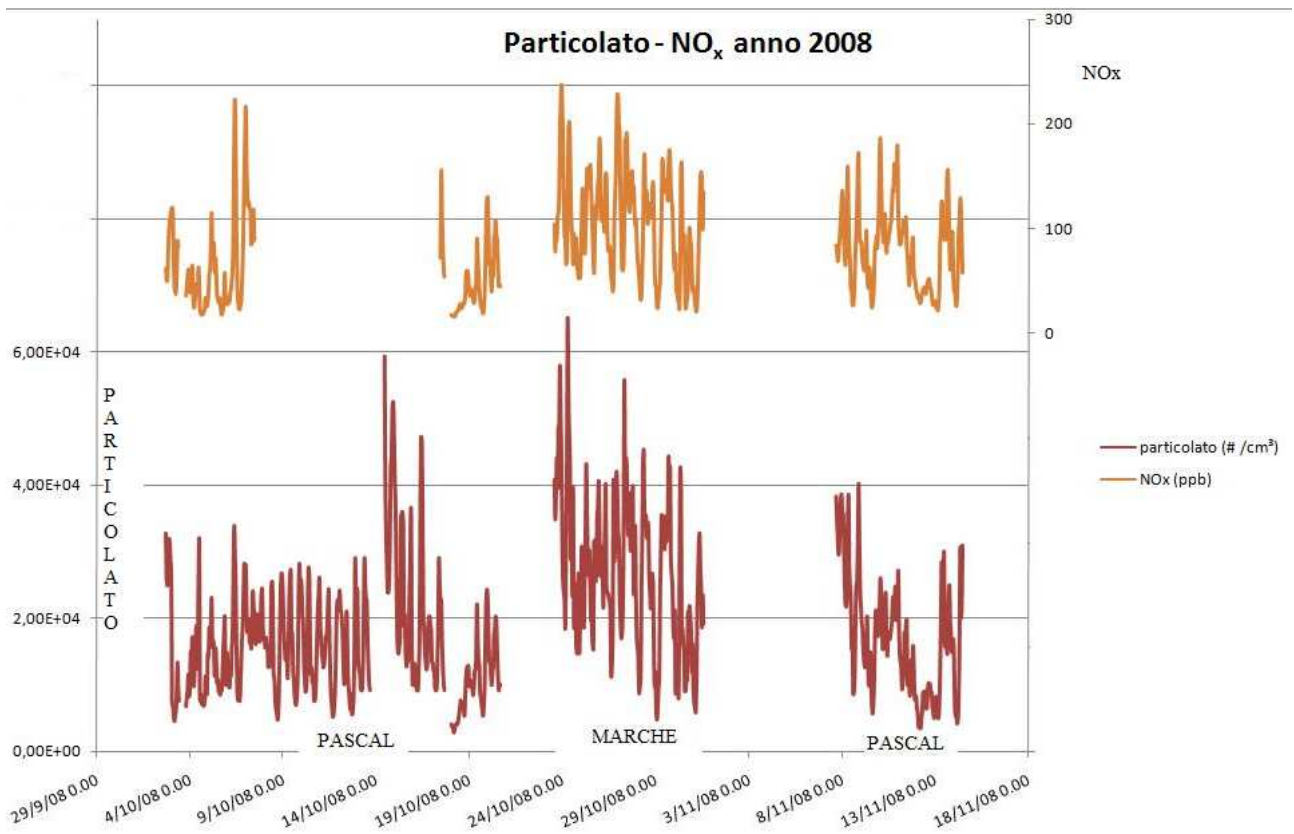


Figura 126 – Confronto fra la concentrazioni numerica di particolato e NO_x per i siti di Pascal e Marche, anno 2008.

BIBLIOGRAFIA

Agenzia Mobilità e Ambiente, Rapporto sulla mobilità urbana (2003-2005)

ANCI, I sindaci contro le polveri sottili (19 febbraio 2010)

Anderson HR et al., Meta-analysis of time series studies and panel studies of particulate matter (PM) and ozone (O₃). Report of a WHO task group, WHO Regional Office for Europe (2004)
Disponibile all'indirizzo: <http://www.euro.who.int/document/e82792.pdf>.

Silvana Angius et Al., Rapporto sulla qualità dell'aria di Milano e provincia, ARPA (2008)

Baron, Willeke, Aerosol measurement: principles, techniques and applications, Wiley Interscience (2001)

W. H. Bassett, Clay's handbook of environmental health, Routledge (1999)

Amaya Castro, Elisabeth Alonso-Blanco et Al., Aerosol size distribution in precipitation events in León, Spain (2010)

Cernuschi, Giugliano, Grosso, Lonati, Il particolato fine in atmosfera, Cipa Editore (2007)

Brown et Al., Ultrafine particles in the atmosphere, London (2003)

W. F. Chen, J. Y. Richard Liew, The civil engineering handbook, second edition, CRC Press (2003)

Paul Cheremisinoff, Air particulate instrumentation and analysis, Ann Arbor Science (1983)

B. Daresta et Al., Il particolato atmosferico, inquinanti vecchi e nuovi, ARPA (2009)

EPA, Guidance for using continuous monitors in PM_{2,5} monitoring networks (1998)

EPA, Air Quality Criteria for Particulate Matter (1999)

B. Gomiscek et Al., Spatial and temporal variations of PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀ and particle number concentration during the AUPHEP—project (2004).

T. Hussein et Al., Urban aerosol number size distributions, European Geosciences Union (2003)

Kittelson, D.B. Engines and Nanoparticles: A Review, J. Aero. Sci., 29, 575-588 (1998).

Laaksonen et Al., Cloud condensation nucleus production from nucleation events at a highly polluted region, Geophysical Research Letter (2005)

Jim J. Lin, Lien-Chih Lee, Characterization of the concentration and distribution of urban submicron (PM₁) aerosol particles (2004)

G. M. Marcazzan et Al, Characterization of PM₁₀ and PM_{2.5} particulate matter in the ambient air of Milan (Italy), Atmosphere Environment; 35:4639-4650 (2001)

Marco Martuzzi et Al., Impatto sanitario di PM10 e ozono in 13 città italiane, APAT (2006)
Disponibile all'indirizzo: <http://www.apat.gov.it>.

Hiroaki Masuda, Ko Higashitani, Hideto Yoshida, Powder Technology Handling and operations, process instrumentation and working hazards, CRC Press (2007)

Douglas C. Montgomery, Progettazione e analisi degli esperimenti, McGraw-Hill (2005)

PARFIL, Il particolato atmosferico fine nella regione Lombardia: PM10, PM2.5 E PM1 nelle aree critiche e nelle aree di fondo della Lombardia (luglio 2003)
Disponibile all'indirizzo: http://www.disat.unimib.it/Chimamb/PARFIL/PARFIL_pubblico.pdf

Rosenfeld et Al., Flood or Drought: How do aerosol affect precipitation?, Science (2008)

C.Sala et Al., Evoluzione nella conoscenza del particolato atmosferico: elementi per valutazioni tossicologiche ed epidemiologiche, ARPA (2006)

Warl B. Schinelle, C. A. Brown, Air pollution control technology handbook, CRC Press (2002)

John G. Watson, Judith C. Chow et Al., Nanoparticle and Ultrafine Particle Events at the Fresno Supersite (2006)

WHO, Particulate matter air pollution: how it harms health, Berlin (2005)

Geller et al, Measurement of particle number and mass concentrations in a Roadway tunnel environment, Environmental Science and Technology (2006)

Donaldson et al, Particle and fiber Toxicol. (2005)

S. A. Cormier, Origin and health impacts of emission of toxic by-products and fine particles from combustion and thermal treatment of hazardous wastes and materials, Environmental health perspectives (2006)

Uve Matson, "Indoor and outdoor concentrations of ultrafine particles in some Scandinavian rural and urban areas", Science of The Total Environment (2005)

NSF Workshop Report on "Emerging Issues in Nanoparticle Aerosol Science and Technology (NAST)", University of California, Los Angeles (2003)

Peters et al, Respiratory Effects are Associated with the Number of Ultrafine Particles, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, Vol.155, Issue 4, 1376-1383 (1997)

Woo, K.S., Chen, D.R., Pui, D.Y.H., and McMurry, P.H., Measurement of Atlanta Aerosol Size Distributions: Observation of Ultrafine Particles Events, Aerosol Science and Technology (2001)

Zhu, Y., Hinds, W.C., Kim, S., Shen, S. and Sioutas, C., Study on Ultrafine Particles and other Vehicular Pollutants near a Busy Highway. Atmospheric Environment. 36, 4375-4383 (2002)

Cass, G.R., Hughes, L.S., Bhave, P., Kleeman, M.J., Allen, J.O. and Salmon, The Chemical Composition of Atmospheric Ultrafine Particles, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 358(1775), 2581-2592 (2000).

LS. Hughes, G.R. Cass, J. Gove, M. Ames, I. Olmez., Physical and chemical characterization of atmospheric ultrafine particles in the Los Angeles area, *Environ Sci Technol*. 32: 1153-61. (1998).

J. Cyrys, M. Stolzel, J. Heinrich, W.G. Kreyling, N. Menzel, K. Wittmaack, et al., Elemental composition and sources of fine and ultrafine ambient particles in Erfur, Germany, *Sci Tot Environ*. 305: 143-56. (2003).

Marconi., Materiale particellare aerodisperso: definizioni, effetti sanitari, misura e sintesi delle indagini ambientali effettuate a Roma, *Istituto Superiore della Sanità*. 39: 329-42. (2003).

G.B. Bartolucci, D. Cottica. Caratterizzazione degli inquinanti aerodispersi e valutazione dell'esposizione. *G Ital Med Erg*. 3: 252-7 (2006).

Aalto P, K. Hämeri, P. Paatero, M. Kulmala, T. Bellander, N. Berglind, L. Bouso, G. Castaño-Vinyals, G. Cattani et Al. Aerosol particle number concentration measurements in five European cities using TSI-3022 condensation particle counter over a three year period during HEAPSS (Health Effects of Air Pollution on Susceptible Subpopulations). *Journal of the Air and Waste Management Association*. (2006).

Marconi A, Menichini E, Ziemacki G, Cattani G e Stacchini G. Misure di materiale particellare PM10 e PM2,5 nell'atmosfera di Roma. *Ann. Ist. Super. Sanità*, 36(3):285-289 (2000)

Paoletti L., Barbara de Berardis e Lorenzo Arrizza, Inquinamento da polveri e da particolato fino in siti con differenti caratteristiche ambientali *Ann Ist Super Sanità*; 39(3):381-385 (2003).

Viviano Giuseppe e Settimo Gaetano, Normativa sulla qualità dell'aria e recepimento delle direttive della Unione Europea. *Ann Ist Sanità*; 39(3): 343- 350 (2003)

Lollobrigida et Al., Determinazione della concentrazione numerica di particelle aerodisperse in un sito urbano da traffico della città di Torino, Arpa Piemonte

OMS, Air Quality Guidelines - Second Edition - Particulate matter (2000)

Vanes Poluzzi et Al., Monitoraggio ambientale di polveri ultrafine e nano particelle, ARPA Emilia Romagna (2006)

Pohjola et al., Evaluation and modelling of aerosol measurements, *Atmos. Chem. Phys.* (2007)

De Hartog JJ, Hoek G, Peters A, Timonen KL, Ibaldo-Mulli A, Brunekreef B, Heinrich J, Tiittanen P, van Wijnen JH, Kreyling W, Kulmala M, Pekkanen, Effects of Fine and Ultrafine Particles on Cardiorespiratory Symptoms in Elderly Subjects with Coronary Heart Disease - The ULTRA Study, *American Journal of Epidemiology*, vol. 157 n. 7.

N. Hudda, K. Cheung, K. F. Moore, and C. Sioutas, Inter-community variability in total particle number concentrations, Copernicus Publications (2010)

Manisha Singh, Harish C. Phuleria, Kenneth Bowers and Constantinos Sioutas, Seasonal and spatial trends in particle number concentrations and size distributions at the children's health study sites in Southern California, *Journal of Exposure and Environmental Epidemiology* (2006)

Francesca Dominici, Roger D. Peng, Michelle L. Bell, Luu Pham, Aidan McDermott, Scott L. Zeger, Jonathan M. Samet, Fine Particulate Air Pollution and Hospital Admission for Cardiovascular and Respiratory Diseases, MD - *JAMA* (2006)

Hamed, A, J. Joutsensaari, S. Mikkonen, L. Sogacheva, M. Dal Maso, M. Kulmala, F. Cavalli, S. Fuzzi, M.C. Facchini, S. Decesari, M. Mircea, K.E.J. Lehtinen and A. Laaksonen, Nucleation and growth of new particles in Po Valley, Italy *Atmos. Chem. Phys.* (2006)

Fuzzi, Andreae, Huebert, Kulmala, Bond, Boy, Doherty, Guenther, Kanakidou, Kawamura, Kerminen, Lohmann, Russell and Pöschl, Critical assessment of the current state of scientific knowledge, terminology, and research needs concerning the role of organic aerosols in the atmosphere, climate, and global change. *Atmos. Chem. Phys.* (2006)

F. Costabile, W. Birmili, S. Klose, T. Tuch, B. Wehner, A. Wiedensohler, U. Franck, K. König, and A. Sonntag, Spatio-temporal variability and principal components of the particle number size distribution in an urban atmosphere, *Atmos. Chem. Phys. Disc.* (2008)

Hitchins, J., Morawska, L., Wolff, R., Gilbert, Concentrations of submicrometre particles from vehicle emissions near a major road, *Atmospheric environment* (2000)

Ziemba, Griffin and Talbot, Observation of elevated particle number concentration events at a rural site in New England, *Journal of Geophysical Research*, vol. 111 (2006)