



Quaderni di
GEOLOGIA APPLICATA



CNR-GNDI

Linea di ricerca n. 4 - Valutazione della Vulnerabilità degli Acquiferi (*Responsabile*: Prof. Massimo Civita)

**2^o CONVEGNO NAZIONALE SULLA PROTEZIONE
E GESTIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE:
METODOLOGIE, TECNOLOGIE E OBIETTIVI**

Nonantola (Modena) 17-18-19 maggio 1995

**BONIFICA E DISINQUINAMENTO
DEL SUOLO E DEGLI ACQUIFERI VULNERATI**

Relatore: Giovanni Pietro Beretta - *Correlatori*: Vincenzo Francani, Luigi Tulipano

**IDENTIFICAZIONE E VALUTAZIONE
DELLO STATO DI INQUINAMENTO DELLA RIS**

Relatore: Adriano Zavatti - *Correlatori*: Luigi Masotti, Giulio Sergio Tazioli, Enzo Funari

Vol. 2



Pitagora Editrice Bologna

Un caso di inquinamento del suolo e delle acque sotterranee da solventi organo-alogenati: monitoraggio e programma di bonifica (San Giovanni in Marignano - Rimini)*

E. Coltelli⁽¹⁾, F. Canavese⁽³⁾, C. Maltoni⁽³⁾, A. Antoniazzi⁽⁴⁾,
B. Spalla⁽²⁾, A. Valentini⁽⁴⁾, C. Valentini⁽⁴⁾, A. Zavatti⁽⁵⁾

Riassunto. È presentato un caso di inquinamento di acque sotterranee da idrocarburi alogenati a S. Giovanni in Marignano (Rimini). L'inquinamento è stato monitorato attraverso una rete di pozzi di controllo, che hanno permesso di definire la distribuzione areale del fenomeno, che ha interessato un acquifero alluvionale della conoide del torrente Ventena. L'applicazione di semplici modelli ha permesso di ricostruire la migrazione degli inquinanti e di progettare la bonifica dell'acquifero contaminato, attraverso una barriera idraulica.

[Parole chiave: *inquinamento di acque sotterranee, idrocarburi clorurati, bonifica*].

Abstract. A case of groundwater pollution due to Chlorinated Hydrocarbons in San Giovanni in Marignano (Rimini) is presented. Groundwater pollution was monitored by a network of wells, which allowed to define his distribution in the area of the alluvial fan of Ventena River. The application of simple models was useful to define the distribution of pollutants and to project the remediation of the contaminated acquifer, using an hydraulic barrier.

[Key words: *groundwater pollution, chlorinated hydrocarbons, remediation*].

INTRODUZIONE

Negli ultimi anni una serie di analisi chimiche effettuate presso i pozzi dei Comuni di Cattolica e San Giovanni Marignano (Prov. di Rimini) hanno riscontrato la presenza di un inquinamento nelle falde sotterranee da solventi clorurati. Dalle analisi effettuate dalla USL di Riccione e dalla variazione di inquinamento nei diversi pozzi si è risaliti all'area di inquinamento puntuale.

L'area interessata è localizzata nella zona artigianale, immediatamente a NE dell'abitato di San Giovanni in Marignano, ed è ubicata nella pianura alluvionale del torrente Ventena, in destra idrografica dello stesso, alla quota di 25 metri s.l.m.

Questo studio ha lo scopo di illustrare la situazione dell'inquinamento attuale nell'area, ipotizzare le condizioni iniziali di inquinamento, data la quasi totale mancanza di informazioni relative, descrivere le ipotesi relative alle modalità di migrazione dell'inquinamento e le soluzioni progettuali relative al disinquinamento dei terreni interessati e delle falde.

Il presente lavoro è il frutto dell'attiva collaborazione tra i soggetti privati coinvolti, resi disponibili all'opera di risanamento e gli organi pubblici di controllo, che hanno svolto la maggior parte del monitoraggio ambientale. Crediamo che tale collaborazione, pur nel rispetto delle rispettive competenze e responsabilità, sia comunque un positivo risultato da sottolineare ancor prima di entrare nel merito tecnico-scientifico del caso presentato.

INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO

Come riportato nella planimetria (vedi fig. 1) la

* Pubbl. n. 1242 GNDICI-CNR.

⁽¹⁾ PMP di Rimini.

⁽²⁾ PMP di Forlì.

⁽³⁾ Serv. Ig. Pubblica, Riccione.

⁽⁴⁾ Libero Professionista.

⁽⁵⁾ Resp. U.O. 4.8 GNDICI-CNR; PMP di Modena.

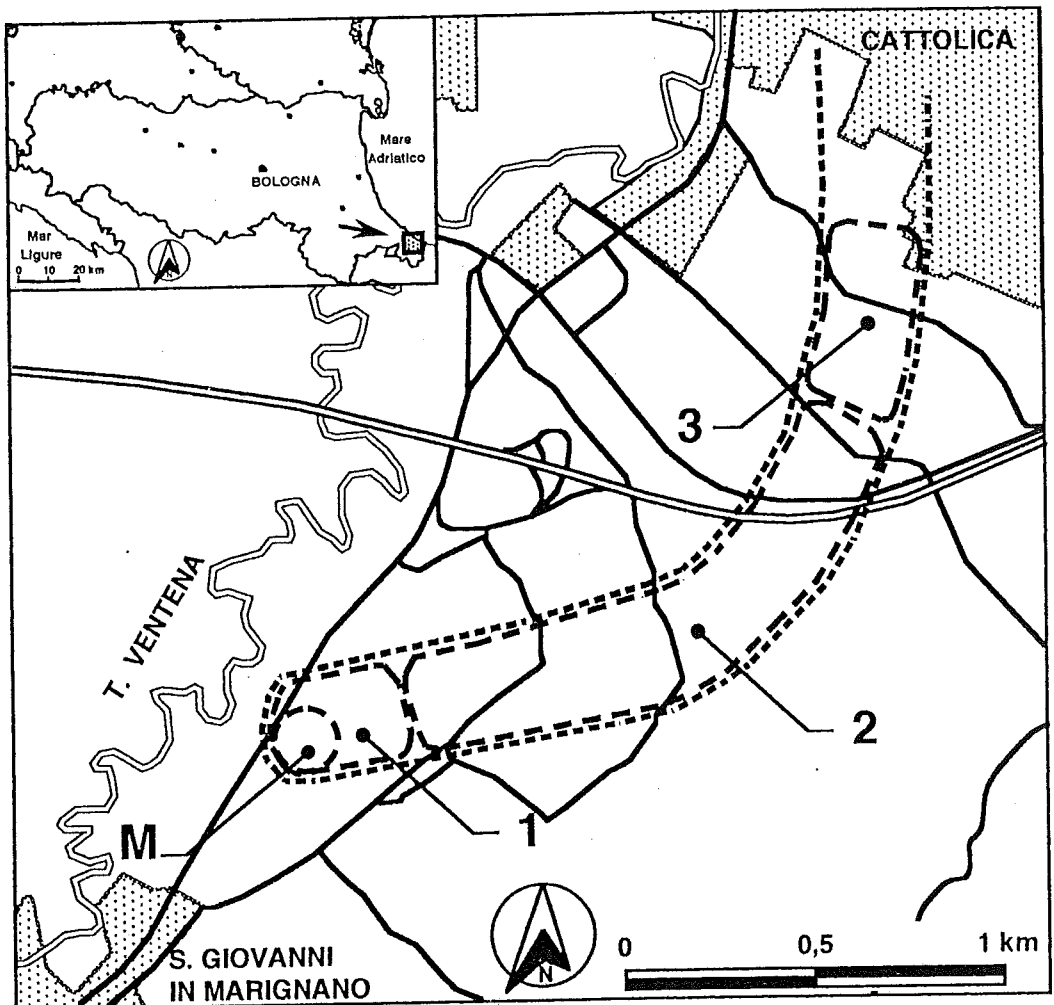


Figura 1. Planimetria area di studio.

zona soggetta all'inquinamento può essere suddivisa in tre aree principali, ognuna delle quali presenta alcuni pozzi di riferimento. I pozzi, oltre ad essere numerati, presentano la sigla iniziale 'V, A o P, in relazione alla proprietà. Le aree sono state definite in relazione a condizioni omogenee di inquinamento; le stesse sono ubicate lungo il paleoalveo, di cui al successivo paragrafo, all'interno del quale si è definito l'inquinamento. Esternamente alle aree di seguito indicate, la concentrazione degli inquinanti è praticamente nulla, per cui tale porzione di territorio non verrà presa in esame in questo studio. In base a queste considerazioni, le aree citate sono:

Area M, relativa all'inquinamento puntuale;

Area 1, relativa alle immediate vicinanze del luogo dove è avvenuto l'inquinamento, è rappresentata dai pozzi V5, V3 e P11;

Area 2, relativa ad un'area intermedia, distante fino ad 1 Km dall'Area 1, è rappresentata dai pozzi P9, A3-6 e V8;

Area 3, fino a distanze di circa 2-3 Km, con concentrazioni di inquinanti minori, è rappresentata dai pozzi V9, V10 e V13-15.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO

Geologicamente l'area in esame è costituita dai sedimenti alluvionali del quaternario, le cui alluvioni hanno potenza variabile da 28 a 44 metri, aumentando la potenza da monte verso valle. Nell'area (M) di inquinamento puntuale, litologicamente i sedimenti sono costituiti da depositi limo argilloso sabbiosi fino a circa $-7.00 + -8.00$ metri, da un livello

ghiaioso in matrice limosa fino a quota $-8.50 + -9.00$ metri, da un secondo livello di argilla limosa sabbiosa fino a quota $-10.00 + -10.50$ metri e ghiaia in matrice limo sabbiosa da tale quota fino alla formazione di deposito marino posta alla profondità di circa 24.00 metri da p.c., con intercalazione di argilla da 18.00 a 22.00 metri.

Nell'area M, secondo prove effettuate nel settembre 1993, la falda risulta, in corrispondenza del sedimento ghiaioso, presente alla profondità di -12.50 metri dal p.c.

Le condizioni idrogeologiche locali, studiate da PERICOLI (1981) e rilevate dalle stratigrafie dei pozzi comunali e da numerosi sondaggi eseguiti da professionisti, sono caratterizzate dai seguenti elementi

che definiscono la dinamica del flusso sotterraneo:

- dalle isofreatiche (PERICOLI, 1981), si rileva la presenza di una linea di flusso principale della falda, passante per il pozzo V5, V3, P9, A6;

- dallo stesso studio risulta che a circa 400 metri dall'area inquinata, poco dopo il pozzo V3, la superficie piezometrica presenta un repentino abbassamento; tale fenomeno è dovuto probabilmente ad un maggiore asse di drenaggio, infatti V3 presenta livelli di ghiaie più potenti e profondi fino a 36.10 metri, a differenza delle condizioni stratigrafiche del pozzo V5, in cui si sono rilevate potenze di ghiaia inferiori e presenti fino a 24.00 metri (vedi fig. 2);

- schematizzando le sezioni stratigrafiche relative ai pozzi comunali, integrate dai sondaggi, si rileva

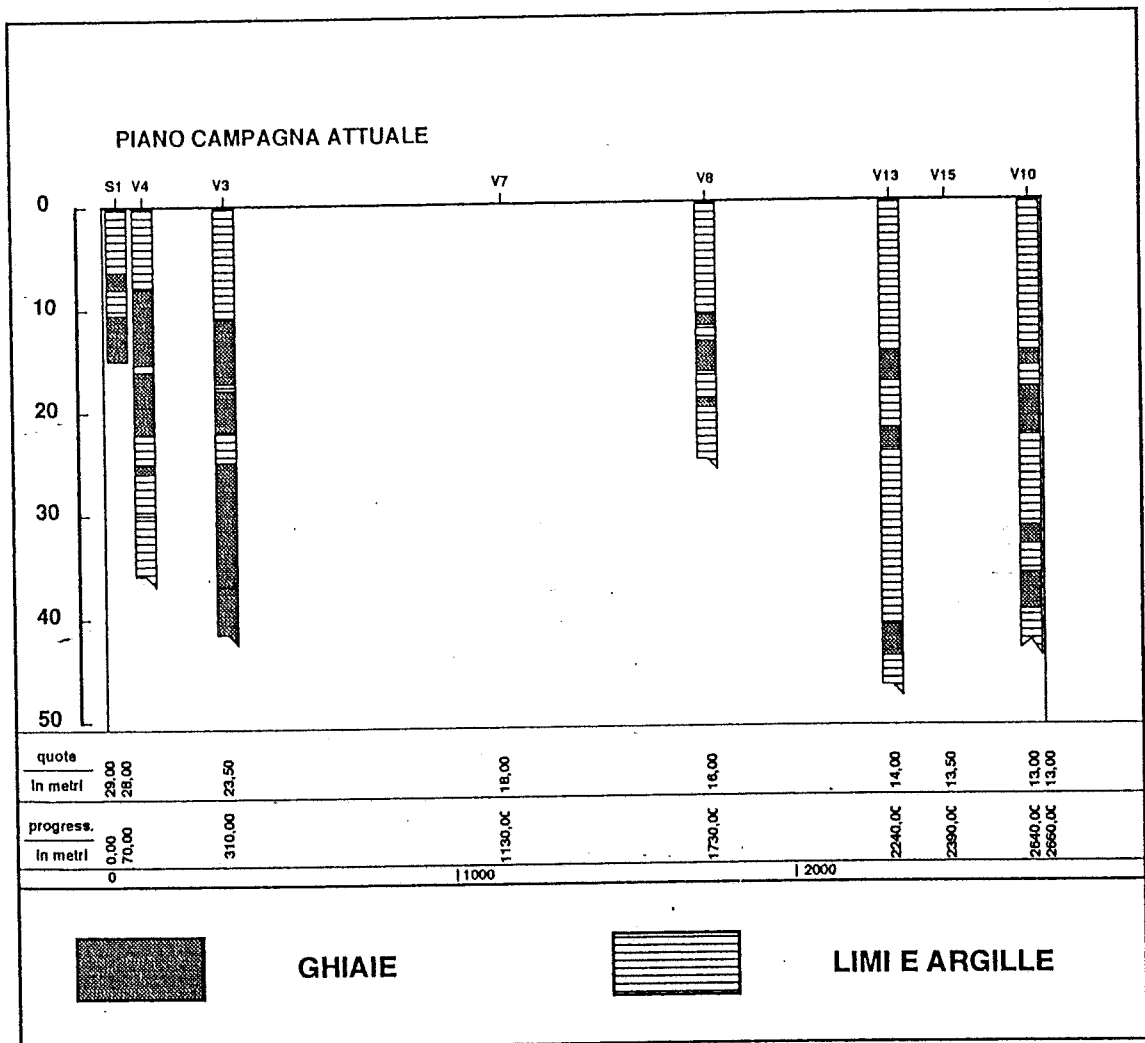


Figura 2. Schema stratigrafie nei pozzi principali.

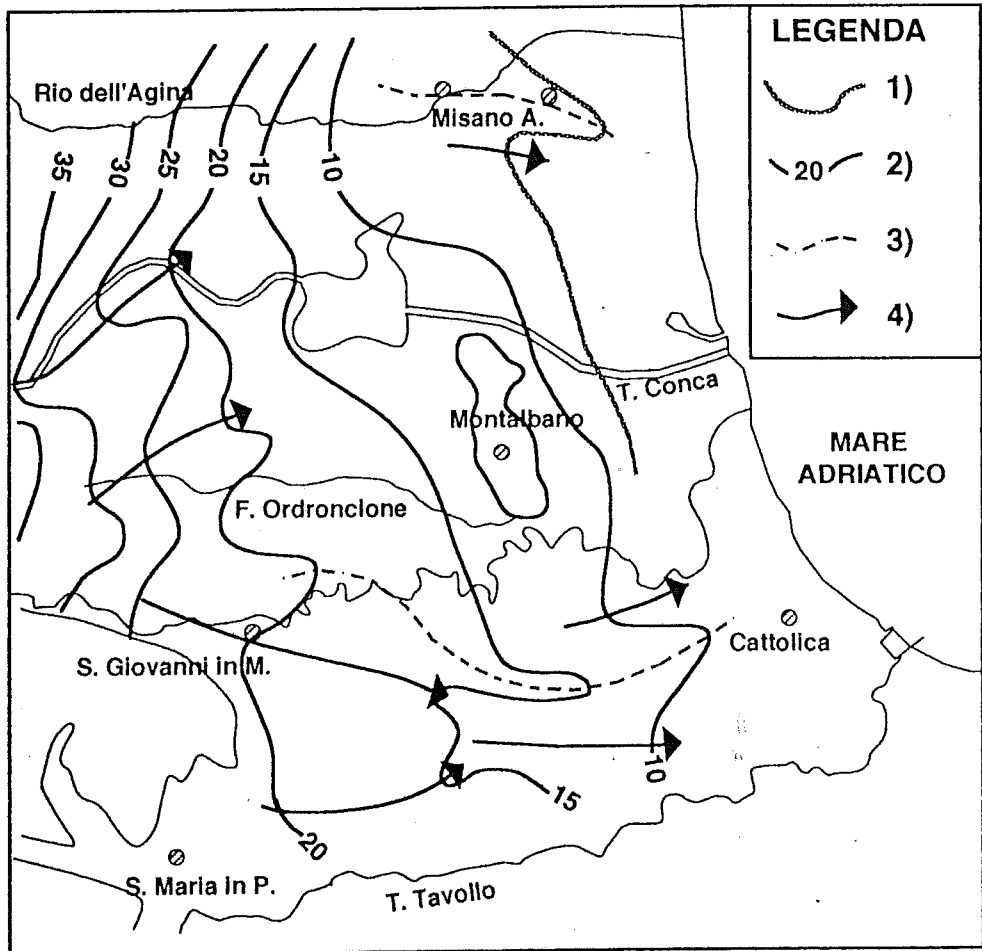


Figura 3. Carta delle isofreatiche (ottobre 1993).

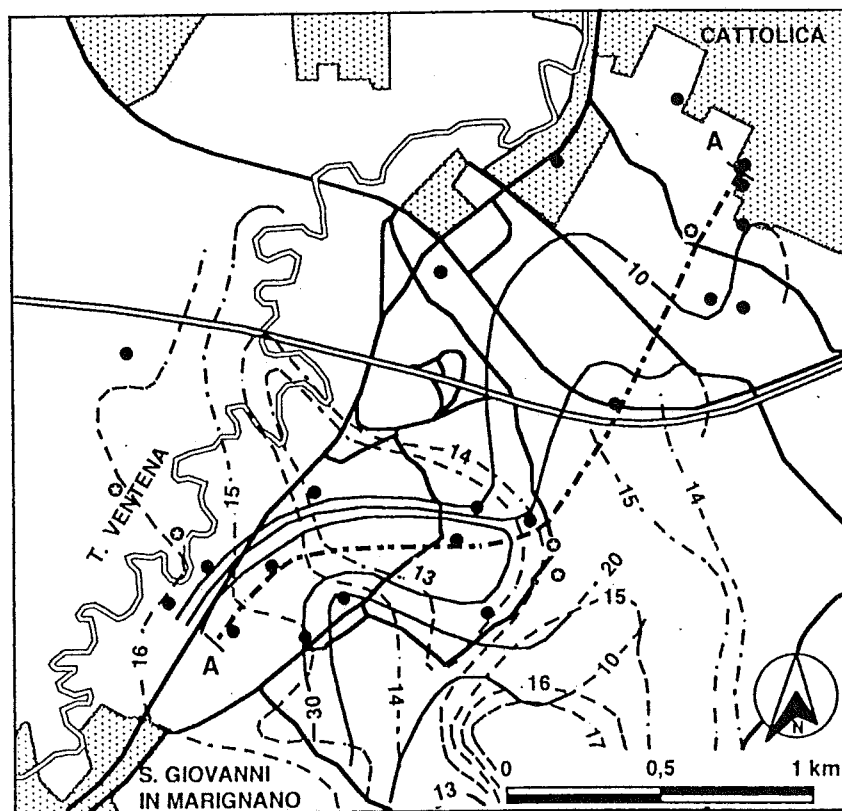


Figura 4. Isofreatiche (1981; ---); isocone degli inquinanti (1993; —).

la presenza di più livelli di ghiaie e quindi di acquiferi, intercalati da livelli di argille relativamente impermeabili, quindi risultano evidenti variazioni di potenza dello spessore dell'acquifero allo scorrimento della falda.

Per la corretta valutazione dei dati idrogeologici di riferimento per il posizionamento e dimensionamento delle opere idrauliche sono stati raccolti dati sui pozzi dell'acquedotto di Cattolica e studi relativi al bacino del Ventena. Dall'analisi delle caratteristiche dei pozzi dell'acquedotto di Cattolica, delle relative portate e livelli statici e dinamici misurati nel periodo 1980-1993, risulta:

- il comportamento idraulico dell'area in studio risulta molto eterogenea, pertanto una corretta dimensione operativa può essere attuata solo con prove di portata puntuali, eseguite sulle opere stesse;
- il livello statico risulta molto variabile e legato alle precipitazioni;
- mediando ed elaborando i dati relativi alle portate ed alle variazioni tra livello statico e dinamico dei pozzi riportati in fig. AA, si ricava che per il litotipo ghiaioso è ipotizzabile una portata specifica del pozzo pari a 1.2 l/s*m, mentre se si considera la

falda nel suo complesso, costituita da alternanza di livelli ghiaiosi e limo argillosi, si può valutare in 0.6 l/s*m la resa dei pozzi stessi. Tali dati sono da considerare medi e di riferimento di massima.

Nelle figg. 3 e 4 si riportano la carta delle iso-freatiche e la carta idrogeologica dell'area.

DESCRIZIONE DELL'INQUINAMENTO

Modalità dell'inquinamento e tipologia degli inquinanti

Sulla base dei dati testimoniali si è risaliti ad ipotesi sulle modalità di inquinamento dell'area. L'inquinamento principale è avvenuto circa nel 1982, a seguito di uno sversamento accidentale di un fusto da 250 kg nel punto di principale inquinamento (Area M), così come riportato nella planimetria (fig. 1). Nella stessa zona, negli anni successivi, sono stati posti un numero non precisato di fusti fatiscenti con conseguenti ulteriori perdite di solventi nella stessa area. Nell'analisi complessiva relativa all'origine dell'inquinamento sono stati ipotizzati i seguenti elementi principali:

- a) inquinamento di tipo puntuale, iniziato presumibilmente nel 1982;

b) volumi delle sostanze contenute nei fusti:

acetone 25 %

trielina 35 %

toluene 40 %

c) peso complessivo di inquinanti pari a circa 500 kg.

Gli inquinanti principali riscontrati nel terreno e nelle acque di falda sono solventi organici e clorurati, in particolare: toluene, tricloroetilene, tetracloroetilene e 1,1,1-tricloroetano. Tali composti chimici presentano caratteristiche abbastanza simili, come elevata pressione di vapore e conseguente facilità a volatilizzarsi (toluene e tetracloroetilene), solubilità compresa tra 0.5 e 1.0 g/l e densità intorno a 1.3-1.6 kg/l per i solventi clorurati.

Osservazione delle analisi effettuate

Le condizioni di eterogeneità delle caratteristiche geologiche ed idrogeologiche del mezzo saturo e non, oltre alle ben note problematiche di applicazione di modelli teorici relativi alla migrazione degli inquinanti in terreni eterogenei, comportano la necessità di approfondire le osservazioni relative alle analisi chimiche effettuate dalla USL nei pozzi lungo il paleovalveo durante gli ultimi anni (tra settembre 1991 e febbraio 1994) (tab. 1).

Tali osservazioni hanno rilevato una diretta corrispondenza tra i fenomeni di precipitazione (in particolare modo per piogge intense), quelli di emungimento dei pozzi e le variazioni delle concentrazioni di inquinanti.

Tabella 1. Analisi dei solventi organo-clorurati presenti nei pozzi interessati nel periodo settembre 1991-febbraio 1994.

POZZO	SET/91	NOV/91	DIC/91	GEN/92	LUG/92	AGO/92	OTT/92	NOV/92	DIC/92	GEN/93	FEB/93	MAR/93
A1	0		0			0	0	0	0	0	0	0
A3	12.00	22.00	19.00				18.00	27.00	96.00	26.00	36.00	18.00
A4	14.00	15.00	20.60				26.00	41.00	59.00	45.00	72.00	29.00
A5	11.00	15.00	13.40				11.00	11.00	27.00	23.00	9.00	15.00
A6	8.00	21.00	23.00	40.00			37.00	26.00	60.00	29.00	22.00	22.00
V1	0		0			0	0	3.00	2.00	0	0	0
V2	10.00			13.00		9.00	3.00	8.00	10.00	10.00	4.00	7.00
V3	5.00		3.60			6.00	1.00	6.00	4.00	12.00	5.00	
V4	2.00		4.50			7.00	0	3.00	0	6.00	2.00	0
V5	6.00		4.00			7.00	1.00	9.00	8.00	9.00	2.00	10.00
V6	0		0			0	0	13.00	5.00	0	0	0
V7	49.00	21.00	17.60	35.00	55.00		49.00	41.00	93.00	49.00	16.00	29.00
V8	22.50			80.00	49.00		45.00	36.00	71.00	34.00	21.00	27.00
V14	70.00	70.00				128.00	75.00	16.00	29.00	3.00	5.00	
V13	182.00	140.00		25.00	170.00		50.00	24.00	18.00	8.00	2.00	4.00
V15	10.00		25.00		102.00		70.00	63.00	61.00	8.00	17.00	0
V11	14.00		0			17.00	4.00	14.00	25.00	6.00	11.00	3.00
V12	5.00		1.80			15.00	8.00	13.00	18.00	5.00	11.00	3.00
V9	12.00		5.00	12.00		9.00	9.00	6.00	45.00	13.00	4.00	6.00
V10	21.70		0.50		92.00		68.00	38.00	43.00	29.00	15.00	8.00
P11	8.00						53.00	35.00	70.00	38.00	29.00	25.00

TABELLA RELATIVA AL LIVELLI D'INQUINAMENTO DEI POZZI NEL PERIODO SETTEMBRE 1991 - MARZO 1993 (dati in µg/L)

POZZO	APR/93	MAG/93	GIU/93	LUG/93	AGO/93	SET/93	OTT/93	NOV/93	DIC/93	GEN/94	FEB/94
A1	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
A3	14.00	27.00	16.00		12.00	14.00	50.00	75.00	44.00	13.00	46.00
A4	10.00	52.00	18.00		17.00	25.00	87.00	173.00	74.00	24.00	75.00
A5	10.00	18.00	13.00		10.00	15.00	16.00	101.00	45.00	14.00	21.00
A6	16.00	69.00	24.00		10.00	14.00	21.00	39.00	39.00	14.00	16.00
V1	0	0	0		0	2.00	0	0	0	0	0
V2	0					4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
V3		4.00	6.00		4.00	0	4.00	14.00	7.00	4.00	4.00
V4	0	3.00	5.00		0	0	3.00	0	4.00	0	0
V5						4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
V6	0	0	0		0	0	0	0	0	0	0
V7	13.00	34.00	11.00		6.00	6.00	28.00	13.00	20.00	17.00	19.00
V8	16.00	35.00	13.00	7.00	6.00	7.00	26.00	26.00	27.00	29.00	43.00
V14		3.00	2.00			4.00	7.00	10.00	29.00	4.00	5.00
V13		4.00	2.00			0	5.00	6.00	19.00	2.00	4.00
V15		5.00	3.00			0	0	2.00	9.00	2.00	0
V11						1.00	4.00	7.00	7.00	5.00	3.00
V12						3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
V9	5.00	20.00	4.00			4.00	3.00	11.00	6.00	0	0
V10	5.00	6.00	0			1.00	2.00	15.00	6.00	0	0
P11	20.00	37.00	3.00		11.00	9.00	29.00	25.00	29.00	14.00	19.00

TABELLA RELATIVA AL LIVELLI D'INQUINAMENTO DEI POZZI NEL PERIODO APRILE 1993 - FEBBRAIO 1994 (dati in µg/L)

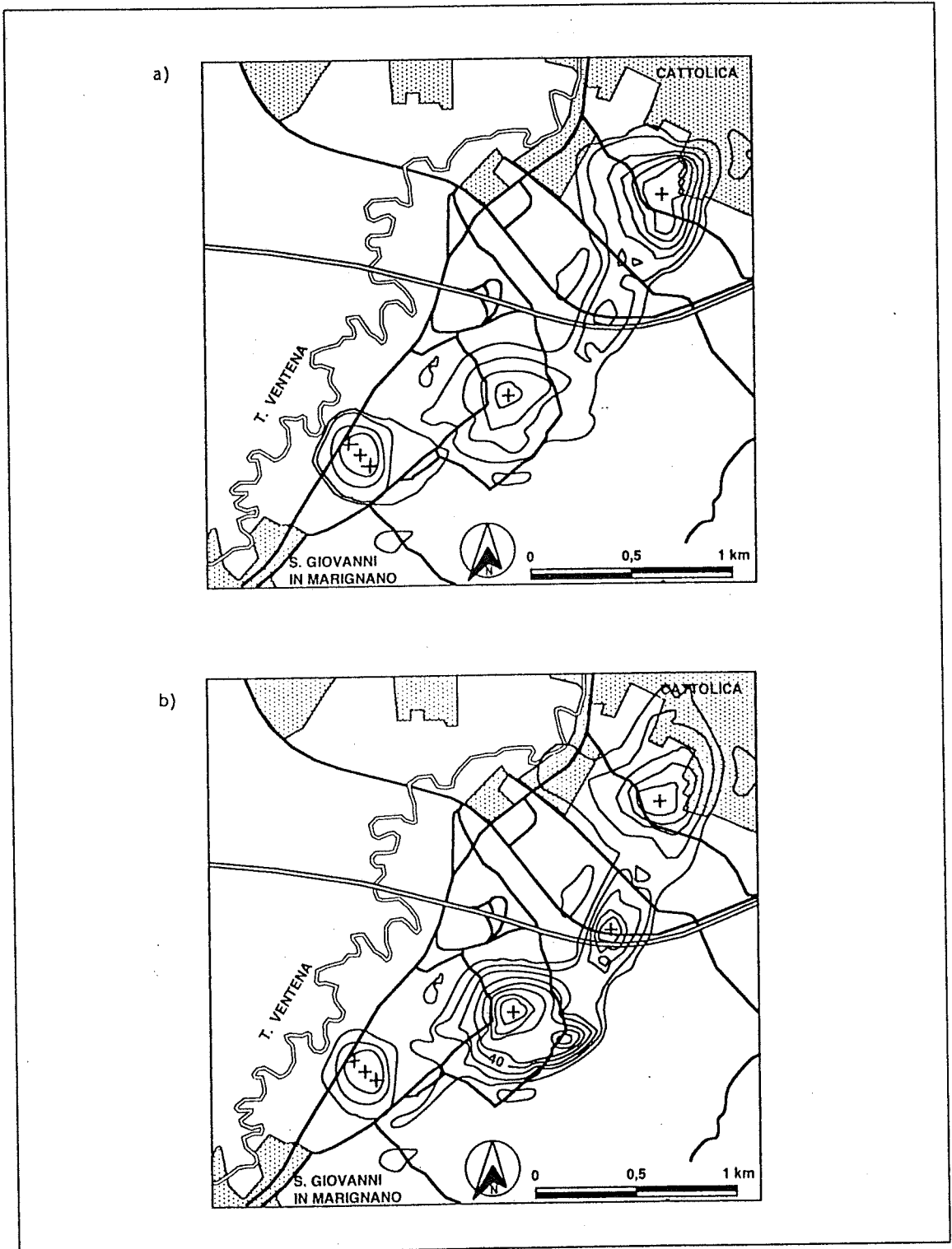


Figura 5. Andamento delle isocone. a) ottobre 1992; b) dicembre 1992.

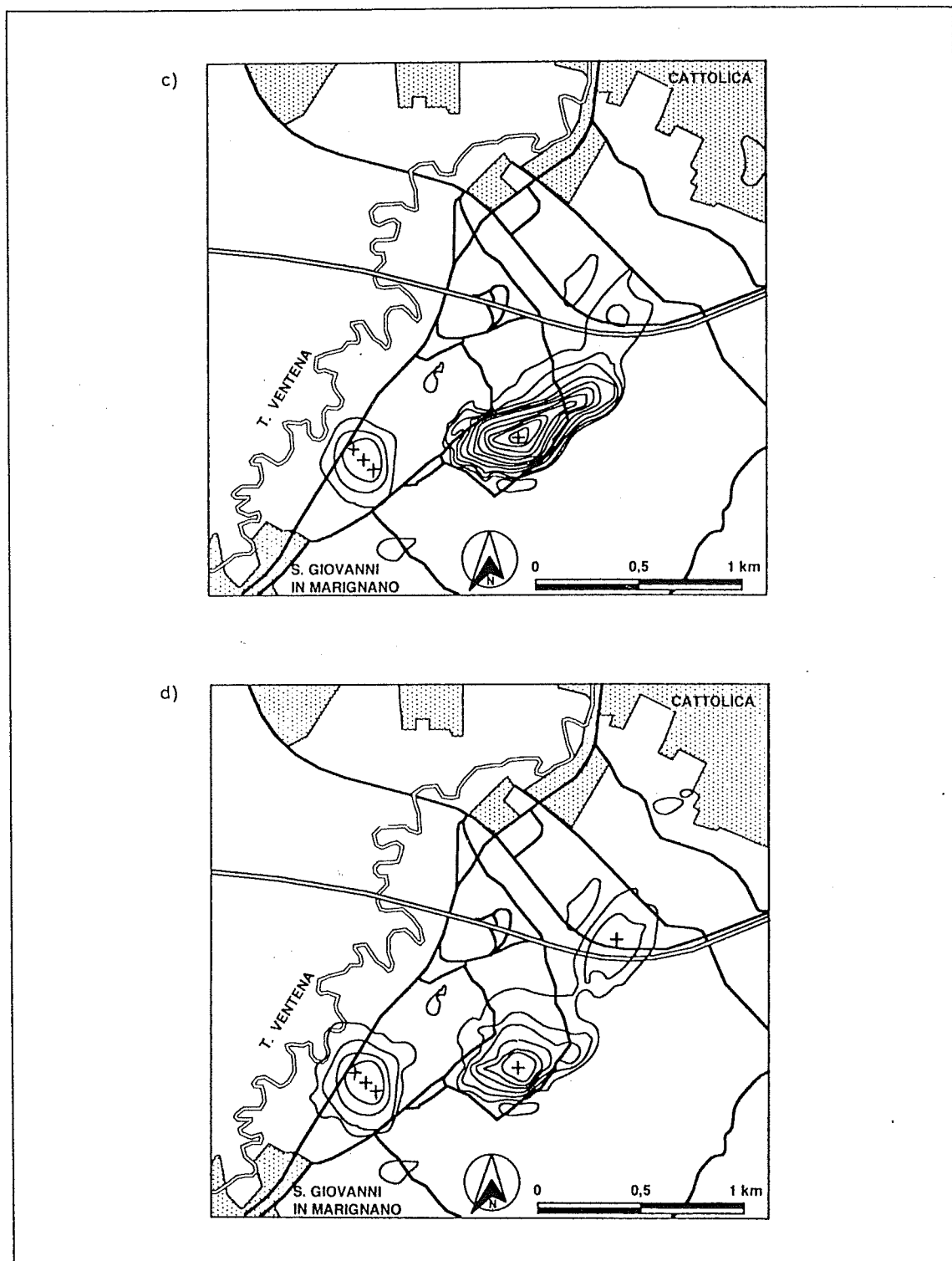


Figura 5. Andamento delle isocone. c) novembre 1993; d) febbraio 1994.

Dai grafici relativi alle isocone durante gli ultimi anni di osservazione (fig. 5) si evince come l'area M sia sempre quella maggiormente inquinata, con concentrazioni piuttosto stabili, intorno ai 1500 µg/l di solventi clorurati totali. I pozzi a valle, invece, presentano variazioni stagionali più o meno accentuate con una certa ripetitività annuale. Inoltre, la correlazione tra le precipitazioni e le concentrazioni di inquinanti (fig. 6), ha portato alle seguenti considerazioni:

a) I pozzi più vicini all'area di inquinamento (Area 1) presentano un aumento deciso delle concentrazioni di inquinanti nei mesi dicembre '92, maggio e novembre '93, in corrispondenza delle piogge ad elevata intensità rispettivamente di ottobre '92, marzo ed ottobre '93. Per i tempi di sfasamento tra precipitazione e variazione della concentrazione di inquinanti si rimanda al prossimo paragrafo.

b) I pozzi che si trovano nella zona intermedia tra l'area di inquinamento e quella relativi a forti portate di emungimento (Area 2) presentano variazioni delle concentrazioni di inquinanti frutto della somma di entrambi i fenomeni sopra descritti: preprecipitazioni ed emungimento. Poichè questi effetti hanno luogo in periodi dell'anno differenti, in tali pozzi si rileva una concentrazione di inquinanti quasi costante (circa 50 µg/l).

c) I pozzi dell'Area 3 presentano un aumento delle concentrazioni durante il periodo estivo, in corrispondenza di consistenti fenomeni di emungimento dai pozzi, e conseguente creazione di coni di depressione nell'area circostante.

Considerazioni teoriche del flusso degli inquinanti

Di seguito si riportano alcune considerazioni generali relative al flusso di inquinanti nel terreno. Inoltre, attraverso una analisi dei grafici relativi alle isoconcentrazioni ed una correlazione con gli agenti esterni principali (agenti climatici, emungimenti), verranno tratte alcune indicazioni modellistiche e progettuali sull'andamento e la migrazione nel tempo degli inquinanti oggetto di questo studio.

Lo studio teorico del fenomeno di migrazione degli inquinanti deve essere suddiviso in due fasi: la prima relativa alla zona non satura, la seconda relativa alla zona satura.

Zona non satura

La possibilità che i composti organici possano raggiungere la falda è legata a diversi fattori, tra i quali:

- volume immesso nel sottosuolo;

- tipologia della fonte inquinante;
- entità di infiltrazione;
- capacità di ritenzione del terreno;
- attenuazione del carico inquinante.

Gli aspetti relativi alle quantità e caratteristiche degli inquinanti sono già stati descritti nei paragrafi precedenti. La capacità di ritenzione è funzione della permeabilità del terreno e delle caratteristiche degli inquinanti. Per i composti organici, SCHWILLE (1984) ha definito una capacità di ritenzione di 3+5 l/m³ per terreni ad elevata permeabilità e 30+50 l/m³ per terreni a bassa permeabilità.

L'attenuazione del carico inquinante è dovuto al potere autodepurante del terreno, in quanto le reazioni che avvengono determinano una riduzione delle concentrazioni. Per i soluti organici si possono riportare i seguenti processi depurativi principali:

- dispersione;
- complessazione;
- reazioni acido-base;
- reazioni di ossido riduzione;
- degradazione biologica (persistenza);
- adsorbimento e desorbimento.

I processi depurativi considerati in questo studio riguardano i fenomeni di persistenza e di adsorbimento del terreno.

Il periodo di persistenza è definito come il tempo richiesto per il dimezzamento della quantità iniziale di una sostanza contenuta nelle acque (ALEXANDER, 1977). La legge di degradazione nel tempo di un composto biodegradabile è di tipo esponenziale:

$$C_t = C_0 \exp\left(-0.693 \frac{T_m}{t - t_0}\right)$$

ove C_t e C_0 sono le concentrazioni rispettivamente al tempo t e t_0 ,

T_m è il tempo di dimezzamento.

I composti organici sono principalmente decomposti dall'azione dei microrganismi, ed i tempi di dimezzamento variano notevolmente a seconda del composto considerato (tab. 2, adattata da BERETTA, 1992).

L'adsorbimento di una sostanza è rappresentato dalla concentrazione del composto sulla superficie di un solido o di un liquido, cioè sull'interfaccia gas-liquido, gas-solido o liquido-solido. Tale fenomeno può essere completamente o parzialmente reversibile. Nel secondo caso il desorbimento risulta incompleto ed una parte delle sostanze adsorbite non viene liberata.

Il fenomeno di adsorbimento nella matrice solida

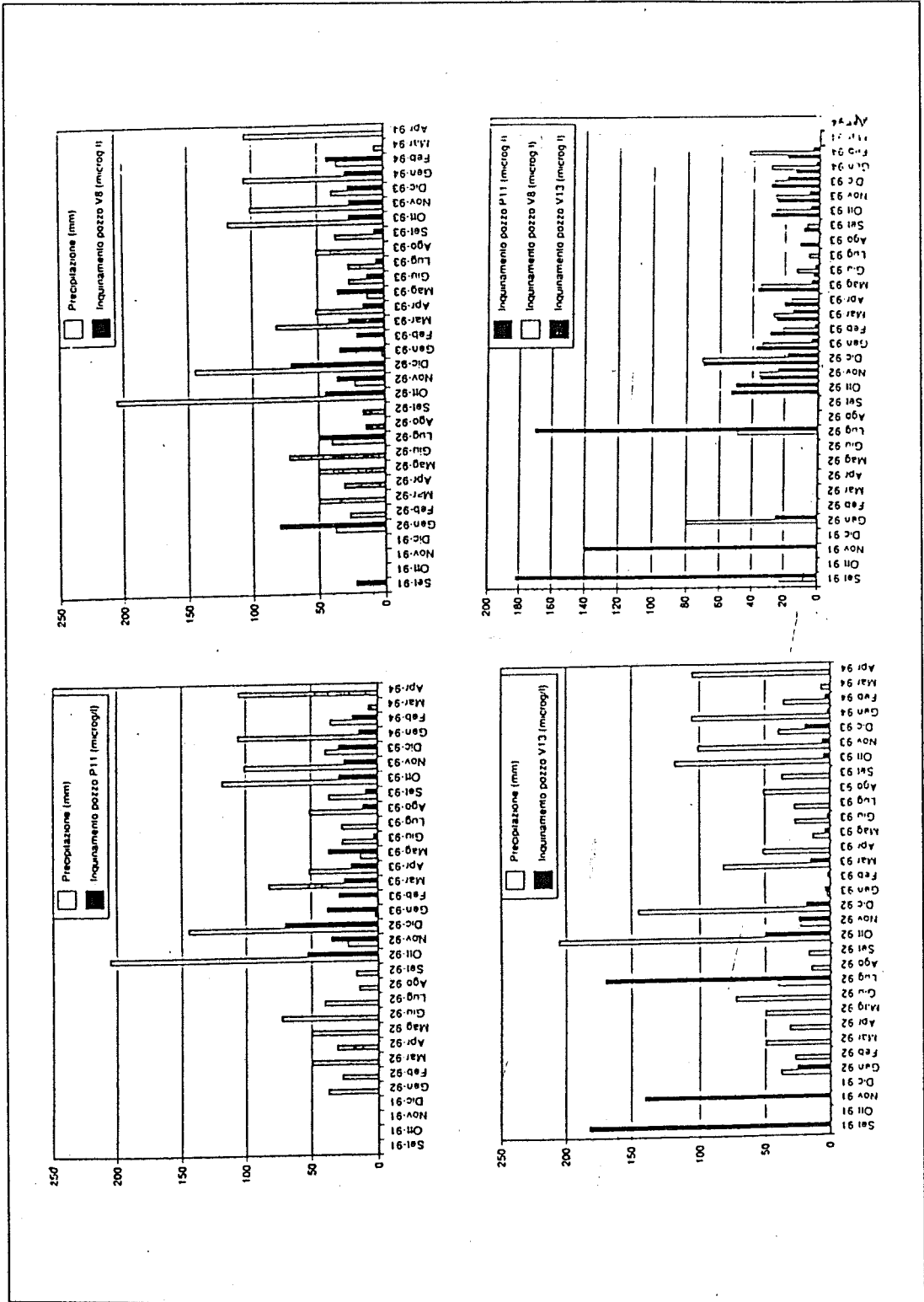


Figura 6. Relazione tra precipitazioni e concentrazioni di inquinanti nei pozzi principali.

Tabella 2. Tempi di dimezzamento stimati per idrocarburi (BERETTA, 1992).

Composti organici	Tempo di dimezzamento stimato
Idrocarburi	
Benzene	1 anno
Toluene	0,3 anni
Xylene	0,3 anni
Etilbenzene	0,3 anni
C3 Benzene	0,6 anni
Naftalene	0,6 anni
Idrocarburi alogenati	
Diclorometano	10 anni
Tricloroetano	2 anni
1.1.1. Tricloroetano	1 anno
Diclorobenzene	1 anno

del mezzo interessa anche le sostanze organiche, determinandone così la mobilità. L'estensione di questo fenomeno è direttamente collegato al contenuto organico all'interno della matrice solida, e quindi ad un parametro denominato frazione di carbonio organico (foc) di non facile determinazione specialmente in aree molto eterogenee.

Per determinare i tempi di percolazione di una massa inquinante attraverso la zona non satura, si considera il calcolo relativo ad una massa d'acqua. Il tempo di transito (*TOT*) di una massa d'acqua in una zona non satura viene determinato applicando la legge di Darcy per un flusso monodimensionale (*q*), ipotizzando il flusso costante, terreno omogeneo e gradiente idraulico unitario. In base a queste considerazioni la velocità di infiltrazione è data dalle seguenti equazioni (HELLER et al., 1985):

$$u = \frac{q}{\theta}$$

$$\theta = \left(\frac{q}{k}\right)^m \theta_s$$

ove *u* è la velocità di infiltrazione
q è la piovosità o flusso
θ è l'umidità o contenuto d'acqua
θ_s è l'umidità a saturazione
k è la conducibilità idraulica
m = 1/(2*b* + 3)
b è un parametro relativo alle caratteristiche

geologiche del terreno (HALL et al., 1977) da cui, considerando lo spessore della zona non satura (*B*), si ottiene il tempo di transito (*TOT*) della massa d'acqua:

$$TOT = \frac{B}{u}$$

Pertanto, note le caratteristiche della zona non satura, è possibile determinare il tempo necessario alla percolazione delle acque di pioggia nelle falde sotterranee, e cioè il tempo di risposta della falda alle precipitazioni. Per piogge ad elevata intensità (circa 30 mm/giorno), ipotizzando uno spessore del non saturo di 10 metri, si è ricavato un tempo di risposta nella variazione della concentrazione degli inquinanti di quasi 2 mesi, tempo confermato dalle correlazioni riportate in fig. 6.

Zona satura

Nella zona satura la concentrazione delle sostanze trasportate dalle acque si modifica a causa del fenomeno di dispersione e delle variazioni della composizione chimica.

Il fenomeno della dispersione idrodinamica dipende fortemente dalle condizioni di flusso e dalle proprietà del mezzo; eventuali eterogeneità presenti rivestono un ruolo determinante, in modo particolare per quanto concerne la conducibilità idraulica. Inoltre, composti reattivi (come i solventi organici e clorurati) manifestano un ritardo nella variazione qualitativa delle acque, esprimibile attraverso un opportuno coefficiente da introdurre nelle relazioni analitiche.

I parametri principali per la descrizione della migrazione degli inquinanti, quali solventi clorurati, nel mezzo saturo sono la densità (maggiore di 1) e la solubilità (molto bassa) degli stessi.

La parte immiscibile dei solventi clorurati, quando raggiunge la superficie della falda, inizia un flusso lento verso il basso spostando l'acqua contenuta nei pori, fino ad un livello impermeabile (BERETTA, 1992).

La configurazione geometrica del paleovalve conferma l'ipotesi relativa alla formazione di un pennacchio di inquinamento simile a quello proposto da SCHWILLE (1984). L'analisi temporale del fenomeno, le ipotesi relative alla modalità di inquinamento ed i calcoli effettuati per la determinazione dei parametri che descrivono la migrazione degli inquinanti nel mezzo saturo e non saturo, hanno permesso di definire alcuni punti che riassumono cronologicamente l'an-

damento delle sostanze inquinanti:

a) La massa di inquinante, per un primo periodo di circa due anni dallo «sversamento» del fusto e successive perdite localizzate, tende a percolare nel terreno non saturo fino a raggiungere la falda; contemporaneamente circa il 70 % della massa viene in parte trattenuta dal terreno ed in parte degradata dai microrganismi.

b) La massa di inquinante che raggiunge la falda tende a migrare verso il battente dell'acquifero. La maggior parte viene adsorbita dalla matrice solida del terreno, mentre in parte si solubilizza nelle acque di falda. Inizia a formarsi il pennacchio di inquinante nella direzione del flusso della falda; contemporaneamente il flusso rallenta in ragione del coefficiente di ritardo.

c) Dopo circa 4 anni il pennacchio, diluito di circa 100 volte, ha percorso circa 1 km longitudinalmente al paleoalveo, e dopo 9 anni ha raggiunto i pozzi V13 e V14 (Area 3). Nel frattempo la parte adsorbita dal terreno in zona satura viene rilasciata, costituendo così una forma di alimentazione continua. Tale alimentazione è ancora attiva (in ragione delle ultime concentrazioni rilevate nell'area 1) mentre il suo rifornimento dalla zona non satura risulta terminato da tempo in considerazione delle ultime analisi ricavate durante la prima fase di bonifica.

d) Allo stato attuale, la maggior parte della massa inquinante adsorbita è stata rilasciata. Nel luglio 1993 ancora si rilevavano concentrazioni massime di circa 1.5 mg/l. Le isoquinanti relative a 30 mg/l risultano ancora abbastanza stabili.

e) Oltre alla sopracitate considerazioni, si devono tener presente i fenomeni di emungimento estivo dei pozzi V13 e V14 e di precipitazione meteorica.

Infatti l'emungimento dei pozzi tende a richiamare le concentrazioni di inquinanti raccolte sul fondo impermeabile della falda.

La trielina, inoltre, per la sua pressione di vapore, tende ad evaporare raccogliendosi e saturando il terreno al di sopra del livello d'acqua della falda, per cui, ad ogni precipitazione atmosferica i vapori di trielina, intrappolati nel terreno, vengono in buona parte riportati dalla pioggia nella falda.

Chiaramente tutte le informazioni e le ipotesi, relative alle caratteristiche idrogeologiche dell'area ed alla migrazione degli inquinanti nei mezzi saturi e non, devono essere confermate dalle ulteriori prove in sito da effettuarsi durante la fase di bonifica delle falde.

PROGETTO DI BONIFICA

Il progetto prevede una prima fase relativa alla

bonifica del terreno inquinato, con asportazione della massa inquinata e trasporto ad una discarica di categoria 2B.

Successivamente il progetto prevede la bonifica delle falde da attuarsi mediante pompaggio delle acque di falde. Le opere di captazione previste sono due: i) un pozzo principale localizzato nella zona di maggior inquinamento; ii) una barriera idraulica costituita da tre pozzi, con la funzione di controllo della stato di inquinamento da situarsi a valle dell'area di maggior inquinamento.

Bonifica del terreno (I Fase)

Il lavoro di scavo è stato effettuato nell'agosto 1994. Lo scavo è stato eseguito fino a completa rimozione del volume inquinato. Costatato che gli ultimi prelievi non contenevano inquinanti rilevabili dalle analisi, si è proceduto al ritombamento dello scavo come di seguito indicato:

- riporto di 15 cm di bentonite laminata
- riporto di terreno argilloso fino alla quota del piano campagna
- riporto di terreno agrario fino a quota +0.50 dal piano campagna

Il ritombamento è stato effettuato a quota maggiore del piano campagna per limitare l'infiltrazione dell'acqua e compensare i cedimenti del terreno da riporto.

La massa totale di terreno asportato è pari a circa 200 t di terreno inquinato, tutti smaltiti in discarica controllata 2B (vedi fig. 7).

Bonifica delle acque di falda (II Fase)

Il progetto di bonifica delle acque di falda considera la captazione delle acque di due falde ipotizzate tra loro indipendenti e quindi la costruzione di due pozzi paralleli in modo da evitare infiltrazioni delle acque della falda superiore in quella inferiore.

Il progetto considera lo spessore complessivo dell'acquifero e la conducibilità idraulica relativa allo strato più permeabile. In base a questi dati si determina la massima portata a cui sono sottoposte le pompe dei singoli pozzi.

Per determinare la portata massima si sono considerate le portate degli afflussi di ricarica della falda; sulla base di valori empirici definiti in relazione alle caratteristiche idrogeologiche del mezzo, ricavate dalle portate di regime attuate in zona per i pozzi comunali e riportate nella tab. 2.

In base a tali considerazioni, è corretto considerare un valore di prelievo a regime compreso tra 0.6 ed 1.2 l/s per metro di abbassamento della falda, considerata come differenza tra livello statico e

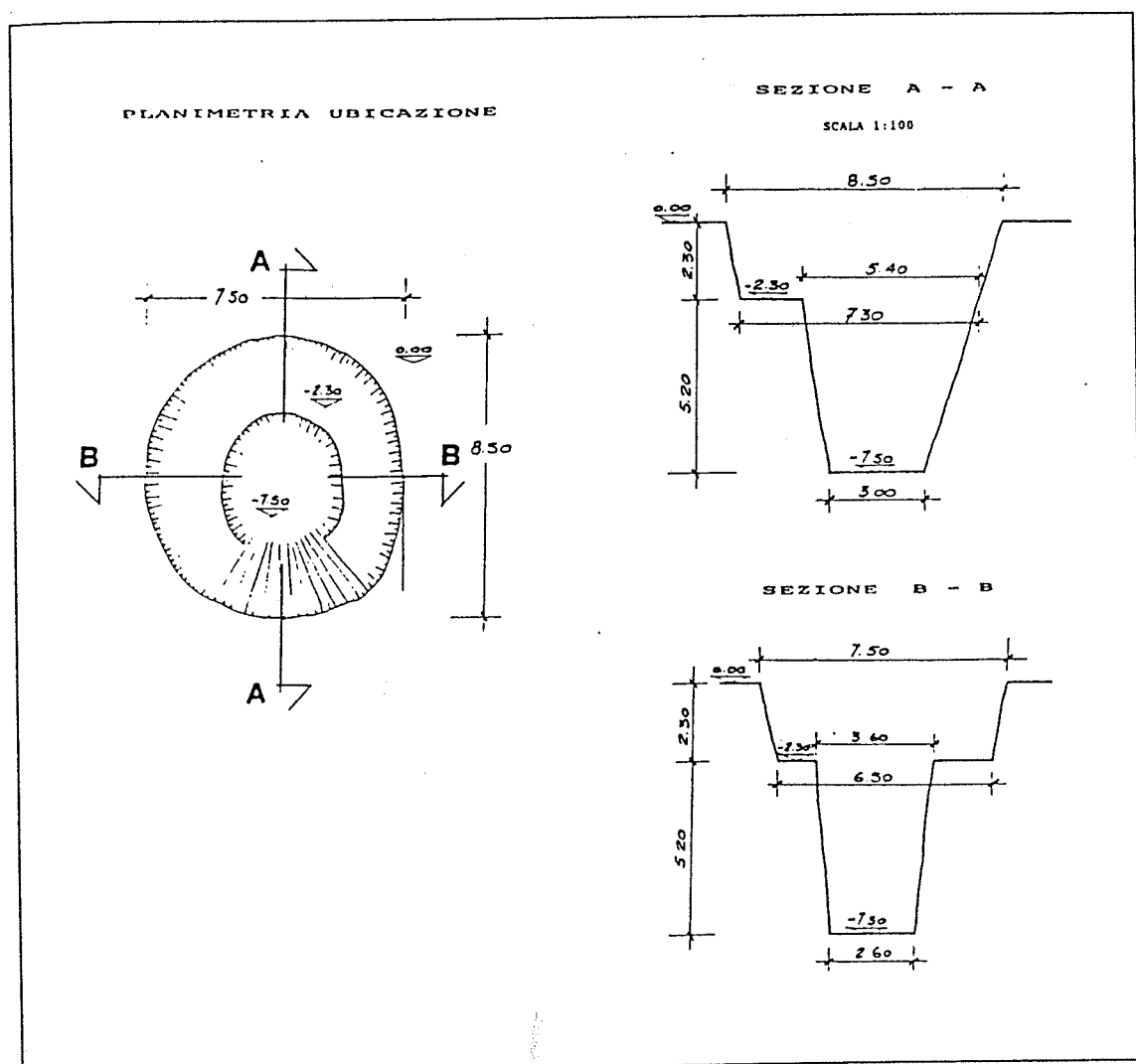


Figura 7. Progetto bonifica terreno (I fase).

dinamico della falda stessa. La variabilità dei due dati è conseguenza della diversa permeabilità del terreno e della presenza di lenti argillo limose intervallate alle ghiaie.

L'area di inquinamento risulta essere relativamente permeabile per quanto riguarda il primo strato ghiaioso, mentre presenta minore permeabilità complessiva per gli strati più profondi; pertanto, il progetto relativo al risanamento della prima falda prevede una portata di prelievo per metro lineare di abbassamento pari a 1.2 l/s, mentre quello relativo all'emungimento della falda confinata prevede una portata unitaria di 0.6 l/s.

In base a questi parametri, la portata relativa al

pozzo di prelievo della prima falda risulta pari a circa 20 m³/h, avendo considerato il livello dinamico coincidente con la quota ottimale in relazione alle condizioni di inquinamento, stratigrafiche ed idrogeologiche.

Dal valore della portata di progetto si può determinare la geometria del cono di influenza esplicitato dalla relazione:

$$Q = 2 ETi$$

ove Q = portata di progetto (m³/s);

E = valore della larghezza massima del cono di influenza (m);

T = trasmissività (m^2/sec);
 i = gradiente idraulico (m/m).

Dal calcolo si ricava un valore di E pari a 154 m. Il punto di stagnazione (punto estremo in direzione del flusso) risulta ad una distanza, D , dal pozzo lungo la linea di flusso principale pari a $D = E/\pi = 50$ m.

Analogamente si ricava per la seconda falda una portata di progetto pari a circa 20 m^3/h , avendo considerato uno spessore dell'acquifero pari a 10 m. Anche in questo caso si ricavano i valori dei parametri geometrici del cono di influenza:

$E = 77$ m

$D = 24$ m

Il progetto della barriera idraulica prevede allo stato attuale due diverse localizzazioni, in funzione dei tempi di attivazione del progetto e delle conseguenti concentrazioni degli inquinanti nelle aree ipotizzate.

La risoluzione della configurazione del flusso idrico e della disposizione dei pozzi viene attuata attraverso un semplice approccio proposto da JAVANDEL (1986). L'autore ha costruito alcune curve-tipo relative alla presenza di più pozzi, le quali individuano la zona di cattura e la distanza ottimale tra le captazioni in funzione del parametro $J = Q/bv$, ove « Q » è la portata di progetto, « b » è lo spessore dell'acquifero e « v » è la velocità del flusso idrico in falda.

Nel caso di specie si prevede la costruzione di una barriera idraulica composta di tre pozzi. Considerando l'opera nelle condizioni più sfavorevoli e ponendo un valore del parametro di JAVANDEL (J) pari a 150 m, al quale corrisponde un fronte di alimentazione pari a 450 m, si ottiene una portata di progetto pari a circa 20 m^3/h per ogni singolo pozzo.

MONITORAGGIO

La valutazione della efficacia dell'intervento è attuata con il monitoraggio di punti posti all'interno dell'area d'intervento ed all'esterno.

L'analisi dei dati di inquinamento definisce chiaramente l'ambito arealmente inquinato ed i pozzi che presentano un tasso elevato d'inquinante. Da tali elementi e dalle opere previste si sono definiti i pozzi oggetto di controllo.

Il controllo, pertanto, viene effettuato nei pozzi di progetto e in quelli che presentano il maggiore inquinamento e trend negativo (V8, A3, A4, V13).

Il monitoraggio complessivo prevede la lettura dei seguenti parametri:

1)livelli della falda (statico e dinamico) mediante piezometri elettrici;

2)precipitazioni (pluviometro di Cattolica);

3)grado di inquinamento da solventi organici e clorurati;

4)controllo di eventuali consolidamenti mediante estensimetri e rilievo topografico di precisione.

Il controllo degli inquinanti avrà cadenza mensile e verrà effettuato nelle condizioni a falda statica (senza emungimento) e falda dinamica (dopo un pompaggio di almeno 10 ore).

Nella valutazione del monitoraggio si considererà che all'interno dell'acquifero sono presenti disomogeneità locali che possono determinare una diversità delle acque captate a differenti livelli, a causa principalmente delle caratteristiche fisiche della massa inquinante che tende a depositarsi sui battenti impermeabili; pertanto sarà necessario un prelievo selettivo di campioni d'acqua a diverse profondità.

Infine, gli eventuali consolidamenti del terreno saranno misurati in corrispondenza degli interventi mediante due estensimetri ad asta per il rilevamento dei micromovimenti del terreno. Per una corretta lettura di eventuali cedimenti areali verrà eseguito un rilievo topografico altimetrico di precisione, con riferimento a capisaldi esterni all'area.

CONCLUSIONI

Lo studio compiuto conferma la possibilità operativa di condurre, con relativa facilità, il controllo ed il risanamento di aree soggette ad inquinamento del suolo e del sottosuolo, purchè vengano adottati i criteri più moderni di approccio al problema, tenendo conto delle variabili ambientali e territoriali dei siti, nonché delle possibili interazioni con l'uso attuale e futuro del territorio.

A tal proposito sono allo studio diverse possibilità di smaltimento delle acque di risulta, che presenteranno probabilmente una concentrazione in organo-alogenati entro i limiti di accettabilità previsti per lo scarico in acque superficiali (e qualora non lo fossero si dovrà provvedere al loro trattamento), ma che tuttavia devono essere allontanate e smaltite in modo da evitare il loro ritorno in falda, attraverso i corsi d'acqua interagenti con l'acquifero, tale da garantire l'assenza di contaminazione con altre matrici ambientali.

Ancora oggi in Italia non esiste e, per quanto ne sappiamo, non è nemmeno allo studio a livello legislativo, se si escludono alcuni tentativi a livello regionale, una metodologia tecnico-amministrativa

nel campo della bonifica dei suoli e delle acque sotterranee; nè, tantomeno, un riferimento per quanto attiene i limiti raggiungibili con la bonifica e le relative conseguenze amministrative ed urbanistiche, dovendosi ritenere irrealizzabile, nella maggior parte dei casi, il ripristino dello status quo antea erat.

Nel caso specifico crediamo che il monitoraggio in corso d'opera potrà fornire utili elementi. È infatti da prevedere un progressivo smorzamento «a dente di sega» della concentrazione durante i ripetuti periodi di pompaggio a cui verrà sottoposto il sistema della barriera idraulica, fino a raggiungere un livello relativamente basso e costante, che potrà concordamente essere ritenuto come «valore di fondo», che sancirà il termine dell'opera di bonifica.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ALEXANDER M. (1977) - *Introduction to soil microbiology*. John Wiley & Sons, New York.
- [2] BERETTA G.P. (1992) - *Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee*. Pitagora Editrice, Bologna.
- [3] HALL D.G.M. et al. (1977) - *Water retention, porosity and density of field soils*. Soil Survey Technical Monograph 9, Rothamsted Experimental Station, Harpendon, England.
- [4] HELLER P.R. et al. (1985) - *Moisture and textural variations in unsaturated soils sediments near the Hadford Wye Barricade*. Pacific Northwest Laboratory, PNL-5377, Richland.
- [5] JAVANDEL I. (1986) - *Application of capture-zone type curves for aquifer cleanup*. In: Groundwater hydrology, contamination and remediation. Khanbilvardi R.M., Fillos J. Editors, Scientific Publications Co., Washington D.C.
- [6] KINZELBACH, W. (1986) - *Groundwater modelling*. Elsevier, Amsterdam.
- [7] PERICOLI (1981) - *Indagini idrogeologiche sulla presenza di composti azotati nelle falde idriche*.

Comune di San Giovanni in Marignano, Prov. di Forlì, Italia.

- [8] SCHWILLE F. (1984) - *Migration of organic fluids immiscible with water in the unsaturated zone*. In: Pollutants in Porous Media. Yaron B., Dagan G., Goldshmid J. Editors, Springer-Verlag, Berlin.

APPENDICE

Normativa di riferimento

– Legge 10 maggio 1976, n. 319 «Norme per la tutela delle acque di inquinamento».

– Legge 24 dicembre 1979, n. 650 «Integrazioni e modifiche delle Leggi 16/4/1973, n. 171 e 10/5/1976, n. 319, in materia di tutela delle acque dall'inquinamento».

– D.P.R. 24 maggio 1988, n. 236 «Attuazione della direttiva CEE n. 80/778 concernente la qualità delle acque destinate al consumo umano, ai sensi dell'art. 15 della Legge 16 aprile 1987, n. 183».

– successive integrazioni e modifiche.

In particolare per la parte relativa alla bonifica delle falde si fa presente che quando la concentrazione totale di solventi clorurati è inferiore a 1 mg/l si è nei limiti prescritti dalla tabella A della Legge Merli e quindi è possibile il recapito delle acque emunte dai pozzi in corsi d'acqua superficiali. Inoltre, quando la concentrazione totale di solventi clorurati è inferiore a 2 mg/l si è nei limiti prescritti dalla tabella C della Legge Merli e quindi è possibile il recapito delle acque emunte dai pozzi in fognature pubbliche.

Nella fase progettuale queste ipotesi sono da verificare in ragione del possibile riafflusso in falda (alvei e condotte disperdenti) e della officiosità delle opere idrauliche (fognature e depuratori).

Il limite di potabilità prevista dal DPR 236/88 per composti organo-alogenati è di 30 µm/l; ad esso vanno riferite le concentrazioni delle acque sotterranee a prevalente e privilegiato uso idropotabile.