

Clustering gerarchico delle proprietà ottiche del PM a Milano: una nuova metodologia per aerosol typing

Stefano Rimoldi^{1*}, Marcus Acton-Bond^{1,2}, Vera Bernardoni^{1,2}, Gianluigi Valli^{1,2}, Laura Cadeo^{1,2},
Cristina Colombi³, Rosario Cosenza³, Roberta Vecchi^{1,2}

¹Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano; ²INFN-Milano; ³ARPA Lombardia

* Corresponding author. E-mail: stefano.rimoldi2@studenti.unimi.it



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MILANO

DIPARTIMENTO DI FISICA



OBIETTIVI dello STUDIO

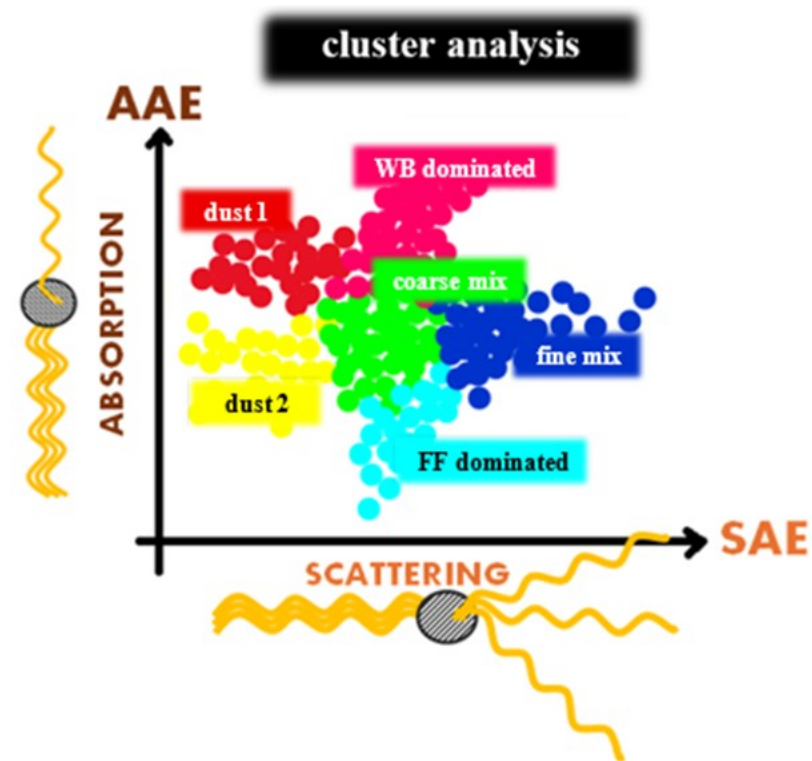
MISURAZIONE ONLINE di PROPRIETÀ OTTICHE
di ASSORBIMENTO e SCATTERING
in reti di monitoraggio

+

implementazione di un semplice
ALGORITMO di CLUSTERING GERARCHICO
su parametri ottici intensivi AAE-SAE



AEROSOL TYPING



STRUMENTI e SITO



AETHALOMETER AE33
(Magee Scientific, USA)

**coefficiente di assorbimento (σ_{abs})
a 7 λ (370 – 950 nm)**



NEPHELOMETER AURORA 3000
(Ecotech, Australia)

**coefficiente di scattering (σ_{sca})
a 3 λ (450, 525, 635 nm)**



**stazione di monitoraggio ARPA Lombardia
background urbano - Milano Pascal**

PARAMETRI OTTICI: AAE e SAE

INFORMAZIONE multi- λ su σ_{abs}

$$\frac{\sigma_{abs}(\lambda_1)}{\sigma_{abs}(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^{-AAE}$$

AAE = Absorption Ångström Exponent

INFORMAZIONI sulle SORGENTI



traffico
AAE ≈ 1



combustione di biomassa (BB)
AAE ≈ 2



polvere minerale
AAE $\approx 1.5 - 2$

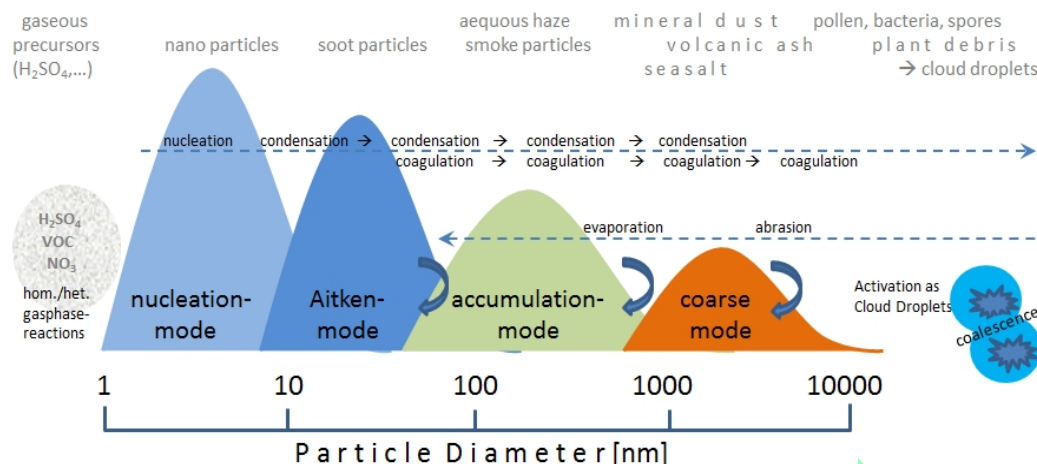
PARAMETRI OTTICI: AAE e SAE

INFORMAZIONE multi- λ su σ_{sca}

$$\frac{\sigma_{sca}(\lambda_1)}{\sigma_{sca}(\lambda_2)} = \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2}\right)^{-SAE}$$

SAE = Scattering Ångström Exponent

INFORMAZIONI DIMENSIONALI

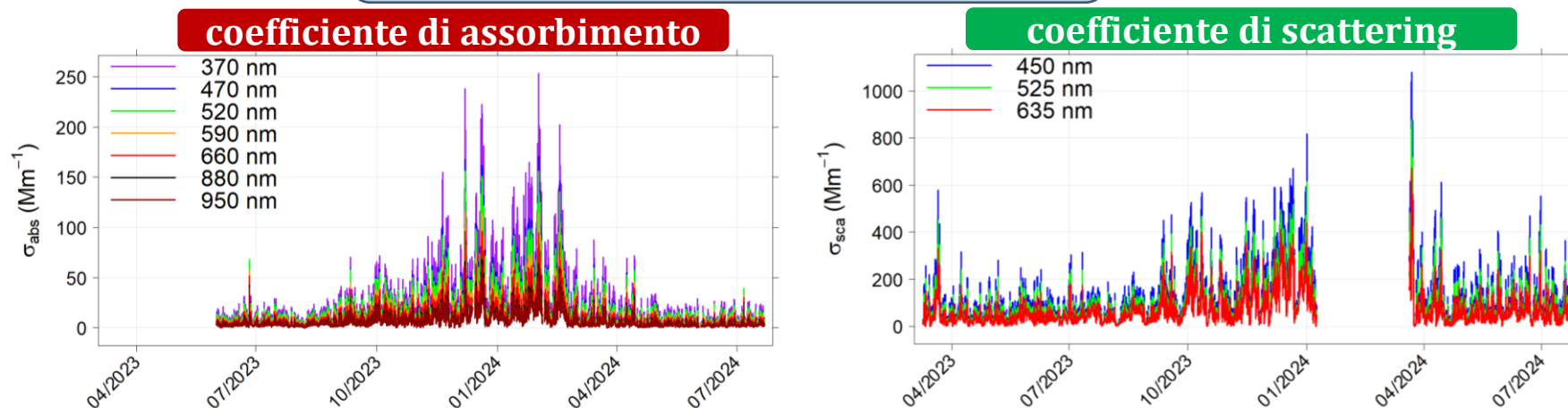


SAE < 1 frazione coarse (> 1 μm)
1 < SAE < 2 moda di accumulazione
SAE > 2 particelle ultrafini (< 100 nm)

SAE DECRESCENTE

CAMPAGNA #1: DATASET ANNUALE

periodo: marzo 2023 – luglio 2024
risoluzione: 1 h



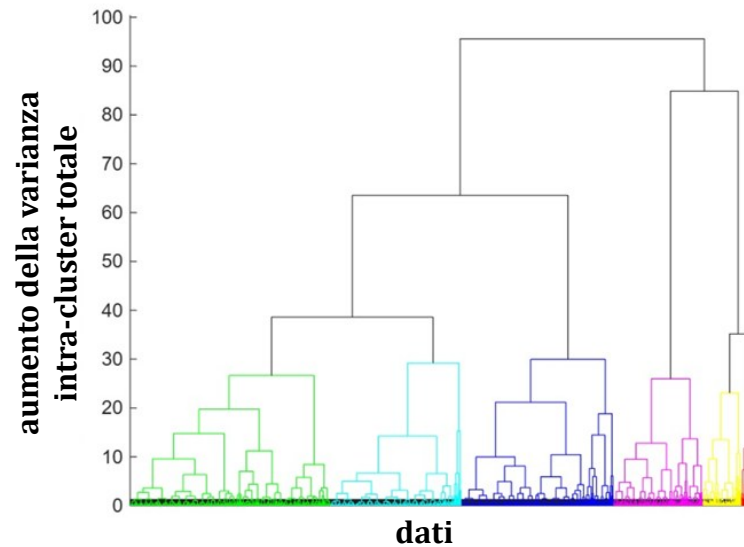
TRATTAMENTO DATI

- 1 – σ_{abs} riportati alle stesse λ di σ_{sca} tramite fitting a legge di potenza
- 2 – calcolo di AAE e SAE alla stessa coppia di λ (450 - 635 nm)
- 3 – esclusione di dati senza senso fisico
 - $0 < \text{AAE} < 3$
 - $-1 < \text{SAE} < 4.5$
- 4 – normalizzazione delle distribuzioni di AAE/SAE
 - media nulla e varianza unitaria
 - SAE ha valori in un range più esteso

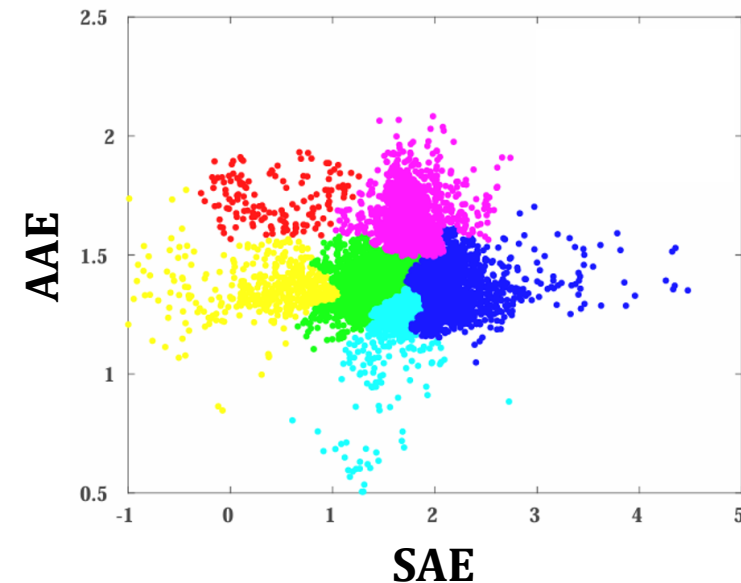
CAMPAGNA #1: DATASET ANNUALE

CLUSTERING GERARCHICO

- **metodo di Ward:** minimizzazione dell'aumento della varianza intra-cluster totale a ogni step di raggruppamento
- **numero di cluster:** scelto in base a parametri matematici (coefficiente di correlazione cofenetico) e interpretazione fisica

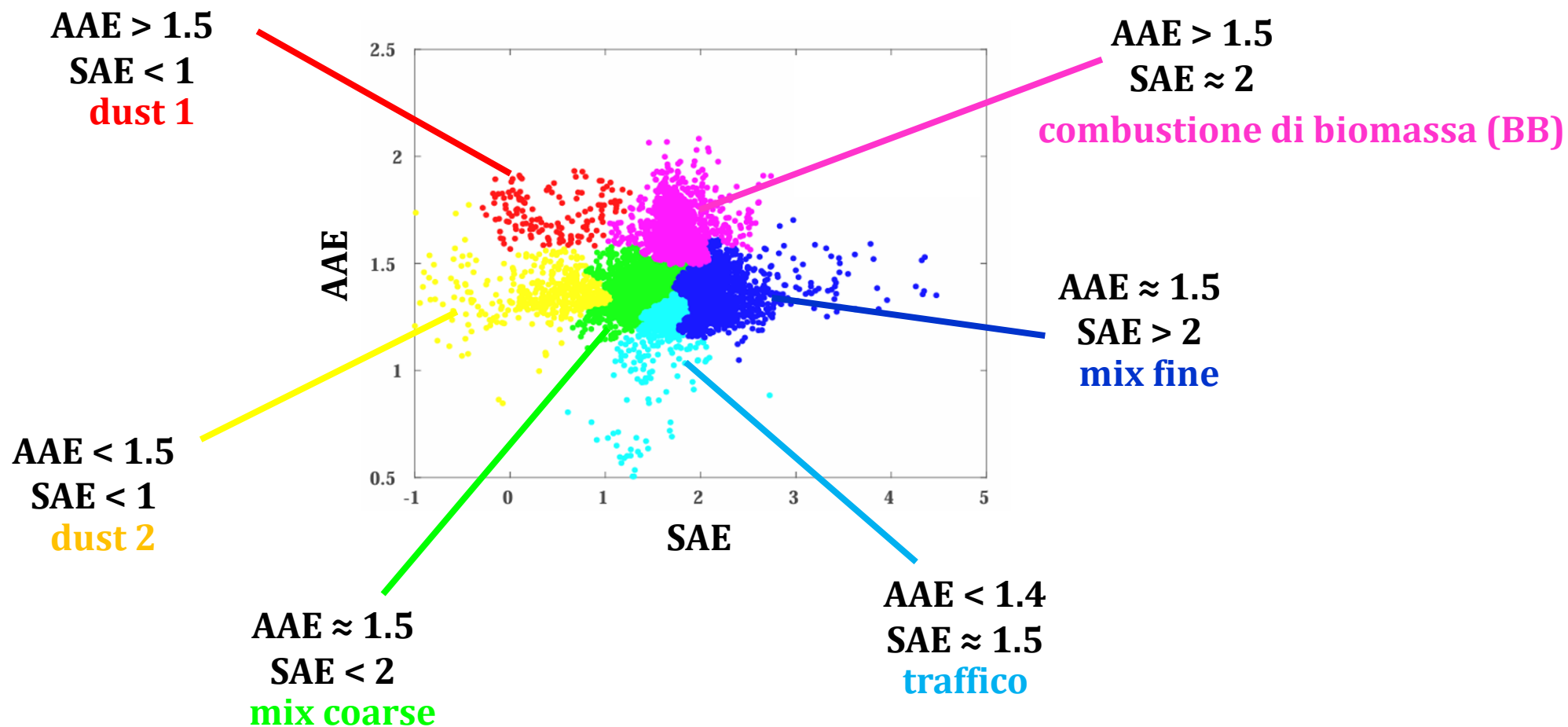


Numero di dati in ogni cluster: 2615 (**verde**, 32.2%), 1705 (**azzurro**, 21.0%), 1986 (**blu**, 24.5%), 1171 (**fucsia**, 14.4%), 500 (**giallo**, 6.2%), 141 (**rosso**, 1.7%).



CAMPAGNA #1: DATASET ANNUALE

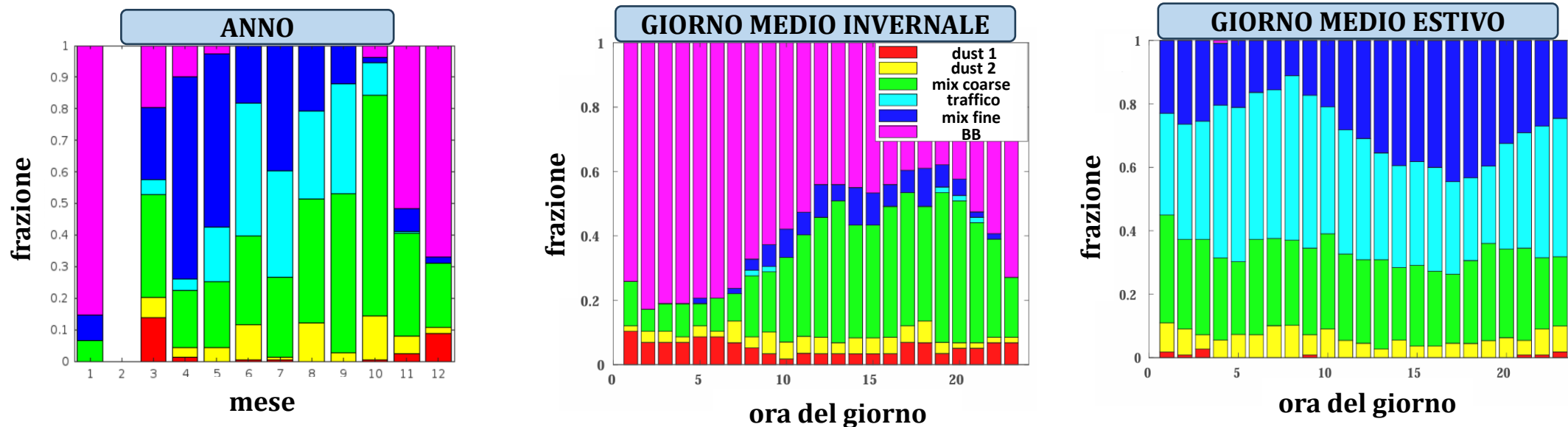
IDENTIFICAZIONE dei CLUSTER: PROPRIETÀ OTTICHE



CAMPAGNA #1: DATASET ANNUALE

IDENTIFICAZIONE dei CLUSTER: ANDAMENTI TEMPORALI

frazione di ore mensili o giornaliere i cui i dati ricadono in un certo cluster



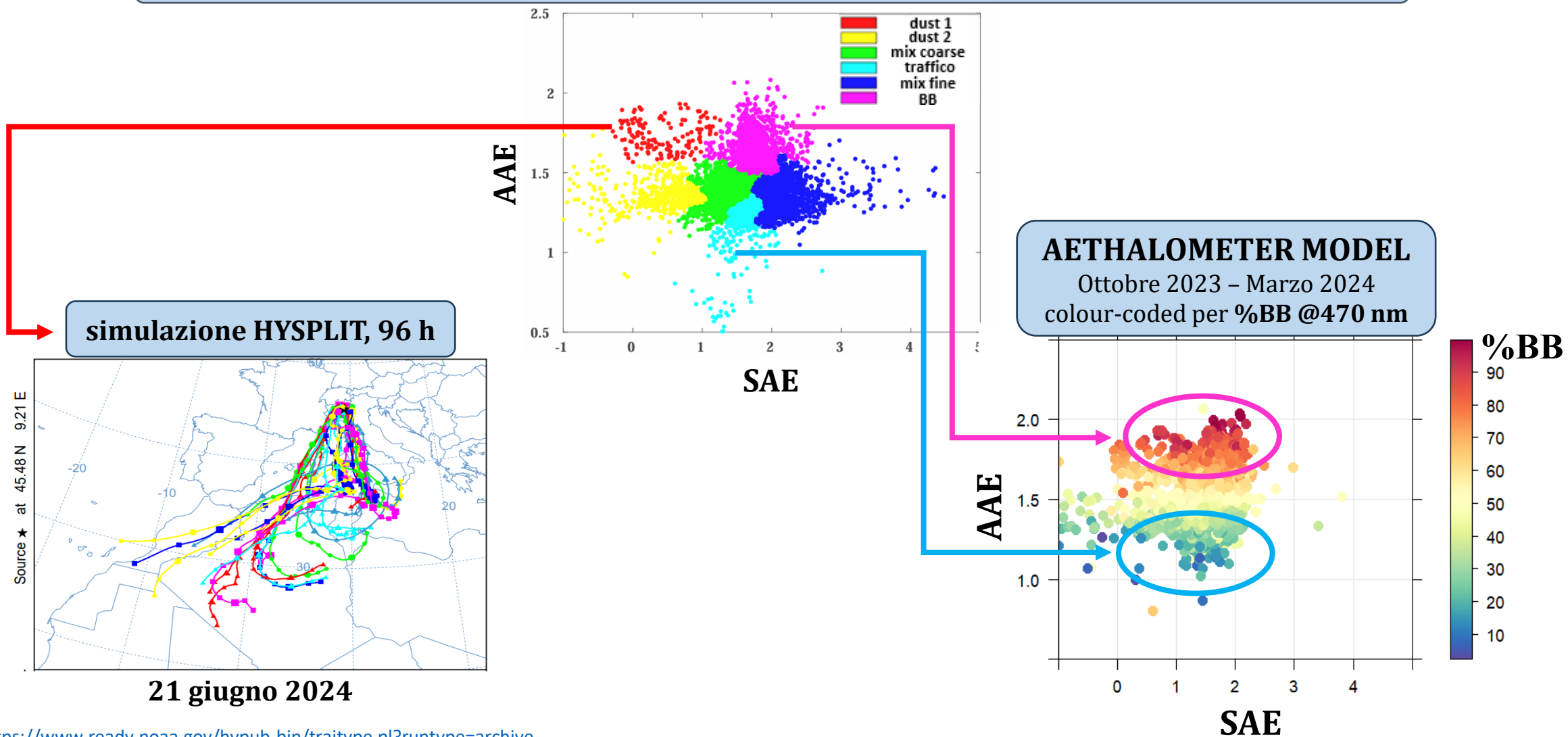
- cluster **dominato da BB**: presente in più del 50% dei campioni invernali (e mai in estate), soprattutto di notte
- cluster **dominato da traffico**: appare soprattutto in estate, quando la sorgente BB è spenta
- mix **fine** e **coarse**: sempre presenti, con il **fine** predominante in estate
- cluster **dust 1** e **dust 2**: distribuiti casualmente durante l'anno



in ogni cluster sono raccolti dati (AAE,SAE) per i quali domina otticamente un certo tipo di aerosol:
le colonne nei grafici sopra NON rappresentano i contributi dei diversi cluster

CAMPAGNA #1: DATASET ANNUALE

IDENTIFICAZIONE dei CLUSTER: RETROTRAIETTORIE ed AETHALOMETER MODEL



<https://www.ready.noaa.gov/hypub-bin/trajtype.pl?runtime=archive>

CAMPAGNA #2: FOCUS su EPISODIO

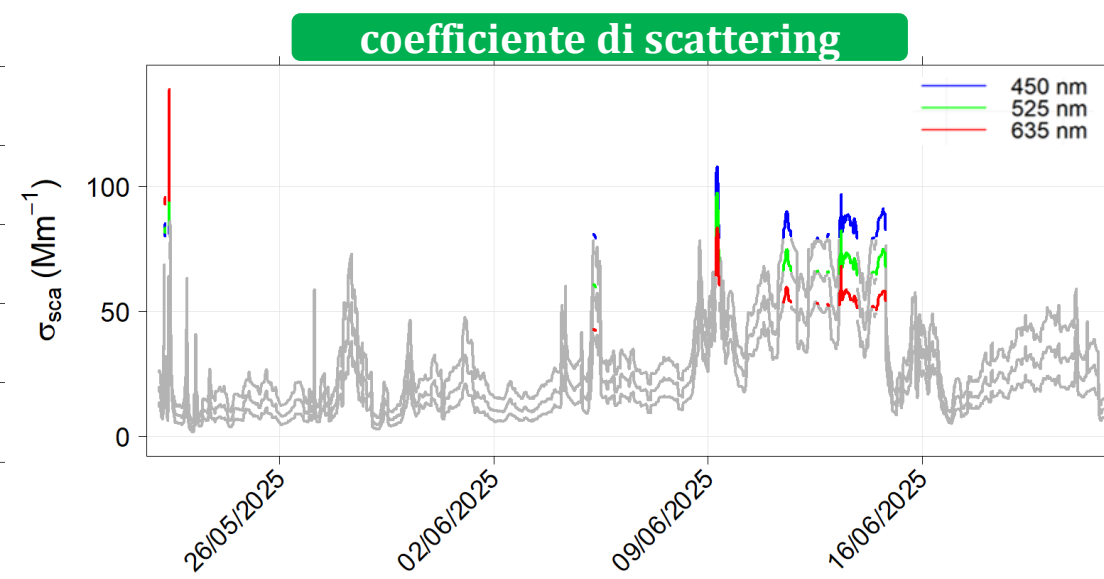
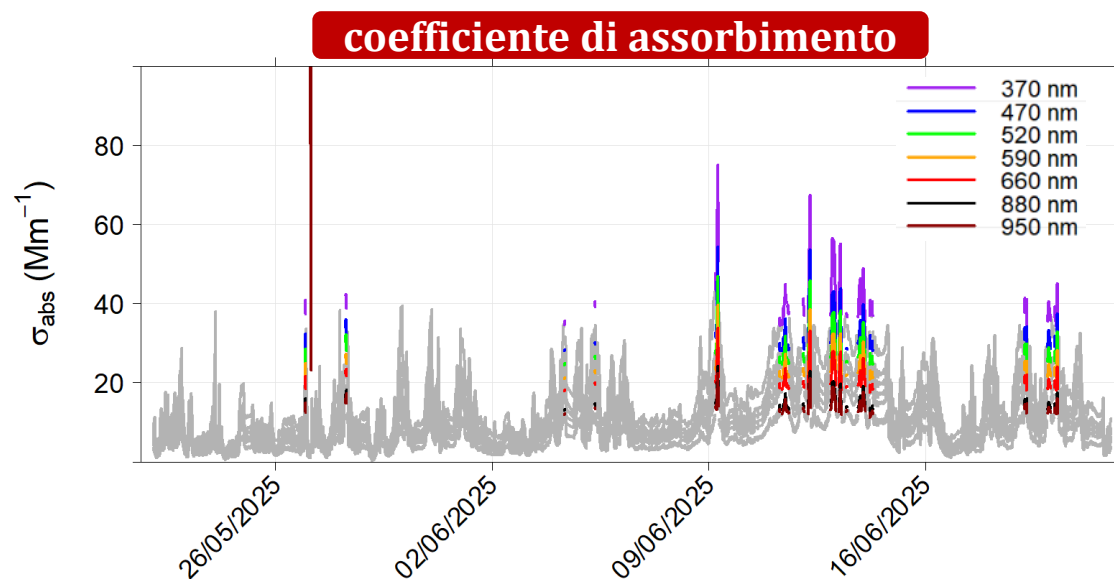
periodo: 21 maggio – 21 giugno 2025
risoluzione: 15 min

raffinamento aggiuntivo: considerati solo i punti con

- $\sigma_{\text{abs}}(450 \text{ nm})$ maggiori del 95° percentile

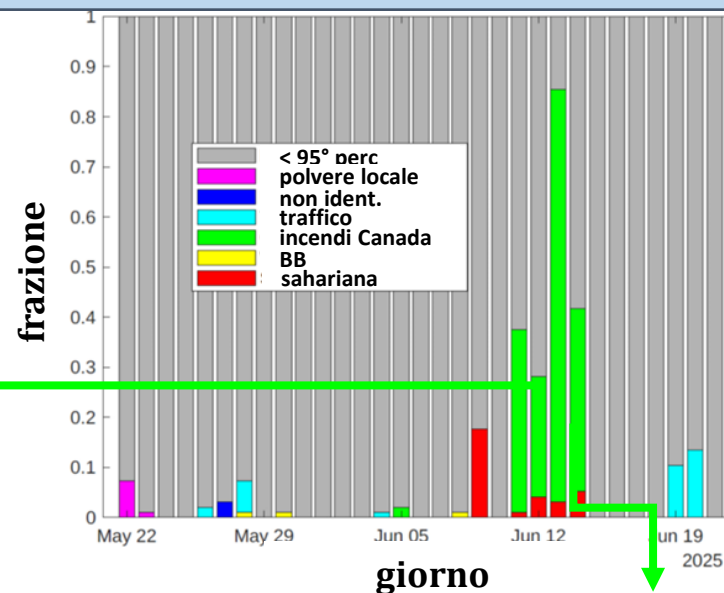
e/o

- $\sigma_{\text{sca}}(450 \text{ nm})$ maggiori del 95° percentile

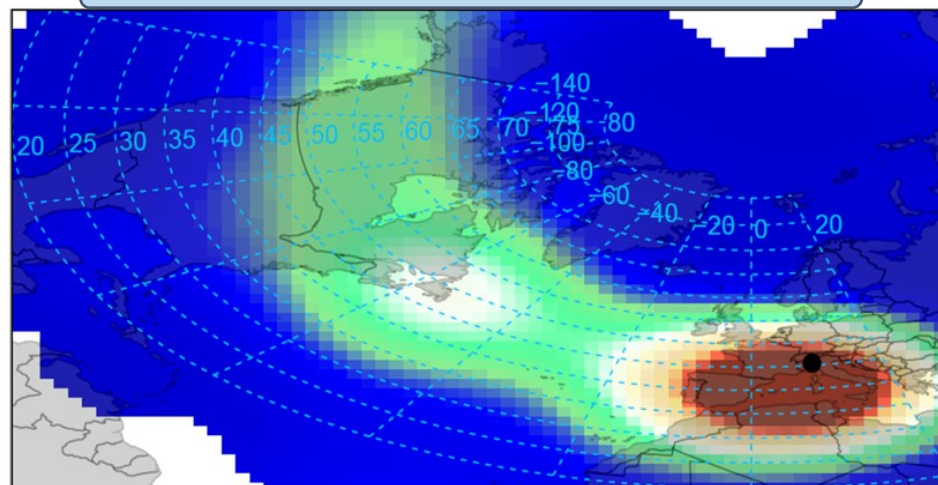


CAMPAGNA #2: FOCUS su EPISODIO

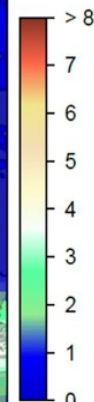
IDENTIFICAZIONE dei CLUSTER: INCENDI CANADESI



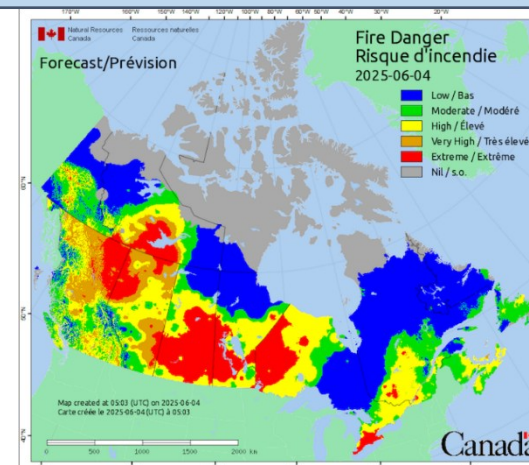
simulazione HYSPLIT, 600 h, 1° x 1° lat-lon



%traiettorie



Canadian Wildfire Information System



<https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/en/summary>

CONCLUSIONI e PROSPETTIVE

il metodo di clustering gerarchico AAE-SAE presentato:

- è semplice da implementare in reti di monitoraggio ed efficace per aerosol typing
- permette un'analisi quasi in tempo reale di episodi che impattano sulla qualità dell'aria

episodio: incendi canadesi

	LIMITI EU	13/06/2025	9-15/06/2025	altri giorni
PM _{2.5}	25 µg/m ³	29 µg/m ³	(19 ± 8) µg/m ³	(10 ± 3) µg/m ³
PM ₁₀	50 µg/m ³	41 µg/m ³	(30 ± 6) µg/m ³	(15 ± 5) µg/m ³

maggiori informazioni nelle seguenti pubblicazioni:



Rimoldi, S., et al., 2026. *Atmospheric aerosol light scattering and absorption properties in the urban area of Milan (Italy): A focus on aerosol typing*. Atmos. Res. 334, 108776.



Acton-Bond, M., et al., 2026. *Near-real time episode identification: Long-range transport of Canadian wildfire aerosol*. Atmos. Res. 339, 109062.



Grazie per l'attenzione!

Stefano Rimoldi^{1*}, Marcus Acton-Bond^{1,2}, Vera Bernardoni^{1,2}, Gianluigi Valli^{1,2}, Laura Cadeo^{1,2},
Cristina Colombi³, Rosario Cosenza³, Roberta Vecchi^{1,2}

¹*Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano*; ²*INFN-Milano*; ³*ARPA Lombardia*

** Corresponding author. E-mail: stefano.rimoldi2@studenti.unimi.it*



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI MILANO

DIPARTIMENTO DI FISICA



Riconoscimenti:

Questa ricerca è parte del progetto “*One Health Action Hub: University Task Force for the resilience of territorial ecosystems*”, sostenuto da Università degli Studi di Milano – PSR 2021 - GSA - Linea



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
DIPARTIMENTO DI FISICA



**AETHALOMETER AE33
(Magee Scientific, USA)**

**coefficiente di assorbimento (σ_{abs})
a 7 λ (370 – 950 nm)**

Il coefficiente di assorbimento è stato calcolato secondo la procedura **ACTRIS**:

$$\sigma_{abs}(\lambda) = \frac{[eBC] \cdot MAC(\lambda)}{H^*}$$

- **[eBC]**: concentrazione di equivalent BC fornita da AE33
- **MAC** riportato nel manuale di AE33
- **$H^* = 1.76$ *fattore di armonizzazione*** costante per tener conto dello scattering multiplo (per il filter tape M8060) ottenuto per confronto con un Multi Angle Absorption Photometer.



NEPHELOMETER AURORA 3000 (Ecotech, Australia)

**coefficiente di scattering (σ_{sca})
a 3 λ (450, 525, 635 nm)**

I coefficienti di scattering forniti da Aurora 3000 ($\sigma_{sca}(\lambda)^{neph}$) sono stati corretti per

- errore di troncamento
- funzione di illuminazione non perfettamente lambertiana

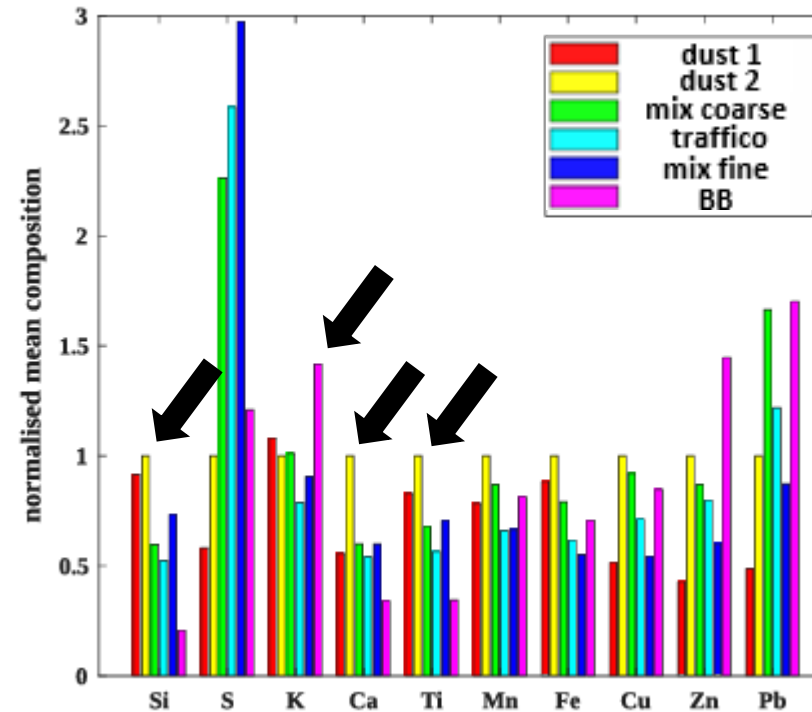
secondo la procedura descritta in *Müller et al. (2011)*:

$$\sigma_{sca}(\lambda) = \sigma_{sca}(\lambda)^{neph} \cdot C_{sca}(\lambda)$$

$$C_{sca}(\lambda) = a + b \cdot SAE$$

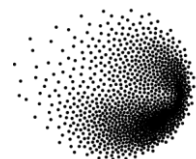
450 nm					
SAE(450,525nm)		SAE(450,635nm)		SAE(525,635nm)	
a	b	a	b	a	b
1.455	-0.189	1.434	-0.176	1.403	-0.156

campagna #1 composizione elementale



composizione elementale dei cluster misurata da Xact 625i (PSI) in 33% dei campioni:

- normalizzata rispetto alla massa oraria PM10 (ARPA Lombardia)
- ogni elemento normalizzato rispetto al valore assunto nel cluster dust 2 per risaltare le differenze inter-cluster



PSI



periodo: 21 maggio – 21 giugno 2025
risoluzione: 15 min

