

Analisi della qualità dell'aria nella zona di Bagnoli (Napoli) mediante Speciazione delle PM₁₀ e delle PM_{2,5}

Relazione di aggiornamento – periodo 24 febbraio – 16 luglio 2026

Interpretazione delle sorgenti sulla base dei dati della campagna di monitoraggio (circa cinque mesi)

1. Periodo di analisi e carattere dei dati

Le elaborazioni presentate si riferiscono ai dati ottenuti dai filtri campionati tra il 24 febbraio e il 16 luglio 2026 nell'ambito della campagna di monitoraggio con laboratorio mobile che è in corso nell'area di Bagnoli. Il laboratorio è stato installato presso la Città della Scienza e include un campionatore automatico e sequenziale a due canali FAI Hydra con cui è stato effettuato il campionamento. Durante questo periodo sono stati analizzati 130 campioni giornalieri concomitanti di PM₁₀ e PM_{2,5} su 143 giorni di calendario (copertura del 91%); i 13 giorni privi di campione sono distribuiti in sette brevi interruzioni e non alterano la rappresentatività della serie.

Rispetto alla relazione precedente, riferita al solo primo mese (24 febbraio – 25 marzo 2026, 29 campioni), il periodo analizzato comprende le condizioni tardo-invernali, primaverili e della prima parte dell'estate. Ciò consente di valutare la variabilità stagionale delle concentrazioni, di verificare la stabilità delle componenti individuate con l'analisi multivariata e di rivedere le interpretazioni preliminari. Il periodo resta comunque inferiore all'anno solare: il confronto con i limiti annuali del D.Lgs. 155/2010 e s.m.i. ha pertanto valore esclusivamente indicativo.

2. Metodi analitici e trattamento dei dati

I campioni giornalieri di PM₁₀ e PM_{2,5} sono stati sottoposti ad analisi chimica per la determinazione di metalli, specie ioniche, carbonio elementare (EC), carbonio organico (OC), levoglucosano e, per il PM₁₀, idrocarburi policiclici aromatici (IPA). Le determinazioni dei metalli sono state effettuate secondo la norma **UNI EN 14902:2005** mediante tecniche ICP-MS conformi alla **UNI EN ISO 17294-2**, mentre le specie ioniche sono state determinate secondo il **DM 5 maggio 2015** (Allegato I). Il carbonio organico ed elementare è stato determinato secondo la norma **UNI EN 16909:2017**, il levoglucosano secondo la **CEN/TS 18044:2024** e gli IPA secondo la **UNI EN ISO 11338-2:2021**. Le concentrazioni di massa di PM₁₀ e PM_{2,5} sono quelle rilevate dallo strumento Palas installato nel laboratorio mobile (valori giornalieri), mentre le determinazioni chimiche sono eseguite sui filtri campionati. Per il PM₁₀ è stato inoltre effettuato un bilancio di massa (par. 4.5), confrontando la massa ricostruita dalle specie chimiche determinate con la massa misurata dallo strumento Palas.

Ai fini dell'elaborazione statistica sono stati utilizzati i dati analitici in forma grezza, comprensivi dei valori inferiori al limite di quantificazione. L'analisi multivariata è stata effettuata mediante **Principal Component Analysis (PCA)** applicata separatamente alle frazioni PM₁₀ e PM_{2,5}. Prima dell'elaborazione le variabili sono state standardizzate mediante trasformazione z-score; i limitati valori mancanti sono stati sostituiti con il valore medio della rispettiva variabile. La variabile temporale (**Campione/Data**) e le concentrazioni massiche di PM₁₀ e PM_{2,5} non sono state incluse tra le variabili della PCA, che è stata applicata esclusivamente alle specie chimiche determinate

3. Introduzione all'analisi della frazione PM₁₀ e PM_{2,5}

L'area di Bagnoli è caratterizzata da una geomorfologia costiera a matrice prevalentemente sabbiosa e da una lunga storia di attività industriali, in particolare siderurgiche. Il particolato atmosferico, nelle frazioni grossolana e fine, integra contributi di sorgenti emissive attuali e di processi di rimaneggiamento di materiali depositati al suolo.

La frazione PM₁₀ (diametro aerodinamico $\leq 10 \mu\text{m}$) include sia la componente fine sia quella grossolana ed è fortemente influenzata da processi meccanici, quali la risospensione di materiale superficiale, oltre che da emissioni dirette. La frazione PM_{2,5} ($\leq 2,5 \mu\text{m}$) è prevalentemente costituita da particolato fine associato a combustione e formazione di aerosol secondario. Le due frazioni sono quindi complementari e la loro analisi congiunta consente di descrivere le interazioni tra suolo, atmosfera e attività antropiche.

La relazione ha l'obiettivo di: aggiornare il quadro delle concentrazioni e dei superamenti; descrivere la composizione media del PM₁₀ mediante bilancio di massa; ricalcolare l'analisi delle componenti principali (PCA) sull'intero periodo, separatamente per PM₁₀ e PM_{2,5}; confrontare i risultati con quelli del primo mese.

4. Campionamento e risultati analitici

4.1 Campionamento

Sono stati analizzati campioni giornalieri concomitanti di PM₁₀ e PM_{2,5}, ciascuno ottenuto mediante campionamento di circa 55 m³ di aria in 24 ore, secondo le metodiche standard previste per il monitoraggio della qualità dell'aria. Per ogni campione sono state determinate 60 specie chimiche nel PM₁₀ (metalli, ioni, IPA, carbonio elementare e organico, levoglucosano) e 42 nel PM_{2,5} (metalli, ioni, carbonio elementare e organico, levoglucosano).

4.2 Andamento delle concentrazioni di PM₁₀ e PM_{2,5}

La Tabella 1 riporta le statistiche descrittive dei due parametri sull'intero periodo; i valori di massa sono quelli misurati dallo strumento Palas del laboratorio mobile.

Tabella 1: statistiche descrittive di PM₁₀ e PM_{2,5} (24 febbraio – 16 luglio 2026).

Indicatore	PM ₁₀	PM _{2,5}
N. campioni giornalieri	130	130
Media ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	40,3	14,6
Mediana ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	40,6	14,0
Deviazione standard ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	14,6	6,7
Minimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	3,1	1,2
25° percentile ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	30,5	9,8
75° percentile ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	51,5	18,1

Massimo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	67,7 (23 giugno)	34,7 (8 marzo)
Giorni > 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (limite giornaliero PM_{10})	35	—
Rapporto medio $\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$	0,37 (mediana 0,34; intervallo 0,21–0,68)	

Le due frazioni sono fortemente correlate ($r = 0,79$), con $\text{PM}_{2,5}$ pari in media a circa il 37% della massa del PM_{10} . L'andamento giornaliero è mostrato in Figura 1.

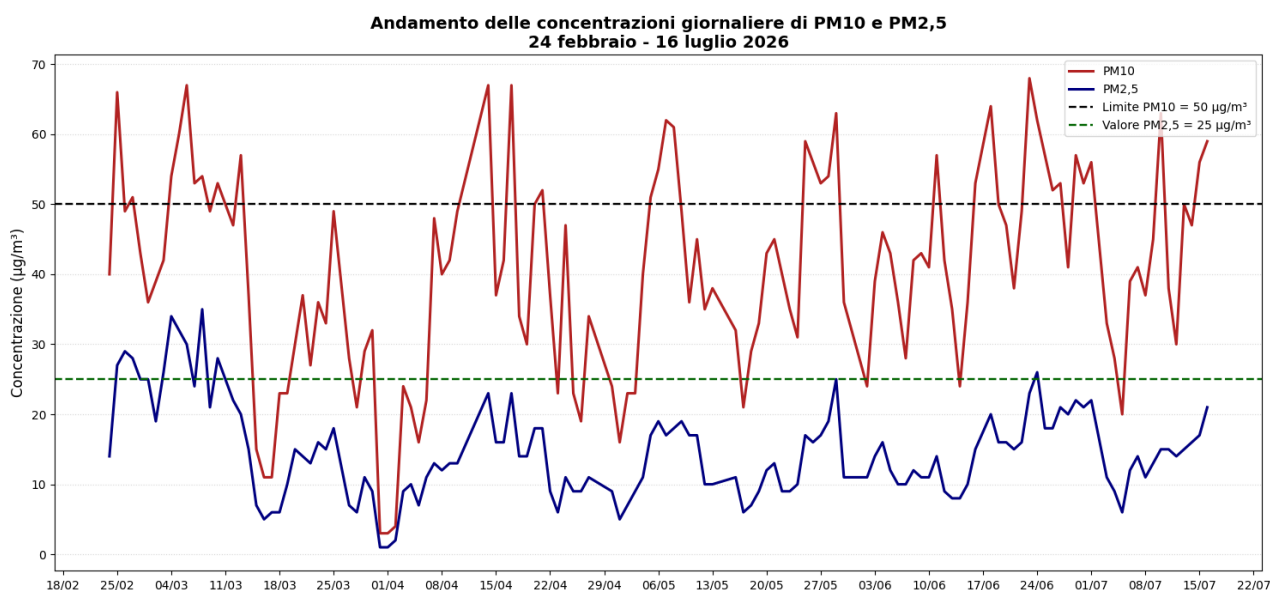


Figura 1: andamento delle concentrazioni giornaliere di PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$ dal 24 febbraio al 16 luglio 2026, con indicazione del limite giornaliero del PM_{10} (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Per puro riferimento viene anche rappresentato il valore limite sulla media annuale del $\text{PM}_{2,5}$ (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) che non è però applicabile alle concentrazioni giornaliere, per le quali il vigente D. Lgs. 155/2010 non ha previsto alcun limite.

La Tabella 2 riporta l'andamento mensile delle concentrazioni di PM_{10} e $\text{PM}_{2,5}$. Le medie mensili più elevate di PM_{10} si osservano a giugno e luglio (45,7 e 42,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), oltre che a febbraio (49,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, su soli cinque giorni); le più basse a marzo e aprile (36,4 e 34,2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Il $\text{PM}_{2,5}$ ha il valore medio più alto a marzo (16,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, escluso febbraio) e il più basso ad aprile (11,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabella 2: valori medi e massimi mensili (concentrazioni in $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Mese	N. giorni	PM_{10} media	PM_{10} massimo	$\text{PM}_{2,5}$ media	$\text{PM}_{2,5}$ massimo	$\text{PM}_{2,5}/\text{PM}_{10}$
Febbraio (24–28)	5	49,9	66,4	24,4	28,6	0,49
Marzo	29	36,4	67,4	16,9	34,7	0,45
Aprile	25	34,2	67,1	11,8	22,8	0,36
Maggio	28	41,5	62,7	13,2	24,9	0,32
Giugno	28	45,7	67,7	15,0	25,6	0,33

Luglio (1-16)	15	42,8	62,8	14,0	22,0	0,33
---------------	----	------	------	------	------	------

Nel periodo di monitoraggio sono stati registrati 35 giorni con concentrazioni di PM_{10} superiori a $50 \mu g/m^3$ (Tabella 3): 2 a febbraio, 7 a marzo, 3 ad aprile, 9 a maggio, 10 a giugno e 4 a luglio. Sebbene tale numero coincida con il massimo di superamenti consentito dal D.Lgs. 155/2010 nell'arco di un anno civile, il confronto ha valore esclusivamente indicativo (par. 4.3), in quanto il periodo considerato è inferiore all'anno solare. Sono inoltre in corso approfondimenti su alcuni campioni che presentano anomalie nella composizione chimica rispetto al quadro generale osservato durante il monitoraggio. Tali verifiche non riguardano le misure di massa del particolato, che appaiono complessivamente coerenti, ma sono finalizzate a valutare la qualità e la rappresentatività di alcune determinazioni analitiche, come discusso nel paragrafo 5.5.

Tabella 3: giorni di superamento del limite giornaliero del PM_{10} ($50 \mu g/m^3$).

Data	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	$PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$)	$PM_{2,5}/PM_{10}$
25 febbraio	66,4	26,7	0,40
27 febbraio	50,6	28,1	0,55
4 marzo	54,1	33,6	0,62
5 marzo	60,0	32,3	0,54
6 marzo	67,4	29,6	0,44
7 marzo	52,9	24,1	0,46
8 marzo	54,3	34,7	0,64
10 marzo	53,3	28,0	0,52
13 marzo	57,5	20,1	0,35
14 aprile	67,1	22,8	0,34
17 aprile	66,6	22,6	0,34
21 aprile	51,7	17,8	0,34
5 maggio	51,0	16,8	0,33
6 maggio	55,0	19,1	0,35
7 maggio	61,5	16,5	0,27
8 maggio	61,1	18,3	0,30
25 maggio	58,6	17,1	0,29
26 maggio	56,3	16,0	0,28
27 maggio	53,3	17,4	0,33
28 maggio	54,4	19,1	0,35
29 maggio	62,7	24,9	0,40
11 giugno	56,5	13,6	0,24
16 giugno	52,8	15,1	0,29
18 giugno	64,0	19,6	0,31
23 giugno	67,7	22,8	0,34
24 giugno	61,8	25,6	0,42
25 giugno	57,4	18,0	0,31
26 giugno	52,0	17,6	0,34
27 giugno	53,3	21,5	0,40

Data	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2,5} (µg/m ³)	PM _{2,5} /PM ₁₀
29 giugno	56,6	22,3	0,39
30 giugno	53,4	20,9	0,39
1 luglio	56,3	22,0	0,39
10 luglio	62,8	15,2	0,24
15 luglio	55,9	16,5	0,30
16 luglio	59,1	21,1	0,36

4.3 Confronto con i limiti normativi

Fra le specie ricercate nel PM₁₀ e nel PM_{2.5} il D.Lgs. 155/2010 e s.m.i. fissa dei valori di obiettivo per arsenico, cadmio, nichel e benzo(a)pirene e un valore limite per il piombo. Si tratta di valori di riferimento annuali, per cui il confronto con dati giornalieri e con un periodo inferiore all'anno non ha valore di verifica normativa ed è puramente indicativo. Si deve comunque tener presente che, anche quando si giungesse a disporre di un intero anno di dati, eventuali superamenti rilevati con questo monitoraggio non rientrerebbero nel conteggio ufficiale previsto dall'Allegato XI del suddetto decreto legislativo, rispetto al quale sono di riferimento soltanto i quattordici siti di monitoraggio individuati dalla DGR 683/2014.

La Tabella 4 riporta le medie del periodo e i massimi giornalieri (arsenico, cadmio, nichel, piombo e benzo(a)pirene sono riferiti al PM₁₀).

Tabella 4: confronto con i valori di riferimento

Parametro	Valore obiettivo o limite	Media del periodo	Massimo giornaliero
Arsenico (As)	6 ng/m ³	0,84 ng/m ³	3,39 ng/m ³
Cadmio (Cd)	5 ng/m ³	0,15 ng/m ³	0,93 ng/m ³
Nichel (Ni)	20 ng/m ³	5,4 ng/m ³	60,0 ng/m ³
Piombo (Pb)	0,5 µg/m ³	0,006 µg/m ³	0,026 µg/m ³
Benzo(a)pirene	1 ng/m ³	0,075 ng/m ³	0,40 ng/m ³

Le medie del periodo di tutti i microinquinanti regolamentati risultano largamente inferiori ai rispettivi valori annuali di riferimento. Il nichel nel PM₁₀ ha raggiunto concentrazioni di 52,3 e 60,0 ng/m³ il 16 e il 17 maggio, superiori al valore obiettivo medio annuale di 20 ng/m³; si tratta degli unici due giorni dell'intera campagna in cui è stato superato tale valore. Questi episodi determinano una concentrazione media nel periodo pari a 5,4 ng/m³, a fronte di una mediana di 2,9 ng/m³. I dati rappresentano eventi puntuali che non trovano un corrispondente incremento negli altri metalli misurati e richiedono pertanto un'interpretazione cauta. Allo stato attuale non è possibile stabilire se riflettano una sorgente emissiva localizzata oppure una variabilità episodica delle condizioni presenti nel sito. Un'emissione reale di origine metallurgica o combustiva avrebbe infatti verosimilmente interessato anche altri elementi e, almeno in parte, la frazione fine del particolato. Il campione di PM_{2,5} del 28 maggio (As 36 ng/m³, Cr circa 320 ng/m³, Al circa 1970 ng/m³, a fronte di mediane del periodo rispettivamente pari a 0,7, 4,5 e 156 ng/m³) presenta caratteristiche fortemente anomale rispetto all'andamento generale della campagna. Nella stessa giornata le concentrazioni di As e Cr nel PM_{2,5} risultano molto superiori a quelle misurate nel PM₁₀ (As 0,76 ng/m³, Cr 4,6 ng/m³), mentre Se, Te, Tl e B mostrano incrementi ancora più marcati. Sebbene il confronto diretto tra PM₁₀ e PM_{2,5}

debba essere effettuato con cautela, poiché le due frazioni sono ottenute mediante linee di campionamento dedicate e possono risentire sia della naturale ripartizione granulometrica delle specie chimiche sia delle specifiche condizioni operative di campionamento, le differenze osservate risultano comunque significativamente superiori a quelle normalmente attese. Il contesto operativo dell'area, caratterizzato nel periodo considerato dalla vicina presenza di attività di bonifica e movimentazione di terreni e materiali, rende plausibile il verificarsi di episodi localizzati di incremento delle concentrazioni di metalli e metalloidi aerodispersi. L'evento del 28 maggio si colloca pertanto in un quadro compatibile con fenomeni di mobilitazione e dispersione di materiali presenti nel sito. Tuttavia, l'entità delle concentrazioni osservate e il carattere isolato dell'episodio non consentono di stabilire con certezza se il dato rappresenti un evento eccezionale legato alle attività in corso oppure una condizione non rappresentativa dell'andamento ordinario del periodo. Per tali motivi il campione viene considerato un evento anomalo rispetto alla distribuzione complessiva della serie e non viene utilizzato come elemento determinante nell'interpretazione delle componenti principali. Il valore di arsenico misurato (36 ng/m^3) non è pertanto considerato rappresentativo dell'esposizione media del periodo e non è stato utilizzato ai fini della valutazione del rispetto del valore obiettivo annuale di 6 ng/m^3 . Si ricorda infine che la direttiva (UE) 2024/2881, che entro fine anno sarà recepita anche dall'Italia, introduce dal 2030 valori limite annuali più restrittivi ($\text{PM}_{10} = 20 \text{ } \mu\text{g/m}^3$; $\text{PM}_{2,5} = 10 \text{ } \mu\text{g/m}^3$).

4.4 Significato ambientale delle specie analizzate

Per il significato ambientale delle specie (elementi litogenici e crostali, alcalino-terrosi, metalli di origine industriale e combustiva, frazioni carboniose, levoglucosano e IPA) si rimanda alla relazione relativa al primo mese, i cui criteri interpretativi restano invariati.

4.5 Bilancio di massa del PM_{10} e composizione media

Per valutare il contributo delle principali componenti chimiche alla massa del PM_{10} è stato effettuato un bilancio di massa (*mass closure*), confrontando la massa ricostruita a partire dalle determinazioni analitiche con la concentrazione di PM_{10} misurata in continuo mediante strumentazione Palas. La procedura ha utilizzato le concentrazioni di carbonio organico (OC), carbonio elementare (EC), specie ioniche maggiori, elementi crostali e metalli in traccia, consentendo di ricostruire le principali classi chimiche che contribuiscono alla massa del particolato.

La materia organica (*Organic Matter*, OM) è stata stimata a partire dal carbonio organico mediante l'applicazione di un fattore di conversione pari a 1,8:

$$OM = 1,8 \times OC$$

Il contributo dell'aerosol inorganico secondario (*Secondary Inorganic Aerosol*, SIA) è stato calcolato come somma di ammonio, nitrato e solfato non marino:

$$SIA = \text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^- + \text{nssSO}_4^{2-}$$

dove il solfato non marino (*non-sea-salt sulfate*) è stato ottenuto sottraendo al solfato totale la quota di origine marina:

$$\text{nssSO}_4^{2-} = \text{SO}_4^{2-} - \text{ssSO}_4^{2-}$$

assumendo per il solfato marino la relazione:

$$ssSO_4^{2-} = 0,252 \times Na^+$$

La componente marina (*Sea Salt*, SS) è stata stimata mediante:

$$SS = Cl^- + 1,47 \times Na^+$$

Seguendo l'approccio proposto da Fakhri et al. (2024)¹, per tenere conto dell'acqua associata alle particelle igroscopiche è stato applicato un fattore di idratazione pari a 1,29 sia all'aerosol inorganico secondario sia alla componente marina. Tale correzione consente di convertire la massa secca delle specie ioniche nella corrispondente massa atmosferica idratata, migliorando la chiusura del bilancio di massa e fornendo una stima più realistica del contributo delle particelle igroscopiche alla massa del particolato.

Pertanto:

$$\begin{aligned} SIA_{idr} &= 1,29 \times SIA \\ SS_{idr} &= 1,29 \times SS \end{aligned}$$

La frazione minerale (*Mineral Dust*, MD) è stata ricostruita utilizzando i principali elementi crostali e applicando i coefficienti stechiometrici necessari a convertirli nelle corrispondenti forme ossidate:

$$MD = 2,20Al + 2,49Si + 1,63Ca + 2,42Fe + 1,94Ti$$

Gli elementi in traccia (*Trace Elements*, TE) sono stati infine ottenuti come somma delle concentrazioni di Sb, Ag, As, Ba, B, Cd, Co, Cr, Mn, Hg, Mo, Ni, Pb, Cu, Se, Sn, Sr, Tl, Te, U, V e Zn.

La quota non ricostruita (*Unidentified Mass*, UNK) è stata determinata per differenza:

$$UNK = PM_{10} - (OM + EC + SIA_{idr} + SS_{idr} + MD + TE)$$

Per alcuni campioni, a causa delle incertezze analitiche e delle approssimazioni introdotte nella ricostruzione della massa, il termine residuo UNK assumeva valori negativi. Tali valori sono stati pertanto posti pari a zero, in quanto privi di significato fisico, e le medie del periodo sono state ricalcolate di conseguenza.

I risultati medi del periodo di monitoraggio (24 febbraio – 16 luglio 2026) sono riportati nella Tabella 5, mentre la variabilità giornaliera delle diverse componenti è mostrata in Figura 2.

¹ Fakhri, M., et al. (2024). *Source apportionment and mass closure of atmospheric particulate matter considering aerosol-bound water*. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24, 1193-1215.

Tabella 5: bilancio di massa del PM₁₀ – concentrazioni medie e contributi percentuali (24 febbraio – 16 luglio 2026).

Componente	Concentrazione media (µg/m ³)	Contributo (%)
OM	10,23	25,6
EC	1,86	4,6
SIA	5,75	14,4
SS	4,44	11,1
MD	10,21	25,5
TE	0,15	0,4
UNK	7,38	18,4%
PM₁₀	40,02	100

Nota: calcolo su 130 campioni giornalieri. UNK è stato posto a zero nei 22 giorni (17%) in cui la massa ricostruita supera quella misurata; Le medie riportate sono state ricalcolate dopo l'azzeramento dei valori negativi di UNK. La somma delle concentrazioni medie delle componenti del bilancio è pari a 40,02 µg/m³. La concentrazione media di PM₁₀ misurata nel periodo mediante strumentazione Palas è pari a 40,3 µg/m³. La lieve differenza è dovuta al fatto che il totale ricostruito è ottenuto come somma delle medie delle singole componenti e agli arrotondamenti numerici applicati ai valori riportati in tabella.

Il bilancio di massa evidenzia che le componenti predominanti del PM₁₀ sono la **materia organica (OM)** e la **polvere minerale (MD)**, che contribuiscono rispettivamente per il 25,6% e il 25,5% della concentrazione media misurata. Tale risultato è coerente con quanto emerso dall'analisi multivariata (par. 5), che ha individuato un fattore associato alla componente crostale e metallica e un secondo fattore riconducibile ai processi di combustione e alla componente carboniosa. L'importanza della frazione minerale conferma il ruolo della risospensione di materiale superficiale e delle polveri di origine crostale. In questo contesto il calcio, con una concentrazione media di 4,00 µg/m³ (Tabella 11), rappresenta l'elemento litogenico più abbondante e mostra una netta prevalenza nella frazione grossolana, come indicato dal rapporto PM_{2,5}/PM₁₀ pari a circa 0,18 (par. 6). La componente organica, invece, riflette sia emissioni primarie legate ai processi di combustione, in particolare della biomassa, sia fenomeni di formazione secondaria di aerosol organico.

L'**aerosol inorganico secondario (SIA)** rappresenta mediamente il 14,4% della massa del PM₁₀. Tale contributo comprende anche la quota di acqua associata alle particelle igroscopiche, stimata mediante l'applicazione di un fattore di idratazione pari a 1,29. La presenza di nitrato, ammonio e solfato conferma l'importanza dei processi atmosferici di trasformazione degli inquinanti gassosi precursori e della formazione secondaria, che interessa prevalentemente la frazione fine del particolato, come discusso nel paragrafo 6.

La componente di **sale marino (SS)** contribuisce mediamente per l'11,1% della massa del PM₁₀. Anche in questo caso il valore include il contributo dell'acqua associata agli aerosol marini mediante l'applicazione del medesimo fattore di idratazione. Tale percentuale risulta pienamente coerente con la localizzazione costiera del sito e con la frequente influenza di masse d'aria provenienti dal settore marino.

Il **carbonio elementare (EC)** rappresenta il 4,6% del PM₁₀ ed è riconducibile principalmente a

sorgenti di combustione, quali traffico veicolare, riscaldamento domestico e combustione di biomassa. Gli **elementi in traccia (TE)** incidono invece in misura molto ridotta sulla massa complessiva del particolato (0,4%), pur mantenendo una notevole importanza come traccianti emissivi e per i possibili effetti sanitari associati ad alcuni metalli.

La quota non ricostruita (**UNK**) risulta pari a $7,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, corrispondente al 18,4% della massa media del PM_{10} . L'applicazione del fattore di idratazione alle componenti secondaria e marina ha consentito di ridurre sensibilmente il residuo e di migliorare la chiusura complessiva del bilancio. La frazione non identificata può comunque includere composti organici non completamente caratterizzati, carbonati presenti nella componente minerale, specie ioniche minori non considerate nello schema di ricostruzione, acqua residua non contabilizzata e altre sostanze non determinate dal protocollo analitico adottato. Un'ulteriore fonte di incertezza è rappresentata dal fattore di conversione OC/OM utilizzato (1,8), che costituisce una semplificazione della reale composizione dell'aerosol organico. Inoltre, la massa di riferimento è stata ottenuta mediante strumentazione ottica Palas e non mediante determinazione gravimetrica, circostanza che può contribuire alle differenze osservate tra massa misurata e massa ricostruita.

Nel complesso, il bilancio di massa mostra una buona capacità di ricostruire la composizione del particolato atmosferico, evidenziando il ruolo congiunto delle componenti crostale, organica, marina e secondaria. Le maggiori contribuzioni sono associate alla materia organica e alla polvere minerale, mentre il contributo dell'aerosol secondario e del sale marino risulta tutt'altro che trascurabile e riflette l'importanza sia dei processi atmosferici di trasformazione sia dell'influenza delle masse d'aria marine sul sito di studio.

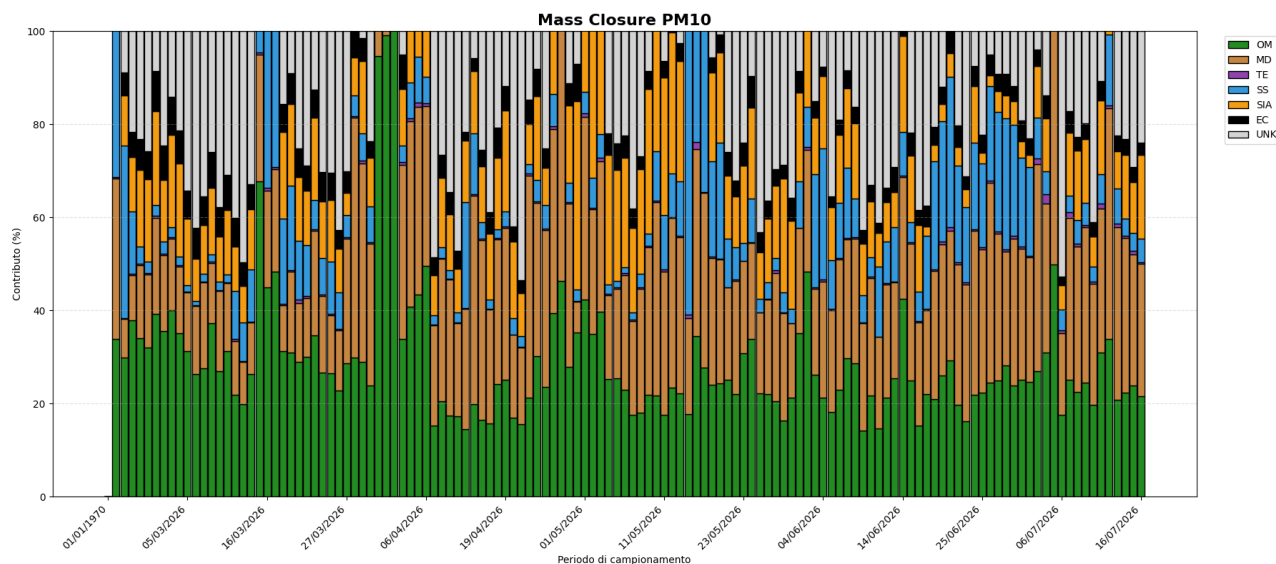


Figura 2: bilancio di massa del PM_{10} – contributi percentuali giornalieri delle componenti OM, MD, TE, SS, SIA, EC e UNK dal 24 febbraio al 16 luglio 2026.

La Figura 2 evidenzia una marcata variabilità temporale nella composizione del PM_{10} . In alcuni periodi prevale la componente minerale, mentre in altri risulta predominante la materia organica, con valori particolarmente elevati tra la fine di febbraio e l'inizio di marzo, in accordo con il maggiore peso della componente combustiva individuata dall'analisi multivariata. L'aerosol inorganico



secondario mostra episodi di crescita riconducibili a condizioni favorevoli alla formazione in atmosfera dei nitrati e dei solfati, mentre il contributo del sale marino varia in funzione delle condizioni meteorologiche e della provenienza delle masse d'aria. Nel complesso, la distribuzione temporale delle diverse componenti conferma che il PM_{10} del sito deriva dalla sovrapposizione di sorgenti crostali, combustive, secondarie e marine, la cui importanza relativa varia sensibilmente nel corso del periodo di monitoraggio.

5. Analisi statistica multivariata – Analisi delle Componenti Principali (PCA)

5.1 Obiettivi e impostazione dell'analisi

La PCA è stata ricalcolata sull'intero periodo, separatamente per il PM_{10} (130 campioni $\times$ 60 variabili chimiche) e per il $PM_{2,5}$ (130 campioni $\times$ 42 variabili chimiche), per preservare la struttura informativa propria di ciascuna frazione. Le variabili sono state standardizzate (z-score); i pochi valori mancanti (4 per l'acenaftilene nel PM_{10} ; 1 per il boro, 2 per il calcio e 2 per il sodio nel $PM_{2,5}$) sono stati sostituiti con la media della variabile.

La variabile temporale (Campione/Data) e le masse di PM_{10} e $PM_{2,5}$ non sono state incluse tra le variabili impiegate nella PCA; l'analisi è stata applicata esclusivamente alle specie chimiche dopo standardizzazione z-score e imputazione dei valori mancanti.

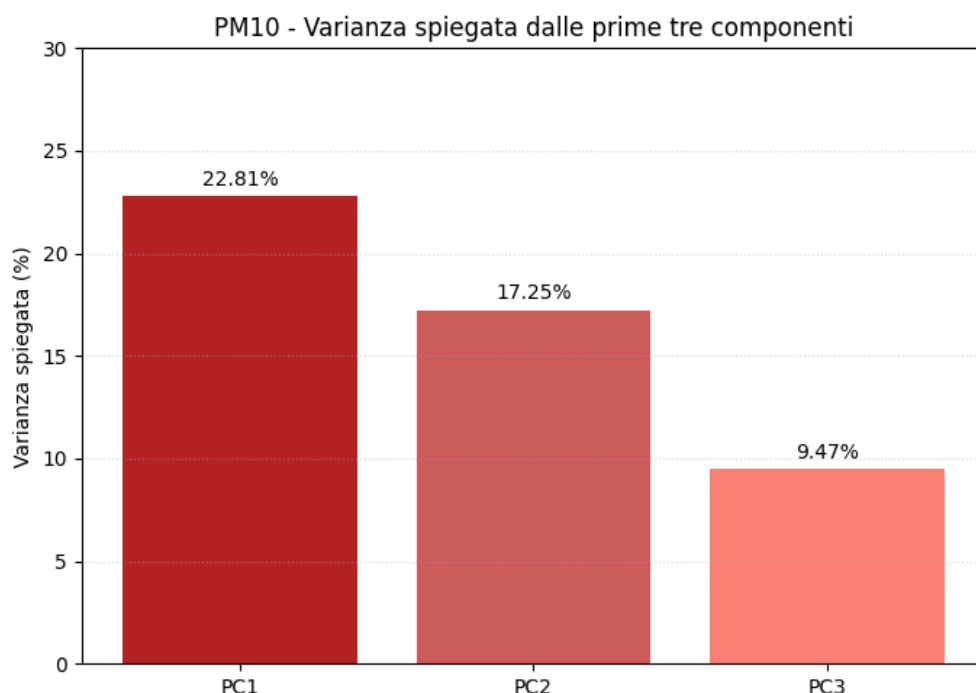
La PCA ha finalità esplorative: le componenti non sono interpretate come sorgenti isolate o quantificate, ma come regimi di covariazione chimica, da approfondire con modelli di source apportionment (es. PMF). I risultati vanno letti tenendo conto di due limiti. La PCA su variabili standardizzate e non trasformate è sensibile a pochi campioni estremi o anomali. L'impiego dei dati grezzi, inclusi quelli inferiori al LOQ, può inoltre rendere dominanti componenti determinate da specie prossime al limite di rilevabilità (come gli IPA leggeri, par. 5.3). Per questo i risultati sono confrontati, al par. 5.5, con una PCA ripetuta escludendo i campioni sospetti.

5.2 Varianza spiegata

Nel PM_{10} le prime tre componenti spiegano il 49,5% della varianza totale e le prime cinque il 61,2%; nel $PM_{2,5}$ rispettivamente il 53,2% e il 67,7%. In entrambi i casi la variabilità è distribuita su più fattori e non è dominata da un unico processo. Rispetto al primo mese (PM_{10} : 24,7%, 20,7% e 14,5%, complessivamente circa 60%) la varianza risulta più ripartita: l'estensione del periodo introduce condizioni diverse e aumenta il numero di processi che contribuiscono alla variabilità.

PCA PM_{10} (24 febbraio - 16 luglio 2026)

Varianza spiegata



Le prime tre componenti spiegano circa il 50% della variabilità complessiva del PM₁₀, mentre le prime cinque componenti arrivano a circa il 61% della varianza totale. Questo risultato evidenzia un sistema caratterizzato da diversi processi concomitanti e da una marcata complessità emissiva.

Tabella 6: varianza spiegata dalle prime dieci componenti – PM₁₀ (periodo 24 febbraio – 16 luglio 2026).

Componente	Varianza spiegata (%)	Varianza cumulata (%)
PC1	22,81	22,81
PC2	17,25	40,06
PC3	9,47	49,54
PC4	6,72	56,25
PC5	4,91	61,17
PC6	4,83	66,00
PC7	3,96	69,96
PC8	3,62	73,57
PC9	2,75	76,32
PC10	2,12	78,45

Dodici componenti hanno autovalore > 1; undici componenti sono necessarie per superare l'80% della varianza.

Tabella 7: varianza spiegata dalle prime dieci componenti – PM_{2,5} (periodo 24 febbraio – 16 luglio 2026).

Componente	Varianza spiegata (%)	Varianza cumulata (%)
------------	-----------------------	-----------------------

PC1	27,52	27,52
PC2	16,92	44,44
PC3	8,79	53,25
PC4	7,72	60,95
PC5	6,72	67,68
PC6	4,49	72,16
PC7	3,42	75,58
PC8	2,90	78,49
PC9	2,55	81,03
PC10	2,32	83,36

Nove componenti hanno autovalore > 1 e nove sono sufficienti per superare l'80% della varianza.

Tabella 8: confronto della varianza spiegata (%) tra le frazioni e con il primo mese.

Componente	PM ₁₀ primo mese	PM ₁₀ periodo completo	PM _{2,5} periodo completo
PC1	24,7	22,8	27,5
PC2	20,7	17,3	16,9
PC3	14,5	9,5	8,8
PC4	n.d.	6,7	7,7
PC5	n.d.	4,9	6,7
PC1-PC3	59,9	49,5	53,2
PC1-PC5	n.d.	61,2	67,7

5.3 Interpretazione delle componenti del PM₁₀

La Tabella 9 riporta le variabili con i loadings più elevati (in valore assoluto) per le prime cinque componenti; la distribuzione completa è mostrata in Figura 3.

Tabella 9: componenti principali del PM₁₀ – variabili dominanti (loadings).

Componente	Varianza	Loadings positivi principali	Loadings negativi principali
PC1	22,8%	Fe 0,23; Co 0,23; Mn 0,22; Cu 0,22; Cd 0,22; Pb 0,22; V 0,21; Ti 0,20; Al 0,19; Sr 0,19	Antracene -0,15; Fluorantene -0,14; Fluorene -0,14; Fenantrene -0,14; Pirene -0,13
PC2	17,3%	Benzo(k)fluorantene 0,29; Benzo(e)pirene 0,28; Benzo(a)pirene 0,28; Benzo(g,h,i)perilene 0,28; Benzo(b)fluorantene 0,27; Indeno(1,2,3-	nessuno rilevante (< 0,10)

		cd)pirene 0,27; Crisene 0,26; Levoglucosano 0,25; Benzo(a)antracene 0,23; OC 0,21	
PC3	9,5%	Fenantrene 0,32; Fluorene 0,32; Antracene 0,31; Pirene 0,31; Fluorantene 0,27; Acenaftilene 0,27	Hg -0,24; EC -0,16; OC -0,15; Levoglucosano -0,14
PC4	6,7%	Cloruri 0,37; Na 0,34; Fluoruro 0,34; Mg 0,32; Acenaftene 0,29	Fosforo -0,20; Hg -0,15; Ag -0,14
PC5	4,9%	Fosfato 0,30; Cloruri 0,30; Acenaftene 0,23	Ammonio -0,30; Solfato -0,27; EC -0,25; OC -0,23; Ca -0,22

PC1 (22,8%) – Componente metallico-crostantale. È dominata da elementi crostantali (Fe, Mn, Ti, Al, Sr) e da metalli in traccia (Co, Cu, Cd, Pb, V); gli IPA a basso peso molecolare hanno loading di segno opposto. Rispetto al primo mese, in cui la PC1 era un regime composito di accumulo atmosferico, diventa il principale asse di variabilità. La co-variazione di elementi crostantali e metalli è compatibile con la risospensione di suoli e sedimenti con impronta metallurgica storica, ma non la dimostra: Cu, Pb e Cd sono anche marcatori di traffico (usura di freni e pneumatici), e il vanadio, insieme al nichel, di combustione di oli pesanti e traffico navale, rilevante in un sito costiero prossimo a un porto. La PCA non separa queste sorgenti: l'attribuzione "storica" richiede conferma con PMF, rapporti di arricchimento rispetto alla crosta e dati di vento. I punteggi crescono nel tempo (mediana -2,7 a marzo, +5,0 a luglio; correlazione con la data $r = 0,66$) e le mediane mensili di Fe, Mn, Cu, Pb e Cd a luglio sono circa il doppio di quelle di marzo (Fe 925 contro 542 ng/m³, Mn 24,8 contro 10,0 ng/m³, Pb 9,2 contro 2,7 ng/m³). L'aumento progressivo dei punteggi della PC1 da marzo a luglio è coerente con una maggiore mobilitazione di materiale metallico-crostantale nei mesi più asciutti. Tale comportamento risulta inoltre compatibile con le attività di bonifica e movimentazione dei terreni e dei materiali presenti nel sito di Bagnoli, che possono favorire la risospensione di particolato contenente elementi metallici associati alla pregressa contaminazione industriale dell'area. L'attribuzione richiede comunque il supporto dei dati meteorologici e delle informazioni operative relative alle attività di cantiere. La componente non è però un effetto dei campioni sospetti: ripetendo la PCA senza di essi (par. 5.5) la PC1 sale al 23,5% e la correlazione con la data a 0,72.

PC2 (17,3%) – Combustione ad alto peso molecolare. Associa gli IPA pesanti (benzo(k)fluorantene, benzo(e)pirene, benzo(a)pirene, benzo(g,h,i)perilene, benzo(b)fluorantene, indeno(1,2,3-cd)pirene, crisene) al levoglucosano, al carbonio organico e, in misura minore, al carbonio elementare. La presenza del levoglucosano, marcatore specifico della combustione di biomassa, e l'andamento stagionale (punteggi con mediane di +7,6 a febbraio e +2,6 a marzo, negativi da aprile a giugno; febbraio comprende solo cinque campioni) indicano il riscaldamento a biomassa

come sorgente più probabile. Il traffico può contribuire agli IPA pesanti ma non spiega da solo la stagionalità. I valori di benzo(a)pirene (massimo 0,40 ng/m³ a fine febbraio, media 0,075 ng/m³) sono coerenti con questo andamento e restano inferiori al valore obiettivo annuale (1 ng/m³). La componente è stabile (17,2%) anche escludendo i campioni sospetti.

PC3 (9,5%) – IPA a basso peso molecolare (componente di episodio). Raggruppa fenantrene, fluorene, antracene, pirene, fluorantene e acenafilene, con loading negativi per mercurio, carbonio elementare, carbonio organico e levoglucosano. Il segnale è concentrato in un intervallo di circa due settimane (12-24 marzo), durante il quale fenantrene, fluorene e antracene passano da valori prossimi al limite di rilevabilità a circa 3-6 ng/m³ (fenantrene), per poi tornare ai livelli di fondo; i punteggi più elevati della PC3 si concentrano integralmente in questo periodo. La componente spiega circa il 10% della varianza totale e appare quindi associata a un episodio specifico piuttosto che a un regime emissivo persistente. Il profilo chimico è coerente con la presenza di IPA a basso peso molecolare riconducibili a contributi organici relativamente freschi, quali traffico veicolare, combustioni recenti o altre sorgenti di idrocarburi. La marcata concentrazione temporale suggerisce il possibile ruolo di condizioni meteorologiche particolari o di eventi emissivi circoscritti. Il peso della componente dipende inoltre dal trattamento statistico dei dati (circa 13,7% della varianza nel caso di PCA applicata ai logaritmi delle concentrazioni). In assenza di informazioni meteorologiche e di ulteriori elementi diagnostici, la componente viene pertanto interpretata come un episodio reale caratterizzato da un arricchimento temporaneo di IPA leggeri, senza attribuzione univoca della sorgente.

PC4–PC5 (6,7% e 4,9%). La PC4 raggruppa cloruri, sodio, magnesio e fluoruro ed è riconducibile al contributo marino e ionico; i punteggi più elevati sono però dominati da un singolo campione (24 febbraio), per cui la componente rappresenta più un evento che un regime, e non va collegata senza verifica agli episodi di aerosol marino di aprile e giugno (par. 4.2). La PC5 contrappone fosfato e cloruri a ione ammonio, solfato, carbonio e calcio: è plausibilmente legata al fondo regionale e alla formazione di aerosol secondario, ma ha un peso limitato e un'interpretazione poco solida.

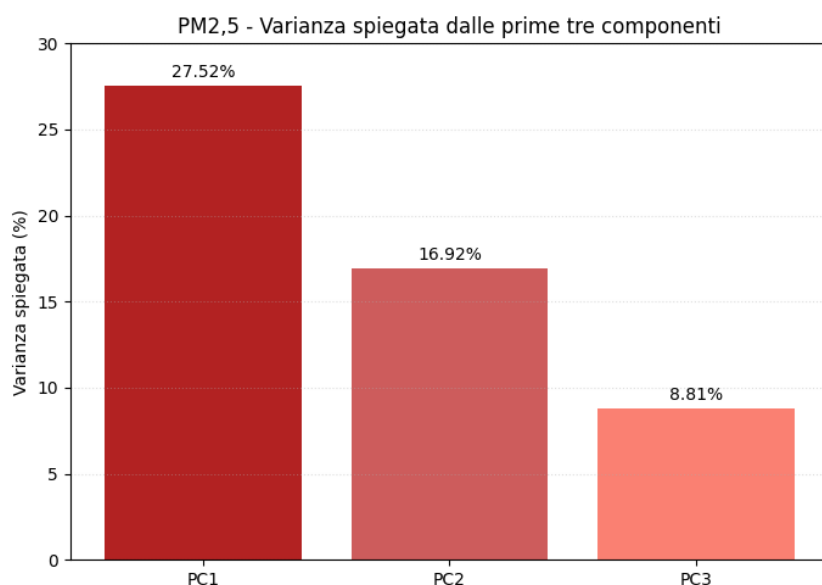


Figura 3: PCA PM₁₀ – heatmap dei loadings delle prime venti variabili delle prime tre componenti principali.

5.4 Interpretazione delle componenti del PM_{2,5}

PCA PM_{2,5} (24 febbraio - 16 luglio 2026)

Varianza spiegata



La PCA del PM_{2,5} risulta leggermente più strutturata di quella del PM₁₀: le prime tre componenti spiegano oltre il 53% della variabilità totale. Tale struttura è però in parte determinata dal campione del 28 maggio, che da solo governa le prime due componenti (44,4%). Escludendolo, insieme ai quattro campioni con metalli prossimi a zero (par. 5.5), la PC1 resta al 26,3%, mentre PC2 e PC3 scendono rispettivamente al 10,8% e al 10,0%.

Tabella 10: componenti principali del PM_{2,5} – variabili dominanti (loadings).

Componente	Varianza	Loadings positivi principali	Loadings negativi principali
PC1	27,5%	Co 0,27; Ag 0,25; Al 0,25; Mn 0,24; Sn 0,24; V 0,24; Ni 0,23; Cr 0,21; As 0,21; B 0,21	nessuno rilevante (< 0,10)
PC2	16,9%	Se 0,27; Te 0,27; Tl 0,27; B 0,27; As 0,26; Cr 0,26	Cd -0,24; Sr -0,21; U -0,20; Ba -0,20; Cloruri -0,18; Fluoruro -0,18
PC3	8,8%	Mg 0,40; Na 0,33; OC 0,32; EC 0,32; Mo 0,32; Levoglucosano 0,30	Ca -0,22; Si -0,19; Nitrito -0,17

PC4	7,7%	Li 0,49; K 0,42; Na -0,24; Hg -0,17; Nitrato 0,40; Ca 0,30; Ammonio -0,16 Solfato 0,29
PC5	6,7%	Hg 0,32; Solfato 0,29; Zn -0,31; Ti -0,30; Ammonio 0,28; Levoglucosano Fluoruro 0,27; Cloruri -0,27; U -0,26; Fe 0,24 -0,24

PC1 (27,5%) – Componente metallica, comune alla frazione grossolana. Nell'impostazione originale è dominata da numerosi metalli in traccia (Co, Ag, Al, Mn, Sn, V, Ni, Cr, As, B) e viene letta come un asse di contributi antropici e processi ad alta temperatura. Una parte di questo profilo (As, Cr, B) deriva però dal campione del 28 maggio, il cui punteggio (26,1) è circa otto volte la deviazione standard. Dopo l'esclusione dei campioni sospetti la PC1 (26,3%) è dominata da Cd, Co, Mn, Fe, Ni, V, Cu e Sb, cioè dalla stessa associazione crostale-metallica della PC1 del PM₁₀, con la stessa tendenza crescente nel tempo (mediana -2,2 a marzo, +5,6 a luglio; $r = 0,66$). Non emerge quindi, nel PM_{2,5}, una componente ad alta temperatura distinta da quella del PM₁₀: è presente nella frazione fine lo stesso regime metallico, la origine può essere coerente con la dispersione atmosferica di frazioni fini derivanti dalla movimentazione dei materiali interessati dagli interventi di bonifica, oltre che con contributi antropici diffusi già presenti nell'area.

PC2 (16,9%) – Associazione Se–Te–Tl–B–As–Cr. Associa selenio, tellurio, tallio, boro, arsenico e cromo, con loading negativi per cadmio, stronzio, uranio e bario. I punteggi di PC1 e PC2 del 28 maggio (26,1 e 21,3) sono circa otto volte la deviazione standard (3,4 e 2,6) e superano di molto quelli di qualsiasi altro giorno. Come indicato al par. 4.3, nel PM_{2,5} di quel giorno tali elementi presentano concentrazioni eccezionalmente elevate rispetto ai valori abituali del periodo. Il dato costituisce pertanto un'anomalia in merito alla quale sono in corso approfondimenti. Tuttavia, l'intensa movimentazione di terreni e materiali nell'ambito delle attività di bonifica del sito rende plausibile la comparsa di episodi caratterizzati da elevate concentrazioni di metalli e metalloidi aerodispersi. Le proporzioni osservate tra PM_{2,5} e PM₁₀ risultano comunque inusuali e non consentono, allo stato attuale, di distinguere con certezza tra un episodio reale associato alle attività di cantiere e una possibile anomalia analitica.

Ripetendo la PCA senza questo campione, la PC2 scende al 10,7% e assume una configurazione riconducibile a una componente combustiva (As, Mg, OC, EC, levoglucosano, Mo, B, Tl), mentre Se, Te e Tl restano associati a una componente minore (PC3, circa 10%), la cui interpretazione richiede ulteriori verifiche. L'associazione Se–Te–Tl–B–As–Cr osservata nella PCA completa non può pertanto essere considerata, allo stato attuale, una sorgente stabilmente identificata; rappresenta piuttosto un episodio singolare che necessita di validazione mediante controlli analitici e confronto con le informazioni relative alle attività di bonifica e alle condizioni meteorologiche del periodo.

PC3 (8,8%) – Combustione diffusa e componente marina. Presenta loading elevati per carbonio organico, carbonio elementare e levoglucosano, insieme a magnesio, sodio e molibdeno, con segno opposto per calcio e silicio. È la componente combustiva della frazione fine (traffico, biomassa), che dopo l'esclusione del campione del 28 maggio diventa la PC2 (10,8%). L'associazione con magnesio e sodio può indicare aerosol marino, ma più probabilmente riflette condizioni meteorologiche comuni (ristagno, brezza) che fanno covariare sorgenti diverse; non va letta come un'unica sorgente. I punteggi sono più elevati a fine febbraio e nei primi giorni di marzo, in coerenza con la stagione

fredda.

PC4–PC5 (7,7% e 6,7%). La PC4 (nitrato, potassio, litio, calcio, solfato) e la PC5 (solfato, ammonio, fluoruro, cloruri, mercurio) sono riconducibili ad aerosol inorganico secondario e fondo regionale; in particolare il nitrato, tipicamente stagionale, risulta separato dal solfato.

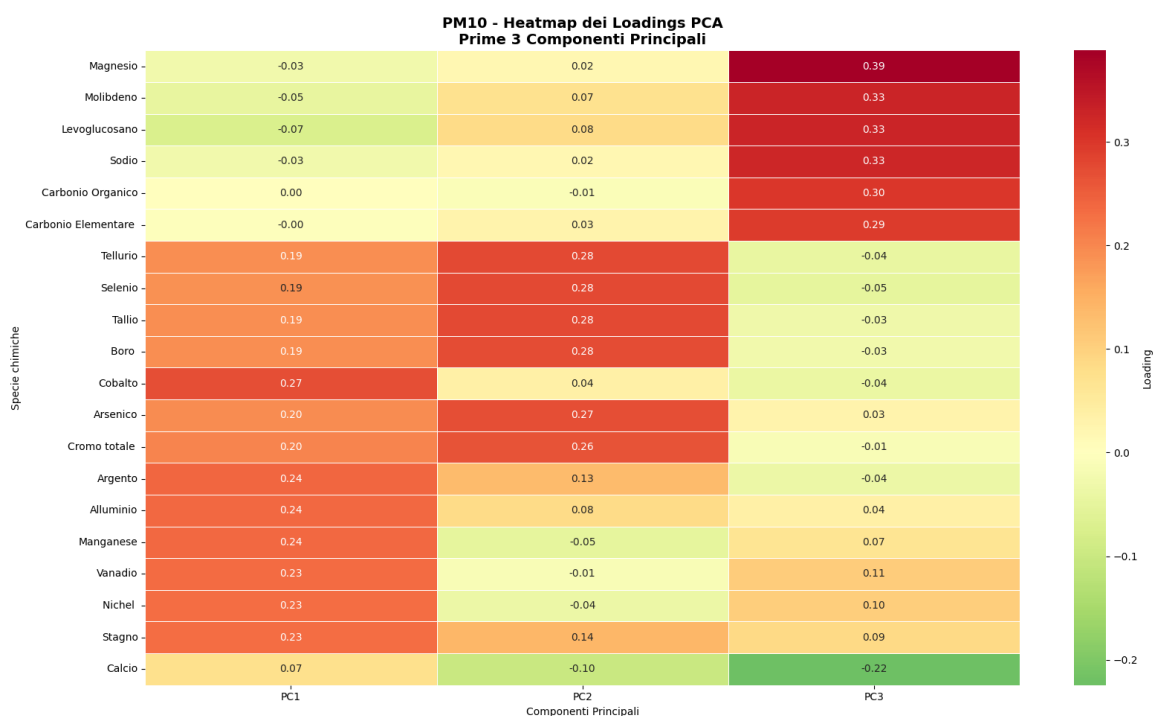


Figura 4: PCA $PM_{2,5}$ – heatmap dei loadings delle prime 20 variabili delle tre prime componenti principali.

5.5 Analisi degli scores e dinamica temporale

L'analisi dei punteggi mostra che: la PC1 del PM_{10} aumenta da marzo a luglio, in coerenza con una maggiore mobilitazione di materiale metallico-crostante nei mesi caldi, ipotesi da verificare con i dati meteorologici e con i controlli analitici; la PC2 del PM_{10} (combustione) è prevalente nei mesi freddi, con i valori massimi in febbraio e a inizio marzo, e si attenua da aprile; la PC3 del PM_{10} è concentrata in un breve intervallo di marzo. Nel $PM_{2,5}$ le PC1 e PC2 originali sono fortemente influenzate dal campione del 28 maggio; senza di esso la PC1 mostra la stessa crescita nel tempo di quella del PM_{10} , mentre la componente combustiva assume valori più elevati a fine febbraio e nei primi giorni di marzo. La rimozione di un singolo campione (12 marzo) non modifica sensibilmente la varianza spiegata in nessuna delle due frazioni.

Prova di sensibilità. Nel dataset sono presenti campioni con metalli crostanti e metalli in traccia a livelli incompatibili con le masse misurate: sei campioni di PM_{10} (21, 23, 24, 25, 29 e 30 maggio; Al da 0,4 a 22 ng/m^3 , mediana del periodo 433 ng/m^3) e quattro di $PM_{2,5}$ (26 e 29 maggio, 15 e 16 luglio; Al da 0,1 a 10,5 ng/m^3 , mediana 156 ng/m^3), in cui almeno metà delle dodici specie metalliche considerate è sotto il 5% della rispettiva mediana. Sono concentrati in poche finestre temporali, il che suggerisce un problema di lotto analitico, e vanno verificati con il laboratorio. Ripetendo la PCA senza questi campioni (e, per il $PM_{2,5}$, senza il 28 maggio): nel PM_{10} le prime tre componenti restano

praticamente invariate (23,5%, 17,2% e 9,6%), con identico significato e con la correlazione della PC1 con la data a 0,72, per cui il quadro del PM₁₀ è robusto; nel PM_{2,5} risultano 26,3%, 10,8% e 10,0%, con la PC1 metallica ancora presente ma senza la componente Se–Te–Tl–B–As–Cr, che si rivela quindi un effetto del singolo campione.

5.6 Considerazioni trasversali

L'estensione a oltre quattro mesi modifica sensibilmente il quadro rispetto al primo mese. Nel PM₁₀ il primo asse di variabilità non è più un regime di accumulo atmosferico ma una componente metallico-crostante con tendenza crescente, che diventa la firma più caratteristica del sito; la componente combustiva (PC2) si conferma e risulta legata alla stagione fredda e al levoglucosano. Nel PM_{2,5}, a differenza di quanto emergeva dall'analisi con tutti i campioni, la componente ad alta temperatura Se–Te–Tl–B–As–Cr non è un regime ricorrente: dopo l'esclusione del campione del 28 maggio prevalgono la stessa associazione metallica del PM₁₀ e una componente combustiva, e le due frazioni risultano meno distinte di quanto ipotizzato. Le componenti vanno interpretate come regimi chimico-fisici e non come sorgenti emissive isolate; nessuna delle attribuzioni proposte (risospensione di materiali con impronta storica, traffico, porto, biomassa) è dimostrata dalla sola PCA, e richiede PMF, dati meteorologici e validazione dei dati analitici. Il bilancio di massa del PM₁₀ (par. 4.5), in cui polvere minerale e materia organica pesano ciascuna per circa un quarto della massa, è coerente con la co-presenza di una componente crostante e di una combustiva.

6. Confronto compositivo tra PM₁₀ e PM_{2,5}

Le Tabelle 11 e 12 confrontano le concentrazioni medie delle specie nelle due frazioni (giorni con campione in entrambe). La “quota in PM_{2,5}” è il rapporto tra la concentrazione media in PM_{2,5} e quella in PM₁₀; il “rapporto normalizzato” è il rapporto tra le medie dei valori divisi per la massa della rispettiva frazione, e indica l'arricchimento relativo della specie nel particolato fine (valori > 1 = specie più abbondante nel PM_{2,5} che nel PM₁₀ a parità di massa; il rapporto medio di massa PM_{2,5}/PM₁₀ è 0,37).

Tabella 11: specie litogeniche – valori medi (24 febbraio – 16 luglio 2026).

Specie	Unità	Media PM ₁₀	Media PM _{2,5}	Quota in PM _{2,5}	Rapporto normalizzato
Alluminio (Al)	ng/m ³	495,3	210,4	0,42	1,22
Ferro (Fe)	ng/m ³	653,3	236,8	0,36	1,10
Titanio (Ti)	ng/m ³	32,6	18,5	0,57	1,62
Manganese (Mn)	ng/m ³	14,0	5,8	0,41	1,21
Silicio (Si)	ng/m ³	782,3	670,7	0,86	2,23
Calcio (Ca)	µg/m ³	4,00	0,72	0,18	0,56
Magnesio (Mg)	µg/m ³	0,29	0,11	0,37	0,87

Tabella 12: specie legate a combustione, metalli antropici e ioni secondari – valori medi.

Specie	Unità	Media PM ₁₀	Media PM _{2,5}	Quota in PM _{2,5}	Rapporto normalizzato
Carbonio organico (OC)	µg/m ³	5,69	3,70	0,65	1,79
Carbonio elementare (EC)	µg/m ³	1,86	1,50	0,81	2,24
Levogluocosano	µg/m ³	0,067	0,057	0,86	2,19
Rame (Cu)	ng/m ³	13,6	8,8	0,65	1,87
Zinco (Zn)	ng/m ³	40,6	47,4	1,17	3,47
Nichel (Ni)	ng/m ³	5,4	3,7	0,68	1,87
Cromo totale (Cr)*	ng/m ³	7,2	8,1	1,12	2,75
Piombo (Pb)	ng/m ³	6,05	4,88	0,81	2,29
Vanadio (V)	ng/m ³	2,6	1,9	0,72	2,08
Arsenico (As)*	ng/m ³	0,84	1,08	1,29	3,50
Nitrato	µg/m ³	2,46	1,25	0,51	1,50
Solfato	µg/m ³	2,32	1,63	0,70	1,89

* Valori del PM_{2,5} influenzati dal campione del 28 maggio.

Le specie crostali sono meno rappresentate nel PM_{2,5} in valore assoluto: la quota in PM_{2,5} è 0,36–0,42 per Al, Fe e Mn, 0,37 per Mg e 0,18 per il calcio, a fronte di un rapporto di massa di 0,37. I rapporti normalizzati di Al, Fe e Mn sono però compresi tra 1,10 e 1,22, cioè moderatamente superiori all'unità, e quello del magnesio è 0,87: un arricchimento netto nel grossolano, atteso per la risospensione di suolo, si osserva con chiarezza solo per il calcio (0,56). Al, Fe e Mn sono dunque presenti nel PM_{2,5} in misura appena superiore a quella della massa, il che indica che la risospensione di materiale grossolano non è l'unico contributo e che sorgenti antropiche (traffico, sorgenti industriali, combustioni) concorrono anche alla frazione fine. Il silicio (quota 0,86, rapporto normalizzato 2,23) e, in misura minore, il titanio (0,57; 1,62) sono ampiamente presenti anche nella frazione fine; per il silicio, insolitamente alto nel PM_{2,5}, va verificato l'eventuale contributo del supporto filtrante e dei bianchi. Le frazioni carboniose, il levogluocosano, il nichel, il piombo, il vanadio e gli ioni secondari mostrano rapporti normalizzati nettamente superiori all'unità (da 1,50 a 2,29): i contributi combustivi, antropici e secondari sono quindi prevalentemente associati al PM_{2,5}. Valori di quota superiori a 1 non sono fisicamente attendibili: per arsenico e cromo dipendono dal campione del 28 maggio (escludendolo, As 0,80 ng/m³ e Cr 5,7 ng/m³ nel PM_{2,5}, con quote 0,96 e 0,78 e rapporti normalizzati 2,84 e 2,15); per lo zinco (quota 1,17, anche senza quel campione) indicano incertezza analitica o di campionamento, e il dato va letto come “comparabile nelle due frazioni”. Il rame, con quota 0,65 e rapporto normalizzato 1,87, è prevalentemente associato alla frazione fine.

7. Conclusioni

Nel periodo 24 febbraio – 16 luglio 2026 le concentrazioni di massa misurate dallo strumento Palas del laboratorio mobile hanno una media di 40,3 µg/m³ per il PM₁₀ e di 14,6 µg/m³ per il PM_{2,5}. Sebbene nessuno di questi valori sia direttamente confrontabile con i limiti di legge, che si riferiscono ad un intero anno civile, si può osservare che la media del PM₁₀ è sostanzialmente in linea con il

valore limite annuale di $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mentre quella del $\text{PM}_{2,5}$ risulta inferiore al valore annuale di riferimento di $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I giorni di superamento del limite giornaliero del PM_{10} ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) sono 35, pari al numero massimo consentito dal D.Lgs. 155/2010 nell'arco di un anno civile, e si distribuiscono lungo tutto il periodo di osservazione con maggiore frequenza nei mesi di maggio e giugno. Il $\text{PM}_{2,5}$ rappresenta mediamente circa il 37% della massa del PM_{10} ed è fortemente correlato ad esso ($r = 0,79$). Entrambe le medie risulterebbero superiori ai valori previsti dalla Direttiva (UE) 2024/2881 applicabili dal 2030 ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il PM_{10} e $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ per il $\text{PM}_{2,5}$). Tali confronti hanno tuttavia un valore esclusivamente indicativo, poiché il periodo di monitoraggio è inferiore all'anno solare e il sito non appartiene alla rete regionale ufficiale di monitoraggio della qualità dell'aria (DGR 683/2014); essi non costituiscono pertanto una verifica di conformità normativa.

L'analisi delle componenti principali (PCA) condotta sull'intero periodo modifica in parte il quadro emerso dall'analisi preliminare del primo mese di monitoraggio. Nel PM_{10} la componente principale (22,8% della varianza) è caratterizzata da elementi di origine crostale e metallica e mostra un incremento nei mesi più caldi; essa risulta compatibile con processi di risospensione di materiali superficiali e con la presenza di un'impronta metallurgica storica, pur non essendo possibile distinguerla con certezza da contributi riconducibili al traffico veicolare o alle emissioni navali. La seconda componente (17,3% della varianza) è invece associata a IPA ad alto peso molecolare, carbonio organico e levoglucosano, risultando prevalente nel periodo più freddo e riconducibile principalmente alla combustione di biomassa. Nel $\text{PM}_{2,5}$ la principale componente metallica (circa il 26% della varianza), una volta esclusi i campioni anomali, mostra una struttura sostanzialmente coerente con quella osservata nel PM_{10} ed è affiancata da una componente combustiva. La componente Se–Te–Tl–B–As–Cr osservata nell'analisi completa deriva invece da un singolo campione di validità dubbia e non rappresenta una configurazione emissiva ricorrente. Le elaborazioni statistiche sono state effettuate sia sull'intero dataset sia verificando la robustezza dei risultati rispetto all'esclusione dei campioni anomali e, nel complesso, le due frazioni granulometriche risultano complementari ma meno nettamente differenziate di quanto apparisse nell'analisi condotta prima della rimozione dei campioni sospetti. Le conclusioni relative al PM_{10} risultano comunque robuste rispetto all'esclusione di tali dati.

Il bilancio di massa del PM_{10} evidenzia che le componenti predominanti sono la materia organica (OM) e la polvere minerale (MD), che contribuiscono rispettivamente per il 25,6% e il 25,5% della massa media misurata. L'aerosol inorganico secondario (SIA) rappresenta il 14,4% del PM_{10} , mentre il sale marino (SS) contribuisce per l'11,1%, confermando l'importanza del trasporto di aerosol marino nel sito costiero di Bagnoli. Tali contributi includono la quota di acqua associata alle particelle igroscopiche, stimata mediante l'applicazione di un fattore di idratazione pari a 1,29 alle componenti secondaria e marina. Il carbonio elementare (EC) rappresenta il 4,6% della massa totale, mentre gli elementi in traccia (TE) incidono per meno dell'1%. La quota non ricostruita (UNK) risulta pari a $7,38 \mu\text{g}/\text{m}^3$, corrispondente al 18,4% del PM_{10} medio. Il quadro ottenuto è coerente con quanto emerso dalla PCA, che indica una forte influenza delle componenti crostale e combustiva-organica, accompagnate da contributi significativi di aerosol secondario e di origine marina, attesi in considerazione della localizzazione costiera del sito. La riduzione della quota non identificata rispetto alle elaborazioni preliminari conferma l'importanza di considerare il contributo dell'acqua associata alle particelle igroscopiche nella ricostruzione della massa del particolato. Permangono tuttavia alcune fonti di incertezza legate al fattore di conversione OC/OM adottato, alla possibile presenza di specie chimiche non determinate dal protocollo analitico e all'impiego della massa misurata mediante strumentazione ottica come riferimento per il bilancio. I risultati devono pertanto essere considerati



rappresentativi, pur rimanendo suscettibili di ulteriore affinamento a seguito del completamento delle attività di validazione dei dati.

I livelli medi dei microinquinanti regolamentati (As, Cd, Ni, Pb e benzo(a)pirene) risultano ampiamente inferiori ai rispettivi valori obiettivo o valori limite annuali. Rimangono tuttavia da approfondire alcuni dati puntuali che, allo stato attuale, devono essere considerati come risultati da validare piuttosto che come episodi ambientali accertati: i valori elevati di nichel nel PM₁₀ del 16 e 17 maggio (52,3 e 60,0 ng/m³), isolati rispetto agli altri metalli e non confermati dalla frazione fine; il campione di PM_{2,5} del 28 maggio, caratterizzato da concentrazioni anomale di arsenico e cromo incompatibili con il corrispondente campione di PM₁₀; i campioni con concentrazioni di metalli crostali prossime allo zero osservati nel mese di maggio e a metà luglio; il gruppo di campioni caratterizzato da elevate concentrazioni di IPA leggeri a metà marzo; nonché alcune criticità residue del bilancio di massa nelle giornate in cui la massa chimicamente ricostruita risulta superiore a quella misurata. Il proseguimento del monitoraggio e l'applicazione di metodologie recettoriali dedicate, quali la Positive Matrix Factorization (PMF), consentiranno di verificare la stabilità delle componenti individuate su scala annuale e di attribuire quantitativamente i contributi delle diverse sorgenti emissive.

In sintesi, nel periodo analizzato i livelli di PM_{2,5} e dei microinquinanti regolamentati risultano inferiori ai rispettivi valori limite o valori obiettivo definiti dalla normativa vigente su base annuale, mentre la concentrazione media di PM₁₀ (40,3 µg/m³) risulta sostanzialmente in linea con il valore limite annuale di 40 µg/m³ e il numero di superamenti del limite giornaliero è pari a 35. Tali confronti mantengono tuttavia un carattere puramente indicativo in ragione della durata limitata del monitoraggio. Nel PM₁₀ si conferma la presenza di una componente metallico-crostante predominante nei mesi più caldi, compatibile con processi di risospensione e movimentazione di materiali, e di una componente combustiva stagionale associata principalmente alla combustione di biomassa; nel PM_{2,5} prevalgono invece componenti fini riconducibili ai processi di combustione e a metalli condivisi con la frazione PM₁₀. Il bilancio di massa del PM₁₀ mostra un contributo dominante della materia organica (25,6%) e della polvere minerale (25,5%), seguite dall'aerosol inorganico secondario (14,4%), dal sale marino (11,1%), dal carbonio elementare (4,6%) e dagli elementi in traccia (<1%), mentre la quota non ricostruita è pari al 18,4% della massa totale. Il quadro risulta complessivamente coerente con le evidenze emerse dall'analisi fattoriale e conferma il ruolo congiunto delle componenti crostanti, combustive, secondarie e marine nella determinazione della composizione del particolato atmosferico nel sito di Bagnoli. Le attribuzioni di sorgente restano comunque ipotesi interpretative che potranno essere ulteriormente consolidate mediante l'applicazione di tecniche di source apportionment e attraverso il proseguimento delle attività di monitoraggio.

Dirigente UO MOAR
Dott. Piero CAU

Dirigente UOC ANCE
Dirigente UO CRIABO f.f.
Dott. Francesca BARONE

I dati analitici utilizzati nella presente relazione sono pubblicati su
<https://www.arpacampania.it/web/guest/determinazioni-analitiche>

