

Interconfronto di smart sensor a Milano: una attività svolta tra soci IAS del WG2

Cristina Colombi, Rosario Cosenza – ARPA Lombardia

Daniela Cesari, Florian Unga, Daniele Contini – ISAC-CNR Lecce

Maria Chiara Bove, Roberto Cresta – ARPA Liguria

Silvia Moroni – AMAT, Comune di Milano

Carlo Giglioni – Con.Tec Engineering srl

Enrico Bompadre – FAI Instruments srl

Stefano Alberti - Dado Lab srl

Alberto Scarcelli - ORION srl

Davide Vignola - Pollution srl

Marc Giles - Eurelettronica Icas

Maria Grazia Perrone - XearPro srl,

WG2 IAS



JRC, 2019 – Review of sensors for air quality monitoring

In linea teorica, uno strumento per la qualità dell'aria deve rispettare i criteri di massima incertezza relativa permessa e indicata nella Direttiva 2008/50/CE (Allegato I).

La valutazione dei LCS si rivolge prevalentemente ai seguenti criteri:

- *accordo tra sensori LCS e misure di riferimento;*
- *disponibilità (in output dello strumento) dei dati grezzi, trasparenza nel loro trattamento e possibilità di calibrazione a posteriori;*
- *possibilità di rilevare e misurare più inquinanti;*
- *accessibilità ai sistemi sensoristici (costo e commercializzazione).*

WMO, 2018 – Low-cost sensors for the measurement of atmospheric composition: overview of topic and future applications

In generale, i LCS devono essere trattati come un qualunque strumento analitico, quindi richiedono una calibrazione regolare (o diretta o con strumenti di riferimento installati nel medesimo sito). Inevitabilmente mostreranno un drift della baseline (cambiamento di intercetta) o della sensibilità (cambiamento della pendenza della retta di calibrazione).

Per ciò che concerne la loro applicabilità, bisogna considerare:

- *il range di T, RH e di concentrazione del parametro target;*
- *il range di risposta dello strumento;*
- *la stabilità dello strumento in funzione delle condizioni ambientali del sito.*

UNI CEN/TS 17660 Marzo 2022 – Qualità dell'aria - Valutazione della prestazione dei sistemi di sensori per la qualità dell'aria

- *principi generali per la classificazione delle prestazioni dei sistemi di sensori a basso costo per il monitoraggio dei composti gassosi in aria ambiente in siti stazionari*
- *applicabile alla determinazione della concentrazione in massa degli inquinanti atmosferici*
- *classificazione coerente con i requisiti per le misurazioni indicative e le stime obiettive definite nella Direttiva 2008/50/EC*
- *fornisce una classificazione per le applicazioni (misurazioni non regolamentate) che richiedono criteri di prestazione più distese*
- *fornisce una guida sulla verifica dei sistemi di sensori per la CO2*
- *Valutazione della sensibilità, selettività e stabilità*

Classe 1: sistemi che possono essere utilizzati per misure indicative

Classe 2: sistemi che possono essere utilizzati per stime

Classe 3: sistemi che hanno caratteristiche di incertezze di misura più «rilassate» e che quindi possono essere utilizzati con obiettivi di ricerca specifici, scopi educativi e/o di *citizen science*.

LCS: Low Cost Sensor.....quanto low?

Detector



Cella elettrochimica (ECH)

Ossido di metallo

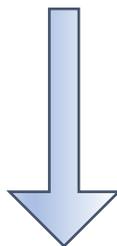
Dispositivi micro-elettro-meccanici

Nefelometro

OPC

Assorbimento non dispersivo dell'IR (NDIR)

Rilevatori a fotoionizzazione (PID)



Torino, 28-31 maggio 2024

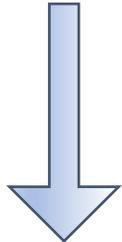
SOCIETA ITALIANA
DI AEROSOL
IAS
ITALIAN AEROSOL
SOCIETY

ARPA LOMBARDIA
Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente

Detector



- Cella elettrochimica (ECH)
- Ossido di metallo
- Dispositivi micro-elettro-meccanici
- Nefelometro
- OPC
- Assorbimento non dispersivo dell'IR (NDIR)
- Rilevatori a fotoionizzazione (PID)



Torino, 28-31 maggio 2024



Schede elettroniche

Dispositivo di alimentazione

Sistema di campionamento (attivo o passivo)

Convertitore di segnale A/D

Processore di segnali



Dispositivo di memorizzazione e trasmissione dati



ECH

Reazione di ossido-riduzione con gli elettrodi del sensore immersi in un elettrolita



Corrente elettrica tra gli elettrodi



proporzionale alle concentrazioni GAS

Buona sensibilità MA precisione e affidabilità variano a seconda della specie da misurare

Interferenze con UR e T

ECH

Reazione di ossido-riduzione con gli elettrodi del sensore immersi in un elettrolita
→ Corrente elettrica tra gli elettrodi → proporzionale alle concentrazioni GAS
Buona sensibilità MA precisione e affidabilità variano a seconda della specie da misurare
Interferenze con UR e T

NDIR

Attenuazione di una luce infrarossa attraverso un gas → assorbimento a specifiche lunghezze d'onda dalle molecole del gas → proporzionale alla concentrazione (*Lambert-Beer*)
Concentrazioni di CO₂ con buona sensibilità
Risultati risentono delle condizioni ambientali (T, UR e P) → correzioni

ECH

Reazione di ossido-riduzione con gli elettrodi del sensore immersi in un elettrolita
→ Corrente elettrica tra gli elettrodi → proporzionale alle concentrazioni GAS
Buona sensibilità MA precisione e affidabilità variano a seconda della specie da misurare
Interferenze con UR e T

NDIR

Attenuazione di una luce infrarossa attraverso un gas → assorbimento a specifiche lunghezze d'onda dalle molecole del gas → proporzionale alla concentrazione (*Lambert-Beer*)
Concentrazioni di CO₂ con buona sensibilità
Risultati risentono delle condizioni ambientali (T, UR e P) → correzioni

PID

Interazione tra una sorgente nel campo UV e le molecole organiche presenti nell'aria (composti organici volatili);
→ fotoni ad alta energia specifica → corrente indotta → proporzionale alla quantità di ioni
Alcuni composti vengono ionizzati (e rilevati) in modo efficiente mentre altri composti sono ionizzati in modo meno efficiente → VOC totali

ECH

Reazione di ossido-riduzione con gli elettrodi del sensore immersi in un elettrolita
→ Corrente elettrica tra gli elettrodi → proporzionale alle concentrazioni GAS
Buona sensibilità MA precisione e affidabilità variano a seconda della specie da misurare
Interferenze con UR e T

NDIR

Attenuazione di una luce infrarossa attraverso un gas → assorbimento a specifiche lunghezze d'onda dalle molecole del gas → proporzionale alla concentrazione (*Lambert-Beer*)
Concentrazioni di CO₂ con buona sensibilità
Risultati risentono delle condizioni ambientali (T, UR e P) → correzioni

PID

Interazione tra una sorgente nel campo UV e le molecole organiche presenti nell'aria (composti organici volatili);
→ fotoni ad alta energia specifica → corrente indotta → proporzionale alla quantità di ioni
Alcuni composti vengono ionizzati (e rilevati) in modo efficiente mentre altri composti sono ionizzati in modo meno efficiente → VOC totali

PM

Misura ottica → diffusione della luce → LED o un laser, diffusa dalle particelle che attraversano una cella di misura → concentrazione proporzionale all'intensità della luce diffusa (densità e $dN/d\log D_p$ fisse)
• Nefelometria: misura la diffusione della luce
• Conteggio ottico delle particelle (OPC): misura dimensione e numero delle particelle (anche \forall classe)

Intercomparison Smart Sensor

Soci IAS partecipanti:

Arpa Lombardia
 ARPA LIGURIA
 ISAC-CNR
 AMAT per Comune di Milano

Enti pubblici

Contec
 Dadolab
 Xearpro
 FAI
 ORION
 Pollution
 Eurelettronica ICAS

Aziende

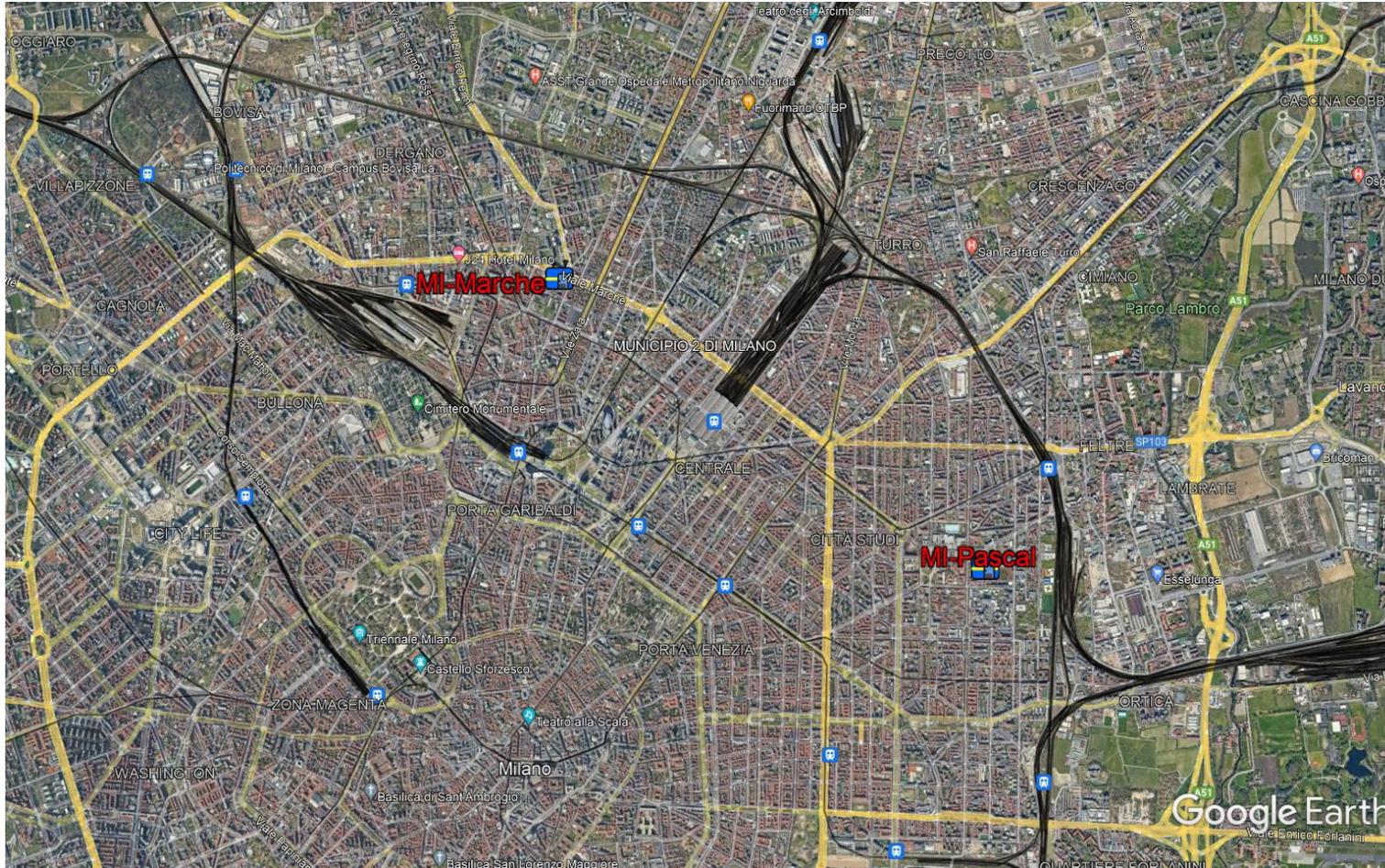
	IAS member	ARPA L.	Socio 1		Socio 2	Socio 3	Socio 4		Socio 5		Socio 6	Socio 7	Socio 8	Socio 9	Socio 10
	Parametri/Device	Ref.	LCS 1	LCS 2	LCS 3	LCS 4	LCS 5	LCS 6	LCS 7	LCS 8	LCS 9	LCS 9	LCS 10	LCS 11	LCS 1
Parametri	Cn	x									x	x			
	PTS								x						
	PM10	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
	PM2.5	x	x		x	x	x	x	x		x	x	x	x	x
	PM1							x	x	x			x	x	
	NO2	x			x	x		x	x	x				x	x
	NO	x				x			x					x	x
	O3	x				x		x	x	x				x	x
	CO	x				x		x	x					x	x
	SO2	x				x									
	H2S					x									
	NH3	x													
	VOC	x								x	x				x
	CO2														x
	BC	x													x
	Luce									x					
Meteo	x				x		x	x			x	x	x	x	

Intercomparison Smart Sensor

	IAS member	Socio 1		Socio 2	Socio 3	Socio 4		Socio 5		Socio 6	Socio 7	Socio 8	Socio 9	Socio 10
	Parametri/Device	LCS 1	LCS 2	LCS 3	LCS 4	LCS 5	LCS 6	LCS 7	LCS 8	LCS 9	LCS 9	LCS 10	LCS 11	LCS 1
Parametri	Cn									OPC	OPC			
	PTS							OPC						
	PM10	Neph	Neph	OPC	OPC	Neph	Neph	OPC		OPC	OPC	OPC	Neph	Neph
	PM2.5	Neph		OPC	OPC	Neph	Neph	OPC		OPC	OPC	OPC	Neph	Neph
	PM1					Neph	Neph	OPC				OPC	Neph	
	NO2		ECH	ECHp		ECHp	ECH	ECH				ECHp	ECH	
	NO			ECHp			ECH					ECHp	ECH	
	O3			ECHp		ECHp	ECH	ECH				ECHp	ECH	
	CO			ECHp		NDIRp	NDIR					ECHp	ECH	
	SO2			ECHp										
	H2S			ECHp										
	NH3													
	VOC								PID	GC				PID
	CO2							NDIR						NDIR
	BC													5λ
	Luce							Neph						
Meteo				x		x	x			x	x	x	x	

Intercomparison Smart Sensor

MI-Marche:
dal 5 maggio al 20
giugno 2022



MI-Pascal:
dal 5 al 29 aprile 2022

Intercomparison Smart Sensor

MI-Pascal – UB

Monitor:

SO2

NOX

O3

NH3 (x2)

CH4

BTX

BC

PM10

PM2.5

OPC-FAI (PM10, PM2.5 e

PM1 orari stimati)



Torino, 28-31 maggio 2024



Intercomparison Smart Sensor

MI-Marche – UT

Monitor:
CO
NOX
BTX
BC
PM10-h
PM2.5-h
OPC-ENVEA (PM1 orario
stimato)



Intercomparison Smart Sensor – MI-Pascal



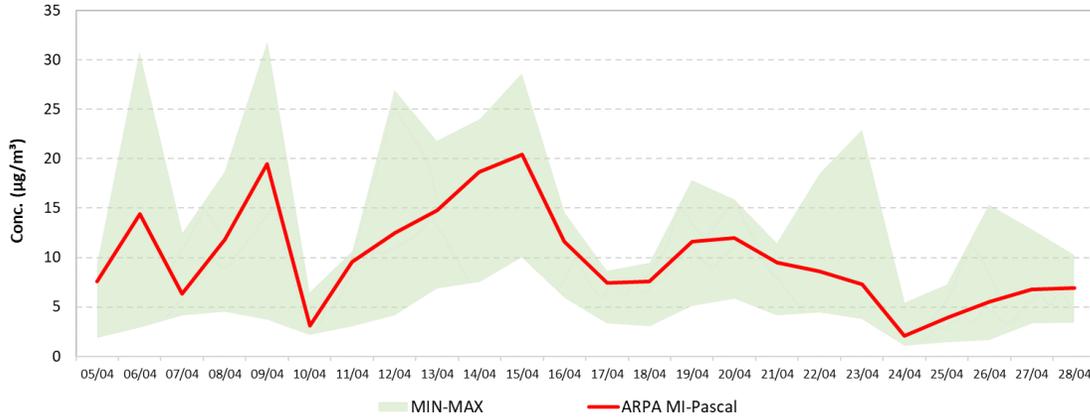
Intercomparison Smart Sensor – MI-Marche



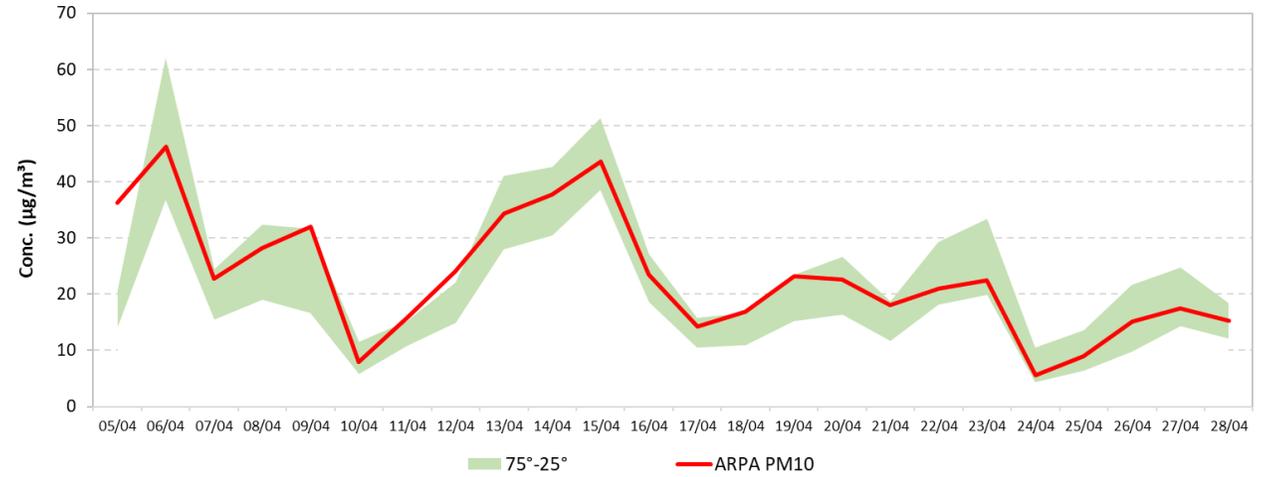
PM – MI-Pascal

PM10	PM2.5
LCS2	---
LCS3	LCS3
LCS4	LCS4
LCS5	LCS5
LCS6a	LCS6a
LCS6b	LCS6b
LCS7	LCS7
LCS9-Socio6	LCS9-Socio6
LCS9-Socio7	LCS9-Socio7
LCS10	LCS10
LCS11	LCS11

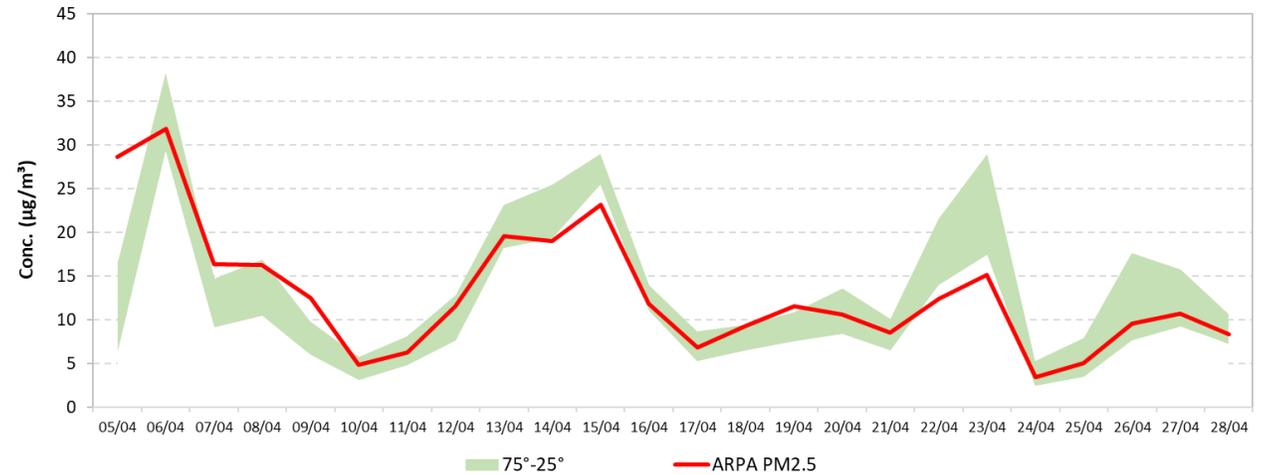
LCS - Frazione Coarse - Concentrazioni giornaliere
MI-Pascal



LCS - PM10 - Concentrazioni giornaliere
MI-Pascal



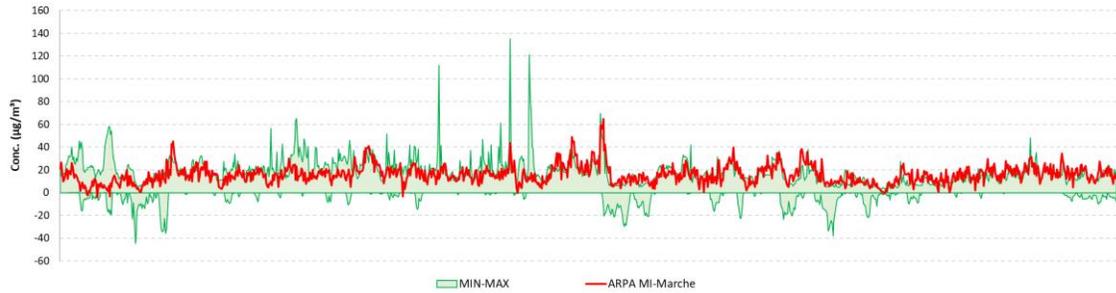
LCS - PM2.5 - Concentrazioni giornaliere
MI-Pascal



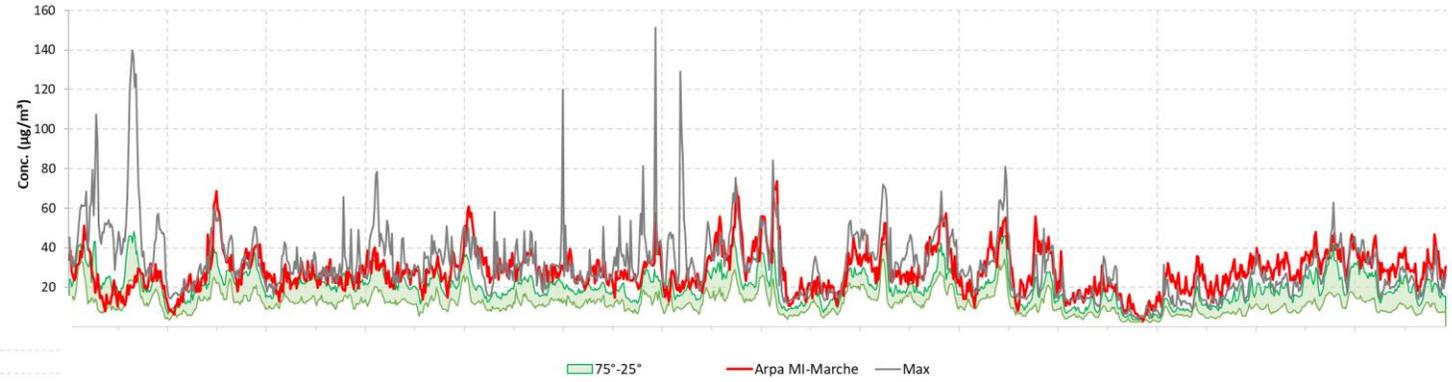
PM – MI-Marche

PM10	PM2.5
LCS1-Socio1	LCS1-Socio1
LCS1-Socio10	LCS1-Socio10
LCS2	---
LCS3	LCS3
LCS4	LCS4
LCS5	LCS5
LCS6a	LCS6a
LCS7	LCS7
LCS9-Socio6	LCS9-Socio6
LCS9-Socio7	LCS9-Socio7
LCS10	LCS10
LCS11	LCS11

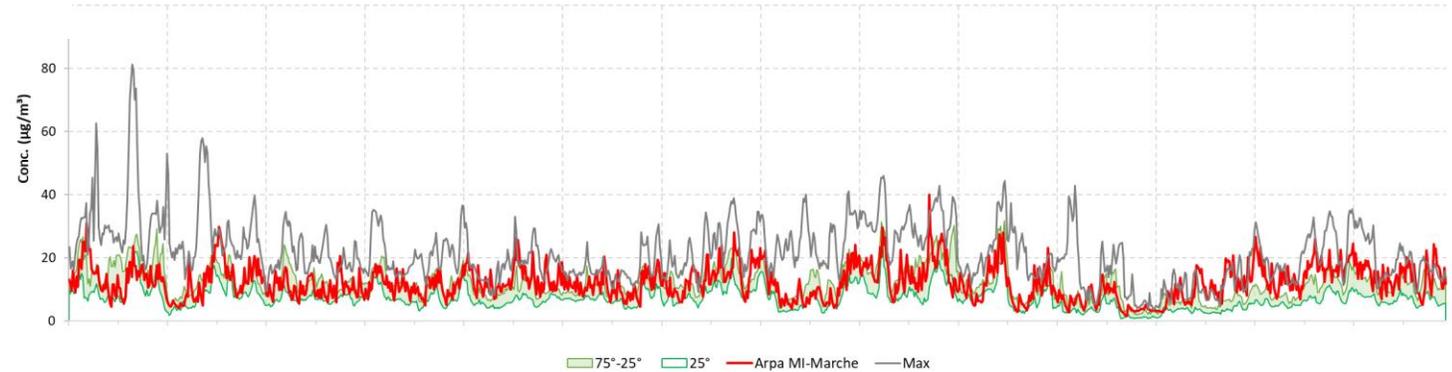
LCS - Frazione Coarse - Concentrazioni orarie
MI-Marche



LCS - PM10 - Concentrazioni orarie
MI-Marche



LCS - PM2.5 - Concentrazioni orarie
MI-Marche

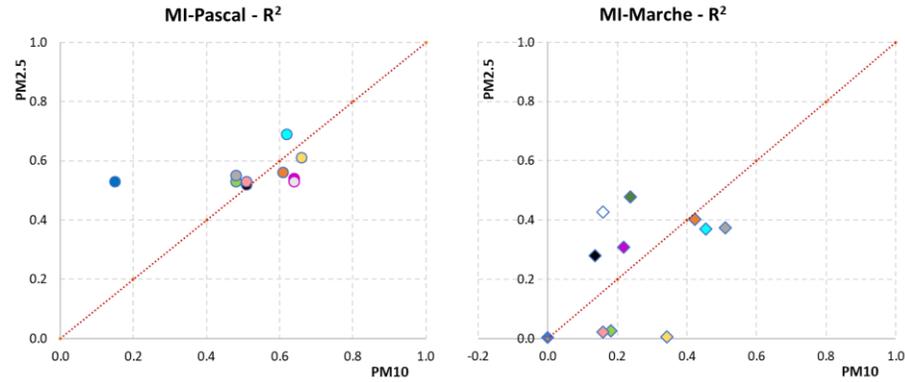


PM – Analisi di regressione

y = mx + q	PM10 MI-Pascal				PM2.5 MI-Pascal				PM10 MI-Marche				PM2.5 MI-Marche			
	R ²	m	q	η (%)	R ²	m	q	η (%)	R ²	m	q	η (%)	R ²	m	q	η (%)
LCS1-Socio1									0.24	0.32	4.6	69	0.48	0.61	0.7	100
LCS1-Socio10									0.16	0.19	4.0	57	0.43	0.67	1.3	57
LCS2	0.58	0.38	10.4	89					0.44	0.29	10.9	70				
LCS3	0.66	0.81	3.4	42	0.61	0.45	-0.8	97	0.34	0.62	3.3	88	0.01	-0.06	14.6	88
LCS4	0.51	0.39	0.3	98	0.52	0.44	1.8	97	0.14	0.19	3.3	100	0.28	0.52	2.1	100
LCS5	0.61	0.50	3.3	96	0.56	0.39	2.6	96	0.42	0.43	1.29	100	0.40	0.54	1.3	100
LCS6a	0.64	0.88	7.2	96	0.54	0.52	4.9	95	0.22	0.70	7.8	100	0.31	0.94	2.3	100
LCS6b	0.64	0.92	5.5	96	0.53	0.53	4.1	95								
LCS7	0.62	0.55	0.8	96	0.69	0.82	3.3	41	0.45	0.36	2.1	99	0.37	0.42	2.3	88
LCS9-Socio6	0.48	0.54	8.9	98	0.53	0.48	5.9	97	0.18	0.33	6.6	100	0.03	-0.20	14.7	100
LCS9-Socio7	0.51	0.67	9.4	98	0.53	0.61	6.6	97	0.16	0.37	7.9	100	0.02	-0.23	17.5	100
LCS10	0.48	0.54	5.2	98	0.55	0.38	2.4	98	0.51	0.76	-0.60	100	0.37	0.51	2.0	99
LCS11	0.15	0.48	17.7	89	0.53	0.25	13.0	89	0.00	0.05	23.6	45	0.00	-0.19	17.9	45

PM – Analisi di regressione

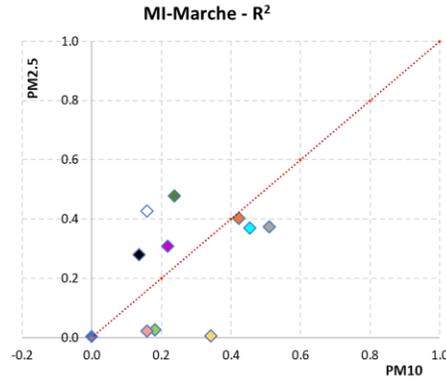
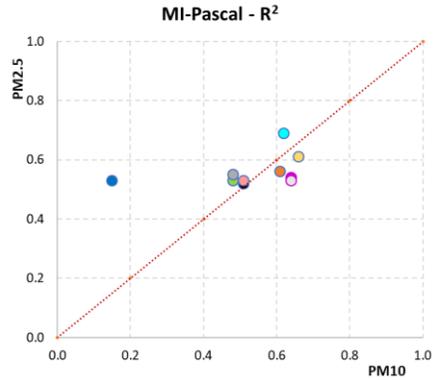
LCS1-Socio1	LCS6b
LCS1-Socio10	LCS7
LCS3	LCS9-Socio6
LCS4	LCS9-Socio7
LCS5	LCS10
LCS6a	LCS11



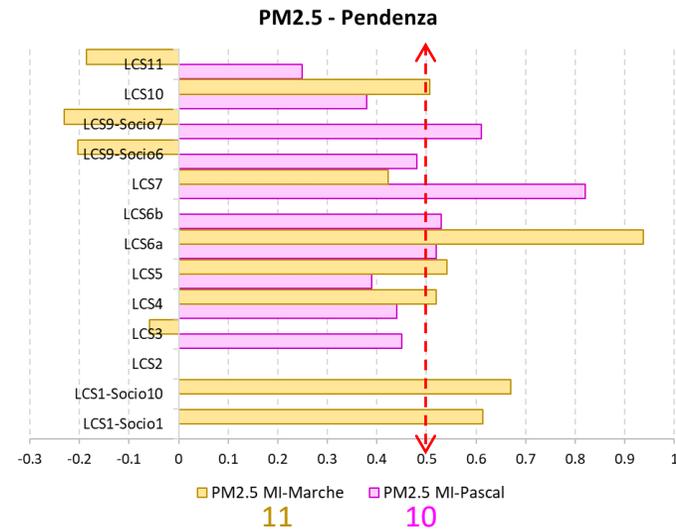
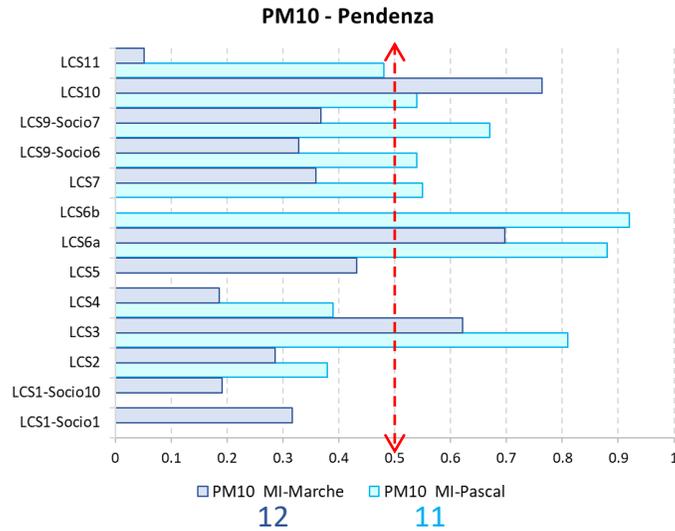
A MI-Pascal sono meno dispersi

PM – Analisi di regressione

LCS1-Socio1	LCS6b
LCS1-Socio10	LCS7
LCS3	LCS9-Socio6
LCS4	LCS9-Socio7
LCS5	LCS10
LCS6a	LCS11



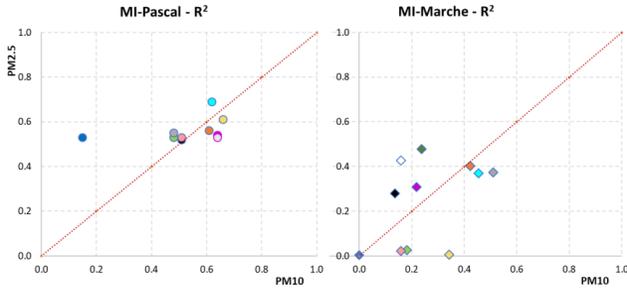
$m \geq 0.5$ 8 sensori MI-Pascal
 3 sensori MI-Marche
 $m \geq 0.6$ 4 sensori MI-Pascal
 3 sensori MI-Marche
 $m \geq 0.8$ 3 sensori MI-Pascal
 0 sensori MI-Marche



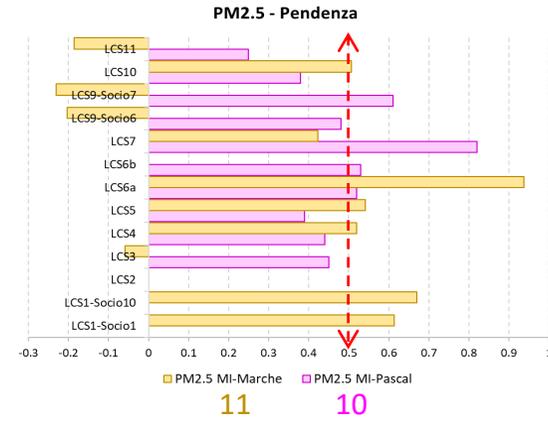
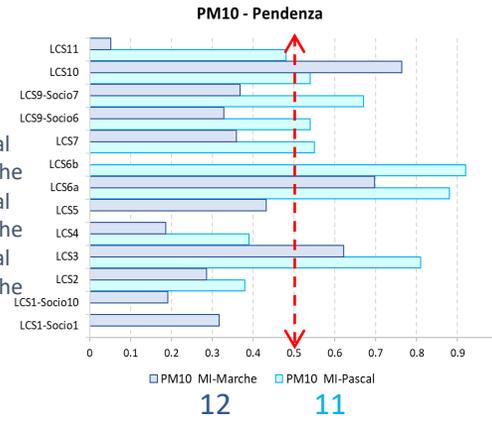
$m \geq 0.5$ 4 sensori MI-Pascal
 6 sensori MI-Marche
 $m \geq 0.6$ 2 sensori MI-Pascal
 3 sensori MI-Marche
 $m \geq 0.8$ 1 sensore MI-Pascal
 1 sensore MI-Marche

PM – Analisi di regressione

LCS1-Socio1	LCS6b
LCS1-Socio10	LCS7
LCS3	LCS9-Socio6
LCS4	LCS9-Socio7
LCS5	LCS10
LCS6a	LCS11

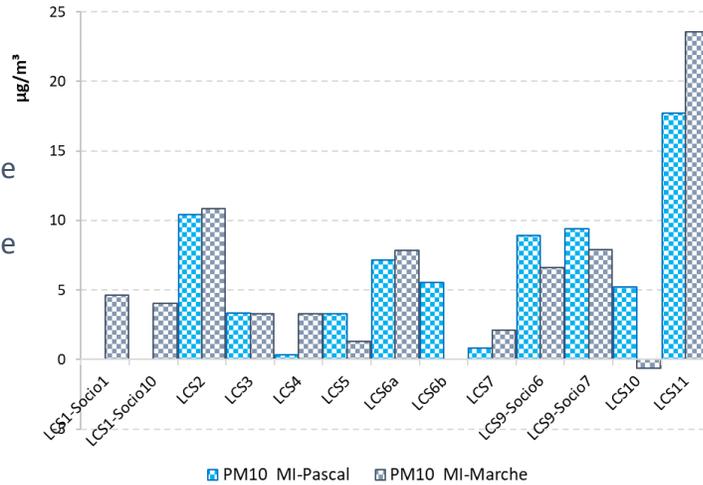


$m \geq 0.5$ 8 sensori MI-Pascal
 3 sensori MI-Marche
 $m \geq 0.6$ 4 sensori MI-Pascal
 3 sensori MI-Marche
 $m \geq 0.8$ 3 sensori MI-Pascal
 0 sensori MI-Marche



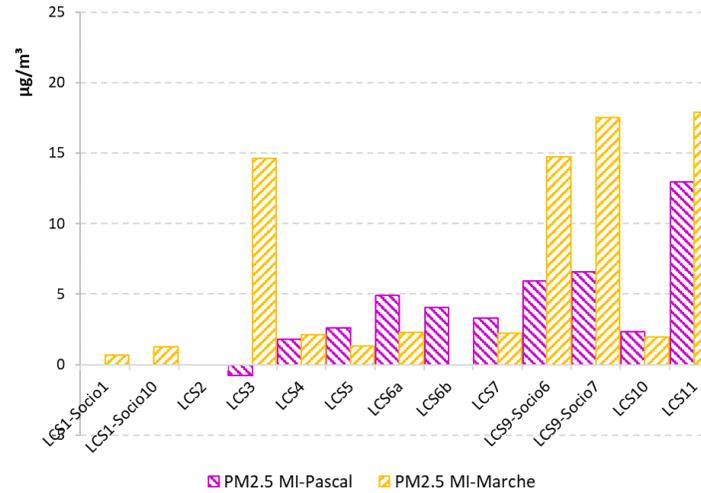
$m \geq 0.5$ 4 sensori MI-Pascal
 6 sensori MI-Marche
 $m \geq 0.6$ 2 sensori MI-Pascal
 3 sensori MI-Marche
 $m \geq 0.8$ 1 sensore MI-Pascal
 1 sensore MI-Marche

PM10 - Intercetta



$q \leq 5.0$ 4 sensori MI-Pascal
 7 sensori MI-Marche
 $q \leq 2.5$ 2 sensori MI-Pascal
 3 sensori MI-Marche

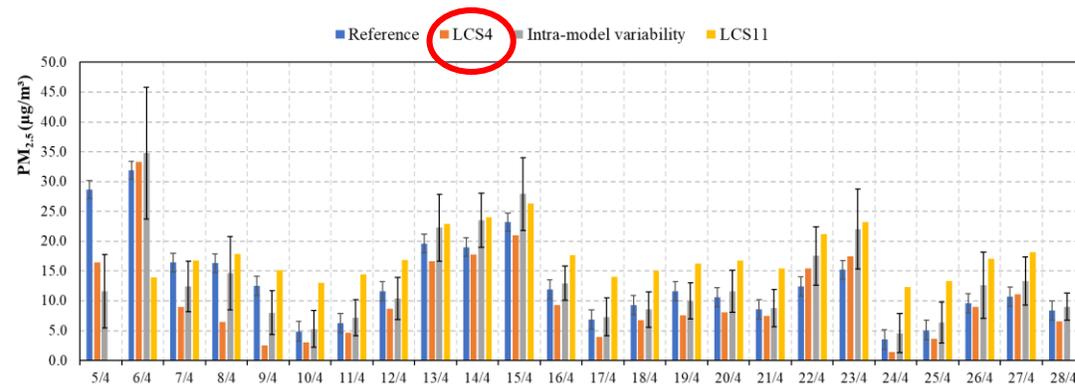
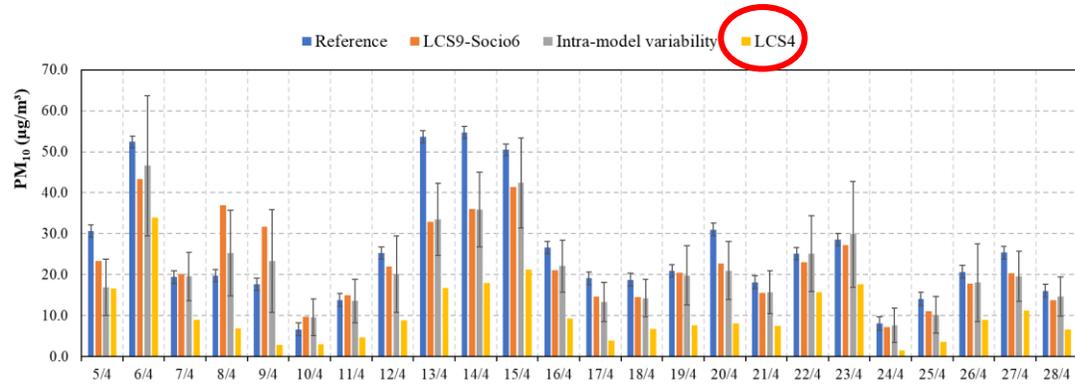
PM2.5 - Intercetta



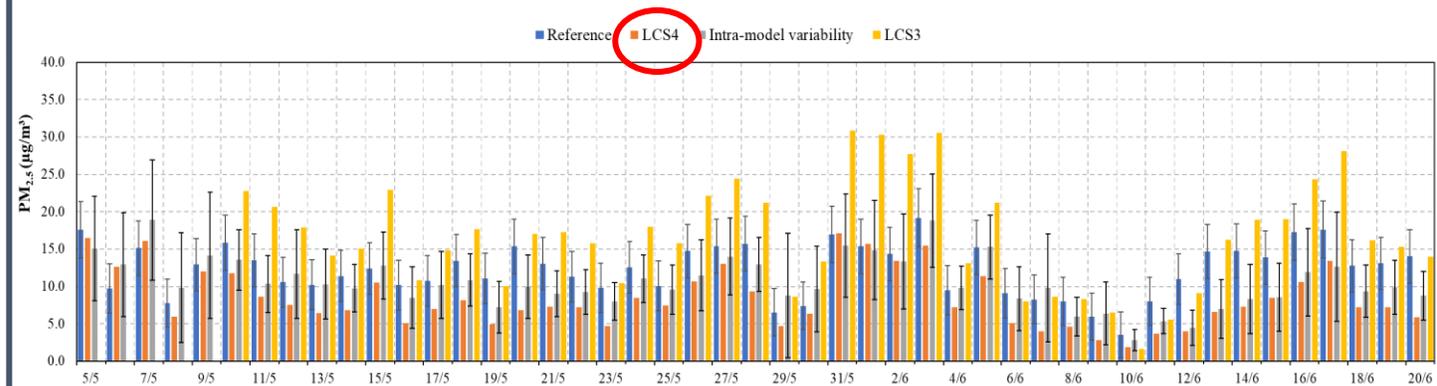
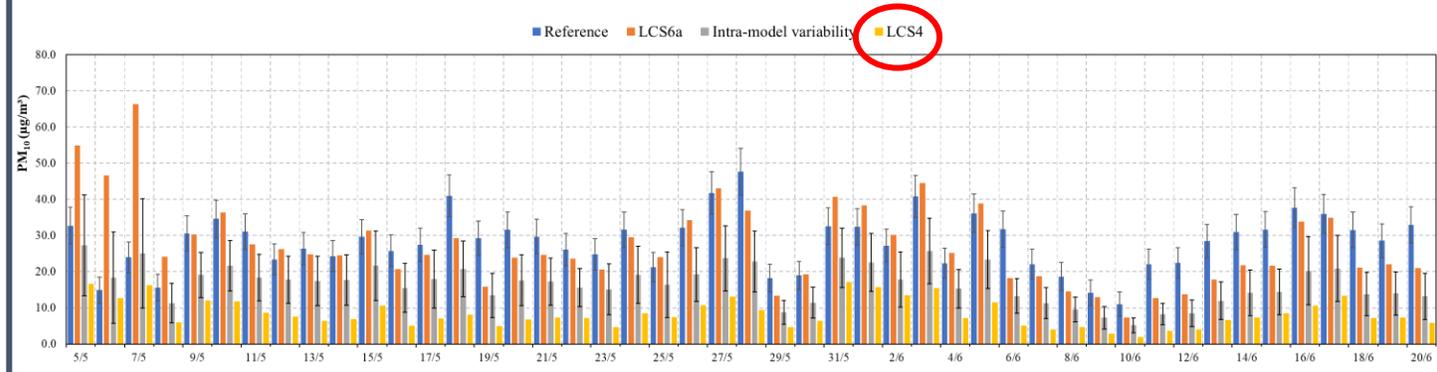
$q \leq 5.0$ 7 sensori MI-Pascal
 7 sensori MI-Marche
 $q \leq 2.5$ 3 sensori MI-Pascal
 7 sensori MI-Marche

PM – Analisi di regressione

MI-Pascal – aprile 2022

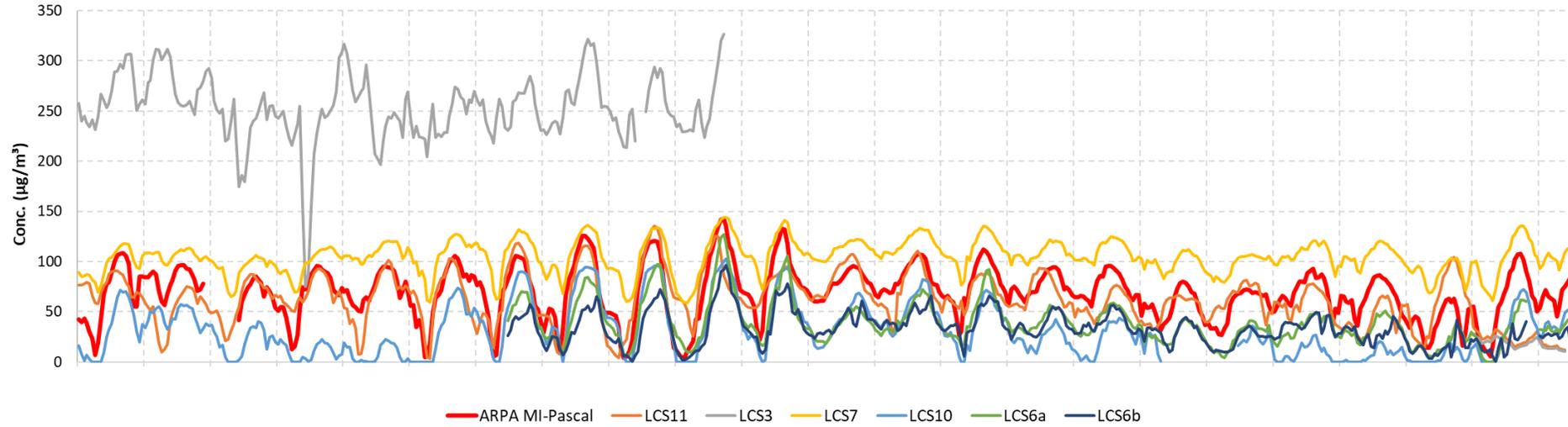


MI-Marche – maggio/giugno 2022



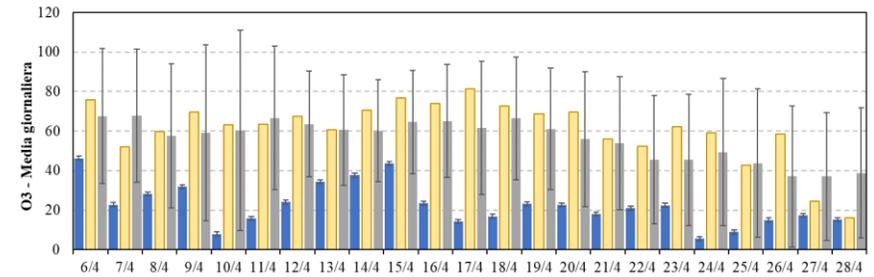
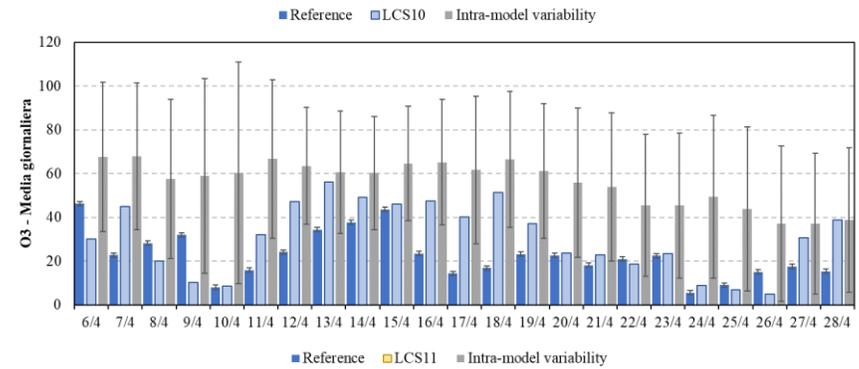
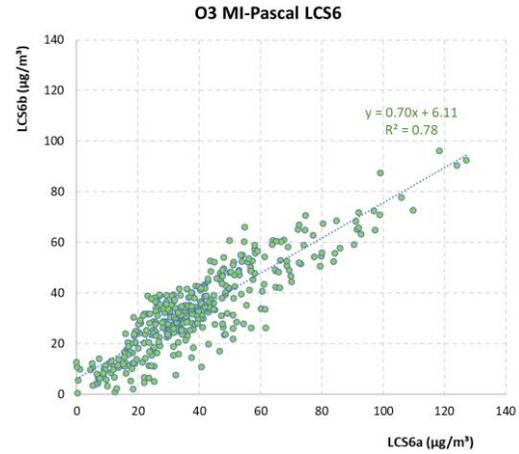
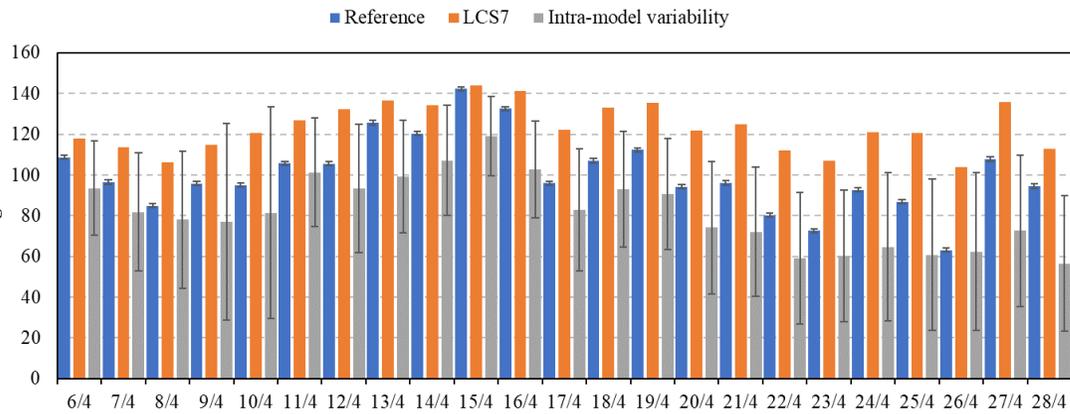
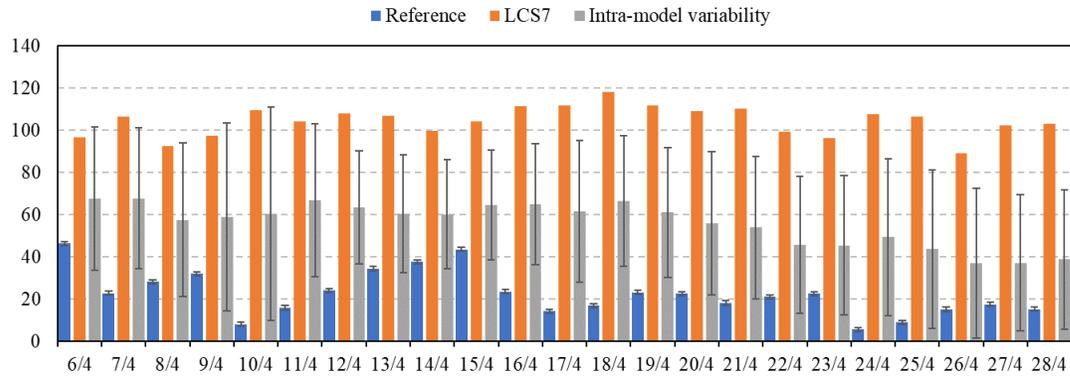
O3 – MI-Pascal

MI-Pascal - Concentrazioni orarie O3



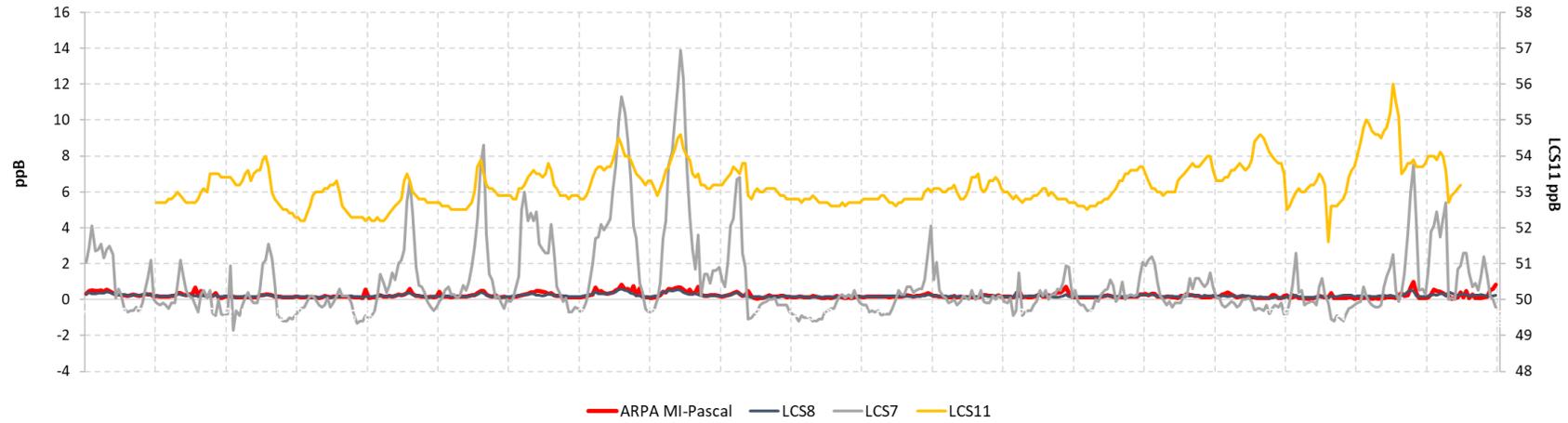
y = mx + q	O3 MI-Pascal			
	R ²	m	q	η (%)
LCS3	0.05	0.64	178	48
LCS6a	0.19	-0.35	63	70
LCS6b	0.10	-0.20	47	70
LCS7	0.83	0.57	66	100
LCS10	0.57	0.75	-21	95
LCS11	0.38	0.61	21	99

O3 – MI-Pascal

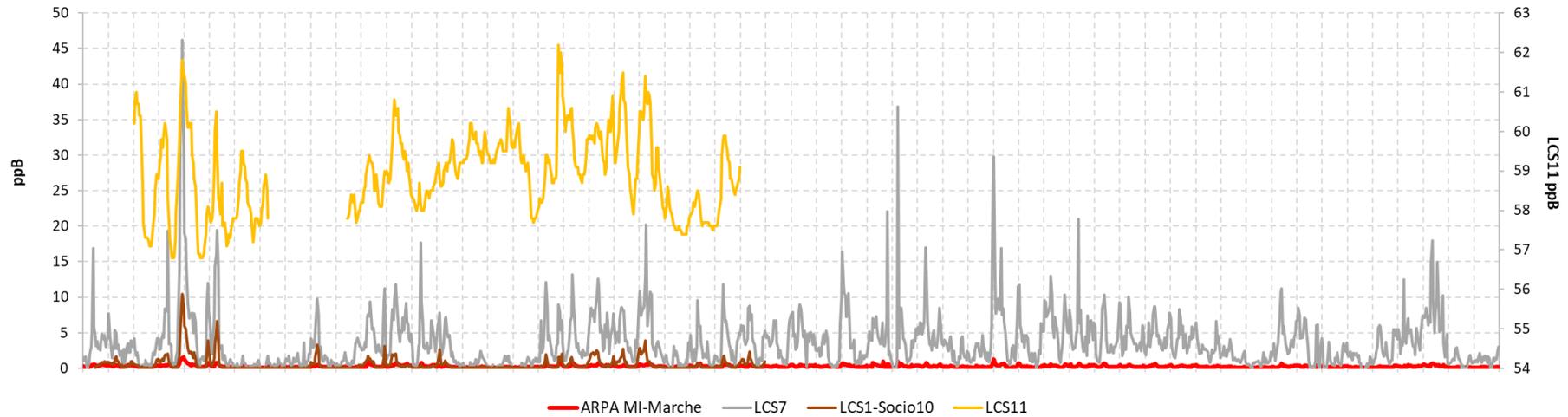


Benzene

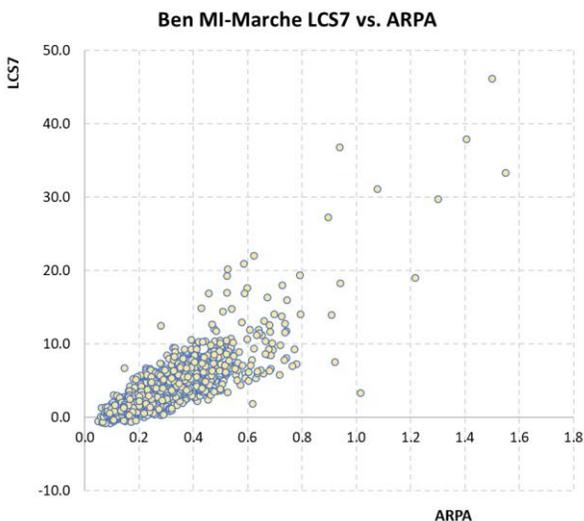
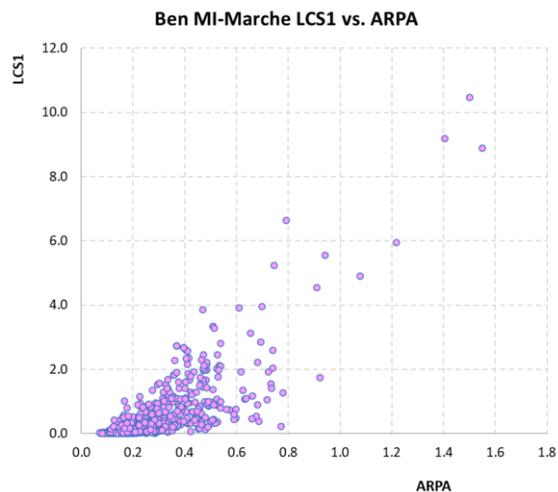
MI-Pascal - Concentrazioni orarie Benzene



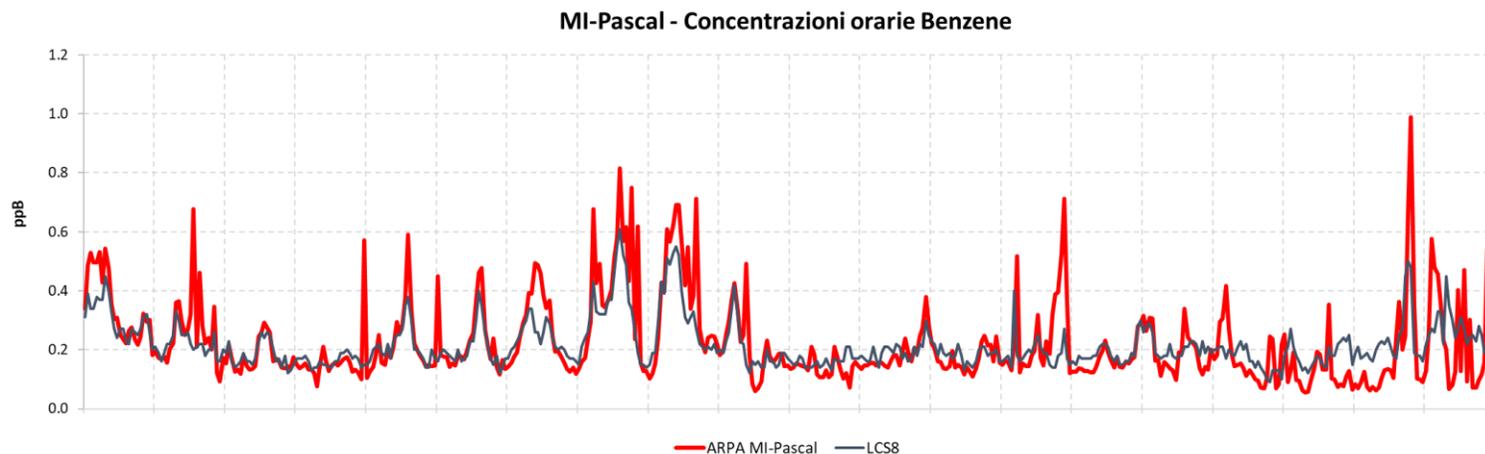
MI-Marche - Concentrazioni orarie Benzene



Benzene - Analisi di regressione

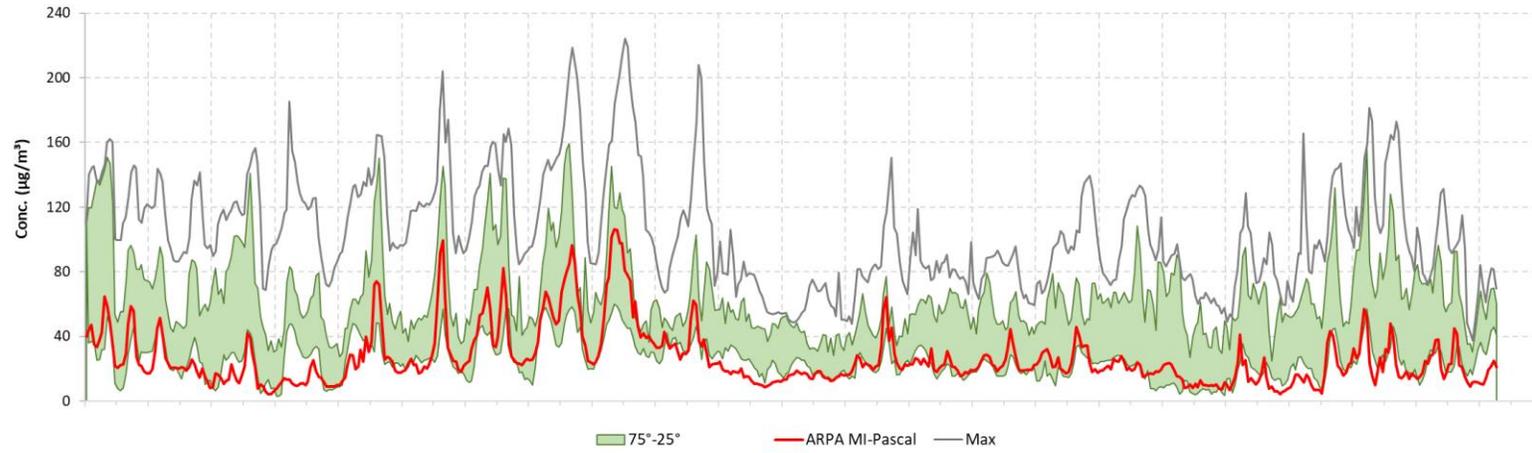


$y = mx + q$	Benzene MI-Pascal				Benzene MI-Marche			
	R^2	m	q	η (%)	R^2	m	q	η (%)
LCS1-Socio10					0.71	0.45	-1	47
LCS7	0.49	0.34	-1.5	100	0.71	0.31	-2	100
LCS8	0.51	0.34	0.1	100				
LCS11	0.06	0.19	53.0	92	0.37	0.36	58	9

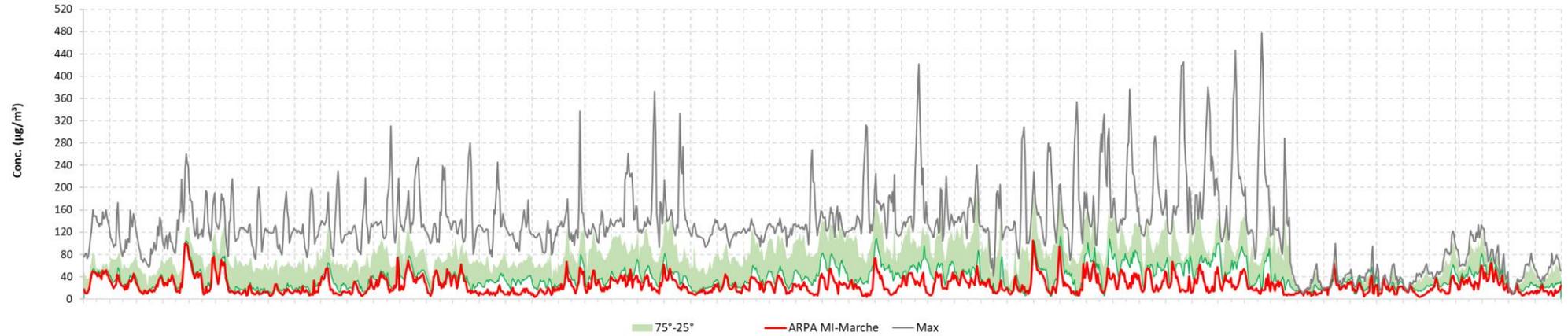


NO2

LCS - NO2 - Concentrazioni orarie
MI-Pascal



LCS - NO2 - Concentrazioni orarie
MI-Marche

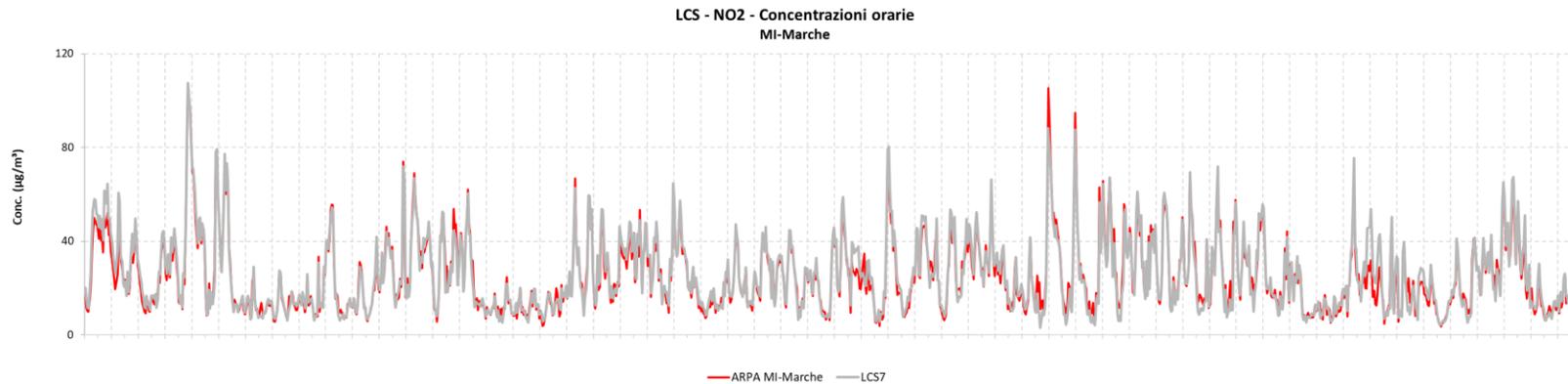


NO2 – Analisi di regressione

	NO2 MI-Pascal				NO2 MI-Marche			
	R ²	m	q	η (%)	R ²	m	q	η (%)
LCS1-Socio1	0.56	1.51	41.2	98	0.31	1.04	56	58
LCS1-Socio10					0.48	1.09	14	47
LCS3	0.41	0.77	84.6	40	0.40	1.04	86	73
LCS5	0.56	2.90	78.9	98	0.03	0.82	109	82
LCS6a	0.36	0.64	21.1	71	0.33	0.89	27	81
LCS6b	0.43	0.64	18.3	71				
LCS7	0.87	0.74	-9.5	98	0.95	1.03	-0.002	100
LCS10	0.49	0.69	5.1	95	0.23	0.73	27	100
LCS11	0.32	0.50	14.1	92	0.10	0.37	20	37

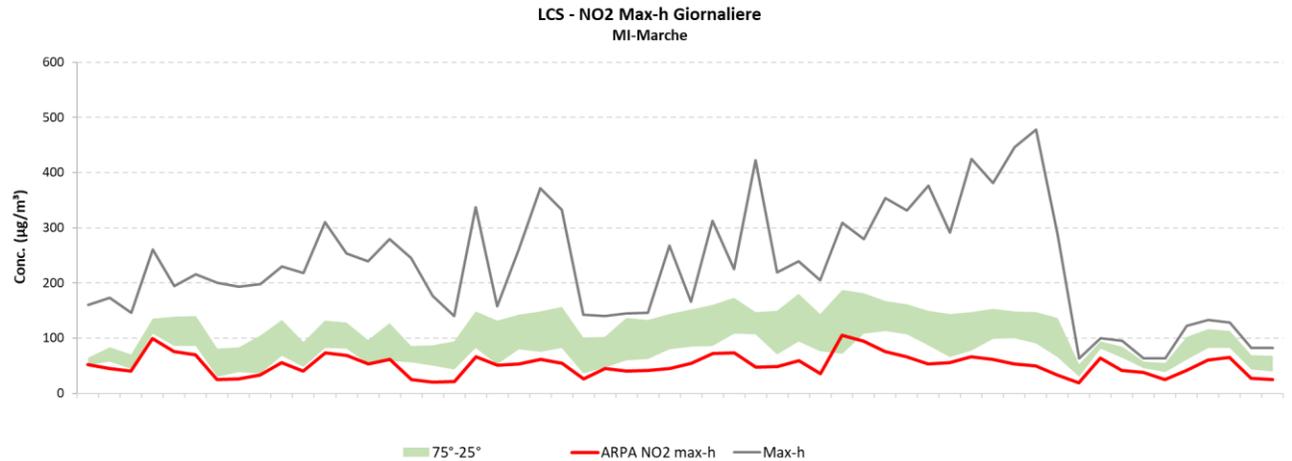
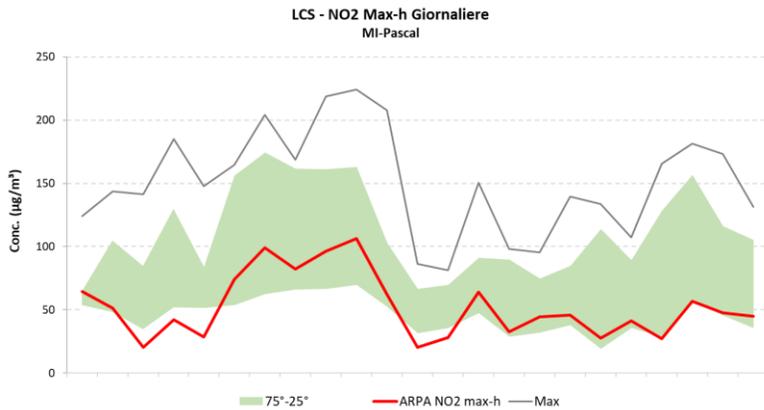
NO2 – Analisi di regressione

	NO2 MI-Pascal				NO2 MI-Marche			
	R ²	m	q	η (%)	R ²	m	q	η (%)
LCS1-Socio1	0.56	1.51	41.2	98	0.31	1.04	56	58
LCS1-Socio10					0.48	1.09	14	47
LCS3	0.41	0.77	84.6	40	0.40	1.04	86	73
LCS5	0.56	2.90	78.9	98	0.03	0.82	109	82
LCS6a	0.36	0.64	21.1	71	0.33	0.89	27	81
LCS6b	0.43	0.64	18.3	71				
LCS7	0.87	0.74	-9.5	98	0.95	1.03	-0.002	100
LCS10	0.49	0.69	5.1	95	0.23	0.73	27	100
LCS11	0.32	0.50	14.1	92	0.10	0.37	20	37



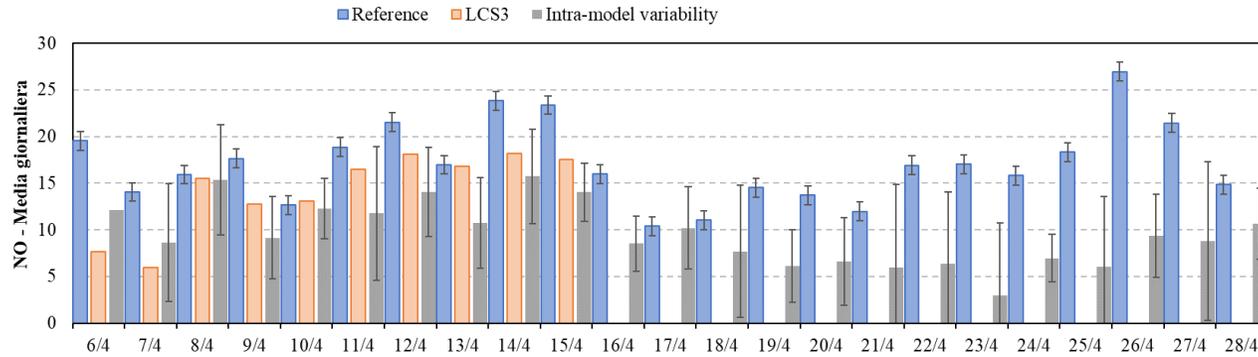
NO2 – Analisi di regressione

	NO2 MI-Pascal				NO2 MI-Marche			
	R ²	m	q	η (%)	R ²	m	q	η (%)
LCS1-Socio1	0.56	1.51	41.2	98	0.31	1.04	56	58
LCS1-Socio10					0.48	1.09	14	47
LCS3	0.41	0.77	84.6	40	0.40	1.04	86	73
LCS5	0.56	2.90	78.9	98	0.03	0.82	109	82
LCS6a	0.36	0.64	21.1	71	0.33	0.89	27	81
LCS6b	0.43	0.64	18.3	71				
LCS7	0.87	0.74	-9.5	98	0.95	1.03	-0.002	100
LCS10	0.49	0.69	5.1	95	0.23	0.73	27	100
LCS11	0.32	0.50	14.1	92	0.10	0.37	20	37

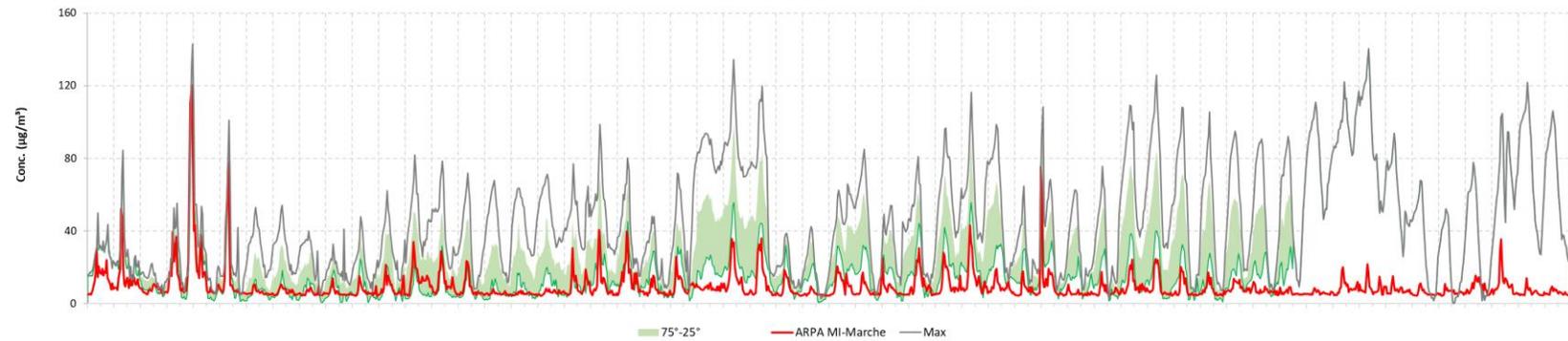


NO – Analisi di regressione

	NO MI-Pascal				NO2 MI-Marche			
	R ²	m	q	η (%)	R ²	m	q	η (%)
LCS3	0.47	0.55	3.5	40	0.61	1.19	8	73
LCS6a	0.10	0.30	0.0	70	0.49	1.08	2	81
LCS6b	0.19	0.34	0.3	71				
LCS10	0.22	0.40	8.7	95	0.10	1.16	33	100
LCS11	0.19	0.24	1.6	91	0.57	0.71	4	37

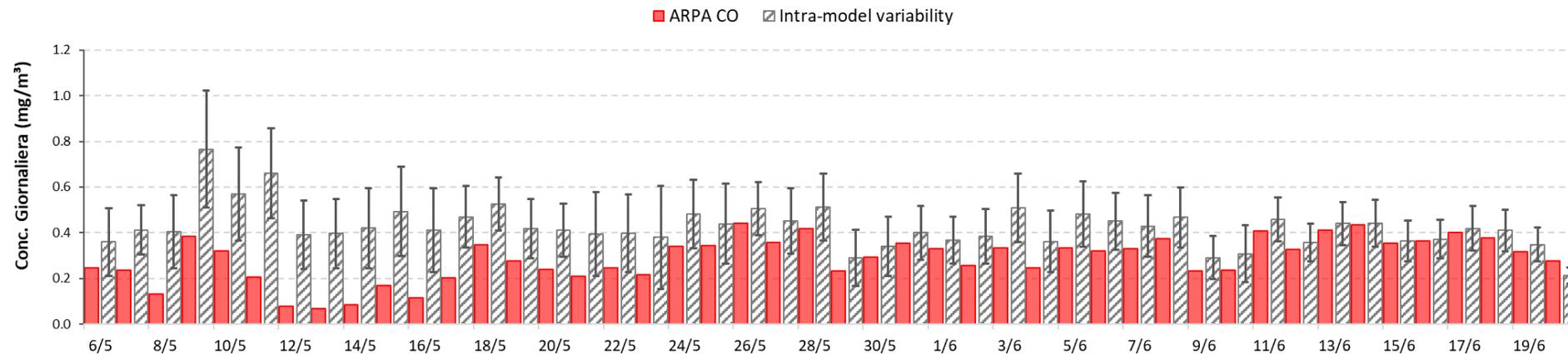


LCS - NO2 - Concentrazioni orarie MI-Marche

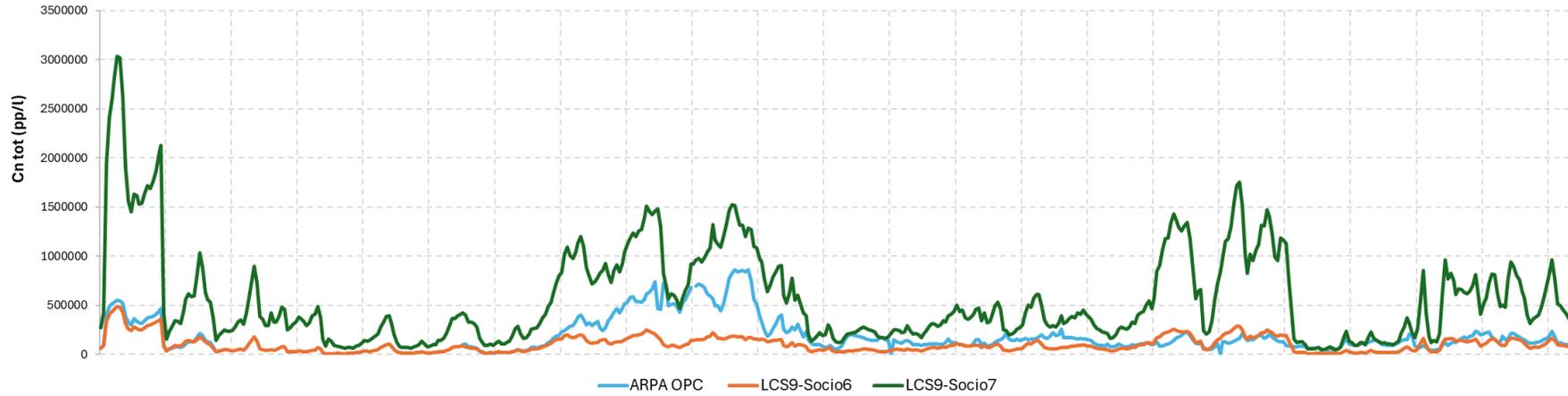


CO – Analisi di regressione

	CO MI-Marche			
	R^2	m	q	η (%)
LCS1-Socio10	0.36	0.51	0.22	57
LCS3	0.43	0.85	0.28	89
LCS5	0.42	0.93	0.20	100
LCS6a	0.58	0.72	0.18	100
LCS10	0.51	0.68	0.07	100
LCS11	0.27	0.66	0.54	44



Concentrazioni numeriche – MI-Pascal

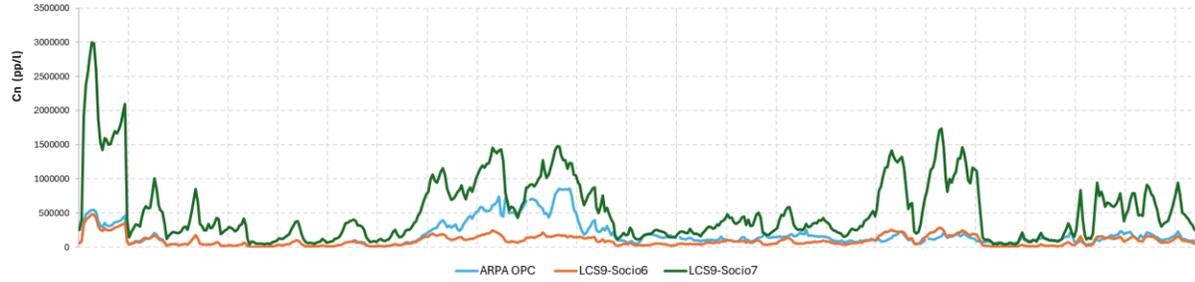


Torino, 28-31 maggio 2024

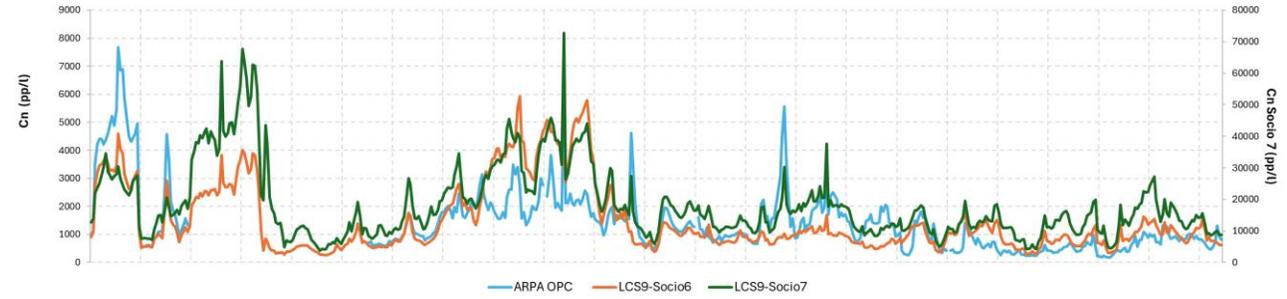


Concentrazioni numeriche – MI-Pascal

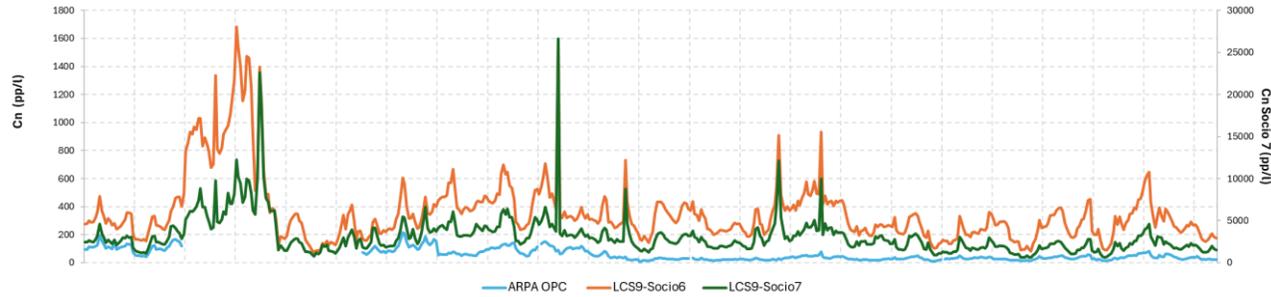
Cluster 0.28-0.7 μm



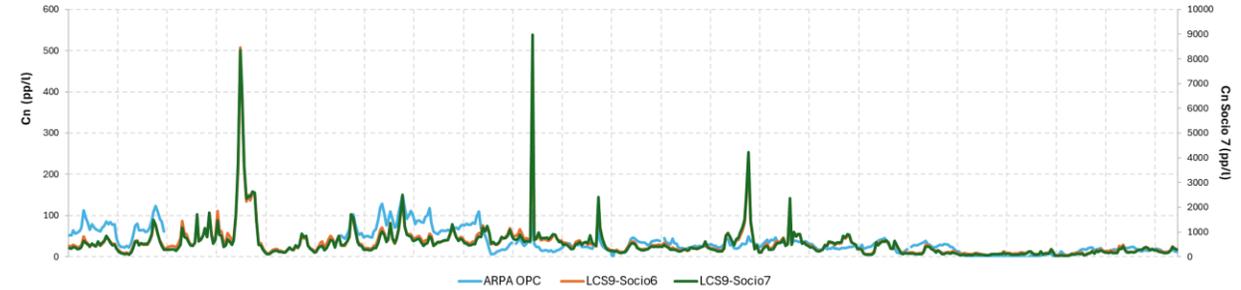
Cluster 0.7-2.0 μm



Cluster 2-5 μm

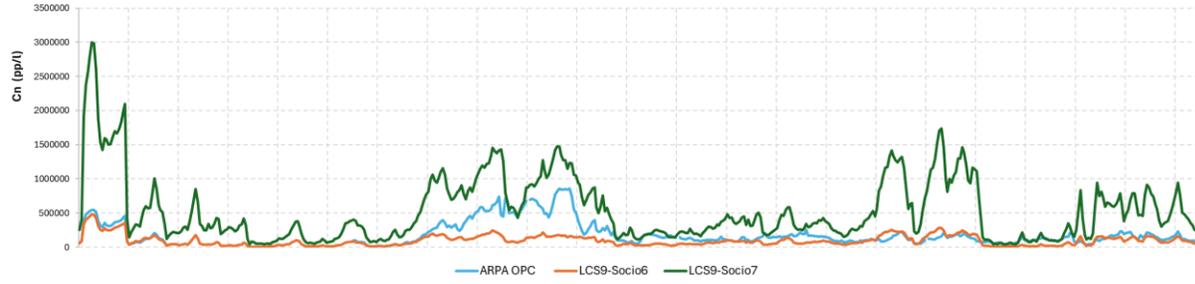


Cluster 5-10 μm

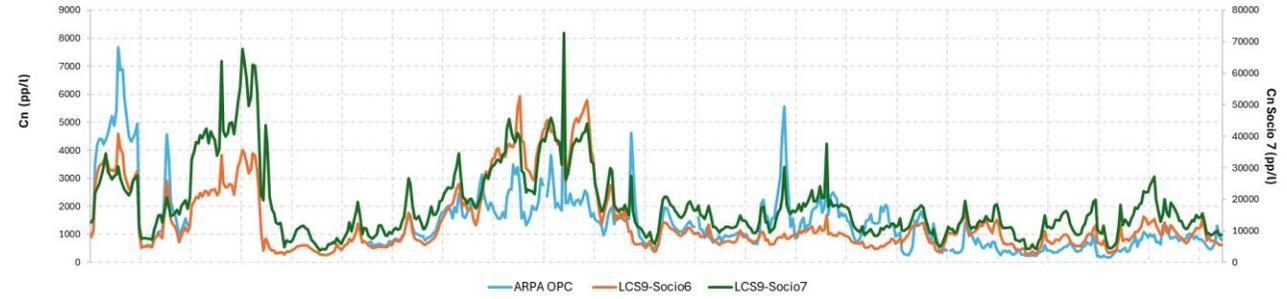


Concentrazioni numeriche – MI-Pascal

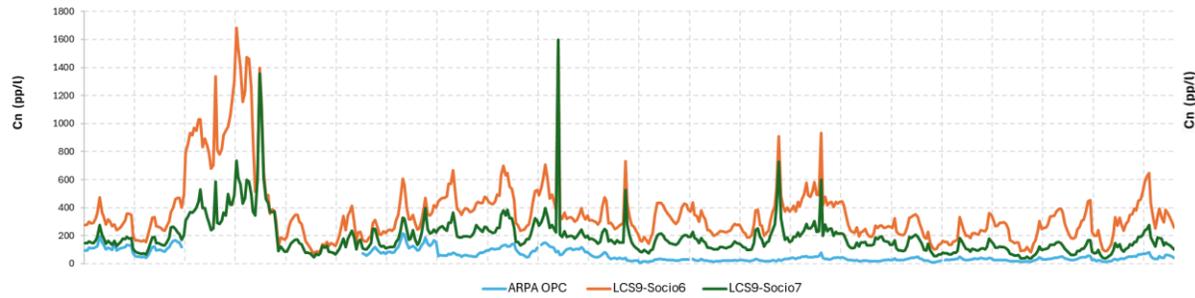
Cluster 0.28-0.7 μm



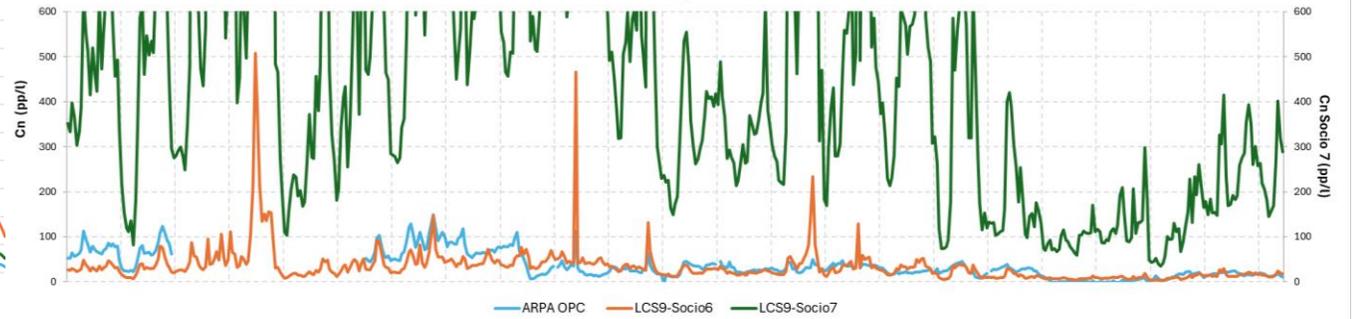
Cluster 0.7-2.0 μm



Cluster 2-5 μm

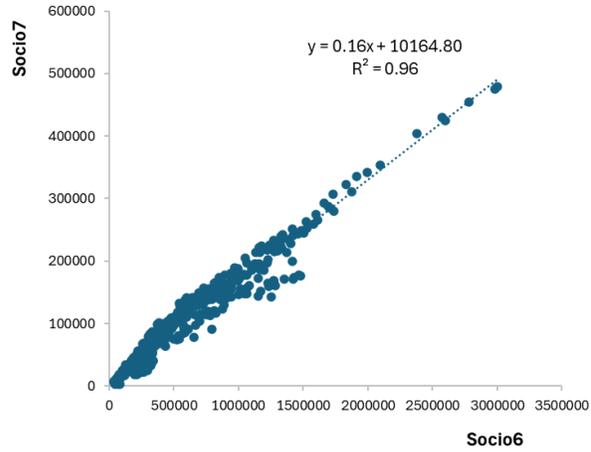


Cluster 5-10 μm

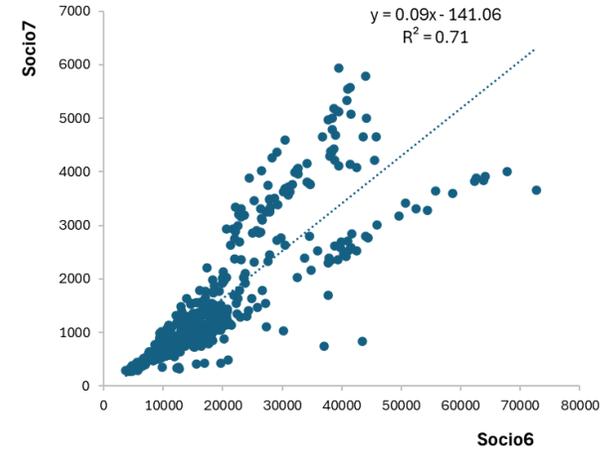


Concentrazioni numeriche – MI-Pascal

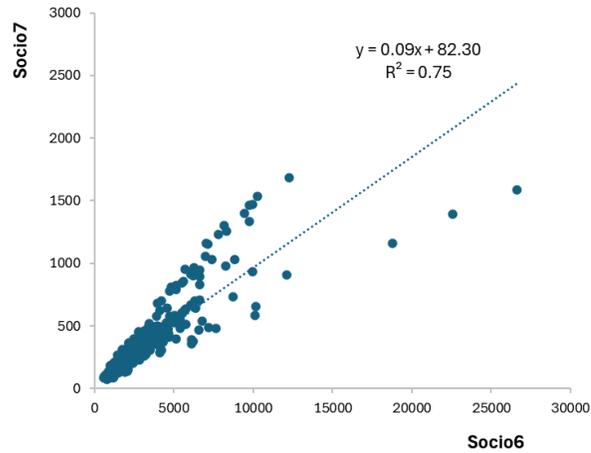
Correlazione LCS9 - Cluster 0.28-0.7 µm



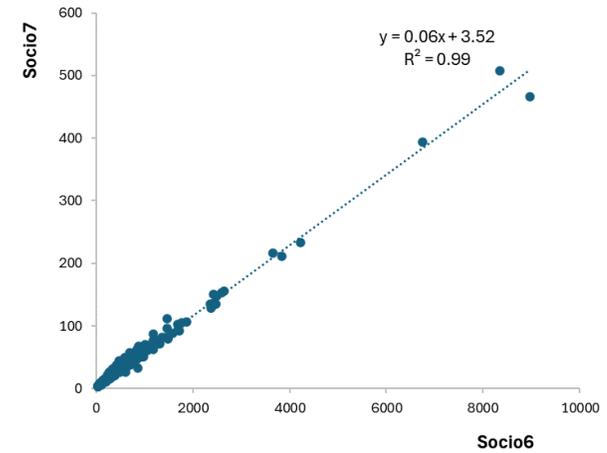
Correlazione LCS9 Cluster 0.7-2.0 µm



Correlazione LCS9 Cluster 2-5 µm

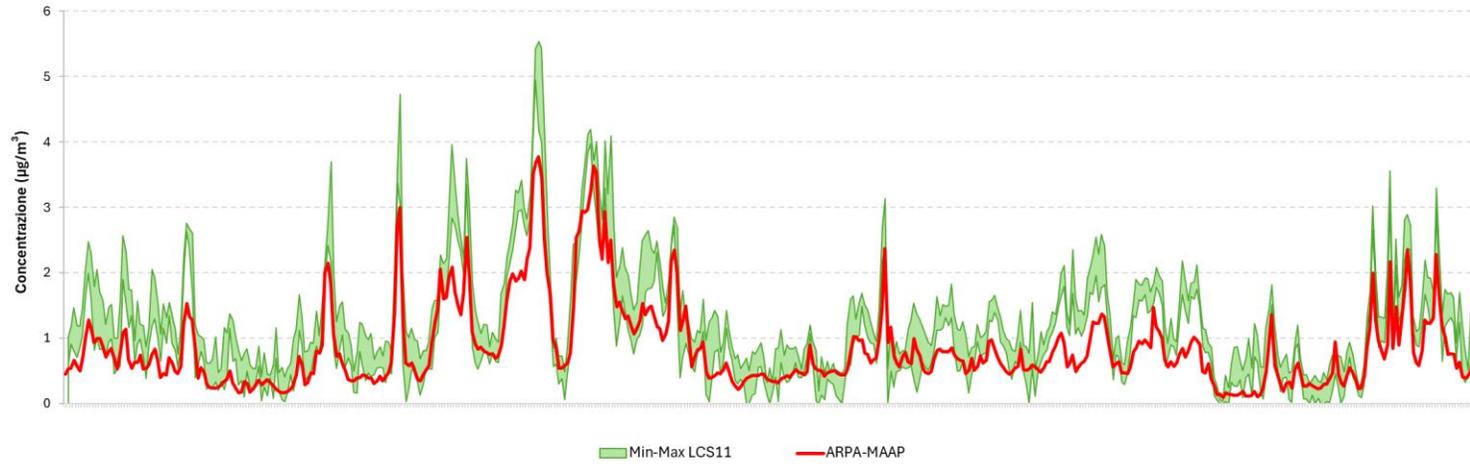


Correlazione LCS9 Cluster 5-10 µm

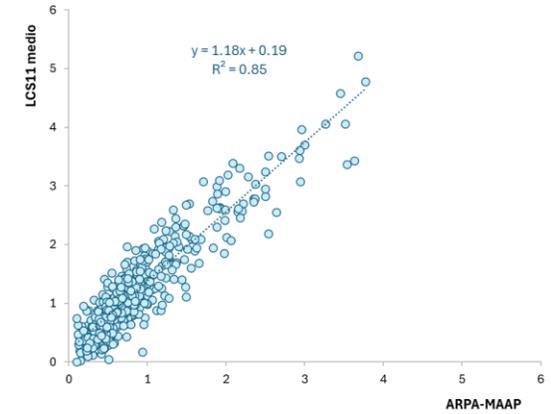


Black Carbon

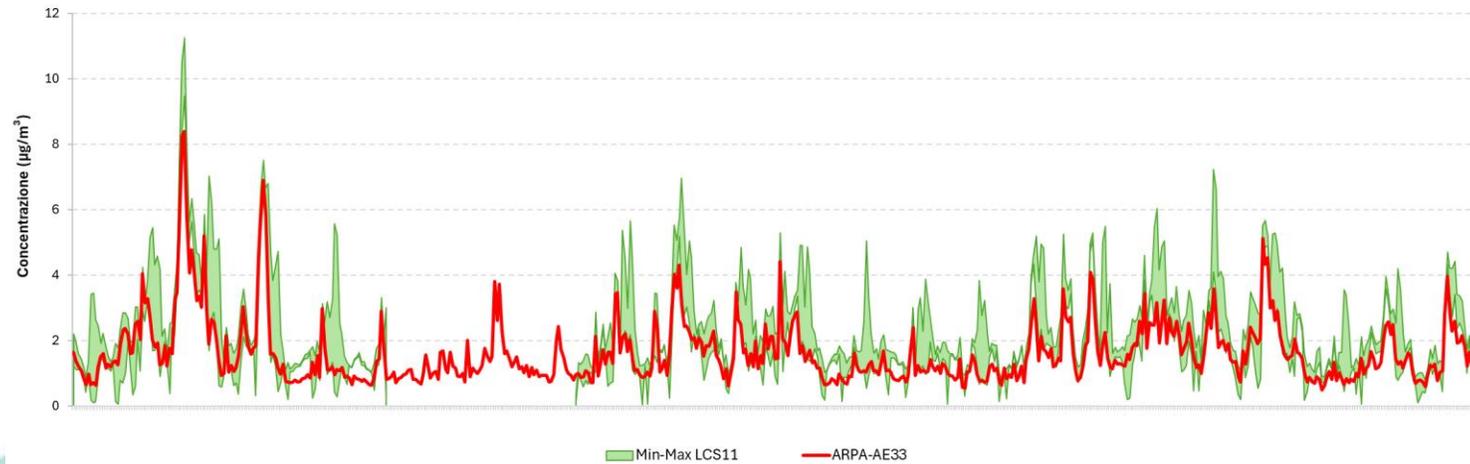
MI-Pascal - Concentrazioni orarie BC



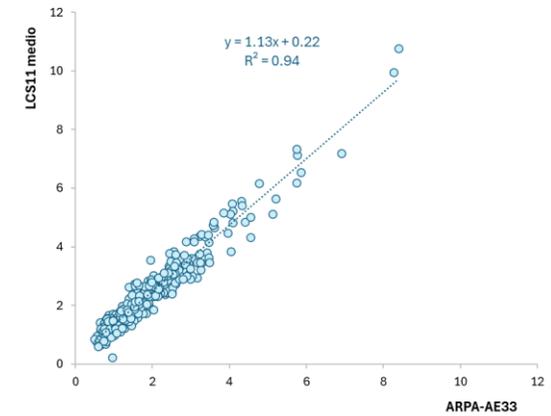
MI-Pascal Correlazione BC



MI-Marche - Concentrazioni orarie BC



MI-Marche Correlazione BC



To be continued....



Torino, 28-31 maggio 2024

