



Valutare a livello locale l'impatto ambientale delle particelle ultrafini

Giorgio Cattani, Alessandro Di Menno di Bucchianico, Alessandra Gaeta, Antonella De Santis, Raffaella Gaddi, Mariacarmela Cusano, Giulia Cesaroni, Carla Ancona, Francesco Forastiere, Claudio Gariazzo, Camillo Silibello, Roberto Sozzi, Marco Inglessis, Elisabetta Salvatori e Fausto Manes

Roma, 4 giugno 2015

Le particelle ultrafini

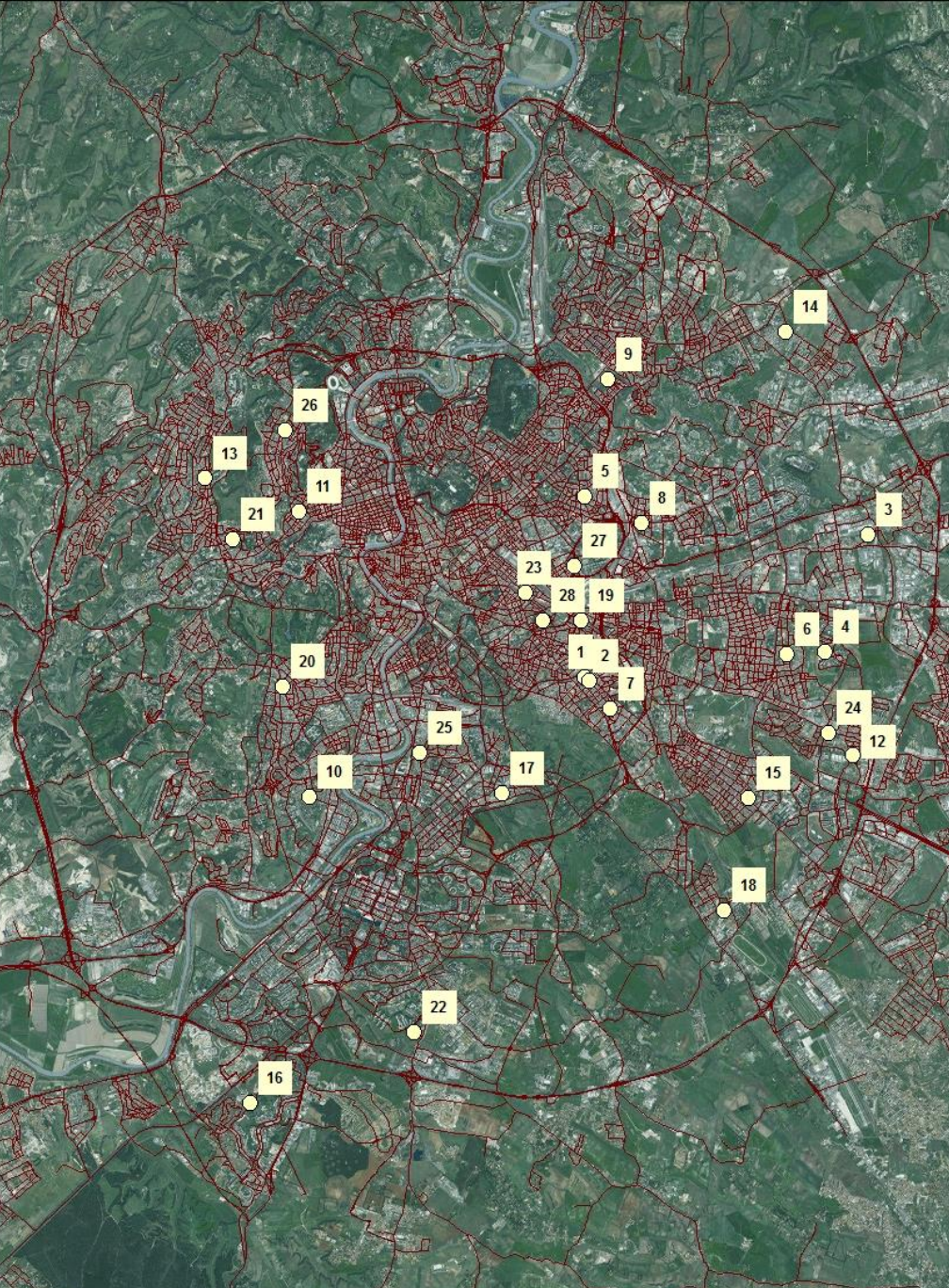
- Per “**particelle ultrafini**” si intende l'insieme delle particelle aerodisperse con diametro inferiore a $0,1 \mu\text{m}$.
- Non esiste una definizione operativa (ovvero legata alle modalità di prelievo e determinazione) condivisa e standardizzata.
- La **concentrazione in numero** delle particelle aerodisperse (espressa generalmente come numero di particelle per centimetro cubo, **PNC**) è largamente dominata dalle particelle ultrafini;
- La frazione ultrafine rappresenta invece una percentuale molto piccola della **concentrazione di massa** del PM che è invece generalmente dominata dalle particelle nell'intervallo dimensionale $0,1 - 1 \mu\text{m}$.
- **PNC** buona variabile *proxy* per esposizione a particelle ultrafini

Background

- Diversi studi, basati su misure puntuali effettuate a diverse distanze da sorgenti lineari rilevanti (autostrade, strade urbane ad alta intensità di traffico, strade con conformazione particolare a “canyon”) hanno evidenziato rilevanti gradienti spaziali della PNC (e.g. Kumar et al, 2014; Klompmaker et al, 2015).
- Per questo è necessario sviluppare modelli ad alta risoluzione spaziale che possano essere utilizzati per gli studi degli effetti a lungo termine delle particelle ultrafini.
- Negli ultimi anni i modelli LUR (Land Use Regression) sono stati diffusamente utilizzati per la stima della variabilità spaziale degli inquinanti atmosferici pervenendo all'individuazione di campi di concentrazione ad alta definizione utili per la stima di effetto sanitario (e.g. ESCAPE).
- Solo in limitati casi sono stati sviluppati modelli LUR per le particelle ultrafini (Toronto, Vancouver, Amsterdam, Girona, New Delhi)

Obiettivi

- Revisione delle conoscenze scientifiche sulle fonti di emissione più significative, sui livelli e sulla distribuzione spaziale delle particelle ultrafini nelle aree urbane.
- Caso studio di valutazione della variabilità spaziale delle particelle ultrafini nella città di Roma attraverso lo sviluppo di un modello LUR.



Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, SPP, swisstopo, and the GIS User Community

Dominio dello studio

I siti sono stati scelti seguendo il protocollo dello studio:

“European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE; Cyris et al,)”:

- Distribuzione sul territorio
- Rappresentare la più ampia prevedibile variabilità all’interno dell’area in esame
- Prevedere un’omogenea distribuzione tra le casistiche possibili almeno in relazione alle variabili potenzialmente più significative (traffico e densità di popolazione)

Strumentazione e Campagne di misura

- TSI 3007 Condensation Particle Counters portatili ($10 \text{ nm} < d_p < 1000 \text{ nm}$)
- Misure di PNC sono state condotte all'esterno di 28 siti residenziali dal 6 aprile 2013 al 10 aprile 2014;
- per ogni sito residenziale sono state realizzate 3 campagne di una settimana a distanza di 4 mesi;
- tre periodi di campionamento giornalieri di 2 ore: 00:30÷02:30, 08:30÷10:30, 16:30÷18:30;
- risoluzione temporale: 1 minuto;
- sonde di campionamento: tubi di silicone conduttivo, lunghezza media 1,5 m.

Stima della media annuale di PNC

- Correzione per la variabilità stagionale utilizzando le misure di NO_x nel sito di background urbano di Roma (Villa Ada).

$$PNC_{i,d} = a_i [NO_X]_{ADA,d} + b_i$$

$$PNC_{i,y} = a_i [NO_X]_{ADA,y} + b_i$$

160 Variabili predittive

- Geometria della rete stradale (distanze dal punto di misura) – TELEATLAS 2008
- Traffico sulle strade locali e sulle strade principali – ARPA LAZIO
- Combinazioni di geometria della rete e traffico
- Output di un modello numerico per concentrazione in numero di PM1 e PM0,1 (INAIL – ARIANET)

In buffer da 25 m a 5000 m:

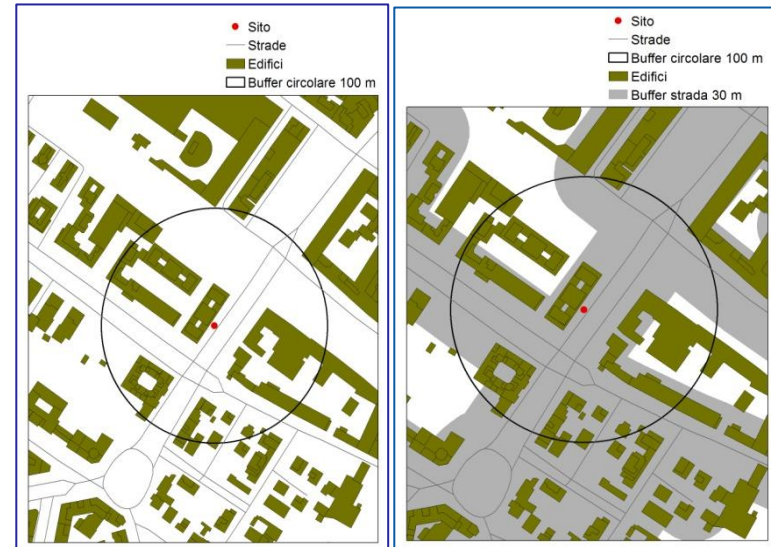
- Somma della lunghezza delle strade
- Carico totale del traffico
- Popolazione residente – CENSIMENTO 2011, ISTAT
- Variabili relative all'uso del suolo, Corine Land Cover (Hdres, Ldres, Industry, Natural, Urban green) – 2006, ISPRA

Canyon urbani (Gulliver et al. 2013)

- A partire da Geometria dei palazzi (altezza e volume) – DEP LAZIO e Geometria delle strade (lunghezza e ampiezza delle strade) sono state calcolate 4 variabili:
 - *Aspect ratio (average building height/road width)*
 - *Maximum aspect ratio (maximum building height/road width)*
 - *Building volume (sum of building area x height)*
 - *Building volume/road width*

Queste 4 variabili sono state calcolate:

- nei buffer circolari intorno ai punti di misura
- nelle intersezioni *buffer - roads-buffer measure point*



LAI stimato nel 2011 in base all'algoritmo sviluppato da Manes et al. (2004; 2006).

L'Indice di Area Fogliare o Leaf Area Index (LAI, $m^2 m^{-2}$) è una variabile adimensionale, definita come la superficie fogliare proiettata su una porzione unitaria di suolo

Legenda

LAI m^2/m^2

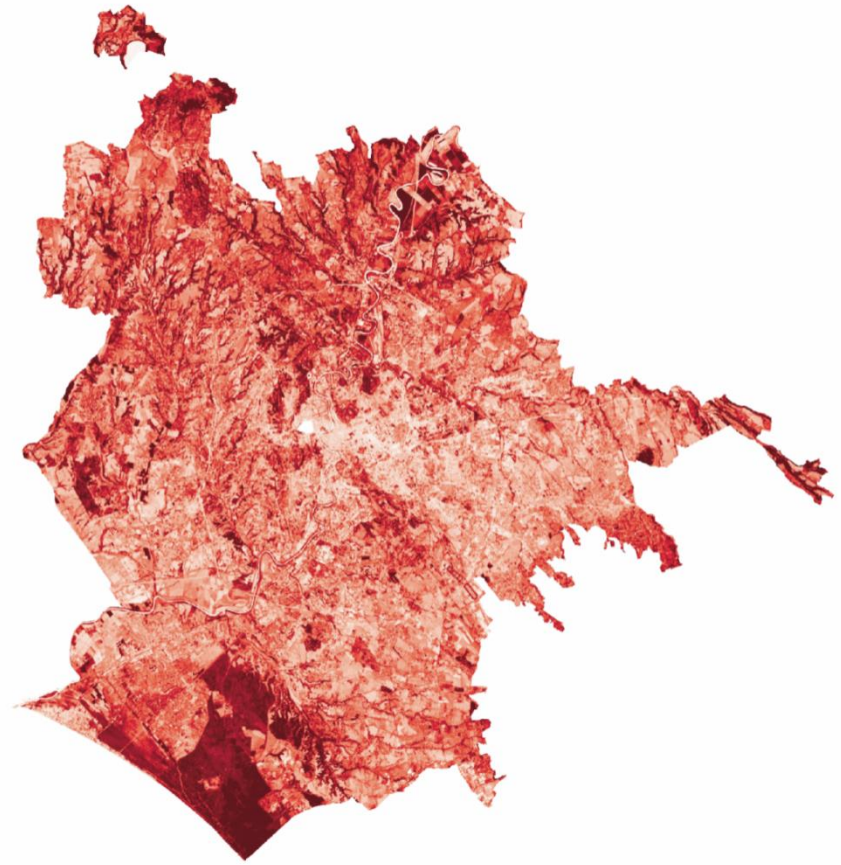
0.0-1.2

1.2-2.4

2.4-3.6

3.6-4.8

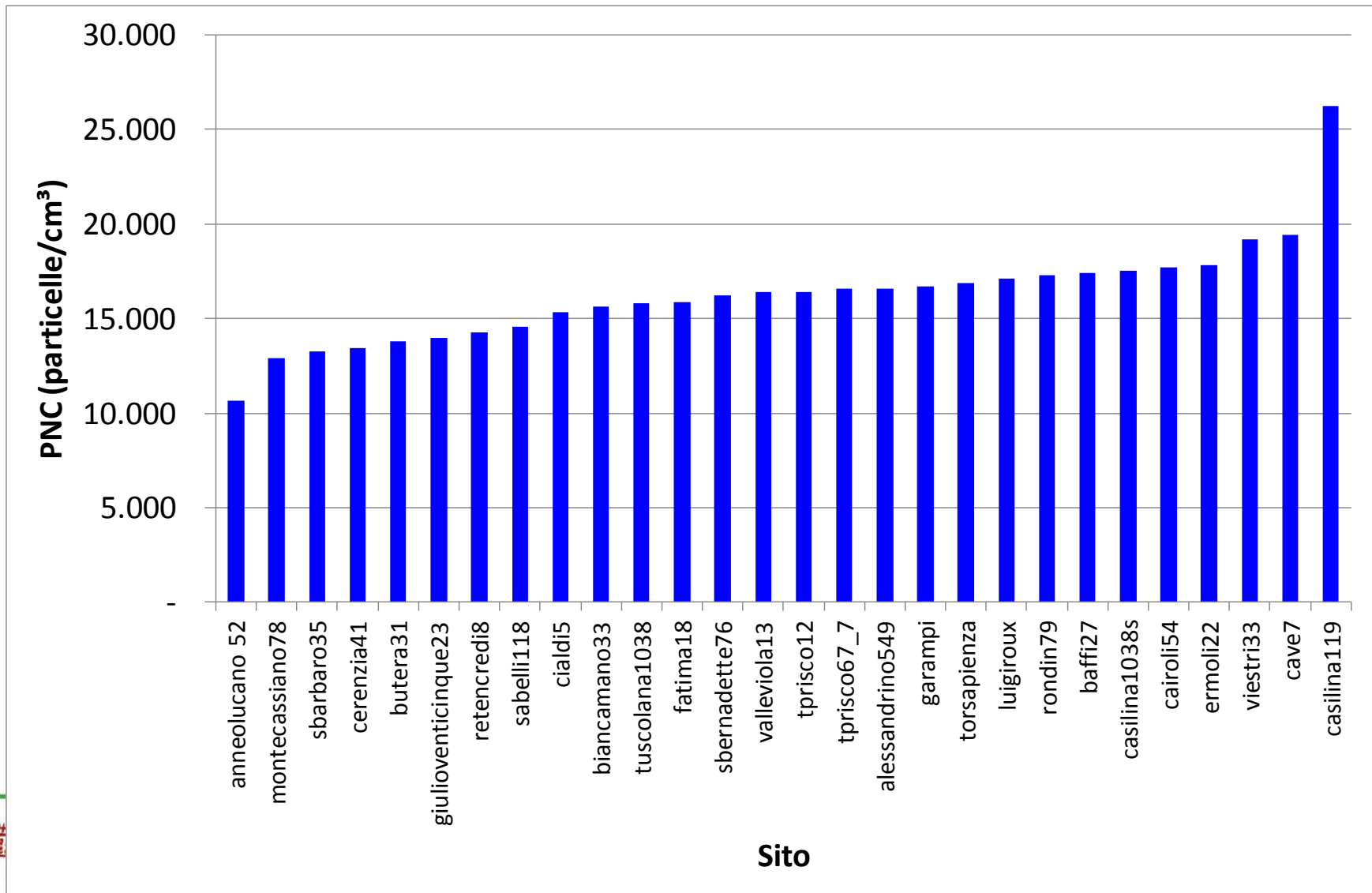
4.8-6.02



Sviluppo del modello: regressione di tipo “supervised forward stepwise selection procedure” (e.g. ESCAPE)

- Regressione univariata della PNC media annuale aggiustata con tutti i potenziali predittori
- Modello di start: predittore con maggiore varianza aggiustata spiegata (R^2) (coefficiente stimato con segno conforme alla direzione stabilita a priori)
- Aggiunta successiva del migliore ulteriore predittore se:
 - se l' R^2 adj del modello aumenta in misura maggiore dell'1%
 - se il coefficiente stimato ha segno conforme alla direzione stabilita a priori.
 - Se l'introduzione della variabile non cambia la direzione delle variabili precedentemente introdotte
- Rimozione dal modello finale delle variabili con p-value $>0,1$
- Verifica degli assunti di base della regressione multipla
- Valutazione della performance del modello

PNC a Roma: medie annuali stimate in 28 siti



Modello LUR per PNC a Roma

- $PNC \sim DistInvMajor1 + LAI5000average + LDRES5000 + Pop1000 + TrafNear + URBGREEN1000 + VoIRb50100$
 $R^2 = 0,78; R^2 \text{ adj} = 0,71$

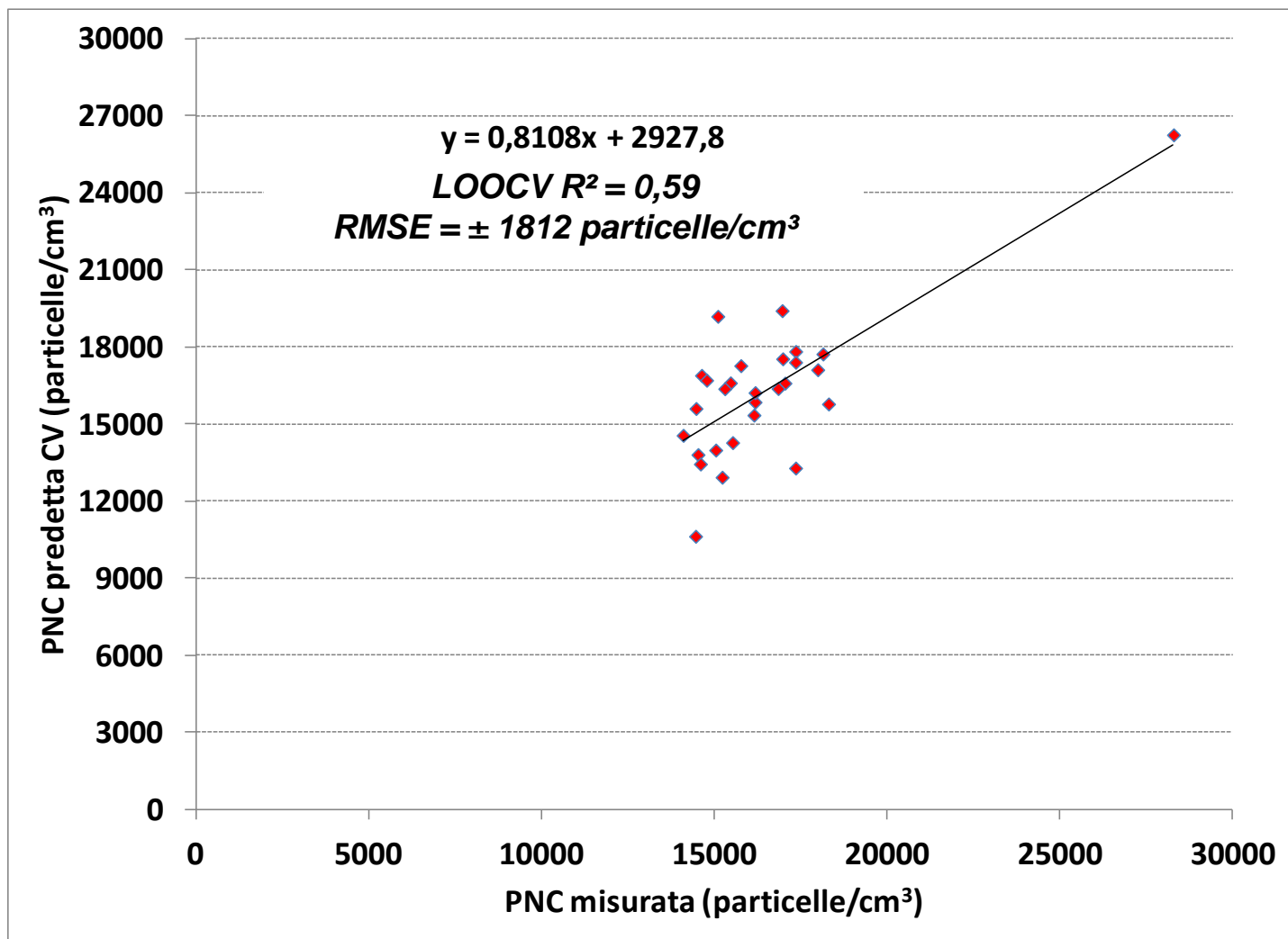
Variable	Unità di misura	Descrizione	Stima	Errore std	p-value
<i>Intercetta</i>	[particelle cm ⁻³]	-	1,51·10 ⁴	3,91·10 ³	< 0,01
<i>DistInvMajor1</i>	[m ⁻¹]	Inverso della distanza dalla strada principale più vicina	5,13·10 ³	1,02·10 ³	< 0,01
<i>LAI5000average</i>	[-]	Valore medio del Leaf Area Index in buffer di 5000 m intorno al punto di misura	-2,51·10 ³	1,80·10 ³	0,18
<i>LDRES5000</i>	[m ²]	Bassa densità residenziale	1,72·10 ⁻⁴	0,95·10 ⁻⁴	0,09
<i>Pop1000</i>	[-]	n. di abitanti in buffer di 1000 m intorno al punto di misura	2,02·10 ⁻²	2,09·10 ⁻²	0,35
<i>TrafNear</i>	[Veh.day ⁻¹]	Intensità traffico nelle strade locali più vicine	4,35·10 ⁻²	2,75·10 ⁻²	0,13
<i>Urban Green1000</i>	[m ²]	Verde urbano ricadente in buffer di 1000 m intorno al punto di misura	-1,97·10 ⁻³	1,42·10 ⁻³	0,13
<i>VoIRb50100</i>	[-]	Volume complessivo degli edifici nel buffer intersezione di un buffer lineare rispetto alla mezzeria della strada di 50 m con un buffer circolare di raggio 100 m intorno al punto di misura	1,96·10 ⁻³	9,89·10 ⁻⁴	0,06

Modello LUR finale per PNC a Roma

- $PNC \sim DistInvMajor1 + LDRES5000 + TrafNear + URBGREEN1000 + VoIRb50100$
- $R^2 = 0,75$;
- $R^2 \text{ adj} = 0,69$;

Variabile	Unità di misura	Descrizione	Stima	Errore std	p-value	VIF
Intercetta	[particelle cm^{-3}]	-	$1,06 \cdot 10^4$	$2,23 \cdot 10^3$	< 0,01	
DistInvMajor1	[m^{-1}]	Inverso della distanza dalla strada principale più vicina	$5,26 \cdot 10^3$	$1,04 \cdot 10^3$	< 0,01	1,35
LDRES5000	[m^2]	Bassa densità residenziale	$1,88 \cdot 10^{-4}$	$0,95 \cdot 10^{-4}$	0,06	1,12
TrafNear	[Veh.day $^{-1}$]	Intensità traffico nelle strade locali più vicine	$5,30 \cdot 10^{-2}$	$2,75 \cdot 10^{-2}$	0,06	1,32
Urban Green1000	[m^2]	Verde urbano ricadente in buffer di 1000 m intorno al punto di misura	$-3,17 \cdot 10^{-3}$	$1,21 \cdot 10^{-3}$	0,02	1,03
VoIRb50100	[-]	Volume complessivo degli edifici nel buffer intersezione di un buffer lineare rispetto alla mezzeria della strada (r = 50 m) con un buffer circolare (r = 100 m) intorno al punto di misura	$2,71 \cdot 10^{-3}$	$8,79 \cdot 10^{-4}$	0,01	1,10

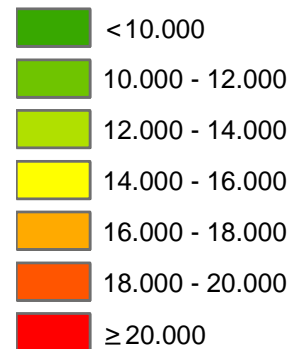
Modello LUR finale per PNC a Roma; LOOCV



Variabilità spaziale della PNC nel dominio di studio



Roma, PNC
[#/cm³]



Confronto con altri LUR per PNC

Città	N siti	Campagne di misura	strumenti	Durata singola misura	FC stima media periodo	Rif
Girona ^a	38-167	1 (estate)	P-TRACK (>20 nm)	15 min	Rapporto NO _x	Rivera et al, 2012
Amsterdam	46	1 (anno)	CPC3022a	7 d	Δ PNC background	Hoeck et al, 2011
Vancouver	80	1 (primavera)	CPC 3007	1 h	CF PNC background	Abernethy et al, 2013
New Delhi ^b	18 - 37	1 (primavera)	CPC 3007	1-3 h	nd	Saraswat et al, 2013
Toronto	8 /112 ^c	1 (estate)	FMPS, WCPC, P-TRACK	5-10 min	Algoritmo di Montecarlo PNC sito fisso	Sabaliauskas et al, 2015

^a **Varie città della provincia di Girona (Spagna)**

^b **Sviluppati due modelli per mattina e pomeriggio**

^c **Misure di 5 – 10 minuti tra le 12 e le 15 in 112 segmenti stradali**

Confronto con altri LUR per PNC

Città	Variabili	R2 adj (R ²)	R ² LOOCV	RMSE	Rif
Girona ^a	Heavy, light and moto; Area of high density Residential land 1000; Dist intersection 2 major roads; Household density 100	0.36	0.35	nd	Rivera et al, 2012
Amsterdam	T.I.*inv dist squared, Address density 300, Port 3000	0.65 (0.67)	0.57	nd	Hoeck et al, 2011
Vancouver	Truck route length 50, distance to port (ln km), truck count, fast food density 200	0.53	0.38	12300	Abernethy et al, 2013
New Delhi ^b	Pop5000, minor road length 500	0.23 – 0.28	0.59 – 0.72	nd	Saraswat et al, 2013
Toronto	population density, Resource & industrial area, Length of major roads and expressways	0.72	0.68	3495	Sabalaiuska s et al, 2015
Roma	DistInvMajor1, LDRES5000, TrafNear, URBGREEN1000 VolRb50100	0.69 (0.75)	0,59	1812	

^a Core model Varie città della provincia di Girona (Spagna);

^b Sviluppato due modelli per mattina e pomeriggio

Confronto con LUR altri inquinanti a Roma (ESCAPE, Beelen et al 2013; Eeftens et al 2012)

	Variabili predittive	R ² adj	RMSE	Media [range]
PM _{2,5} [µg/m ³]	Traffload_25, roadlength_100	0,71	1,9	19,8 [14,2 – 27,0]
PMcoarse [µg/m ³]	Traffroadlength_50, load_25, roadlength_1000_50	0,70	3,7	17,2 [11,3 – 32,0]
PM _{2,5} Absorbance [µg/m ³]	Intmajorinvdist, pop_5000	0,84	0,3	2,9 [1,9 – 4,7]
NO ₂ [µg/m ³]	Pop_100, roadlength_1000, distinvnear2, industry_5000, urbangreen_1000, traffload_50, majorroadlength_100	0,87	6,8	42,6 [13,6 – 72,6]
NOx [µg/m ³]	Ldres_100, pop_100, traffload_100, sqralt, natural_1000_5000, roadlength_25	0,80	15,1	72,7 [25,1 – 146,0]
PNC [#/cm³]	DistInvMajor1, LDRES5000, TrafNear, URBGREEN1000 VolRb50100	0,69	1812	16255 [10633 – 26263]

Conclusioni

- È stato sviluppato per la prima volta in Italia un modello LUR che permette di stimare la variabilità spaziale della PNC in una grande città come Roma.
- È il secondo modello LUR (oltre a quello sviluppato ad Amsterdam) che permette di stimare la variabilità spaziale della media annuale della PNC (gli altri hanno un orizzonte temporale limitato a una stagione), e che non è basato su misure short term (i.e. poche ore in molti siti).
- È il primo modello LUR basato su misure effettuate in ciascun sito in tre diversi periodi dell'anno
- Rispetto a ESCAPE sono state aggiunte variabili rappresentative geometria degli edifici e delle strade; Leaf area index, output di un modello numerico
- La performance del modello è risultata molto buona con una **variabilità spiegata del 69%**. L'errore quadratico medio (± 1822 particelle/cm³) è accettabile considerato il range di PNC osservato (10.633 – 26.263).
- Il modello sviluppato potrà essere utilizzato nell'ambito di futuri studi di coorte per la valutazione dell'esposizione della popolazione.

Grazie per l'attenzione

Giorgio Cattani, Alessandro di Menno Di Bucchianico, Alessandra Gaeta,
Antonella De Santis, Raffaella Gaddi, Mariacarmela Cusano (ISPRA)

Giulia Cesaroni, Carla Ancona, Francesco Forastiere (DIPEPI LAZIO)

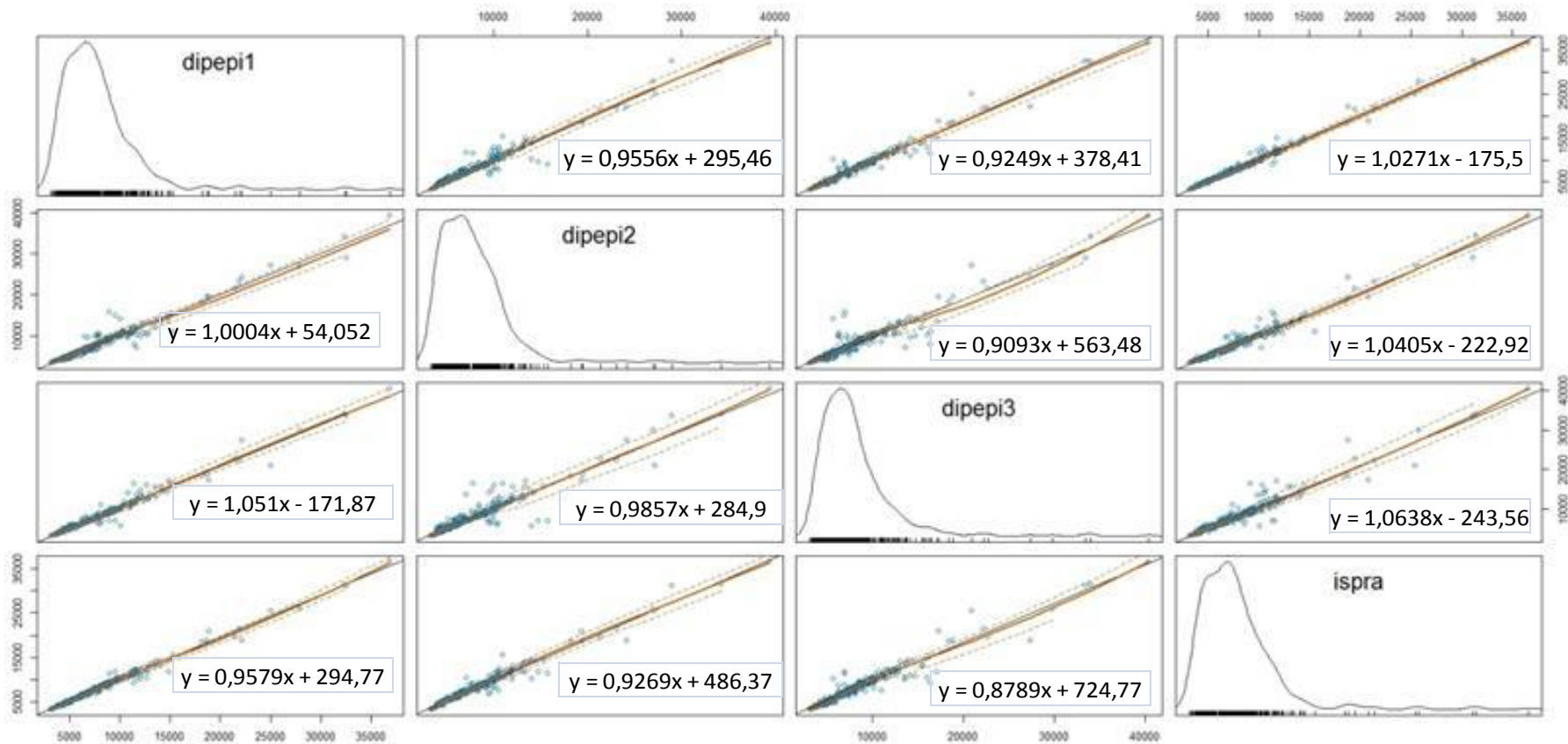
Roberto Sozzi (ARPA LAZIO)

Elisabetta Salvatori e Fausto Manes UNIVERSITA' DI ROMA LA SAPIENZA,
DIPARTIMENTO DI ECOLOGIA AMBIENTALE

Claudio Gariazzo (INAIL)

Camillo Silibello (ARIANET)

Marco Inglessis (ISS)



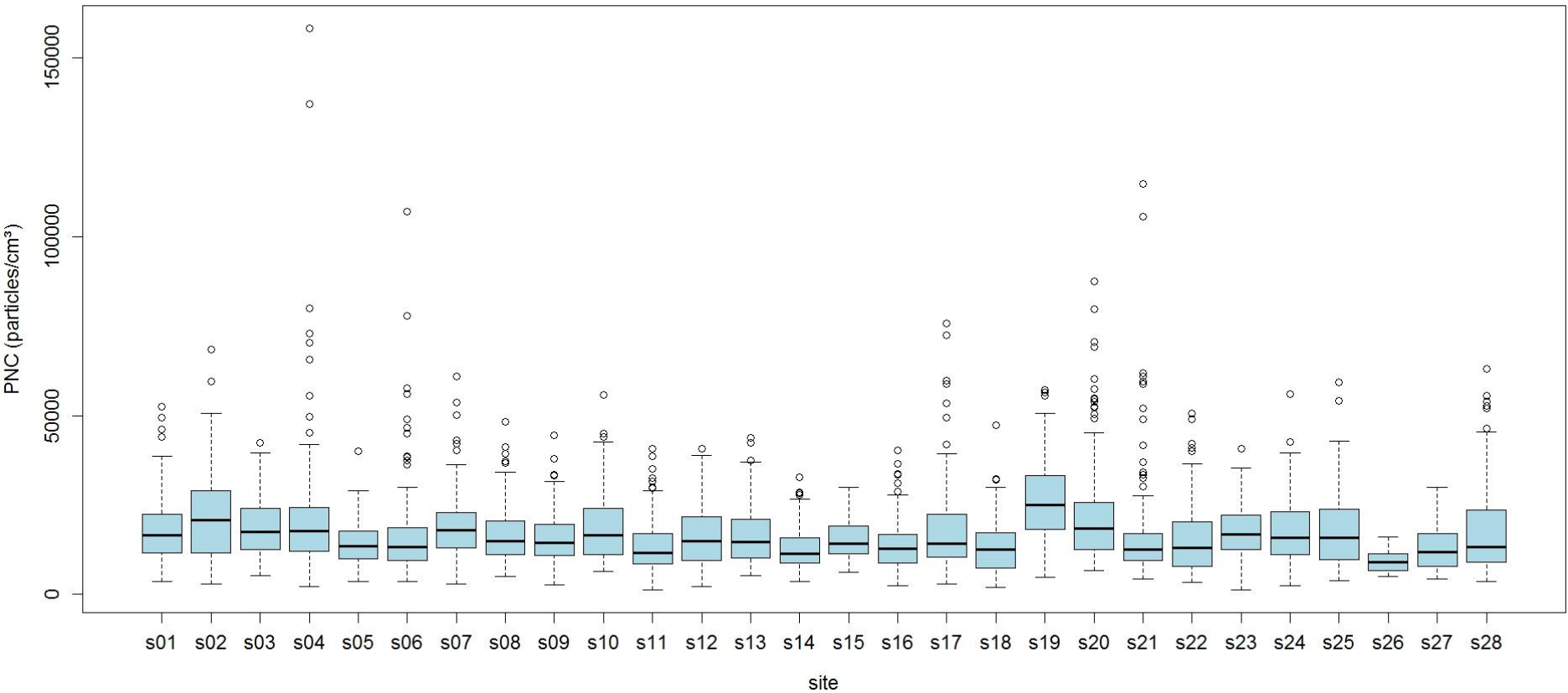
	mean	sd	se(mean)	IQR	cv	0%	25%	50%	75%	100%	n	NA
dipepi1	7893,028	4127,626	217,545	3675,25	0,522946	3151	5386,25	7029	9061,5	36846	360	0
dipepi2	7950,436	4223,288	222,5868	4141,75	0,531202	3295	5232,75	7131,5	9374,5	39325	360	0
dipepi3	8102,46	4386,856	231,5294	3609	0,541423	3168	5583	7192	9192	40437	359	1
ispra	7855,4	3986,066	210,0841	3747,25	0,50743	3192	5401,75	7115	9149	36587	360	0

	DIPEPI1	DIPEPI2	DIPEPI3	ISPRA
DIPEPI1				
DIPEPI2	0,956			
DIPEPI3	0,9721	0,8963		
ISPRA	0,9839	0,9644	0,9349	

Statistiche descrittive – medie di 1 minuto

Sito	mean	sd	IQR	cv	n	recovery
tprisco67_7	18371	10279	10889	56%	7130	94,3%
tprisco12	21421	12429	17507	58%	7526	99,6%
torsapienza	18927	8615	12395	46%	7393	97,8%
ermoli22	20831	22200	11669	107%	7557	100,0%
retencredi8	13923	6328	7950	45%	7557	100,0%
alessandrino549	15769	16856	8554	107%	7437	98,4%
cave7	18886	9819	11172	52%	7557	100,0%
luigiroux	16337	9436	9492	58%	7557	100,0%
valleviola13	15877	7383	8700	47%	7557	100,0%
baffi27	18913	10152	12858	54%	7557	100,0%
giulioventicinque23	13521	8290	8871	61%	7317	96,8%
rondin79	16011	8723	12051	54%	7197	95,2%
garampi	16207	9224	11177	57%	7557	100,0%
montecassiano78	12752	6937	7321	54%	7557	100,0%
tuscolana1038	15287	6031	7751	39%	7557	100,0%
butera31	13569	7276	7789	54%	7197	95,2%
fatima18	18102	14211	11791	79%	7197	95,2%
cerenzia41	13333	8468	10620	64%	7557	100,0%
casilina119	26177	12799	15873	49%	7557	100,0%
viestri33	22215	14824	13944	67%	7437	98,4%
sbernadette76	15933	18671	7269	117%	7557	100,0%
sbarbaro35	15742	10040	12747	64%	7408	98,0%
caioli54	17766	7849	10410	44%	7501	99,2%
casilina1038s	17493	10146	12568	58%	7557	100,0%
cialdi5	17968	11809	14526	66%	7197	95,2%
anneolucano 52	9261	2932	4587	32%	1679	22,2%
sabelli118	13113	7011	8854	53%	5938	78,5%
biancamano33	18047	14002	14235	78%	7557	100,0%

Livelli di concentrazione (medie orarie) di particelle in numero (PNC)



Modello di start

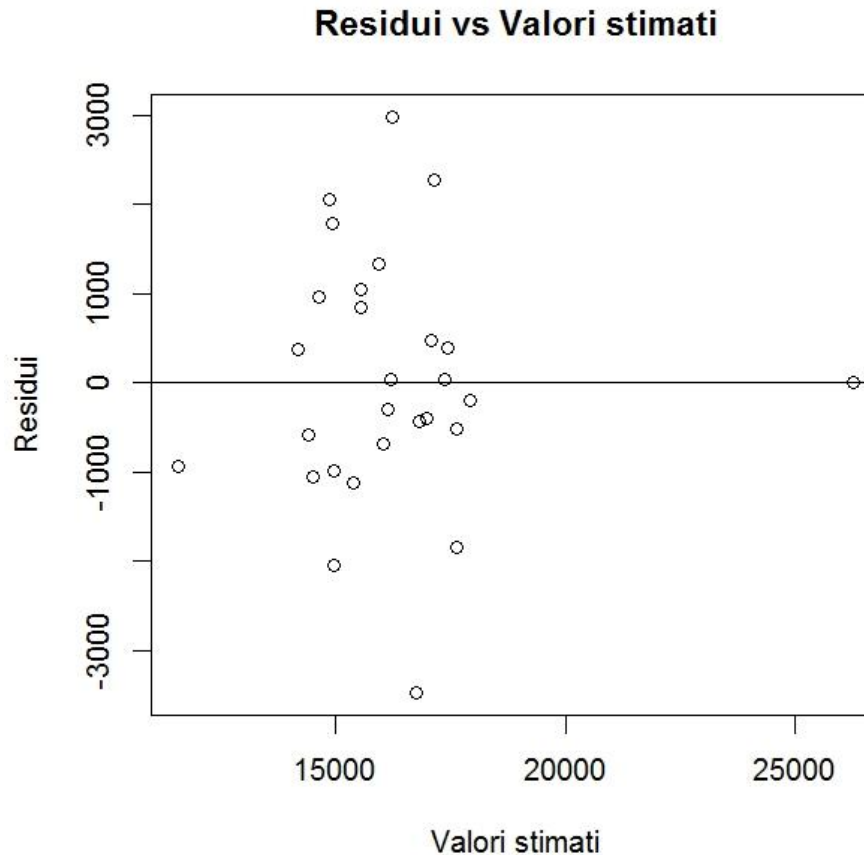
N.	Variabili	R2	R2 adjusted
1	DistInvMajor1	0,517	0,4984
2	TrafMajorLoad25	0,5111	0,4923
3	IntMajorInvDist	0,5092	0,4903
4	TrafLoad25	0,5084	0,4895
5	IntInvDist	0,5082	0,4893
6	IntInvDist2	0,5017	0,4826
7	DistInvMajor2	0,5001	0,4809
8	IntMajorInvDist2	0,4998	0,4806
9	MajorRoadLength25	0,4761	0,456
10	MajorRoadLength50	0,3451	0,3199
11	TrafMajorLoad50	0,3379	0,3124
12	TrafLoad50	0,3353	0,3097
13	TrafLoad100	0,2917	0,2644
14	TrafMajorLoad100	0,2862	0,2588
15	TrafNear	0,2701	0,242
16	TrafMajorLoad300	0,2375	0,2082
17	TrafLoad300	0,2318	0,2023
18	PM1mod	0,228	0,1983
19	PM01mod	0,2276	0,1979
20	LAI5000average	0,2093	0,1789

Modello LUR per PNC a Roma

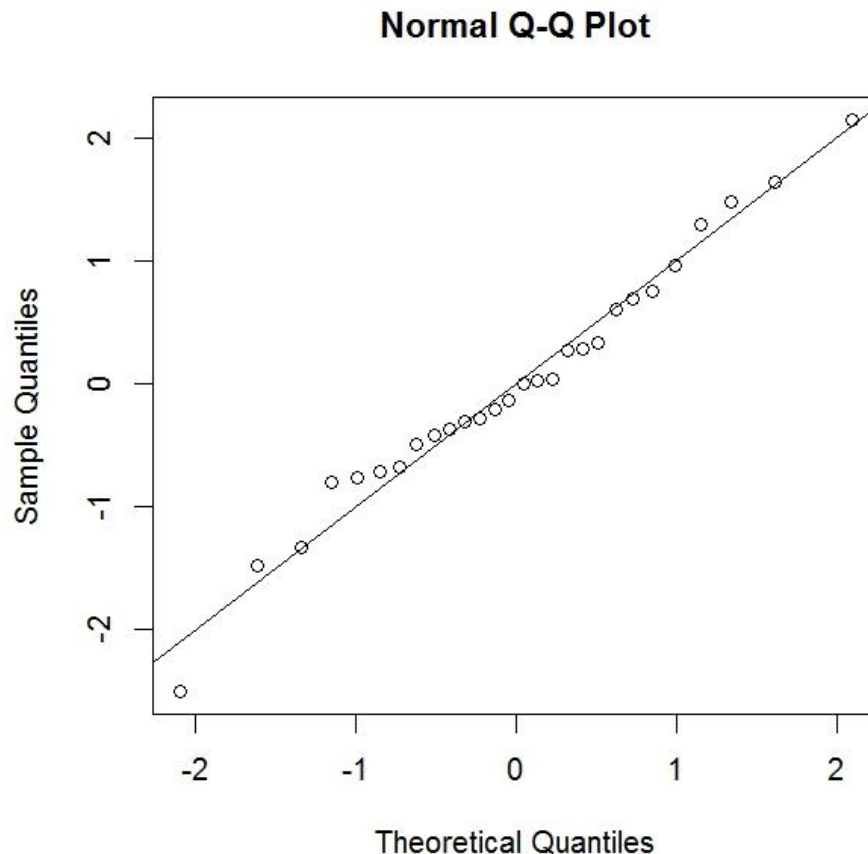
- $UFP \sim DistInvMajor1 + LAI5000average + LDRES5000 + TrafNear + URBGREEN1000 + VoIRb50100$
 $R^2 = 0,75; R^2 \text{ adj} = 0,69$

Variabile	Unità di misura	Descrizione	Stima	Errore std	p-value
Intercetta	[particelle cm ⁻³]	-	1,52·10 ⁴	3,90·10 ³	< 0,01
DistInvMajor1	[m ⁻¹]	Inverso della distanza dalla strada principale più vicina	5,19·10 ³	1,02·10 ³	< 0,01
LAI5000average	[-]	Valore medio del Leaf Area Index in buffer di 5000 m intorno al punto di misura	-2,57·10 ³	1,79·10 ³	0,167
LDRES5000	[m ²]	Bassa densità residenziale	1,90·10 ⁻⁴	0,93·10 ⁻⁴	0,05
TrafNear	[Veh.day ⁻¹]	Intensità traffico nelle strade locali più vicine	4,68·10 ⁻²	2,72·10 ⁻²	0,1
Urban Green1000	[m ²]	Verde urbano ricadente in buffer di 1000 m intorno al punto di misura	-2,05·10 ⁻³	1,41·10 ⁻³	0,162
VoIDivWidthRb50100	[-]	Volume edifici diviso l'ampiezza media delle strade nel buffer intersezione di buffer lineare rispetto alla mezzera della strada (r=50 m) con buffer circolare (r=100 m) intorno al punto di misura	2,37·10 ⁻³	8,92·10 ⁻⁴	0,01

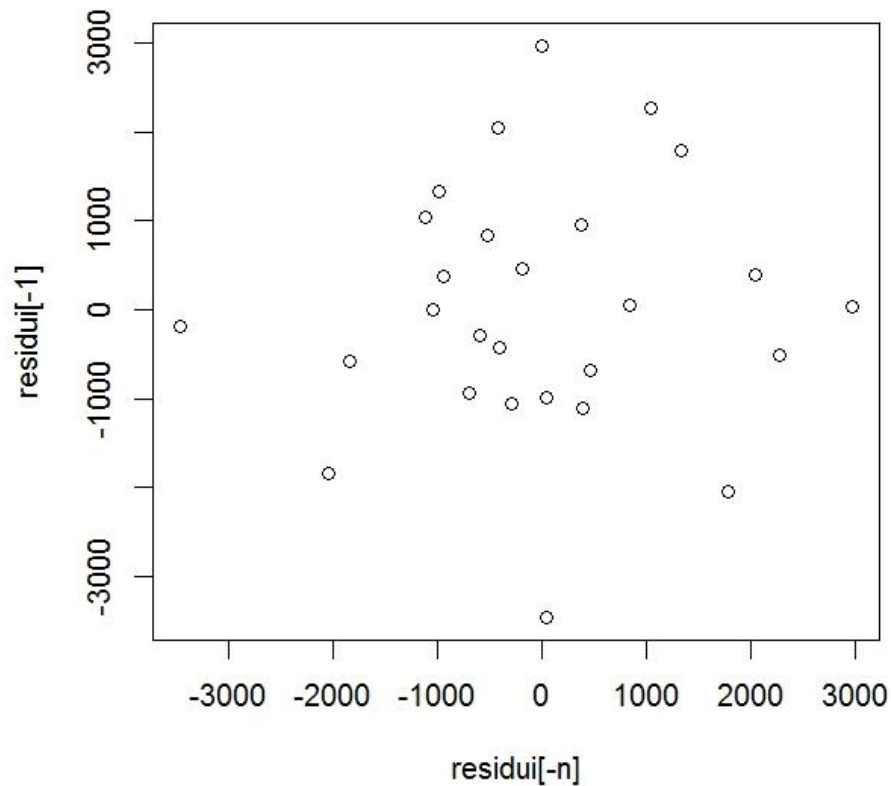
I residui sembrano disperdersi in maniera casuale sopra e sotto la loro media (lo zero) quindi i regressori hanno colto tutta la variabilità della variabile risposta.



Anche l'ipotesi di normalità distributiva dei residui è rispettata come si evince dal grafico quantile-quantile e dal test di Shapiro-Wilk, che saggia l'ipotesi nulla di normalità distributiva di un insieme di c ($p = 0.9133$).

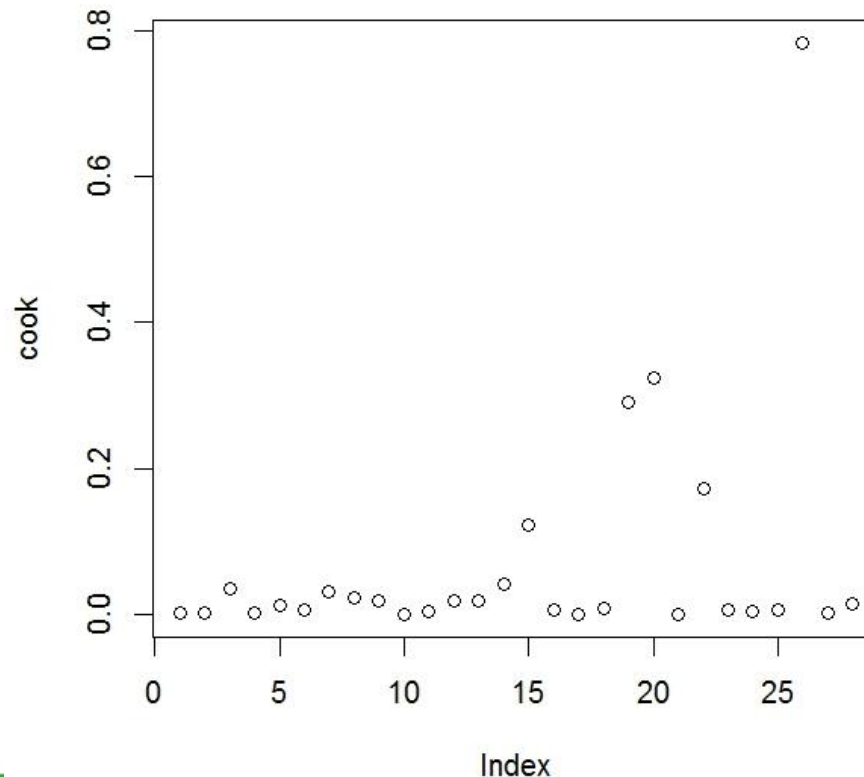


L'assenza di autocorrelazione dei residui è evidenziata in forma grafica nella figura e in forma numerica con il test di Durbin-Watson (DW = 1.8672. p-value = 0.3809).



La distanza di Cook misura l'influenza di un singolo caso sulla stima dei coefficienti di regressione, quando il singolo caso viene rimosso dal processo di stima. Dall'analisi emerge che nessun punto supera limiti per la definizione di punto influente (distanza di Cook >1)

Distanza di Cook



Modello definitivo con LAverage5000

lm(formula = UFP ~ DistInvMajor1 + LDRES5000 + TrafNear + VoIRb50100 + LAI5000average, data = Dati)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-2729.1	-553.2	-141.9	448.5	3212.3

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)
(Intercept)	1.748e+04	3.665e+03	4.771	9.20e-05 ***
DistInvMajor1	5.256e+03	1.043e+03	5.041	4.77e-05 ***
LDRES5000	2.010e-04	9.539e-05	2.107	0.0467 *
TrafNear	4.317e-02	2.774e-02	1.557	0.1338
VoIRb50100	2.089e-03	8.918e-04	2.342	0.0286 *
LAI5000average	-3.999e+03	1.533e+03	-2.608	0.0161 *

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 1535 on 22 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.7506, Adjusted R-squared: 0.6939

F-statistic: 13.24 on 5 and 22 DF, p-value: 5.076e-06

Call:

**lm(formula = UFP ~ DistInvMajor1 + LDRES5000 + VolRb50100 + LAI5000average,
data = Dati)**

Residuals:

Min 1Q Median 3Q Max
-2868.4 -691.1 -205.8 390.3 3673.2

Coefficients:

Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1.817e+04 3.749e+03 4.847 6.82e-05 ***
DistInvMajor1 6.012e+03 9.507e+02 6.324 1.88e-06 ***
LDRES5000 2.109e-04 9.808e-05 2.150 0.0423 *
VolRb50100 1.962e-03 9.151e-04 2.144 0.0429 *
LAI5000average -4.309e+03 1.567e+03 -2.750 0.0114 *

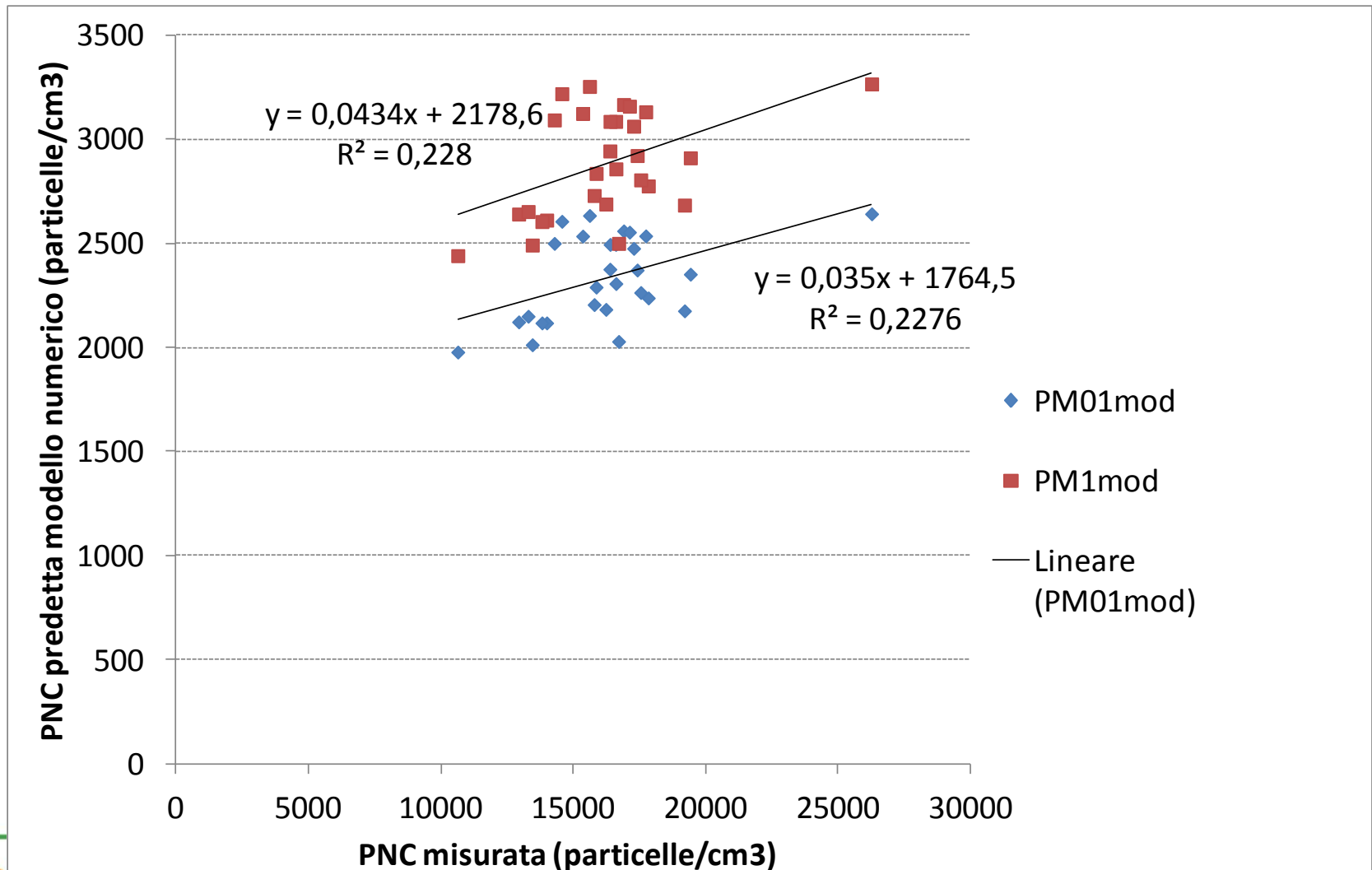
Signif. codes: 0 '*' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1**

Residual standard error: 1582 on 23 degrees of freedom

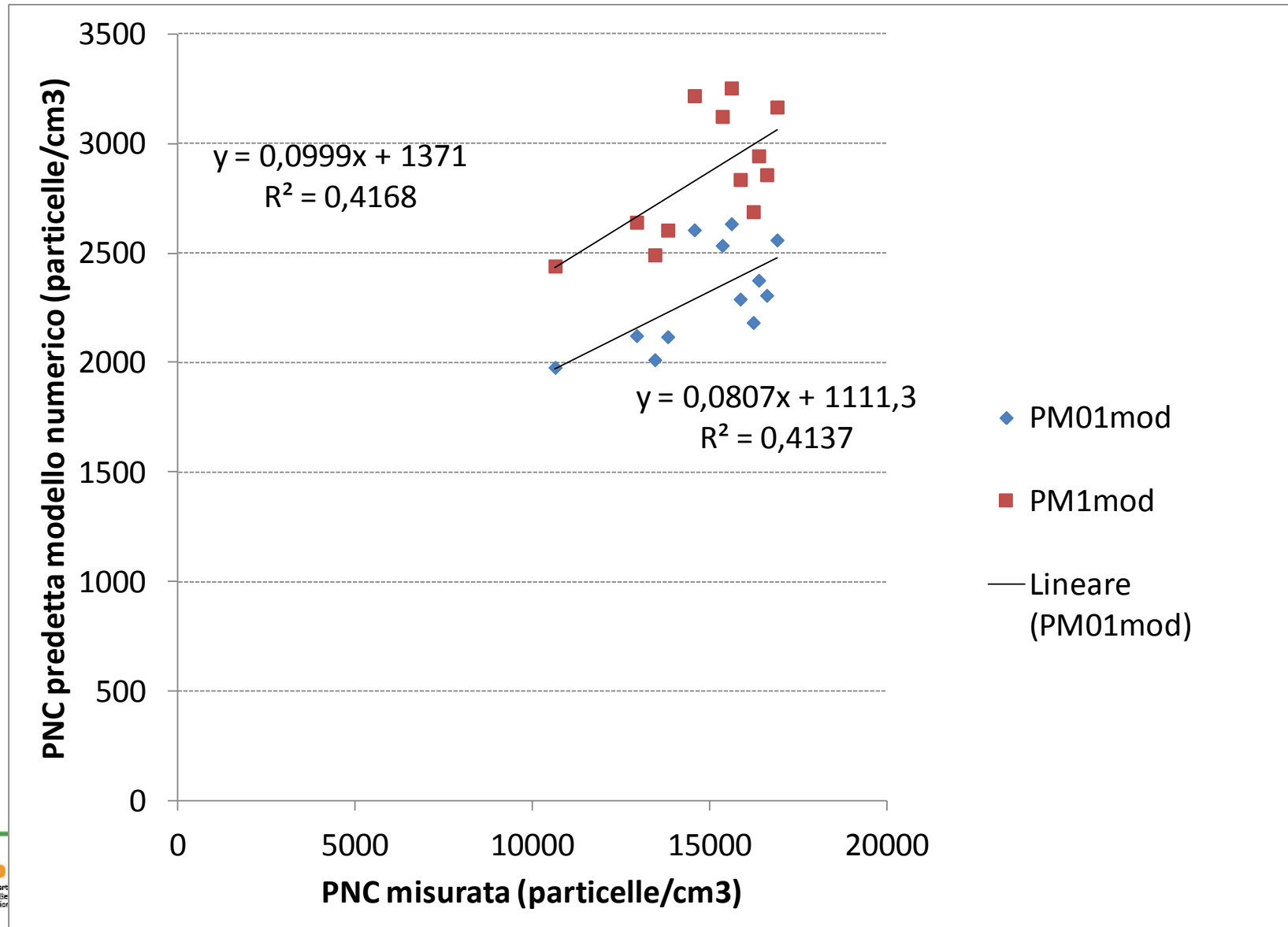
Multiple R-squared: 0.7231, Adjusted R-squared: 0.675

F-statistic: 15.02 on 4 and 23 DF, p-value: 3.595e-06

Confronto dati predetti da modello numerico e dati misurati in 28 siti



Confronto dati predetti da modello numerico e dati misurati in 12 siti selezionati tra quelli meno influenzati dal traffico (d major road > 100 m; traffic load $100 < 10^6$ [Veh.day⁻¹ m])



Confronto medie annuali PM2,5 predette e misurate in siti di fondo urbani e rurali di Roma

