



 POLITECNICO DI MILANO

Convegno Contaminazione delle acque sotterranee e tecnologie innovative di bonifica in Lombardia Milano 28 settembre 2015



Modellistica di flusso e trasporto a supporto della gestione qualitativa delle acque sotterranee



POLITECNICO
MILANO 1863

DICA-Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale

L. Alberti, A. Azzellino, S. Lombi, L. Colombo, M. Cantone

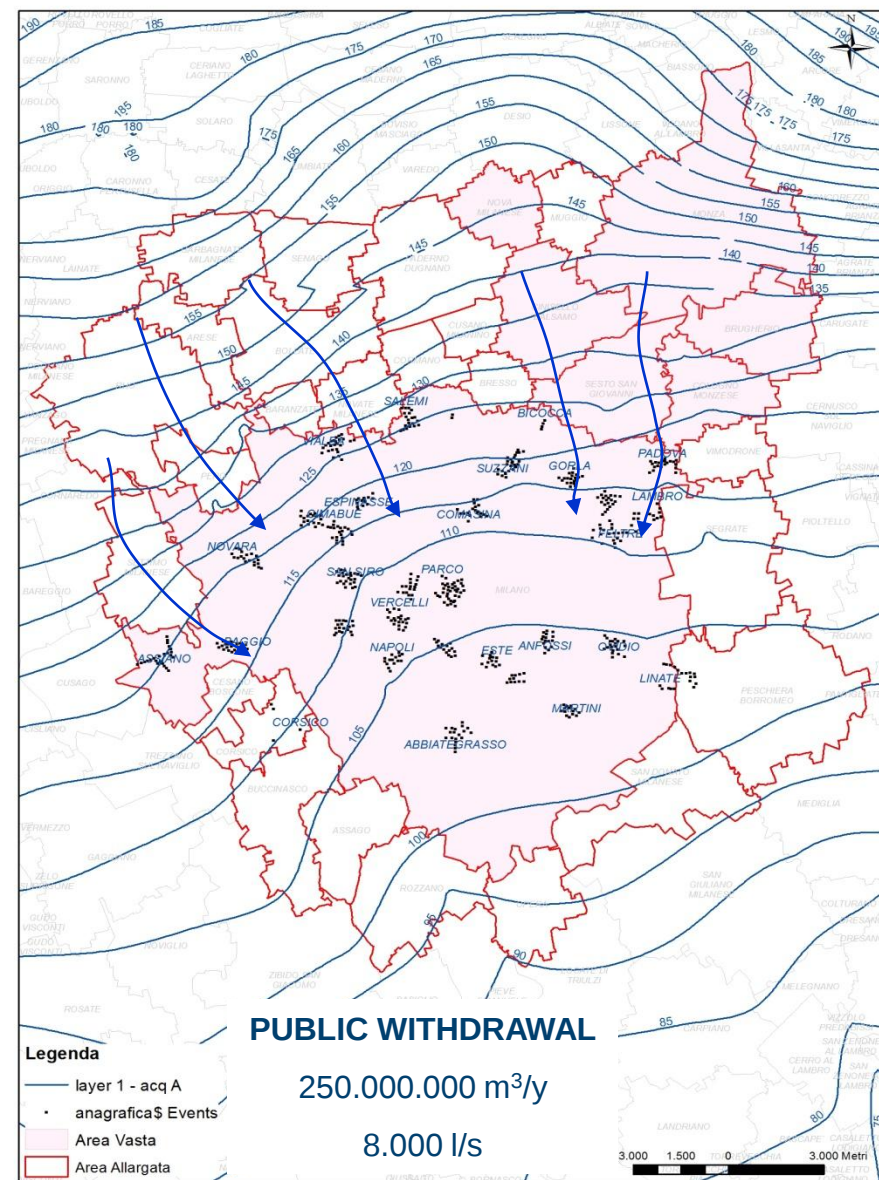
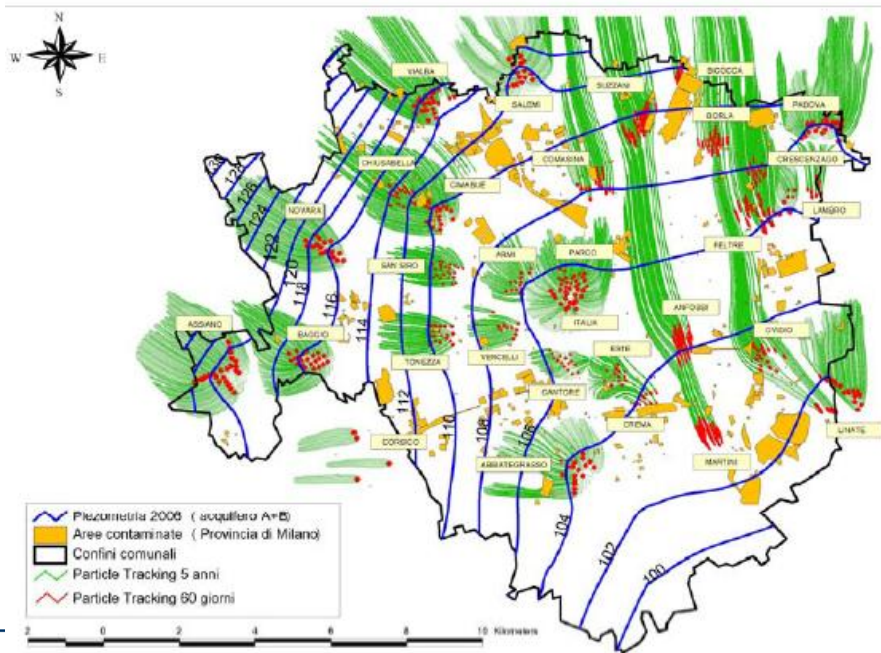




Milano- Area Urbana Funzionale

Il miglioramento della qualità dell'ambiente e pertanto delle acque sotterranee nelle Functionl Urban Areas (FUA) rappresenta sempre più un tema di attualità nell'ambito delle politiche ambientali europee.

Il caso di Milano è esemplificativo per la stretta connessione economica che esiste tra il capoluogo e il suo hinterland e l'influenza che questo ha sulle risorse idriche sotterranee cittadine.





Milano- Area Urbana Funzionale

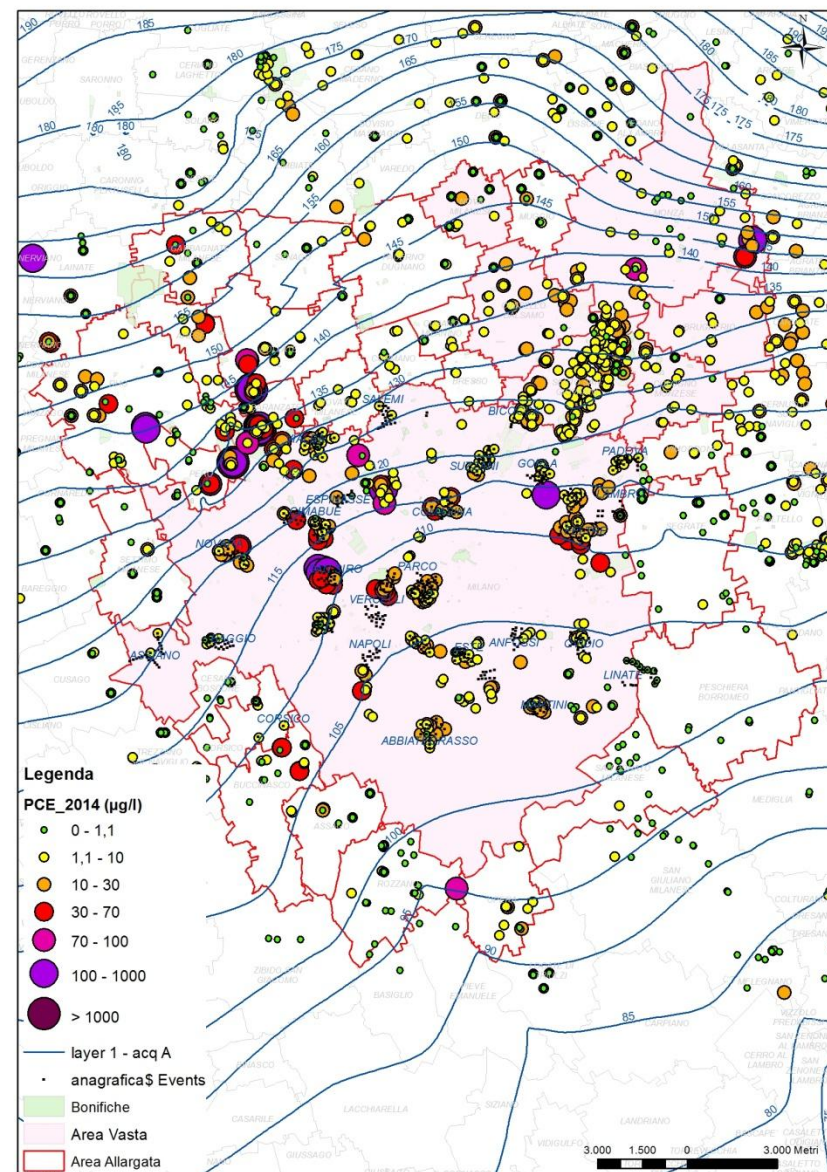
Nell'ambito della FUA di Milano in riferimento a PCE, TCE, TCM e CrVI possiamo distinguere 2 tipi di contaminazione:

- quella **puntuale** legata a specifiche sorgenti
- quella **diffusa multi-puntuale** legata a molteplici piccole sorgenti

Dopo oltre 20 anni di caratterizzazioni e bonifiche è chiaro che le 2 contaminazioni non possono essere affrontate con il medesimo approccio.

Per questo è di fondamentale importanza **riuscire a distinguerle** capendo quali aree sono colpite dall'una, dall'altra o da entrambe. Solo così potrà essere possibile definire:

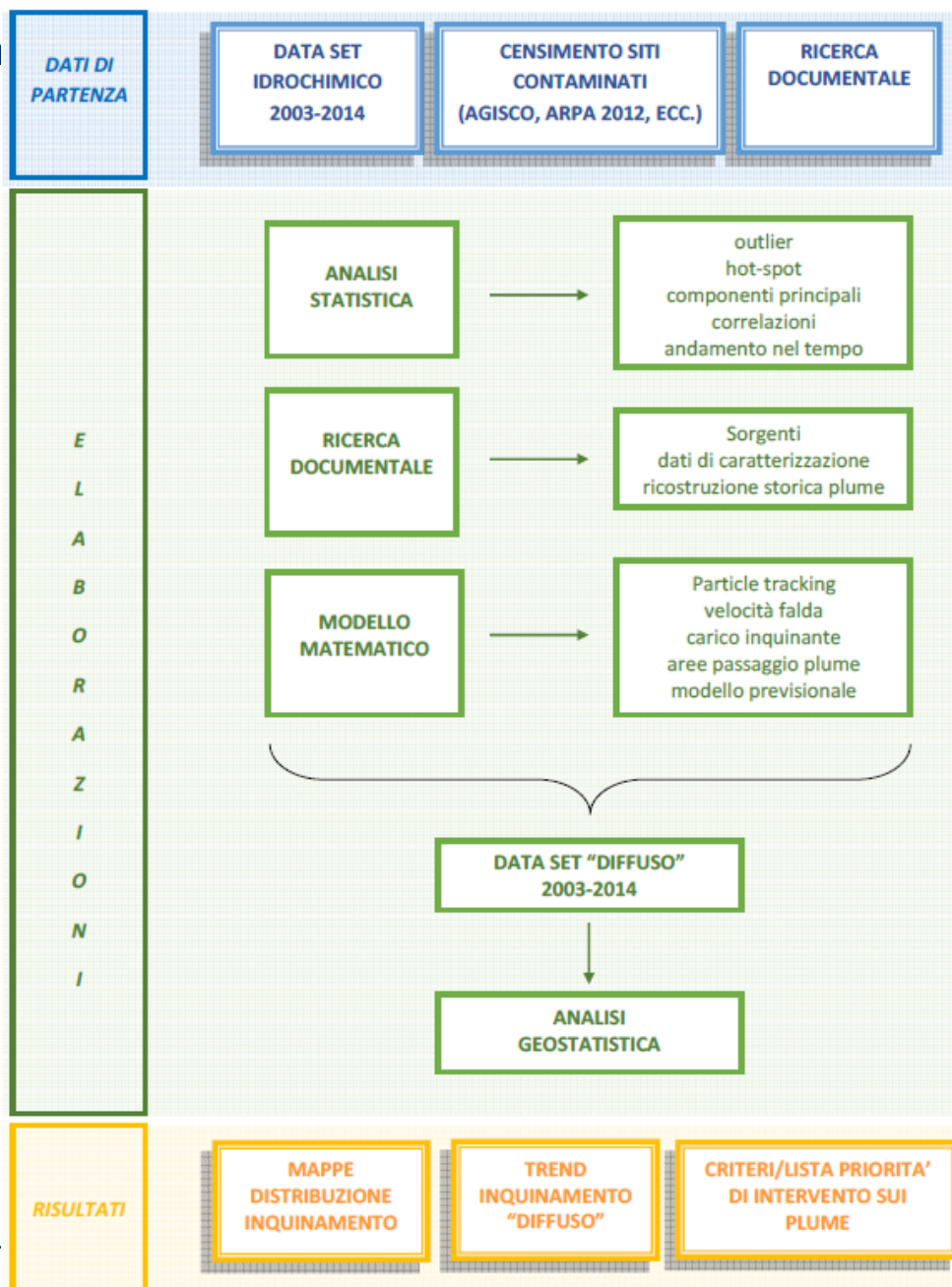
- obiettivi di bonifica credibili
- tempi congrui di raggiungimento di tali obiettivi
- un ordine di priorità in base al quale allocare le risorse economiche necessarie





Milano- Area Vasta

Il progetto PLUMES si prefigge di raggiungere tali obiettivi attraverso l'abbinamento di modelli di flusso e trasporto con l'analisi statistica (cluster e multivariata)



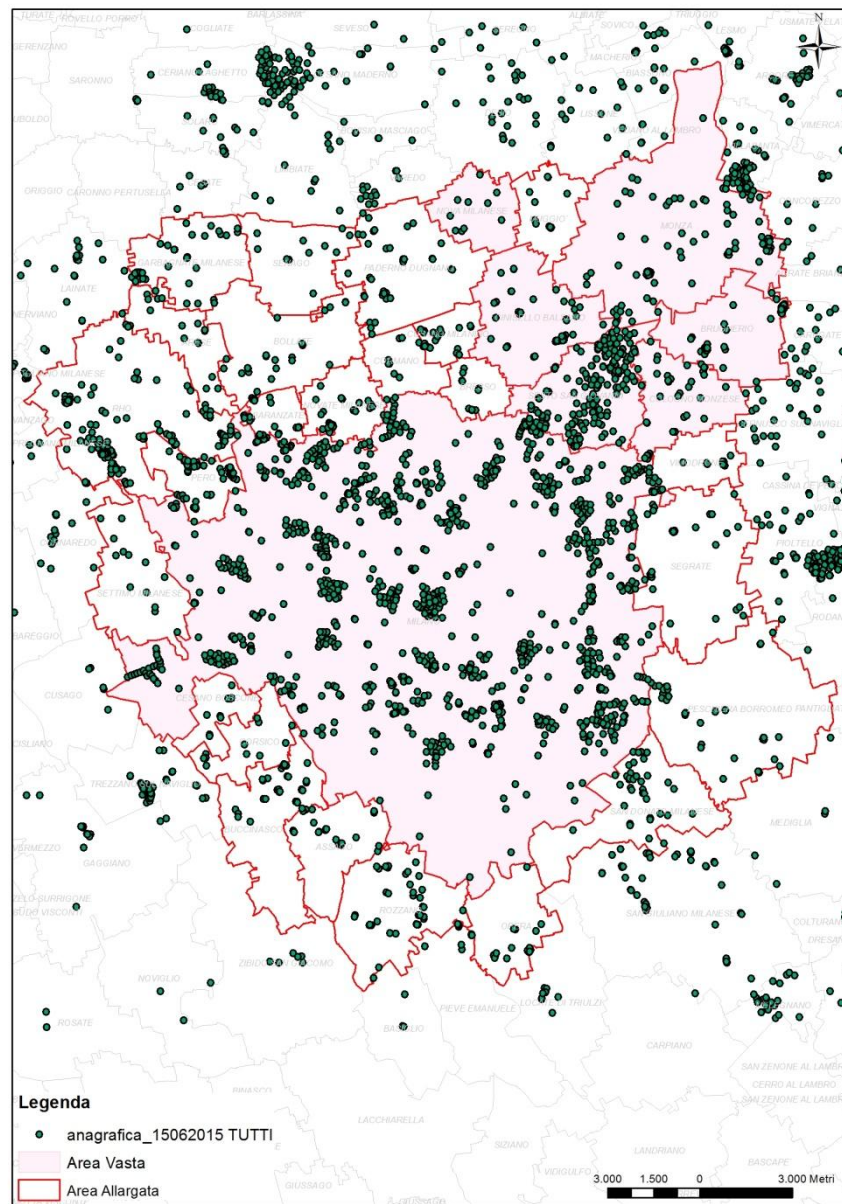


Analisi statistica

Grazie al lavoro compiuto da ARPA, sono stati resi disponibili **3.478 punti** di monitoraggio per i quali è stato possibile attribuire su base stratigrafica lo/gli acquiferi captati.

Il dataset completo dei dati idrochimici per il **periodo 2003-2014** consiste in circa **45.500 dati** per ogni parametro considerato

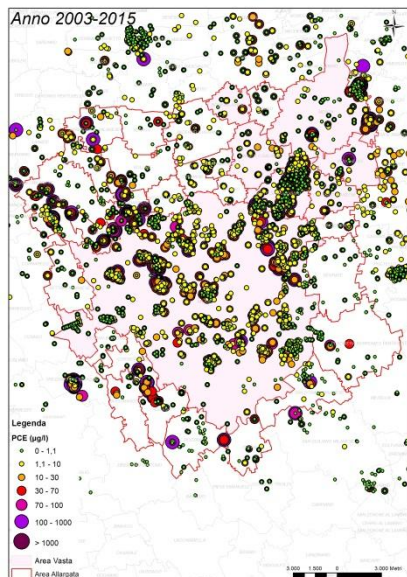
Un numero così elevato di informazioni ha richiesto un'elaborazione statistica mediante cluster analysis e analisi multivariata



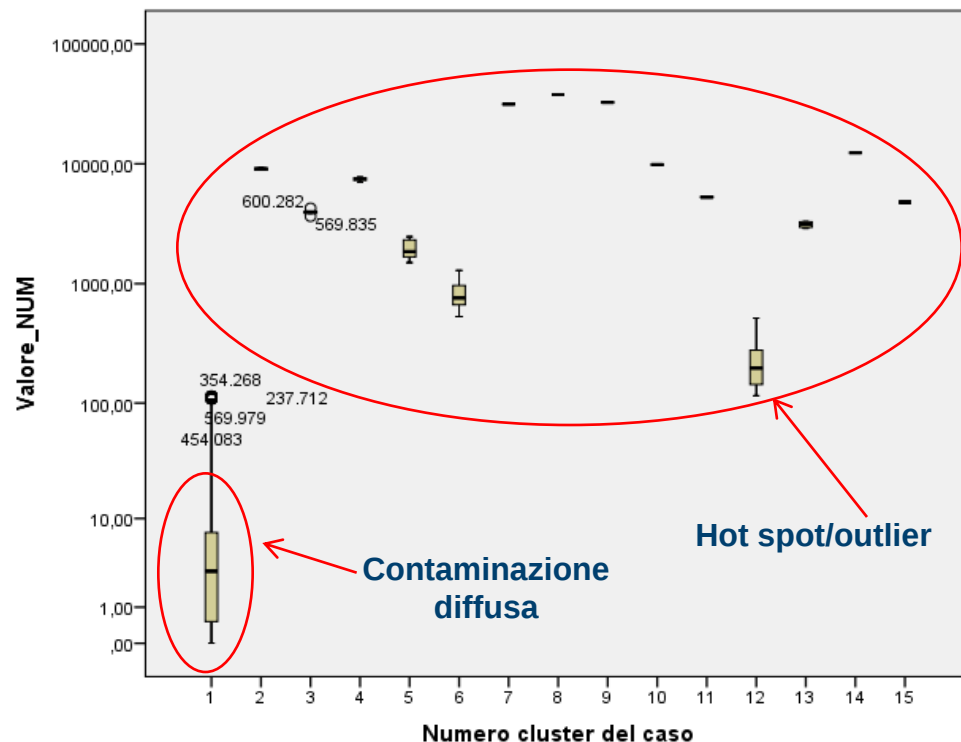


Analisi statistica: cluster analysis

Di seguito si riporta un esempio dei risultati preliminari che si sono ottenuti mediante cluster analysis dei dati di PCE del periodo 2003-2014



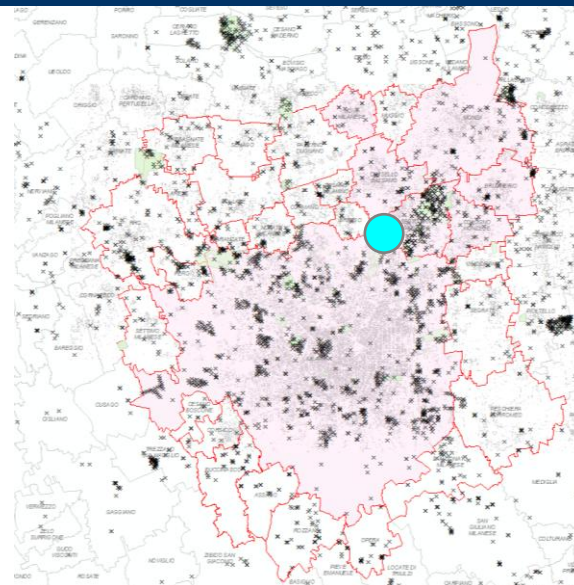
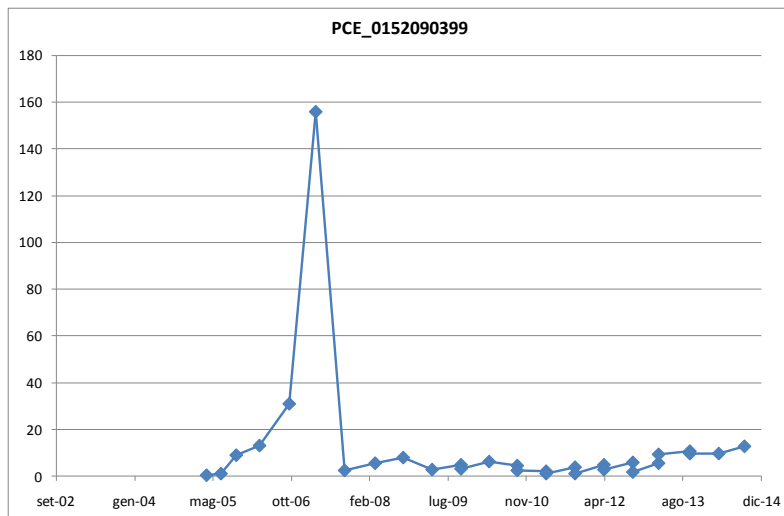
Numero di casi in ciascun cluster		
cluster		
Cluster	1	45076,000
	2	2,000
	3	5,000
	4	3,000
	5	18,000
	6	79,000
	7	1,000
	8	1,000
	9	1,000
	10	1,000
	11	3,000
	12	406,000
	13	4,000
	14	1,000
	15	1,000
Valido		45602,000
Mancante/i		26,000



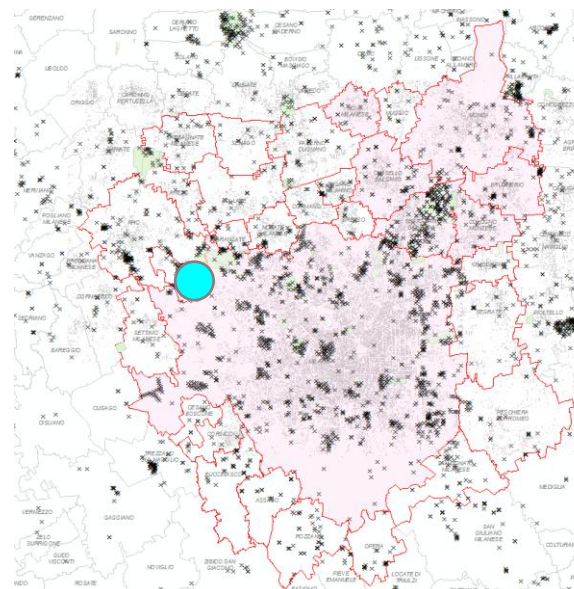
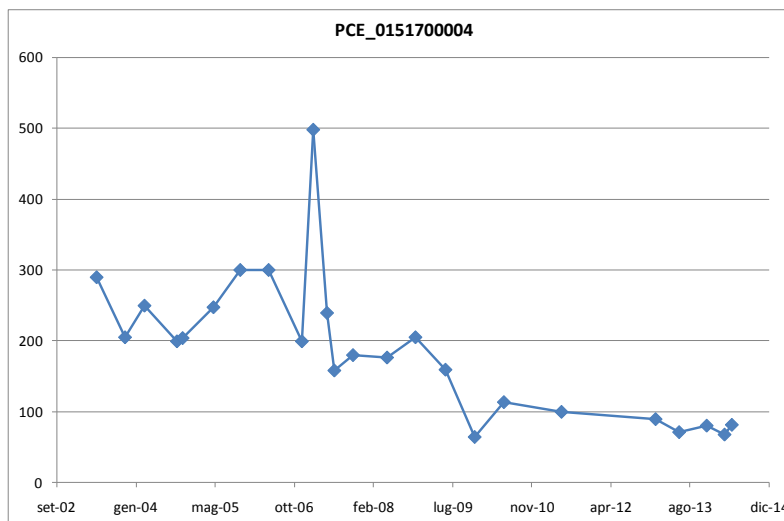


Analisi statistica: cluster analysis

OUTLIER



HOT-SPOT

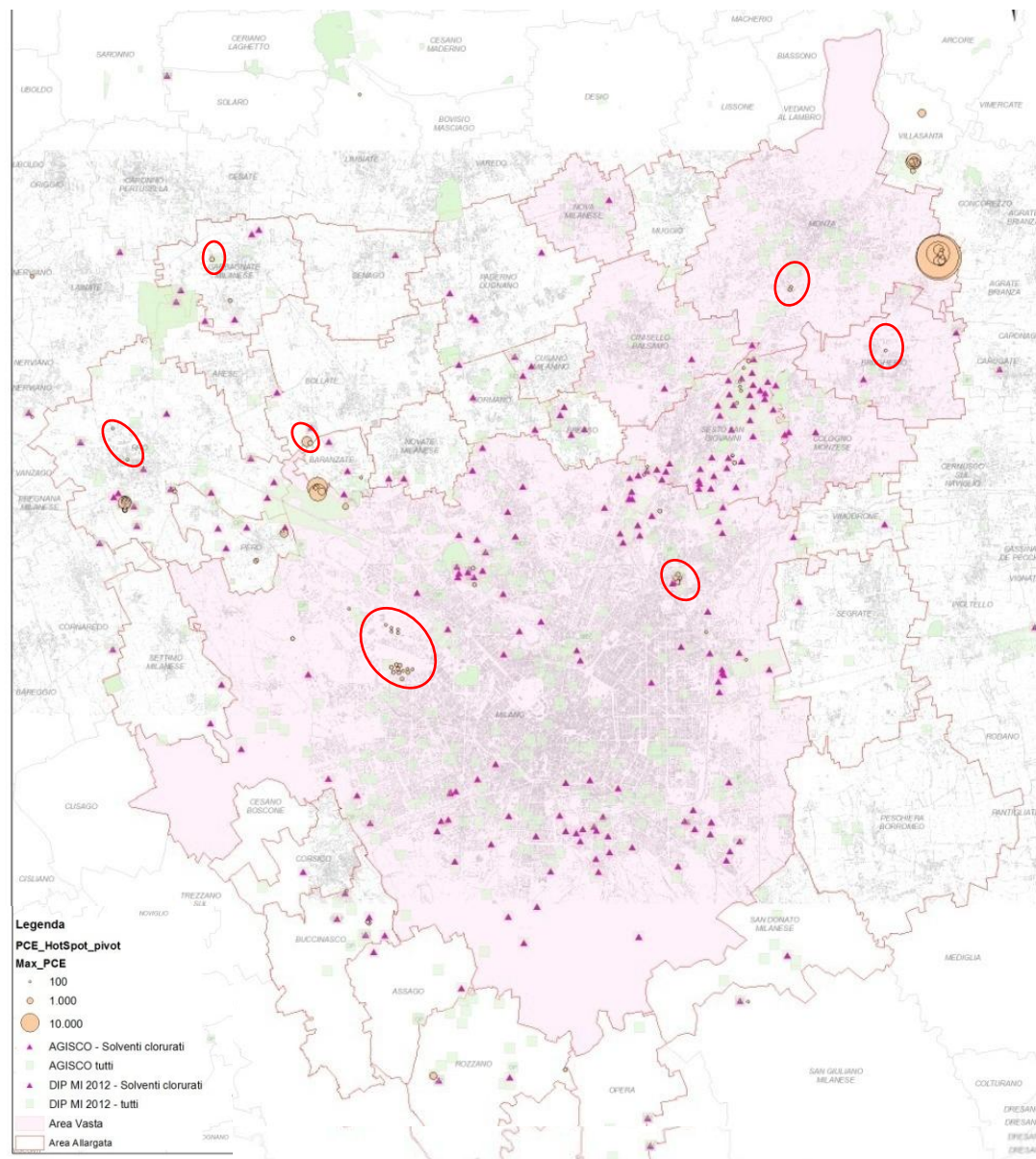




Analisi statistica: cluster analysis

Sovrapponendo le sorgenti note ai punti appartenenti ai cluster identificati come sorgenti puntuali, è stato possibile:

- analizzare le loro relazioni
- evidenziare inquinamenti puntuali non relazionati a sorgenti note
- evidenziare errori di analisi





Analisi statistica: fattoriale e delle componenti principali

Si tratta di uno strumento di Analisi Multivariata

Caratteristica comune di queste tecniche è quella di non fare alcuna distinzione a priori tra variabili dipendenti ed indipendenti, e di esaminarne la struttura delle relazioni reciproche, considerando tutte le variabili come un gruppo unico di soggetti.

L'analisi ha come obiettivo primario l'individuazione di **strutture "latenti"** tra le variabili e la riduzione dei fattori in gioco nella descrizione di un determinato fenomeno.

L'analisi consente di determinare una serie di combinazioni lineari del tipo:

$$F1 = w_{11}X_1 + w_{12}X_2 + \dots + w_{1k}X_k$$

$$F2 = w_{21}X_1 + w_{22}X_2 + \dots + w_{2k}X_k$$

w coefficienti fattoriali: scelti in modo da massimizzare la varianza spiegata da ciascuna relazione;

F fattori: che sono "ortogonali" ovvero non correlati fra loro.



Analisi statistica: fattoriale e delle componenti principali

Communalities

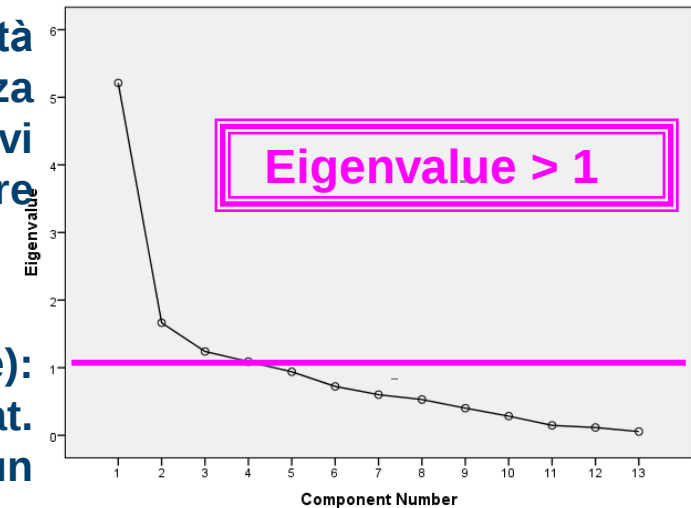
	Initial	Extraction
Ca_mean	1.000	.905
Cl_mean	1.000	.812
Conducib_mean	1.000	.938
Cr_tot_mean	1.000	.913
Mg_mean	1.000	.695
NO3_NUM_mean	1.000	.588
pH_mean	1.000	.660
K_mean	1.000	.513
Na_mean	1.000	.819
Solfati_mean	1.000	.772
PCE_mean	1.000	.745
TCE_mean	1.000	.819
TCM_mean	1.000	.966

Extraction Method: Principal Component Analysis.

Il vincolo dell'ortogonalità implica che la varianza spiegata dai fattori successivi al primo sia via via sempre minore.

Eigenvalue (autovalore): quantità di variabilità (stat. varianza) spiegata da ciascun fattore

Scree Plot



Total Variance Explained

Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings			Rotation Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	5.212	40.094	40.094	5.212	40.094	40.094	3.262	25.096	25.096
2	1.664	12.802	52.896	1.664	12.802	52.896	3.098	23.833	48.929
3	1.239	9.535	62.430	1.239	9.535	62.430	1.645	12.652	61.581
4	1.090	8.381	70.811	1.090	8.381	70.811	1.102	8.478	70.059
5	.939	7.226	78.037	.939	7.226	78.037	1.037	7.979	78.037
6	.723	5.563	83.601						
7	.601	4.622	88.222						
8	.529	4.068	92.291						
9	.402	3.089	95.380						
10	.284	2.181	97.561						
11	.146	1.126	98.687						
12	.116	.889	99.576						
13	.055	.424	100.000						

Extraction Method: Principal Component Analysis.



Analisi statistica: fattoriale e delle componenti principali

Rotated Component Matrix^a

	Component				
	1	2	3	4	5
Ca_mean	.462	.822	-.056	.116	.003
Cl_mean	.821	.345	.045	.077	.104
Conducib_mean	.675	.686	-.016	.105	.032
Cr_tot_mean	-.005	.043	.021	.954	-.005
Mg_mean	.219	.798	-.096	.035	-.005
NO3_NUM_mean	.366	.589	.089	.305	.080
pH_mean	.051	-.774	-.166	.147	.089
K_mean	.691	.142	-.077	-.042	-.088
Na_mean	.875	.002	.223	-.060	-.005
Solfati_mean	.695	.472	.160	.164	.120
PCE_mean	.071	.057	.842	.095	.133
TCE_mean	.075	.001	.896	-.062	-.085
TCM_mean	.013	-.030	.038	.000	.982

1. *Componente idrochimica-1* (Conducibilità K, Na, Cl, SO₄)
2. *Componente idrochimica-2* (Conducibilità, Ca, Mg, NO₃, pH);
3. *Componente inquinante PCE/TCE*
4. *Componente inquinante Cr-tot*
5. *Componente inquinante TCM*

Extraction Method: Principal Component Analysis.
Rotation Method: Varimax with Kaiser Normalization.

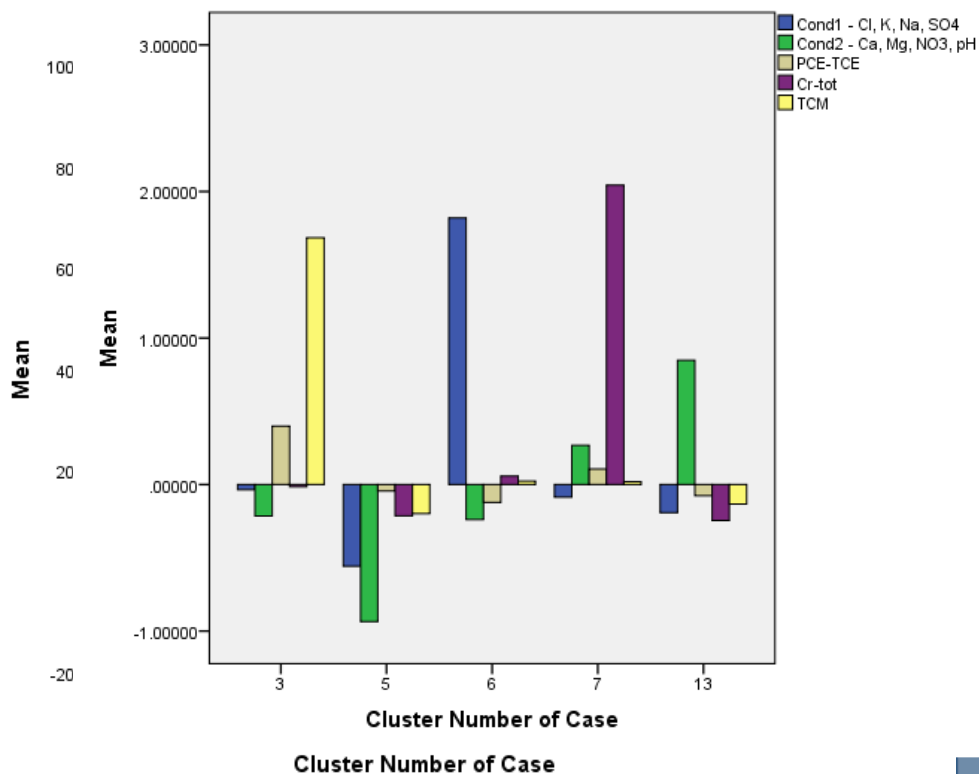
a. Rotation converged in 5 iterations.



Analisi statistica: analisi dei Cluster K-Means

Sulla base delle 5 componenti idrochimiche e inquinanti individuate in base all'Analisi Fattoriale verrà effettuata un'Analisi dei Cluster K-Means

- Centroidi iniziali: 15
- Metrica: Distanza Euclidea

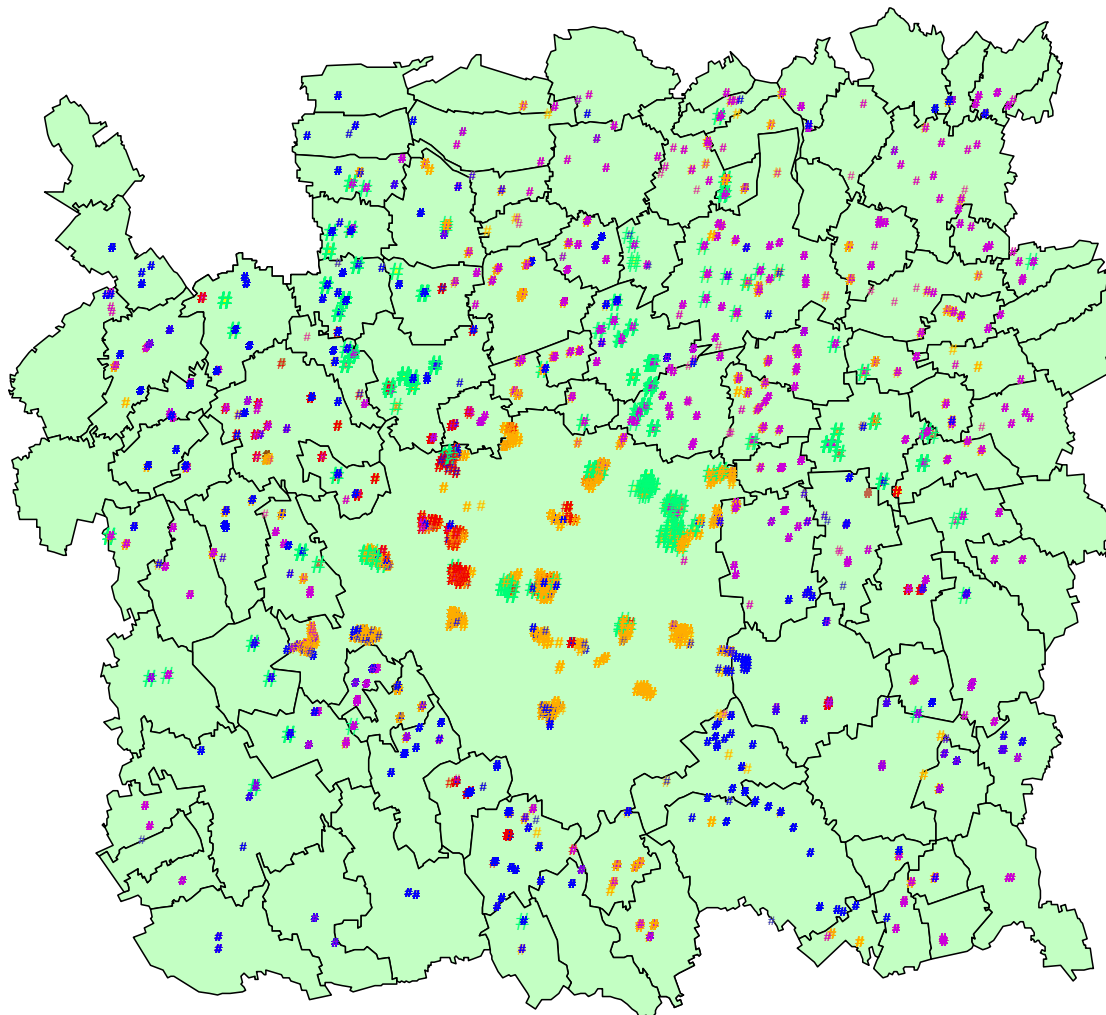


Number of Cases in each Cluster

Cluster	1	218
2	13	
3	1001	
4	1	
5	8613	
6	3902	
7	1358	
8	151	
9	19	
10	59	
11	3	
12	1	
13	10410	
14	2	
15	6	
Valid		25757
Missing		34015

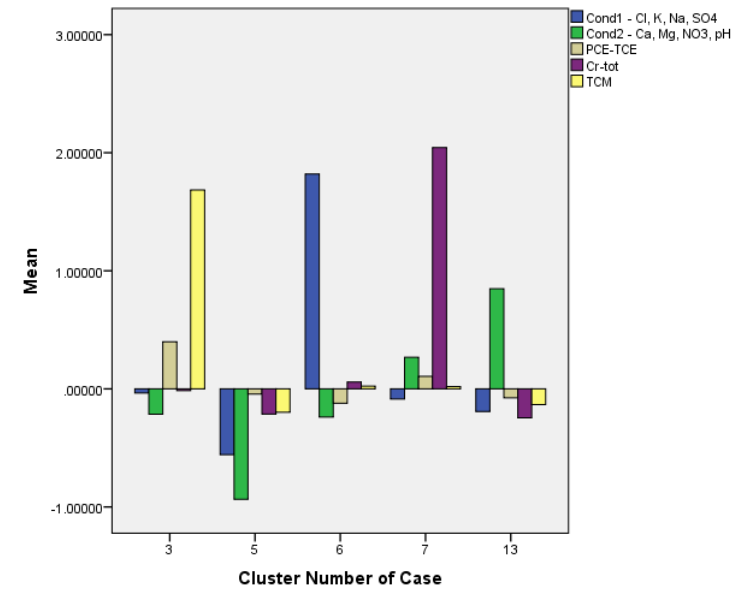


Analisi statistica: analisi dei Cluster K-Means



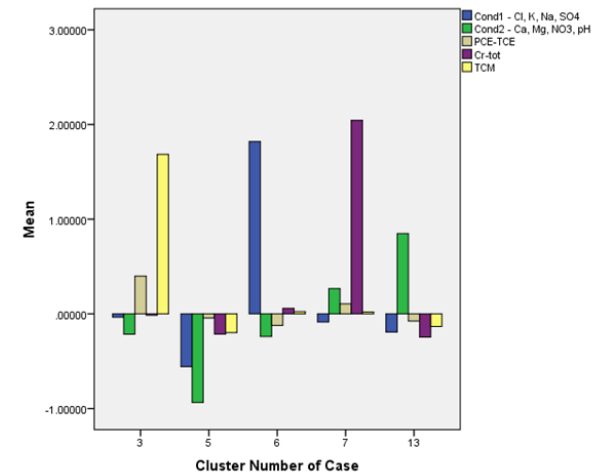
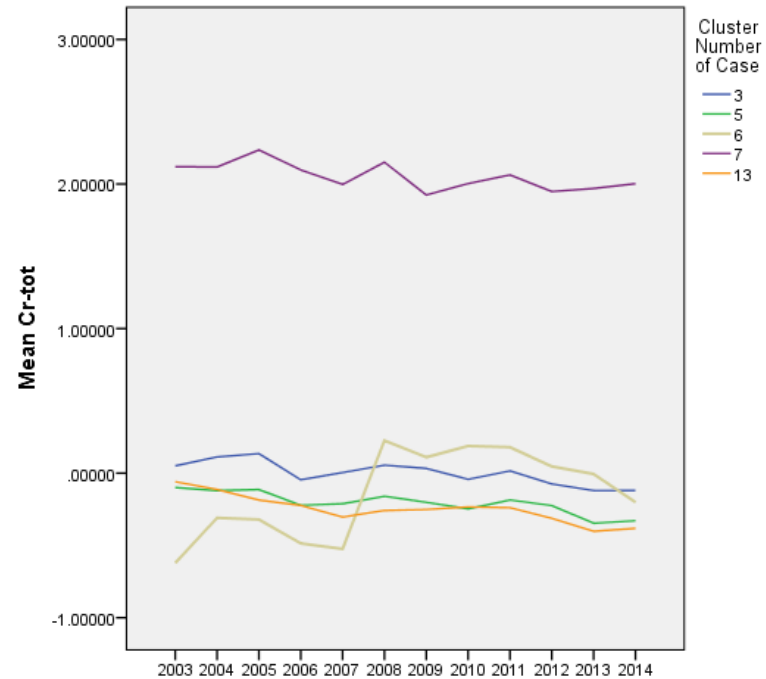
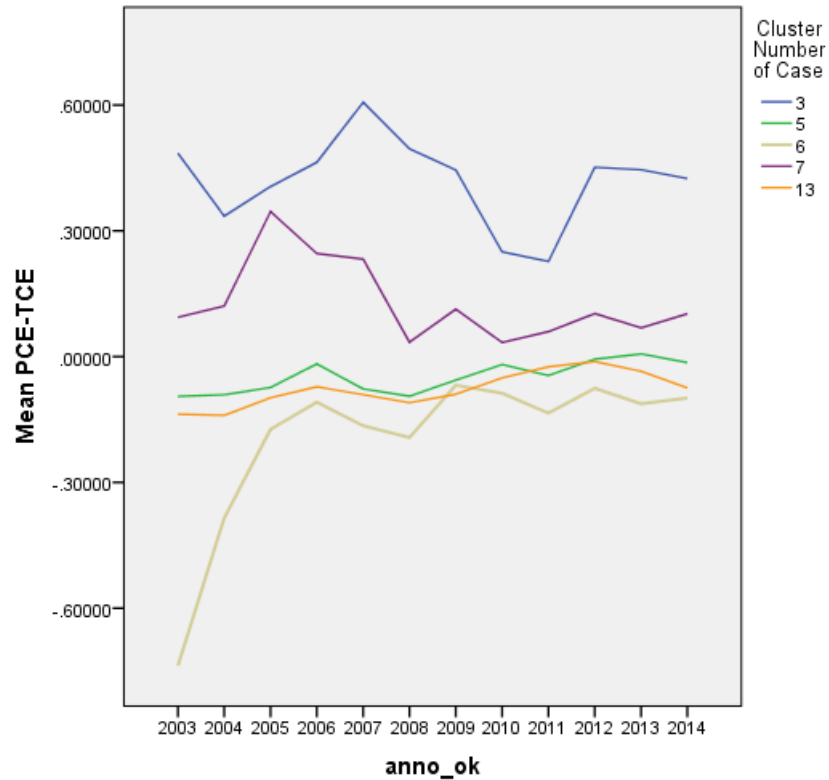
Cluster diffuso

- # 3
- # 5
- # 6
- # 7
- # 13





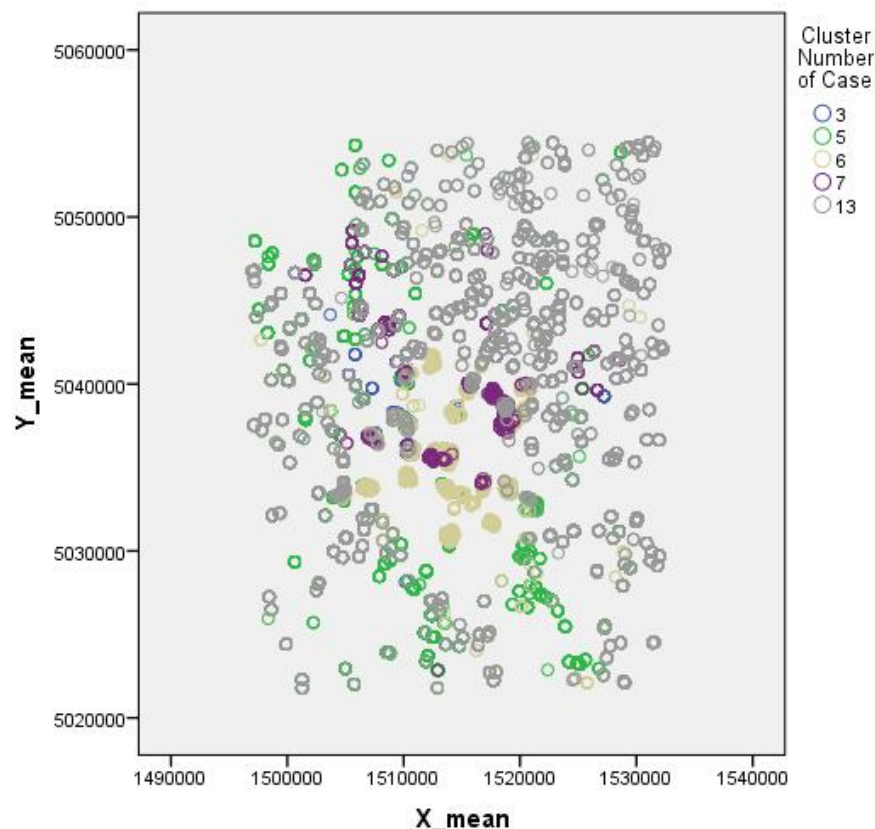
Analisi statistica: analisi dei Cluster K-Means





Analisi statistica: analisi dei Cluster K-Means

PCE



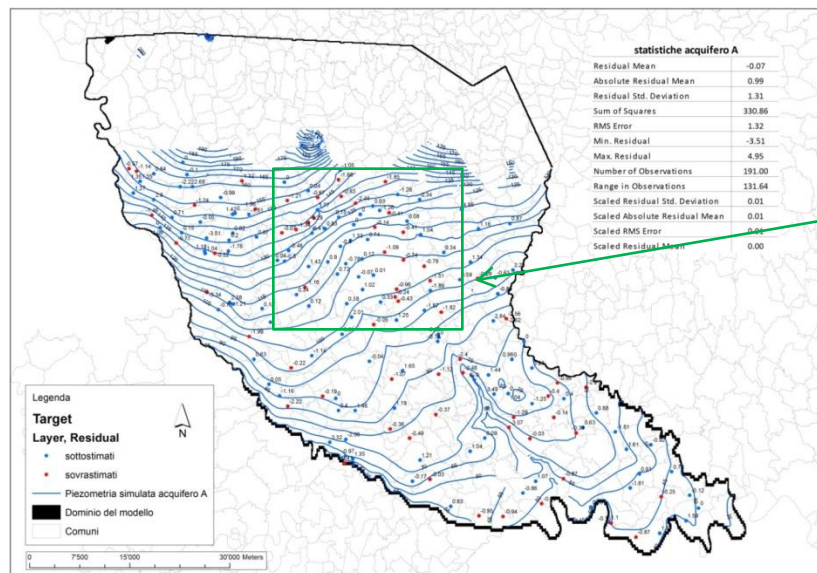
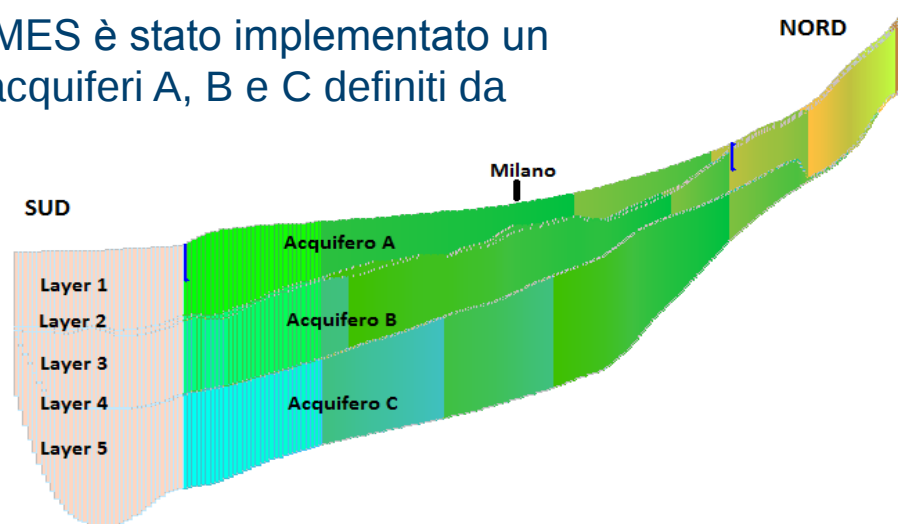
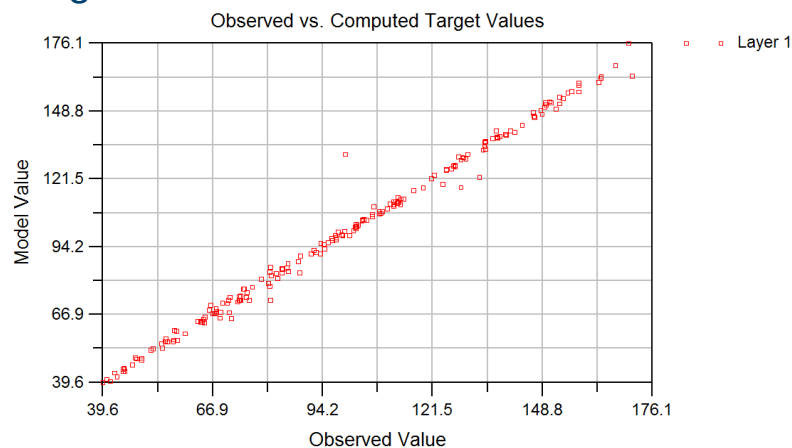
Report

Cluster Number of Case		Cr_tot_mean	Cr_VI_mean	PCE_mean	TCM_mean
3	Mean	3.3378	3.7624	28.9766	16.7703
	Median	2.5000	3.3800	13.0000	15.0000
	Minimum	.50	.37	.05	.50
	Maximum	18.00	19.16	290.00	40.00
	N	1001	515	1001	1001
	Std. Deviation	2.28985	2.42097	44.59481	8.04800
5	Mean	2.6439	2.9065	1.3319	1.0304
	Median	2.5000	2.6800	.5000	.5000
	Minimum	.20	.04	.01	.03
	Maximum	12.00	10.70	57.00	13.00
	N	8613	772	8613	8613
	Std. Deviation	.95877	1.81169	2.65982	1.74288
6	Mean	3.8947	4.6777	8.7230	2.6667
	Median	3.0000	4.0000	6.0000	1.0000
	Minimum	.25	.15	.02	.03
	Maximum	38.00	38.00	145.60	63.00
	N	3902	2807	3902	3902
	Std. Deviation	2.72391	2.93291	8.91305	3.70587
7	Mean	13.6641	12.9213	13.9712	2.6407
	Median	13.0000	12.1300	9.0000	1.0000
	Minimum	2.50	1.00	.07	.05
	Maximum	34.00	32.51	280.00	31.00
	N	1358	438	1358	1358
	Std. Deviation	5.02291	4.47179	21.56786	3.61337
13	Mean	2.7883	2.9111	3.9801	1.0503
	Median	2.5000	2.5400	2.0000	.5000
	Minimum	.25	.01	.03	.01
	Maximum	13.00	10.53	164.00	17.00
	N	10410	373	10410	10410
	Std. Deviation	1.23602	2.12282	7.33636	1.51068
Total	Mean	3.5158	4.9046	5.3362	2.0007
	Median	2.5000	3.8300	2.0000	.5000
	Minimum	.20	.01	.01	.01
	Maximum	38.00	38.00	290.00	63.00
	N	25284	4905	25284	25284
	Std. Deviation	3.11134	3.87470	13.21255	4.09580

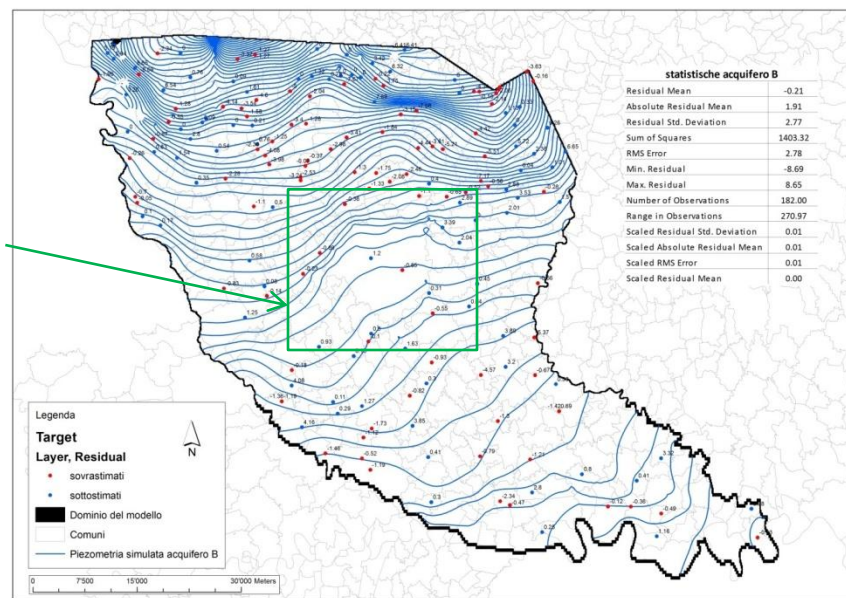


Modellazione del flusso- bacino sotterraneo Ticino-Adda

Contemporaneamente nell'ambito del progetto PLUMES è stato implementato un modello di flusso per il bacino Ticino-Adda per i tre acquiferi A, B e C definiti da ENI-Regione Lomb.



Milano FUA





Modellazione del flusso - Discretizzazione

Dal modello di bacino è stato estratto un modello locale mediante TMR per gli acquiferi A e B dell'area allargata di Milano

Discretizzazione del dominio

Griglia orientata in direzione Nord – Sud

Superficie complessiva: circa $1,1 \cdot 10^3 \text{ km}^2$

Dimensioni E-O: 34 km

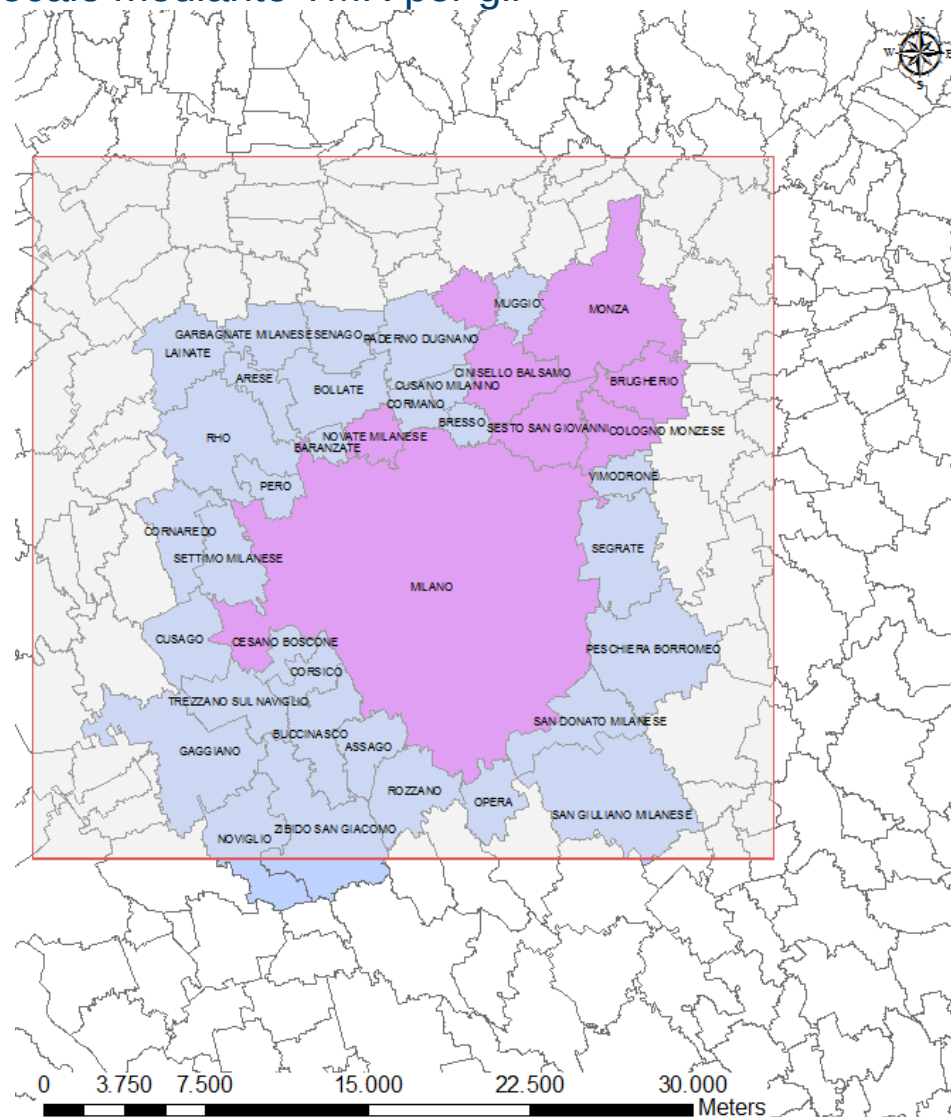
Dimensioni N-S: 32,5 km

Dimensioni celle:

- 20 x 20 m

- Totale: 1625 righe x 1725 colonne

Totale celle attive: 7.215.021





Modellazione del flusso- Struttura idrogeologica

Dal modello di bacino è stato estratto un modello locale mediante TMR per gli acquiferi A e B dell'area allargata di Milano

Discretizzazione del dominio

Superficie complessiva: circa 1100 km²

Dimensioni E-O: 34 km

Dimensioni N-S: 32,5 km

Dimensioni celle:

- 20 x 20 m

- Totale: 1625 righe x 1725 colonne

Totale celle attive: 7.215.021

220 m s.l.m.

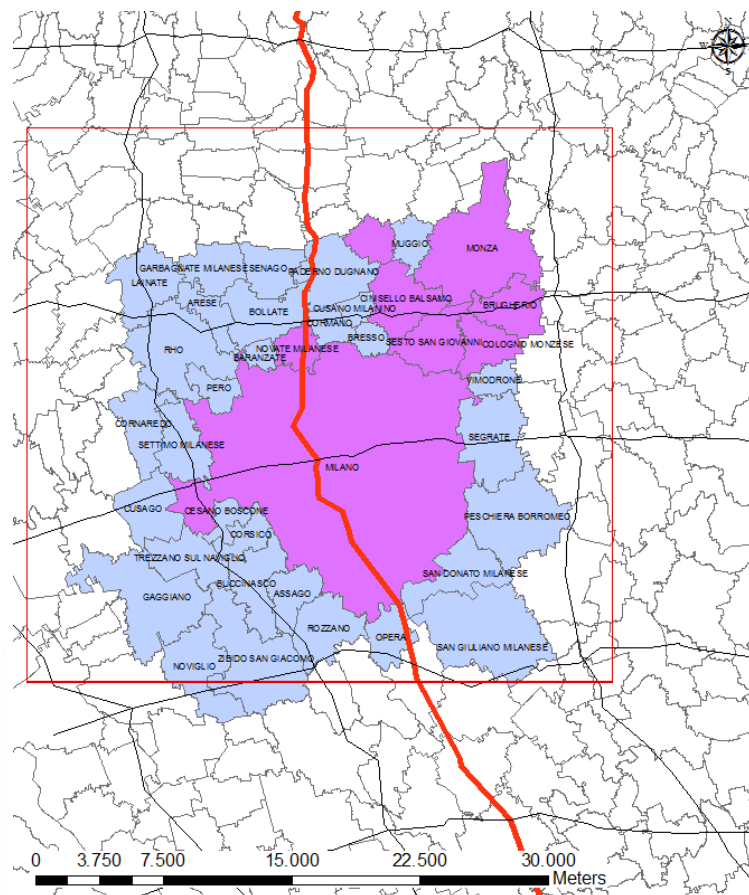
162 m s.l.m.

Discretizzazione verticale

Milano

Discretizzazione verticale del dominio in 3 layers (acquiferi A e B)

-67 m s.l.m.



Layer 1 (Acquifero A)

Layer 2 (Aquitard)

Layer 3 (Acquifero B)



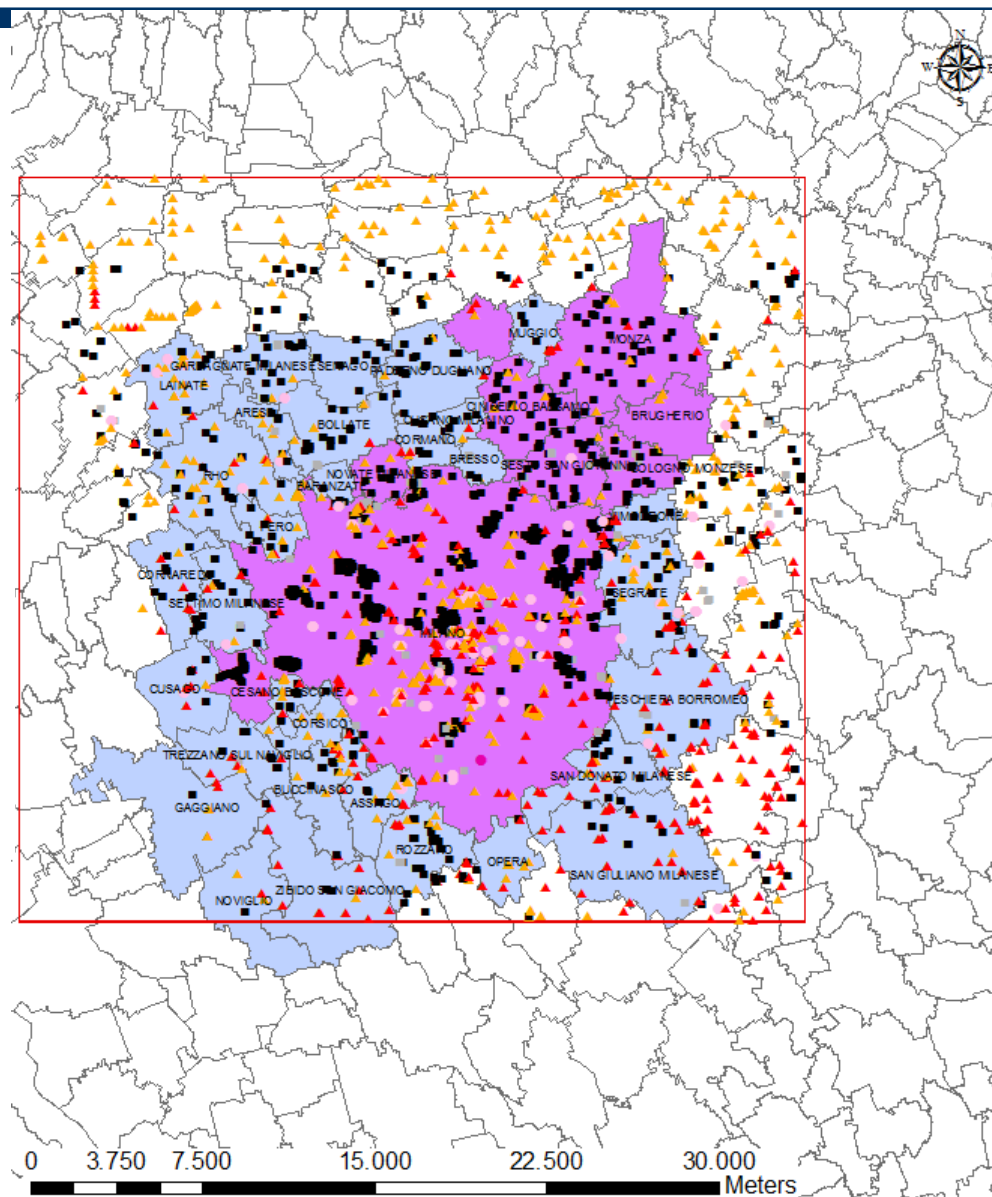
Modellazione del flusso- Prelievi idrici

Prelievi da pozzi/piezometri pubblici e privati (SIF,CUI,MM)

Totale 2195 pozzi/piezometri

Legenda

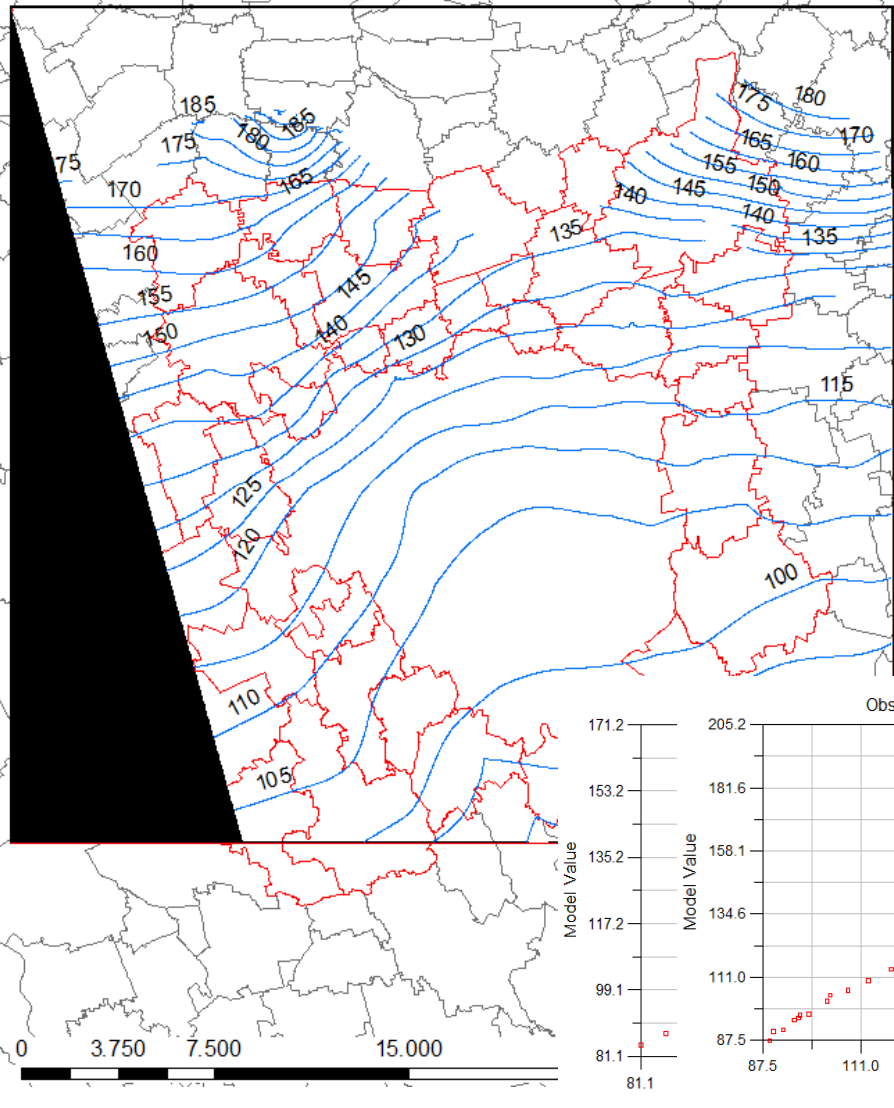
- # Layer 1 (406)
- ! Layer 1-2 (94)
- # Layer 1-3 (637)
- ! Layer 2 (1)
- " Layer 2-3 (76)
- " Layer 3 (981)
- █ Dominio_Modello
- ▭ Area_Allargata



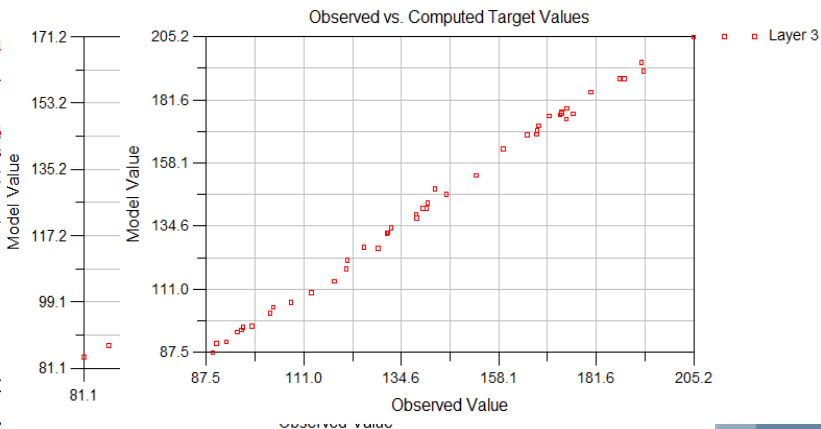
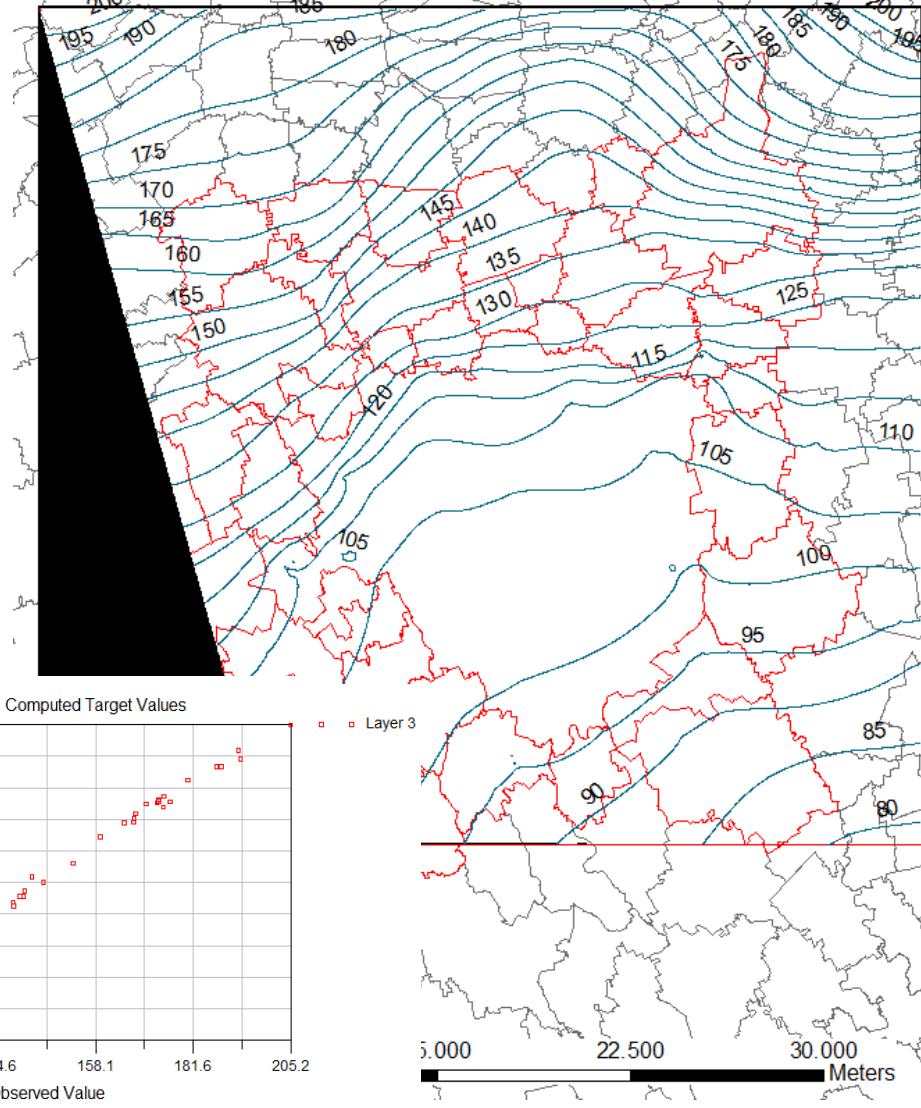


Modellazione del flusso- Piezometria

Piezometria Calibrata Layer 1



Piezometria Calibrata Layer 3

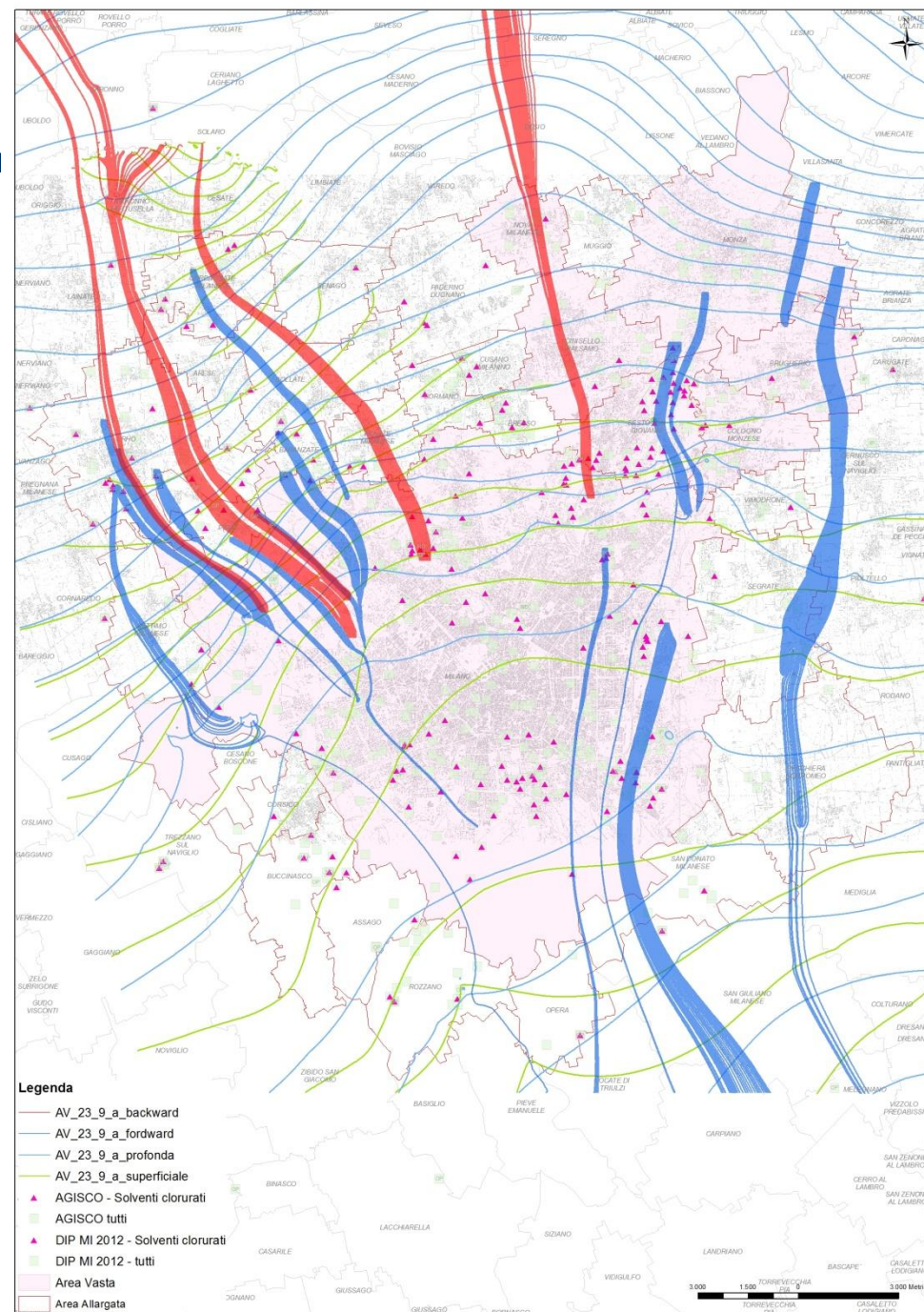




Modellazione del flusso

Sulla base del modello di flusso calibrato si è effettuato un tracciamento delle particelle (trasporto advettivo) a partire dagli hot spot individuati nell'ambito della cluster analysis

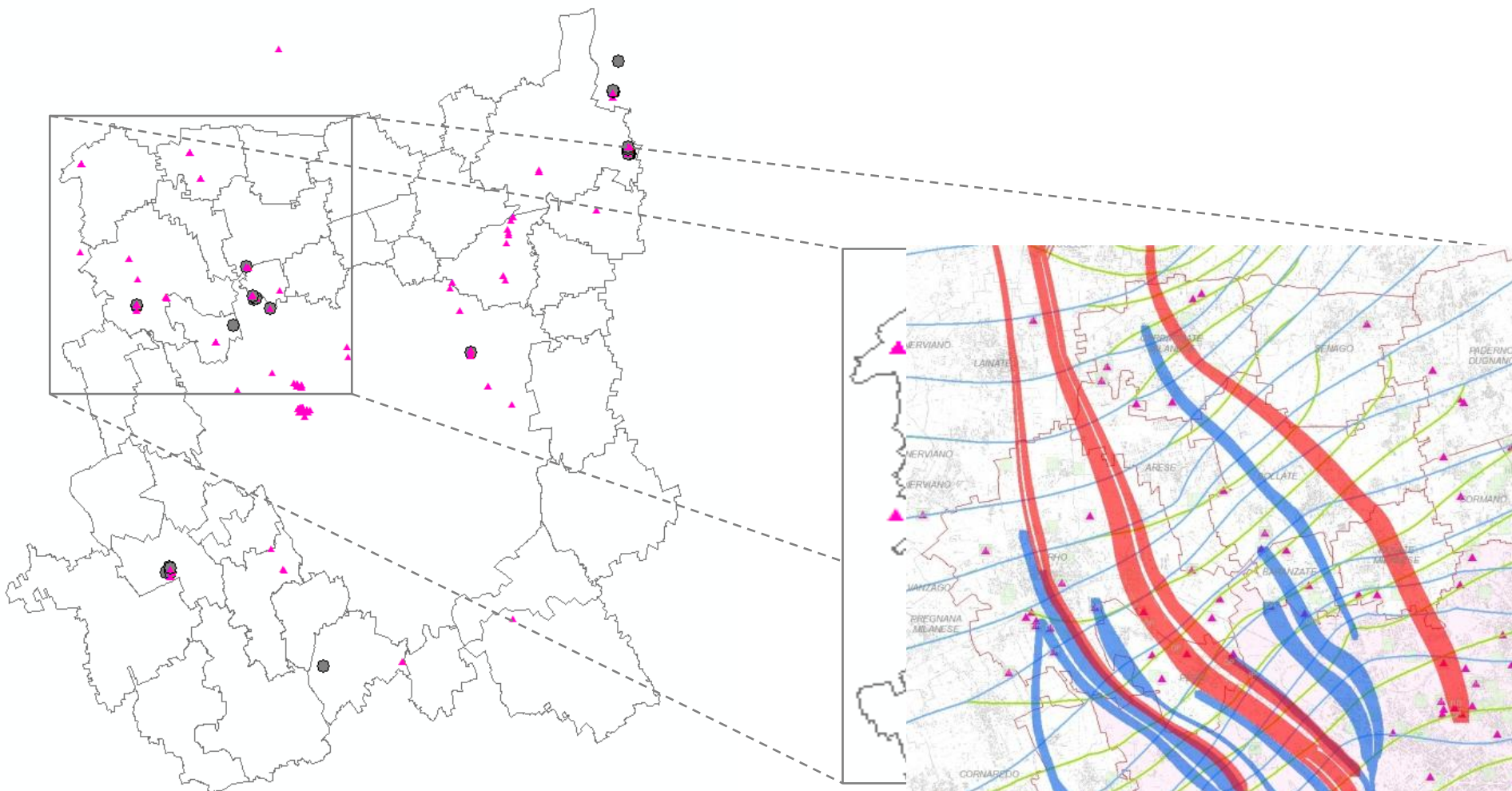
In tal modo è possibile avere una prima valutazione delle aree potenzialmente impattate dai relativi plumes e definire un ordine di priorità tra le sorgenti





Modellazione matematica: modello di trasporto

Possiamo qui vedere un primo esempio di applicazione nel settore NW dell'area di studio già oggetto di modellazione di dettaglio del progetto PLUME. Nell'area sono stati individuati punti appartenenti ad un cluster con valore medio di PCE pari a circa $200 \mu\text{g/l}$.

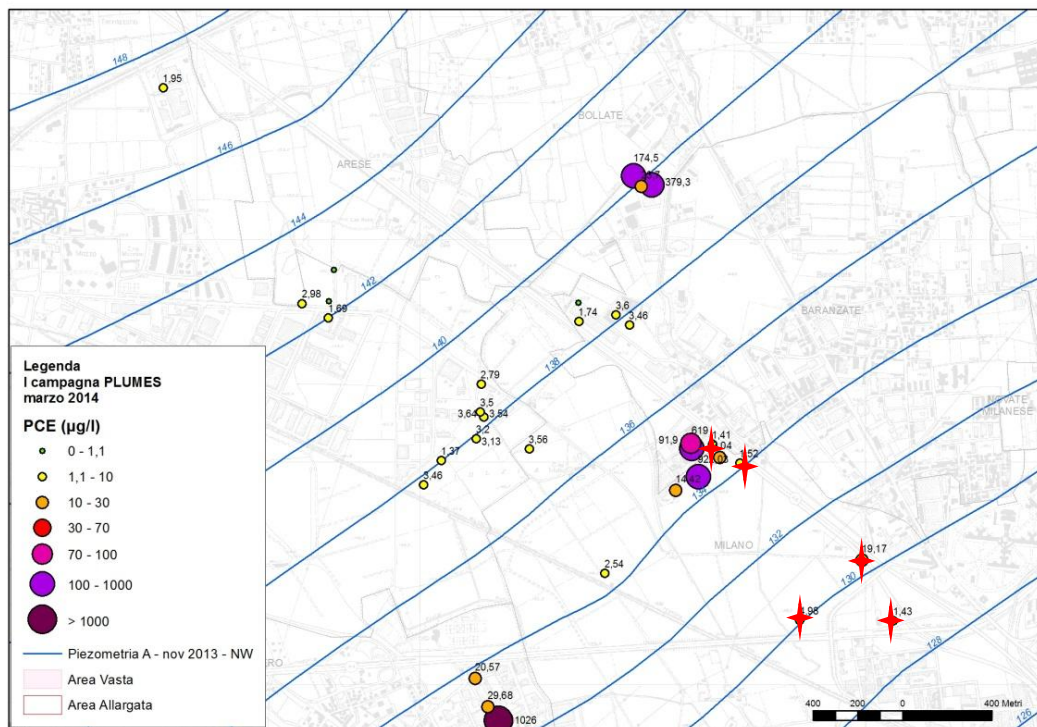




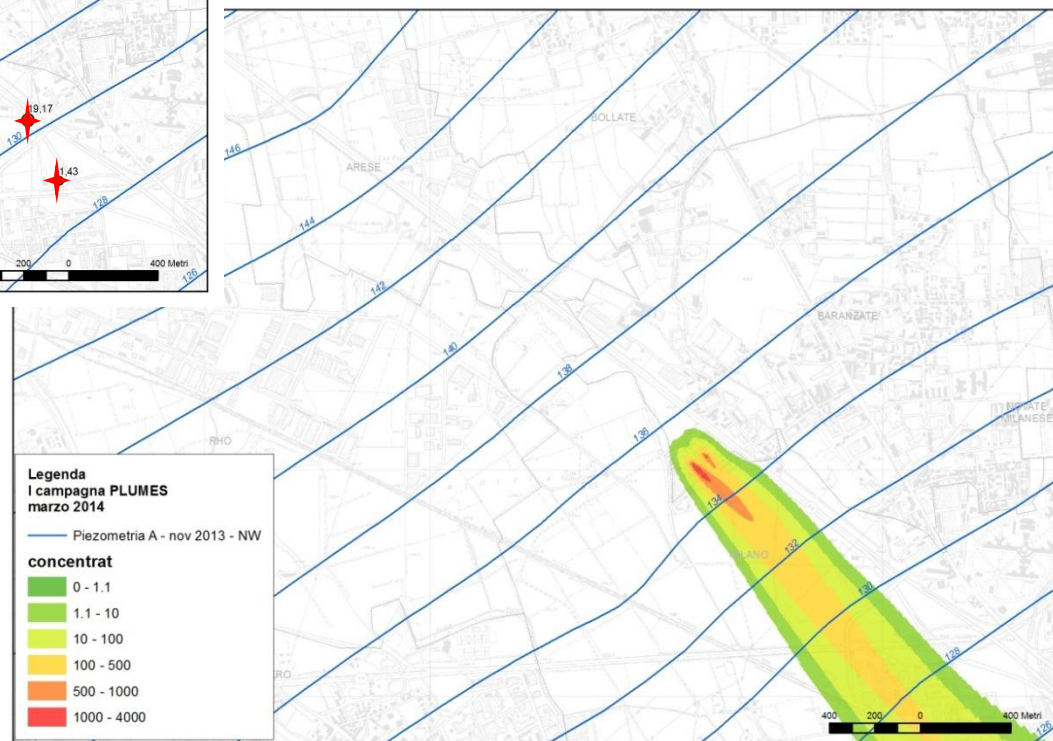
Modellazione matematica: modello di trasporto

Un modello di trasporto con 2 sorgenti è stato implementato e tarato.

Il risultato ha mostrato, per il PCE, un plume simulato con lunghezza di circa 2 km



Pertanto solo i piezometri posti al di fuori dell'areale colpito dal plume verranno utilizzati per definire i valori di inquinamento diffuso multi-puntuale (media 3 µg/l)

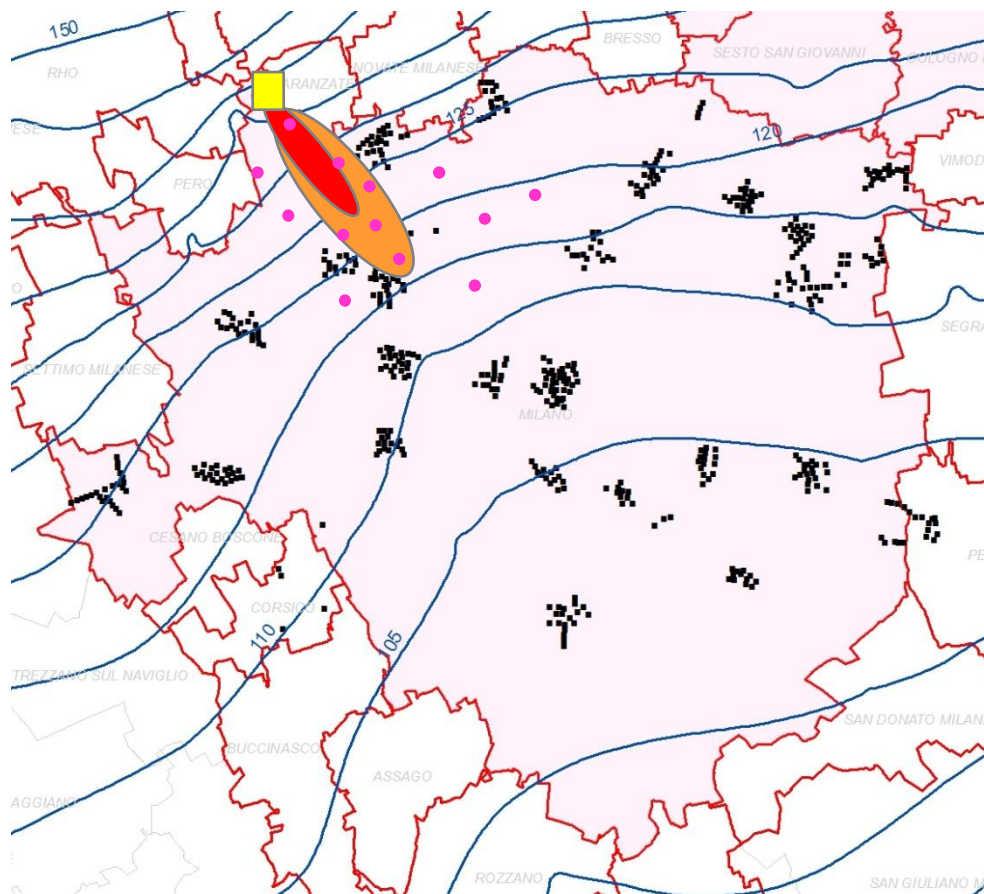




Modellazione matematica: modello di trasporto

Riassumendo, la procedura per la definizione delle concentrazioni dell'inquinamento diffuso multi-puntuale può sinteticamente essere riassunta nelle seguenti fasi:

- Analisi statistica per associare punti di monitoraggio ad una specifica sorgente
- Modellazione di trasporto per la definizione dell'estensione del plume e dei pozzi coinvolti
- Esclusione dei punti coinvolti nel plume dalla lista dei punti utili alla definizione della distribuzione dell'inquinamento diffuso multi-puntuale
- Analisi statistica per la definizione dei valori di inquinamento diffuso e individuazione dei cluster che vi appartengono
- Supporto a Reg. Lombardia per la definizione del valore di inquinamento diffuso nell'area vasta





CONCLUSIONI

Dopo oltre 20 anni di indagini e azioni di bonifica risulta sempre più evidente che nelle aree urbanizzate ed in tempi ragionevoli nessuna tecnologia sarà in grado di raggiungere i valori limite di legge previsti dal Dlgs 152/06 che sono dell'ordine di (0,1-5 $\mu\text{g/l}$).

Per Milano e il suo hinterland una delle principali sfide sulla qualità dell'ambiente sarà quella di gestire al meglio nei prossimi due decenni i valori di solventi clorurati e CrVI di poco superiori ai limiti attuali

Il progetto che Regione Lombardia, ARPA e Politecnico hanno avviato mira a individuare strategie di gestione supportate dalla modellazione matematica e dall'analisi statistica al fine di:

- Proporre una metodologia per distinguere l'inquinamento puntuale da quello diffuso multi-puntuale
- Individuare strategie alternative per affrontare i plume maggiori che interessano l'area allargata
- Scegliere un criterio di priorità per allocare le risorse economiche pubbliche al fine da ottenere un miglioramento ambientale nei tempi più stretti possibili
- Prevedere tramite la modellazione matematica l'evoluzione dello stato qualitativo e gli effetti indotti dalle diverse alternative di intervento

D.I.C.A. – Dipartimento di Ingegneria Civile Ambientale



www.dica.polimi.it



<http://hydroinformatics.polimi.it/>