

## **ALLEGATO A.2:**

### ***Riferimenti normativi e tecnici per le acque potabili, le fonti di prelievo gli impianti di potabilizzazione***

## INDICE

<b>1. ACQUE POTABILI.....</b>	<b>IV</b>
1.1 <i>INTRODUZIONE NORMATIVA GENERALE.....</i>	IV
1.2 <i>PRINCIPALI COSTITUENDI DELL'ACQUA .....</i>	IV
1.2.1 <i>Principali contaminanti chimici inorganici.....</i>	IV
1.2.2 <i>Principali contaminanti chimici organici.....</i>	VI
1.2.3 <i>Principali contaminanti microbiologici .....</i>	VII
1.3 <i>TIPOLOGIA DELLE ANALISI CONSIGLIABILI.....</i>	VII
1.4 <i>LIMITI DI LEGGE (TRATTI DAL D.LGS. 31/2001) .....</i>	VIII
<b>2. ACQUE SOTTERRANEE.....</b>	<b>XIV</b>
2.1 <i>INTRODUZIONE NORMATIVA .....</i>	XIV
2.2 <i>DERIVAZIONE ACQUE SOTTERRANEE .....</i>	XIV
2.2.1 <i>Derivazione da sorgenti.....</i>	XV
2.2.1.1 <i>Definizione di sorgente.....</i>	XV
2.2.1.2 <i>Caratteristiche .....</i>	XV
2.2.1.3 <i>Classificazione .....</i>	XVI
2.2.1.4 <i>Captazione delle sorgenti.....</i>	XXII
2.2.2 <i>Derivazione da falda tramite pozzi.....</i>	XLV
2.2.2.1 <i>Definizione di pozzo.....</i>	XLV
2.2.2.2 <i>Livello dell'acqua nel pozzo.....</i>	XLV
2.2.2.3 <i>Definizione di falda e di acquifero.....</i>	XLVI
2.2.2.4 <i>Classificazione pozzi.....</i>	XLVII
2.2.2.5 <i>Opere di captazione da falde - linee guida tratte dalla "Delibera 4 febbraio 1977 – Criteri, metodologie e norme tecniche generali" .....</i>	XLVII
2.2.2.6 <i>Fasi di progettazione e sviluppo dei pozzi per acqua.....</i>	XLVIII
2.3 <i>POTABILIZZAZIONE ACQUE SOTTERRANEE .....</i>	LX

## INDICE DELLE FIGURE

Figura 2.2.1 – Spaccato stratigrafico del sottosuolo.....	XV
Figura 2.2.2 – Sorgente.....	XV
Figura 2.2.3 – Sorgenti in Emilia Romagna.....	XVII
Figura 2.2.4 – Sorgente di trabocco.....	XVIII
Figura 2.2.5 – Sorgente di deflusso.....	XVIII
Figura 2.2.6 – Sorgente di sbarramento.....	XIX
Figura 2.2.7 – Sorgente di affioramento o di valle.....	XIX
Figura 2.2.8 – Sorgente di falda.....	XX
Figura 2.2.9 – Sorgente carsica.....	XX
Figura 2.2.10 – Schema di flusso di un acquifero in roccia dolomitica che dà luogo a sorgenti di acque termali nel cuneo di faglie.....	XXI
Figura 2.2.11 – Schema di emergenza dal detrito.....	XXV
Figura 2.2.12 – Quando lo spessore dell'ammasso detritico è notevole, possono sorgere serie difficoltà nell'opera di captazione.....	XXVI
Figura 2.2.13 – Quando l'ammasso detritico da cui scaturisce una sorgente ha uno spessore notevole nel senso della massima pendenza, l'opera di captazione può essere eseguita mediante una galleria laterale che segue l'isoipsa immediatamente sottostante al punto di emergenza.....	XXVII
Figura 2.2.14 – Schema di opera di captazione di una sorgente mediante lo scavo di una galleria nel materiale detritico fino ad entrare nel corpo roccioso integro.....	XXVII
Figura 2.2.15 – Schema di captazione in roccia.....	XXVIII
Figura 2.2.16 – Schema di opera di captazione di una sorgente mediante lo scavo di una galleria.....	XXIX
Figura 2.2.17 – Al termine delle operazioni di captazione, occorre regimare la acque meteoriche che ruscellano dal pendio con canalette disposte a lisca di pesce e fosse di smaltimento alla base del versante.....	XXX
Figura 2.2.18 – Schema di circolazione delle acque in roccia carsica.....	XXX
Figura 2.2.19 – Sorgente che scaturisce da uno strato compreso tra due formazioni impermeabili.....	XXXII
Figura 2.2.20 – Sorgente che scaturisce da un corpo idrico sabbioso non protetto superficialmente.....	XXXIII
Figura 2.2.21 - Misura del livello statico.....	XLVI
Figura 2.2.22 – Scalpelli tricono a denti.....	LII
Figura 2.2.23 – Perforazione a circolazione diretta (schema del circuito del fango).....	LIII
Figura 2.2.24 – Martelli fondo foro.....	LIV
Figura 2.2.25 – Perforazione a circolazione inversa (schema del circuito del fango).....	LV
Figura 2.2.26 – Filtro a ponte e a spirale continua.....	LVII
Figura 2.2.27 – Diagramma Tempi di pompaggio/abbassamento (gradini stabilizzati).....	LIX

## 1. ACQUE POTABILI

### 1.1 *Introduzione normativa generale*

Le acque destinate al consumo umano sono normate dal Decreto Legislativo 31/2001 e s.m.i. che disciplina la qualità delle acque destinate al consumo umano al fine di proteggere la salute umana dagli effetti negativi derivanti dalla contaminazione delle acque, garantendone la salubrità e la pulizia (Art. 1). Per acque potabili si intendono le acque destinate al consumo umano definite come (Art. 2):

- le acque trattate o non trattate, destinate ad uso potabile, per la preparazione di cibi e bevande, o per altri usi domestici, a prescindere dalla loro origine, siano esse fornite tramite una rete di distribuzione, mediante cisterne, in bottiglie o in contenitori;
- le acque utilizzate in un'impresa alimentare per la fabbricazione, il trattamento, la conservazione o l'immissione sul mercato di prodotti o di sostanze destinate al consumo umano, escluse quelle, individuate ai sensi dell'articolo 11, comma 1, lettera e), la cui qualità non può avere conseguenze sulla salubrità del prodotto alimentare finale.

Le acque destinate al consumo umano devono essere salubri e pulite e non devono contenere microrganismi e parassiti, né altre sostanze, in quantità o concentrazioni tali da rappresentare un potenziale pericolo per la salute umana (Art.4).

### 1.2 *Principali costituenti dell'acqua*

#### 1.2.1 **Principali contaminanti chimici inorganici**

Lo ione ammonio ( $\text{NH}_4^+$ ) deriva principalmente dalle deiezioni umane o animali dove è contenuto assieme all'urea risultante dal metabolismo delle proteine. La sua presenza nelle acque, specialmente in quelle sotterranee, è dovuta in alcuni casi a cause geologiche quali ad esempio la degradazione di materiale in via di fossilizzazione (resti di piante, giacimenti di torba, ecc.). Queste acque, con ione ammonio che può raggiungere valori elevati (5 - 10 mg/litro) ma pure dal punto di vista microbiologico, possono essere considerate potabili se non ci sono alterazioni di altri parametri. Al contrario la sua presenza associata ad analisi microbiologiche sfavorevoli costituisce un sicuro indice di inquinamento da scarichi fognari o zootecnici. L'Organizzazione Mondiale della Sanità e la legislazione vigente in altre nazioni non fissano alcun limite per questa sostanza nelle acque potabili in virtù della sua possibile origine "naturale" e della sua trascurabile tossicità. In Italia invece la legge ha introdotto un valore limite pur classificando lo ione ammonio fra le "sostanze indesiderabili" e non fra le "sostanze tossiche".

Nitriti e nitrati, invece, possono essere prodotti in natura da processi ossidativi dello ione ammonio oppure da fenomeni conseguenti l'impiego dei fertilizzanti azotati in agricoltura. Lo ione nitrato è infatti presente come componente di sali molto solubili impiegati come fertilizzanti, pertanto può passare velocemente nelle acque sotterranee per dilavamento del suolo agricolo. Esistono comunque trattamenti di potabilizzazione, tecnologicamente avanzati e piuttosto complessi, che permettono di ridurre la concentrazione di nitriti e nitrati fino alla loro totale eliminazione.

Le caratteristiche organolettiche (colore, odore, sapore e torbidità) dell'acqua potabile possono essere alterate da sostanze di origine naturale. Le acque sotterranee sono generalmente povere d'ossigeno e riescono a tenere disciolti, mostrandosi limpide, il ferro e il manganese nella forma "ridotta" (ione "ferroso" e "manganoso") anche a concentrazioni superiori ai valori limite. Un'acqua sotterranea che contiene ferro e manganese in quantità elevate quando viene portata in superficie si trasforma in breve tempo (da pochi minuti a qualche ora) in una soluzione torbida e giallastra dall'aspetto poco invitante. In pratica il contatto con l'ossigeno atmosferico trasforma la forma ionica di questi materiali da "ridotta" a "ossidata" (ione "ferrico" e "manganico") e dà luogo a prodotti poco solubili. Si ha così la separazione per precipitazione di fanghiglie colorate dal giallo-ruggine al nero. Un'acqua con queste caratteristiche non presenta rischi sanitari, ma ha caratteristiche indesiderabili: uno sgradevole sapore metallico, possibilità di dar luogo a fenomeni di corrosione delle tubature e di macchiare la biancheria durante il lavaggio. Gli acquedotti che attingono acque ricche di ferro e/o manganese dispongono di adeguati impianti per la rimozione di questi metalli.

Un'altra sostanza d'origine naturale che frequentemente altera la qualità dell'acqua di possibile uso potabile è l'acido solfidrico (o idrogeno solforato), un gas facilmente riconoscibile per il caratteristico odore di uova marce. Questa sostanza è ritenuta a torto un indice di scarsa qualità dell'acqua potabile: ci sono acque sotterranee contenenti acido solfidrico assolutamente pure da un punto di vista microbiologico, ed è noto da molti secoli l'impiego terapeutico delle acque sulfuree anche come bevande. La normativa delle acque potabili prevede che questa sostanza non sia presente nelle comuni acque potabili perché l'odore dell'acqua è sgradevole e perché è comunque sconsigliabile l'assunzione per lunghi periodi. L'acido solfidrico è facilmente eliminabile per ossigenazione.

La torbidità è un fattore che influenza frequentemente la qualità dell'acqua potabile: valori elevati possono essere dovuti alla presenza di materiale argilloso oppure a idrossidi di ferro o alluminio, sostanze, queste ultime, usate nel processo di potabilizzazione delle acque superficiali e che possono erroneamente finire nella rete acquedottistica. Talvolta fenomeni di corrosione delle tubature danno luogo ad acque "rosse" per presenza di idrossido di ferro.

Tra i componenti inorganici che possono essere presenti nelle acque alcuni sono tossici: si tratta di quelli comunemente noti come "metalli pesanti" (cadmio, cromo, piombo, arsenico, mercurio, nichel, ecc.) pur rientrandovi anche elementi a basso peso atomico o che non manifestano proprietà tipicamente metalliche (arsenico e selenio). I metalli pesanti possono essere presenti in natura o derivare da attività umane. Mentre nel primo caso si trovano nelle rocce quasi sempre sotto forma di

composti pochissimo solubili (ossidi, solfuri, ecc.), così che le acque circolanti solo raramente risultano contaminate da questi metalli, i metalli pesanti rilasciati nell'ambiente dalle attività umane non sono sempre in forma innocua. I metalli pesanti, data la loro tossicità, hanno una soglia di concentrazione ammessa molto bassa, generalmente dell'ordine dei microgrammi (milionesimi di grammo) per litro. Un metallo è tanto più tossico quanto più basso è il suo valore limite: talvolta è sufficiente una quantità piccolissima di un qualsiasi metallo pesante per rendere un'acqua non idonea all'uso potabile: ad es. sono sufficienti 5 milligrammi di cadmio per contaminare 1 metro cubo di acqua; fanno eccezione il rame e lo zinco che per la loro minore tossicità hanno valori limite più alti.

### 1.2.2 Principali contaminanti chimici organici

Fra le sostanze che possono contaminare le acque si trovano numerosi composti organici. Si tratta di sostanze che contengono carbonio e che sono presenti in natura ma che sono anche prodotte dall'attività umana (sono alla base della chimica della plastica, del legno, della carta, del petrolio e derivati, dei solventi delle vernici). La ricerca scientifica ne inventa continuamente di "nuovi" dalle proprietà tossicologiche sconosciute ed il cui destino, una volta immessi nell'ambiente, è incerto. Spesso si tratta di sostanze non degradabili o che impiegano tempi lunghissimi per decomporsi perché "sconosciute" ai microrganismi che operano la biodegradazione. Si ritiene che attualmente siano alcuni milioni le sostanze chimiche conosciute. Quelle effettivamente disponibili sul mercato sono circa 100.000 di cui circa 8000 tossiche e 200 ritenute cancerogene e sospette cancerogene; solo per 2100 prodotti sono stati individuati i rispettivi valori limite di tossicità. Ovviamente questi prodotti organici non sono tutti presenti contemporaneamente nell'ambiente: l'eventuale presenza in una zona è legato all'esistenza di industrie di produzione o all'utilizzo locale di singoli prodotti o classi di prodotti.

Tra i contaminanti organici si riscontrano più frequentemente:

- trielina, tetracloroetilene e composti organoalogenati in genere: i primi due sono prodotti in uso nelle lavanderie e in industrie metalmeccaniche; nelle acque si possono incontrare anche altri solventi (1,2 dicloropropano, metilcloroformio, ecc.) comunemente usati per lo sgrassaggio dei pezzi meccanici;
- idrocarburi: sono componenti delle benzine e degli oli lubrificanti; lo sversamento di queste sostanze nel suolo può determinare gravi inquinamenti delle acque;
- aloformi (derivati alogenati del metano): fra questi si trova il cloroformio ed altri composti simili. La presenza di aloformi nelle acque potabili (di acquedotto) non è da collegarsi con i fenomeni di inquinamento del territorio: nella maggior parte dei casi queste sostanze si formano durante alcuni processi di potabilizzazione per reazione chimica del cloro, impiegato come disinfettante, con sostanze organiche naturali di origine vegetale sempre presenti nelle acque di approvvigionamento a livello di pochi mg/l.

### 1.2.3 Principali contaminanti microbiologici

Sono microrganismi (invisibili ad occhio nudo) che, se ingeriti, possono provocare un danno alla salute del consumatore. Le malattie che possono essere trasmesse dall'acqua sono alquanto numerose e sono causate da varie specie di microrganismi (dai più grandi ai più piccoli): elminti, protozoi, miceti (funghi), batteri e virus. Gli agenti patogeni più diffusi nei nostri climi sono riportati in Tabella 1.2.1.

Le acque potabili in natura sono sempre più rare, soprattutto per la contaminazione microbiologica. Solo le sorgenti di montagna, localizzate in aree dove sono assenti insediamenti umani, possono offrire buone garanzie di sicurezza; tuttavia già la presenza di animali selvatici può indurre fenomeni di contaminazione delle acque. È quindi sconsigliabile bere acqua non controllata perché non valgono requisiti come la limpidezza, la freschezza e l'isolamento della zona per garantire l'assenza di rischio. Anche l'acqua di pozzi profondi, che dovrebbe essere meglio protetta dall'inquinamento, non offre sempre garanzia di purezza perciò è opportuno controllarla periodicamente e all'occorrenza ricorrere a trattamenti di potabilizzazione.

Tabella 1.2.1 – Agenti eziologici e patologie da ingestione di acqua contaminata.

Classificazione	Patologia	Specie
Elminti (vermi)	Elminitiasi	Schistosoma (larva) Fasciola Epatica (larva) Taenia solium (uova) Echinococcus (uova)
Protozoi	Dissenteria amebica	Entameba histolitica
	Giardiasi	Giardia intestinalis
	Criptosporidiosi	Cryptosporidium parvum
Batteri	Tifo e paratifo	Salmonella typhi e paratyphi A e B + altre salmonelle
	Gastroenterite	Shigella (varie specie) Yersinia enterocolitica Escherichia coli (enteropatogeno) Campylobacter jejuni
	Colera	Vibrio cholerae
Virus	Gastroenterite	Adenoirus Echovirus Norwalk virus
	Epatite	Epatite A, Epatite E

### 1.3 Tipologia delle analisi consigliabili

Un'acqua può essere dichiarata idonea all'uso potabile solo quando è stata analizzata sia sotto il profilo chimico che microbiologico: nessuna altra indicazione (l'assenza di torbidità, il senso di

gradevolezza, l'isolamento ambientale del corso idrico o della sorgente) costituisce un elemento sufficiente per dichiarare un'acqua "buona" o esente da rischi. Per le acque distribuite da reti acquedottistiche il tipo di controllo analitico e la frequenza sono dettati dalla legge. Per gli approvvigionamenti privati, stabilito che le opere di captazione siano state fatte a regola d'arte, è consigliabile eseguire un'analisi di tipo batteriologico. Se questa ha esito favorevole si può procedere ad un'analisi chimica di base per caratterizzare il tipo d'acqua che si va ad impiegare. All'occorrenza vanno ricercati specifici contaminanti in relazione alle condizioni ambientali: presenza di industrie, agricoltura ecc. Se l'esame batteriologico ha avuto esito sfavorevole o si abbandona la risorsa oppure si procede ugualmente agli esami chimici per meglio decidere sui trattamenti di potabilizzazione da eseguire.

#### 1.4 Limiti di legge (tratti dal D.Lgs. 31/2001)

##### Parametri microbiologici

Parametro	Valore di parametro (numero/100ml)
Escherichia coli ( <i>E. coli</i> )	0
Enterococchi	0

Per le acque messe in vendita in bottiglie o contenitori sono applicati i seguenti valori:

Parametro	Valore di parametro
Escherichia coli ( <i>E. coli</i> )	0/250 ml
Enterococchi	0/250 ml
Pseudomonas aeruginosa	0/250 ml
Conteggio delle colonie a 22°C	100/ml
Conteggio delle colonie a 37°C	20/ml

##### Parametri chimici

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura	Note
Acrilammide	0,10	µg/l	Nota 1
Antimonio	5,0	µg/l	
Arsenico	10	µg/l	
Benzene	1,0	µg/l	
Benzo(a)pirene	0,010	µg/l	
Boro	1,0	µg/l	
Bromato	10	µg/l	Nota 2
Cadmio	5,0	µg/l	
Cromo	50	µg/l	

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura	Note
Rame	1,0	µg/l	Nota 3
Cianuro	50	µg/l	
1, 2 dicloroetano	3,0	µg/l	
Epicloridrina	0,10	µg/l	Nota 1
Fluoruro	1,50	µg/l	
Piombo	10	µg/l	Nota 3 e 4
Mercurio	1,0	µg/l	
Nichel	20	µg/l	Nota 3
Nitrato (come NO <sub>3</sub> )	50	µg/l	Nota 5
Nitrito (come NO <sub>2</sub> )	0,50	µg/l	Nota 5
Antiparassitari	0,10	µg/l	Nota 6 e 7
Antiparassitari-Totale	0,50	µg/l	Nota 6 e 8
Idrocarburi policiclici aromatici	0,10	µg/l	Somma delle concentrazioni di composti specifici; Nota 9
Selenio	10	µg/l	
Tetracloroetilene	10	µg/l	Somma delle concentrazioni dei parametri specifici;
Tricloroetilene	30	µg/l	Somma delle concentrazioni di composti specifici; Nota 10
Triometani-Totale	0,5	µg/l	Nota 1
Cloruro di vinile	200	µg/l	Nota 11
Clorito I	50	µg/l	

Indipendentemente dalla sensibilità del metodo analitico utilizzato, il risultato deve essere espresso indicando lo stesso numero di decimali riportato in tabella per il valore di parametro.

Nota 1	Il valore di parametro si riferisce alla concentrazione monomerica residua nell'acqua calcolata secondo le specifiche di rilascio massimo del polimero corrispondente a contatto con l'acqua.
Nota 2	Ove possibile, ci si deve adoperare per applicare valori inferiori senza compromettere la disinfezione. Per le acque di cui all'articolo 5 comma 1, lettere a), b) e d), il valore deve essere soddisfatto al più tardi entro il 25 dicembre 2008. Il valore di parametro per il bromato nel periodo compreso tra il 25 dicembre 2003 ed il 25 dicembre 2008 è pari a 25 µg/l.
Nota 3	Il valore si riferisce ad un campione di acqua destinata al consumo umano ottenuto dal rubinetto tramite un metodo di campionamento adeguato e prelevato in modo da essere rappresentativo del valore medio dell'acqua ingerita settimanalmente dai consumatori. Le procedure di prelievo dei campioni e di controllo vanno applicate se del caso, secondo metodi standardizzati da stabilire ai sensi dell'articolo 11 comma 1 lettera b). L'Autorità sanitaria locale deve tener conto della presenza di livelli di picco che possono nuocere alla

	salute umana.
Nota 4	Per le acque di cui all'articolo 5, comma 1, lettere a), b) e d), questo valore deve essere soddisfatto al più tardi entro il 25 dicembre 2013. Il valore di parametro del piombo nel periodo compreso tra il 25 dicembre 2003 ed il 25 dicembre 2013 è pari a 25µg/l. Le Regioni, le Aziende sanitarie locali ed i gestori d'acquedotto, ciascuno per quanto di competenza, devono provvedere affinché venga ridotta al massimo la concentrazione di piombo nelle acque destinate al consumo umano durante il periodo previsto per conformarsi al valore di parametro; nell'attuazione delle misure intese a garantire il raggiungimento del valore in questione deve darsi gradualmente priorità ai punti in cui la concentrazione di piombo nelle acque destinate al consumo umano è più elevata.
Nota 5	Deve essere soddisfatta la condizione $[(\text{nitrito})/50+(\text{nitrito})] / 3 < o = 1$ , ove le parentesi quadre esprimono la concentrazione in mg/l per il nitrito (NO3) e per il nitrito (NO2), e il valore di 0,10 mg/l per i nitrati sia rispettato nelle acque provenienti da impianti di trattamento.
Nota 6	Per antiparassitari s'intende: <ul style="list-style-type: none"> <li>- insetticidi organici</li> <li>- erbicidi organici</li> <li>- fungicidi organici</li> <li>- nematocidi organici</li> <li>- acaricidi organici</li> <li>- algicidi organici</li> <li>- rodenticidi organici</li> <li>- sostanze antimuffa organiche</li> <li>- prodotti connessi (tra l'altro regolatori della crescita) e i pertinenti metaboliti, prodotti di degradazione e di reazione.</li> </ul> Il controllo è necessario solo per gli antiparassitari che hanno maggiore probabilità di trovarsi in un determinato approvvigionamento d'acqua.
Nota 7	Il valore di parametro si riferisce ad ogni singolo antiparassitario. Nel caso di aldrina, dieldrina, eptacloro ed eptacloro epossido, il valore parametrico è pari a 0,030 µg/l.
Nota 8	"Antiparassitari - Totale" indica la somma dei singoli antiparassitari rilevati e quantificati nella procedura di controllo.
Nota 9	I composti specifici sono i seguenti: <ul style="list-style-type: none"> <li>- benzo(b)fluorantene</li> <li>- benzo(k)fluorantene</li> <li>- benzo(ghi)perilene</li> <li>- indeno(1, 2, 3-cd)pirene</li> </ul>
Nota 10	I responsabili della disinfezione devono adoperarsi affinché il valore parametrico sia più basso possibile senza compromettere la disinfezione stessa. I composti specifici sono: cloroformio, bromoformio, dibromoclorometano, bromodichlorometano.

Nota 11	Per le acque di cui all'Articolo 5, comma 1, lettere a), b), e d), questo valore deve essere soddisfatto al più tardi entro il 25 dicembre 2006. Il valore di parametro clorito, nel periodo compreso tra il 25 dicembre 2003 e il 25 dicembre 2006, è pari a 800 µg/l.
---------	---

### Parametri indicatori

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura	Note
Alluminio	200	µg/l	
Ammonio	0,50	mg/l	
Cloruro	250	mg/l	Nota 1
<i>Clostridium perfringens</i> (spore comprese)	0	numero/100 ml	Nota 2
Colore	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale		
Conduttività	2500	µScm-1 a 20° C	Nota 1
Concentrazione ioni idrogeno	=6,5 e =9,5	Unità pH	Nota 1 e 3
Ferro	200	µg/l	
Manganese	50	µg/l	
Odore	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale		
Ossidabilità	5,0	mg/l O <sub>2</sub>	Nota 4
Solfato	250	mg/l	Nota 1
Sodio	200	mg/l	
Sapore	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale		
Conteggio delle colonie a 22 °C	Senza variazioni anomale		
Batteri coliformi a 37°C	0	numero/100 ml	Nota 5
Carbonio organico totale (TOC)	Senza variazioni anomale		Nota 6
Torbidità	Accettabile per i consumatori e senza variazioni anomale		Nota 7
Durezza *			Il limite inferiore vale per le acque sottoposte a trattamento di addolcimento o di dissalazione
Residuo secco a 180°C **			
Disinfettante residuo***			

Indipendentemente dalla sensibilità del metodo analitico utilizzato, il risultato deve essere espresso indicando lo stesso numero di decimali riportato in tabella per il valore di parametro.

\* valori consigliati: 15-50° F.

\*\* valore massimo consigliato: 1500 mg/l.

\*\*\* valore minimo consigliato 0,2 mg/L (se impiegato).

### Radioattività

Parametro	Valore di parametro	Unità di misura	Note
Trizio	100	Becquerel/	Note 8 e 10
Dose totale indicativa	0,10	mSv/anno	Note 9 e 10
Nota 1		L'acqua non deve essere aggressiva.	
Nota 2		Tale parametro non deve essere misurato a meno che le acque provengano influenzate da acque superficiali. In caso di non conformità con il valore parametrico, l'Azienda sanitaria locale competente al controllo dell'approvvigionamento d'acqua deve accertarsi che non sussistano potenziali pericoli per la salute umana derivanti dalla presenza di microrganismi patogeni vitali ad esempio il cryptosporidium. I risultati di tutti questi controlli debbono essere inseriti nelle relazioni che debbono essere predisposte ai sensi dell'articolo 18, comma 1.	
Nota 3		Per lo acque frizzanti confezionate in bottiglie o contenitori il valore minimo può essere ridotto a 4,5 unità di pH. Per le acque confezionate in bottiglie o contenitori, naturalmente ricche di anidride carbonica o arricchite artificialmente, il valore minimo può essere inferiore.	
Nota 4		Se si analizza il parametro TOC non è necessario misurare questo valore.	
Nota 5		Per le acque confezionate in bottiglie o contenitori, l'unità di misura è "Numero/250 ml".	
Nota 6		Non è necessario misurare questo parametro per approvvigionamenti d'acqua inferiori a 10.000 m3 al giorno.	
Nota 7		In caso di trattamento delle acque superficiali si applica il valore di parametro: $< o = a$ 1,0 NTU (unità nefelometriche di torbidità) nelle acque provenienti da impianti di trattamento.	
Nota 8		Frequenza dei controlli da definire successivamente nell'allegato II.	
Nota 9		Ad eccezione del trizio, potassio-40, radon e prodotti di decadimento del radon; frequenza dei controlli, metodi di controllo e siti più importanti per i punti di controllo da definire successivamente nell'allegato II.	
Nota 10		La Regione o Provincia autonoma può non fare effettuare controlli sull'acqua potabile relativamente al trizio ed alla radioattività al fine di stabilire la dose totale indicativa quando sia stato accertato che, sulla base di altri controlli, i livelli del trizio o della dose indicati va calcolata sono ben al di sotto del valore di parametro. In tal caso essa comunica la motivazione della sua decisione al Ministero della Sanità, compresi i risultati di questi altri controlli effettuati.	

#### (AVVERTENZA)

Fermo restando quanto disposto dall'articolo 8, comma 3 (*vedi testo completo*), a giudizio dell'autorità sanitaria competente, potrà essere effettuata la ricerca concernente i seguenti parametri accessori:

- 1) alghe;
- 2) batteriofagi enti E. coli;
- 3) elminti
- 4) enterobatteri patogeni;
- 5) enterovirus;
- 6) funghi;
- 7) protozoi;
- 8) *Pseudomonas aeruginosa*;
- 9) Stafilococchi patogeni.

Tali parametri vanno ricercati con le metodiche di cui all'articolo 8, comma 3 (*vedi testo completo*). Devono comunque essere costantemente assenti nelle acque destinate al consumo umano gli enterovirus, i batteriofagi anti E.coli, gli enterobatteri patogeni e gli stafilococchi patogeni.

## **2. ACQUE SOTTERRANEE**

### **2.1 Introduzione normativa**

La normativa di riferimento per le acque sotterranee è il D.Lgs 152/06 e s.m.i. che le definisce come tutte le acque che si trovano sotto la superficie del suolo nella zona di saturazione e a contatto diretto con il suolo o il sottosuolo (Art. 54). Le finalità della normativa sono di assicurare la tutela ed il risanamento del suolo e del sottosuolo, il risanamento idrogeologico del territorio tramite la prevenzione dei fenomeni di dissesto, la messa in sicurezza delle situazioni a rischio e la lotta alla desertificazione (Art. 53, comma 1). Per il conseguimento delle finalità la pubblica amministrazione deve svolgere ogni opportuna azione di carattere conoscitivo, di programmazione e pianificazione degli interventi (Art. 53, comma 2).

### **2.2 Derivazione acque sotterranee**

Le acque sotterranee vengono definite come acque che si trovano al di sotto della superficie terrestre, immagazzinate nei pori e nelle fessure di rocce compatte, in una zona detta di saturazione (Figura 2.2.1).

Le manifestazioni sorgentizie concentrate e diffuse appartengono alle acque sotterranee (Figura 2.2.2).

La captazione delle acque sotterranee avviene in corrispondenza di sorgenti attraverso bottini di presa, trincee drenanti, gallerie drenanti, drenaggi sub-orizzontali oppure mediante la perforazione di pozzi e l'utilizzo di pompe per l'estrazione di acqua. Possiamo allora distinguere tra derivazione da sorgente e derivazione di acque di falda (dove per falda s'intende uno strato di acquifero completamente saturo e delimitato inferiormente da argilla impermeabile).

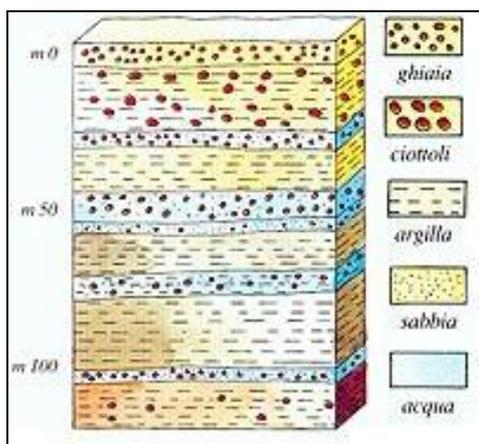


Figura 2.2.1 – Spaccato stratigrafico del sottosuolo.



Figura 2.2.2 – Sorgente.

## 2.2.1 Derivazione da sorgenti

### 2.2.1.1 Definizione di sorgente

Per sorgente si intende l'emergenza in superficie di acqua sotterranea per cause naturali, connesse con l'assetto idrogeologico strutturale locale.

I fattori principali che determinano la formazione di una sorgente sono: la differenza di permeabilità degli acquiferi, la struttura idrogeologica e la morfologia della superficie topografica. Questi fattori sono quelli che danno luogo ad una classificazione di tipo qualitativa (idrogeologica o genetica).

Le acque meteoriche, penetrando nel sottosuolo, circolano lungo le fratture del ceppo e in prossimità dei depositi di argille, sotto il ceppo (idrogeologicamente impermeabili), si ha un cambio di permeabilità che fa emergere queste sorgenti.

### 2.2.1.2 Caratteristiche

#### Portata

La portata delle sorgenti, cioè il loro quantitativo d'acqua per unità di tempo, varia nell'anno con le precipitazioni e la loro distribuzione, ma le variazioni avvengono con un ritardo tanto più sensibile quanto più lungo e più lento è il percorso sotterraneo, in dipendenza dell'ampiezza del bacino di alimentazione e delle proprietà del sottosuolo; così mentre nelle rocce permeabili in grande con bacini ristretti il ritardo può essere anche solo di poche ore, nelle rocce omogeneamente permeabili può giungere a parecchi mesi. Anche le ampiezze delle variazioni variano nello stesso senso: nel primo caso ora citato le portate di piena possono giungere anche a una decina di volte quelle normali, mentre nel secondo non superano le 2 o 3 volte.

### Percorso sotterraneo medio

Il percorso sotterraneo medio dipende dall'ampiezza del bacino imbrifero geologico; è da osservare, a proposito di bacino, che mentre quello imbrifero che alimenta le acque di superficie, ad esempio le fluviali, dipende dalla conformazione morfologica e può essere delimitato con criteri puramente topografici sulle carte a curve di livello, i bacini imbriferi delle sorgenti possono essere delimitati, assai meno facilmente, solo in base alla tettonica, e possono risultare anche notevolmente diversi da quelli topografici; l'acqua che cade è divisa dalla linea di displuvio in 2 parti che scorrono in 2 bacini imbriferi topografici diversi; invece quella che penetra può andare in parte in un bacino diverso da quello in cui cade. Il fenomeno è talora reso manifesto mediante la misura delle portate nell'anno, quando queste sono maggiori delle portate dovute ai quantitativi assorbiti e perfino ai quantitativi totali di acqua caduta.

### Temperatura

La temperatura delle sorgenti è alquanto variabile, e sulle sue variazioni si fanno sentire in buona parte le stesse influenze che agiscono sulle variazioni delle portate.

### Tempo di efflusso

Rispetto al tempo le sorgenti possono essere perenni, cioè ad efflusso continuo, o stagionali, e cioè ad efflusso limitato a una parte dell'anno: un curioso tipo è quello delle sorgenti intermittenti, che danno acqua a brevi intervalli di tempo; l'intervallo in cui l'acqua non esce è quello che occorre per riempire un serbatoio interno che poi per una frattura o condotta a sifone è scaricato all'esterno.

#### **2.2.1.3 Classificazione**

Le sorgenti possono essere distinte in: ordinarie, termali e minerali (Figura 2.2.3).

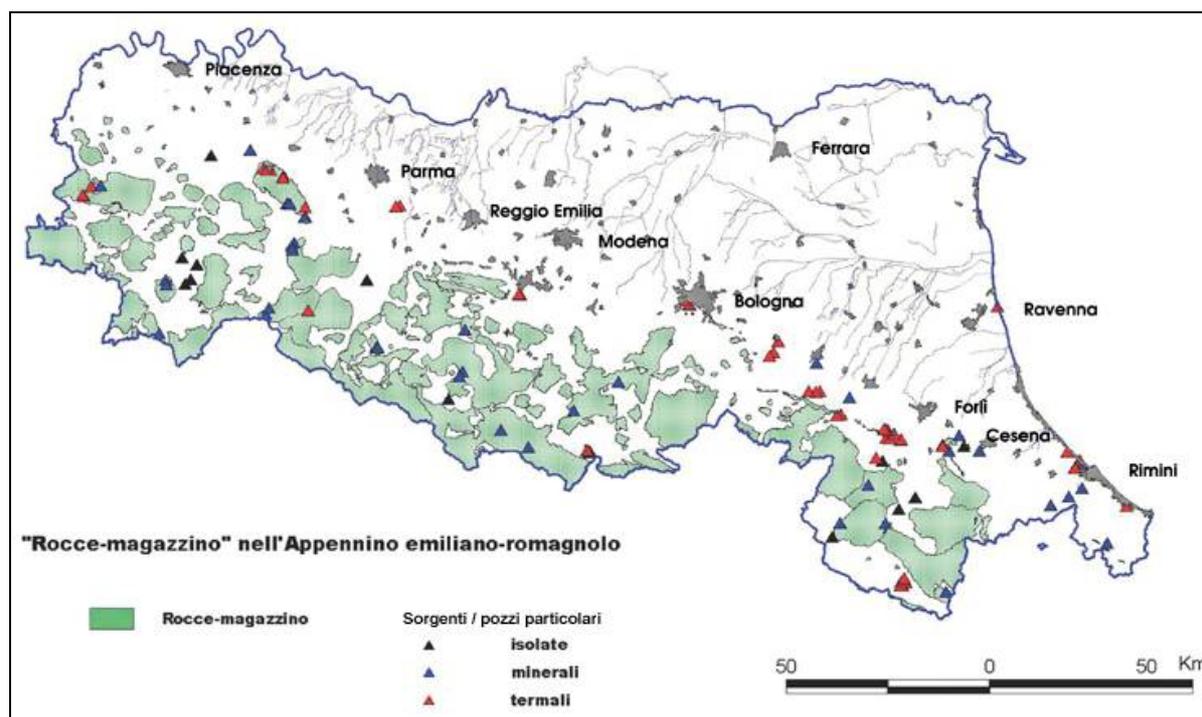


Figura 2.2.3 – Sorgenti in Emilia Romagna.

### Sorgenti ordinarie

I criteri di classificazione sono numerosi e seguono un parametro guida caratteristico, che può essere la temperatura dell'acqua, il chimismo o l'assetto geologico che condiziona il punto di emergenza.

Alcuni autori parlano di limiti di permeabilità imposta, laterale ecc, mentre altri prendono in considerazione la geometria del deflusso.

Sulla base di quest'ultimo criterio, si distinguono:

### Sorgenti di trabocco

Sboccano dai bassi morfologici di un bacino sotterraneo concavo che raccoglie più acqua di quella che può contenere. Si formano quando, lungo il deflusso naturale della falda, la roccia permeabile subisce un tamponamento da parte di una formazione impermeabile per ragioni tettoniche o stratigrafiche. Il contatto fra le due formazioni a diversa permeabilità crea una struttura sotterranea a catino che si satura completamente di acqua che trabocca nei punti ove le condizioni morfologiche del terreno lo permettono. Generalmente queste sorgenti sgorgano sul fronte di un versante, ad un'altezza che coincide all'incirca con la piezometrica della falda (Figura 2.2.4).

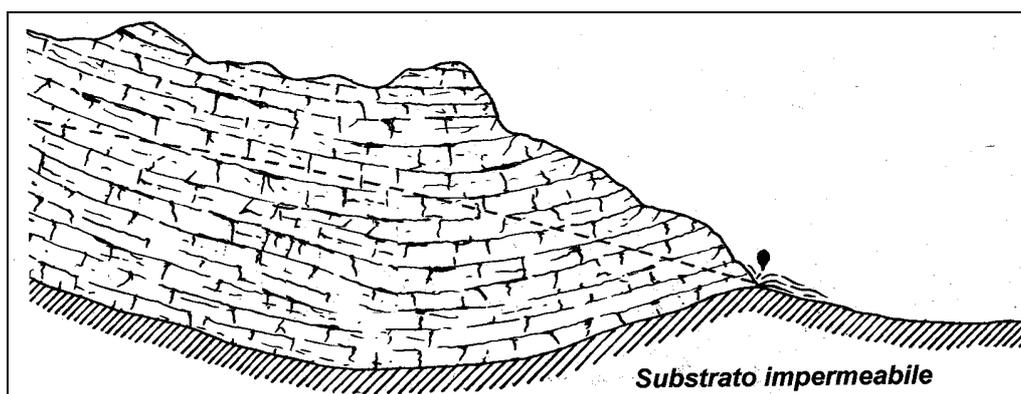


Figura 2.2.4 – Sorgente di trabocco.

### Sorgenti di deflusso

Sono le più comuni e si originano quando uno strato impermeabile inclinato affiora su un versante e fa defluire l'acqua contenuta negli strati permeabili sovrastanti. Sorgenti di questo tipo si incontrano nelle formazioni carbonatiche, ma si ritrovano anche nei complessi arenacei o alla base di antichi apparati vulcanici (Figura 2.2.5).

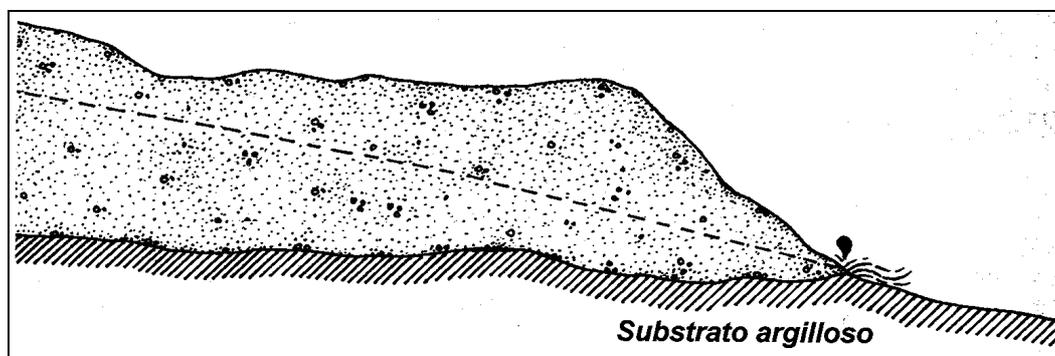


Figura 2.2.5 – Sorgente di deflusso.

### Sorgenti di sbarramento

Sono molto simili alle sorgenti di trabocco da cui si distinguono solo per il tipo di sbarramento al deflusso, che può essere costituito da una paleofrana, da un filone o da una forte eteropia laterale di facies.

Questo ostacolo lungo il piano inclinato sul quale corre l'acqua, obbliga la falda stessa ad affiorare in superficie. Sorgenti di questo tipo sono abbastanza frequenti nelle rocce magmatiche o metamorfiche dotate di permeabilità secondaria elevata (Figura 2.2.6).

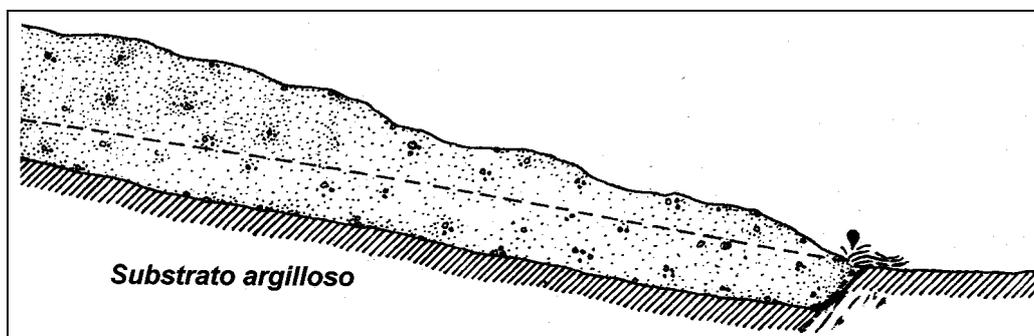


Figura 2.2.6 – Sorgente di sbarramento.

#### Sorgenti di affioramento o di valle

Sono caratteristiche di formazioni omogenee e permeabili che, dopo aver raggiunto la saturazione, producono emergenze lungo la superficie piezometrica.

In questo caso le sorgenti sono disposte su vari fronti o su allineamenti preferenziali ove fenomeni di erosione superficiale hanno creato condizioni favorevoli all'affioramento della falda. Dal punto di vista tecnico sono le più vulnerabili per l'alta permeabilità della roccia serbatoio affiorante (Figura 2.2.7).

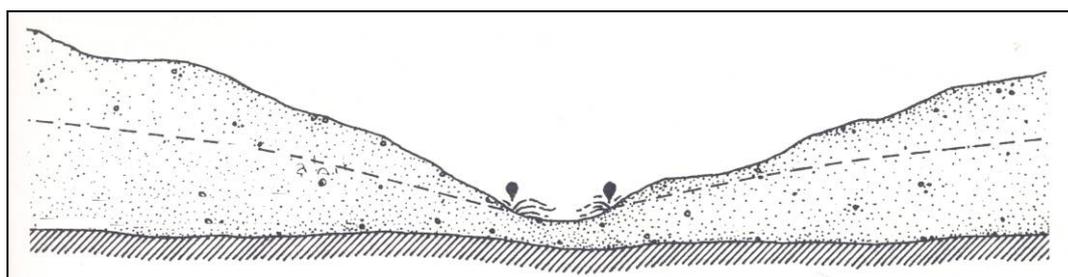


Figura 2.2.7 – Sorgente di affioramento o di valle.

#### Sorgenti di faglia

Si ritrovano per lo più in complessi rocciosi impermeabili o parzialmente permeabili che sono stati interessati da intense azioni tettoniche; il sistema di faglie, fratture e litoclasti generatosi costituisce un vero e proprio corpo idrico ove le faglie stesse rappresentano le vie di scorrimento più importanti.

Dove la morfologia del terreno lo consente o dove si creano condizioni che ostacolano il deflusso, l'acqua emerge in superficie a formare sorgenti interessanti ma soggette talora a variazioni di portata connesse con il regime delle precipitazioni locali.

Queste sorgenti costituiscono uno dei casi più difficili per una corretta captazione, in quanto il sistema reticolare delle fratture permette apporti diretti di acque superficiali (Figura 2.2.8).

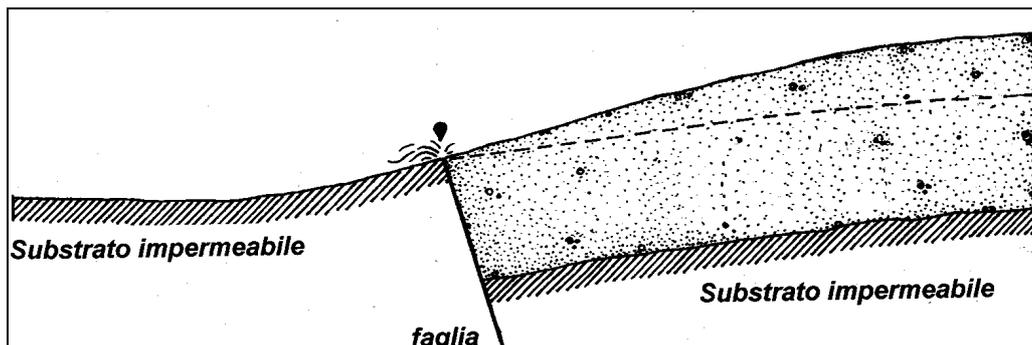


Figura 2.2.8 – Sorgente di falda.

### Sorgenti carsiche

Sono caratteristiche dei complessi carbonatici: hanno spesso portate considerevoli perché dispongono di una roccia serbatoio con elevata capacità di immagazzinamento, spesso hanno carattere intermittente, sono soggette a sbalzi di portata e sono poco affidabili per la loro elevata vulnerabilità: esistono però anche stupende sorgenti carsiche che si comportano molto bene relativamente alla costanza della composizione chimica dell'acqua, con portate stabili e caratteristiche batteriologiche sempre accettabili (Figura 2.2.9).

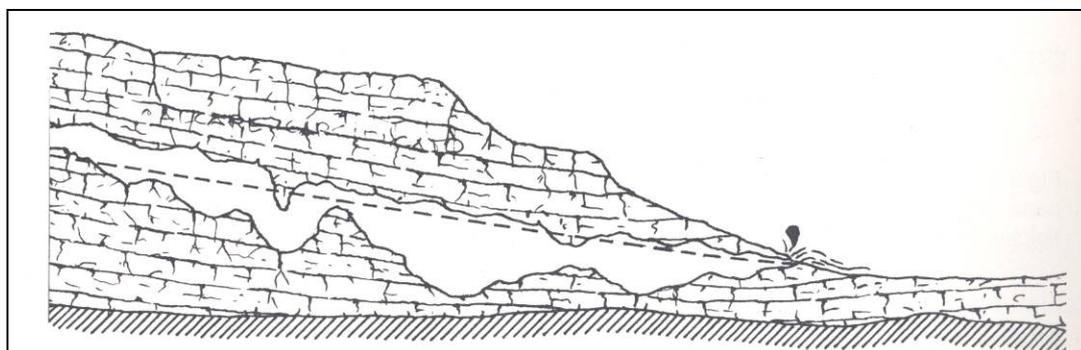


Figura 2.2.9 – Sorgente carsica.

### Sorgenti termali

Le sorgenti termali rientrano per la loro natura geologica in uno dei tipi sopra descritti ma, a differenza delle altre, la loro acqua proviene spesso da notevole profondità e talora risale per pressione idrostatica e per la forza di espansione dei gas che contiene. La temperatura supera normalmente i 23° C e non risente in genere delle variazioni stagionali di piovosità: la portata è indipendente dalle precipitazioni atmosferiche e non varia per periodi di siccità anche prolungata.

Le acque hanno un percorso sotterraneo lungo e profondo e all'emergenza sono quasi sempre ricche di sali e gas: vengono utilizzate per le loro proprietà terapeutiche, spesso assai specifiche (Figura 2.2.10).

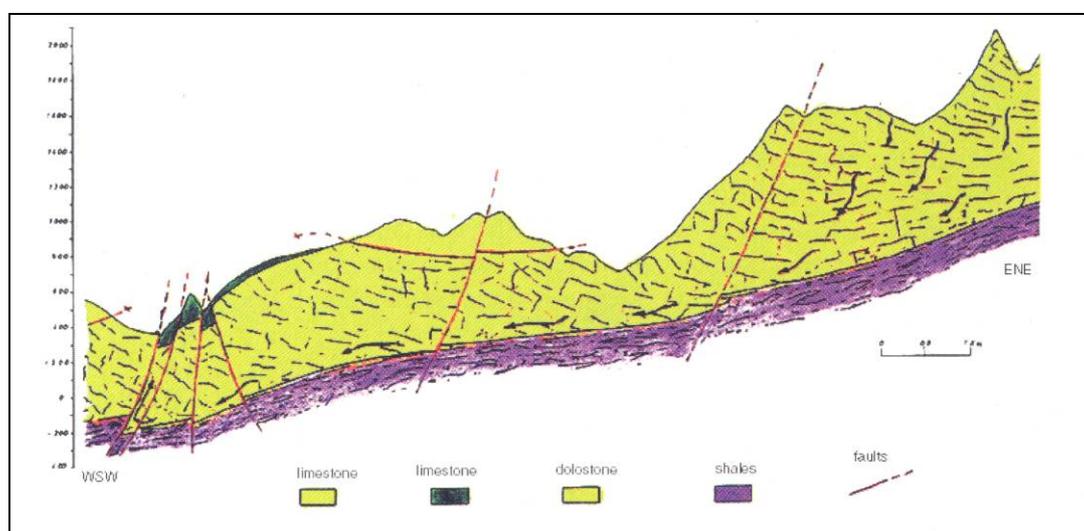


Figura 2.2.10 – Schema di flusso di un acquifero in roccia dolomitica che dà luogo a sorgenti di acque termali nel cuneo di faglie.

### Sorgenti minerali

Le acque di infiltrazione nell'attraversare lentamente le rocce costituenti il loro bacino imbrifero sciogliono dei sali, in esse contenuti, in quantità variabilissime a seconda della durata del percorso, della solubilità dei sali, del potere solvente che all'acqua stessa conferiscono anche i gas che essa ha sciolto attraversando l'atmosfera e specialmente l'anidride carbonica e l'ossigeno nonché gli stessi sali di cui essa man mano si arricchisce; perciò tutte le acque sotterranee sono più o meno mineralizzate. Lo sono naturalmente meno quelle a percorso sotterraneo più breve, quelle che circolano in rocce poco solubili, come in generale le magmatiche e le scistose cristalline; più mineralizzate sono quelle che attraversano formazioni saline, gessose, calcaree, dolomitiche, in ordine decrescente.

Nella classificazione delle acque in base al contenuto in sali si può seguire la classificazione proposta da D. Marotta e Sica in *Le acque minerali d'Italia* (Roma, 1933); il residuo fisso è determinato dopo averlo portato a 180°C.

- I. Acque oligo-minerali, aventi un residuo fisso non superiore a g 0,2‰
- II. Acque medio-minerali (residuo a 180°C superiore a 0,2 e inferiore a 1‰)
- III. Acque minerali (residuo a 180°C superiore a 1‰):
  - A. Salse
  - B. Solfuree
  - C. Arsenicati-ferruginose
  - D. Bicarbonate
  - E. Solfate

Nella classe I e in parte nella II sono comprese le acque potabili, in cui il residuo fisso non dovrebbe superare il mezzo per mille.

La classe III ha invece grande importanza per la cura delle infermità e talora anche per l'industria. L'analisi chimica che serve di base alla classificazione dà i componenti espressi in ioni, forma sotto la quale secondo le vedute moderne si trovano dissociate le molecole delle soluzioni saline assai diluite come quelle delle sorgenti minerali.

I componenti più frequenti delle acque minerali sono i seguenti:

- Cationi: sodio, potassio, litio, calcio, magnesio, stronzio, ferroso, alluminio
- Anioni: cloro, iodio, bromo, solforico, idrocarbonico, arsenioso; ad essi si aggiungono: silice, anidride carbonica libera, idrogeno solforato, acido borico, ecc.

#### **2.2.1.4 Captazione delle sorgenti**

Lo scopo di un'opera di captazione è quello di porre nell'acquedotto l'acqua, così come si trova nella parte finale del suo percorso sotterraneo, preservata da ogni possibile contaminazione chimica e batteriologica.

Generalmente il punto più vulnerabile di una sorgente è proprio la zona di emergenza. Nella maggioranza dei casi infatti, un inquinamento riscontrato nell'acqua prelevata da una sorgente non è espressione di inquinamento di tutta la falda, ma solo della sua parte terminale.

La roccia da dove sgorga la sorgente è quasi sempre interessata da fratture e microfrazture che si estendono a formare un reticolo capillare ove proliferano alghe, muffe e batteri che vengono

successivamente veicolati dalle acque di infiltrazione meteorica verso il sottostante acquifero, contaminandolo.

Inoltre cespugli e alberi, pur creando un paesaggio suggestivo, con il loro apparato radicale contribuiscono a creare vie preferenziali per le infiltrazioni nel sottostante acquifero.

Per decidere il metodo di captazione da adottare, non esiste una regola valida per tutti i casi: ogni sorgente ha le proprie caratteristiche e le proprie difficoltà che debbono essere affrontate e risolte volta per volta.

Lo scopo finale è sempre quello di captare tutta l'acqua disponibile, di non permettere la minima infiltrazione laterale o alla base del punto di emergenza e di eliminare ogni possibile contatto tra le acque di falda e quelle superficiali .

È necessario prevedere anche eventi eccezionali che potrebbero danneggiare irreparabilmente l'opera di presa, come frane o smottamenti, caduta di grossi alberi, piene improvvise di canali vicini ecc.

Tutto ruota intorno alla risorsa fondamentale, cioè l'acqua, che deve essere in quantità tale da soddisfare il fabbisogno, deve avere sempre la stessa composizione chimica e deve essere sempre batteriologicamente pura.

### **Linee guida tratte dalla “Delibera 4 Febbraio 1977 – Criteri, metodologie e norme tecniche generali”**

Alla luce di studi idrogeologici e di indagini di dettaglio, intese a definire le caratteristiche di affioramento della falda, si procederà alla definizione delle opere di captazione. Queste, per quanto possibile, penetreranno nella formazione costituente l'acquifero principale, mediante gallerie o pozzi.

Nella esecuzione dei lavori si dovrà tenere conto in particolare che alcune opere potranno divenire inaccessibili dopo il completamento dei lavori stessi.

La zona transitabile sarà adeguatamente isolata dalla rimanente.

Le acque intercettate, ma non destinate alla utilizzazione, nonché quelle provenienti dall'esterno, dovranno essere accuratamente separate ed allontanate.

I tratti di galleria ispezionabile, con alimentazione laterale, saranno provvisti di canale collettore destinato alla raccolta ed al convogliamento dell'acqua captata.

Di norma allo sbocco delle opere di presa sarà disposta una vasca di raccolta contenuta in un manufatto chiuso, di dimensioni tali da consentire la decantazione di eventuali sostanze solide trasportate dall'acqua, facilmente ispezionabile anche per eventuali interventi di manutenzione. A tale fine la vasca sarà divisa in 2 o più parti, ciascuna munita di scarichi di fondo e di troppo pieno. Le sue pareti saranno accuratamente impermeabilizzate. Le zone accessibili nelle quali l'acqua è a superficie libera (vasche di raccolta, serbatoi) saranno adeguatamente separate da quelle zone nelle quali

l'acqua è entro tubazioni in pressione (camere di manovra, cunicoli transitabili per alloggiarvi tubazioni). Appositi locali consentiranno la preparazione igienica del personale addetto alle ispezioni.

Le opere di presa saranno munite di apparecchiature per il prelievo di campioni, nonché di strumentazioni per la misura di talune caratteristiche delle acque derivate.

### **Vari tipi di emergenze**

Abbiamo già detto che l'opera di captazione di una sorgente ha lo scopo di convogliare tutta l'acqua possibile al punto di utilizzo, conservandone inalterate le caratteristiche specifiche. Una volta che siano state ricostruite nei dettagli la tipologia della sorgente e la geometria dell'acquifero nella sua parte terminale, si può iniziare il lavoro di progettazione della captazione considerando innanzitutto le condizioni morfologiche in cui la sorgente si trova.

Infatti essa può scaturire:

- dal detrito;
- direttamente dalla roccia;
- da una formazione carsica;
- da uno strato drenante in un terreno alluvionale.

Queste sono le situazioni più comuni, anche se talora esistono casi diversi che necessitano di indagini più approfondite.

Benché non esistano criteri standard validi per tutti i casi, in generale è necessario:

- individuare il piano di scorrimento dell'acqua, detto piano base o quota zero;
- valutare lo spessore del detrito presente tra il punto di emergenza e la roccia integra;
- individuare con certezza la larghezza del fronte di emergenza;
- circoscrivere la roccia " a rischio " al tetto dell'emergenza;
- individuare la vegetazione che dovrà essere eliminata;
- valutare la stabilità dei versanti interessati dalla sorgente nel punto di emergenza e nelle immediate vicinanze;
- valutare la pericolosità di eventuali ruscelli vicini alla sorgente le cui acque, in morbida o in piena, potrebbero interferire con l'opera di presa della sorgente stessa;
- valutare la viabilità esistente per giungere con automezzi all'opera di presa e la eventuale necessità di crearne di nuova;
- individuare il punto più vicino ove effettuare un allacciamento alla rete.

Questo è il quadro generale di intervento che deve essere preso in considerazione prima di iniziare il lavoro alle sorgenti.

Analizziamo ora come ci si comporta nei casi più comuni.

a) *La sorgente scaturisce dal detrito*

E' il caso più frequente. La scaturigine produce col tempo l'erosione della roccia dalla quale emerge, provocando ripetute piccole frane di materiale detritico ed arretrando continuamente il proprio punto di emergenza verso monte. Il materiale detritico costituisce un nuovo corpo drenante dove l'acqua della sorgente prosegue il suo percorso fino ad emergere più a valle, spesso ad alcune decine di metri dalla vera scaturigine dalla roccia (Figura 2.2.11 e Figura 2.2.12).

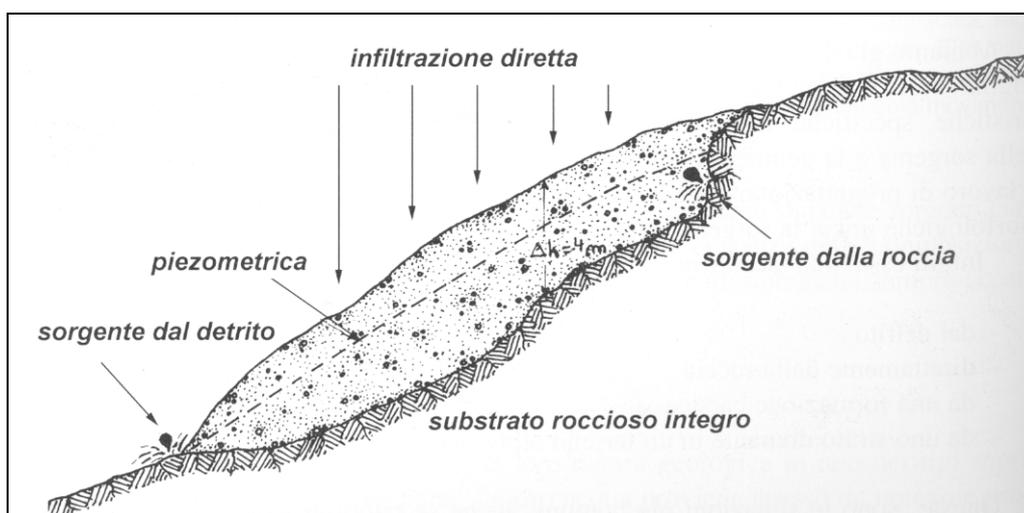


Figura 2.2.11 – Schema di emergenza dal detrito.

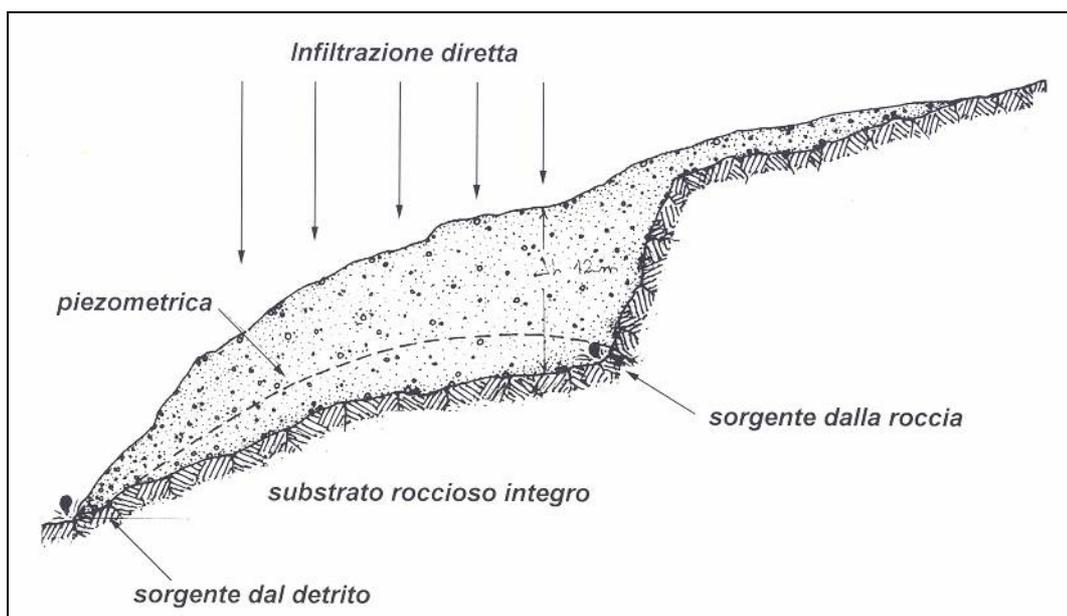


Figura 2.2.12 – Quando lo spessore dell'ammasso detritico è notevole, possono sorgere serie difficoltà nell'opera di captazione

Talora, a causa della morfologia del terreno, l'ammasso detritico che si deposita è così spesso e consistente da rendere difficile l'intervento necessario per giungere alla roccia integra. Ove la sciara detritica non sia sicuramente dimensionabile con un rilevamento di superficie, è indispensabile eseguire indagini geofisiche (tomografia elettromagnetica, ad es.) al fine di ricostruirne esattamente lo spessore, localizzare la profondità del substrato roccioso e individuare il punto in cui l'acqua fuoriesce dalla roccia (Figura 2.2.13 e Figura 2.2.14).

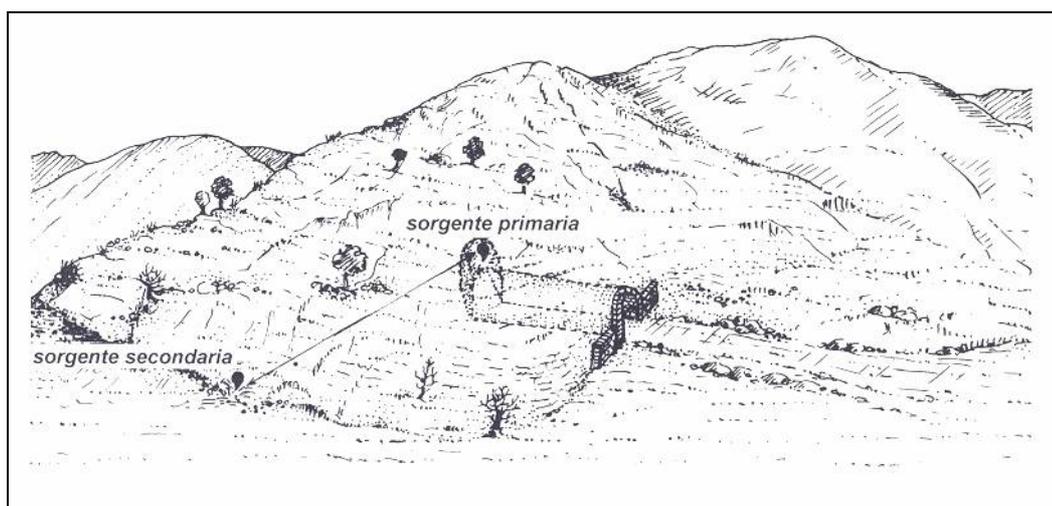


Figura 2.2.13 – Quando l'ammasso detritico da cui scaturisce una sorgente ha uno spessore notevole nel senso della massima pendenza, l'opera di captazione può essere eseguita mediante una galleria laterale che segue l'isoipsa immediatamente sottostante al punto di emergenza.

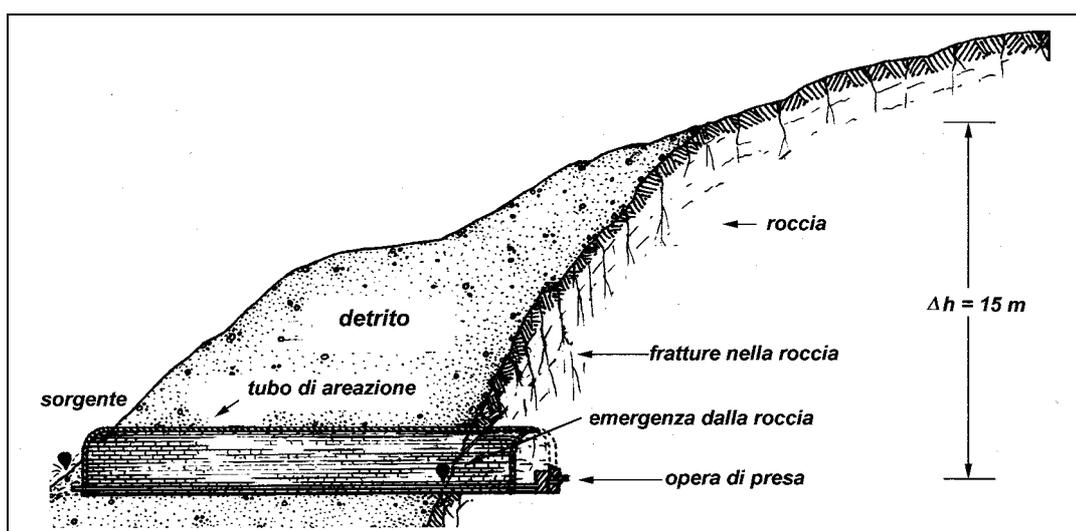


Figura 2.2.14 – Schema di opera di captazione di una sorgente mediante lo scavo di una galleria nel materiale detritico fino ad entrare nel corpo roccioso integro

Non è infatti opportuno effettuare un'opera di captazione nel detrito in quanto questo, essendo assai permeabile, può permettere l'infiltrazione di grandi quantità di acque superficiali che si miscelerebbero alle acque della sorgente, inquinandole o almeno modificandone la composizione. La valutazione dello spessore dell'ammasso detritico dal quale sgorga l'acqua è determinante perché può far cambiare totalmente il progetto di captazione: infatti, se lo spessore del detrito è dell'ordine di 3-4 metri, è possibile intervenire con mezzi meccanici, asportandolo completamente fino ad arrivare alla roccia di base e incontrare la vera scaturigine (Figura 2.2.15).

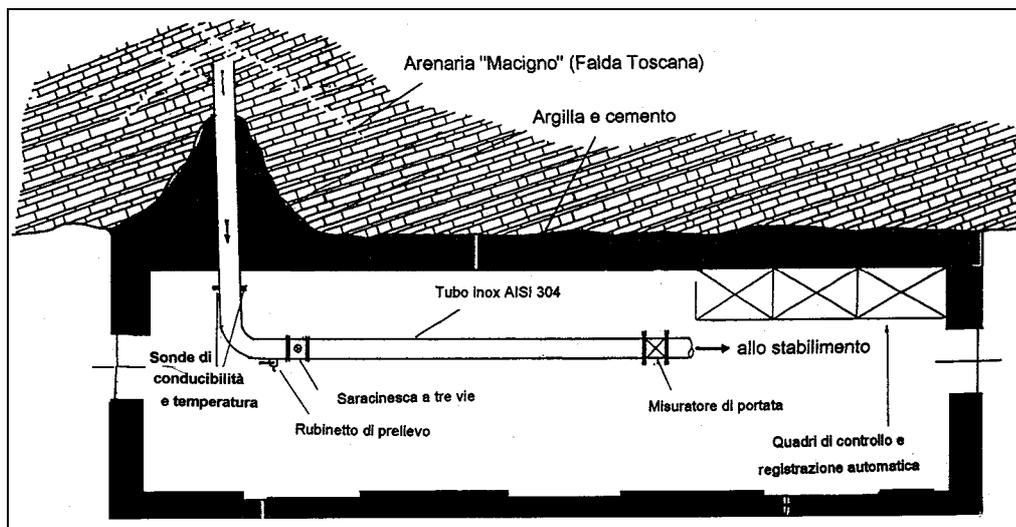


Figura 2.2.15 – Schema di captazione in roccia.

Se gli spessori sono superiori, le soluzioni possono essere due:

1) scavare una trincea profonda anche 7-8 metri perpendicolarmente al pendio in modo da intercettare l'acquifero giungendo lateralmente al punto di emergenza. Ciò può essere realizzato solo se la morfologia del pendio lo consente.

2) scavare una galleria nel corpo detritico fino ad arrivare alla emergenza dalla roccia.

Nella scelta, si deve tener conto innanzi tutto del risultato che si vuole conseguire e in secondo luogo dell'impegno economico.

*b) La sorgente scaturisce dalla roccia*

In questo caso ci troviamo nella situazione ideale per captare razionalmente una sorgente. L'unica indagine da condurre con attenzione sarà quella per valutare lo stato di integrità della roccia al tetto dell'emergenza (Figura 2.2.16).

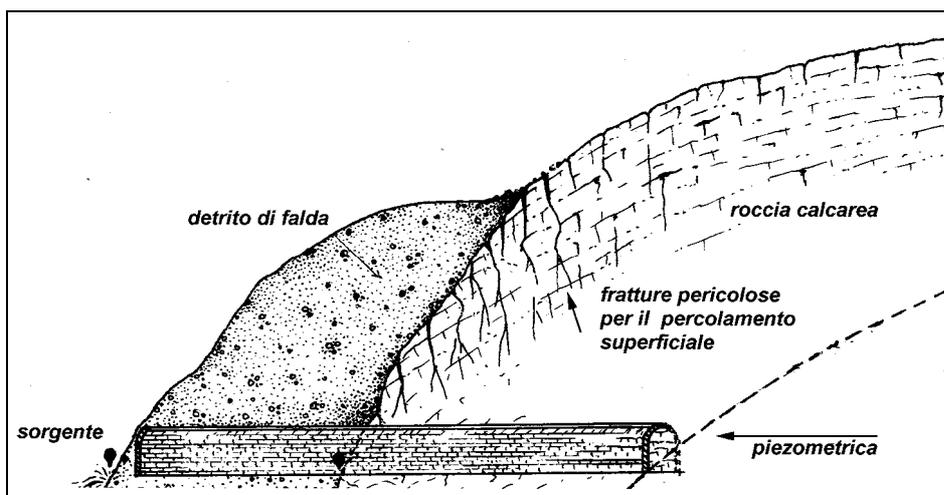


Figura 2.2.16 – Schema di opera di captazione di una sorgente mediante lo scavo di una galleria.

Se esistono fratture o litoclasti localizzati in un intorno di pochi metri, è conveniente lo scavo di una piccola galleria che segua il substrato della sorgente fino ad arrivare in una zona di assoluta sicurezza: se le fratture sono estese su un'area piuttosto vasta, si arretra il punto di captazione il più a monte possibile del punto di emergenza, attuando su tutta l'area fratturata una bonifica per una profondità verso monte, di circa 100-150 metri, con cementazioni bentonitiche o impermeabilizzazioni con argilla umida ben battuta. Si adottano infine tutti gli accorgimenti necessari ad evitare ruscellamenti di acque meteoriche verso le opere di presa, ponendo in opera canalette a lisca di pesce in grado di deviare le acque superficiali lateralmente al punto di captazione. Al tetto del punto di emergenza è opportuno togliere tutte le piante che potrebbero costituire vie di infiltrazione delle acque superficiali verso la falda e procedere ad opere di impermeabilizzazione superficiale che garantiscano la protezione del sottostante acquifero (Figura 2.2.17).

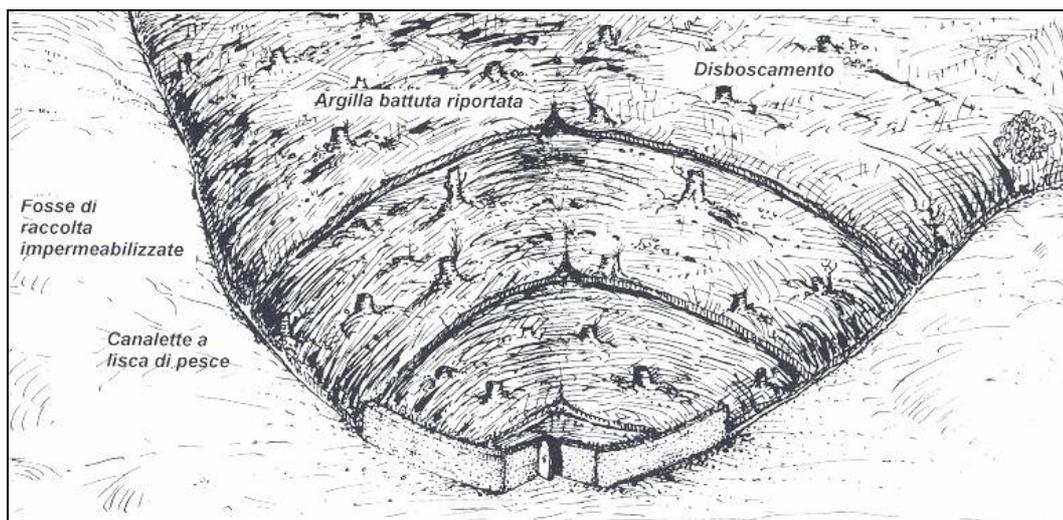


Figura 2.2.17 – Al termine delle operazioni di captazione, occorre regimare le acque meteoriche che ruscellano dal pendio con canalette disposte a lisca di pesce e fosse di smaltimento alla base del versante.

c) *La sorgente scaturisce da una roccia carsica*

Si procede come nel caso precedente: l'unica differenza consiste nel fatto che, nelle rocce carsiche, i rischi di contaminazione non sono contenuti solo in pochi metri a monte dell'emergenza, ma possono essere localizzati nei punti più imprevedibili (Figura 2.2.18).

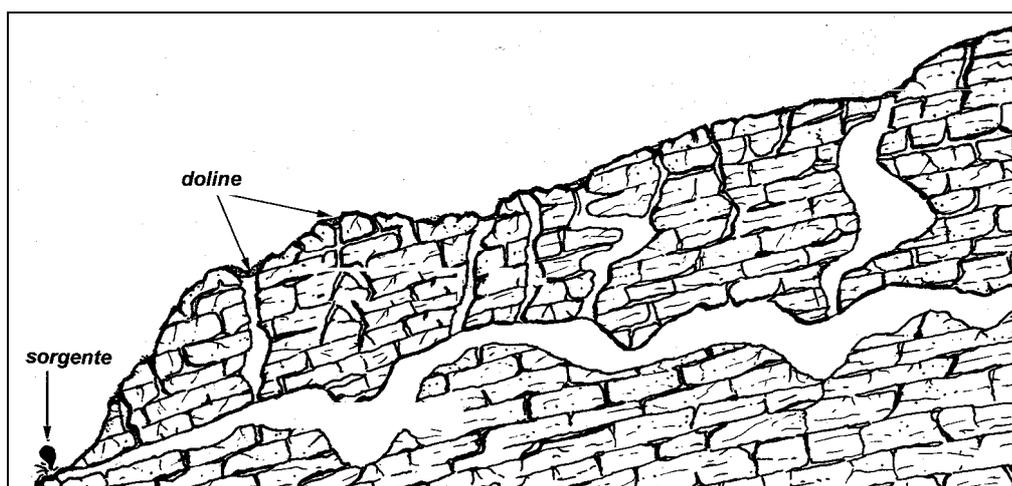


Figura 2.2.18 – Schema di circolazione delle acque in roccia carsica.

In questi casi è importante intervenire su ogni singola area ritenuta a rischio e tenere sotto controllo zone assai vaste.

Prima di dare il riconoscimento di validità all'opera di captazione di una sorgente carsica, è opportuno tenerla sotto controllo chimico e batteriologico per un tempo più lungo del normale, dopo aver effettuato le opere di bonifica al tetto dell'area di emergenza e nella zona circostante.

Se i risultati delle analisi sono sempre perfetti, l'obiettivo è stato raggiunto, anche se il controllo non dovrà mai essere allentato; se invece i risultati delle analisi risultassero talora non accettabili, è necessario proseguire con grande pazienza l'opera di bonifica, ampliando l'area di intervento per cerchi concentrici sempre più larghi.

Non è detto che il risultato sia garantito; anzi talora succede che non si riescano a individuare le zone di infiltrazione e che la sorgente debba essere abbandonata.

Le sorgenti di origine carsica sono le più difficili sia da studiare che da gestire. Quando sembra che la composizione dell'acqua si sia normalizzata e tutto vada per il meglio, senza alcun motivo apparente l'acqua può intorbidarsi, cambiare le caratteristiche chimiche e contaminarsi per periodi più o meno lunghi.

Poi il fenomeno cessa e si ripristinano le condizioni di normalità, ma spesso gli eventi si ripetono, sconsigliando il proseguimento di ogni indagine.

*d) La sorgente scaturisce da uno strato drenante in un terreno alluvionale*

E' il caso più frequente nei terreni alluvionali, ove a strati di argille sono intercalati livelli di sabbie e di ghiaie; l'assetto stratigrafico può consentire la venuta a giorno di numerose sorgenti distribuite lungo il bordo dello strato drenante, là dove l'erosione ha creato condizioni idonee al deflusso. Acque minerali della Toscana, del centro e del nord Italia hanno sorgenti che scaturiscono da strati ghiaiosi e sabbiosi di colline plioceniche o quaternarie, sedi di importanti corpi idrici abbastanza protetti.

Nel caso di sorgenti che scaturiscono da uno strato drenante compreso tra due strati impermeabili, l'opera di captazione si riduce alla localizzazione del fronte di emergenza, alla posa in opera di muri di protezione laterale disposti ad arco e allo scavo di una piccola galleria lungo il piano di scorrimento dell'acqua fino ad entrare per qualche metro al di sotto dello strato argilloso posto al tetto dell'acquifero. Tutta l'acqua viene captata con manufatti in acciaio inox, opportunamente attrezzati per consentire l'esecuzione di periodiche sanitizzazioni.

Se le sorgenti sono invece localizzate ai piedi di un rilievo totalmente permeabile, cioè costituito da ghiaie, sabbie e limi giacenti su uno strato argilloso, le cose sono un po' più complicate. La formazione permeabile affiorante infatti rappresenta una zona altamente vulnerabile attraverso la quale qualsiasi inquinante superficiale potrebbe percolare e raggiungere irrimediabilmente la falda sottostante. In questo caso è necessario proteggere l'area di emergenza con muri che costeggino il contatto substrato-acquifero per un tratto più lungo possibile, costipando argilla tra

il muro e il versante: si può poi scavare una piccola galleria, seguendo il flusso dell'acqua nel corpo drenante, fino a raggiungere il punto ove lo spessore della copertura è maggiore (Figura 2.2.19).

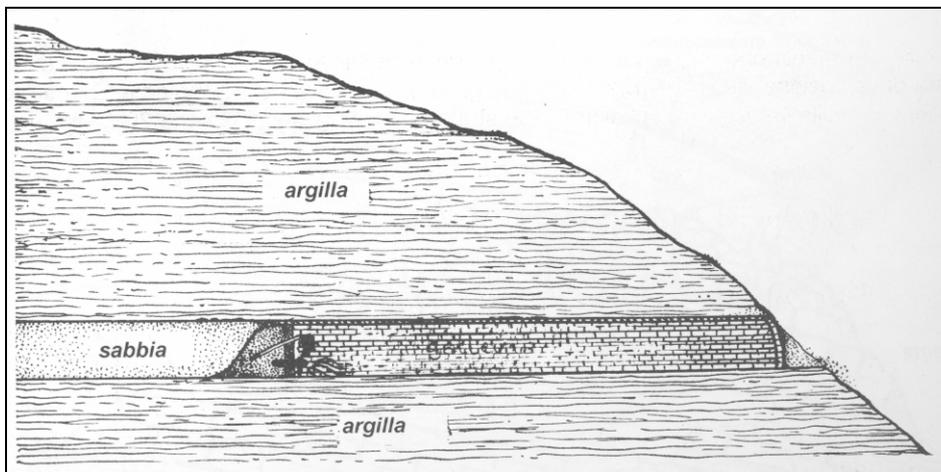


Figura 2.2.19 – Sorgente che scaturisce da uno strato compreso tra due formazioni impermeabili.

Occorre poi intervenire sulla parte esterna del complesso drenante: l'area viene impermeabilizzata, specie nei punti ove la copertura si riduce di spessore, vengono poste in opera canalette di scolo per allontanare le acque superficiali, tolte tutte le piante le cui radici potrebbero favorire l'infiltrazione delle acque meteoriche in falda e recintato tutto l'affioramento permeabile in modo che nessuno possa accedervi provocando, anche involontariamente, un inquinamento.

L'inquinamento batterico non preoccupa particolarmente in quanto, se lo spessore delle sabbie sopra la piezometrica della falda supera i 15-20 metri e la loro granulometria non è grossolana, la carica batterica esterna ha scarse possibilità di raggiungere l'acquifero (Figura 2.2.20).

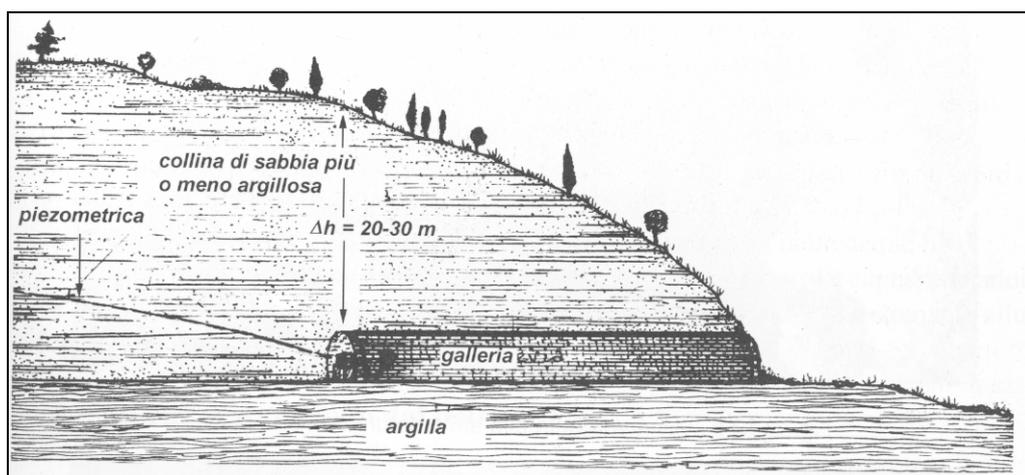


Figura 2.2.20 – Sorgente che scaturisce da un corpo idrico sabbioso non protetto superficialmente.

### **Tecniche di captazione delle sorgenti**

Una volta ricostruita la geometria dell'acquifero al punto di emergenza e deciso il metodo di intervento adatto per realizzare l'opera di captazione, si può iniziare la fase esecutiva.

Prima di dare inizio ai lavori, deve essere trasportato in prossimità della sorgente il seguente materiale di base:

- argilla plastica di cava, mantenuta costantemente umida;
- ghiaia silicea di diversa granulometria;
- cemento e betoniera a motore;
- box con tavolo e sedie;
- tavole e pali di legno;
- attrezzi e materiali da carpenteria (chiodi, seghe, carriole, pale, picconi, ecc.);
- martelli pneumatici con compressore;
- generatore di corrente;
- una gru;
- tubi in plastica di vario diametro, con innesto a bicchiere;
- ferri per armare;
- tubi e lamiere inox e saldatore ad argon;
- escavatori e ruspe;

- casseforme per gettare;
- pompe da cantiere e idrovore.

Inoltre, prima di iniziare qualsiasi lavoro, è sempre opportuno:

- fotografare la sorgente da un punto ben preciso che permetta di abbracciare tutta l'area dei lavori;
- scegliere una base al di sotto del piano di scaturigine come quota zero; quindi con lo strumento quotare ogni singola emergenza, rapportandola alla quota zero;
- misurare la temperatura dell'aria e la temperatura dell'acqua di ogni singola emergenza con un termometro di precisione;
- numerare ogni sorgente con picchetto e cartello;
- registrare la conducibilità di ogni emergenza con un conduttimetro di precisione, riportando il valore alla temperatura di 20°C;
- misurare manualmente la portata di ogni emergenza con cronometro e recipiente graduato;
- misurare con precisione l'estensione del fronte di emergenza delle acque.

A titolo di esempio, vengono ora descritte le modalità esecutive di captazioni adottate per sorgenti che scaturiscono dal detrito, dalla roccia e da uno strato drenante alluvionale.

#### Sorgenti che scaturiscono dal detrito

Fasi di intervento:

- si effettua l'individuazione del litotipo;
- si ricostruisce tramite rilievi geofisici lo spessore del detrito addossato al versante nel punto di emergenza;
- si numerano le venute d'acque;
- si effettua lo scavo di fosse lateralmente al fronte di emergenza delle acque;
- si costruiscono le fondamenta in calcestruzzo armato di due muri di contenimento;
- si costipa argilla plastica di cava tra muro e terreno;
- si convoglia l'acqua delle sorgenti in una canaletta scavata sotto le emergenze e la si allontana con un tubo di plastica: in questo modo tutta l'area antistante le sorgenti, cioè il piano base, rimane asciutta;
- si impermeabilizza l'area antistante le sorgenti con argilla battuta e cemento; questa soglia impermeabile ha lo scopo di creare una barriera sotterranea per sbarrare il deflusso di qualsiasi piccola infiltrazione possa introdursi sotto il piano base;

- si devia il flusso delle sorgenti verso il lato opposto a quello da dove vengono iniziati i lavori di scavo, usando tubi di plastica provvisori;
- si inizia lo scavo dal lato opposto a quello dove è stata deviata l'acqua delle sorgenti, asportando il materiale detritico dall'alto del fronte con escavatori e mezzi meccanici, rimanendo a quota superiore alla piezometrica. Le pareti pericolanti vengono armate con tavole e pali di legno;
- si procede successivamente ad asportare con piccone e pala la restante parte di terreno, fino a scoprire tutto il fronte di emergenza dell'acqua dalla roccia;
- si scava nella roccia in modo da localizzare bene i punti di emergenza. Si scava quindi una fossetta con gli estremi arcuati ad entrare nella roccia in modo da abbracciare sicuramente tutto il fronte dell'acquifero, che viene poi riempita di argilla plastica battuta e cemento, creando così un cordolo di contenimento posto ad una quota leggermente inferiore alla piezometrica;
- al di sopra del cordolo viene impiantato un muretto in calcestruzzo armato che abbraccia tutto il fronte di emergenza delle acque e che lateralmente si ammorsa ad arco nella roccia. Tutti i contatti tra calcestruzzo e roccia vengono impermeabilizzati a mano con argilla plastica e bentonite;
- il piano tra roccia e muretto viene impermeabilizzato con argilla e cemento e gli viene data una inclinazione di 10° a convergere verso il centro. Nella parte centrale viene realizzato un pozzetto in cui viene intestato un tubo di acciaio inox che esce dal fronte dei lavori. Tolto l'ultimo piccolo diaframma, le acque delle sorgenti vengono convogliate nella canaletta di raccolta e quindi nel pozzetto centrale da dove, attraverso il tubo inox, vengono avviate al collettore principale di raccolta;
- tutto lo spazio tra roccia e muretto viene riempito di ghiaietto siliceo ben lavato e sanitzizzato. A vari livelli e per tutta la lunghezza del fronte di captazione vengono inseriti tubi di acciaio inox del diametro di un pollice, completamente forati e collegati con collettori centrali ubicati esternamente all'opera di presa, per effettuare periodiche sanitizzazioni;
- si crea quindi una soletta in calcestruzzo armato, a sigillare questa specie di fossa drenante artificiale;
- il fronte di scavo viene protetto con un muro in calcestruzzo armato, così come le pareti laterali, in modo da creare un manufatto armonico e solido. Per l'opera di impermeabilizzazione tutti gli spazi tra roccia e muro in calcestruzzo vengono riempiti di argilla ben costipata e il tetto dell'area di emergenza viene impermeabilizzato con argilla battuta, dopo aver tolto tutta la vegetazione che vi radicava sopra;

- l'opera di captazione viene rifinita con canalette drenanti che hanno il compito di allontanare le acque meteoriche dal tetto e dal fronte dell'area di emergenza delle sorgenti.

### Sorgenti che scaturiscono dalla roccia

Possono verificarsi due casi:

- 1) la sorgente è una sola
- 2) le sorgenti sono diverse e occupano un fronte ben definito

Nel primo caso l'opera di captazione è molto semplice: è sufficiente verificare l'integrità della roccia nell'area circostante il punto di emergenza, entrare per quanto è possibile nella viva roccia e innestarvi un tubo in acciaio inox opportunamente dimensionato e ben cementato. Il tubo sarà quindi dotato degli strumenti di controllo previsti dalla legge e dei sistemi di sanificazione per disinfettare in profondità fino allo strato roccioso.

Un piccolo manufatto racchiuderà l'opera di presa che verrà rifinita con tutti gli accorgimenti di protezione e prevenzione, precedentemente esposti.

Nel secondo caso è possibile intervenire in vari modi, uno dei sistemi più collaudati è il seguente:

- creare un piano base ad una quota di almeno 3 metri più bassa del fronte di emergenza scavando nella roccia fino a formare un grande gradino
- delimitare il fronte delle emergenze con due muri laterali in calcestruzzo armato
- raccogliere tutta l'acqua delle sorgenti in tubi di plastica, deviarla lateralmente e incanalarla verso valle
- accertato che il piano di emergenza delle sorgenti si mantenga a quota superiore allo scavo, si impermeabilizza e si cementa il piano base, che si unisce così ai due muri laterali
- se non è possibile allontanare tutta l'acqua che scaturisce dal fronte acquifero, si possono utilizzare anche pompe da cantiere per mantenere asciutto il piano base
- viene data al piano base una leggera pendenza verso una scanalatura centrale, dove sarà alloggiato il tubo definitivo
- a partire dal piano base, si realizza una piccola paratia parallela al fronte dell'acquifero, ad una distanza di 30-40 cm dalla roccia
- nel centro della paratia, in basso, si lascia lo spazio per il tubo in acciaio inox, finestrato per tutta la parte che entra nell'opera di presa, che sarà alloggiato nella scanalatura del piano

base e intestato nella parete rocciosa . Il tubo deve avere una pendenza di almeno 5° e l'apertura da dove esso fuoriesce deve essere cementata con cura particolare

- si riempie l'intercapedine tra muretto e fronte acquifero con ghiaia silicea ben lavata e sanitizzata
- si realizza infine una soletta al tetto dell'opera di presa, ben ammorsata nella roccia del tetto della falda
- il tubo di acciaio inox di uscita deve essere dotato di valvola di chiusura a tre vie
- a vari livelli e per tutta la lunghezza del fronte di emergenza delle acque, vengono inseriti tubi di acciaio inox opportunamente forati e collegati con due collettori centrali, disposti sul tetto dell'opera di captazione e ben chiusi, per le periodiche sanificazioni.

#### Sorgenti in strati drenanti di terreni alluvionali

Prendiamo in esame il caso di un acquifero in sabbia, confinato tra due strati argillosi, con un fronte di emergenza dell'acqua di due metri.

Eseguite tutte le operazioni preliminari di controllo, i lavori proseguono nel modo seguente:

- si scava una piccola trincea e la si riempie con argilla di cava che sbarri la parte frontale della sorgente;
- si localizza il piano impermeabile di base sul quale scorre l'acqua della sorgente e lo si amplia con argilla e cemento, in modo da creare un piano di imposta sul quale iniziare le operazioni di scavo in galleria;
- si inizia l'opera di scavo, seguendo con attenzione il piano argilloso di base nella direzione della venuta dell'acqua. Essa viene continuamente deviata lateralmente al fronte di avanzamento e convogliata in un tubo che comunica con l'esterno. In questo modo il deflusso non risulta mai ostruito o disturbato dai lavori di scavo o dalle frane che si possono verificare in avanzamento;
- lo scavo in galleria prosegue ponendo in opera dei marciavanti e delle casseforme ove viene gettato il muro in calcestruzzo. E' essenziale procedere per piccoli tratti in modo che, dopo ogni metro di avanzamento, si possa porre argilla ben costipata tra il muro della galleria e la sabbia. Non occorrono lavori faraonici: è sufficiente una galleria alta 1,90 m. e larga 1,50 m;
- giunti nel punto ritenuto più idoneo alla captazione, in questo caso a circa 16 metri dalla vecchia emergenza, si realizzano due gallerie ad arco, ad abbracciare il punto di captazione, che vengono poi riempite di argilla plastica di cava ben battuta, in modo da

creare due diaframmi di "invito" per convogliare al centro le eventuali infiltrazioni laterali della sorgente;

- al centro si realizza il solito pozzetto di raccolta delle emergenze, dopo aver spinto un tubo filtrante per 2-3 metri nel corpo sabbioso dell'acquifero e aver disposto il tubo per la sanitizzazione e i periodici lavaggi dei filtri. Il pozzetto viene collegato con un tubo in acciaio inox che convoglia l'acqua allo stabilimento. Vengono posti in opera infine i sistemi di controllo e di sanitizzazione della sorgente. Nel caso in cui manchi lo strato impermeabile al tetto della falda, è opportuno spingere lo scavo della galleria il più possibile nell'interno del corpo drenante, in modo che lo spessore delle sabbie al tetto del punto di captazione sia il maggiore possibile.

### **Opere di captazione particolari**

In alcuni casi l'opera di captazione di una o più sorgenti non può essere effettuata seguendo le indicazioni classiche sopra descritte.

Si ricorre allora a metodi già largamente utilizzati in ingegneria mineraria, tenendo però conto che le opere di protezione per la captazione della falda debbono essere attuate applicando tutte le norme di sicurezza e di igiene indispensabili per le acque minerali naturali.

Le opere di presa particolari più frequentemente adottate per captare acquiferi minerali, sono:

- le trincee drenanti;
- le gallerie drenanti;
- i fori sub-orizzontali;
- i pozzi radiali;
- le captazioni di tipo misto.

### **Trincee drenanti**

Questo sistema di captazione viene adottato quando:

- le emergenze e gli stillicidi sono numerosi, disposti alla stessa quota lungo un versante roccioso o alla base di esso, e occupano un fronte massimo di 20-25 metri;
- le emergenze e gli stillicidi sono numerosi e disposti trasversalmente al pendio, lungo una linea di contatto tettonico o stratigrafico;
- le emergenze e gli stillicidi sono numerosi e sgorgano "a spaglio" da uno strato drenante di una formazione alluvionale.

Stillicidi o piccole emergenze disposte alla stessa quota su un versante roccioso possono essere captati per mezzo di una trincea drenante, consistente nell'effettuare uno scavo a cielo aperto perpendicolare alla direzione di flusso delle sorgenti, impiantato su un substrato impermeabile. Vengono "tagliate" così tutte le bocche di emergenza della falda e l'acqua ha modo di riversarsi in una canaletta di raccolta sottostante, da dove poi viene convogliata al serbatoio di accumulo.

La canaletta, posta in opera con una pendenza di circa 5°, viene inserita in un manufatto in cemento che ha lo scopo di proteggere la captazione dagli agenti atmosferici.

Questa è l'opera di captazione che normalmente viene effettuata quando l'acqua è destinata ad acquedotti pubblici o a complessi industriali.

Nel caso di acque minerali, che debbono essere sempre batteriologicamente pure anche al punto di emergenza, una captazione di questo tipo provocherebbe seri problemi di qualità durante la gestione. Infatti, se la trincea drenante ha il vantaggio di captare tutta l'acqua disponibile, possiede però il grosso inconveniente di esporre tutto il fronte di emergenza delle acque a rischio di inquinamento poiché è molto difficile procedere ad efficaci sanitizzazioni. Nonostante venga effettuato un "risanamento" della roccia da dove scaturiscono le acque con piccoli tamponamenti e cementazioni, molte fratture e microfratture rimangono aperte; alcune possono portare acqua nei periodi molto piovosi e asciugarsi durante la stagione secca, il che è molto pericoloso dal punto di vista igienico, in quanto si creano le condizioni ottimali per la proliferazione di colonie batteriche e di muffe.

Esistono acque minerali da molti anni in commercio, che sono state captate con questo sistema, sulle quali si è dovuto intervenire con modifiche, smantellando talora il manufatto che proteggeva la trincea drenante e inserendo sofisticati dispositivi di sanitizzazione.

Uno dei metodi che ha dato buoni risultati è quello cosiddetto "a iniezione diretta del sanificante". Si tratta di inserire al tetto del manufatto, in prossimità del piano di emergenza delle sorgenti, un tubo da mezzo pollice in acciaio inox dotato di sistemi di irrorazione e nebulizzazione collegati con un collettore centrale posto al di fuori dell'opera di captazione. Periodicamente, e talora molto spesso, si attiva il sistema iniettando un sanificante a pressione, così da disinfettare anche in profondità le fratture e microfratture presenti lungo il piano di emergenza delle sorgenti. L'unico inconveniente sta nel fatto che, quando si effettuano queste operazioni, è necessario buttare via molta acqua in quanto essa non è utilizzabile fino a che non sia scomparsa l'ultima traccia di sanificante dall'opera di presa.

In alcuni casi, quando il fronte delle emergenze non è molto esteso e alcune tra queste hanno portate nettamente superiori alle altre, si possono cementare le venute d'acqua minori e scavare entrando in profondità nella roccia fino ad essere certi che tutta l'acqua raccolta non si sia concentrata in un'unica emergenza. Si procede poi come se si stesse captando una singola

sorgente. Così, invece di una trincea drenante, si realizza una serie di captazioni semplici che sono successivamente riunite in un unico collettore.

Mai come in questo caso è importante effettuare uno studio dettagliato su tutto il versante ove sono presenti le emergenze, asportando localmente il detrito di copertura e riportando al suo posto argilla plastica di cava o bentonite, in modo da impermeabilizzare bene tutta l'area dove esiste il rischio di infiltrazione di acque superficiali.

Vengono poi poste in opera canalette di scolo disposte in modo da deviare lateralmente il flusso delle acque superficiali, che altrimenti percolerebbero verso il fronte della trincea drenante.

Nel caso di emergenze "a spaglio" provenienti da strati di ghiaie, sabbie o limi, la captazione con trincee drenanti sembra essere l'unico modo per risolvere una situazione assai delicata a causa delle difficoltà nel localizzare il fronte di emergenza.

Infatti nelle ghiaie e nelle sabbie molto spesso le acque hanno un comportamento bizzarro e non è raro che, specialmente dopo un lungo periodo piovoso, l'acqua scelga altri punti di emergenza, deviando dal vecchio percorso e non giungendo più al punto ove era stata effettuata l'opera di captazione.

### Gallerie drenanti

Diversi stabilimenti di acqua minerale attingono l'acqua da opere di captazione costituite da gallerie drenanti che si addentrano per varie decine di metri nella roccia o in terreni alluvionali poco permeabili, con strutture in muratura che creano una coreografia suggestiva a tutta l'opera di presa.

Le gallerie drenanti vengono realizzate nei casi di sorgenti che affiorano con fronti limitati, caratterizzati da stillicidi diffusi e scarse venute d'acqua: caratteristiche morfologiche che fanno supporre che esse rappresentino solo una piccola parte della potenzialità dell'acquifero.

Per realizzare questo tipo di opera di captazione, si inizia lo scavo di una galleria praticabile con il piano di imposta sullo strato impermeabile, un po' più in basso della quota di emergenza dell'acqua, seguendo metro per metro il percorso della base dell'acquifero. Usando dei marciavanti in acciaio si può proseguire lo scavo intercettando tutto lo strato drenante, creando un sostegno in muratura alla volta ma lasciando spazi laterali che consentono il percolamento e quindi la raccolta di tutta l'acqua che affiora.

Normalmente si riveste la galleria con lastre di acciaio inox disposte in modo da spingere gli stillicidi verso i bordi laterali della stessa; qui vengono poste in opera delle canalette di acciaio inox che, dopo aver raccolto tutta l'acqua di percolamento, la convogliano verso il serbatoio di accumulo. Ottimi risultati si ottengono in terreni in cui lo strato drenante è costituito da ghiaia mista a sabbie fini e limi, ove la permeabilità non è costante. Nel caso di rocce microfessurate,

gli stillicidi possono talora sfociare in piccole ma interessanti sorgenti che possono essere captate anche singolarmente.

Da quanto è stato sopra esposto, risulta evidente che le gallerie drenanti non costituiscono certo le migliori opere di captazione per acque minerali: presentano infatti inconvenienti anche gravi, quali la lenta perdita di permeabilità per formazione di depositi incrostanti e le notevoli difficoltà per una razionale e proficua sanitizzazione.

Quando acque contenenti una elevata quantità di bicarbonati sgorgano nella galleria, perdono la CO<sub>2</sub> e i bicarbonati solubili si depositano come carbonati, incrostando la volta e le pareti e riducendo così progressivamente la portata dell'acquifero. E' necessario pertanto intervenire periodicamente con operazioni di ripulitura che tolgano, meccanicamente o con prodotti chimici, le incrostazioni e attacchino anche le microfessure e i meati della roccia, che con il tempo tendono ad otturarsi. L'acqua sgorga su un fronte diffuso e viene raccolta lateralmente alla base della galleria praticabile che deve quindi essere soggetta a periodici interventi di manutenzione e di sanitizzazione da effettuarsi con estrema cura.

E' evidente che il sistema è ad alto rischio di inquinamento, per possibili insediamenti di colonie batteriche e di muffe. Per ovviare a questo problema, si dispongono batterie di irroratori a pressione in prossimità delle pareti e della volta della galleria, attraverso i quali si può nebulizzare il sanificante in ogni parte dell'opera di presa.

L'operazione può essere fatta manualmente, ma è più conveniente porre in opera un dispositivo automatico comandato elettronicamente da una cabina esterna, che garantisca un'assoluta sterilità al sistema. Anche in questo caso, l'acqua sanitizzata deve essere gettata via fino a che non sia più riscontrabile alcuna traccia di disinfettante nella galleria drenante; ciò procura un certo danno al sistema produttivo, sia dal punto di vista economico che tecnico.

### Fori sub-orizzontali

Quando un acquifero è localizzato in una zona montana o collinare inaccessibile ai mezzi rotabili e il suo deflusso è sbarrato da una formazione impermeabile o semipermeabile, si può operare la captazione eseguendo dei fori sub-orizzontali.

Si effettua una serie di perforazioni inclinate verso l'alto di 5-10 gradi o più che, attraversando lo strato impermeabile che sbarrava il deflusso delle acque, entrano nel corpo idrico creando le condizioni per un vero e proprio travaso.

Le operazioni di perforazione non sono semplici: si procede usando un martello fondo foro che si trascina dietro un tubo in acciaio inox di diametro un po' inferiore a quello del perforo, fino ad innestarlo nell'acquifero. Il primo tubo della colonna viene fenestrato, in modo che quando entra nel corpo idrico abbia maggiore possibilità di captare la falda, aumentando così la sua superficie

filtrante. Man mano che il tubo avanza, vengono aggiunti e saldati altri tubi, creando una colonna continua che rimarrà definitivamente in opera.

Il diametro delle perforazioni varia da 80 mm a 150-200 mm e più e si possono raggiungere profondità di 80-90 metri dalla piazzola di cantiere.

Teoricamente si potrebbero raggiungere distanze anche maggiori, ma ciò andrebbe a scapito della qualità del lavoro, in quanto è molto difficile mantenere la direzione di imposta iniziale della perforazione: è sufficiente che la punta del martello incontri un ostacolo per deviare dal suo percorso e perché si perda così il controllo della direzione di perforazione. Nel caso di acque minerali, questo tipo di captazione è evidentemente sconsigliabile perché troppe sono le parti incontrollabili che possono poi creare problemi durante la produzione.

Talora si tenta di effettuare una cementazione del tubo, sia in avanzamento che al termine della perforazione, iniettando cemento con pompe a pressione, utilizzando dei packers per evitarne il refluisce, ma i risultati sono sempre incerti; nessuno può garantire che la cementazione abbia sigillato completamente ogni eventuale infiltrazione tra tubo e perforo e che il cemento non si sia disperso con l'acqua nel corpo idrico.

Non si può garantire neppure che, durante il trascinarsi, il tubo non sia rimasto danneggiato da frammenti acuminati di roccia o che alcune saldature non si siano deteriorate, consentendo infiltrazioni locali. L'unico modo per evitare tutti questi problemi consiste nel realizzare il preforo trascinando un tubo in acciaio del diametro più grande possibile (200-250 mm.) attraverso tutto lo spessore impermeabile e intestandolo ben in profondità nell'acquifero.

Si lascia in opera il tubo e si estrae tutta la colonna delle aste di perforazione; si immette quindi nel tubo un'altra colonna di tubi in acciaio inox di diametro non superiore a 100-120 mm, con la testa innestata in un packer metallico dotato di guarnizioni di teflon; la colonna deve essere dotata di numerosi centratori che possono scorrere sulla parete interna del tubo di diametro maggiore, per mezzo di piccole sfere o cuscinetti. Data la presenza di acqua che scende nel tubo, durante le operazioni di introduzione del tubo definitivo è necessario esercitare una certa pressione per spingere la colonna dotata di packer fino alla bocca del tubo intestato nell'acquifero. Per questo si usano presse spingitubo che esercitano una pressione continua e nello stesso tempo permettono di saldare agevolmente le barre di tubo e i rispettivi centralizzatori.

Terminata questa operazione, si inietta a pressione del cemento, in modo da sigillare completamente lo spazio tra i due tubi.

Si realizza così un'opera di captazione che offre minori possibilità di inquinamento e può essere gestita con una buona affidabilità.

Difficilmente viene effettuato un solo foro sub-orizzontale: generalmente se ne "sparano" tre, quattro o anche più, a seconda della quantità di acqua che il sistema può erogare.

### Pozzi radiali

I pozzi radiali costituiscono un buon sistema di captazione per acquiferi a scarsa permeabilità e trasmissività come quelli che caratterizzano i complessi sedimentari lacustri, ove predominano limi e sabbie fini in strati molto sottili. Talora vengono effettuati anche in complessi rocciosi fratturati, ove l'acqua circola solo attraverso microfrazioni con direzioni preferenziali.

L'opera di captazione consiste nell'effettuare un pozzo verticale di grande diametro, intestato nel substrato impermeabile o comunque ben cementato sul fondo, e quindi dei fori orizzontali in corrispondenza degli strati drenanti. Il pozzo funziona da cisterna di raccolta per tutta l'acqua che viene drenata dai tubi radiali. Generalmente non si raggiungono portate elevate, però si riesce a captare l'acquifero su un'area piuttosto ampia. Per effettuare i dreni radiali in terreni abbastanza molli, si può utilizzare una pressa idraulica che spinge direttamente la colonna di filtri dentro lo strato acquifero e la lascia in opera (metodo Ranney). Al termine dell'infissione si inietta aria compressa in modo da rimuovere le sabbie e i limi, creando un filtro naturale intorno al tubo stesso.

L'inconveniente di questo metodo di captazione è dato dal fatto che le canne drenanti sono soggette ad intasarsi e debbono essere frequentemente ripulite e soffiate. L'utilizzo di filtri artificiali con pori dell'ordine del micron, che rivestono l'interno del dreno, non dà buoni risultati: il sistema perde lentamente di permeabilità e una manutenzione regolare e periodica è di rigore.

Per infiggere le canne drenanti in terreni un po' più consistenti si può usare il metodo Fehlmann, che prevede la penetrazione nel terreno di un'asta cieca, del diametro di circa 150-200 mm, con la spinta di potenti getti d'acqua e aria in pressione che scavano il terreno in avanzamento.

Terminata la perforazione, si pone in opera la vera colonna drenante in acciaio inox, dotata di filtri a ponte e avvolta da rete reps e quindi si estrae la colonna cieca. Neppure in questo caso si possono evitare gli intasamenti prodotti dalle particelle più fini presenti nel sedimento; si ottiene però una riduzione della frequenza del fenomeno gestendo con criterio il pompaggio dal pozzo.

Il livello idrodinamico deve rimanere rigorosamente costante al di sopra della quota delle canne radiali, in modo che non si producano cambiamenti della velocità dell'acqua nella falda; in questo modo, quando si è raggiunto un equilibrio idrodinamico nel sistema di emungimento, vengono di molto limitati i trascinati delle particelle più piccole dal corpo limoso e i tubi radiali rimangono più a lungo liberi dai sedimenti.

Nei corpi rocciosi microfrazionati si utilizza lo stesso sistema di captazione, ma i dreni radiali vengono realizzati con modalità totalmente diverse. Dal pozzo centrale infatti si perfora la roccia

in tutte le direzioni, utilizzando un martello a fondo foro manovrato da piccole aste che vengono aggiunte man mano che il foro avanza.

Al termine si pone in opera un tubo inox di piccolo diametro, dotato di filtri fessurati, in modo da captare totalmente l'acqua che vi percola. In questo caso gli intasamenti sono rari e il sistema funziona senza dare problemi.

Per le acque minerali, questo tipo di captazione presenta alcuni inconvenienti relativamente alla qualità dell'acqua e ai metodi di sanitizzazione.

Essendo il pozzo abbastanza superficiale e di grande diametro, è necessario rivestirlo in acciaio inox e cementarlo, dopo aver predisposto tamponi di argilla per evitare possibili percolamenti di acque superficiali nella falda sottostante. Occorre inoltre impermeabilizzare con argilla il terreno che lo circonda per un diametro maggiore della lunghezza dei dreni radiali, predisponendo canalette per lo smaltimento rapido delle acque meteoriche e controllando se esistono aree permeabili vicine che possano influenzare e contaminare le acque sottostanti.

Per la sanitizzazione, dopo aver versato il disinfettante nel pozzo, si può utilizzare un grande tappo in acciaio inox che funzioni come un pistone; collegato ad una batteria di aste, esso può esercitare una pressione dall'alto verso il basso e viceversa, in modo che l'acqua e il sanitizzante possano rifluire contro corrente dentro tutti i dreni radiali, interessando così l'intera opera di captazione.

### Opere di presa di tipo misto

Quando un'opera di captazione viene realizzata componendo vari metodi fra quelli sopra descritti, si parla di opera di presa di tipo misto. Ad esempio, talora si effettuano trincee drenanti che danno poca acqua; per incrementarne la potenzialità idrica, si "spara" una serie di fori sub-orizzontali in modo da entrare nella parte più permeabile del corpo idrico. Si ottiene così un'opera di captazione di tipo misto che usufruisce di fori sub-orizzontali e di una trincea drenante che raccoglie tutta l'acqua intercettata dal versante ove affiorava timidamente l'acquifero.

L'opera di presa di tipo misto si usa frequentemente anche perché offre la possibilità di effettuare le sanitizzazioni impiegando poco personale, pur raggiungendo i migliori livelli di efficienza.

## 2.2.2 Derivazione da falda tramite pozzi

### 2.2.2.1 Definizione di pozzo

Un pozzo è uno scavo praticato nel terreno, verticalmente per estrarre acqua dal sottosuolo, di solito a sezione circolare e rivestito in muratura, nell'antichità anche in legno; la tecnica di costruzione dei pozzi, anticamente scavati a mano, è rimasta fondamentale inalterata per millenni.

Attualmente all'interno dei fori scavati, fino al raggiungimento della falda, viene inserito un tubo in acciaio chiamato colonna. In corrispondenza degli strati permeabili della falda, la colonna presenta delle aperture, chiamate filtri, attraverso le quali l'acqua passa dalla falda al pozzo.

L'Italia ha una grande tradizione nella trivellazione dei pozzi, questo per la fiducia nella buona qualità delle acque profonde, che ha favorito la diffusione dell'uso di prelevare acque sotterranee mediante la perforazione.

Ancora oggi, soprattutto al nord, un notevole quantitativo delle acque captate è di origine freatica.

### 2.2.2.2 Livello dell'acqua nel pozzo

Livello statico (metri) dal punto di riferimento: livello dell'acqua nel pozzo/piezometro misurata dal punto di riferimento (pr), non disturbato dai prelievi; per convenzione si usano valori negativi, a meno che non vi sia salienza; la salienza è un fenomeno che si verifica in alcune particolari condizioni in cui il livello dell'acqua è più alto rispetto al piano campagna (Figura 2.2.21).

Livello dinamico (metri) dal punto di riferimento: livello dell'acqua nel pozzo misurata dal punto di riferimento (pr), quando ha luogo l'emungimento.

Livello piezometrico s.l.m. (metri): è la quota del pelo libero dell'acqua nel pozzo sul livello del mare, può avere valori negativi (livello dell'acqua sotto la quota del livello del mare) o positivi;

L.P. = quota punto riferimento (pr) + misura del livello statico (che ha valore negativo).

Misura della soggiacenza dal piano campagna (metri): è la misura del pelo libero dell'acqua nel pozzo dal piano campagna (pc); si calcola; per convenzione si usano valori negativi. E' opportuno provvedere a calcolare prima la piezometria e poi la soggiacenza; il calcolo si ottiene nel seguente modo: livello piezometrico – quota piano campagna (pc).

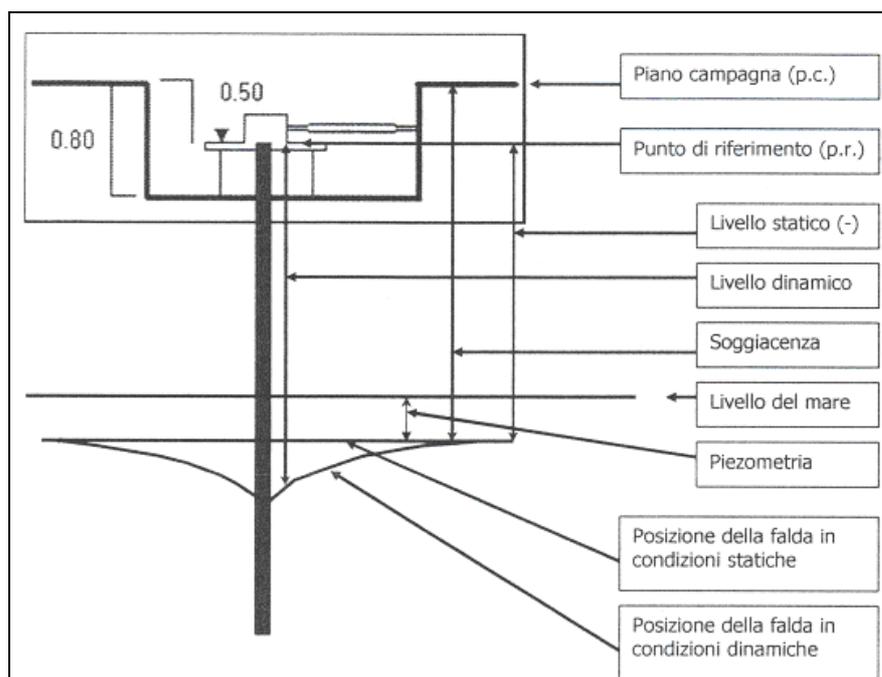


Figura 2.2.21 - Misura del livello statico.

### 2.2.2.3 Definizione di falda e di acquifero

Per falda acquifera (o falda idrica, secondo una vecchia definizione) s'intende l'acqua che circola nel sottosuolo (più esattamente, nella zona di saturazione dell'acquifero).

Il suolo e le rocce contengono sempre quantità variabili di acqua. Quando l'acqua contenuta nelle porosità, negli interstizi, nelle cavità e nelle fratture geologiche può fornire una quantità utilizzabile di acqua, questa formazione si definisce acquifero.

L'acquifero può essere suddiviso in due zone:

- zona insatura (o zona di aerazione), la pressione dell'acqua supera la pressione atmosferica. Ciò significa che, se si buca la terra (p.es. con un pozzo), parte dell'acqua presente potrà essere prelevata sotto forma di acqua libera;
- zona satura, l'acqua è aspirata dal terreno. Essa appare come umidità ma non appare mai come acqua libera.

In entrambe le zone, l'acqua si può comunque muovere nel terreno, per capillarità e con altri meccanismi.

Anche la falda acquifera si distingue in:

- falda libera o freatica: falda con superficie piezometrica in grado di oscillare liberamente nell'acquifero;
- falda confinata: falda limitata inferiormente e superiormente da superfici impermeabili, la superficie piezometrica non è compresa nell'acquifero;
- falda semiconfinata: falda limitata superiormente da superfici semipermeabili che permettono un debole passaggio da una falda all'altra;
- falda sospesa: falda libera presente nel terreno non saturo sostenuta alla base da orizzonti ridotti e sopraelevati rispetto alla sottostante falda libera.

#### 2.2.2.4 Classificazione pozzi

##### Pozzo artesiano

Il "pozzo artesiano", che deriva il suo nome dalla contea di Artois, in Francia, dove fu scavato il primo di questo tipo nel 1126, è un pozzo che, raggiungendo la falda posta tra due strati impermeabili, quindi in pressione, fa sgorgare l'acqua zampillante.

Questa tecnica, che conobbe una diffusione enorme nel XIX secolo, in realtà, data la scarsa conoscenza degli strati geologici profondi e l'eccessivo sfruttamento, produsse un danno, rappresentato dall'abbassamento del livello delle falde, per cui venne abbandonata.

##### Pozzo freatico

Nella tipologia del pozzo freatico, l'acqua scorre, rispetto alla falda artesianiana, su di uno strato inferiore di materiale impermeabile, e non si creano particolari pressioni del fluido.

##### Pozzo piezometrico

Il pozzo piezometrico è un pozzo di piccolo diametro che filtra solo un breve tratto della falda. Viene utilizzato per misurare il livello piezometrico, cioè l'altezza dell'acqua di falda, rispetto al livello del mare.

#### 2.2.2.5 Opere di captazione da falde - linee guida tratte dalla "Delibera 4 febbraio 1977 – Criteri, metodologie e norme tecniche generali"

Sulla base delle caratteristiche delle formazioni interessate e di quelle dell'acquifero si definirà il complesso delle opere di attingimento e, in particolare, i tipi dei pozzi più idonei ad emungere la

portata richiesta. La depressione della superficie piezometrica della falda indisturbata dovrà essere contenuta entro valori tali da evitare richiami da altre falde o di acque esterne.

I prelievi dovranno essere opportunamente limitati o anche vietati in quelle zone in cui è da temere un abbassamento del terreno che possa danneggiare, direttamente o indirettamente, il territorio interessato e in particolare gli edifici e le opere sovrastanti.

Le perforazioni saranno eseguite in modo da evitare la comunicazione tra falde diverse, provvedendo tra l'altro alla cementazione delle falde non interessate alla utilizzazione.

La testata dei pozzi sarà a quota superiore a quella del piano di calpestio, sarà chiusa ed alloggiata in apposita cabina, nella quale avrà sede l'eventuale impianto di sollevamento. La chiusura della testata sarà provvista di organo di aerazione. Nella cabina potrà essere alloggiata anche l'eventuale autoclave occorrente per l'immissione diretta in rete.

Gli impianti elevatori saranno provvisti di valvole di non ritorno, nonché di dispositivi di allarme per avaria o disservizio.

Ciascun manufatto di testata sarà completo di dispositivi per il prelievo di campioni ed eventualmente di strumentazioni per la misura in sito di talune caratteristiche delle acque derivate. Strumentazioni di controllo saranno predisposte altresì in corrispondenza dei pozzi previsti per l'accertamento del regime della falda.

#### **2.2.2.6 Fasi di progettazione e sviluppo dei pozzi per acqua**

##### **a) Fase preliminare**

###### *Identificazione degli acquiferi*

Identificare un acquifero significa sostanzialmente definirne le caratteristiche chimiche e idrauliche. Per assumere dati certi ed inoppugnabili si dovrebbe eseguire delle prove di portata adeguate sul pozzo completato e compiere analisi periodiche per definirne il chimismo. Ciò è evidentemente incompatibile con la perforazione, bisogna quindi limitarsi all'assunzione di elementi quanto più attendibili da collocare nell'inquadramento geologico preliminare.

###### *Le caratteristiche chimiche*

Definire il chimismo significa prelevare un campione significativo di acqua di falda eseguendo nella maggior parte dei casi una prova di strato, la cui esecuzione varia di complessità e costo a seconda della tecnica di perforazione utilizzata.

- Percussione: la prova ha basso costo soprattutto quando in presenza di granulometrie grossolane non è necessario mettere in opera colonne provvisorie con tubi filtro.

- Ad aria compressa: ove si possa eseguire ha un costo pressoché irrilevante, poiché viene campionata l'acqua che fuoriesce dal pozzo sia pure con piccoli accorgimenti che rendano il campione il più possibile rappresentativo.
- A circolazione inversa: la prova ha un costo rilevante e crescente con l'aumentare della profondità, ma la rappresentatività del campione è assicurata. Questa tecnica è molto diffusa negli acquiferi alluvionali soprattutto in seguito al progressivo inquinamento delle falde più superficiali che spinge la ricerca a una sempre maggiore profondità.
- A circolazione diretta: negli acquiferi alluvionali è una prova rischiosa e difficile da realizzare, di fatto non usata. Condizioni diverse e migliori risultati in formazioni rocciose stabili, dove però raramente occorre caratterizzare chimicamente l'acquifero.

### *I livelli produttivi*

L'individuazione dei livelli produttivi e la stima della loro potenzialità risultano essere complesse e varia è la procedura da adottare secondo le tecniche e il contesto geologico della ricerca.

## TERRENI ALLUVIONALI

Nota la piezometria dell'area si tratta sostanzialmente di prendere in esame i livelli con le permeabilità più elevate: sabbie e soprattutto ghiaie. La regola molto semplice secondo la quale maggiore è la granulometria costituente l'acquifero, maggiore risulterà la permeabilità, è sostanzialmente confermata dalle esperienze di cantiere. Si deve però porre molta attenzione alla grande variabilità della permeabilità sull'asse verticale (stratificazione) di uno stesso acquifero sia all'eterogeneità della composizione granulometrica.

- Perforando a percussione si possono raccogliere facilmente campioni significativi di terreno anche se fortemente rimescolati all'interno del singolo tratto di perforazione effettuato, che può arrivare anche ai 2 metri di spessore; in questo caso si dovrà avanzare avendo cura di cogliere le variazioni della stratificazione.
- Perforando a circolazione inversa si può osservare con molta precisione la variazione verticale della composizione granulometrica, ma il dilavamento del fluido può "nascondere" la frazione più sottile componente il campione che si vuole analizzare. Per ovviare a tale inconveniente si ricorre a tecniche particolari di campionamento e di analisi granulometrica (dissabbiamento del fluido, correzione delle analisi) che migliorino l'attendibilità del campionamento con particolare riferimento agli acquiferi a matrice sottile.
- Perforando a circolazione diretta a causa della bassa velocità di risalita del fluido si assiste ad una cassazione del detrito che, perturbato anche dalla forte percentuale di ghiaie frantumate

dallo scalpello, rende non rappresentativo il campione. In pratica questa tecnica di perforazione è consigliabile solo nei casi in cui le caratteristiche dell'acquifero siano note: costituito da ghiaie grossolane che non necessitano di drenaggio artificiale, oppure quando sia possibile trascurare l'obiettivo di un'elevata efficienza idraulica.

## FORMAZIONI ROCCIOSE

Per ragioni di perforabilità, tranne in condizioni molto particolari, sono da escludersi le tecniche a circolazione inversa e a percussione.

- Perforando ad aria compressa con martello fondo foro o con lo scalpello, l'individuazione dei livelli produttivi è immediata per la risalita dell'acqua insieme ai detriti della perforazione. La stima della portata non è altrettanto immediata poiché entrano in gioco vari fattori che possono turbare considerevolmente il modello teorico di sollevamento (fatturazione del non saturo, portata dei compressori, immersione, livello dinamico). Risulta molto facile ed inequivocabile l'incremento di portata con l'avanzare della perforazione, quando acqua e detriti risalgono regolarmente in superficie.
- Perforando a circolazione diretta invece, le informazioni ricavabili dall'osservazione della perforazione per l'individuazione dei livelli produttivi sono molto scarse, ancor più difficile la stima della potenzialità dei livelli attraversati. Le osservazioni possibili sono legate al "saltellamento" della batteria di perforazione, che può essere indotto da livello più o meno grande di fatturazione; nessuna indicazione può essere ricavata sul grado di apertura delle fratture stesse. L'assorbimento del fluido, pur condizionato dal grado di viscosità e dalla percentuale di solidi in sospensione, rappresenta un dato inequivocabile dell'esistenza della fatturazione. Infine, se non è nota a priori, nulla può essere constatato circa la piezometria dell'acquifero. Quando si vogliono acquisire dati importanti prima del completamento del pozzo sarà quindi utile eseguire logs di pozzo particolarmente efficaci se abbinati a questa tecnica di perforazione.

### Funzionalità ed efficienza

Questi elementi sono ovviamente connessi alla tecnica di perforazione ma sono in particolare legati al progetto di completamento: tubi, filtri, dreno e tecnica di sviluppo.

### *Drenaggio artificiale*

Si consiglia cautelativamente di prevedere uno spessore di circa 15 cm, in modo da compensare le tolleranze fra i diametri di perforazione e i centralizzatori, la non perfetta linearità delle perforazioni a

rotazione e l'assestamento del dreno stesso che può creare pericolose miscele. Si consiglia inoltre di non superare i 20 – 25 cm di spessore per non rendere difficoltosa la successiva fase di sviluppo.

### *Filtri*

La velocità dell'acqua in corrispondenza dei filtri non dovrà superare i 3 cm/s per evitare perdite di carico legate al regime turbolento che si determina oltre tale valore. Oltre a questo valore di riferimento si dovrebbe tenere conto anche della permeabilità dell'acquifero e del coefficiente di uniformità del terreno. Si dovrà tenere conto inoltre che circa il 50% delle luci di passaggio di un filtro risulteranno chiuse dai grani del drenaggio e che la percentuale aperta della superficie di un filtro risulterà del 6-13% per i filtri a ponte e del 10-30% per i filtri a spirale. Il filtro dovrà intercettare il 100% dello spessore della falda artesianica da captare, salvo una piccola frazione utile per garantirsi dal rischio di dilavamento delle argille ai limiti dello stesso acquifero. Nel caso di falde freatiche il filtro interesserà il 35-50% dell'acquifero, salvo la presenza di stratificazioni che suggeriscano soluzioni diverse.

### *Tubazioni*

Il diametro della tubazione del pozzo è molto spesso determinato dalle dimensioni di ingombro delle flange della tubazione di mandata della pompa di produzione che sarà installata all'interno. Si terrà conto, nella stessa tubazione di mandata, di non superare la velocità di 2-2,5 m/s per non determinare eccessive perdite di carico idraulico. Molto spesso, inoltre, per fondati motivi si preferisce mantenere costante il rivestimento fino a fondo pozzo, determinando quindi sul parametro "flange" l'intero dimensionamento del pozzo.

### *Tecniche di sviluppo*

Ogni tecnica ha un campo di applicazione limitato e quindi non esiste una tecnica che abbia efficacia massima di per sé. Si tratta quindi di individuare la tecnica migliore nella situazione data basandosi sull'esperienza e la conoscenza dell'area .

## **b) Fase di perforazione**

### Tecniche di perforazione

Le tecniche di perforazione del sottosuolo sono numerosissime, noi ci limiteremo ad analizzare le tecniche più diffuse sul mercato italiano:

- perforazione a circolazione diretta;
- perforazione ad aria compressa;
- perforazione a circolazione inversa;
- perforazione a percussione.

*Perforazione a circolazione diretta a fango*

Il sistema si basa sulla rotazione di una batteria di aste che muovono uno scalpello “tricono”, il quale per azione di percussione/trascinamento frantuma il terreno, che è sollevato fino alla superficie dal fango risalente nell'intercapedine fra le aste e il perforo (Figura 2.2.22).



Figura 2.2.22 – Scalpelli tricono a denti.

In questo caso il fango dovrà essere abbastanza o molto viscoso, sia per la velocità di risalita decisamente bassa (0,2 – 0,5 m/s), sia per motivi di costo che di dimensionamento del sistema. Il fango ha inoltre la funzione di stabilizzare e impermeabilizzare temporaneamente le pareti della perforazione, attraverso la formazione del “panello”.

Giunti in superficie i detriti saranno separati con metodo meccanico e centrifugo oppure con la meno efficace sedimentazione. Il fango poi riprenderà la circolazione spinto da una pompa a pistoncini, che lo inietterà all'interno delle aste fino agli ugelli dello scalpello.

I limiti operativi di questo sistema oggi sono stimati intorno ai 13.000 m (ricerca degli idrocarburi), quindi ben al di sopra delle necessità dei pozzi per acqua. Inoltre permette la perforazione di qualsiasi tipo di terreno, con ottime velocità di avanzamento. Limitazioni si possono avere solo in rocce fortemente fratturate che assorbono eccessive quantità di fango (Figura 2.2.23).

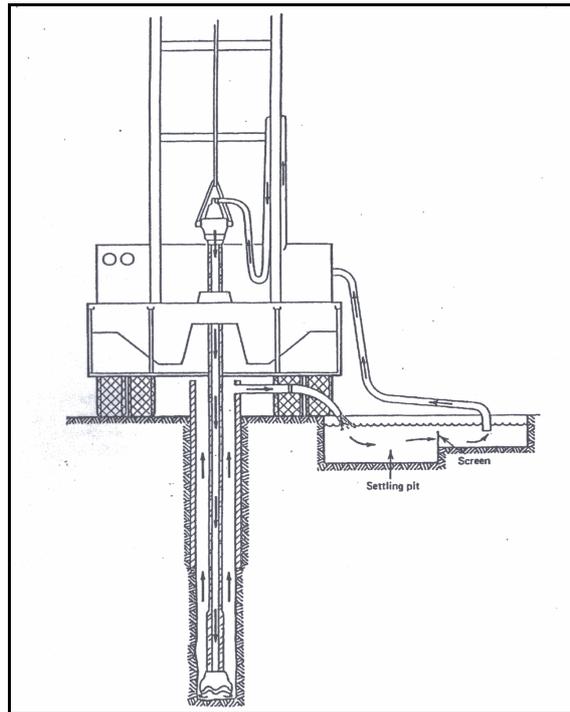


Figura 2.2.23 – Perforazione a circolazione diretta (schema del circuito del fango)

*Perforazione ad aria compressa e martello fondo foro*

Sistema e impianto analogo a quello della circolazione diretta, con la sostanziale differenza che il fango viene sostituito dall'aria compressa, alla quale si possono aggiungere schiumogeni, che aumentando la viscosità del fluido favoriscono la pulizia del perforo e diminuiscono il consumo di aria.

L'utensile può essere ancora lo scalpello tricono, utilizzato nella circolazione diretta o il più efficace martello fondo foro (Figura 2.2.24).



Figura 2.2.24 – Martelli fondo foro.

Il sistema è ovviamente adatto solo nei terreni coerenti e in presenza di acqua il battente piezometrico può essere penetrato solo per 100 – 200 m, in ragione della pressione disponibile con gli attuali compressori in commercio.

Infine il costo rilevante dell'aria compressa suggerisce di limitare quanto più possibile i diametri di perforazione.

#### *Perforazione a circolazione inversa*

Il sistema è costituito da una tavola di rotazione o testa idraulica, che tiene in rotazione una batteria di aste all'estremità della quale è posto uno scalpello, di disegno diverso secondo le caratteristiche del terreno. Con azione di taglio, percussione o sollevamento il terreno viene frantumato e portato in superficie dal fango che risale attraverso le aste per effetto air-lift (Figura 2.2.25).

I detriti si depositano in superficie nelle capienti vasche di circolazione, quindi il fluido torna a scendere verso lo scalpello attraverso l'intercapedine compresa fra le aste e il perforo.

Il fango, analogamente alla circolazione diretta, dà origine al "panello" per stabilizzare e impermeabilizzare temporaneamente le pareti della perforazione, ma a differenza di questa la velocità di risalita è molto alta, così che il fango non ha bisogno di un'elevata viscosità per sollevare detriti di grossa pezzatura.

L'impianto cantiere, piuttosto complesso, rende il sistema poco concorrenziale nelle piccole profondità ed è normalmente sconsigliabile al di sotto dei 70 – 80 m; il sistema perde efficienza quando si superano i 400 – 500 m.

Predilige terreni incoerenti di piccola e media granulometria, in queste condizioni lo scalpello ha solo funzione di taglio e l'avanzamento risulta velocissimo.

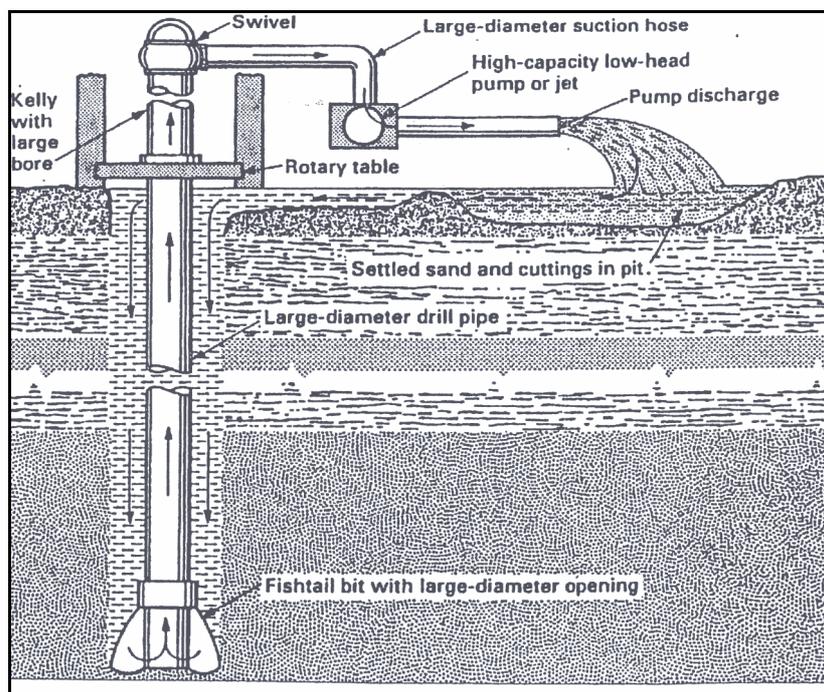


Figura 2.2.25 – Perforazione a circolazione inversa (schema del circuito del fango).

### *Perforazione a percussione*

Il sistema si basa sulla capacità di frantumazione e asportazione del terreno mediante un utensile pesante (sonda a cucchiaia o benna) che viene sollevato e fatto cadere tramite una fune di acciaio azionata da un organo a caduta libera. L'utensile è normalmente accompagnato da una tubazione di rivestimento, spinta nel sottosuolo con metodi diversi, che convenzionalmente, danno il nome ai corrispondenti sistemi:

- con giracolonna: quando una morsa idraulica ruotando alternativamente la colonna di rivestimento, ne favorisce la discesa, per effetto della diminuzione dell'attrito laterale;
- con colonna filettata: quando la colonna scende semplicemente per gravità o battuta dall'alto con la sonda a cucchiaio;
- ad infissione: quando una coppia di martinetti idraulici ben ancorati a terra spinge nel sottosuolo la colonna; la colonna rimarrà in opera e costituirà il rivestimento definitivo del pozzo.

I tre sistemi appena descritti possono operare "a cannocchiale", riducendo il diametro quando l'attrito laterale sulle pareti della colonna sale eccessivamente. E' in evitabile che per scendere in profondità bisogna ridurre frequentemente il diametro, rendendo il sistema lento e oneroso, per cui di fatto si

cerca di limitare a 2 – 3 il numero di colonne impiegate. Possiamo quindi parlare di profondità oscillanti fra i 100 e 200 m.

La perforazione a percussione è adatta a terreni incoerenti anche con ciottoli di grossa pezzatura .

### **c) Fase di completamento**

#### Il completamento del pozzo

Al termine della perforazione il pozzo sarà completato con la messa in opera della tubazione definitiva, l'installazione dei filtri in corrispondenza del livello acquifero da captare, l'esecuzione del drenaggio, la cementazione e/o i tamponamenti per ripristinare gli orizzonti impermeabili. Si tratta di definire il dimensionamento delle varie parti in modo corretto, così che risulti nel contempo agevole la messa in opera e affidabile la struttura definitiva del pozzo.

#### *Le tubazioni*

La scelta del tipo di tubazione da impiegare per il completamento di un pozzo è essenzialmente legata alle condizioni di sollecitazione meccanica e ai possibili fenomeni di corrosione.

La soluzione ottimale sarebbe ovviamente quella che prevede l'impiego di tubazioni non deteriorabili nel tempo e sufficientemente robuste. Si dovrebbero quindi privilegiare i tubi in PVC per i pozzi poco profondi e di piccolo diametro e l'acciaio inox per le condizioni in cui le sollecitazioni risultano più elevate.

Per ragioni di costo l'acciaio al carbonio è invece di gran lunga il più usato (rappresenta oltre il 90% degli acciai presenti in commercio). Si deve comunque osservare, che ove le acque non risultino aggressive l'acciaio al carbonio offre ottimi risultati.

#### *I diametri dei tubi*

La determinazione del diametro di rivestimento del pozzo è essenzialmente legata alla portata del pozzo stesso. La verifica verrà effettuata su tre parametri:

- ingombro della pompa;
- ingombro delle flange della tubazione di mandata;
- velocità di flusso.

#### *I filtri*

Esistono vari tipi di filtro più o meno adatti agli acquiferi che si possono incontrare, i più diffusi risultano nell'ordine il tipo a ponte e il tipo a spirale continua (Figura 2.2.26).

I filtri a ponte, sono nettamente i più diffusi e sono costituiti da una lamiera di acciaio sulla quale, per punzonatura, sono realizzati dei piccoli ponticelli.

I filtri a spirale continua, sono i migliori filtri attualmente esistenti perché hanno un'elevata superficie filtrante e la geometria a spirale limita i fenomeni di intasamento.

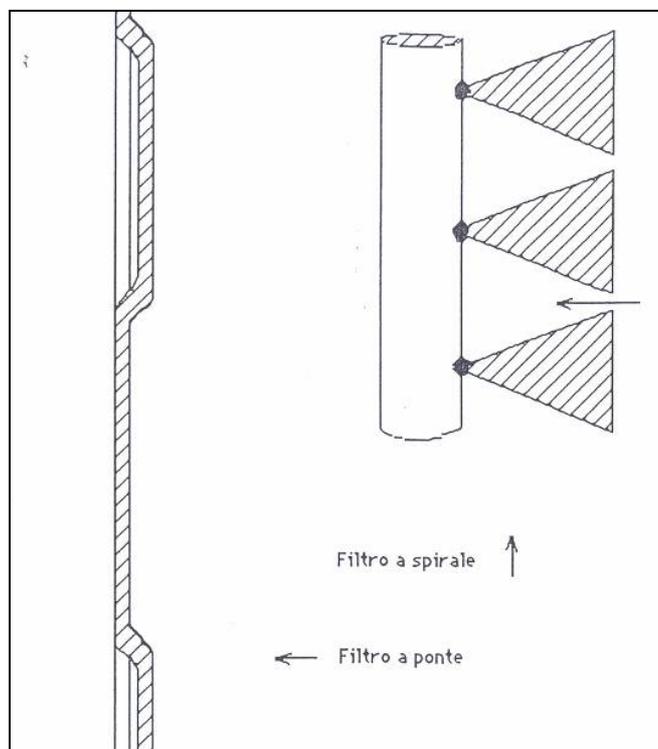


Figura 2.2.26 – Filtro a ponte e a spirale continua.

### *Il drenaggio*

Il drenaggio consiste sostanzialmente nella posa in corrispondenza dei filtri di una corona anulare di ghiaietto siliceo di granulometria variabile in funzione della geologia dello strato drenato. Bisogna però distinguere quando il ghiaietto ha un'efficacia effettiva nell'arrestare le granulometrie più sottili dell'acquifero e quindi favorire lo sviluppo, da quando il ghiaietto ha solo funzioni di riempimento e la selezione delle granulometrie è svolta dal filtro.

La definizione delle dimensioni del sistema filtro-drenaggio è compito di primaria importanza per conferire al pozzo la massima efficienza e soprattutto impedire il trascinarsi della sabbia.

### *Le cementazioni*

Con questo termine si intendono le fondamentali operazioni di isolamento dei livelli acquiferi rinvenuti rispetto alla superficie e fra loro stessi. Questa fase riveste primaria importanza non solo per la funzionalità del pozzo ma anche per i danni permanenti che la sua cattiva esecuzione può arrecare all'ambiente nel suo complesso.

I materiali utilizzabili per le cementazioni sono sostanzialmente la boiacca di cemento, l'argilla e il calcastruzzo.

Le tecniche di cementazione sono sostanzialmente di due tipi:

- intercapedine fra perforazione e tubo di dimensioni sufficienti da consentire la discesa di testimoni e tubicini (cementazione selettiva);
- intercapedini che non consentono la discesa certa di attrezzature (cementazione con scarpa).

### **d) Fase di collaudo**

#### Prove di portata

L'esecuzione di una prova di portata consiste nel sottoporre un pozzo a pompaggio, controllando contemporaneamente la portata e le variazioni del livello dinamico in pozzo.

Le prove di portata possono essere eseguite per due scopi principali:

- valutare la funzionalità del pozzo, cioè il suo grado di efficienza come opera di captazione, può essere perseguito mediante l'esecuzione di una prova di pompaggio detta a "gradini di portata"; la prova si esegue effettuando intervalli consecutivi di pompaggio a portate crescenti (minimo 3) della stessa durata (da un minimo di 20 minuti a un massimo di 3-4 ore), rilevando il livello dinamico sia durante che alla fine di ciascun gradino di portata. Si ottengono così delle coppie di valori: Portata (Q) – Abbassamento (S) (Figura 2.2.27);
- indagare le caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero nel corso di indagini idrogeologiche, si ricorre generalmente all'esecuzione di prove di pompaggio di lunga durata a portata costante, seguite da una rilevazione della velocità di risalita del livello d'acqua nel pozzo alla fine del pompaggio.

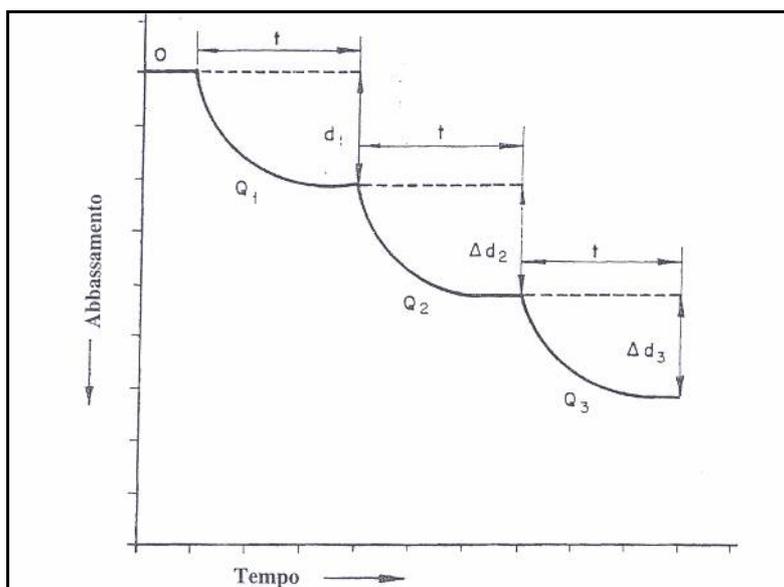


Figura 2.2.27 – Diagramma Tempi di pompaggio/abbassamento (gradini stabilizzati).

### DISINFEZIONE DEL POZZO

Un pozzo costituisce un collegamento diretto tra la superficie del terreno e i livelli acquiferi incontrati. I materiali e l'attrezzatura utilizzati per la costruzione e lo sviluppo di un pozzo sono generalmente contaminati in una certa misura con batteri o altri microrganismi, che durante le varie fasi di realizzazione possono venir introdotti nell'acquifero e quindi contaminare l'acqua di falda. Pertanto, al fine di limitare l'eventualità che batteri patogeni raggiungano la falda è auspicabile adottare alcune precauzioni già durante le operazioni di costruzione del pozzo, specie nel caso di pozzi ad uso idropotabile, come:

- disinfettare periodicamente il pozzo durante la trivellazione;
- utilizzare acqua potabile durante lo scavo e lo sviluppo;
- disinfettare i filtri e il ghiaietto costituente il dreno prima della messa in opera.

In ogni caso è comunque opportuno eseguire una disinfezione successiva al completamento del pozzo per eliminare gli eventuali batteri presenti che, anche se non sono patogeni, possono favorire fenomeni di incrostazione e/o corrosione riducendo così la durata dell'opera di captazione. Questi batteri possono venir introdotti anche durante operazioni di riparazione o mantenimento. Pertanto è consigliabile eseguire una disinfezione anche in seguito ad ogni intervento di riparazione o mantenimento.

L'utilizzo di soluzioni di cloro è il metodo più utilizzato per la sterilizzazione di pozzi, pompe, tubazioni...ecc.

Il cloro è un potente ossidante in grado di eliminare i batteri ed altri organismi (esclusi i virus). L'efficacia della soluzione impiegata dipende principalmente dalla concentrazione in cloro, che deve essere sufficientemente elevata da soddisfare la richiesta immediata e persistere in eccesso per diverse ore dopo l'inizio del trattamento; ciò può essere verificato analizzando l'acqua estratta dal pozzo dopo 24 ore di sosta, che deve contenere ancora una quantità di cloro libero non inferiore a 25 mg/L (in caso contrario si deve ripetere l'operazione). Per ottenere buoni risultati vengono in genere utilizzati quantitativi di cloro tali da ottenere all'interno del pozzo una soluzione con contenuti non inferiori a 50-200 mg/L.

Importante è ricordare che i contenuti di cloro dovranno essere maggiori per acque con valori elevati di pH, in quanto l'effetto germicida degli ioni cloro si neutralizza all'aumentare del pH; al contrario per acque con pH molto basso si dovranno utilizzare soluzioni con minori concentrazioni. In ogni caso le soluzioni impiegate non dovranno avere contenuti in cloro superiori a 100 ppm.

I prodotti comunemente impiegati per ottenere tali soluzioni sono principalmente gli ipocloriti di Ca e di Na.

Dal punto di vista operativo, normalmente si procede, dopo aver versato la soluzione nel pozzo, eseguendo un pistonaggio meccanico per garantire una distribuzione uniforme e quindi un'azione efficace della sostanza disinfettante.

Nel caso di pozzi profondi o di pozzi artesiani si può operare facendo discendere all'interno del pozzo, tramite un cavo, un contenitore realizzato con un tratto di tubo chiuso alle estremità e forato lateralmente, contenente la soluzione di cloro. Si procede poi muovendo il contenitore verticalmente più volte per tutta la colonna d'acqua assicurando in tal modo una dispersione uniforme della soluzione.

### **2.3 Potabilizzazione acque sotterranee**

I principali contaminati delle acque sotterranee sono: ferro e manganese, idrogeno solforato, ammoniaca, nitrati e microinquinanti quali pesticidi e prodotti assimilati e solventi clorurati.

#### **Ferro e manganese**

Nelle acque profonde il ferro è presente in forma ferrosa ( $\text{Fe}^{2+}$ ), prevalentemente sotto forma di bicarbonato (reperibile anche come solfato e sotto forma di complessi organici). Le tecniche di trattamento sono solitamente di tipo ossidativo, per aerazione, sia a pressione atmosferica, che sotto pressione; la velocità di reazione è significativamente influenzata dal pH della soluzione (la velocità aumenta all'aumentare del pH).

La scelta del sistema di aerazione è molto influenzata dalla concentrazione iniziale sia per quanto concerne l'entità dei prodotti finali di reazione. Infatti, se da un lato l'aerazione sotto pressione è favorita dalla maggiore concentrazione di saturazione di  $O_2$  ottenibile, dall'altro esistono limiti pratici legati alla produzione di  $Fe(OH)_3$  e di  $CO_2$ . Un'eccessiva quantità di idrossido può intasare i corpi di riempimento, riducendone la superficie specifica, e sovraccarica il filtro finale; la presenza di molta  $CO_2$  richiede invece sfiati frequenti del reattore. (Se la concentrazione di  $Fe(HCO_3)_2$  è alta, è opportuno dosare calce per far precipitare la  $CO_2$  di reazione). In tali condizioni si usano quindi sistemi a pressione atmosferica (con riempimenti grossolani,  $\varnothing = 60 \div 100$  mm) eventualmente seguiti da una sedimentazione intermedia. (La sedimentazione viene solitamente prevista quando  $C_0 > 5$  mg Fe/l e presenta di solito caratteri di sgrossatura ( $t < 60$  minuti e  $C_i < 4$  m/h). Meno comune è il ricorso a metodi chimici di ossidazione; tra questi vengono ricordati il permanganato di potassio, il cloro e il biossido di cloro.

Il manganese, molto spesso presente insieme al ferro, pur se in concentrazioni inferiori, pone problemi analoghi, ma con l'aggravante di risultare di rimozione più difficile e di essere quotato con limiti più restrittivi. I risultati ottenibili mediante aerazione risentono della lentezza delle cinetiche di reazione: l'aerazione infatti può fornire risultati accettabili solo a  $pH > 9,5$  e la reazione di ossidazione porta alla formazione di biossido di manganese. (Il biossido di manganese è spesso presente in forma colloidale, o comunque difficilmente filtrabile, e modifica anche la dimensione nominale della sabbia, che viene rivestita da uno strato aderente di  $MnO_2$  che talora provoca anche un'aggregazione intergranulare. Quando il tenore iniziale di Mn è elevato, è bene sostituire alla filtrazione normale quella per contatto). Assumono quindi maggiore importanza i metodi chimici, in particolare quelli basati sull'uso di biossido di cloro, ozono e permanganato di potassio, che consentono di ossidare e precipitare rapidamente il manganese sotto forma di  $MnO_2$ . La presenza di reazioni parassite rende però difficile individuare il dosaggio corretto degli ossidanti ed è pertanto sempre consigliabile una preventiva verifica di laboratorio; anche in questo caso il trattamento dei solidi di reazione è demandato ad una fase di filtrazione rapida su sabbia.

Altri schemi di trattamento, di recente diffusione, impiegano biomasse autotrofe capaci di ossidare, a certe condizioni,  $Fe^{2+}$  e, con difficoltà maggiore, anche Mn (in presenza di Fe); le condizioni di funzionamento di questi impianti risentono significativamente delle caratteristiche dell'acqua. Lo schema d'impianto prevede: aerazione + filtrazione + disinfezione e l'attecchimento delle biomasse attive avviene sul supporto filtrante (di solito sabbia con  $\varnothing = 1,1 \div 1,3$  mm); quando però, in uscita dal trattamento,  $pH > 7$ , è opportuno ricorrere ad una doppia aerazione (prima e dopo la filtrazione). Il processo biologico, una volta stabilizzato, si è rivelato efficace e rapido (si possono usare carichi idraulici fino a 60 m/h) ed è possibile semplificare decisamente la fase di aerazione iniziale, che può

anche essere realizzata in linea; per contro il processo può rivelarsi “delicato” quando  $\text{pH} > 7$ , in quanto il campo di redox compatibile è alquanto limitato; va inoltre considerata la necessità della disinfezione, tenendo conto dei rischi intrinseci connessi alla presenza dei ferrobatteri.

### **Idrogeno solforato**

L'idrogeno solforato è molto solubile in acqua; con riferimento alla legge di Henry la sua solubilità è, ad esempio, circa tripla di quella dell'anidride carbonica alla stessa temperatura. Come è noto, oltre a sciogliersi facilmente in acqua, l'idrogeno solforato presenta caratteri organolettici molto sgradevoli anche in piccole concentrazioni ed è aggressivo nei confronti dei materiali metallici ed in particolare di ferro, acciaio e leghe di rame. Anche in questo caso il trattamento teoricamente più specifico è l'aerazione, o – per meglio dire – lo strippaggio, anche perché la pressione parziale di  $\text{H}_2\text{S}$  nell'atmosfera è praticamente nulla. (Molti gas disciolti, tra cui appunto l'idrogeno solforato e anche l'ammoniaca, sono in equilibrio con forme ionizzate e pertanto il pH è un parametro di grande importanza per lo sviluppo del processo). Nella pratica però, anche a causa della minore solubilità della  $\text{CO}_2$ , si hanno spostamenti del pH con dissociazione dell' $\text{H}_2\text{S}$  e conseguente abbassamento del rendimento di rimozione per strippaggio. L'efficienza di desolforazione per semplice aerazione è pertanto piuttosto limitata, a meno di non pre-acidificare l'acqua almeno a  $\text{pH} < 6$ , operazione che può peraltro rilevarsi costosa nel caso di acque ad elevato titolo alcalimetrico iniziale; l'intervento può essere effettuato con acidi forti o flussi di anidride carbonica. In ogni caso a valle dell'aerazione dovrà essere prevista una filtrazione per contatto per rimuovere la frazione di zolfo elementare prodottasi nel corso della reazione secondaria.

L'eliminazione di  $\text{H}_2\text{S}$  può essere ottenuta anche per ossidazione chimica, ad esempio con  $\text{KMnO}_4$ , cloro oppure ozono. Tutte queste reazioni sono molto rapide, in particolare quelle con il permanganato di potassio (~5 sec) o con l'ozono, che è pressoché istantanea. E' stato anche proposto l'uso dell'acqua ossigenata, che porta però a cinetiche decisamente più lente (~ 15 minuti).

Nel caso di forti concentrazioni iniziali è opportuno prevedere impianti misti di aerazione ed ossidazione che riservino a quest'ultima solo compiti di finissaggio. Va in ogni caso tenuta ben presente la necessità di intercettare l'idrogeno solforato dal flusso di aria effluente, ad esempio mediante passaggio su letti di carbone attivo o di materiali metallici granulari capaci di formare solfuri.

### **Ammoniaca**

L'ammoniaca può essere presente nelle acque di falda, sia in quanto costituente naturale, che per l'effetto di inquinamenti; in certe zone si registrano valori naturali di ammoniaca di alcuni mg/L (Concentrazione massima ammissibile =  $0,5 \text{ mg NH}_4^+/\text{L}$ , ma Numero guida =  $0,05 \text{ mg NH}_4^+/\text{L}$ ). Limiti così restrittivi vengono giustificati dalla necessità di contenere la possibile formazione di triometani

(THM) e di al organici totali (TOX) durante il tradizionale trattamento di clorazione al break-point (il break-point viene raggiunto per dosi di cloro pari a circa 7 volte la concentrazione di  $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ). Anche l'aerazione potrebbe essere presa in considerazione, ma solo dopo aver alcalinizzato l'acqua a  $\text{pH} \geq 10,5$  (con necessità di una successiva regolazione del medesimo); non va inoltre dimenticato che l'impiego di calce in quantità di alcalinizzante porta inevitabilmente a formare precipitati, anche all'interno della torre di strippaggio. Un'opzione che sta diffondendosi con sempre maggiore ampiezza e che ha dato luogo anche a realizzazioni su scala reale è la bio-nitrificazione su colonie adese in ambiente fortemente aerobico. Lo schema di trattamento può essere configurato in modi diversi: un primo schema prevede un semplice reattore a biomasse adese, molto simile ad un percolatore (il riempimento in ghiaia ha pezzatura dell'ordine di 20-40 mm e carichi idraulici  $< 2$  m/h), seguito da un filtro a sabbia; altri schemi, proposti più recentemente, si basano invece su un reattore a biomassa adesa con supporto di dimensioni molto minori (sabbia rivestita di  $\text{MnO}_2$  con  $\varnothing < 1,2$  mm) alimentato con flusso d'aria in controcorrente, seguito da un affinamento. In quest'ultimo caso il parametro discriminante, come del resto in molti trattamenti biologici è il tempo di contatto tra l'acqua e la biomassa, che viene di solito assunto pari all'EBCT (Empty Bed Contact Time), cioè al tempo necessario all'acqua per percorrere il reattore vuoto al carico idraulico prefissato; di solito si opera con  $C_i < 5$  m/h e con altezza di letto dell'ordine di 1,5 m e quindi con  $\text{EBCT} > 20$  minuti. Questi limiti derivano dalla necessità di evitare il rischio di un'inaccettabile concentrazione di nitriti nell'acqua trattata (carichi superiori sono chiaramente possibili se si opta per letti di altezza maggiore); infatti nel corso di una reazione di nitrificazione biologica si riconosce una sequenza che prevede 2 stadi in cascata, ciascuno dei quali basato su un tipo diverso di microrganismo:

- ossidazione dell'ammoniaca a nitriti (*Nitrosomonas*);
- ossidazione dei nitriti a nitrati (*Nitrobacter*); (la produzione di nitrati non provoca solitamente problemi, date le solitamente limitate concentrazioni iniziali).

Se EBCT non fosse sufficiente, all'uscita del reattore si avrebbe una consistente concentrazione di nitriti negli strati inferiori del reattore, ove prevale *Nitrobacter*.

Operando nelle condizioni descritte sono stati ottenuti rendimenti di trasformazione  $> 90\%$ ; qualora la concentrazione iniziale sia maggiore di 3 mg/l è necessario prevedere schemi a 2 stadi o una circolazione iniziale sia maggiore di 3 mg/l è necessario prevedere filtri (eventualmente anche a GAC qualora si voglia disporre di una fase tampone) e una fase di disinfezione (solitamente raggi UV).

### **Nitrati**

La presenza di nitrati nelle acque di falda italiane è stata per anni considerata una situazione del tutto peculiare di alcune aree (riviera romagnola e marchigiana); solo a partire dalla metà degli anni '80 si è potuto verificare che la diffusione del fenomeno era molto estesa e la sua gravità ben maggiore del prevedibile. Intense discussioni sull'origine dell'inquinamento hanno portato, dopo diversi anni, a

ritenere che le fonti principali siano di volta in volta di tipo diffuso (sovra-fertilizzazione) o puntiforme (perdite da reti di collegamento, scarichi sul terreno, ecc.). Negli stessi anni sono state considerate le diverse opzioni di trattamento e sono state intraprese ricerche per verificarne sperimentalmente le effettive possibilità. Sembra qui opportuno riassumere in breve i termini del problema denitrificazione per dare una visione d'insieme, anche se molto superficiale, della problematica. Le opzioni più comuni di trattamento sono:

- Elettrodialisi (ED) – impianto monostadio; si produce una salamoia (non molto concentrata) da smaltire; l'efficienza supera di poco il 50%;
- Osmosi inversa (RO) – impianto monostadio; viene contemporaneamente rimossa gran parte della salinità totale. Il flusso di permeato è ben maggiore che per ED e la salamoia più concentrata. L'efficienza del sistema (~ 90%) rende possibile il trattamento di una frazione della portata (con miscelazione successiva);
- Biodenitrificazione autotrofa (BDA) – opera con carichi volumetrici ed idraulici piuttosto ridotti e, soprattutto per carichi maggiori, sono possibili forti concentrazioni di nitriti in uscita. Consente efficienze accettabili (60-80%), produce limitate quantità di biomasse di scarto e può portare a problemi di sicurezza (accumulo di idrogeno gassoso);
- Biodenitrificazione eterotrofa (BDE) – rispetto a BDA si opera con carichi volumetrici doppi e carichi idraulici anche fino a 10 m/h, ottenendo livelli di rimozione anche del 90% e oltre (ciò porta alla possibilità di trattare sola una parte della portata). Sono possibili ridotte fughe di nitriti se il tempo di contatto è troppo breve; la produzione di fanghi è limitata.
- Scambio ionico (SI) – l'uso di resine selettive consente la rimozione degli ioni nitrato (sostituiti di norma da ioni Cl<sup>-</sup>), ma l'efficienza varia nel corso del ciclo di esaurimento (aumenta il livello di fuga con tc e l'efficienza può scendere anche sotto il 60%) in quanto la selettività è relativa (soprattutto in presenza di ioni solfato). Vi è presenza di un eluato concentrato da smaltire.

In anni recenti, a causa dei notevoli costi dei trattamenti biologici e a membrana, ha assunto importanza crescente il metodo ED, anche perché le richieste di rimozione percentuale dei nitrati per rientrare nei limiti sono complessivamente modeste.

### **Considerazioni sulla rimozione dei micro-inquinanti**

I micro-inquinanti costituiscono un gruppo molto composito e numeroso di molecole organiche, caratterizzate da un grado di nocività diversificato, talora non del tutto noto, e accomunate dal fatto di essere presenti in concentrazioni molto basse (frazioni di ppm o di ppb); tra questi rivestono particolare importanza negli approvvigionamenti idropotabili in Italia:

- Pesticidi e prodotti assimilati: vasto gruppo di composti, tracci si citano i clororganici, i fosfororganici, gli azotorganici, nonché altri erbicidi e fungicidi;

- Solventi clorurati: si tratta di composti organo-alogenati, prevalentemente volatili (tri-cloro-etilene o TCE, tetra-cloro-etilene o PCE, di-cloro-etano, ecc.).

Le tecnologie di rimozione applicabili sono diverse e spesso tra loro combinate, per raggiungere un sicuro livello di potabilità; le unità di processo utilizzate più di frequente sono:

- adsorbimento su carboni attivi: sotto forma pulverulenta (PAC) o granuli (GAC = è rigenerabile e nel corso del processo per via termica si registra una perdita in peso del 10% circa); nel caso delle acque profonde – per le quali non sono di norma richiesti altri trattamenti che prevedono operazioni di miscelazione e contatto – l'impiego di PAC non è giustificabile, mentre risulterebbe conseguente nel caso di un intervento di sgrossatura in un impianto di chiari-flocculazione. L'impiego di GAC nei trattamenti delle acque è ormai sempre più ampio e con riferimento ai problemi citati in precedenza appare una delle opzioni principali nel settore dei micro-inquinanti; va tenuto però ben presente che la durata del ciclo è molto variabile in funzione del tipo di inquinante (ad esempio per l'atrazina si hanno indicativamente tempi ciclici di esaurimento 10 volte superiori a quelli riscontrabili per il tricloroetilene, a parità di condizioni al contorno). Nel caso del trattamento delle acque sotterranee è comune l'impiego di colonne (filtri a carbone attivo) aventi un letto di adsorbimento di altezza compresa tra 1,2 e 6 m (di solito 2-3 m) alimentato con portale in grado di determinare carichi idraulici dell'ordine di 6-12 m/h; in ogni caso il tempo di contatto non deve scendere sotto i 10 minuti (è anzi opportuno che sia intorno ai 15-20 minuti). La durata ciclica di un letto adsorbente può essere prevista con opportuni modelli o, meglio, con simulazioni di laboratorio ed è molto variabile in funzione del tipo di micro-inquinante da adsorbire e del volume di GAC utilizzato (da alcune settimane a pochi mesi nel caso dei solventi clorurati a 20 mesi e oltre nel caso di alcuni erbicidi); per evidenti motivi di prudenza si preferisce spesso utilizzare il GAC su 2 colonne in serie, che possono funzionare alternativamente e che garantiscono una capacità di arresto anche nel caso di inquinamenti imprevisti. Un aspetto che può avere rilevante influenza sulla durata ciclica di una colonna a GAC è la concentrazione di TOC nell'acqua, che può "consumare" una frazione non trascurabile delle capacità adsorbenti del letto;
- ossidazione con ozono: l'energica azione ossidante esercitata dall'ozono da solo o in combinazione con coadiuvanti attivatori (ad esempio acqua ossigenata o raggi UV) suscita un interesse crescente per la rimozione di alcuni micro-inquinanti (in particolare pesticidi o composti assimilabili). Gli effetti dell'ozono da solo possono essere sicuramente di grande rilievo in alcuni casi, mentre sono complessivamente deludenti in altri, quali ad esempio i solventi clorurati ed alcuni pesticidi. L'ozono da solo non è, ad esempio, per dosi < 1,5 mg/L e per tempi di contatto < 5 minuti, sufficiente a garantire una sensibile riduzione delle concentrazioni di atrazina, simazina e molinate, mentre si rileva efficace nel caso del bentazone; alle stesse dosi i risultati migliorano sensibilmente se i tempi di contatto sono ≥ 90 minuti. Risultati interessanti si possono ottenere operando con concentrazioni intorno a 2,5 mg O<sub>3</sub>/L, che sono ritenute il limite prudenziale per

evitare problemi di sottoprodotti, anche per tempi di contatto < 5 minuti, ma sicuramente i risultati migliori sono quelli ottenuti con ozonizzazione assistita da radiazione UV su una molecola peraltro molto refrattaria come l'atrazina, si sono ottenuti livelli di rimozione dell'ordine del 90% con concentrazioni attive di ozono di 2,5 mg/L e tempi di contatto < 4 minuti. L'impiego combinato di ozono ed acqua ossigenata in rapporto 1 : 0,2 ha fornito risultati molto interessanti su TCE e PCE, ma solo quando sono state usate concentrazioni attive decisamente elevate (90% di rimozione di TCE con 12 mg O<sub>3</sub>/L e 2,5 mg H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/L). Gli schemi di impianto possono essere molto semplici, ad esempio basati sul reattore di contatto tra l'ozono (e gli eventuali coadiuvanti di ossidazione) e l'acqua prudenzialmente seguito da una sezione di adsorbimento su GAC. Va infatti sempre considerato che l'energica ossidazione può dare origine a sottoprodotti di reazione (più o meno stabili), circa i cui effetti le conoscenze sono spesso ancora molto lacunose; tale aspetto va verificato caso per caso per evitare che l'intensa ossidazione sposti soltanto il problema portando sì alla trasformazione della molecola interessata, ma non alla sua completa demolizione.

- strippaggio: l'efficacia di rimozione dei micro-inquinanti volatili (ad esempio i solventi) è ben nota e questa operazione unitaria è applicata da sola o a monte di una fase di adsorbimento mediante GAC, talora presente con funzioni di affinamento. Non vanno trascurati gli eventuali interventi di depurazione sul flusso gassoso, per evitare il trasferimento ambientale del 'problema, anche se – alle concentrazioni tipiche nelle acque sotterranee – si hanno di solito bassi livelli di concentrazioni nell'aria effluente (< 1 ppb); inoltre l'efficienza di adsorbimento dei VOC (Volatile Organic Compounds) è decisamente superiore in fase gassosa. Il processo viene solitamente condotto in torri a pressione atmosferica (a caduta o, più frequentemente, con riempimento) ed è influenzato, oltre che dalla volatilità dei composti da rimuovere, anche dai seguenti parametri:
  - carico idraulico (l'altezza cresce con il carico idraulico);
  - rapporto A/W tra la portata di aria e quella dell'acqua (solitamente 20-70);
  - superficie specifica (tale parametro migliora nelle torri a riempimento);
  - temperatura dell'acqua e dell'aria (l'efficienza cresce con T).

Per ottenere elevati rendimenti di rimozione si opera di solito con altezze dell'ordine di 4-6 m, carichi idraulici di 40-50 m/h e rapporti aria : acqua di 50 : 1; impianti su scala reale funzionanti in queste condizioni hanno portato a livelli di rimozione > 98%, in un campo di concentrazioni iniziali variabile tra 70 e 200 ppb.

### **Trattamenti a membrana**

I processi a membrana realizzano una separazione tra due fluidi, attraverso una barriera selettiva (la membrana stessa), che viene attraversata solamente da alcune delle sostanze presenti nei fluidi

mentre è poco (o per nulla) permeabile alle altre (molecole organiche, ioni, microrganismi). I processi a membrana tradizionali possono essere suddivisi essenzialmente in due grandi categorie in base alla forza motrice che rende possibile il fenomeno di trasporto attraverso la membrana: la pressione o un campo elettrico.

Nel primo caso si hanno membrane permselective o semi-selettive che trattengono parte o tutti i composti in soluzione. Questo gruppo comprende membrane a porosità via via decrescente che permettono, oltre al passaggio dell'acqua, anche quello di una frazione via via calante dei solidi presenti in soluzione.

Questi processi, che si applicano per entità di differente taglio (MWCO, cioè Molecular Weight Cut Off) e peso molecolare, si differenziano sia per il tipo di membrane impiegate in ciascuno di essi (materiale, diametro, poro, ecc.) che per il campo di pressione al quale operano. In una scala crescente di potere di separazione e quindi in una scala crescente di pressioni di esercizio, si passa da ~ 1 bar per MF a oltre 100 bar per RO:

- MF – microfiltrazione;
- UF – ultrafiltrazione;
- NF – nanofiltrazione;
- RO (IF) – osmosi inversa o iperfiltrazione.

Il processo ad Elettrodialisi (ED) prevede invece la separazione degli ioni per il tramite di un campo elettrico esercitato su una batteria di celle alternate di deanionizzazione e di concentrazione, separate da membrane selettive caricate positivamente e negativamente.

In Tabella 2.2.1 sono riportati alcune delle caratteristiche salienti di alcune membrane che operano sotto pressione, mentre in Tabella 2.2.2 sono indicati alcuni possibili settori di impiego dei metodi a membrana per produrre acque potabili da fonti di diverse caratteristiche.

Tabella 2.2.1 – Confronto tra membrane UF, NF e RO a parità di flusso specifico.

<b>Tipo membrana</b>	<b>Ultrafiltrazione UF</b>	<b>Nanofiltrazione NF</b>	<b>Osmosi inversa RO</b>
Pressione efficace (bar)	3,5	5,0	15,5
Flusso specifico (l/m <sup>2</sup> h)	42,5	42,5	42,5
MWCO (dal ton)	1000	500	200
<i>Livelli di rimozione %</i>	<i>(esempi)</i>		
NaCl	45	80	98
Ca(Cl) <sub>2</sub>	70	95	99
Mg(SO <sub>4</sub> )	85	98	99
Glucosio	88	98	98
Durezza totale	85 – 90	85 – 90	95
Colore	90 – 95	90 – 95	95

Tipo membrana	Ultrafiltrazione UF	Nanofiltrazione NF	Osmosi inversa RO
TOC	80 - 85	80 - 85	90

Tabella 2.2.2 – Settori di impiego dei metodi a membrana per produrre acque potabili da fonti di diverse caratteristiche

Tipo di acqua	Necessità principali di trattamento	Processo a membrana applicabile
Acque con torbidità variabile e contaminazione microbica (acque superficiali)	Destabilizzazione delle sospensioni colloidali e disinfezione	MF; UF
Acque con elevata torbidità e colore, contaminate microbiologicamente (Acque superficiali di bassa qualità)	Destabilizzazione delle sospensioni colloidali, rimozione del colore e disinfezione	UF; NF (dopo pretrattamento)
Acque salmastre e dure (acque profonde)	Addolcimento e dissalazione parziale	NF; ED
Acque con elevato contenuto organico (acque superficiali)	Rimozione precursori THM, TOC, etc.	NF (dopo pretrattamento)
Acque con presenza di microinquinanti	Rimozione microinquinanti (pesticidi, etc.)	NF; UF + PAC; ED
Acque con nitrati	Rimozione nitrati	ED
Acque saline o salmastre	Rimozione salinità	RO; NF; ED

Come si può vedere dalla tabella precedente le possibilità di impiego sono molto ampie, anche se sono tuttora frenate – oltre che dai costi di gestione, che restano sensibilmente più alti dei trattamenti concorrenti – da alcuni problemi gestionali intrinseci dei sistemi a membrana.

Si fa qui riferimento a:

- **Fouling** – è una diminuzione di flusso di tipo irreversibile causata dalla deposizione e dall'accumulo di particelle submicroniche sulla superficie della membrana e/o dalla cristallizzazione e precipitazione di soluto sulla superficie e tra i pori della membrana stessa. In linea generale la formazione di fouling in un generico impianto a membrana dipende dai seguenti parametri: proteine e macromolecole organiche (effetto gel), microrganismi, sali, pH, velocità di flusso e turbolenza (se elevate aiutano a diminuire il fouling), ecc. Per valutare in prima istanza il fattore di sporco è necessario effettuare il test chiamato "Silt Density Index" (SDI), che consiste nel misurare la velocità di intasamento di un filtro con porosità di 0,45  $\mu$ , attraversato dall'acqua che si vuole esaminare alimentata ad una pressione di 207 kPa (circa 2 bar). Da correlazioni empiriche si può dire che se SDI < 3 un processo di RO può ottenere buoni risultati nel lungo periodo, senza risentire eccessivamente di fenomeni di fouling. A causa del fouling l'impianto opera al di sotto delle proprie potenzialità ed è soggetto ad una frequenza maggiore di sostituzione delle membrane.
- **Polarizzazione per concentrazione** – si tratta dell'incremento della concentrazione del soluto nello strato limite laminare a contatto con la membrana; per conseguenza si ha una pressione osmotica

locale più elevata e quindi una diminuzione della  $\Delta P$  motrice (pressione efficace), che comporta una diminuzione del flusso essendo, secondo il modello della pressione osmotica,  $J = (\Delta P - \Delta \pi) / R_m$ , dove  $\Delta \pi$  è la pressione osmotica ed  $R_m$  la resistenza della membrana, misurata con riferimento all'acqua pura. Tale fenomeno, a differenza del fouling, è reversibile e presenta inoltre un'incidenza meno significativa.

- Problemi di smaltimento delle salamoie – all'aumentare della pressione efficace aumenta il flusso specifico di permeato (acqua a bassa salinità) e per conseguenza aumenta la concentrazione della salamoia da smaltire che può anche superare ampiamente i limiti accettabili per lo smaltimento in acque superficiali (con l'eccezione di quelle marine). Questo problema assume un'importanza più ridotta nei sistemi ED, ove la rimozione di salinità supera con difficoltà il 50% (per ogni stadio) e risulta pertanto difficile avere salamoie molto concentrate (anche perché i sistemi ED sono applicabili solo ad acque di salinità inizialmente contenuta, poveri in Fe ed oli).

Per contro un notevolissimo interesse dei sistemi a membrana operanti sotto pressione (non dell'elettrodialisi) è la loro capacità, crescente al diminuire del cutoff (passando cioè da MF a RO), di trattenere quantitativamente i microrganismi (per RO anche i virus): in altre parole potrebbe essere possibile in un futuro non lontano strutturare un trattamento di potabilizzazione che prescindesse dai sistemi di disinfezione chimica e quindi esente da tutti i rischi di produzione di DBPs correlati. Un esempio su questa via è l'impianto di Mèry-sur-Oise (Francia), che tratta mediamente nanofiltrazione l'acqua della Senna, previa una chiariflocculazione semplificata ad alto carico; l'effluente della NF è disinfettato mediante radiazione UV per mettersi al riparo da eventuali imprevedibili cedimenti strutturali della membrana.

## **DISINFEZIONE**

I principali agenti di disinfezione sono ben noti e quelli tradizionalmente più diffusi sono: il cloro e alcuni suoi composti (in prevalenza NaClO, ma anche ClO<sub>2</sub>), l'ozono, i raggi UV. A questi si aggiungono altri agenti di più recente introduzione, tra cui:

- l'acido peracetico (PAA);
- il bromo.

Gli agenti disinfettanti usati in potabilizzazione devono essere caratterizzati, oltre che da una rilevante efficacia su un vasto spettro di microrganismi, anche da un ridotto impatto in termini di sottoprodotti (DBPs) e di qualità organolettica. Questi aspetti hanno reso e renderanno sempre meno praticabile l'uso del cloro e dei suoi composti, anche se talora la sua automatica "criminalizzazione" andrebbe valutata con maggiore attenzione, in funzione delle circostanze. Va peraltro segnalato che le nuove normative fissano parametri piuttosto stringenti per vari sottoprodotti, siano essi THM, che clorati o cloriti (il che porterà sicuramente a rendere più difficile anche l'uso del biossido di cloro).

La varietà di microrganismi da inattivare rende spesso necessario il ricorso a interventi multipli che non riguardano solo la disinfezione, ma anche le fasi precedenti ed in particolare la filtrazione, che – oltre a migliorare la qualità dell'acqua (anche in termini microbiologici, separando i solidi colonizzati dai microrganismi) e quindi l'efficacia della disinfezione vera e propria – svolge funzioni fondamentali di trattenimento di alcuni microrganismi (spore, cisti, protozoi, uova di elminti). Per quanto concerne più direttamente la fase di disinfezione, sempre più frequentemente si fa ricorso a tecniche di disinfezione frazionata, meglio se utilizzando agenti disinfettanti diversi (tipico è il caso della disinfezione mediante ozono o con raggi UV, con disinfezione di copertura basata su agenti persistenti).

I disinfettanti “non persistenti”, che sono quelli al momento più utilizzati, anche a causa di una più ridotta produzione di DBPs, presentano problemi non trascurabili per quanto riguarda il controllo della dose (risulta molto più complesso ed impreciso risalire alla frazione attiva del disinfettante immesso nell'acqua). Ciò rende più complessa la regolazione dell'impianto e il raggiungimento del livello di efficienza richiesto ottimizzando i consumi, in particolare per l'ozono – disinfettante molto reattivo – la cui concentrazione efficace (cioè il residuo attivo per la disinfezione) può essere molto rapidamente ridotto in presenza di variazioni del contenuto di sostanze ossidabili. Ciò comporta spesso la necessità di fare ricorso a bacini di contatto pluristadio, ove parcellizzare il dosaggio dell'ozono. (Tali tecniche di contatto risultano particolarmente idonee quando, oltre alla disinfezione, è richiesta l'ossidazione di composti organici refrattari potenzialmente tossici).

L'uso del PAA come agente di pre-disinfezione potrebbe avere alcune conseguenze in quanto la sua normale decomposizione ad acido acetico può facilitare fenomeni di ricrescita e di extra-carico della fase di adsorbimento. Resta pertanto confermata l'opportunità di utilizzare tale agente solo in pre-disinfezione, utilizzando dosi contenute (Tabella 2.2.3).

Tabella 2.2.3 – Confronto tra disinfettanti di uso comune (le scritte in neretto segnalano i punti critici, mentre le aree schermate indicano le prerogative favorevoli).

Caratteristiche	Cloro libero	Clorammine	ClO <sub>2</sub>	Ozono	Raggi UV
Efficacia su batteri	Ottima (HClO)	Moderata	Ottima	Ottima	Buona
Efficacia su spore	Ottima (HClO)	<b>Bassa</b>	Ottima	Ottima	Buona
Efficacia su virus	<b>molto bassa</b>	<b>Nulla</b>	<b>Molto bassa</b>	Discreta	<b>Molto bassa</b>
Influenza pH	*	Limitata	Ridotta	<sup>(o)</sup>	Nessuna
Residuo in rete	sì	Sì	Sì	<b>no</b>	<b>No</b>
Formazione THM	<b>sì</b>	Difficile	^	no	No
Altri sottoprodotti	<b>sì</b>	Non noti	cloriti, clorati	<b>aldeidi, chetoni</b>	Non noti
LC <sub>50</sub> /96 h su trota	<b>22%</b>	n.r.	35%	<b>0</b>	0
Difficoltà di esercizio	<b>alta cautela</b>	normale	alta cautela	0 cautela	normale
<p>* efficacia decrescente all'aumentare del pH  <sup>(o)</sup> l'aumento del pH promuove la decomposizione dell'ozono disciolto            ^ dipende dalla tecnica di produzione utilizzata</p>					