Identificazione e monitoraggio delle aree contaminate da diverse fonti di inquinamento

A cura di V. Francani e C. Rampolla
vincenzo.francani@polimi.it

Premessa

Nelle aree industrializzate riconosciamo contaminazioni delle acque sotterranee ereditate dal passato industriale del secolo scorso,in cui motivi storici ed economici spingevano per un uso indiscriminato del territorio, e altre che si sono determinate dal 2000 in poi essenzialmente, quando la cultura ambientale si è estesa ed è stata in grado di utilizzare appieno i mezzi messi a punto dalle normative progressivamente predisposte per ridurre le contaminazioni a casi isolati e in buona parte accidentali.

L'eredità del secolo industriale è molto pesante e si traduce ancora in inquinamenti concentrati in forma di pennacchi talora sovrapposti e con elevata variabilità della distribuzione delle concentrazioni, e in inquinamenti diffusi, caratterizzati da basse concentrazioni e prodotti da sorgenti multiple spesso non identificabili

Le aree colpite da queste forme di inquinamento interessano anche oltre il 50% dei maggiori centri urbani e tendono a coinvolgere progressivamente le risorse idriche più pregiate, che si localizzano negli acquiferi profondi.

Le forme di contaminazione attuali sono generate in molti casi dalle lavorazioni di prodotti che fino al secolo scorso non erano considerate pericolose, ma che tali si sono rivelati in seguito a studi chimici, biochimici ed epidemiologici di dettaglio.

In alcuni casi le misure di prevenzione sono state per vari motivi adottate solo di recente, e si sono per questo rivelate al momento insufficienti di fronte all'estensione e alla gravità delle contaminazioni.

Risulta quindi utile compiere una anche breve disamina delle tecniche idrogeologiche di studio e di prevenzione, estendendola a una significativa porzione della pianura padana, per valutare la possibilità di una loro integrazione in modo da favorirne l'efficacia ai fini della prevenzione e del contenimento.

Le fasi evolutive delle tecniche di studio degli inquinamenti

Nel tempo sono state sviluppate pregevoli sintesi, per lo più racchiuse in testi didattici rivolti anche ai tecnici del settore, sulle modalità di propagazione degli inquinamenti.

Dai testi generali di Schoeller (1965) e Castany (1963)e Custodio & Llamas (1976), che descrivono la classificazione delle contaminazioni distinguendo soprattutto quelle naturali da quelle antropiche, si ricava che la cartografia della distribuzione delle concentrazioni dei contaminanti che rispecchia la ripartizione delle aree a diverso grado di inquinamento, permette di identificare le sorgenti e il percorso degli inquinanti.

Gli Autori mostravano significativi esempi di come fosse possibile definire, sovrapponendo le carte piezometriche che rappresentano le direzioni di flusso della falda a quelle delle concentrazioni della sostanza inquinante, le aree sorgenti che hanno le maggiori concentrazioni e si trovano localizzate alle quote piezometriche maggiori.

In base alla direzione di flusso fornite dalla cartografia piezometrica, risultano evidenti quali sono le zone verso le quali la contaminazione è destinata a propagarsi e che risultano quindi vulnerabili all'inquinamento.

Negli anni '80 e '90 si sono sviluppate le metodologie di studio della propagazione degli inquinamenti, come imposto dalle normative ambientali progressivamente adottate, e questa attività ha portato all'applicazione di tecniche idrologiche (Domenico e Schwartz, 1990; Kinzelbach, 1986) e all'introduzione di applicazioni della modellistica matematica a ricostruzioni anche di buon dettaglio della struttura idrogeologica

In queste analisi, la sovrapposizione della cartografia idrochimica e di quella idrogeologica avviene con i medesimi criteri delineati negli anni '60-'70 dagli autori nominati, e la modellazione matematica provvede a identificare i tempi della propagazione dei pennacchi di inquinamenti concentrati derivanti dalla fonti individuate con queste tecniche.

Anche gli inquinamenti regionali, come quelli provenienti da i nitrati smaltiti dalle lavorazioni conciarie o messi in circolo dalle perdite di discariche e impianti di smaltimento, vengono sottoposti a modellazione matematica portando a esemplari contributi nella loro ricostruzione (G. P. Beretta, 1992).

La produzione di testi nazionali contenenti validi esempi di indirizzo per i tecnici del settore è segnata in particolare dai lavori di P. Celico (1988) e M. Civita (1995 e 2005).

Questi contributi mettono a disposizione degli operatori le conoscenze applicabili per far fronte allo stato dell'inquinamento prodotto dagli insediamenti industriali almeno fino al 1970, ma in alcuni casi anche ben oltre questo termine. Le normative tengono conto del buon grado di efficacia di questo tipo di analisi e si evidenzia la necessità di affrontare con sempre maggiore dettaglio lo studio delle contaminazioni non solo ai fini della prevenzione, ma anche a quelli dell'individuazione delle responsabilità degli inquinamenti pregressi la loro origine e cause.

L'insorgere di queste nuove finalità ha posto in evidenza la necessità di introdurre variazioni nell'approccio teorico al problema dell'individuazione delle fonti, ad esempio prendendo in attenta considerazione anche gli inquinamenti diffusi che comportano un rilevante peggioramento della qualità delle acque ; le nuove tecniche poste in atto oggi permettono di sviluppare un'oggettiva e promettente analisi anche della dinamica evolutiva degli inquinamenti.

A questi scopi si è resa evidente la necessità di stabilire criteri che permettessero la distinzione fra inquinamenti in fase di espansione (progressivo aumento dell'area interessata e delle concentrazioni a valle della fonte), stazionari (mantenimento delle concentrazioni su tutta l'area) e in esaurimento (riduzione su una buona parte dei punti di controllo delle concentrazioni, frammentazione dei pennacchi).

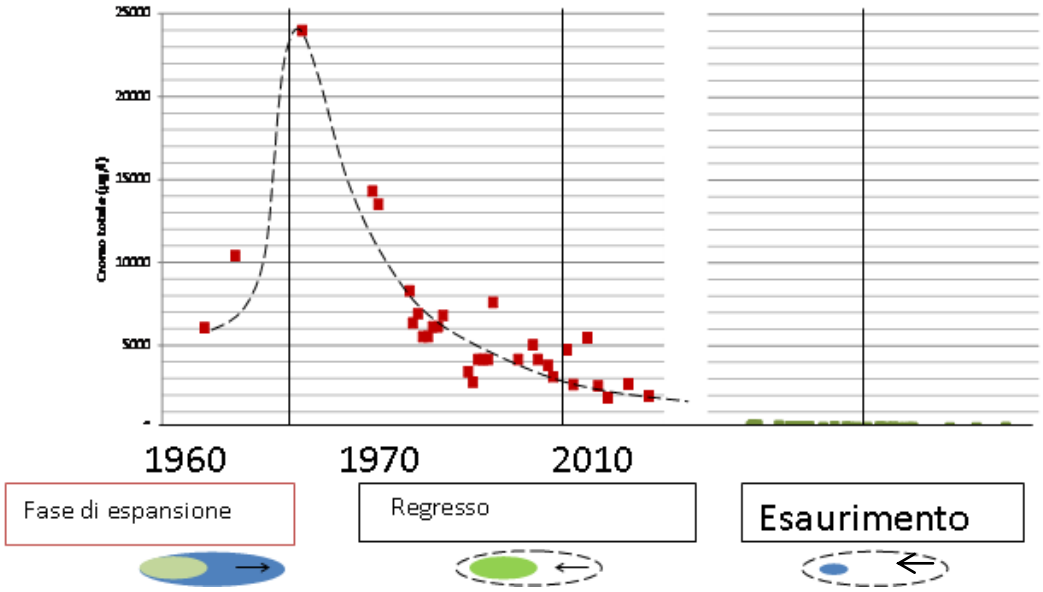


Figura 1 Evoluzione della contaminazione di un pozzo da Arsenico dal 1960 a oggi

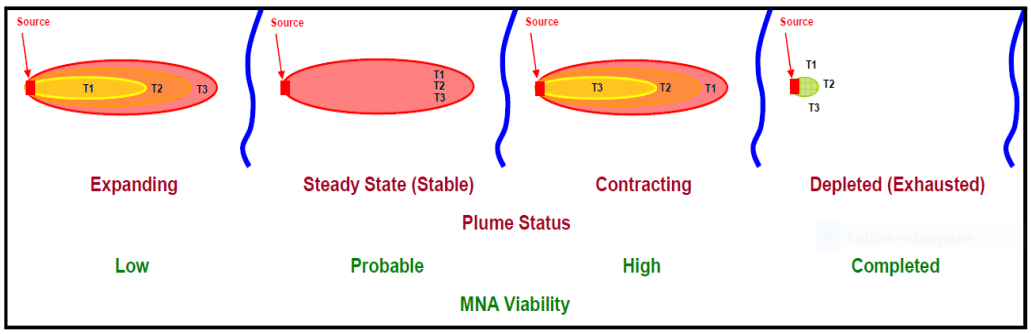


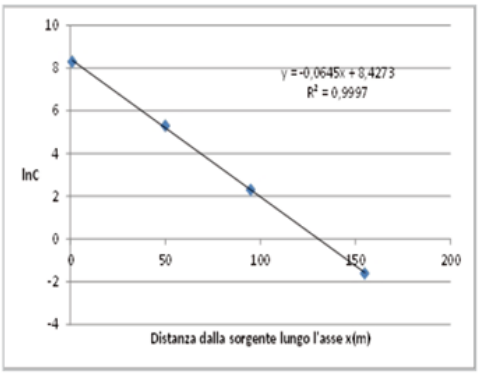
Figura 2 Stato di contaminazione secondo OK EA e Washington State Department of Ecology (2005)

Per valutare se gli inquinamenti sono in fase di espansione e quindi più degli altri pericolosi, insieme alle note relazioni d Domenico e Schwartz (1990) si vennero a impiegare metodi anche piu' semplici. Tra questi ad esempio la valutazione dei gradienti di concentrazione nel tempo dC/dt, e con la distanza dC/dx, al fine di determinare la massima distanza x alla quale le contaminazione è pervenuta al tempo t e prevederne il tempo di esaurimento nei singoli piezometri.

Il risultato si ottiene disponendo in grafici semilogaritmici il Logaritmo naturale delle concentrazioni C a diverse distanze dalla fonte o in tempi successivi (da Washington State Department of Ecology Toxics Cleanup Program (2005).

Tali metodi sono di interesse pratico, ma non sono sempre adattabili ai casi reali, ad esempio quando la falda subisce variazioni della piezometria nel corso delle stagioni. In figura 3 si dà una sintetica rappresentazione di questi calcoli.

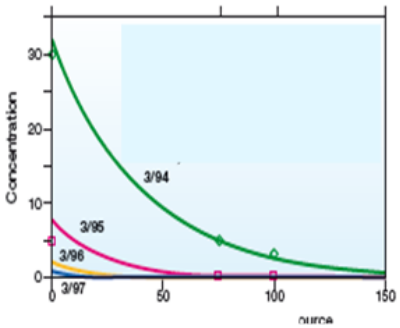
Grafico semi-logaritmico distanza concentrazione



Concentrazione del benzene in funzione della distanza dalla sorgente lungo una direzione preferenziale.

Distanza dalla sorgente lungo l'asse *x* (m)	Concentrazione del benzene C (µg/l)	lnC
1	4000	8,29405
50	200	5,298371
95	10	2,302585
155	0,20	–1,60944

Concentrazione/distanza fra piezometri



C nel tempo in diversi piezometri

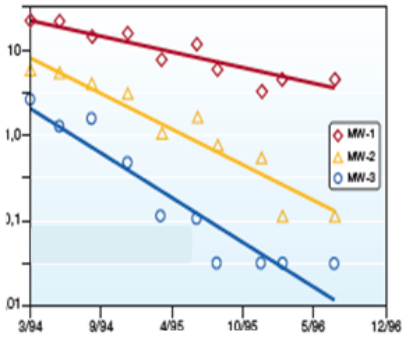


Fig. 3 - relazioni (grafici semologaritmici) che permettono di valutare la riduzione di concentrazione nel tempo in una singola stazione di misura (parte alta) e nello spazio lungo l'asse del pennacchio di inquinamento (parte inferiore). [da Wash. State Depart.of Ecology Toxics Cleanup Program (2005)].

Nel caso di variazioni delle concentrazioni legate alla ricarica della falda, le possibilità di applicare queste relazioni a casi pratici sono in realtà molto poche ; le soluzioni indicate dalla letteratura sono state quindi orientate verso l'impiego di metodi statistici, fra i quali un esempio chiaro è presentato da Accoto,Bullo e al. (2016) che, nel caso di una falda freatica nella Pianura Veneta, stabiliscono tramite soprattutto la cross-correlation il legame fra episodi di pioggia e aumenti episodici di concentrazione di CrVI in falda, evidenziando estensione e caratteristiche sia della fonte sia della contaminazione da essa prodotta.

Si è reso quindi gradualmente evidente che solo operando un ulteriore approfondimento di queste tecniche, si potevano ottenere risultati adeguati alle esigenze della prevenzione. Una serie di studi concentrati sulle aree industrializzate nello scorso secolo, ha permesso di arrivare a un deciso miglioramento delle conoscenze sugli inquinamenti diffusi, in passato trascurati nonostante il deciso degrado da essi derivante, e sviluppano un'oggettiva e promettente analisi delle possibilità di reperire le fonti dell'inquinamento, indispensabile premessa per il recupero qualitativo.

Possiamo citare infatti i contributi che, con l'apporto degli Enti preposti (ARPA,Regioni), provengono da questa ricerca (es. per la Lombardia da A. Azzellino, L. Alberti, L. Colombo,2019), che sovrappone l'analisi statistica alla modellazione matematica. La simulazione compiuta tramite modello riproduce le variazioni della piezometria nell'arco di tempo durante il quale gli inquinamenti si sono evoluti, chiarendo l'effetto delle variazioni piezometriche sulla velocità e la distribuzione delle concentrazioni nel tempo.

Successivamente, eseguendo la ricostruzione del backward particle – tracking si individuano le vie percorse preferenzialmente dai contaminanti tenendo conto delle variazioni della piezometria nel tempo.

L'applicazione di un'evoluta statistica permette agli Autori di stabilire con grande affidabilità le aree di provenienza degli inquinamenti sia concentrati sia diffusi.

I risultati di questi studi, adottati per il Milanese, possono essere estesi ad altre zone della Pianura Padana e fornire un dettaglio sufficiente per affrontare il problema dell'origine degli inquinamenti e del loro controllo.

Possibili integrazioni delle tecniche tradizionali di cartografia idrochimica

Per adattare la cartografia idrochimica alla nuova visione dell'analisi delle contaminazioni, che ne considera soprattutto l'evoluzione nel lungo periodo anche in funzione predittiva, appaiono quindi necessarie alcune integrazioni, pur mantenendone l'impiego come base di partenza indispensabile. La cartografia idrochimica ha rivestito sempre una fondamentale importanza nella costruzione del modello concettuale degli inquinamenti, cioè della struttura idrogeologica e delle modalità di propagazione dei contaminanti al suo interno a partire dalle fonti, naturali o antropiche che siano.

Come noto, le cartografie tradizionali si traducono essenzialmente in rappresentazioni della distribuzione della qualità delle acque su dati raccolti entro brevi intervalli di tempo, e sono valide come attestazione del chimismo per tali ridotti periodi, ma non consentono altro che confronti ed elaborazioni deduttive immediate, insufficienti per avere una percezione quantitativa delle modalità evolutive degli inquinamenti.

L'approccio "dinamico" utilizzato per lo studio degli inquinamenti negli studi più recenti richiede soprattutto l'individuazione dell'entità e la tipologia dei cambiamenti che incorrono nel tempo, e possibilmente una ricostruzione dei motivi che portano a tali variazioni. Un tentativo di adattare la metodologia del supporto idrochimico allo studio delle contaminazioni è stato fatto per gli inquinamenti cosiddetti secondari (Francani e al.,2019), che esprime i principi sui quali la presente ricerca è stata compiuta. Alcuni esempi rendono più chiara l'opportunità di affiancare tecniche tradizionali e supporti integrativi.

a) Esempi dei risultati dell'applicazione delle tecniche tradizionali

Nelle figure seguenti sono riportate per un medesimo sito alcune cartografie idrochimiche eseguite per rappresentare le condizioni di brevi intervalli di tempo di una medesima località.

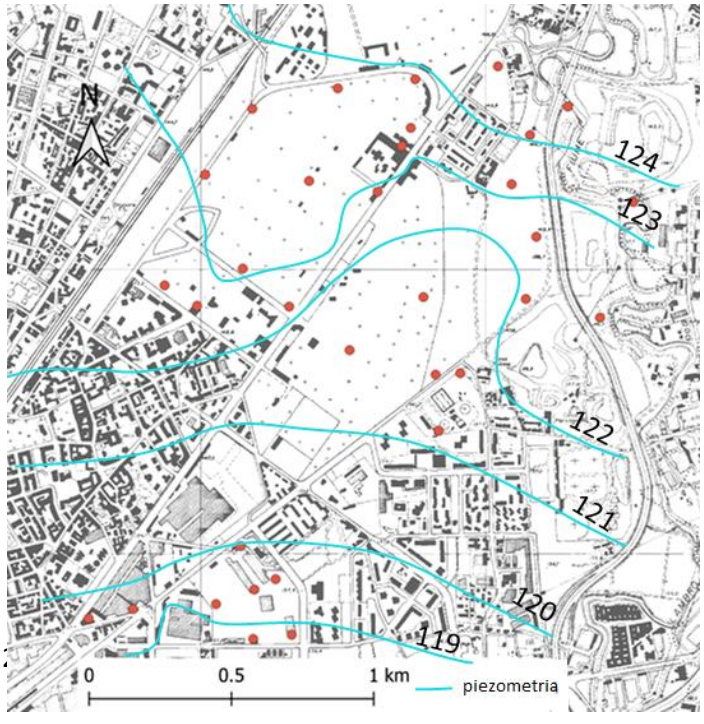


Figura 4 - piezometria

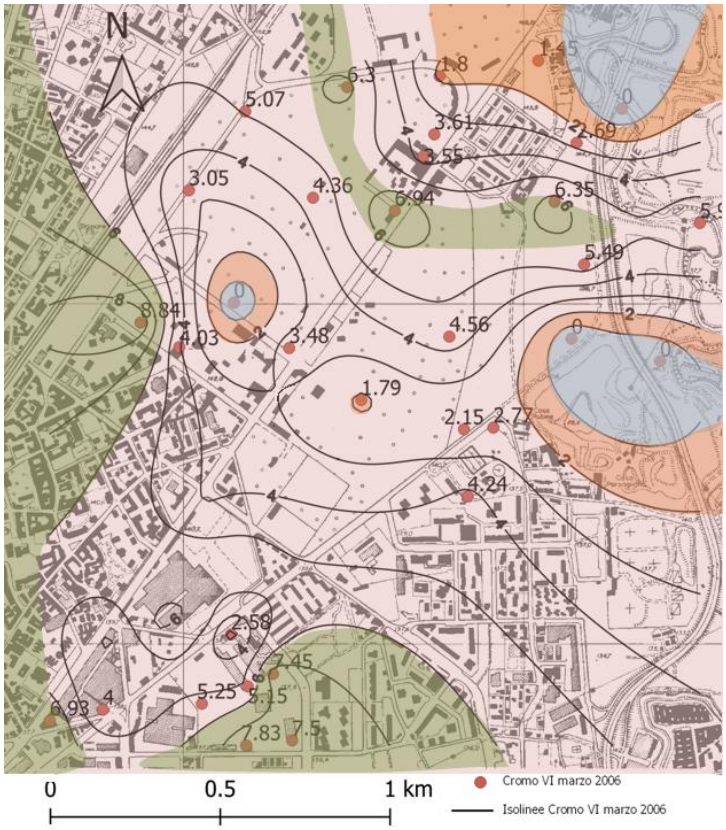


Figura 5

Cartografia tradizionale della distribuzione del CRVI nel marzo 2006

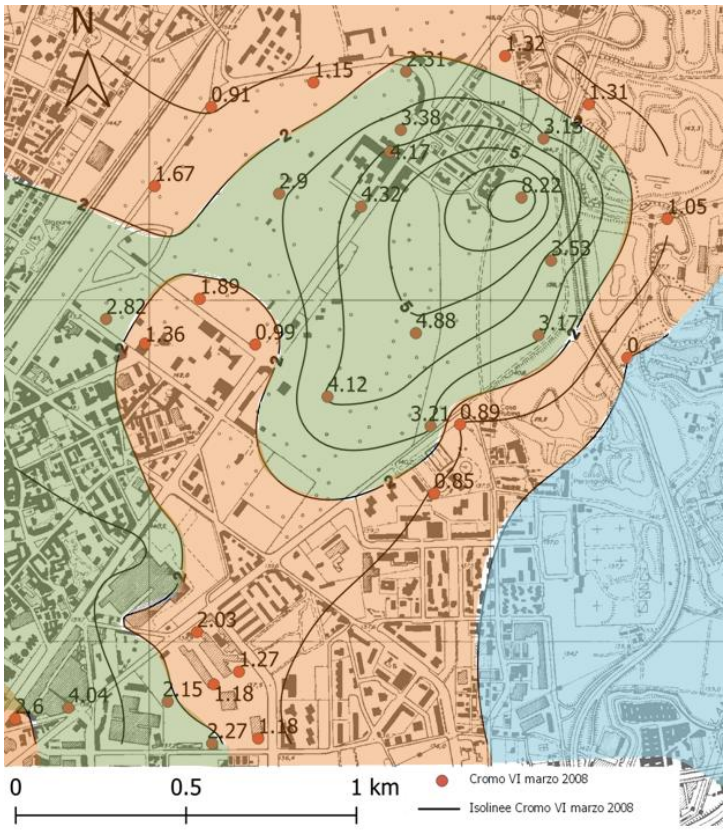


Figura 6

Cartografia tradizionale della distribuzione del CRVI nel marzo 2008

Le due cartografie non forniscono significative indicazioni sulla distribuzione dei contaminanti, e quindi rappresentano documenti poco utilizzabili per le previsioni della loro evoluzione

b)Possibili integrazioni dei metodi tradizionali: previsione dell'entità della variazione annuale delle concentrazioni e dei picchi di concentrazione

Un miglioramento dei risultati si ottiene con operazioni molto semplici, come nell'esempio seguente.

La figura 7 permette di evidenziare infatti che è sufficiente la rappresentazione delle differenze fra le concentrazioni de 2006 e de 2008 per ottenere una prima indicazione sullo stato evolutivo del degrado ambientale.

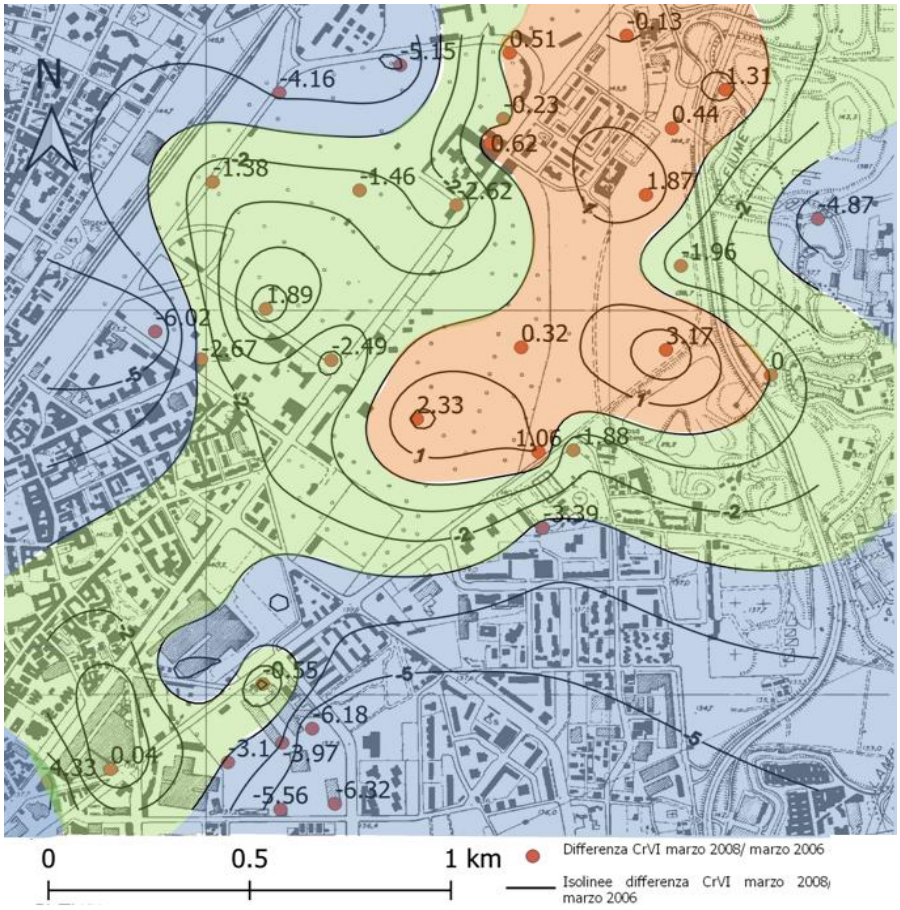


Figura 7

differenza delle concentrazioni di Cr VI fra 2008-2006

Si nota infatti che l'inquinamento è in fase di riduzione mediamente su tutta l'area, e che le variazioni di concentrazione maggiori corrispondono alle zone di NE, evidenziando che da questo settore è oggetto di inquinamento da una fonte attiva, mentre nella restante parte dell'area esaminata non si hanno più sensibili apporti contaminanti.

Questo risultato riguarda comunque l'arco di soli tre anni, idonea per considerazioni sul breve periodo, ma insufficienti per una previsione valutazione di medio termine.

Agendo allora su un periodo più lungo (9 anni),e ripetendo la differenza fra il primo e l'ultimo anno considerato, si ha una conferma condivisibile delle considerazioni fatte per il triennio.

Si può stabilire tramite la media annua degli incrementi delle concentrazioni un valore affidabile anche per una previsione estesa al medio termine della velocità di aumento del degrado, valutabile nell'area nordorientale in circa 5 microgrammi/litro in 10 anni.

L'esempio della figura 8 sintetizza la media delle variazioni nel tempo delle concentrazioni.

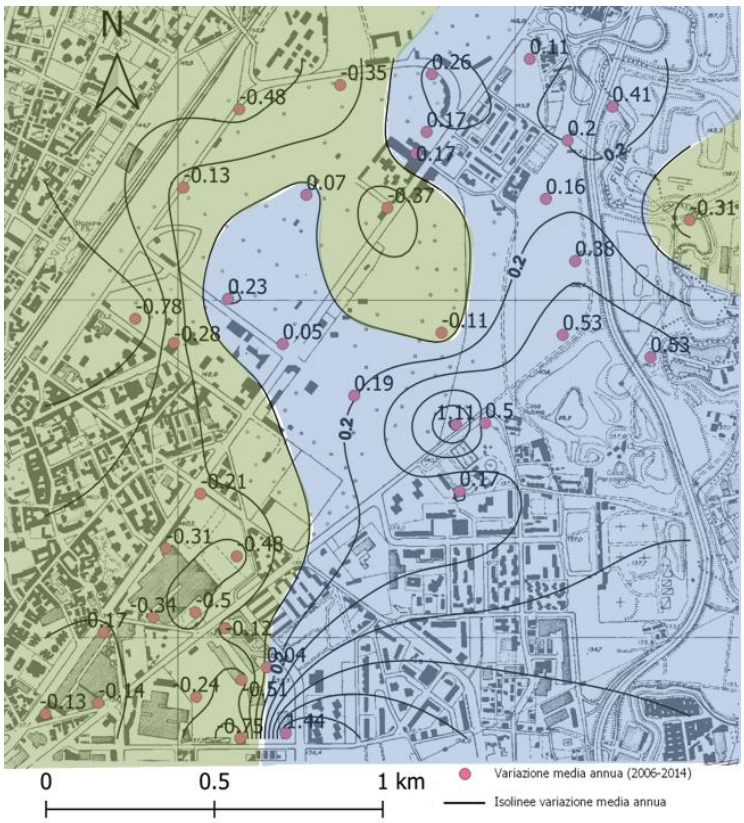


Figura 8
variazione medio annua delle concentrazioni di Cr VI dal 2006 al 2014

I picchi di concentrazione

Le modalità di evoluzione della contaminazione non sono solitamente rappresentabili dall'unico parametro della variazione media annua delle concentrazioni, in quanto le oscillazioni delle concentrazioni possono essere molto consistenti.

Questa variabilità nello spazio e nel tempo si nota ad esempio nelle aree fortemente industrializzate, dove pennacchi di antichi inquinamenti vengono a sommarsi e danno luogo a concentrazioni distribuite in modo ben differente da quello teorico che prevede una tendenzialmente regolare riduzione dei valori procedendo verso valle.

La distribuzione nel tempo delle concentrazioni presenta oscillazioni entro una fascia di massimi e di minimi che solo con la disponibilità di molti dati ben distribuiti nel tempo può essere compresa e caratterizzata. Sicuramente il fenomeno più preoccupante nel contesto evolutivo di un'area degradata è quello dell'aumento improvviso (picchi di concentrazione) su aree estese dei valori del grado di inquinamento, con la comparsa di alti valori per un periodi anche di anni.

I casi in cui solitamente tale processo si verifica sono quelli determinati dalla mobilizzazione improvvisa per cause antropiche o naturali di inquinanti nella zona di origine.

La cartografia idrochimica può essere adattata in modo da consentire una rapida comprensione delle modalità di sviluppo del fenomeno,ad esempio raggruppando i punti di monitoraggio accomunati dall'aumento improvviso delle concentrazioni.

Nell'esempio riprodotto dalla figura seguente, sono indicati in grigio i settori in cui nel corso del periodo 2010-2011 si è riscontrato il maggiore aumento di percloroetilene in falda, risultante dalle differenze di concentrazione fra i due anni. Si nota come nelle aree circostanti l'entità rilevata appare invece in diminuzione, evidenziando così il passaggio nell'arco di alcuni mesi di un picco di inquinamento che attraversa diagonalmente da NNE a SSO tutta l'area di studio.

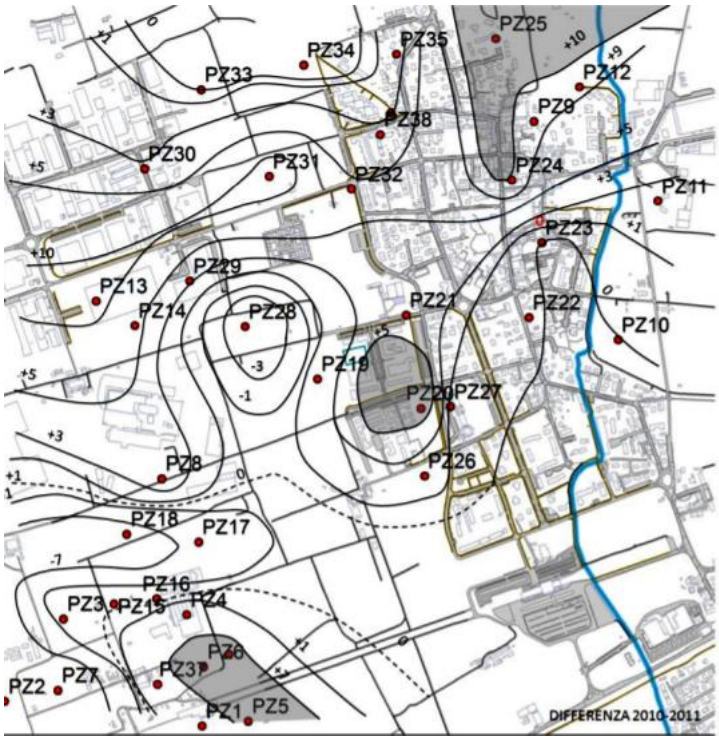


Figura 9 - Le aree segnate in grigio indicano i valori più elevati di un cuneo diretto da NNE a SSO che rappresenta un episodio di aumento rapido e transitorio (picco) delle concentrazioni di PCE, posto in evidenza dal confronto di una serie di dati rilevati in un periodo biennale

Correlazione dei dati di concentrazione

Al fine di ottenere questo raggruppamento ordinato dei punti di monitoraggio in aree omogenee, è sufficiente eseguire la correlazione lineare multipla dei dati di concentrazione rilevati nel corso dell'eventi.

Nell'esempio riportato nelle figure successive, a tal fine sono stati raffrontati i valori di concentrazione di circa una quarantina di piezometri (raccolti in due anni), e per ogni coppia di piezometri è stato calcolato l'indice di correlazione. In seguito, analizzando i dati, sono state elaborate mappe di aree omogenee che includono punti di monitoraggio che hanno comportamenti simili (indice di correlazione maggiore di 0,8).

Dall'analisi della distribuzione delle variazioni dei valori di concentrazione all'interno di ciascuna area omogenea si può osservare che due aree omogenee (quella occidentale e centrale in figura 9), evidenziano una la buona connessione tra i valori delle concentrazioni nella stessa area. Infatti oltre il 70% degli indici di Pearson oscilla tra 0,95 e 1, confermando che i cambiamenti di concentrazione nell'area omogenea erano simultanei e che non erano influenzati da altre fonti. Invece in una terza area omogenea (quella orientale), gli indici di Pearson mostrano una dispersione significativa, che potrebbe suggerire la sovrapposizione degli effetti di attenuazione causati da fonti esterne (per esempio il corso d'acqua presente in questa zona. Una volta definite le aree nelle quali si sono sviluppate le diverse contaminazioni, per conseguire maggiori dettagli nella ricostruzione dei singoli episodi di inquinamento sono state realizzate le mappe degli episodi di contaminazione di breve durata individuale (Figura 9). Ancora una volta è stato utilizzato il metodo di mappatura delle differenze di concentrazione tra i susseguenti rilevamenti (in questo caso distanziati di un anno). Nelle figura 9a e 9b si riporta l'esempio degli anni 2010 e la cartografia delle variazioni annue di concentrazione (fig. 9c), che pare idonea a chiarire con immediatezza quali settori ricevano apporti da fonti attive (quelli contrassegnati da valori positivi della differenza) e quelli in cui la contaminazione si attenua.

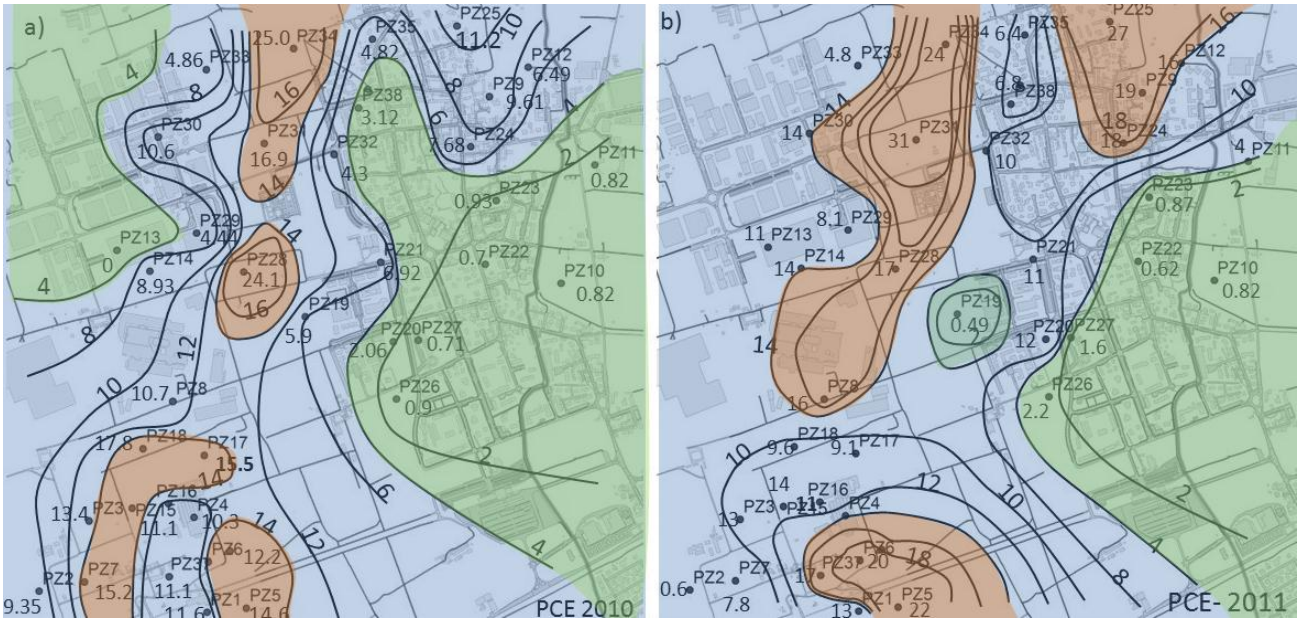


Fig. 11 – Mappe di isoconcentrazione del PCE nel 2010 (a) e 2011 (b)

Considerazioni finali

Le mappe idrochimiche tradizionali per quanto insostituibili per la comprensione dello stato del chimismo, non sono sempre adeguate per studi di dettaglio e previsioni. Esse risultano infatti, se

utilizzate da sole, insufficienti nella maggior parte dei casi, ad esempio in contaminazioni causate da più fonti o quando si hanno bruschi cambiamenti nei livelli piezometrici.

Quando i rilasci di inquinanti dalle fonti variano nel tempo, i valori di concentrazione non sono spesso interpretabili in modo univoco con i metodi analitici tradizionali, perché la comprensione del reale sviluppo dell'inquinamento sarebbe possibile solo disponendo di cartografie molto dettagliate e separate da periodi di tempo molto ristretto. Di conseguenza, anche quando il numero di piezometri è elevato e il loro posizionamento è adeguato, è quasi sempre difficile dedurre con questi metodi come si stanno sviluppando gli inquinamenti e valutare quindi il rischio di contaminazione dei pozzi posti più a valle.

Pertanto in queste condizioni è opportuno utilizzare le cartografie che rappresentano il valore del cambiamento nel tempo della concentrazione nelle diverse parti dell'area selezionata. Questa metodologia è stata testata in casi pratici, al fine di dimostrare che queste cartografie, accoppiate con le tradizionali rappresentazioni idrochimiche, facilitano l'interpretazione dell'evoluzione della contaminazione anche nel caso di pennacchi secondari. Si possono fare alcuni esempi dei casi principali che ricadono in questa categoria.

1) Contaminazioni variabili nel tempo nel lungo termine

Sulla base dei grafici delle concentrazioni di vari anni, è possibile identificare le aree che presentano una peculiare evoluzione della qualità dell'acqua,delineare la distribuzione della velocità media della variazione delle concentrazioni, e rilevare le aree in cui l'aumento delle concentrazioni è marcato. Questi fattori consentono di produrre previsioni nel breve-medio termine dell'evoluzione dei contaminanti.

2) Picchi di concentrazione

Tramite analisi statistiche semplici, come la correlazione lineare multipla, si possono isolare le aree nelle quali gli inquinanti tendono ad aumentare con rapidità, evidenziando le zone in cui si propagano picchi di concentrazione dovuti al rilascio improvviso di inquinanti dalle fonti, così da poterne prevenire gli effetti.

Si osserva inoltre che la ricostruzione con questo metodo delle "aree omogenee", legate solitamente ciascuna a una fonte di inquinamento propria, consente di avere indicazioni per una ricostruzione chiara e corretta della storia dei contaminanti del sito selezionato.

Bibliografia

- Alberti L., Colombo L., Formentin G., Oberto G. (2017). Assessment of sources of PCE contamination in groundwater using a Monte Carlo method in the Functional Urban Area of Milano. Rend. Online. Soc. Geol. It., In press.
- Alberti L., Azzellino, A., Colombo, L., Lombi S. (2016). Use of cluster analysis to identify tetrachloroethylene pollution hotspots for the transport numerical model implementation in urban functional area of Milan, Italy. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, pp. 723-730. DOI: 10.5593/SGEM2016/B11/S02.091.
- L. Alberti, L. Colombo, A. Elefanti, P. Casciano, D. Balzarolo, DIFFUSE CONTAMINATION ASSESSMENT FOR THE GROUNDWATER QUALITY PROTECTION IN FUNCTIONAL URBAN AREAS (FUA), (2019) Geoingegneria Ambientale e Mineraria, 156 (1), pp. 13-23.
- L. Alberti, L. Colombo, G. Formentin, NULL-SPACE MONTE CARLO PARTICLE TRACKING TO ASSESS GROUNDWATER PCE (TETRACHLOROETHENE) DIFFUSE POLLUTION IN NORTH-EASTERN MILAN FUNCTIONAL URBAN AREA "Science of The Total Environment", April 2018 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.253
- Azzellino A., Colombo L., Lombi S., Merri. A., Piana A., Marchesi V., Alberti L., GROUNDWATER DIFFUSE POLLUTION IN FUNCTIONAL URBAN AREAS: THE NEED TO DEFINE ANTHROPOGENIC DIFFUSE POLLUTION BACKGROUND LEVELS, Science of the Total Environment, Volume 656, 15 March 2019, Pages 1207-1222,DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.11.416
- ARPA Plume (2016)– Integrazione: realizzazione mappe tematiche sulla distribuzione delle concentrazioni di sostanze.
- Accoto V., Bullo P.,Faccio R.,Mason L., Sottani A. (2016): Hexavalent Chromium: analysis of the mechanism of the groundwater contamination in a former industrial site in the Province of Vicenza. Special issue Aqua2015,Acque Sotterranee.
- Beretta G. (1992)- Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee.Pitagora ed.,Bologna
- Castany G.(1963) – Prospection et evaluation des eaux souterraines, Dunod, Paris

- Cavallin A., Francani V., Mazzarella S. (1983). “Studio idrogeologico della pianura compresa fra Adda e Ticino”. Costruzioni, n. 326-327, Milano.
- Celico P. (1988)- Prospezioni idrogeologiche, ed. Liguori,Palermo
- Civita M. (1995) - Sul rischio di inquinamento delle risorse idriche sotterranee.Atti 2° Conv. Naz.“Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee: Metodologie,Tecnologie e Obiettivi", Nonantola (Modena), 4, pp. 103-119.
- Civita M. (2005) – Idrogeologia applicata e ambientale) Casa editrice Ambrosiana, Milano
- Colombo L., Alberti L.,. Formentin G, Oberto G.,(2017)- Assessment of sources of pce contamination in groundwater using a Monte Carlo method in the functional urban area (FUA) of Milan,“Rendiconti Online Società Geologica”, Società Geologica Italiana
- Colombo L. (2017) - Statistical methods and transport modeling to assess groundwater pce hotspots and diffuse pollution in Milan Functional Urban Area “Acque Sotterranee-Italian Journal Of Groundwater”,, doi: 10.7343/as-2017-301
- Custodio E.&Llamas M.R.(1976) – Hidrologia subteranea, ed. Omega, Madrid
- Devic, G., Djordjevic, D., Sakan, S. (2014). Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia. Science of the Total Environment. Volumes 468–469, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.09.011
- Domenico, P.A. and F.W. Schwartz, (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*, John Wiley & Sons, New York, p.824
- Gattinoni P., Scesi L., (2017). The groundwater rise in the urban area of Milan (Italy) and its interactions with underground structures and infrastructures. Tunnelling and Underground Space Technology, 62(2017)103-114
- Gelhar L.W., Welty, C., Rehfeldt, K.R. (1992). A critical review of data on field-scale dispersion in aquifers. Water Resources Research 28. doi:10.1029/92WR00607.ISSN:0043-1397
- Grath J., Scheidleder A., Uhlig S., Weber K., Kralik M., Keimel T., GruberCommon D. Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC). Technical report nº 1 The EU Water Framework Directive: statistical aspects of the identification of groundwater pollution trends, and aggregation. Office For Official Publications Of The European Communities L-2985 Luxembourg ISBN: 92-894-5639-6 ISSN:1725-5570.
- Kinzelbach, W. (1986). Groundwater modelling: an introduction with sample program in BASIC. Elsevier Scientific Publ. Co., Amsterdam. 330 pp.

- M. Masetti, L. Pollicino; S. Stevenazzi; L. Colombo; L. Alberti SPATIAL STATISTICAL ASSESSMENT OF GROUNDWATER PCE (TETRACHLOROETHYLENE) DIFFUSE CONTAMINATION IN URBAN AREAS, Water 2019, 11, 1211; doi:10.3390/w11061211
- Mouron, P., Nemecek, T., Scholz, R. W., Weber, O. (2006). Management influence on environmental impacts in an apple production system on Swiss fruit farms: Combining life cycle assessment with statistical risk assessment. Agriculture, Ecosystems and Environment, 114(2–4),311–322.
- Reghunath R., Murthy T. R. S., Raghavan B. R. (2002). The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: An example from Karnataka, India. Water Research, 36(10), 2437–2442. https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00490-0
- Schoeller H. (1962): Les eaux souterraine, ed.,Masson,Paris
- Robbins G.A. (1983). Determining dispersion parameters to predict groundwater contamination. Thesis
- Yidana, S. M., Ophori D., & Banoeng-Yakubo B. (2008). A multivariate statistical analysis of surface water chemistry data-The Ankobra Ba
- Washington State Department of Ecology Toxics Cleanup Program (2005):Guidance on Remediation of Petroleum-Contaminated Ground Water By Natural Attenuation).