



Éupolislombardia

Istituto superiore per la ricerca,
la statistica e la formazione



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

Metodi di caratterizzazione dei siti contaminati

Giovanni Pietro Beretta
Via Mangiagalli 34 – 20133 Milano
Email: giovanni.beretta@unimi.it



PROCESSO DINAMICO DI CARATTERIZZAZIONE DI UN SITO CONTAMINATO

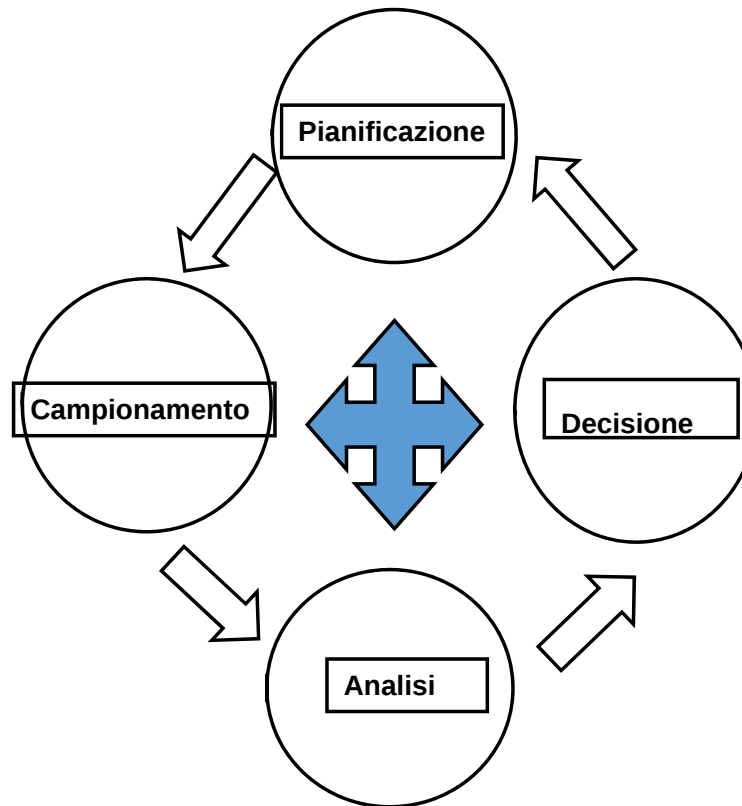
CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI UN SITO CONTAMINATO

Gestione delle incertezze

Pianificazione
sistematica del
lavoro

Utilizzo di misure di
campo in tempo
reale

Strategia per un
piano di lavoro
dinamico



(U.S. Environmental Protection Agency, 2006 e 2010)



METODI TRADIZIONALI E INNOVATIVI DI DI CARATTERIZZAZIONE DI UN SITO CONTAMINATO

Metodi tradizionali utilizzabili per la caratterizzazione

Ricostruzione del modello geologico del sottosuolo

Standardizzazione della restituzione dei dati

Necessità di standardizzazione nelle diverse fasi

Metodi innovativi di caratterizzazione di siti contaminati

Metodi geofisici

Metodi di caratterizzazione per composti volatili

Metodi innovativi di caratterizzazione derivati dalle tecniche “direct push”

Metodi innovativi di campionamento di acque sotterranee – tecnica low flow

Metodi di misura flussi idrici verticali nei pozzi

Metodi isotopici

Metodi di caratterizzazione microbica

Metodi di fingerprinting

METODI DI CARATTERIZZAZIONE DI SITI CONTAMINATI

Metodi Tradizionali	Metodi Innovativi
Metodi derivati da consolidate tecniche di indagine geologiche, geotecniche, geofisiche e idrogeologiche Utilizzo nella definizione del modello geologico concettuale del sottosuolo Misure condizionate dall'effetto-scala Limiti nella definizione del modello concettuale della contaminazione per eterogeneità del mezzo e caratteristiche degli inquinanti Problemi nella predisposizione del progetto di bonifica e nella sua realizzazione Costi contenuti di utilizzo	Metodi specificatamente studiati per valutare la qualità ambientale in acqua, suolo e gas interstiziale Contribuiscono alla definizione della distribuzione tridimensionale della contaminazione Riducono il possibile rilevante errore nel campionamento delle matrici ambientali Consentono una progettazione e realizzazione della bonifica più affidabile Costi più elevati rispetto alle tecniche tradizionali



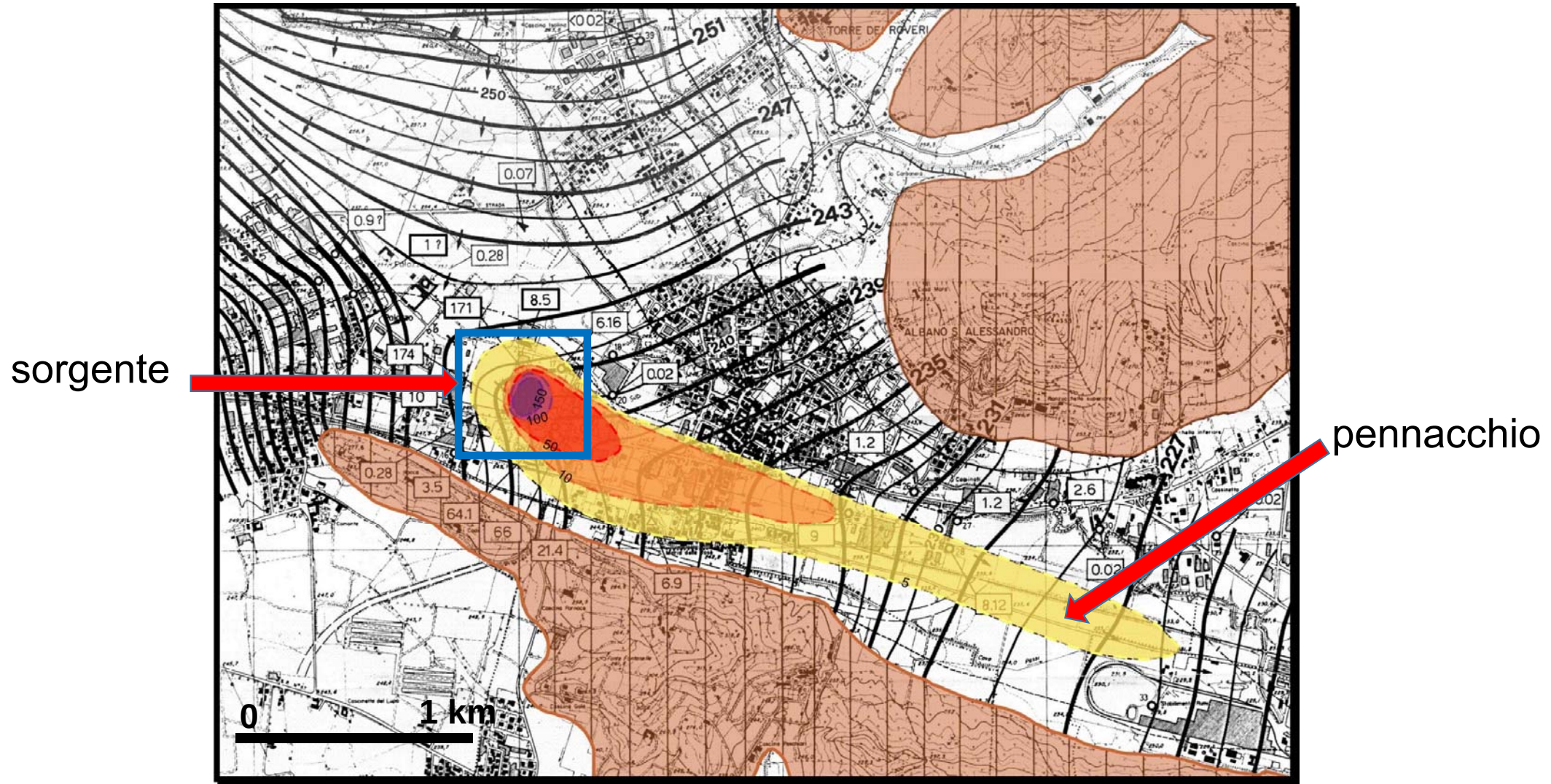
SORGENTE/PENNACCHIO E DISTRIBUZIONE DEI CONTAMINANTI

ELEMENTI DA CONSIDERARE NEL VALUTARE IL DESTINO DEI CONTAMINANTI NELLE ACQUE SOTTERRANEE

- 1 – Sorgente e pennacchio
- 2 – Permeabilità dei litotipi in area pennacchio e sorgente
- 3 – Fasi (iniziale, intermedia, finale di contaminazione)
- 4 – Caratteristiche dei complessi idrogeologici lombardi

**Concentrazioni attese per solventi clorurati
e Cromo esavalente**

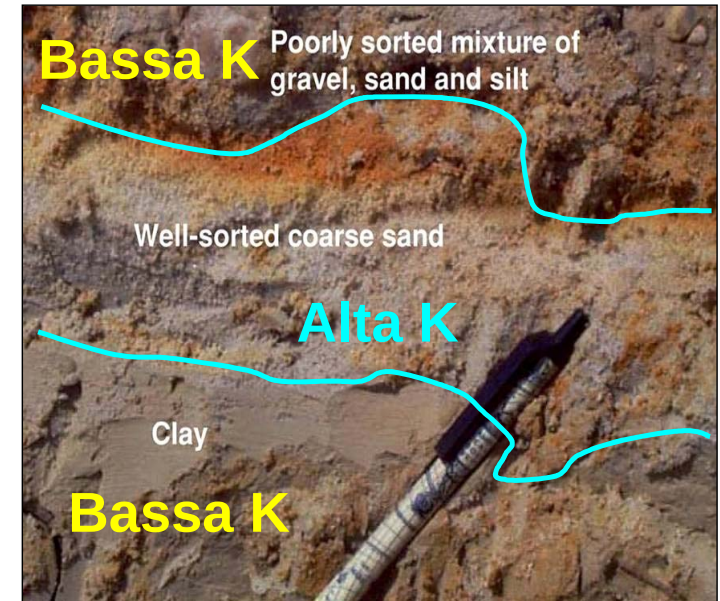
ESEMPIO DI PENNACCHIO (PLUME) DI INQUINANTE



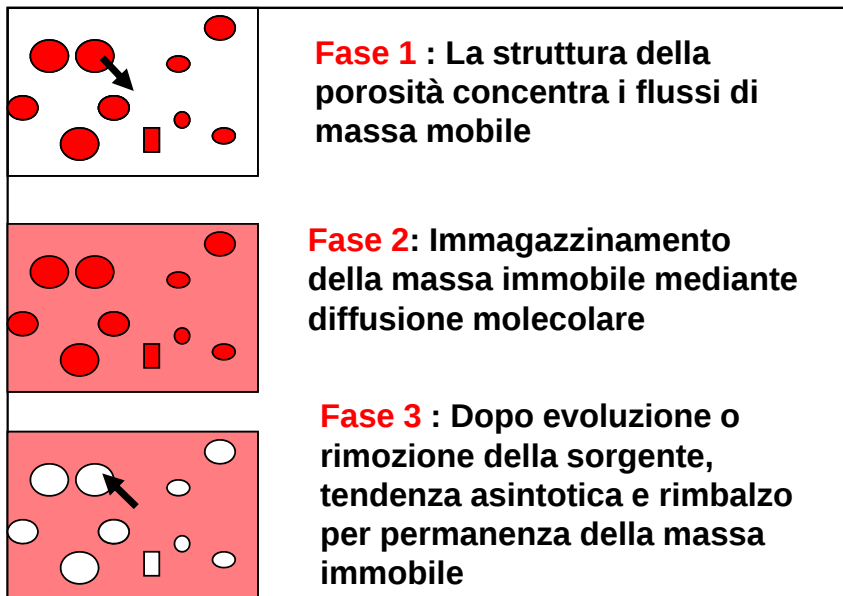
La massa di contaminante complessiva M_{tot} immessa nel sottosuolo si distribuisce nelle acque nel modo seguente:

- massa mobile M_m : dovuta al moto di avvezione e dispersione idrodinamica;
- massa immobile: M_{im} : dovuta al moto di diffusione molecolare.

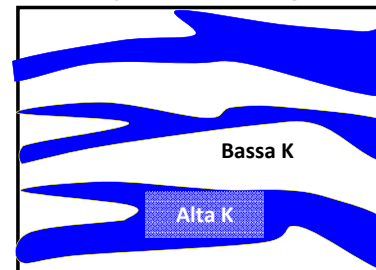
DOMINIO DUALE Flussi preferenziali



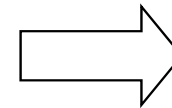
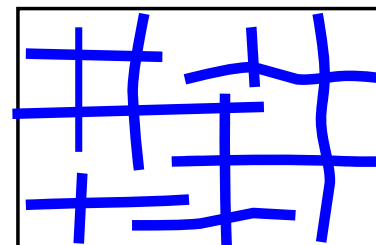
Zheng and Gorelick (2003)



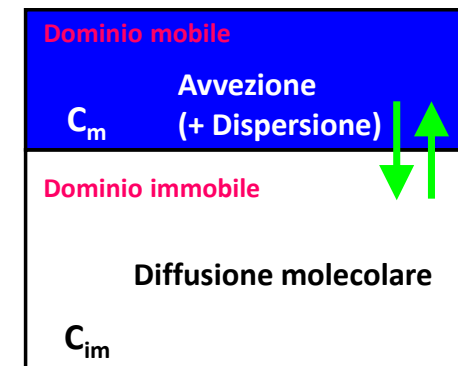
Mezzo poroso eterogeneo



Mezzo fessurato



Dominio a porosità duale

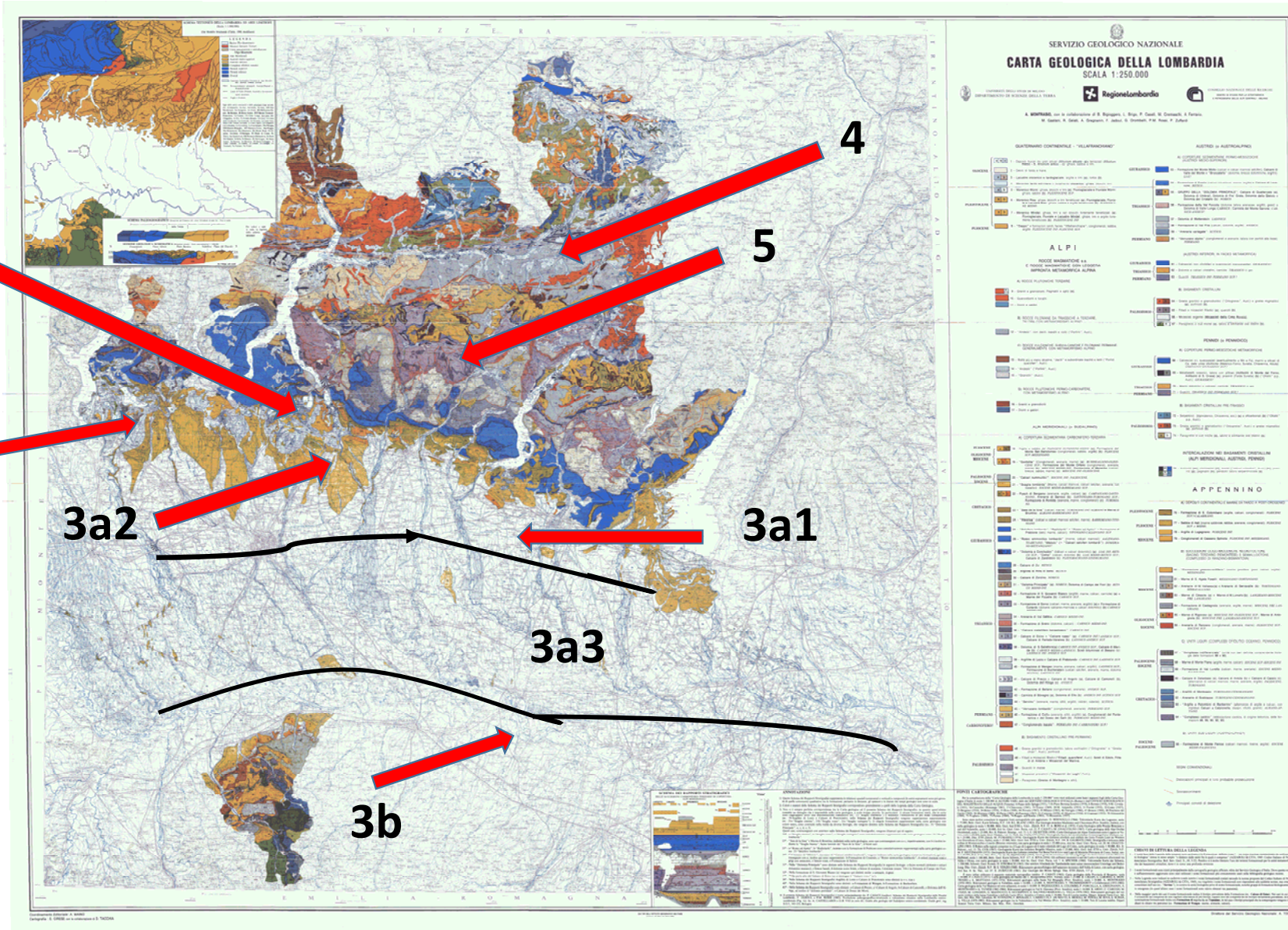


Trasferimento di massa tra i due domini

$$C_{tot} = C_m + C_{im}$$

Guan et al. (2008)

**COMPLESSI IDROGEOLOGICI
LOMBARDI E
CONCENTRAZIONI ATTESE DI
SOLVENTI CLORURATI
E CROMO ESAVALENTE**



INDIVIDUAZIONE COMPLESSI IDROGEOLOGICI LOMBARDI

1-Depositi glaciali

2-Depositi lacustri

3a1-Alta pianura
3a2-Terrazzi

3a3-Bassa pianura

3b-Depositi Po

4-Rocce poco permeabili

5-Rocce permeabili

SINTESI DI AMBIENTI GEOLOGICI LOMBARDI IN RELAZIONE ALLE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE E ALLA MOBILITÀ DEI **SOLVENTI CLORURATI**

Ambiente deposizionale	Permeabilità (m ²)	Conducibilità idraulica (m/s)	Porosità totale (%)	Proprietà
Tipo 1 – Depositi glaciali	$k > 10^{-14}$	$K > 10^{-7}$	5 - 40	Sensibili variazioni di permeabilità (depositi glaciali, delta, glaciolacustri, etc.)
Tipo 2 – Depositi lacustri	$k < 10^{-14}$	$K < 10^{-7}$	5 - 40	Bassa permeabilità senza percorsi preferenziali dovuti a permeabilità secondaria dovuta a fratture
Tipo 3a1, 3a2 – Depositi alluvionali con canali intrecciati/anastomosati (alta/media permeabilità).	$k > 10^{-11}$	$K > 10^{-5}$	5 – 40	Litotipi molto permeabili (ghiaie e sabbie) con ridotti orizzonti poco permeabili
Tipo 3a3 – Depositi fluviali meandriformi (bassa permeabilità)	$k > 10^{-12}$	$K > 10^{-7}$	5 – 40	Litotipi con media permeabilità (sabbie) con frequenti orizzonti poco permeabili
Tipo 3b – Depositi fluviali meandriformi del Fiume Po (bassa/media permeabilità)	$k > 10^{-11}$	$K > 10^{-6}$	5 – 40	Litotipi con media permeabilità (sabbie) e scarsi orizzonti poco permeabili
Tipo 4 – Rocce fessurate con bassa porosità della matrice	$k < 10^{-17}$	$K < 10^{-10}$	< 1 (per fratture e matrice)	Molto bassa porosità della matrice e permeabilità dovuta alle fratture (ad esempio rocce cristalline e calcareo marnose)
Tipo 5 – Rocce fessurate con alta porosità della matrice	$k < 10^{-17}$	$K < 10^{-10}$	< 1 (fratture) 1 – 40 (matrice)	Sistemi di fratture e cavità nella matrice cavità –(calcari, dolomie, rocce evaporitiche)

Potenziale distribuzione dei solventi clorurati nei principali complessi idrogeologici lombardi

sorgente e pennacchio

permeabilità

fasi

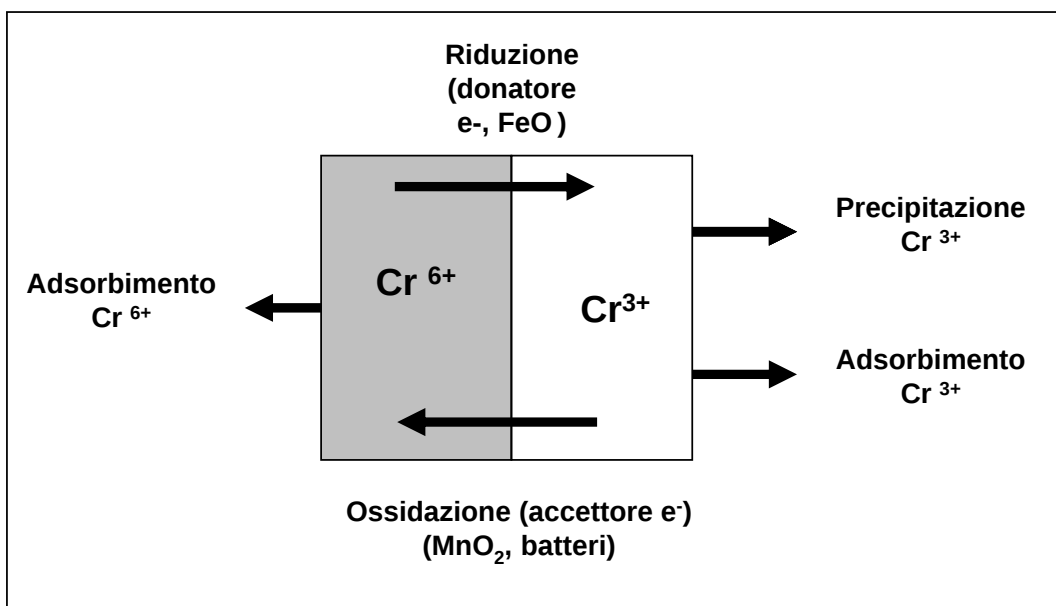
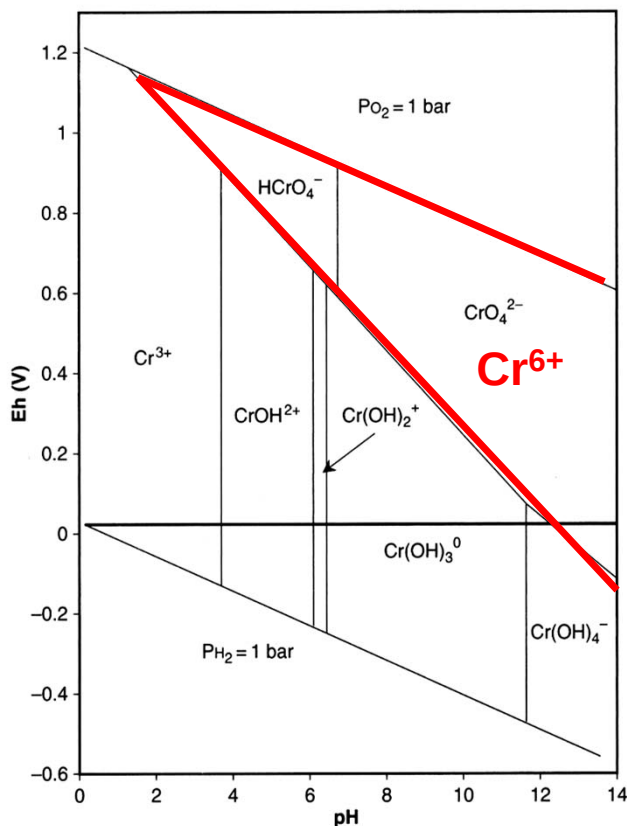
complessi
idrogeologici

	FASE INIZIALE						FASE INTERMEDIA						FASE FINALE						SOLVENTI CLORURATI	
	Zone		Sorgente		Pennacchio		Zone		Sorgente		Pennacchio		Zone		Sorgente		Pennacchio			
TIPO 1	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa		
	Permeabilità						Permeabilità						Permeabilità							
	Gassosa		0	2	1	0	Gassosa		1	2	1	1	Gassosa		1	2	1	2		
	Separata		0	4			Separata		2	3			Separata		1	1				
	Acquosa		0	2	1	0	Acquosa		2	2	3	2	Acquosa		2	2	2	2		
Adsorbita		0	2	2	0	Adsorbita		2	2	3	3	Adsorbita		2	2	2	2			
TIPO 2	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa		
	Permeabilità						Permeabilità						Permeabilità							
	Gassosa		0			0	Gassosa		0				Gassosa		0			0		
	Separata		4				Separata		3				Separata		2					
	Acquosa		3			1	Acquosa		3			2	Acquosa		3			2		
Adsorbita		3			1	Adsorbita		3			3	Adsorbita		3			3			
TIPO 3A1	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa		
	Permeabilità						Permeabilità						Permeabilità							
	Gassosa			2	2		Gassosa		1	2	1		Gassosa		0	1	1			
	Separata			4			Separata			3			Separata			0				
	Acquosa			3	2		Acquosa			4	3		Acquosa			2	2			
Adsorbita			2	1		Adsorbita			2	2		Adsorbita			2	2				
TIPO 3A2	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa		
	Permeabilità						Permeabilità						Permeabilità							
	Gassosa		1	1	2	0	Gassosa		1	1	1	0	Gassosa		0	0	0	0		
	Separata		1	3			Separata		1	2			Separata		1	1				
	Acquosa		2	3	2	1	Acquosa		2	4	3	1	Acquosa		2	3	3	1		
Adsorbita		2	2	1	0	Adsorbita		2	2	2	1	Adsorbita		2	2	2	1			
TIPO 3A3 e 3B	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa		
	Permeabilità						Permeabilità						Permeabilità							
	Gassosa		0	0	0	0	Gassosa		1	1	1	0	Gassosa		0	0	0	0		
	Separata		1	3			Separata		3	2			Separata		2	1				
	Acquosa		2	3	2	1	Acquosa		3	4	2	2	Acquosa		3	3	2	2		
Adsorbita		3	2	1	1	Adsorbita		3	2	2	2	Adsorbita		3	2	2	2			
TIPO 4	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa		
	Permeabilità						Permeabilità						Permeabilità							
	Gassosa			2	1		Gassosa			2	2		Gassosa			2	2			
	Separata			4			Separata			3			Separata			1				
	Acquosa			1	1		Acquosa			2	3		Acquosa			2	2			
Adsorbita			2	1		Adsorbita			2	3		Adsorbita			2	3				
TIPO 5	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa	Fase		bassa	alta	alta	bassa		
	Permeabilità						Permeabilità						Permeabilità							
	Gassosa		0	2	1	0	Gassosa		1	2	2	1	Gassosa		1	2	1	1		
	Separata		0	4			Separata		2	3			Separata		0	1				
	Acquosa		0	3	3	1	Acquosa		2	3	3	2	Acquosa		2	2	1	2		
Adsorbita		0	2	1	1	Adsorbita		2	2	2	1	Adsorbita		2	2	2	1			

concentrazioni attese

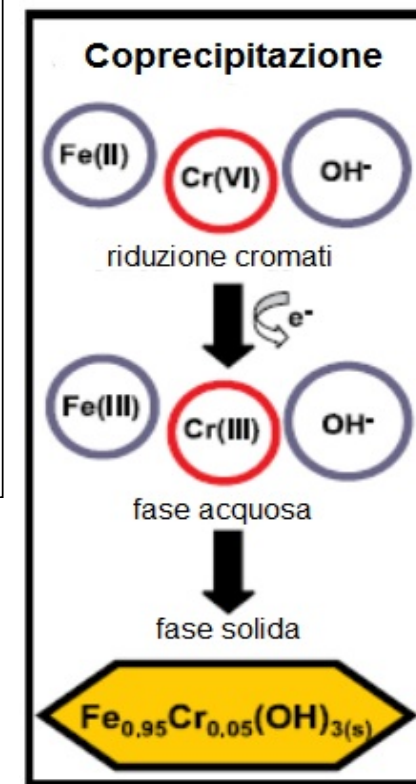
concentrazioni
attese

CONDIZIONI GEOCHIMICHE DI BASE E PRESENZA DI CROMO TRIVALENTE ED ESAVALENTE



La presenza di batteri e di MnO_2 consente l'ossidazione da Cr^{3+} a Cr^{6+} . In alcuni trattamenti circa il 15% di Cr^{3+} precipitato si può riossidare in presenza di ossidi di Mn (Hawley E.L., et al., 2004)

La presenza di ossidi di FeO può determinare la precipitazione di un minerale di Fe e Cr



SINTESI DI AMBIENTI GEOLOGICI LOMBARDI IN RELAZIONE ALLE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE E ALLA MOBILITÀ DEL **CROMO ESAVALENTE**

Ambiente deposizionale	Permeabilità (m ²)	Conducibilità idraulica (m/s)	Porosità totale (%)	Proprietà idrogeologiche	Condizioni geochemiche generali
Tipo 1 – Depositi glaciali	$k > 10^{-14}$	$K > 10^{-7}$	5 - 40	Sensibili variazioni di permeabilità (depositi glaciali, delta, glaciolacustri, etc.)	Salvo in paleobacini lacustri, risulta scarsa la componente di sostanza organica. Nei depositi più antichi si hanno in superficie paleosuoli, con ricchezza di ossidi di Fe ³⁺ .
Tipo 2 – Depositi lacustri	$k < 10^{-14}$	$K < 10^{-7}$	5 - 40	Bassa permeabilità senza percorsi preferenziali dovuti a permeabilità secondaria dovuta a fratture	Nei depositi lacustri si hanno condizioni redox ed abbondanza di materia organica (torbe). Scarso Ossigeno disciolto e presenza di Fe ²⁺ e Mn ²⁺
Tipo 3a1, 3a2 – Depositi alluvionali con canali intrecciati/anastomosati (alta/media permeabilità).	$k > 10^{-11}$	$K > 10^{-5}$	5 – 40	Litotipi molto permeabili (ghiaie e sabbie) con ridotti orizzonti poco permeabili	Nella zona a terrazzi si hanno paleosuoli con presenza di ossidi di Fe ³⁺ (“ferretto”); paleosuoli talora presenti in profondità (argille gialle, argille rosse, etc.). Generali condizioni ossidate con scarsa materia organica
Tipo 3a3 – Depositi fluviali meandriformi (bassa permeabilità)	$k > 10^{-12}$	$K > 10^{-7}$	5 – 40	Litotipi con media permeabilità (sabbie) con frequenti orizzonti poco permeabili	Prevalenti condizioni redox, con abbondanza di Fe ²⁺ e Mn ²⁺ nelle acque e talora sostanza organica (torbe). Scarso Ossigeno disciolto
Tipo 3b – Depositi fluviali meandriformi del Fiume Po (bassa/media permeabilità)	$k > 10^{-11}$	$K > 10^{-6}$	5 – 40	Litotipi con media permeabilità (sabbie) e scarsi orizzonti poco permeabili	Prevalenti condizioni redox, con Fe ²⁺ e Mn ²⁺ nelle acque e talora sostanza organica (torbe). Scarso Ossigeno disciolto
Tipo 4 – Rocce fessurate con bassa porosità della matrice	$k < 10^{-17}$	$K < 10^{-10}$	< 1 (per fratture e matrice)	Molto bassa porosità della matrice e permeabilità dovuta alle fratture (ad esempio rocce cristalline e calcareo marnose)	Limitata disponibilità di ossidi di Fe ²⁺ e Mn ²⁺ in fessure. Assenza di sostanza organica. Mineralizzazione a solfuri in area prealpina e alpina. Bassa alcalinità (ad eccezione marmi, calcescisti e calcari marnosi),
Tipo 5 – Rocce fessurate con alta porosità della matrice	$k < 10^{-17}$	$K < 10^{-10}$	< 1 (fratture) 1 – 40 (matrice)	Sistemi di fratture e cavità nella matrice cavità – (calcari, dolomite, rocce evaporitiche)	Minerali di alterazione contenenti Fe e Al, nonché concrezioni di ossidi di Mn. Presenza di solfati in evaporiti. Mineralizzazioni a solfuri in area prealpina

Potenziale distribuzione del **Cromo esavalente** nei principali complessi idrogeologici lombardi

sorgente e pennacchio

permeabilità

fasi

complessi
idrogeologici

	FASE INIZIALE					FASE INTERMEDIA					FASE FINALE					CROMO ESAVALENTE	
	Fase \ Zone	Sorgente		Pennacchio		Fase \ Zone	Sorgente		Pennacchio		Fase \ Zone	Sorgente		Pennacchio		assente	
TIPO 1	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	0 non impattata	
	Gassosa					Gassosa					Gassosa					1	1 ug/l
	Separata					Separata					Separata					2	10 ug/l
	Acquosa		4	2		Acquosa	3	4	3	2	Acquosa	2	2	2	2	3	100 ug/l
	Adsorbita		3	2		Adsorbita	3	4	2	2	Adsorbita	2	2	1	2	4	1000 ug/l
TIPO 2	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa		
	Gassosa					Gassosa					Gassosa						
	Separata					Separata					Separata						
	Acquosa	4			0	Acquosa	3			2	Acquosa	3			1		
	Adsorbita	4			0	Adsorbita	4			2	Adsorbita	3			2		
TIPO 3A1	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa		
	Gassosa					Gassosa					Gassosa						
	Separata					Separata					Separata						
	Acquosa		4	2	1	Acquosa	2	4	3	2	Acquosa	2	3	2	1		
	Adsorbita		3	2	1	Adsorbita	2	3	2	2	Adsorbita	2	2	2	1		
TIPO 3A2	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa		
	Gassosa					Gassosa					Gassosa						
	Separata					Separata					Separata						
	Acquosa		4	2	1	Acquosa	2	4	3	2	Acquosa	2	3	2	1		
	Adsorbita		3	2	2	Adsorbita	2	3	2	2	Adsorbita	2	2	2	1		
TIPO 3A3 e 3B	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa		
	Gassosa					Gassosa					Gassosa						
	Separata					Separata					Separata						
	Acquosa		4	2	1	Acquosa	2	4	2	1	Acquosa	2	2	1	1		
	Adsorbita		3	2	2	Adsorbita	3	3	2	2	Adsorbita	2	2	2	1		
TIPO 4	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa		
	Gassosa					Gassosa					Gassosa						
	Separata					Separata					Separata						
	Acquosa	0	3	1	1	Acquosa	2	3	2	1	Acquosa	1	0	1	1		
	Adsorbita	0	2	2	1	Adsorbita	2	2	1	1	Adsorbita	1	0	1	1		
TIPO 5	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa	Permeabilità	bassa	alta	alta	bassa		
	Gassosa					Gassosa					Gassosa						
	Separata					Separata					Separata						
	Acquosa	0	4	3	1	Acquosa	2	4	2	1	Acquosa	2	2	0	1		
	Adsorbita	0	2	2	1	Adsorbita	2	2	2	1	Adsorbita	1	1	1	1		

concentrazioni
attese



PARAMETRI DESCRITTIVI: MASSA E CONCENTRAZIONE DEGLI INQUINANTI

PARAMETRI DESCRITTIVI DELLE CONDIZIONI AMBIENTALI CONCENTRAZIONE - MASSA

Per valutare l'efficacia di un intervento di bonifica è stato da sempre utilizzato il concetto di valutazione dei "limiti finali di concentrazione", mentre sarebbe più opportuno applicare anche un altro concetto costituito da "**ordine di grandezza del flusso di massa dei contaminanti**".

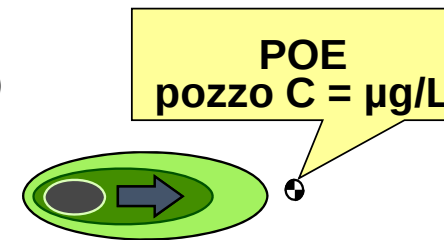
In questo senso assumono una importanza fondamentale:

- la **determinazione della massa di contaminanti** sia all'interno che all'esterno (pennacchio) di un sito contaminato;
- il monitoraggio dell'attenuazione naturale e **la diminuzione delle concentrazioni e soprattutto della massa di contaminanti a valle di un sito.**

CONCENTRAZIONE E MASSA IN UN PENNACCHIO

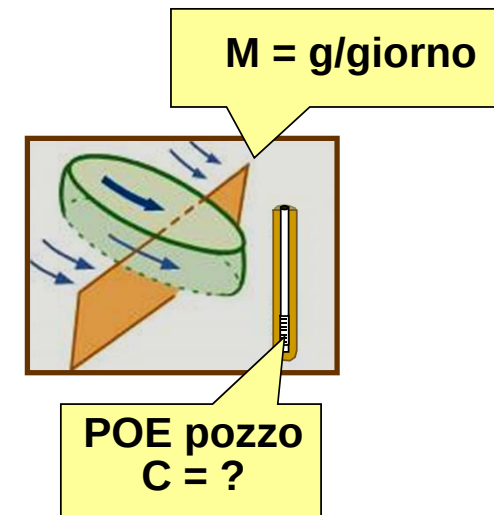
Approccio tradizionale: Misura concentrazione C (g/m³) pennacchio esistente per stima:

- Impatto al pozzo recettore
- Aliquota attenuazione naturale
- Interventi di risanamento



Approccio di deflusso di massa: Definizione di flusso di massa M (g/giorno) lungo sezioni del pennacchio per stima:

- Impatto al pozzo recettore
- Aliquota attenuazione naturale
- Interventi di risanamento
- Priorità di interventi a scala regionale
- Confronto efficacia barriere idrauliche/interventi in situ
- Stima dei tempi di recupero

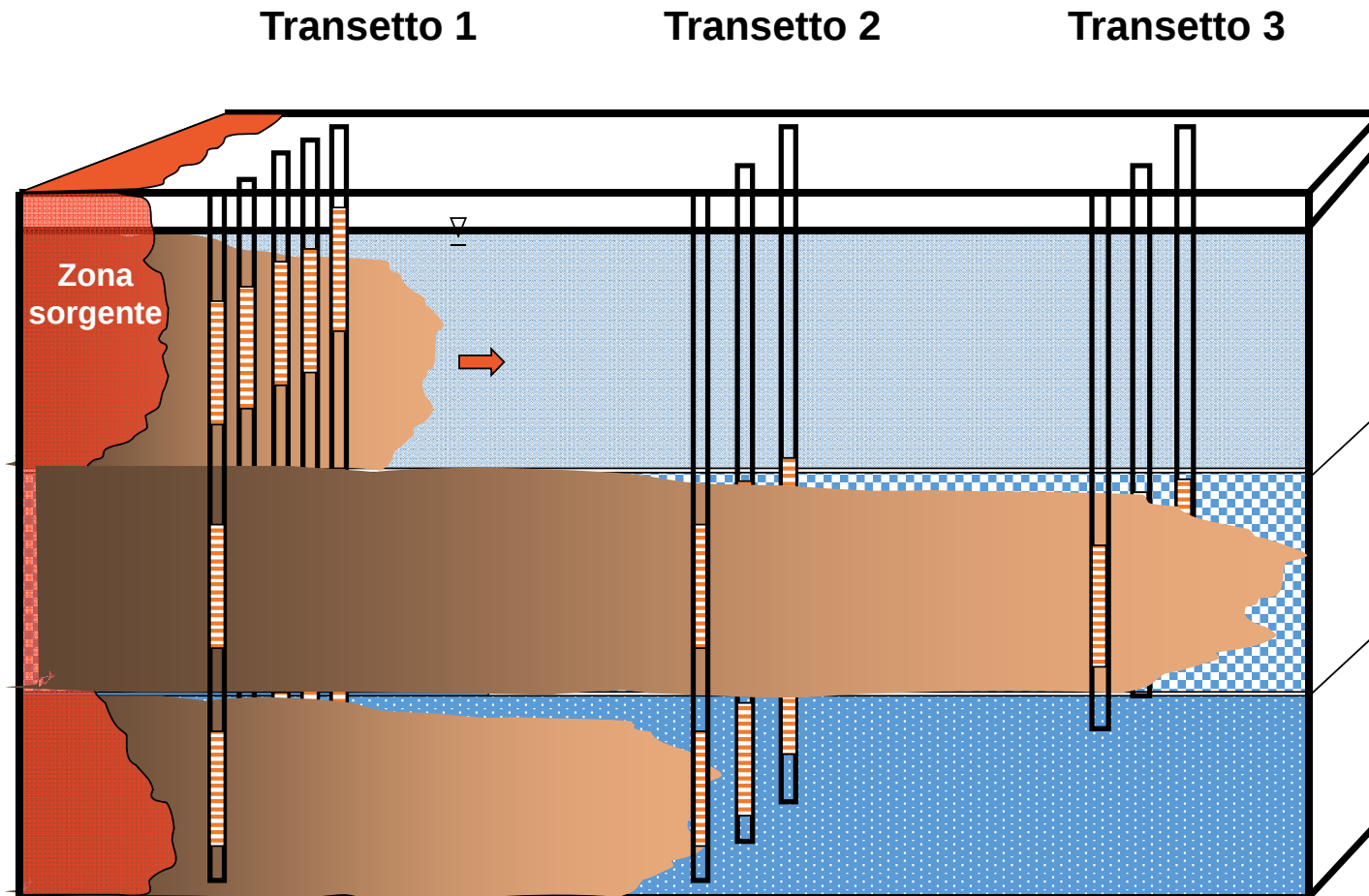


INDIVIDUAZIONE MASSA DEGLI INQUINANTI NEL PENNACCHIO

METODI SPERIMENTALI E NUMERICI PER LA STIMA DELLA **MASSA DI UN PENNACCHIO**

- 1 - Metodo dei transetti
- 2 - Dati sperimentali disponibili (isocone di contaminazione)
- 3 - Passive Flux Meter
- 4 - Integral Pumping Test
- 4 - Partitioning Interwell Tracer Test
- 5 - Modelli analitici e numerici di trasporto

STIMA FLUSSO DI MASSA - METODO DEI TRANSETTI



$$M = \sum (C_n \cdot A_n \cdot v)$$

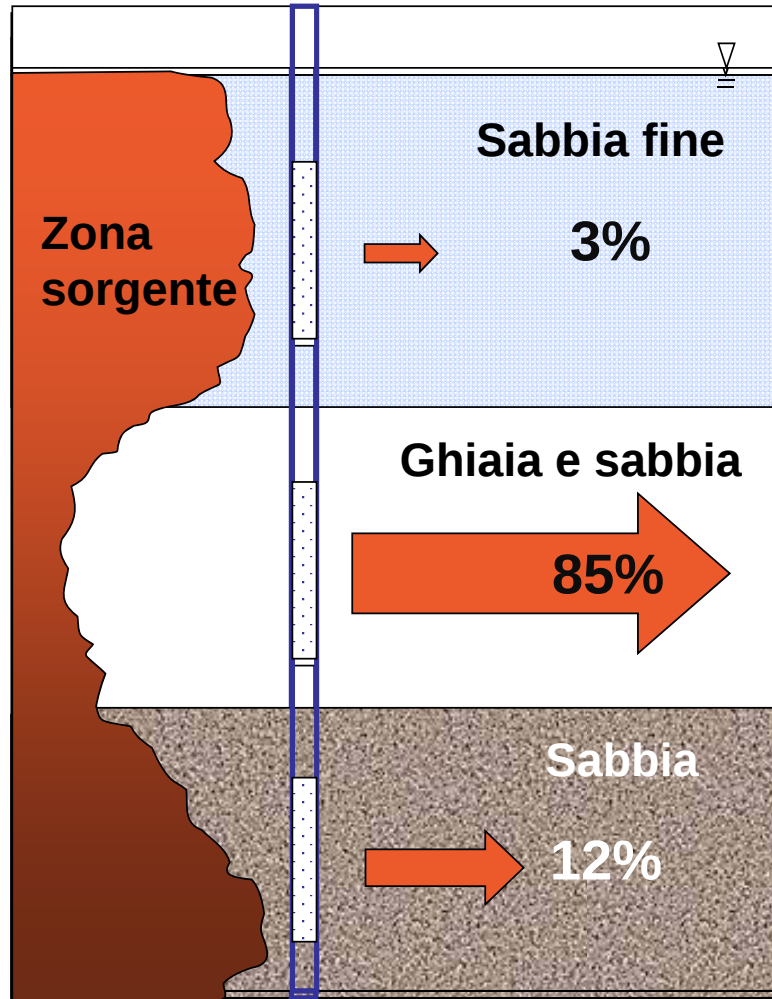
M = Flusso di massa (g/giorno)

C_n = concentrazione in un poligono sotteso da un piezometro del transetto n (g/m³)

A_n = area sottesa da un piezometro nel transetto n (m²)

$v = K i$ = velocità di Darcy (m/giorno)

STIMA DEL FLUSSO DI MASSA LUNGO UNA SEZIONE DI ACQUIFERO



Flusso di massa unitario (J) = KiC

$K = 1.0$ m/giorno

$i = 0.003$

$C = 10,000$ $\mu\text{g/L}$

Flusso di massa unitario = 0.03 g/giorno/ m^2

$K = 33.3$ m/giorno

$i = 0.003$

$C = 10,000$ $\mu\text{g/L}$

Flusso di massa unitario = 1 g/giorno/ m^2

$K = 5.0$ m/giorno

$i = 0.003$

$C = 10,000$ $\mu\text{g/L}$

Flusso di massa unitario = 0.15 g/giorno/ m^2



CLASSIFICAZIONE DEI PENNACCHI

CLASSIFICAZIONE DELLE CATEGORIE DEI PENNACCHI solventi clorurati

CON $C_{\text{RECETTORE}} = 1 \mu\text{g/L} \cong \text{CSC}$

Massa scaricata (g/giorno)	Categoria del pennacchio	Esempio di condizioni di flusso che possono potenzialmente impattare pozzi o corsi d'acqua
< 0.001	"Mag 1 Plume"	Impatto limitato
0.001 - 0.01	"Mag 2 Plume"	Pozzo domestico (10 m ³ /giorno)
0.01 - 0.1	"Mag 3 Plume"	Pozzo acquedotto (100 m ³ /giorno)
0.1 - 1	"Mag 4 Plume"	Pozzo acquedotto (1000 m ³ /giorno)
1 - 10	"Mag 5 Plume"	Pozzo acquedotto (10000 m ³ /giorno)
10 - 100	"Mag 6 Plume"	Flusso di base corso d'acqua di 1.16 m ³ /s
100 - 1000	"Mag 7 Plume"	Flusso di base corso d'acqua di 11.6 m ³ /s
1000- 10000	"Mag 8 Plume"	Flusso di base corso d'acqua di 115.7 m ³ /s
10000 - 100000	"Mag 9 Plume"	Flusso di base corso d'acqua di 1157.4 m ³ /s
> 100000	"Mag 10 Plume"	Flusso di base corso d'acqua > 1157.4 m ³ /s

(da Neville C.J. et al., 2011 modificato)

CLASSIFICAZIONE DELLE CATEGORIE DEI PENNACCHI:

Solventi clorurati

CON $C_{\text{RECETTORE}} = 10 \mu\text{g/L}$ - **Acqua potabile**

Massa scaricata (g/giorno)	Categoria del pennacchio	Esempio di condizioni di flusso che possono potenzialmente impattare pozzi o corsi d'acqua
< 0.001	"Mag 0 Plume"	Impatto limitato
0.001 - 0.01	"Mag 1 Plume"	Impatto limitato
0.01 - 0.1	"Mag 2 Plume"	Pozzo domestico (10 m ³ /giorno)
0.1 - 1	"Mag 3 Plume"	Pozzo acquedotto (100 m ³ /giorno)
1 - 10	"Mag 4 Plume"	Pozzo acquedotto (1000 m ³ /giorno)
10 - 100	"Mag 5 Plume"	Pozzo acquedotto (10000 m ³ /giorno)
100 - 1000	"Mag 6 Plume"	Flusso di base corso d'acqua di 1.16 m ³ /s
1000- 10000	"Mag 7 Plume"	Flusso di base corso d'acqua di 11.6 m ³ /s
10000 - 100000	"Mag 9 Plume"	Flusso di base corso d'acqua di 115.7 m ³ /s
> 100000	"Mag 9 Plume"	Flusso di base corso d'acqua di 1157.4 m ³ /s

(da Neville C.J. et al., 2011 modificato)



METODI INNOVATIVI DI INDAGINE PER LA CARATTERIZZAZIONE DI UN SITO CONTAMINATO

METODI DI INDAGINE GEOFISICA

Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali
CNR MILANO

Metodo geofisico di esplorazione	Finalità in campo ambientale
Elettromagnetico (EM resistivity)	Presenza di terreni contaminati, materiali di riporto e rifiuti. Localizzazione sottoservizi metallici. Collaudo impermeabilizzazione discariche.
Georadar (GPR Ground Penetration Radar)	Rappresentazioni delle discontinuità presenti nel sottosuolo: naturali (stratificazioni, cavità) e antropiche (sottostrutture, serbatoi interrati, rifiuti, riporti, etc.),
Magnetometria (M Magnetometry)	Informazioni qualitative sulla localizzazione ed estensione di oggetti sepolti (come fusti, cavi, , tubi, etc.).
Potenziali spontanei (SP Self Potential)	Informazioni circa i flussi idrici sotterranei e la loro variazione nel tempo
Impedenza elettrica/spettroscopia elettrica (SIP/EIT Electrical Spectroscopy / Electrical Impedence Tomography)	Informazioni circa la presenza di fluidi nel sottosuolo e dello stato idrochimico (eventualmente influenzato da inquinanti)
Radio-magnetotellurico /RMT)	Uso è limitato alla segnalazione di eventuali strutture nel sottosuolo (tubazioni, cavi, etc.)

METODI DI CARATTERIZZAZIONE PER COMPOSTI VOLATILI (VOC & SVOC)

SOIL GAS SURVEY

Attivo

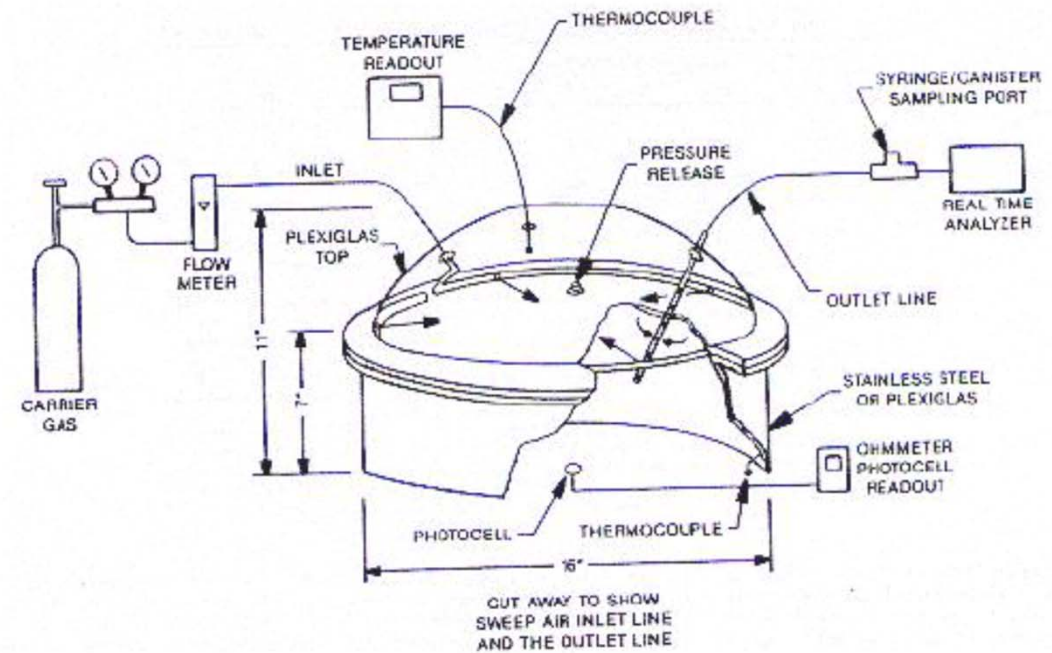
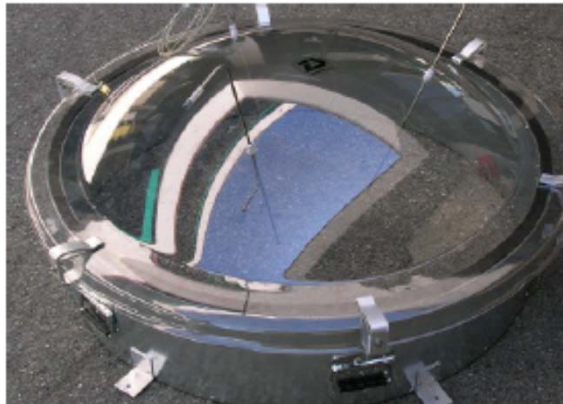


Passivo

GORE-SORBER®



CAMERA DI FLUSSO



Anche a supporto dell'analisi di rischio
(intrusione indoor or outdoor di gas)

METODI DI CARATTERIZZAZIONE DERIVATI DALLE TECNICHE “DIRECT PUSH”

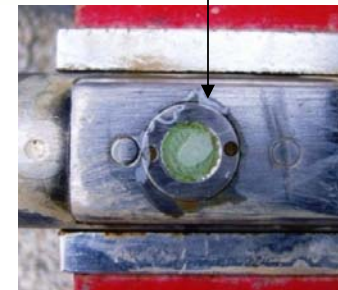
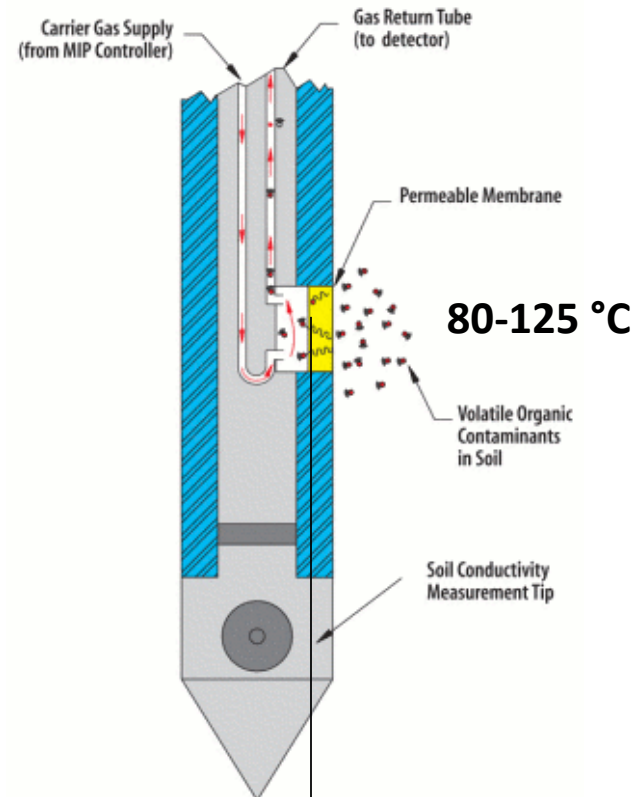
MEMBRANE INTERFACE PROBE (MIP)

Tubazioni e linea del gas



Gas Cromatografo

Controllo del sistema



MIP-HPT PROBE (HYDRAULIC PROFILING TOOLS)

- **Conducibilità elettrica – EC (mS/m)**

Alta > argilla

Bassa > sabbia - ghiaia

- **Pressione – P (kPa)**

Alta > bassa permeabilità

Bassa > alta permeabilità

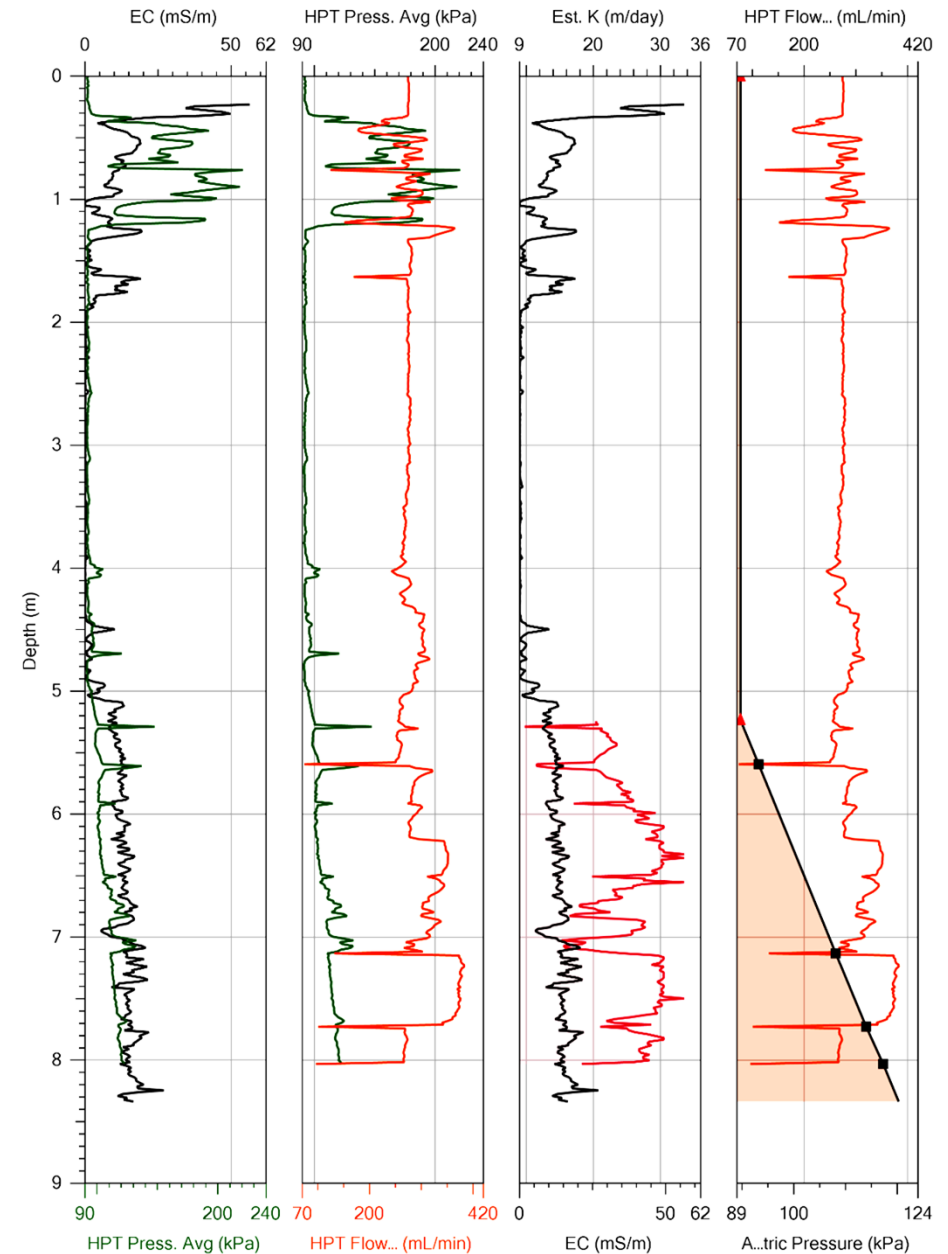
Idrostatica > incremento linea di base

- **Flusso – Q (mL/min) ~ costante**

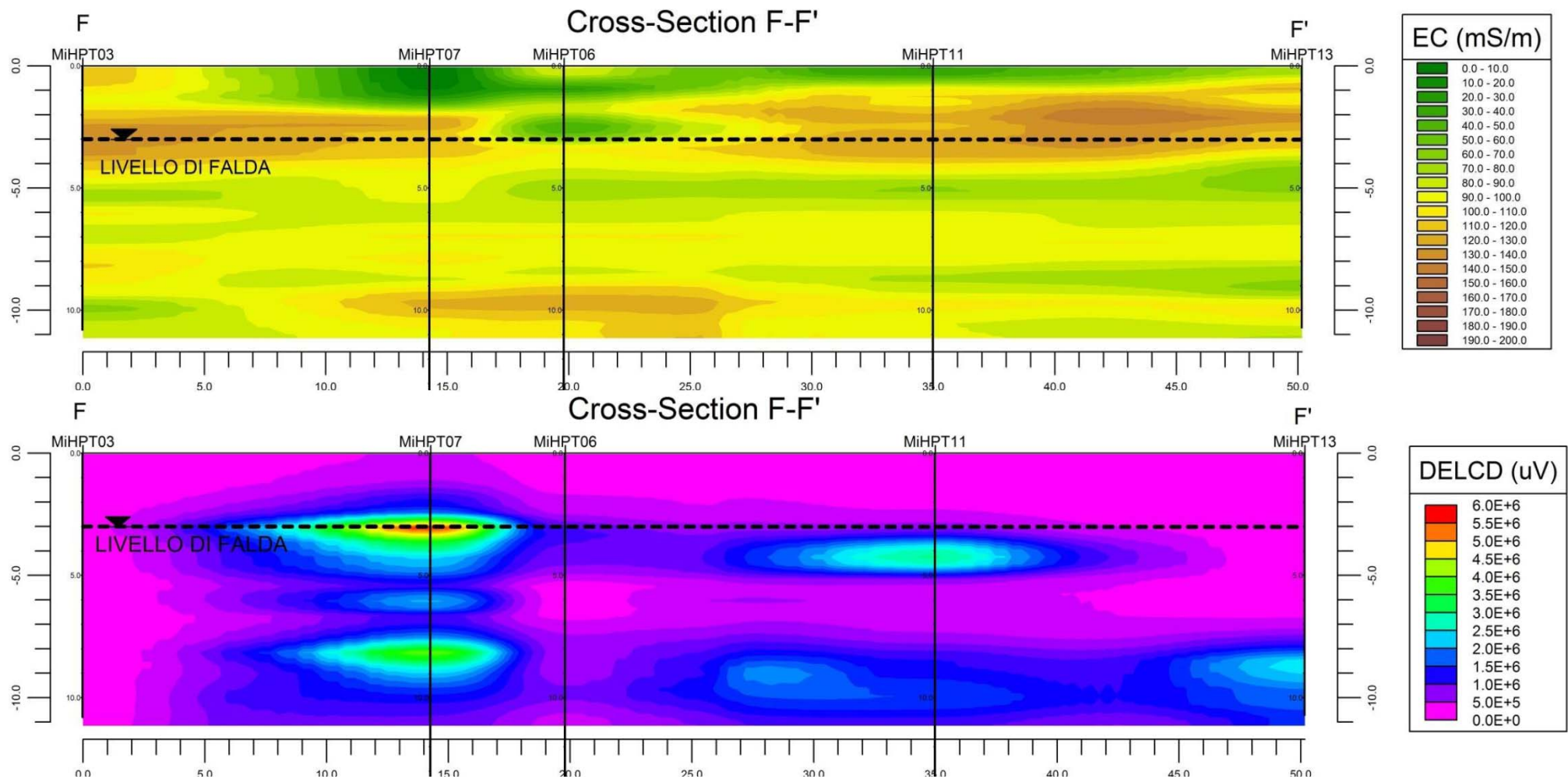
Alto > alta permeabilità

Basso > bassa permeabilità

Permeabilità relativa Q/P



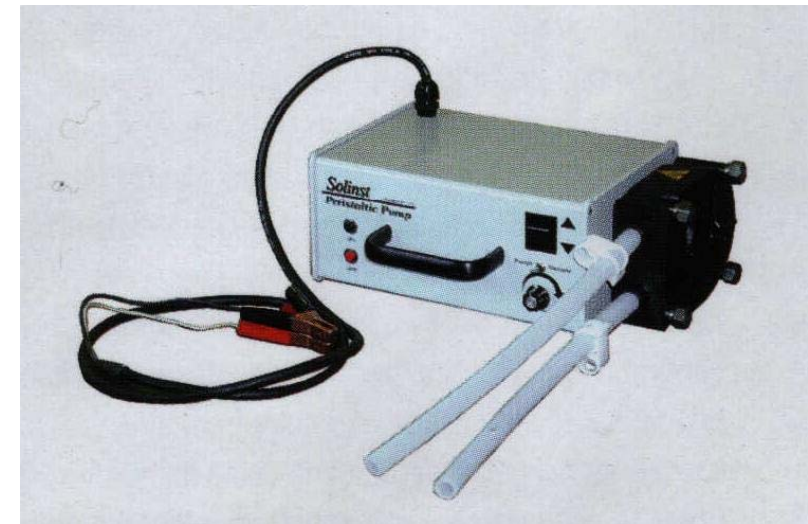
ESEMPIO RISULTATI INDAGINE MIP



METODI DI CAMPIONAMENTO DI ACQUE SOTTERRANEE CON TECNICA LOW FLOW

In presenza di valori di accettabilità delle acque di falda particolarmente ridotti ($\mu\text{g/l}$ e/o ng/l) è necessario disporre di dati rappresentativi dell'effettivo contaminante disciolto in falda rispetto a quello presente come particolato in sospensione. Può essere adottata la seguente metodologia operativa:

- utilizzo della tecnica "low flow purging" ($<0.1 \text{ l/min}$);
- misura della stabilizzazione di pH, Eh e conducibilità elettrica;
- prelievo di acque diretto.

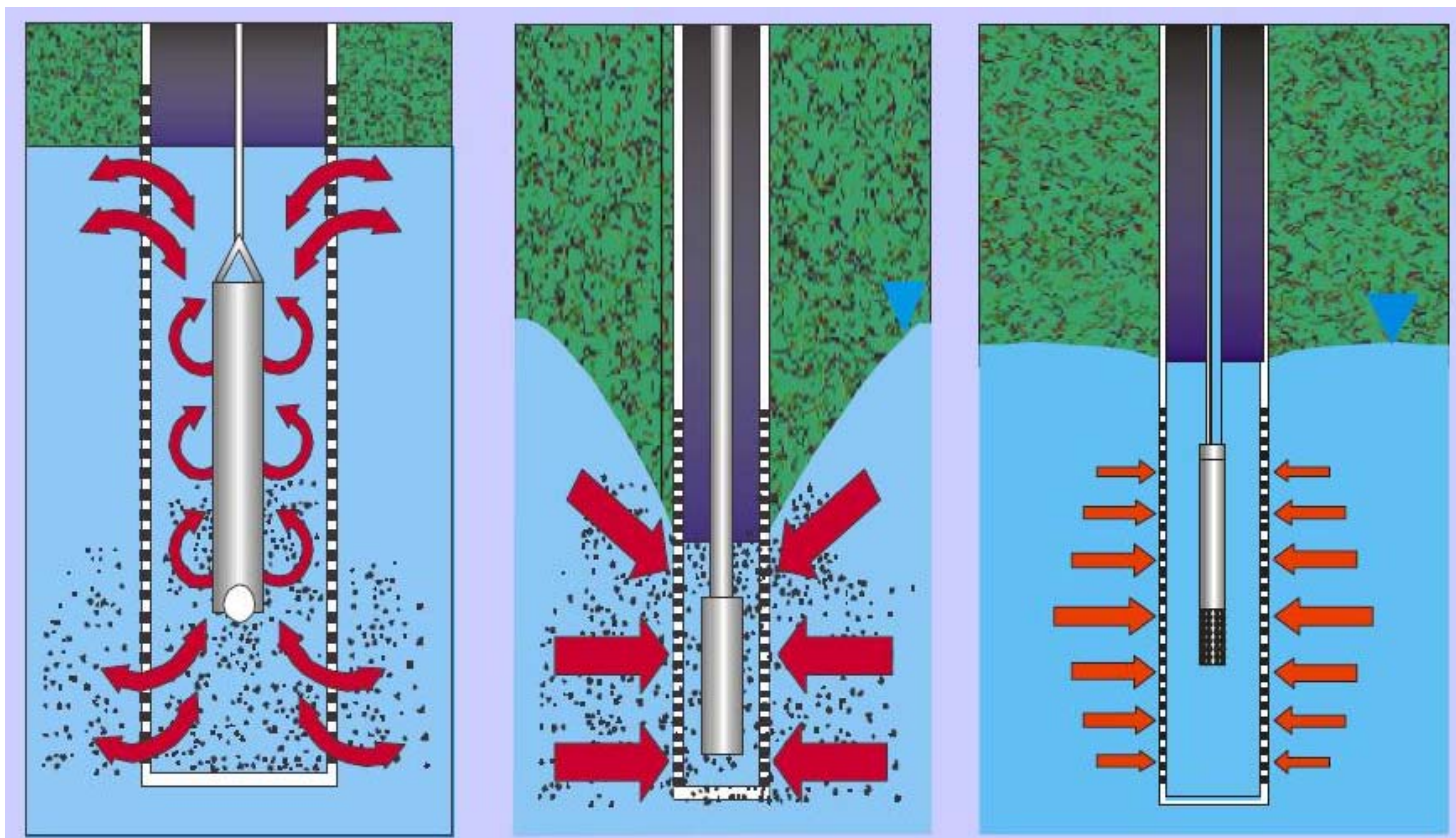


CONFRONTO TECNICHE DI PRELIEVO ACQUE SOTTERRANEE

BAILER

POMPE DI ALTA
PORTATA

POMPE LOW FLOW



aumento torbidità
aerazione campione

dispersione suolo e
contaminanti

controllo torbidità e
zona da campionare



tecnica
tradizionale

low
flow

CAMPIONAMENTO ACQUE

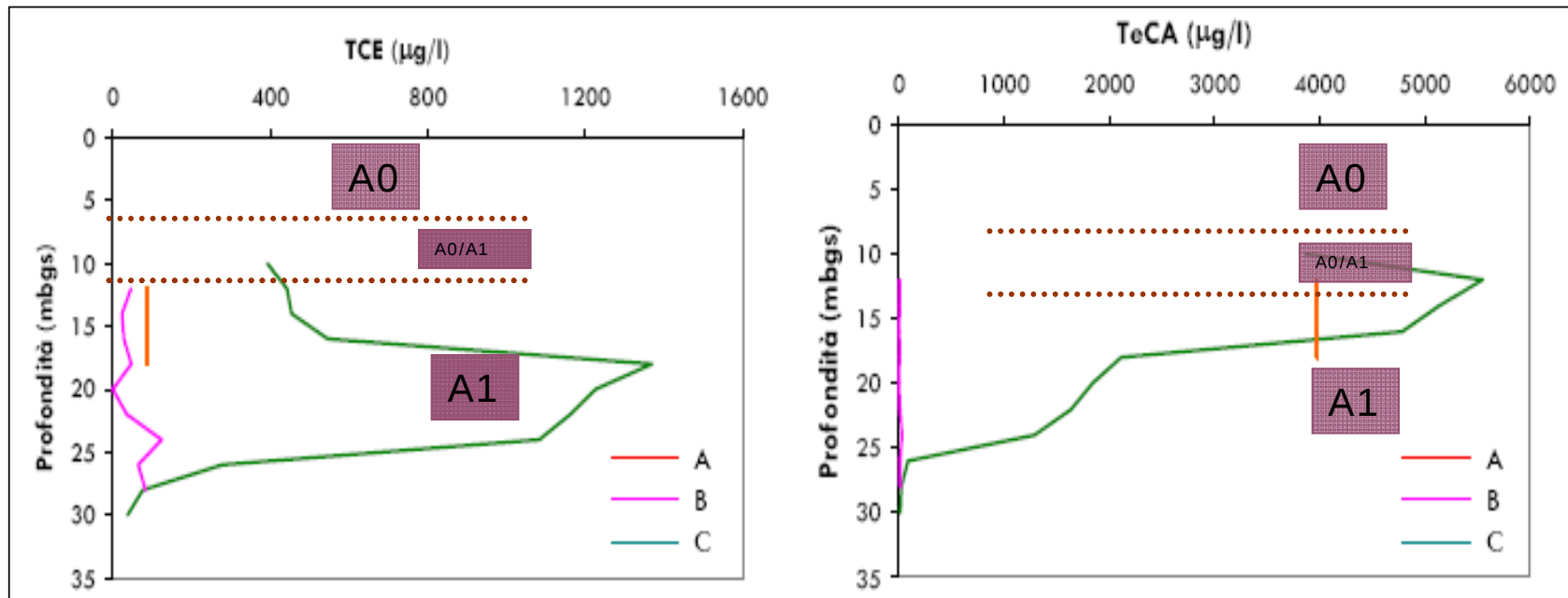
Stratificazione contaminazione

Confronto risultati tecniche alternative

A) Integrato sulla verticale

B) Stratificato sulla verticale con sistema MLPS

C) Stratificato sulla verticale con sistema GeoProbe ®



TeCA: 1,1,2,2-Tetracloroetano TCE: Triclorotilene

Rho (MI) – ex Chimica Bianchi

METODI DI MISURA DI FLUSSI IDRICI VERTICALI NEI POZZI

vertical flowmeter (flussometro)

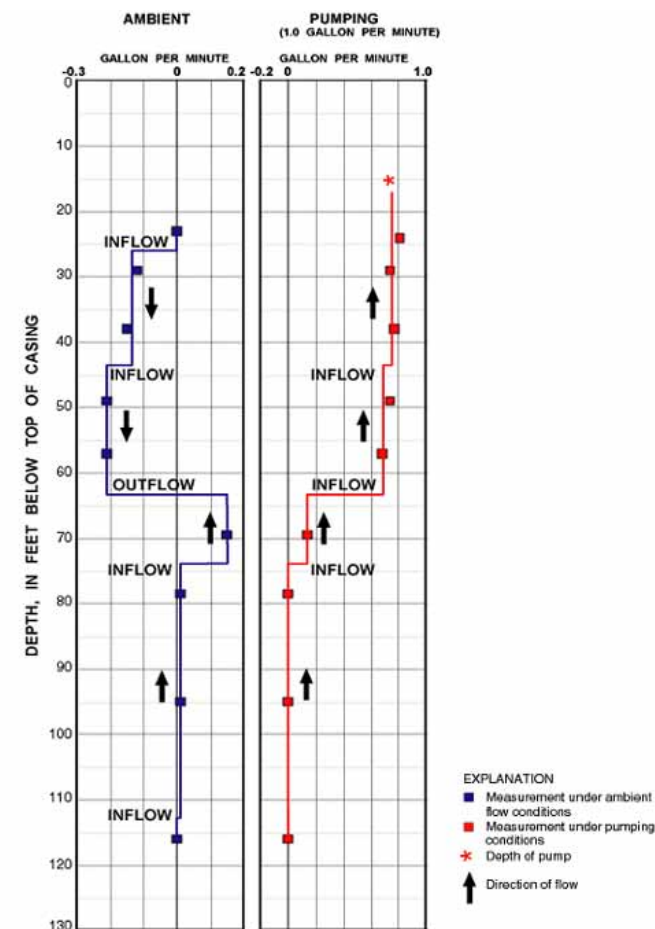
Heat pulse flowmeter (HPFM), Electromagnetic flowmeter (EMFM), Spinner flowmeter

Heat pulse ad onda di calore:

- 1) Emissione di un'onda di calore
- 2) Acquisizione della temperatura da parte di termistori posti ad uguale distanza dal punto di emissione

Uso:

- misurare la velocità di flusso verticale;
- identificare la direzione di flusso verticale;
- stabilire gradienti idraulici relativi;
- identificare fratture o unità geologiche trasmissive che sono la fonte di acqua o che potrebbero agire come condotti per i flussi in un foro aperto.

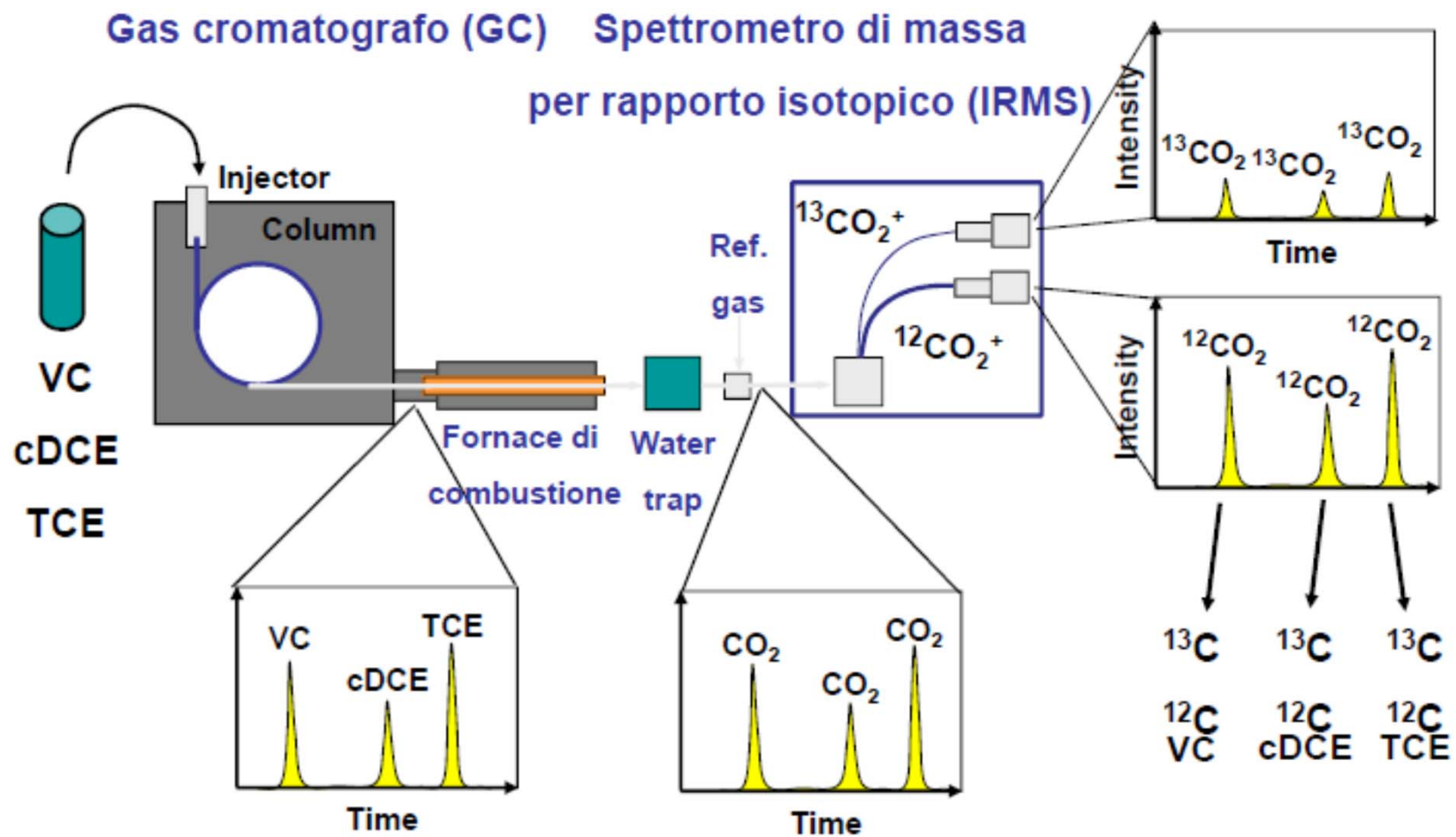


METODI ISOTOPICI

ISOTOPI STABILI DI INTERESSE PER LO STUDIO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Isotopo	Rapporto	%	Standard
^2H	$^2\text{H}/^1\text{H}$	0.015	VSMOW
^3He	$^3\text{He}/^4\text{He}$	0.000138	Atmospheric He
^{13}C	$^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$	1.11	VPDB
^{15}N	$^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$	0.366	AIR N ₂
^{18}O	$^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$	0.204	VSMOW
^{34}S	$^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$	4.21	CDT
^{37}Cl	$^{37}\text{Cl}/^{35}\text{Cl}$	24.23	SMOC
^{53}Cr	$^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$	0.113	SMOC

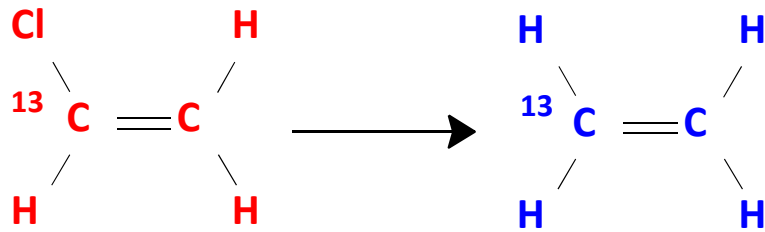
ANALISI DI ISOTOPI $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$: Tecnica GC-IRMS



Gargini A., 2015

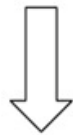
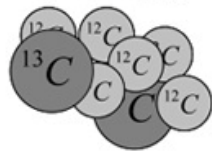
ISOTOPI DEL CARBONIO

Test di laboratorio: dealogenazione riduttiva del Cloruro di Vinile
(Co=40 mg/l) a etilene



Composizione isotopica contaminante

$^{12}\text{C}:^{13}\text{C} = 99:1$

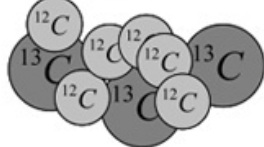


microrganismi

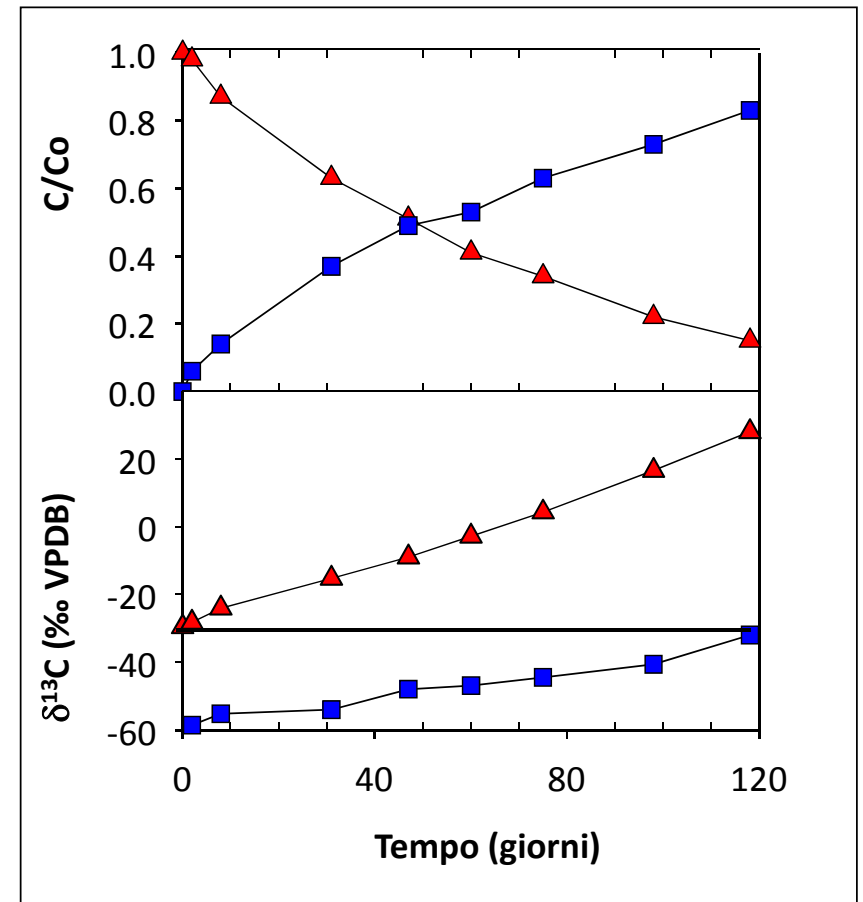
Contaminante residuo + Prodotto

$^{13}\text{C} > 1\%$

$^{12}\text{C} < 99\%$



Compound Specific
Isotope Analysis (CSIA)



Hunkeler, D. et al., 2001

ISOTOPI DEL CROMO

Isotopo	Abbondanza relativa	Tempo di dimezzamento
^{50}Cr	4.35	$1.3 \cdot 10^{18}$ anni
^{52}Cr	83.76	Stabile
^{53}Cr	9.50	Stabile
^{54}Cr	2.37	Stabile

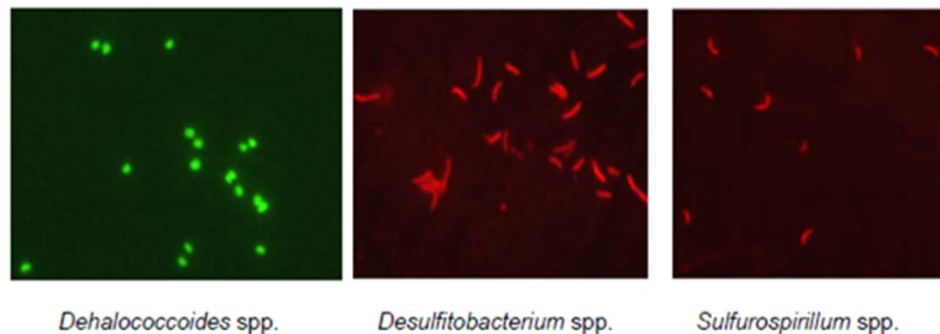
$$\delta^{53}\text{Cr}(\text{‰}) = \{ [(^{53}\text{Cr}/ ^{52}\text{Cr})_{\text{campione}} / (^{53}\text{Cr}/ ^{52}\text{Cr})_{\text{standard}}] - 1 \} \cdot 1000$$

Arricchimento nell'isotopo pesante in presenza di fenomeni di riduzione
da CrVI a CrIII

METODI DI CARATTERIZZAZIONE MICROBICA

Idrocarburi petroliferi: BACTRAP® - *tubo riempito da carbone attivo arricchito in ^{13}C e introduzione di microcosmi per valutare biodegradazione (dopo un intervallo di tempo)*

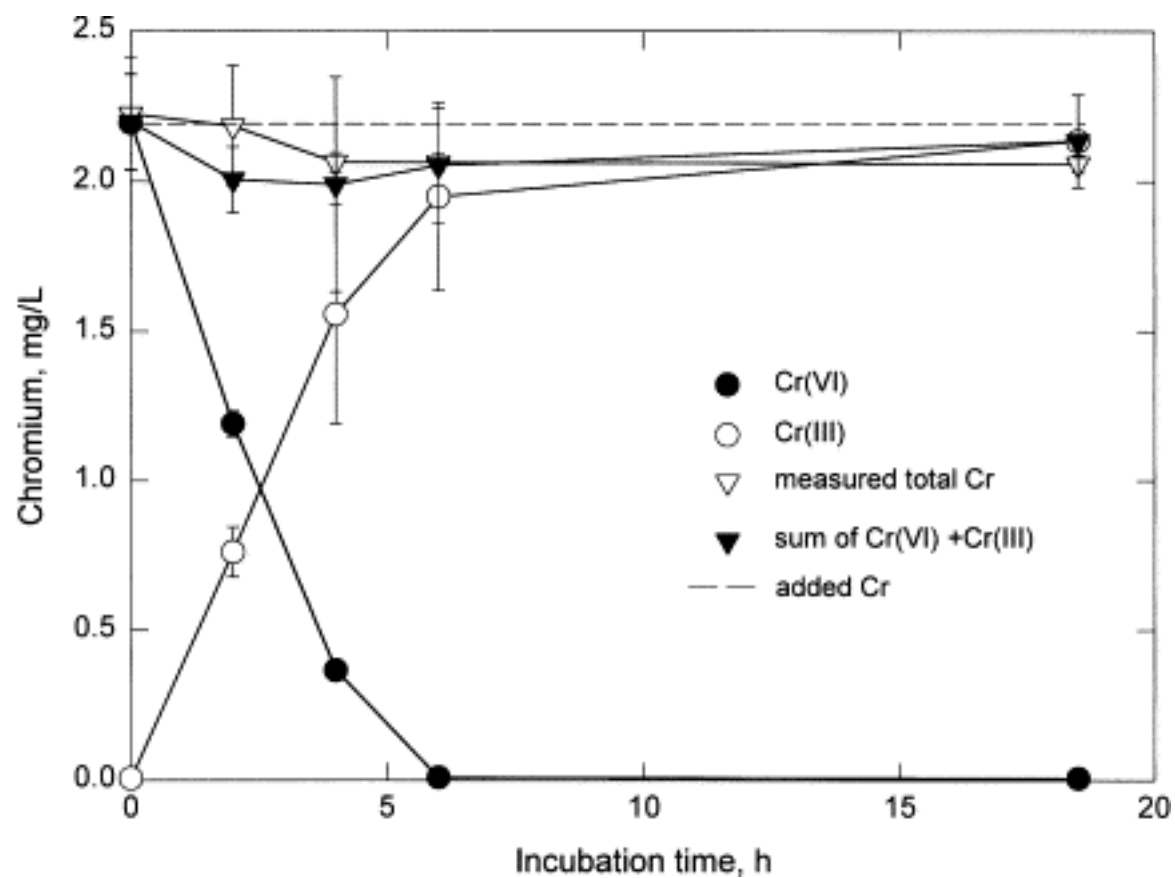
Solventi clorurati: PCR (Polymerase Chain Reaction – *estrazione di DNA genomico*)
FISH (Fluorescent In Situ Hybridization) - *sonde molecolari che si legano a RNA ribosomiale*



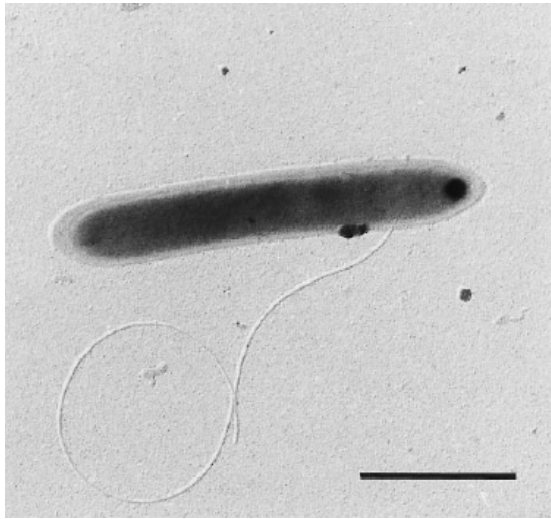
IRSA Monterotondo (Roma)

Test di tossicità - *test ecotossicologici che prevedono anche saggi multispecie relativi ad organismi con livelli trofici diversi (manuali APAT-IRSA-CNR, 2003)*

Riduzione del Cr(VI) a Cr(III) in cultura anaerobica con 200 mg/l di fenolo
Interazione tra *Escherichia coli* e degradatori dei fenoli

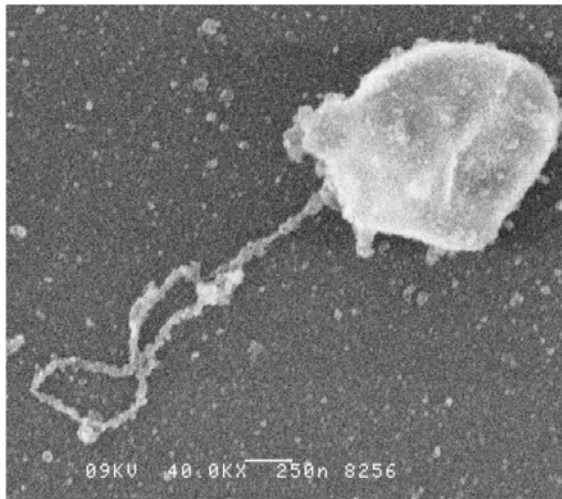


Evans N. Chirwa, Yi-Tin Wang, 2000



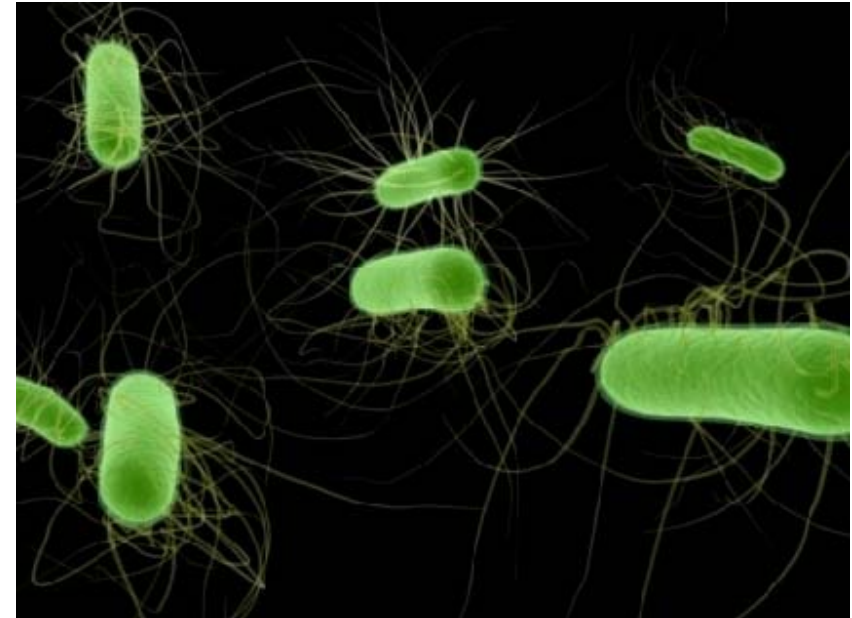
Dehalobacter restrictus

Batteri che intervengono
nella dechlorazione riduttiva



Dehalococcoides ethenogenes

Batterio che interviene
nella riduzione del Cromo esavalente

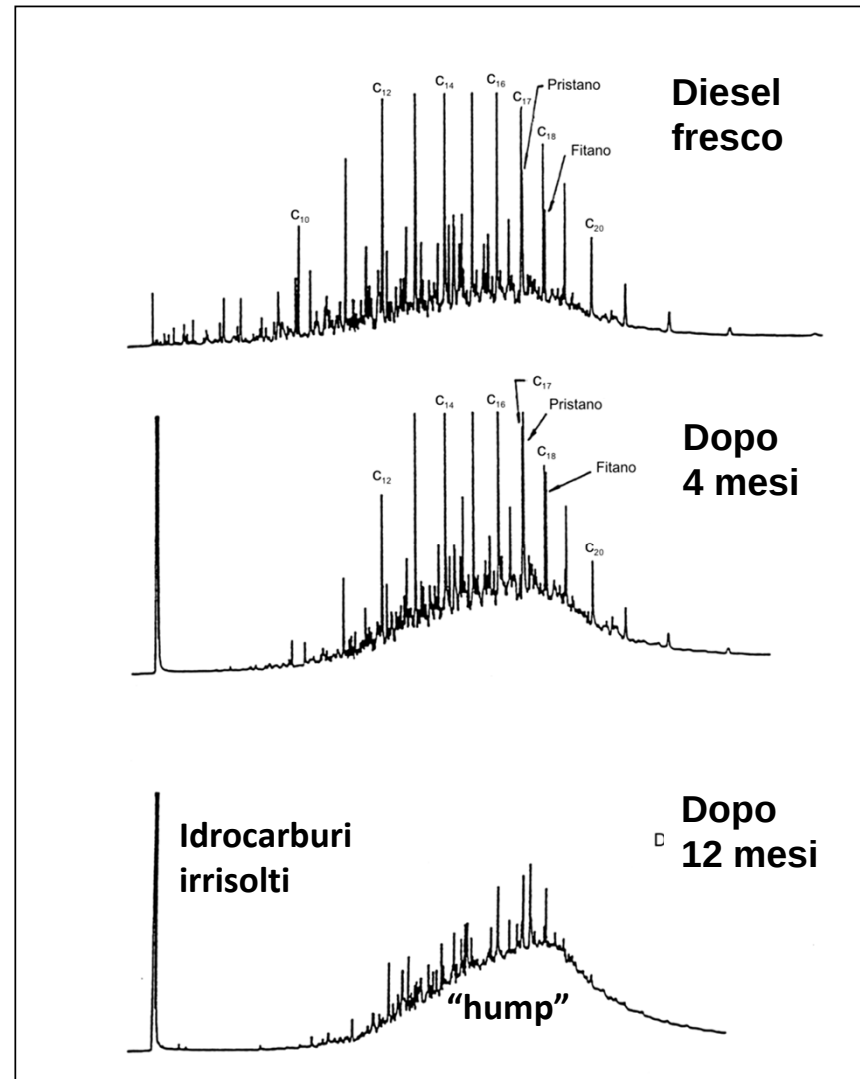


Escherichia coli

METODI DI FINGERPRINTING : BIODERADAZIONE DI IDROCARBURI

GAS CROMATOGRAFIA

Contaminazione diesel e risalita della “gobba” (“hump”)



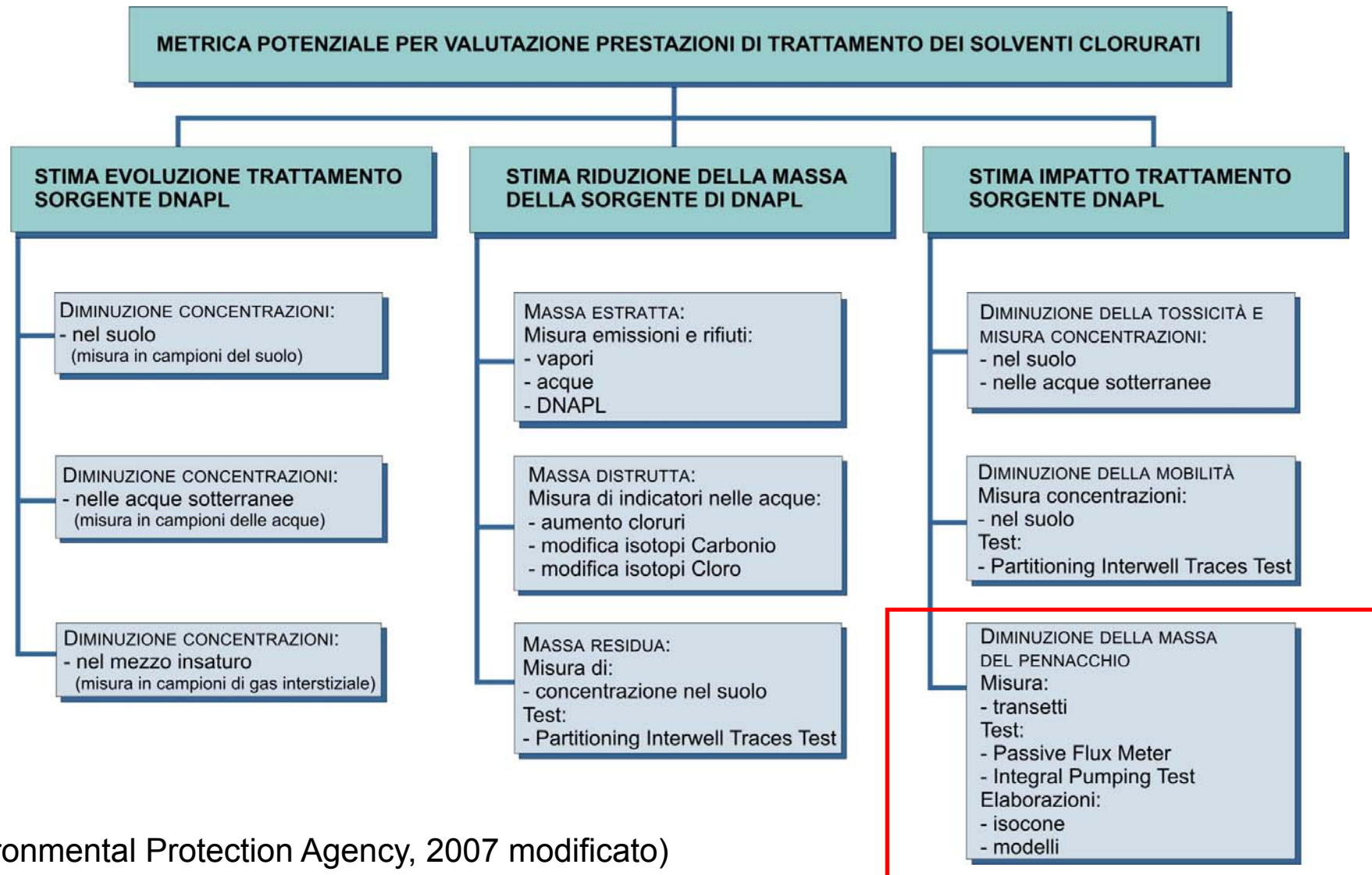
**APPLICAZIONE DEI METODI
ALLE FASI DI BONIFICA/MESSA
IN SICUREZZA DI UN SITO
CONTAMINATO**

APPLICAZIONE DI METODI DI CARATTERIZZAZIONE AI COMPLESSI IDROGEOLOGICI LOMBARDI

Caratterizzazione	Bonifica/messa in sicurezza
Raccolta dati Ricostruzione del sottosuolo Caratterizzazione del mezzo insaturo <i>Presenza di VOC e SVOC</i> <i>Assenza di VOC e SVOC</i> Caratterizzazione del mezzo saturo <i>Misure del flusso idrico</i> <i>Misure della qualità delle acque</i> <i>Presenza di acquiferi produttivi</i> <i>Presenza di acquiferi poco produttivi</i> <i>Elevate concentrazioni di composti poco solubili</i> Report dei dati	Metodi che intervengono su composti volatili Metodi che intervengono su reazioni in situ di ossidazione o riduzione Metodi che intervengono su reazioni in situ mediate da microrganismi Metodi che intervengono sul monitoraggio dell'attenuazione naturale Metodi che intervengono sull'interruzione della migrazione dei contaminanti

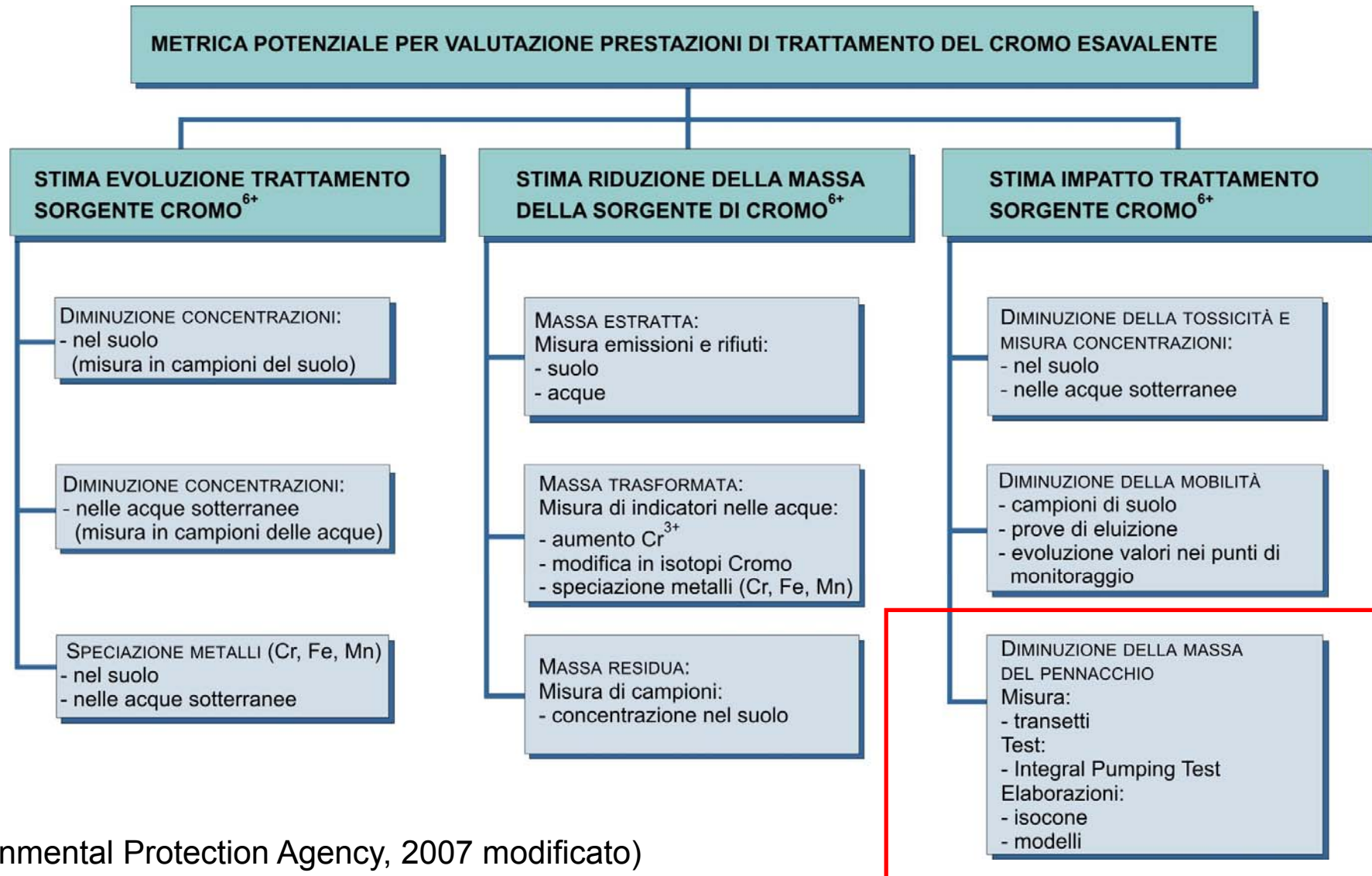
**SCENARI DI GESTIONE DEI
PENNACCHI DI SOLVENTI
CLORURATI E CROMO
ESAVALENTE**

ASPETTI DELLA VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEGLI INTERVENTI: SOLVENTI CLORURATI



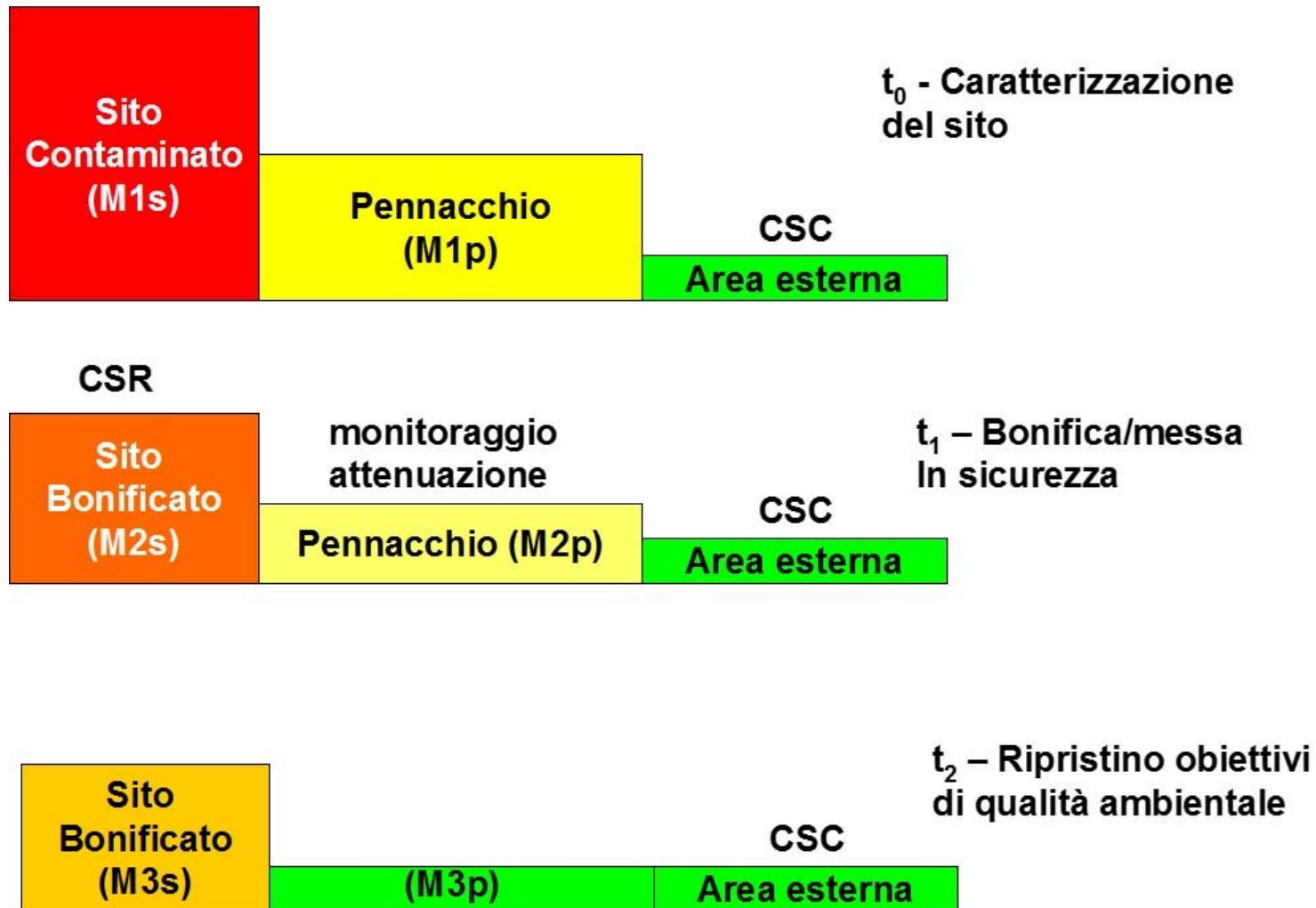
(U.S. Environmental Protection Agency, 2007 modificato)

ASPETTI DELLA VALUTAZIONE DELL'EFFICACIA DEGLI INTERVENTI: CROMO ESAVALENTE



(U.S. Environmental Protection Agency, 2007 modificato)

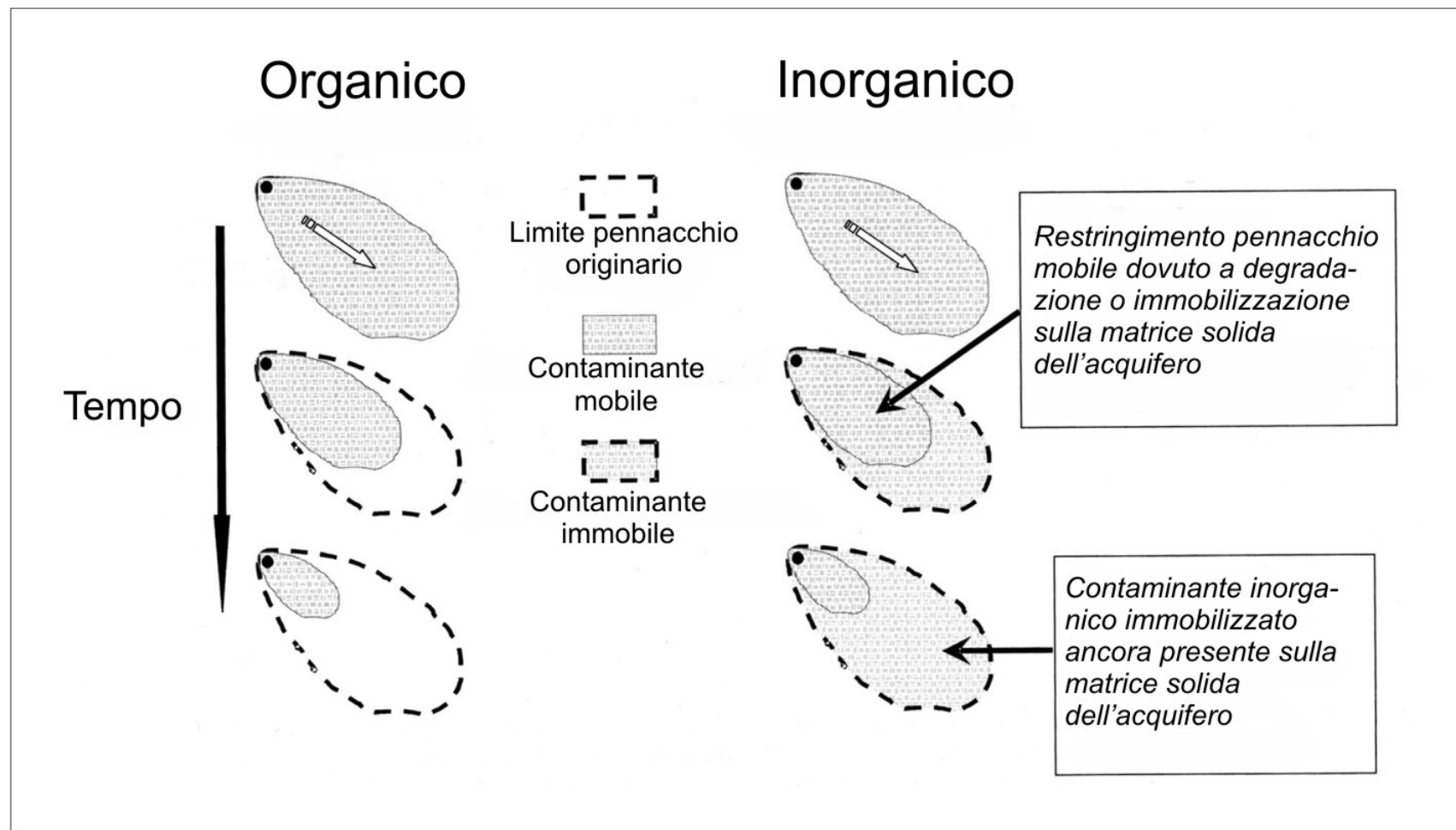
**POSSIBILI SCENARI DI GESTIONE DI SITI CONTAMINATI E DI PENNACCHI
(integrazione bonifiche-qualità risorse)**



COMPORTAMENTO ATTESO NEL PENNACCHIO

Solventi clorurati

Cromo esavalente





Grazie dell'attenzione