





PROVINCIA DI VERCELLI

# Le acque sotterranee della pianura vercellese

*La falda superficiale*

*giugno 2006*

*Realizzazione a cura di:*

Giovanni Gabriele Varalda – Mauro Falco – Oriana Benazzi (Provincia di Vercelli)  
Domenico A. De Luca - Manuela Lasagna – Daniele Casaccio – Luca Ossella  
(Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Torino).

*Autori dei testi:*

Domenico A. De Luca - Manuela Lasagna - Daniele Casaccio - Luca Ossella - Mauro Falco

*Un ringraziamento particolare per i dati forniti a:*

Regione Piemonte Direzione 24 Pianificazione delle Risorse Idriche  
Associazione Irrigazione Ovest Sesia – Vercelli  
Associazione Irrigazione Est Sesia - Novara  
Coutenza Canali Cavour - Novara

**P**arlare dell'acqua pare un argomento ovvio in quanto si tratta di un elemento indispensabile per la vita sia umana, sia animale, sia vegetale. Le stesse ricerche spaziali per portare l'uomo su altri corpi celesti sono condizionate dalla presenza dell'acqua sulle loro superfici.

*Che senso ha quindi una pubblicazione sull'acqua?*

*Direi per un semplice motivo: che non se ne sa abbastanza.*

Da una parte è infatti generalizzato un atteggiamento di superficialità e pigrizia che impone alle Amministrazioni Pubbliche di intervenire nel campo educativo.

Dall'altra c'è comunque la necessità di approfondire le conoscenze del proprio territorio; a maggior ragione di un territorio che storicamente si è sviluppato grazie alla risorsa "acqua".

Si impone poi una questione più generale legata alla consapevolezza che non esistono beni a consumo illimitato, e che quindi il loro utilizzo ha un costo, sebbene non facilmente calcolabile in termini economici.

Sono scelte politiche di lungo corso, per sviluppare la sensibilità dei cittadini, non quindi immediatamente riscontrabili, ma proiettate nel futuro a favore dei nostri figli che speriamo siano più accorti di quanto lo sono le generazioni attuali.

L'Amministrazione Provinciale dimostra responsabilità offrendo questo lavoro all'attenzione degli addetti ai lavori, del mondo della scuola e dei cittadini.

L'Assessore all'Ambiente  
*Borasio Ing. Francesco*



# INDICE

1. LE ACQUE SOTTERRANEE: UNA RISORSA DA CONOSCERE E DA PROTEGGERE .....	1
---	---

2. ASSETTO LITOSTRATIGRAFICO E GEOIDROLOGICO DELLA PIANURA VERCELLESE .....	45
---	----

*Tavole su CD-rom:*

- Carta geoidrologica – Settore Nord
- Carta geoidrologica – Settore Sud-Est
- Carta geoidrologica – Settore Sud-Ovest
- Sezione litostratigrafica n. 1
- Sezione litostratigrafica n. 2
- Sezione litostratigrafica n. 3
- Sezione litostratigrafica n. 4
- n. 30 stratigrafie rappresentative

3. CARATTERISTICHE IDROCHIMICHE DELLA FALDA SUPERFICIALE DELLA PIANURA VERCELLESE .....	83
--	----

4. PIEZOMETRIA E VARIAZIONE DEL LIVELLO PIEZOMETRICO DELLA FALDA SUPERFICIALE DELLA PIANURA VERCELLESE .....	111
---	-----

*Tavole su CD-rom:*

- Carta della soggiacenza della falda superficiale – Settore Nord
- Carta della soggiacenza della falda superficiale – Settore Sud-Est
- Carta della soggiacenza della falda superficiale – Settore Sud-Ovest

5. LA VULNERABILITÀ ALL'INQUINAMENTO DELL'ACQUIFERO SUPERFICIALE DELLA PIANURA VERCELLESE .....	147
--	-----

*Tavole su CD-rom:*

- Carta della vulnerabilità dell'acquifero superficiale (Metodo GOD 1987) – Settore Nord
- Carta della vulnerabilità dell'acquifero superficiale (Metodo GOD 1987) – Settore Sud-Est
- Carta della vulnerabilità dell'acquifero superficiale (Metodo GOD 1987) – Settore Sud-Ovest

# **1. LE ACQUE SOTTERRANEE: UNA RISORSA DA CONOSCERE E DA PROTEGGERE**

## **1.1 - INTRODUZIONE**

Scopo principale di questo lavoro è fornire, non solo agli esperti ma soprattutto ai non addetti ai lavori, un quadro generale e semplificato sui concetti generali dell'idrogeologia. In particolare sono stati analizzati e descritti temi quali le modalità di accumulo e circolazione di acqua nel sottosuolo, le modalità di estrazione delle acque sotterranee, le caratteristiche chimiche delle acque sotterranee e la loro cartografia.

Sono stati, inoltre, esaminati i fattori di degrado delle acque sotterranee, con un approfondimento sull'importanza delle risorse idriche.

## **1.2 - LE ACQUE IN NATURA E IL CICLO IDROLOGICO**

L'acqua è uno dei composti principali per la vita sulla terra. Essa, infatti, è il solvente in cui si sciolgono e vengono trasportate buona parte delle molecole che si trovano negli organismi, oltre a costituire una percentuale rilevante del loro corpo.

Le acque presenti in natura possono essere suddivise in due grandi categorie: acque atmosferiche e acque litosferiche (Figura 1).

Le acque atmosferiche sono contenute nell'atmosfera sotto forma di vapore e di precipitazioni liquide (pioggia e rugiada) o solide (neve, grandine e brina).

Le acque litosferiche sono contenute nella litosfera. Possono essere a loro volta distinte in:

- acque superficiali (situate sulla crosta terrestre nei fiumi, nei laghi, nei mari, ecc.);
- acque sotterranee (contenute nel sottosuolo).

<b>Acque atmosferiche</b>	<b>Vapore</b>	
	Precipitazioni liquide	Pioggia e rugiada
	Precipitazioni solide	Neve grandine e brina
<b>Acque litosferiche</b>	Acque superficiali	Corsi d'acqua, laghi e mari
	Acque sotterranee	Acque a circolazione attiva Acque connate Acque fossili Acque juvenili

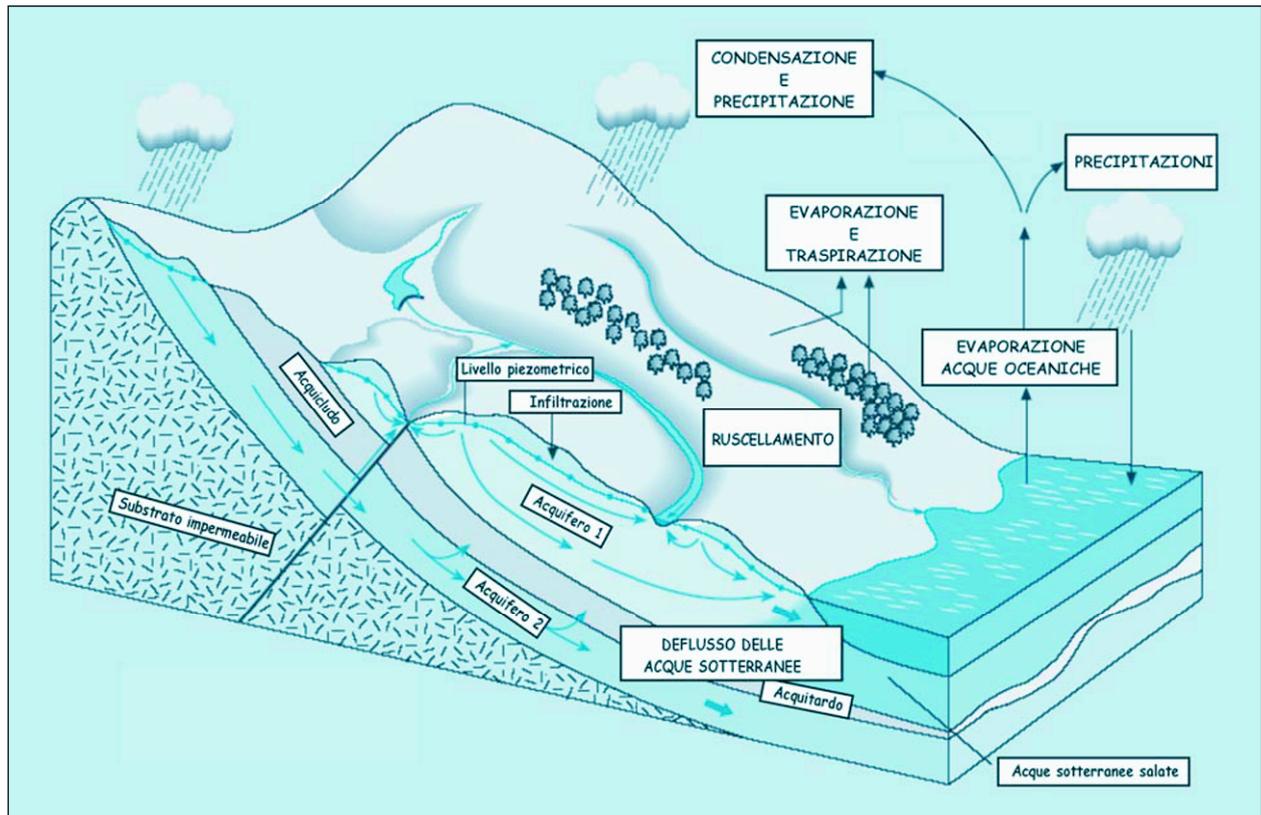
**Figura 1 - Tipi di acqua naturale.**

All'interno delle acque sotterranee si possono distinguere le acque a circolazione attiva, che normalmente defluiscono negli acquiferi dalle zone di alimentazione alle zone di drenaggio, le acque connate intrappolate nei sedimenti al momento della loro deposizione, come ad esempio le acque salate nei sedimenti marini, le acque fossili, escluse dalla circolazione attiva in quanto confinate in acquiferi molto profondi, le acque juvenili di neoformazione derivanti dalla segregazione dei magmi.

Le acque atmosferiche e litosferiche, che sulla Terra sono molto abbondanti e costituiscono circa 1420 Km<sup>3</sup>, sono soggette ad un ciclo chiuso il cui motore è costituito dall'energia solare e dalla gravità.

Queste forze provocano una serie di fenomeni, variabili nel tempo e nello spazio, che si ripetono con sistematicità.

La circolazione continua dell'acqua tra oceani, atmosfera e continenti è chiamata **ciclo idrologico**. Il ciclo idrologico è riprodotto, in modo schematico, nella Figura 2.



**Figura 2 - Il ciclo dell'acqua (modificato da Morris B.L. et alii, 2003).**

Sottoposta alla forza di gravità ed al calore del sole, la maggior parte delle acque della Terra è in continuo movimento e può passare incessantemente dalla litosfera all'atmosfera e viceversa. In questo scambio litosfera/atmosfera, le acque subiscono trasformazioni di fase passando negli stati liquido, solido e gassoso.

Per effetto delle condizioni climatiche, ed in particolare di temperatura, umidità, pressione, vento, e della presenza di vegetazione, le acque possono evaporare e passare nell'atmosfera sotto forma di vapore acqueo; viceversa il vapore acqueo può condensarsi nelle nuvole e precipitare sulla superficie terrestre come pioggia o neve, ecc.; qui comincia un nuovo cammino: sulla superficie terrestre l'acqua può scorrere in torrenti o fiumi, oppure infiltrarsi e circolare nel sottosuolo negli acquiferi per poi riemergere, naturalmente o estratta dall'uomo, e giungere al mare, da dove può evaporare nuovamente e così via.

Questo ciclo può durare poche ore nel caso di gocce di pioggia che rievaporano immediatamente, ma può richiedere anche mesi o anni o secoli.

Si stabilisce in questo modo un continuo stato di equilibrio basato su uno scambio reciproco ed un movimento incessante di acque contenute nell'atmosfera e acque presenti sulla litosfera, sia in superficie che nel sottosuolo.

## 1.3 - L'IDROGEOLOGIA E LE ACQUE SOTTERRANEE

L'idrogeologia è la scienza che studia le acque sotterranee.

Il termine **acque sotterranee** è riservato alle acque presenti nel sottosuolo, ed in particolare modo all'acqua che satura completamente rocce e terreni.

Tuttavia anche l'acqua che non riesce a saturare completamente i primi metri del sottosuolo ed è presente sotto forma di umidità nella cosiddetta zona non satura riveste un ruolo fondamentale nel ciclo idrologico.

Originariamente lo studio dell'idrogeologia era rivolto esclusivamente allo sfruttamento delle acque sotterranee tramite pozzi e sorgenti. Le acque sotterranee, però, sono più di una risorsa, in quanto componente fondamentale dell'ambiente naturale. La comprensione del loro ruolo nel ciclo idrologico è indispensabile se si vogliono effettuare analisi integrate per la delimitazione delle risorse idriche a scala di bacino e per la valutazione dell'inquinamento dell'ambiente a scala regionale.

### 1.3.1 - Utilità delle acque sotterranee

Le acque sotterranee costituiscono circa il 95 per cento dell'acqua dolce sul nostro pianeta (escludendo i ghiacci polari) e risultano pertanto fondamentali per la vita umana e lo sviluppo economico. Il loro sfruttamento contribuisce in maniera sostanziale a soddisfare i fabbisogni idropotabili dell'uomo.

Inoltre, nella maggior parte dei paesi industrializzati le acque sotterranee rappresentano una parte significativa e talora prevalente delle risorse idriche disponibili.

Di facile ed economico sfruttamento, le acque sotterranee rappresentano, tuttavia, una risorsa soggetta ai rischi dell'eccessivo sfruttamento e della degradazione qualitativa in aree di espansione demografica ed economica. In tali zone le autorità preposte alla gestione delle acque devono produrre il massimo sforzo per la loro conservazione e protezione.

Le acque sotterranee presentano vantaggi largamente riconosciuti, in quanto sfruttabili a lungo termine e con profitto, fattori che ne fanno una fonte preferenziale per l'approvvigionamento idrico ed il soddisfacimento dei bisogni di varie categorie di utilizzatori. Tali vantaggi sono legati alla quantità ed alla qualità dell'acqua, come pure alle condizioni operative e di sfruttamento.

Tra le ragioni più importanti per cui la società ha trovato così utile l'utilizzo delle acque sotterranee (Figura 3) si possono citare le seguenti:

- gli acquiferi sono fonti di acqua molto convenienti perché essi sono serbatoi sotterranei naturali che possono avere una capacità di deposito molto maggiore dei più grandi serbatoi artificiali.

Tale deposito permette un uso tempestivo dell'acqua, che può essere pompata durante i periodi asciutti quando le risorse di superficie corrispondenti, come fiumi o serbatoi, non sono in grado di fornire acqua in quantità sufficiente;



**Figura 3 - Pozzo artesiano: l'acqua risale naturalmente in superficie.**

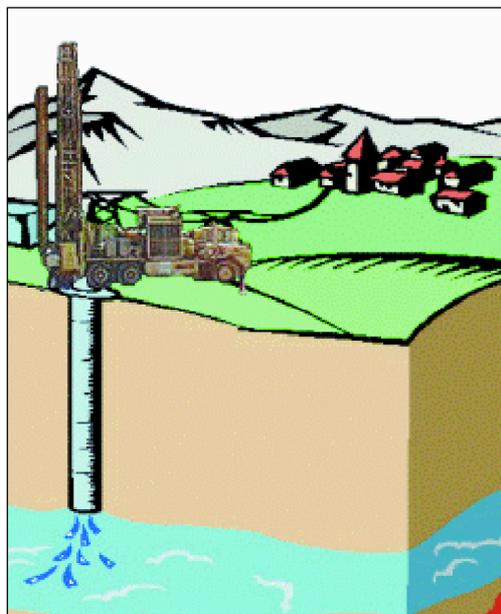
- molti acquiferi sono capaci di offrire protezione naturale dalla contaminazione; per questo motivo solitamente le acque sotterranee sono più sicure delle acque di superficie non trattate. In effetti generalmente le caratteristiche naturali delle acque sotterranee sono in linea con gli standard richiesti (ad esempio per le acque ad uso potabile) e sono costanti nel tempo.

Le condizioni proprie delle acque sotterranee, poi, assicurano la protezione contro la contaminazione batterica, in seguito a fenomeni di autopurificazione per filtrazione,

mentre alcuni inquinanti chimici possono essere trattenuti dal suolo, ad esempio per un fenomeno di adsorbimento da parte delle argille.

In generale, quindi, la produzione di acqua potabile a partire dall'acqua sotterranea richiede un trattamento più semplice e meno costoso, come pure controlli meno frequenti rispetto all'acqua potabile ottenuta a partire da acque superficiali;

- gli acquiferi forniscono il flusso di base ai corsi d'acqua durante i periodi di assenza di pioggia. Essi sono, quindi, una risorsa che richiede protezione in modo che le acque sotterranee possano continuare a sostenere l'umanità e i diversi ecosistemi;
- le acque sotterranee sono di utilizzo relativamente facile ed economico. Possono essere estratte progressivamente con piccola spesa e, spesso, i pozzi possono essere realizzati vicino alle località ove l'approvvigionamento idrico è necessario (Figura 4);



**Figura 4 - I pozzi possono essere realizzati laddove l'approvvigionamento idrico è necessario.**

- le acque sotterranee sono una risorsa facile da sviluppare da un punto di vista organizzativo: gli individui possono costruire, gestire e controllare il proprio rifornimento, spesso sulle aree di proprietà (Figura 5).

L'acqua sotterranea è una risorsa permanente ed estesa che non richiede l'installazione di impianti particolari, come nel caso della regolazione ed utilizzazione delle acque superficiali. Essa può venire prelevata direttamente ed è disponibile per le varie imprese, individuali e collettive, presenti sul territorio. L'investimento richiesto è di facile ripartizione e distribuzione nel tempo e l'impianto rapidamente raggiunge la piena operatività con tutti i relativi vantaggi economici;



**Figura 5 - Vecchio pozzo utilizzato per irrigare un orto domestico.**

- l'acqua sotterranea è comunemente accessibile e sfruttabile con impianti assai produttivi senza richiedere lavori importanti. Impianti vari richiedono spazi di superficie minimi. I condizionamenti legati alla localizzazione, sebbene non trascurabili (ad esempio la distribuzione irregolare dei siti produttivi e la discontinuità di alcuni acquiferi) sono assai minori che per le acque superficiali. I costi energetici di sfruttamento sono spesso nulli (prese a gravità, pozzi artesiani) o minimi (pompaggio da piccole profondità).

Le acque sotterranee rappresentano per tutte queste motivazioni un bene insostituibile per la comunità; la conservazione e protezione delle loro qualità dovrà, quindi, essere uno dei punti fondamentali di una lungimirante politica del territorio. E' da tenere presente che, una

volta contaminate, le falde idriche richiedono tempi lunghissimi, alla scala umana, per autodepurarsi e che eventuali interventi di disinquinamento, sempre che siano possibili, risultano altresì molto costosi.

### 1.3.2 - Uso delle acque sotterranee

Globalmente, l'uso delle acque sotterranee è enorme a causa della facilità di utilizzo e della loro ubiquità; generalmente, tuttavia, il dato relativo alla diffusione del loro utilizzo tende a essere sottovalutato: infatti gran parte degli utilizzi locali sono esclusi dalle statistiche ufficiali.

Il contributo delle acque sotterranee tuttavia è vitale: oltre a due miliardi di persone dipendono direttamente dagli acquiferi per l'acqua potabile.

In Tabella 1 è riportata una valutazione dell'uso di acque sotterranee per rifornimento potabile in tutto il mondo.

<b>Valori stimati del consumo di acque ad uso domestico estratte dal sottosuolo</b>		
<b>Continente</b>	<b>%</b>	<b>Popolazione servita (milioni)</b>
<i>Asia</i> .....	32	1000-2000
<i>Europa</i> .....	75	200-500
<i>America centrale e del Sud</i> .....	29	150
<i>USA</i> .....	51	135
<i>Australia</i> .....	15	3
<i>Africa</i> .....	-	-
<b>MONDO</b> .....	-	1500-2750

*Dati UNEP, OECD, FAO, US-EPA Australian EPA (2000)*

**Tabella 1 - Valutazione dell'uso di acque sotterranee per il rifornimento potabile nel Mondo.**



***Figura 6 - L'approvvigionamento idrico di oltre due miliardi di persone nel mondo dipende dalle acque sotterranee.***

Il 40 per cento del cibo del mondo è prodotto da agricoltura irrigata con acqua proveniente in gran parte da acque sotterranee.



***Figura 7 - Sistemi di irrigazione delle colture: le acque sotterranee costituiscono una importante fonte di acqua per tale utilizzo.***

Nel futuro, le acque sotterranee continueranno ad essere fondamentali per lo sviluppo economico e per fornire approvvigionamenti idrici affidabili necessari per l'uso domestico, industriale e per l'irrigazione.

Il riconoscimento del ruolo essenziale delle acque sotterranee nello sviluppo umano è, tuttavia, relativamente recente e ancora non sufficientemente compreso e tutelato.

### **1.3.3 - L'acqua nel sottosuolo**

Nel sottosuolo l'acqua si accumula e circola nei vuoti dei terreni e delle rocce; tali vuoti sono rappresentati da pori nei sedimenti sciolti (specialmente ghiaie e sabbie), da fratture e discontinuità, quali i piani di stratificazione e di frattura, nelle rocce litificate, e da cavità di tipo carsico nelle rocce carbonatiche.

In generale, si possono distinguere tre grandi categorie di serbatoio in base al tipo di vuoti in cui l'acqua sotterranea può essere contenuta:

- a) le rocce incoerenti permeabili per porosità (o permeabili in piccolo);
- b) le rocce compatte fessurate permeabili per fessurazione (o permeabili in grande);
- c) le rocce compatte permeabili per carsismo (o permeabili in grande).

Tuttavia le rocce compatte presentano spesso caratteri misti, con coesistenza di pori e fessure e, nelle rocce solubili, condotti carsici.

#### **1.3.3.1 - Rocce incoerenti permeabili per porosità (o porosità in piccolo)**

Le rocce incoerenti o non consolidate (terreni) presentano unicamente **pori**, che impartiscono al mezzo poroso carattere di continuità (Figura 8).

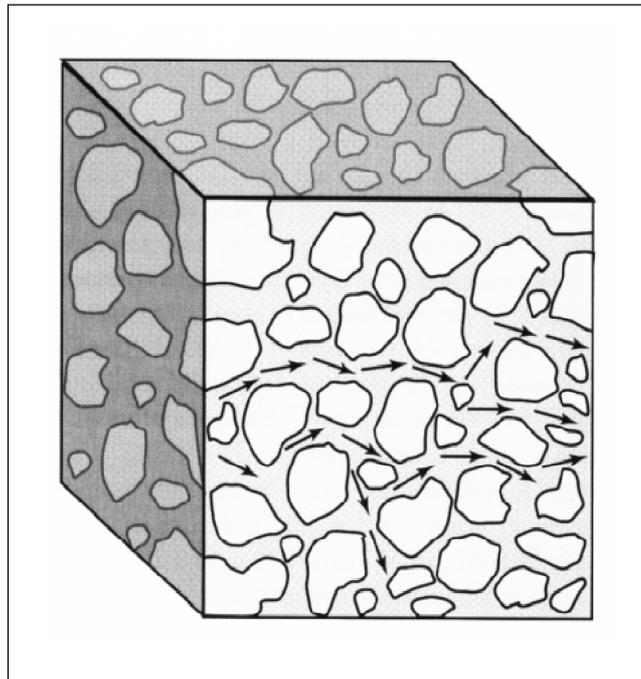
Appartengono a tale categoria di rocce le ghiaie, le sabbie, i silt, le argille, le ghiaie sabbiose, le sabbie argillose, le argille sabbiose... ecc.

Queste rocce costituiscono un gran numero di formazioni idrogeologiche.

I pori sono dei **vuoti** di forma più o meno sferica, di piccole dimensioni (ordine di grandezza millimetrica) disposti tra le particelle solide o grani costituenti il serbatoio.

I pori comunicano tra di loro, nel senso del deflusso idrico sotterraneo, permettendo lo spostamento delle particelle di acqua (acqua gravifica).

Le dimensioni dei vuoti sono strettamente legate a quelle dei grani.



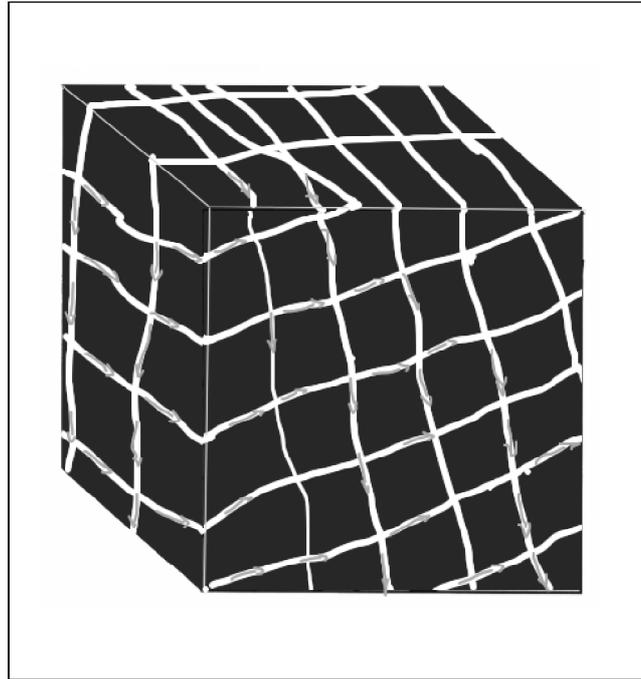
*Figura 8 – Deflusso idrico nei pori di un mezzo poroso.*

### 1.3.3.2 - Rocce compatte fessurate

Le rocce compatte (sedimentarie, intrusive ed effusive) fessurate possono essere acquifere. L'acqua trova sede nelle zone con **discontinuità** (fratture, piani di scistosità, fessure da raffreddamento, stratificazioni) (Figura 9).

Appartengono a tale categoria di rocce le arenarie, i calcari, gli gneiss, i graniti, le quarziti, i basalti ecc.

Le fessure sono delle **discontinuità** di forma allungata, ad apertura più o meno larga. Il loro insieme costituisce la fessurazione, fenomeno naturale la cui origine è essenzialmente meccanica. Quando le fessure si intersecano fino a dividere la roccia in una serie di blocchi individuati da una "rete" di aperture, la circolazione avviene attraverso la **rete acquifera** corrispondente.



*Figura 9 – Deflusso idrico in una rete acquifera.*

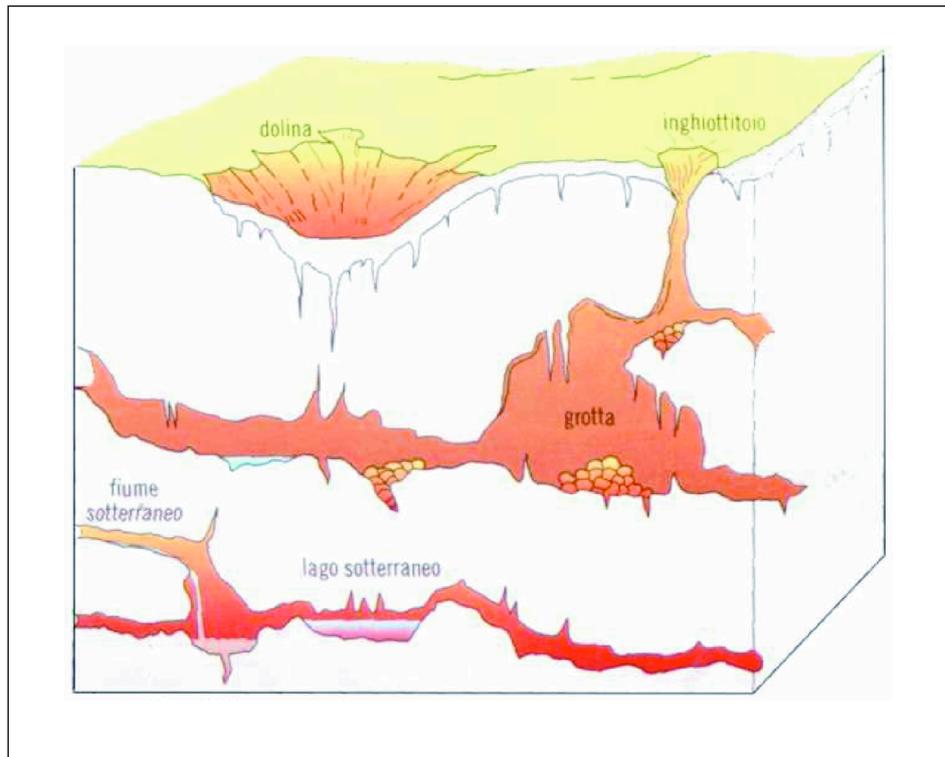
### **1.3.3.3 - Rocce carsiche**

Le rocce carbonatiche (calcari, calcari dolomitici e dolomie, gessi e anidridi) presentano all'origine delle fessure. L'azione meccanica e chimica (per dissoluzione dei carbonati) delle acque sotterranee allarga le fessure che possono divenire canali e cavità, a volte di grandi dimensioni (Figura 10).

Si tratta del fenomeno di **carsificazione**, che dà origine a reti di canali, definite reti carsiche. La circolazione idrica avviene in questo caso in corrispondenza di grandi cavità, con formazione, talora, di veri e propri fiumi e laghi sotterranei.

Nelle rocce solubili carsificate è possibile, inoltre, la coesistenza dei tre tipi di vuoti (pori, fessure, cavità carsiche) e quindi di permeabilità.

Fatta eccezione per le cavità di tipo carsico, quindi, nel sottosuolo non sono presenti laghi o fiumi.



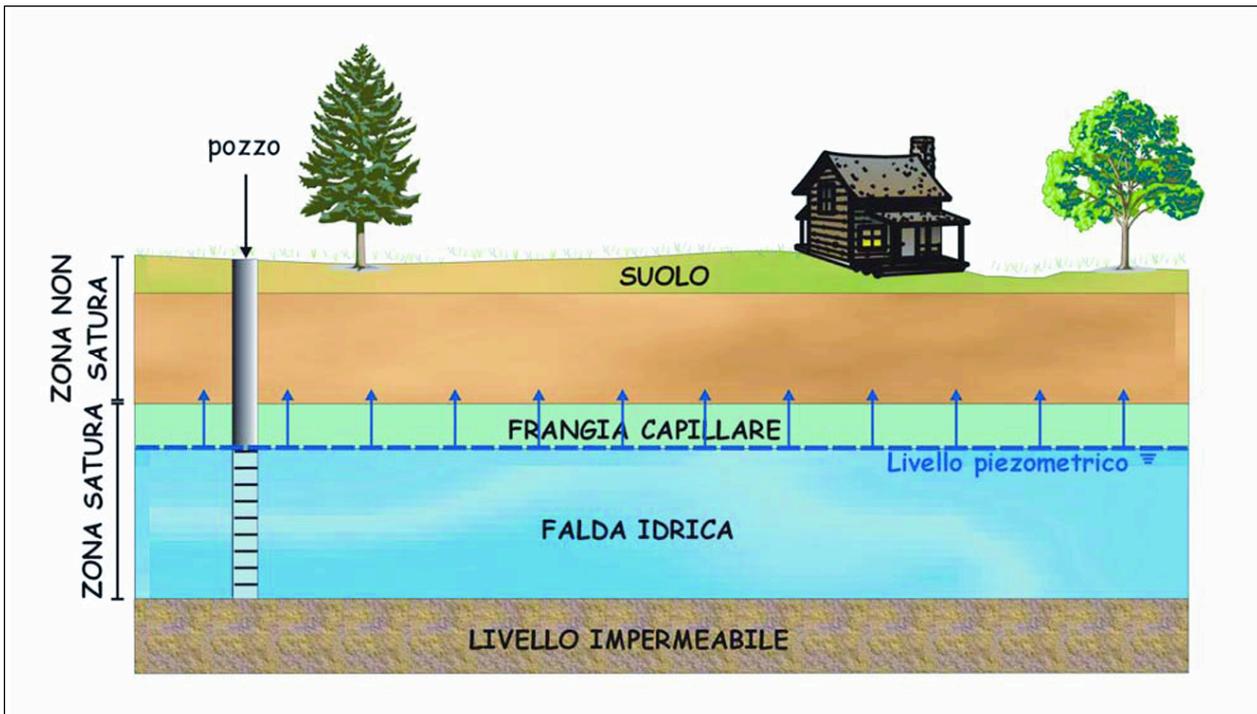
**Figura 10 – Le cavità carsiche.**

#### **1.3.3.4 - Rappresentazione schematica del sottosuolo**

L'acqua presente nel sottosuolo può derivare dall'infiltrazione delle precipitazioni meteoriche, dalla dispersione dei fiumi o dall'irrigazione.

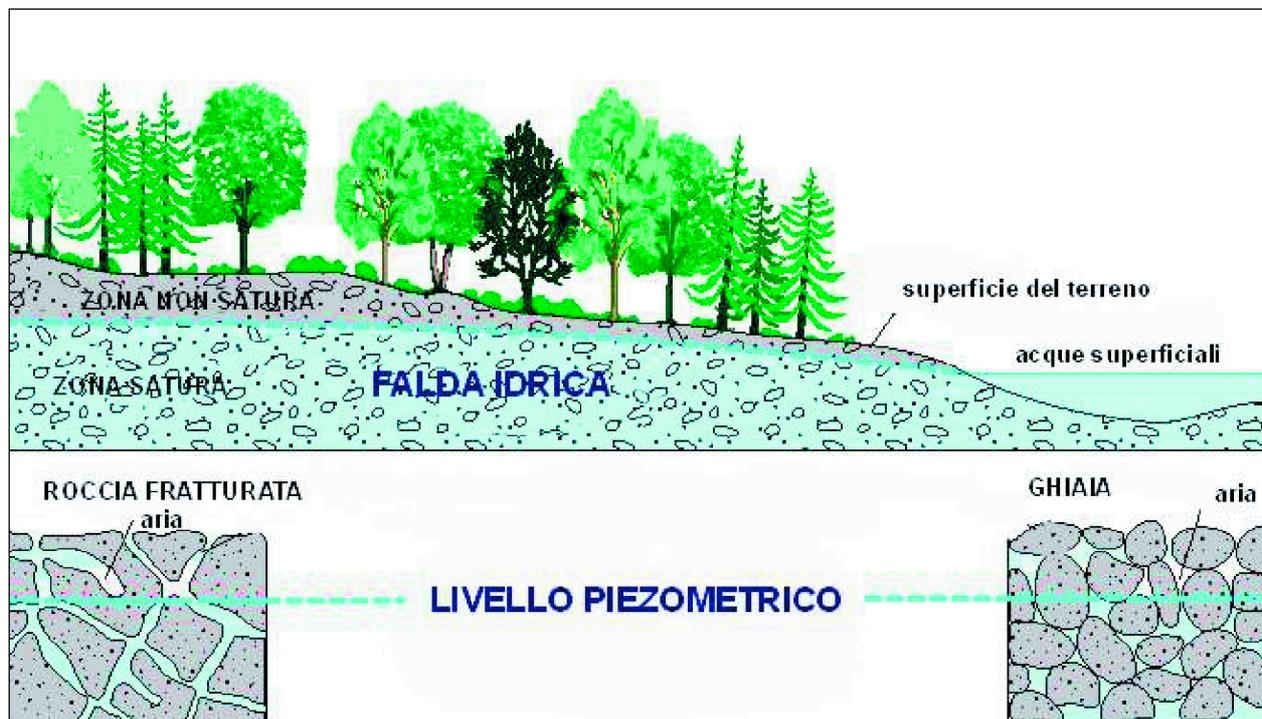
In uno schema del sottosuolo, a partire dalla superficie (Figura 11) è presente una **zona non satura**, di spessore variabile da luogo a luogo, detta anche zona di aerazione (o aerato) in quanto i pori e le discontinuità sono in parte occupati da aria.

Essa comprende la zona del suolo, una sottostante zona intermedia e la parte superiore della frangia capillare. Quest'ultima è situata a cavallo tra la zona insatura e la sottostante zona satura e in essa l'acqua aderisce alle particelle di roccia e risale in pori di piccolo diametro vincendo per capillarità la forza di gravità. L'acqua contenuta nella zona insatura intermedia viene detta vadosa.



**Figura 11** - L'acqua sotterranea si trova sia nella zona saturata che in quella non saturata. La parte superiore della zona saturata è occupata dall'acqua sollevata per capillarità dalla tensione superficiale. La superficie piezometrica è il livello della zona saturata in corrispondenza del quale l'acqua ha una pressione uguale a quella atmosferica: la sua posizione è indicata dal livello dell'acqua nei pozzi (livello piezometrico) come quello riportato in Figura.

Nella **zona saturata**, che giace al di sotto della zona non saturata, tutti i vuoti sono riempiti da acqua, che va a costituire la **falda idrica** (Figura 12); la superficie superiore della falda idrica, soggetta a oscillazioni di posizione in relazione a diversi fattori, viene denominata **superficie piezometrica** e rappresenta il livello idrico dell'acqua nei pozzi (**livello piezometrico**). Nella zona saturata vi è, quindi, l'acqua di falda (ingl. *groundwater*), che nel linguaggio corrente è chiamata "acqua sotterranea".



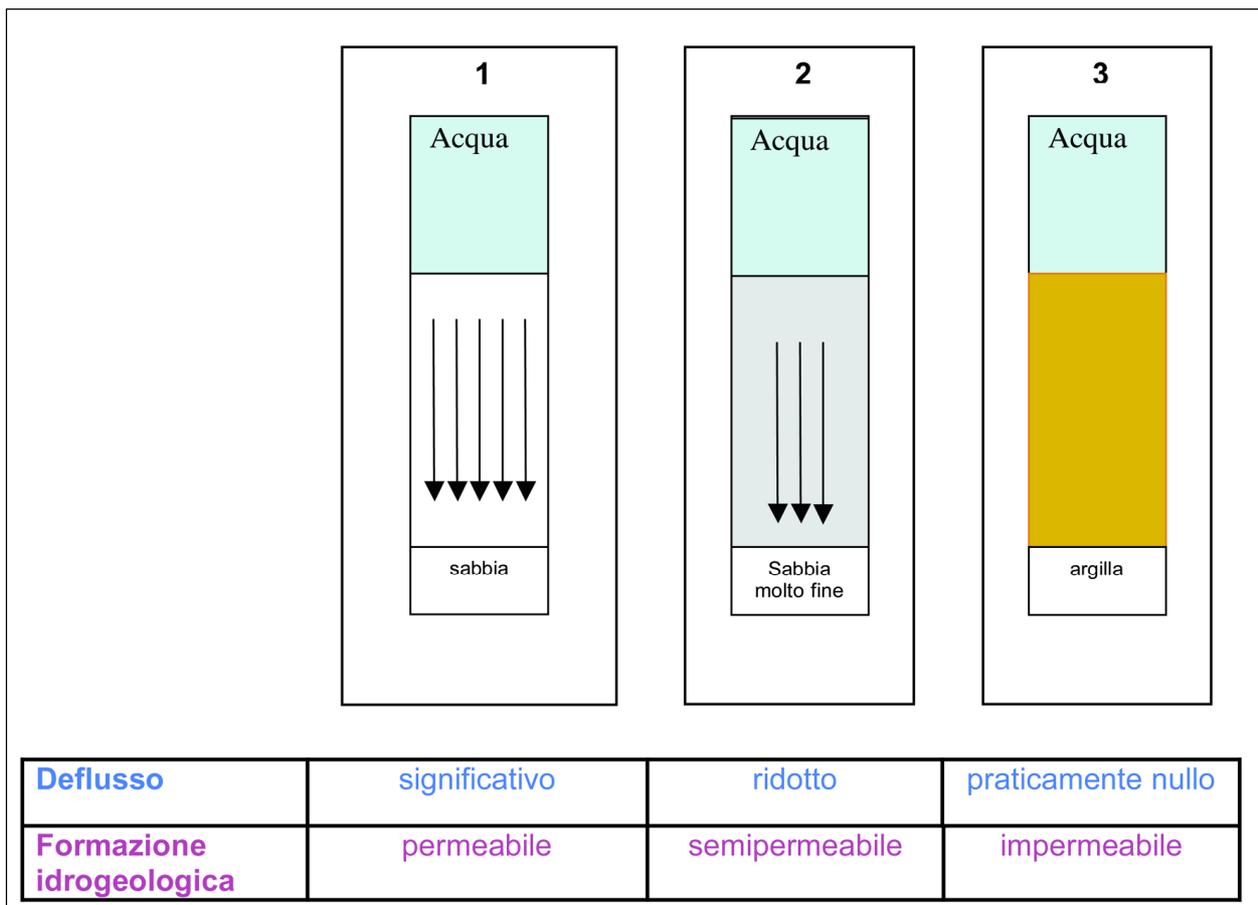
**Figura 12 – Schematizzazione della zona non satura, zona satura e livello piezometrico.**

### **1.3.3.5 - Distinzione delle formazioni geologiche in base al grado di permeabilità**

Il **grado di permeabilità** rappresenta l'attitudine di una roccia a condurre il deflusso idrico. Per quantizzare il grado di permeabilità di una formazione geologica viene utilizzato il parametro conducibilità idraulica  $k$  (m/s). Maggiore è il valore della conducibilità idraulica, maggiore è la permeabilità della formazione geologica.

In particolare, in base al valore della conducibilità idraulica le formazioni idrogeologiche possono essere distinte in tre categorie (Figura 13):

- formazioni permeabili;
- formazioni semipermeabili;
- formazioni impermeabili.



**Figura 13 – Classificazioni delle formazioni idrogeologiche in base al grado di permeabilità (ridisegnato da Castany, 1985).**

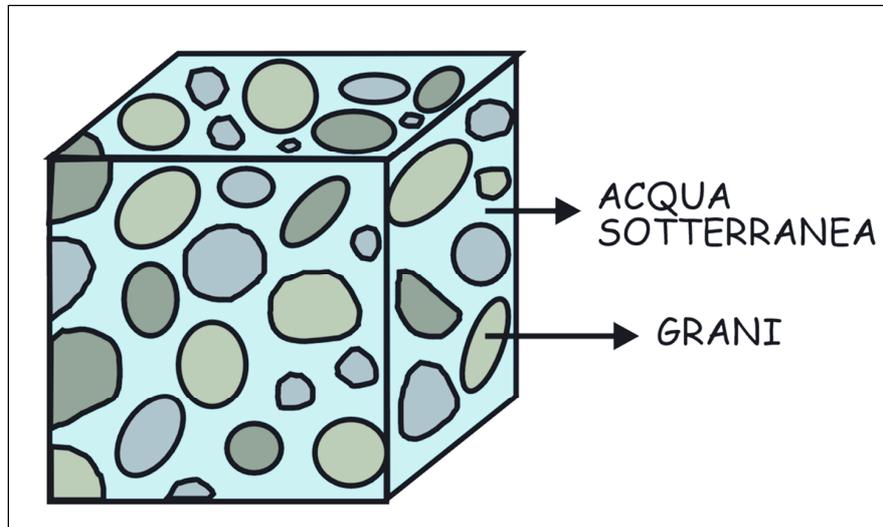
**Formazioni geologiche permeabili: acquiferi ( $k > 10^{-4}$  m/s).**

Le rocce o i terreni saturi in acqua e che ne consentono il flusso con velocità (da qualche metro a migliaia di metri per anno) compatibile con le possibilità di un normale utilizzo costituiscono le formazioni idrogeologiche permeabili o **acquiferi** (in inglese *aquifers*). Sono acquiferi le ghiaie, le sabbie grossolane e medie, i calcari fessurati, le rocce magmatiche fessurate, ecc.

L'acquifero è quindi un complesso di due costituenti essenziali: il serbatoio e l'acqua sotterranea (Figura 14).

Il **serbatoio** è la fase solida, il mezzo poroso o fessurato che costituisce lo scheletro solido o matrice. Sono esempi di serbatoio i grani di sabbia di una formazione sabbiosa o la roccia fessurata di un calcare, ecc.

L'**acqua sotterranea** è la fase liquida che satura il serbatoio, la cui frazione mobilizzabile (detta acqua gravifica), costituisce la **falda idrica** sotterranea che alimenta le sorgenti, i fiumi e le captazioni. È errato utilizzare il termine falda acquifera al posto di falda idrica.



**Figura 14** – L'acquifero è un complesso di due elementi: il serbatoio e l'acqua sotterranea, la cui frazione mobile costituisce la falda idrica sotterranea.

I principali acquiferi, in ordine decrescente di permeabilità, sono:

- sabbie e ghiaie (depositi alluvionali grossolani);
- rocce carbonatiche fessurate;
- basalti fessurati;
- arenarie poco cementate o fessurate;
- graniti fessurati.

**Formazioni geologiche semiimpermeabili: acquitardi ( $k > 10^{-4} - 10^{-9} \text{ m/s}$ ).**

Sono definiti acquitardi (in inglese *aquitards*) le rocce o i terreni semipermeabili contenenti una quantità d'acqua che viene trasmessa lentamente e in condizioni particolari, ma comunque con velocità inferiore a quella dell'acquifero e superiore a quella dell'acquiclude. Tali materiali, come le sabbie molto fini o le sabbie argillose di bassissima permeabilità, permettono in condizioni idrodinamiche favorevoli, scambi verticali ascendenti o

discendenti tra acquiferi sovrapposti, per un fenomeno naturale chiamato **fuga** (*drainance*, francese ; *leakage*, inglese).

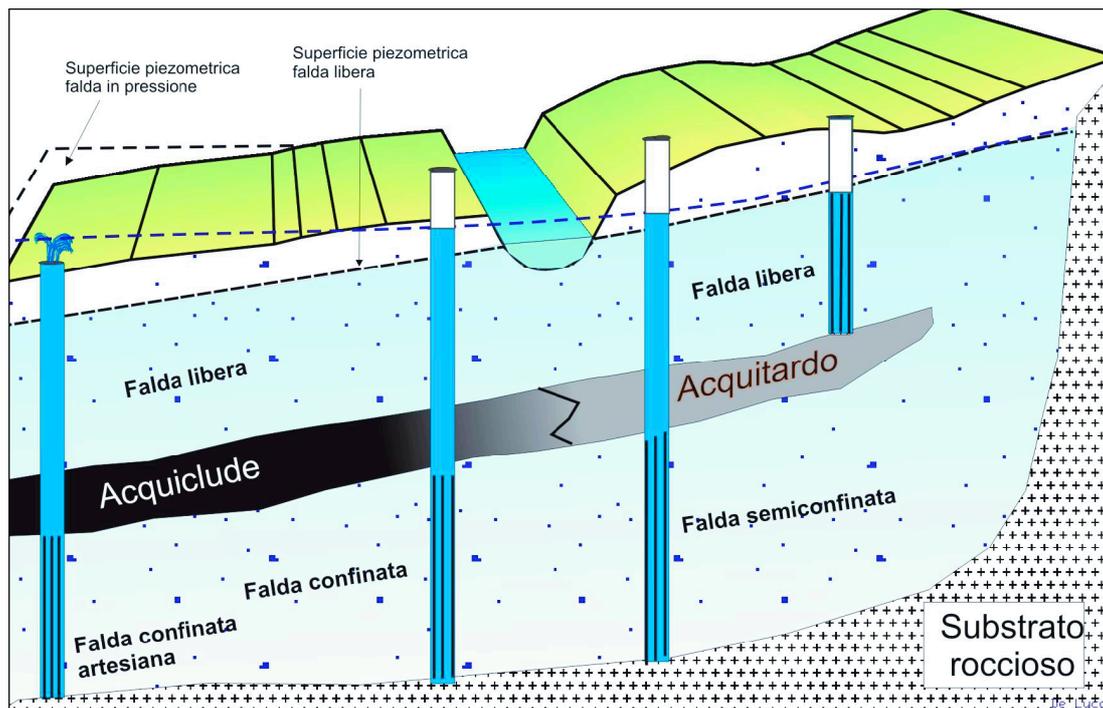
**Formazioni geologiche impermeabili: acquicludi ( $k < 10^{-9}$  m/s).**

In tali formazioni le velocità di deflusso dell'acqua sotterranea sono molto basse, praticamente non misurabili (qualche millimetro per anno). Ne consegue che le grandi quantità d'acqua che esse spesso contengono non possono essere sfruttate. Sono acquicludi (in inglese *aquicludes*) i limi, le argille, le marne, gli scisti, ecc.

### **1.3.3.6 - Tipologia degli acquiferi in base al grado di confinamento**

Come precedentemente detto, l'**acquifero** è rappresentato da una formazione geologica in grado di immagazzinare acqua all'interno dei vuoti che contiene (pori o fessure) e sufficientemente permeabile da consentire il flusso con portate significative nei confronti di un eventuale utilizzo.

Le caratteristiche geometriche e geologiche del sottosuolo condizionano la tipologia degli acquiferi presenti, ed in particolare influiscono sulla pressurizzazione a cui l'acqua può trovarsi in risposta alla presenza di livelli impermeabili (acquicludi) o semipermeabili (acquitardi) che separano i diversi acquiferi (Figura 15). In particolare si definisce **letto** dell'acquifero la base su cui esso scorre e **tetto** la formazione geologica che lo limita superiormente. Si possono distinguere acquiferi a falda libera, acquiferi a falda confinata, e acquiferi a falda semiconfinata.



**Figura 15 – Tipologia degli acquiferi in base al grado di confinamento.**

**Acquifero a falda libera (o freatica o non confinata)**

Si tratta di un acquifero che poggia su un orizzonte impermeabile (acquicludo) e la cui superficie piezometrica è in equilibrio con la pressione atmosferica. In questo tipo di acquifero, quindi, mancano nella parte superiore livelli impermeabili in grado di confinare (cioè mettere in pressione) la falda idrica.

**Acquifero a falda semiconfinata**

È un acquifero limitato a tetto o a letto da un livello semipermeabile (acquitarzo); vi può essere, quindi, un certo passaggio di acqua tra un acquifero e l'altro, anche se limitato dalla bassa permeabilità del livello semiconfinante.

**Acquifero a falda confinata**

È un acquifero limitato a tetto e a letto da un livello impermeabile (acquicludo); non vi è, quindi, un significativo passaggio di acqua tra un acquifero e l'altro.

Se si realizza un pozzo finestrato in un acquifero, il livello idrico si posizionerà nello stesso in accordo con la posizione della superficie piezometrica della falda in esso contenuto. In particolare, nel caso di acquiferi in pressione il livello si ritroverà al di sopra del tetto impermeabile dell'acquifero stesso. In alcuni casi esso potrebbe risultare al di sopra del

piano campagna, entrando naturalmente in produzione: in tal caso l'acquifero viene detto **a falda artesianiana**.

Se nella zona non satura al di sopra della falda libera si trovano lenti impermeabili (limi, argille), l'acqua di infiltrazione dalla superficie può essere intercettata dalle stesse, per cui si possono formare degli accumuli di acqua spazialmente limitati e chiamati **falde sospese**, in genere di scarsa potenzialità.

#### 1.3.4 - I pozzi per acqua

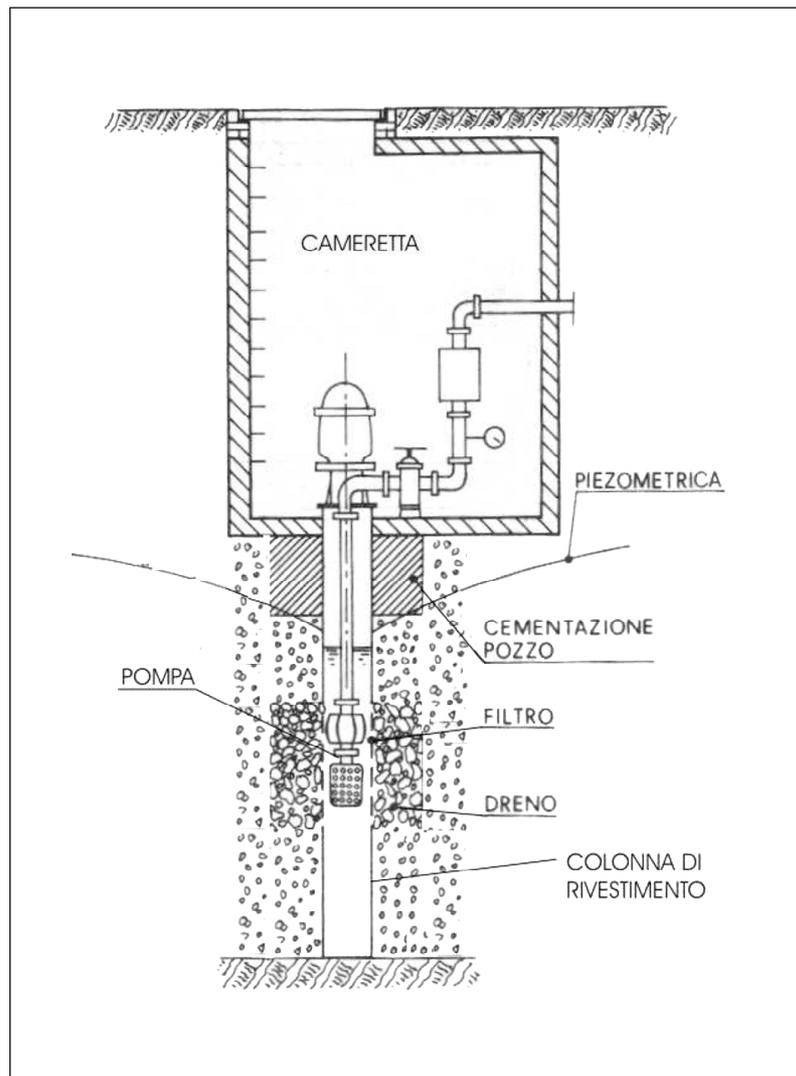
Un pozzo idrico è uno scavo cilindrico verticale in un mezzo acquifero, il cui fine è l'estrazione delle acque di falda, senza alterare lo stato qualitativo e quantitativo delle risorse idriche sotterranee.

In generale un moderno pozzo per l'estrazione d'acqua è costituito da (Figura 16):

- **Colonna di rivestimento definitiva:** una colonna di tubi inserita nel terreno, di diametro idoneo a contenere una pompa, dotata di tratti ciechi e tratti con aperture detti filtri.
- **Filtri:** tubi dotati di aperture per l'ingresso dell'acqua nel pozzo; consentono l'ingresso della maggior quantità di acqua possibile senza che contemporaneamente entrino nel tubo particelle solide.
- **Dreno:** materiale granulare inserito tra i filtri e l'acquifero; aumenta la permeabilità in prossimità dei filtri e forma un ulteriore filtro al contorno della colonna, avente la funzione di ridurre o trattenere le particelle.
- **Cementazione:** boiaccia cementizia/bentonite/calcestruzzo che può avere varie funzioni: isolare la colonna del pozzo dai terreni più superficiali, ancorare la colonna al terreno, isolare i singoli livelli produttivi.
- **Pompa:** è inserita all'interno della colonna per l'estrazione dell'acqua.

Il progetto di un pozzo, soprattutto se si tratta di una captazione spinta fino ad una certa profondità nel sottosuolo, richiede una approfondita conoscenza della struttura idrogeologica del territorio e delle condizioni qualitative degli acquiferi in esso presenti.

Pozzi di diametro ridotto, utilizzati ai fini della misura del livello piezometrico della falda, vengono definiti **piezometri**. In genere sono utilizzati anche per il prelievo di campioni d'acqua rappresentativi della falda interessata dai filtri, a scopo di monitoraggio.



**Figura 16 – Schema generale di un pozzo per acqua.**

## 1.4 - IL CHIMISMO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Lo studio del chimismo delle acque sotterranee, cioè delle caratteristiche fisico-chimiche delle stesse, è di notevole ausilio nel valutare e individuare:

- il bacino di alimentazione delle acque sotterranee;
- i percorsi di circolazione idrica sotterranea;
- le aree di drenaggio preferenziali;
- i fenomeni di mescolamento di acque di diversa provenienza.

Le caratteristiche fisico-chimiche delle acque sotterranee dipendono principalmente dai seguenti fattori:

- composizione della roccia-serbatoio;
- fenomeni fisico-chimici legati all'interazione acqua-roccia;
- condizioni idrodinamiche esistenti all'interno dell'acquifero;
- tempi di residenza nel sottosuolo;
- mescolamento tra acque con caratteristiche chimiche differenti.

L'acqua è in grado di disciogliere un ampio spettro di sostanze solide, più di qualsiasi altro liquido. La lenta percolazione dell'acqua attraverso il sottosuolo ha, come risultato, il contatto prolungato della stessa con i minerali del terreno e delle rocce. Molti di questi minerali vengono disciolti lentamente e, col passare del tempo, si raggiunge un "quasi-equilibrio" chimico tra l'acqua sotterranea e i minerali costituenti il terreno o le rocce.

Fino a quando dell'acqua "sottosatura" resta a contatto con la superficie del minerale, il processo di dissoluzione procederà. Questo processo generalmente avviene quando il movimento dell'acqua è lento e i minerali sono relativamente solubili.

L'acqua è, quindi, saturata dai sali disciolti derivati da questi minerali. Tale capacità dell'acqua di dissolvere i minerali, in aggiunta alla solubilità di questi ultimi, determina la natura chimica dell'acqua sotterranea.

La caratteristica dell'acqua di essere un buon solvente, e quindi la sua capacità di disciogliere i minerali del terreno che attraversa, è legata, in primo luogo, alla sua struttura chimica.

Tutti gli atomi e le molecole in natura sono carichi positivamente o negativamente, prima di combinarsi a formare minerali o composti. Gli atomi e le molecole carichi sono chiamati ioni: gli ioni carichi positivamente sono chiamati cationi mentre quelli carichi negativamente anioni.

Nell'acqua ( $H_2O$ ), i tre atomi che ne costituiscono la molecola sono disposti a formare un angolo di circa  $105^\circ$ . I due ioni di idrogeno hanno una carica positiva ciascuno, e lo ione ossigeno ha una doppia carica negativa. La molecola risulta, quindi, formata da due poli: un polo formato dall'ossigeno (negativo) ed un polo formato dai due atomi di idrogeno (positivo) e si comporta, quindi, come un dipolo.

Quando un minerale, formato da ioni positivi e negativi legati insieme, viene messo in acqua, questo si scioglie perché gli ioni positivi vengono attratti dal polo negativo dell'acqua (ossigeno) e gli ioni negativi dal polo positivo (idrogeno): l'acqua si frappone così fra le parti del sale, sciogliendolo.

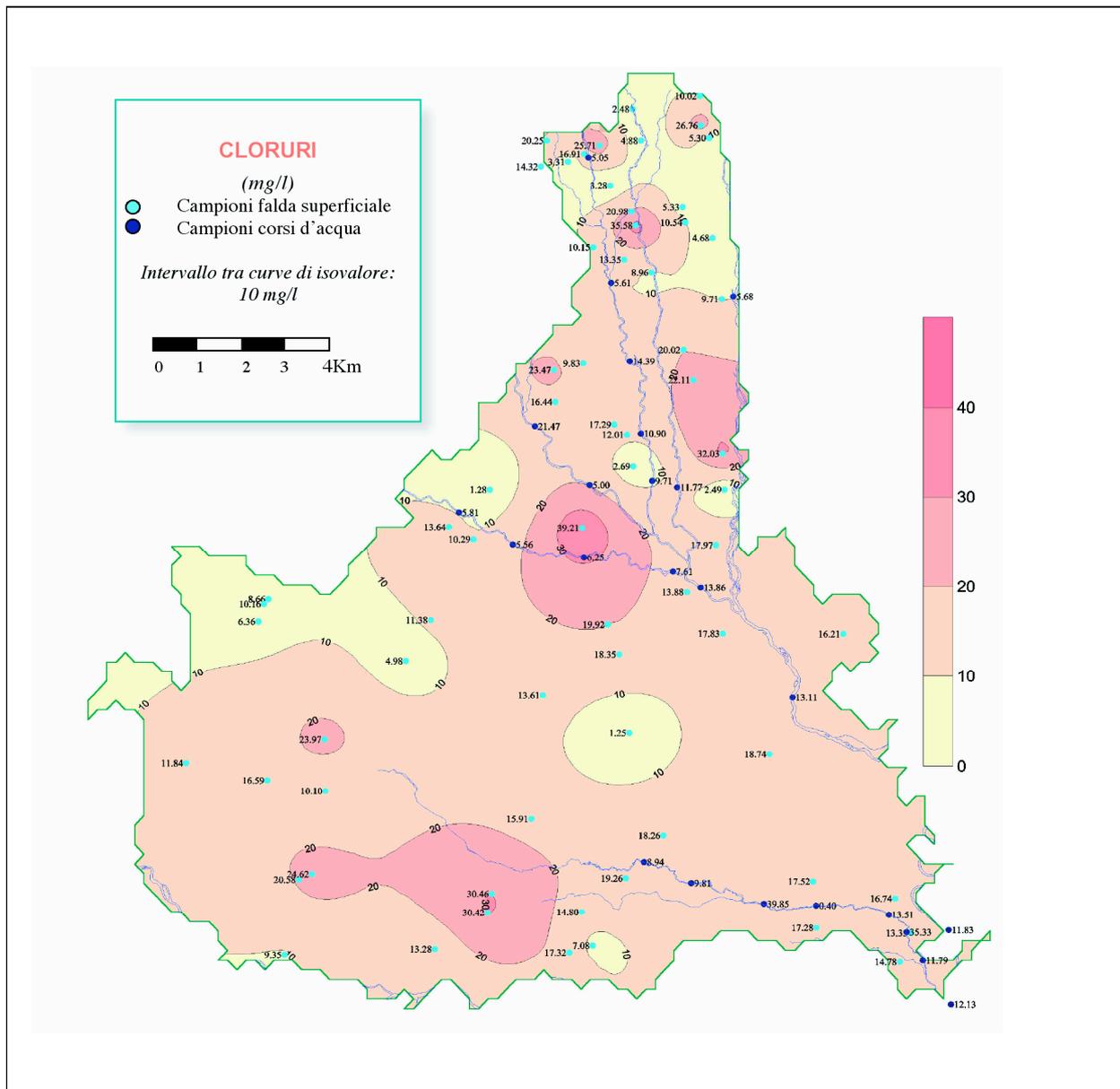
Il tipo e la concentrazione dei minerali disciolti possono influenzare, poi, l'utilizzo dell'acqua sotterranea.

Gran parte delle acque sotterranee non contiene particelle in sospensione e, praticamente, non contiene né batteri né sostanze organiche. Di solito appare chiara e senza odore. Queste caratteristiche contrastano con quelle delle acque superficiali, che generalmente contengono materiali in sospensione e considerevoli quantità di batteri. Per questi motivi l'acqua sotterranea è, in generale, più igienica, sebbene contenga più sali disciolti rispetto all'acqua superficiale. Alcuni di questi minerali disciolti sono essenziali per la salute; altri, se troppo abbondanti, possono provocare problemi sanitari, o di gusto e odore.

Per evidenziare le caratteristiche idrochimiche delle acque sotterranee a scala regionale, possono essere eseguite delle rappresentazioni cartografiche dei principali parametri chimici e chimico-fisici, costruendo delle curve di isovalore o isoconcentrazione (isocone) dei singoli parametri (temperatura, salinità, conducibilità elettrolitica o resistività, durezza, tenore dei singoli cationi o anioni, valore dei rapporti caratteristici, ecc.).

Le curve vengono costruite ubicando sulla carta i punti di prelievo, assegnando ad ognuno di essi il valore del singolo parametro misurato ed interpolando i dati. Si giunge così alla

costruzione di carte idrogeochimiche (Figura 17) che prendono il nome del parametro rappresentato: carta delle temperature, carta delle resistività, carta dei cloruri, ecc.



**Figura 17 – Esempio di una carta idrogeochimica della pianura vercellese (carta della distribuzione dei cloruri nelle acque sotterranee).**

## 1.5 - IL LIVELLO PIEZOMETRICO NEI MEZZI POROSI

L'altezza a cui risale il livello di falda in un pozzo di osservazione è detto **livello piezometrico**.

L'acqua risale fino ad equilibrarsi con la pressione atmosferica esterna.

L'insieme dei livelli piezometrici, misurati in differenti punti ad una data stabilita, permette di determinare la superficie piezometrica. Come le quote di livello del suolo permettono di tracciare la superficie topografica, la superficie piezometrica può essere rappresentata su carte con curve di uguale livello piezometrico o **linee isopiezometriche** (o isopiezometriche) dette **carte piezometriche**.

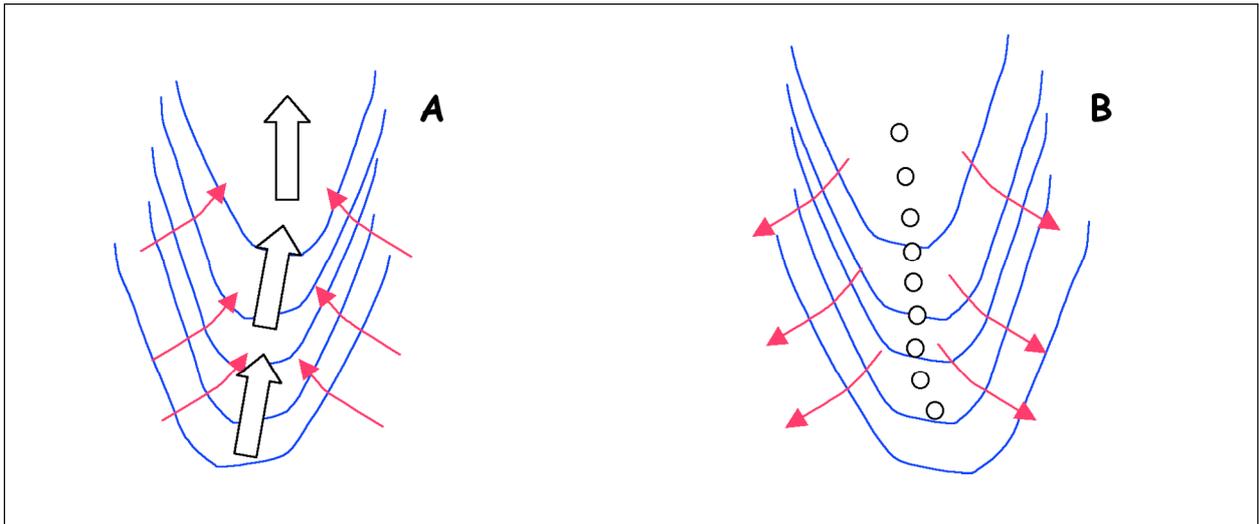
La più semplice configurazione idrogeologica è quella di una zona non satura in superficie e di una zona satura in profondità; in tal caso infatti si ha una falda libera la cui superficie piezometrica è nota anche come **superficie di falda libera, superficie freatica o tavola d'acqua** (in inglese *water table*). Mentre la tavola d'acqua è una superficie reale, nel caso degli acquiferi a falda confinata la superficie piezometrica è invece una superficie virtuale. L'acqua di falda presente negli acquiferi non è ferma bensì in movimento. Tale movimento nei mezzi permeabili per porosità (ad esempio ghiaie e sabbie) è relativamente lento e varia da qualche centimetro a qualche metro al giorno.

L'acqua tende a muoversi dalle zone a maggiore livello piezometrico alle zone a minore livello piezometrico, così come una pallina che si muove su una superficie topografica tende a muoversi dalle zone più alte verso le zone più basse.

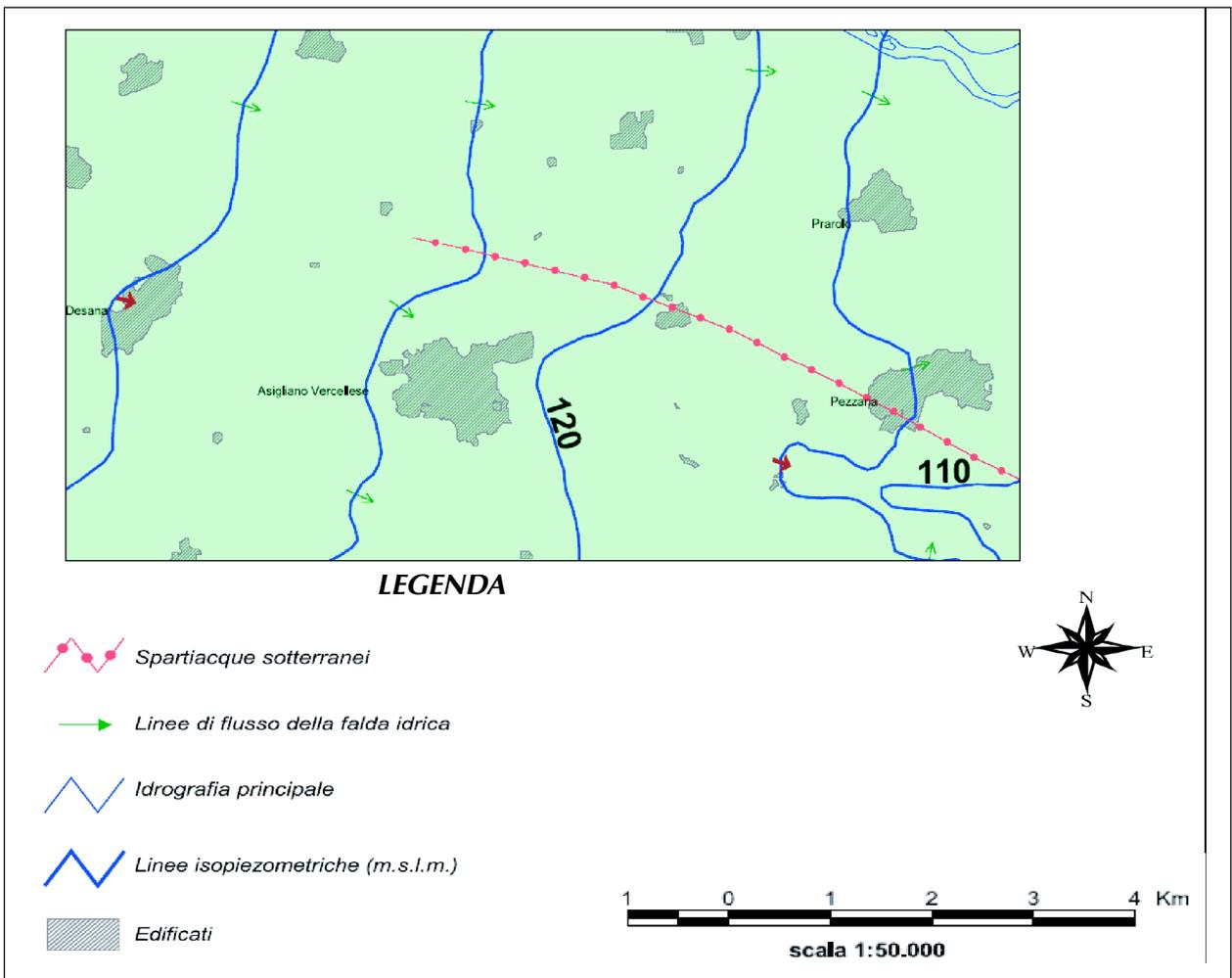
Per facilitare l'interpretazione di una carta piezometrica è utile arricchirla con una serie di elementi quali linee di flusso, assi drenanti e spartiacque piezometrici.

Le linee di flusso materializzano la direzione media (in superficie) del deflusso e corrispondono alle linee di massima pendenza, cioè alla perpendicolare ad ogni linea isopiezometrica. Gli assi drenanti (Figura 18) sono rappresentati dagli assi delle depressioni della superficie piezometrica; essi sono determinati da particolari condizioni che facilitano la convergenza delle acque verso questi settori, in genere caratterizzati da maggiore trasmissività o da drenaggio causato da corsi d'acqua. Gli spartiacque piezometrici sono individuati, infine, dal divergere delle linee piezometriche.

Lo stralcio di una carta piezometrica è riportato in Figura 19.



**Figura 18 – Schema di un asse drenante (A) e di uno spartiacque sotterraneo (B).**



**Figura 19 – Stralcio di una carta piezometrica di un settore della pianura vercellese.**

### 1.5.1 Costruzione di una carta piezometrica

Le carte piezometriche si ottengono con un procedimento distinto in due fasi:

- **misura del livello piezometrico in pozzi e piezometri:** il livello piezometrico è ricavato sottraendo la **soggiacenza** (profondità del livello della falda dal piano di campagna) dalla quota del piano di campagna;
- **interpolazione dei dati piezometrici e ricostruzione** delle linee isopiezometriche e delle linee di flusso.

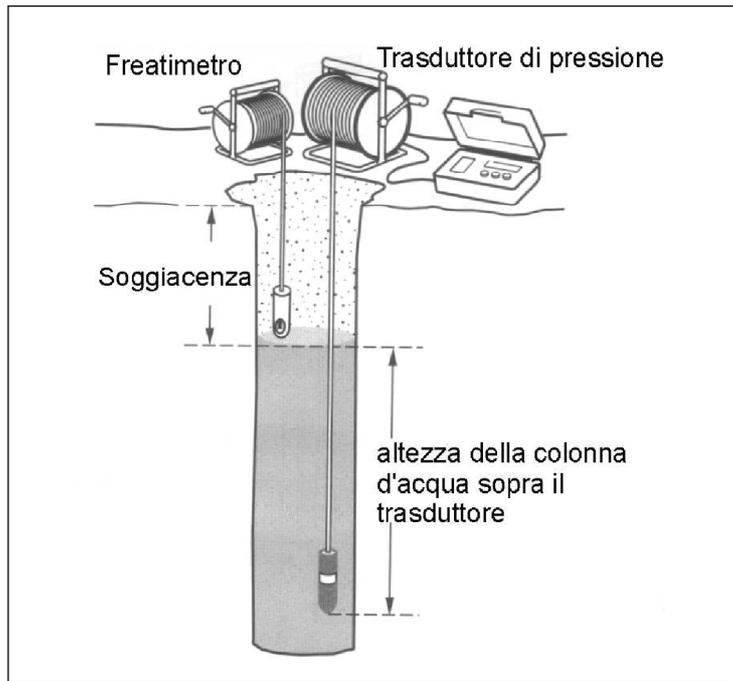
È necessario tenere presente, come principio fondamentale, che la carta piezometrica deve rappresentare solamente una falda o un gruppo di falde, omogenee o con caratteristiche piezometriche identiche.

Nel corso del rilevamento, quindi, ha molta importanza l'individuazione della profondità dei pozzi e della posizione dei filtri che consentono l'ingresso delle acque sotterranee nella captazione; occorre, infatti, sapere quali sono le falde che concorrono a determinare il livello piezometrico registrato.

La valutazione del livello piezometrico in un pozzo o in un piezometro viene fatta sottraendo la **soggiacenza** (profondità della superficie piezometrica rispetto al piano campagna) all'altezza del piano campagna, misurata in metri sul livello del mare (o del punto a cui si riferisce la misura di soggiacenza).

Il metodo più semplice per misurare i livelli piezometrici impiega il **sondino elettrico** o **freatimetro** (Figura 20), con cui si possono fare misure con precisione di 5 mm.

Un'altra possibilità è quella di utilizzare una strumentazione dotata di **trasduttore di pressione** e in grado di registrare nel tempo l'altezza della colonna d'acqua al di sopra di un sensore di pressione.



**Figura 20 – Strumenti di misura del livello piezometrico.**

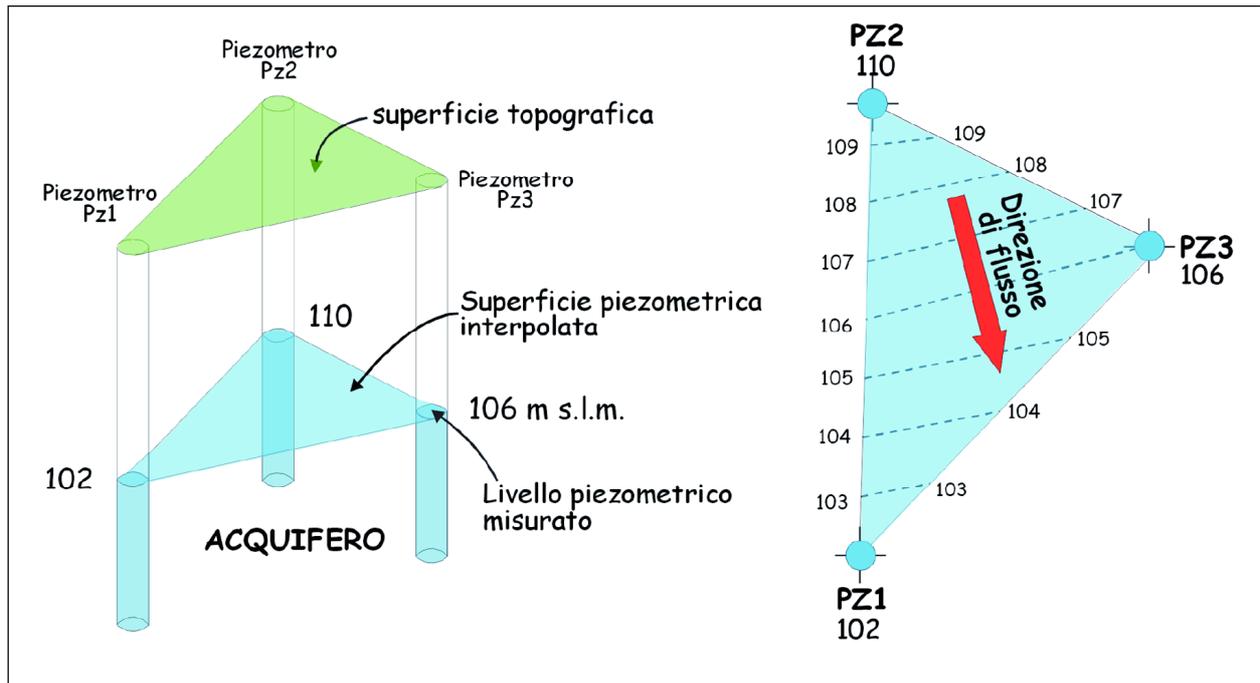
Il tracciamento delle linee isopiezometriche dipende dalla precisione e dalla densità dei dati disponibili.

Il **metodo della triangolazione** è una delle tecniche più semplici per eseguire tale operazione; tale metodo prevede una interpolazione lineare dei dati, che può essere applicata anche manualmente.

Gli altri metodi si basano, invece, su complessi algoritmi matematici, per cui è necessario l'utilizzo di un codice di calcolo (programma) al computer.

Per l'interpolazione dei dati mediante il metodo della triangolazione (Figura 21), si procede nel modo seguente:

- i punti di misura vengono uniti con dei segmenti a costruire un reticolo a maglia triangolare;
- i lati del triangolo vengono suddivisi in segmenti proporzionali;
- le curve isopiezometriche sono ottenute unendo, con segmenti di retta, i punti di uguale livello;
- le isopieze a segmenti vengono trasformate in modo da ottenere curve regolari.



**Figura 21 – Interpolazione dei dati di livello piezometrico mediante triangolazione.**

La superficie piezometrica è soggetta a continue variazioni di livello, per cause naturali e/o artificiali (Figura 22).

Le principali cause naturali sono legate a:

- precipitazioni atmosferiche;
- pressione atmosferica;
- maree;
- variazioni del livello dei fiumi e laghi;
- evapotraspirazione;
- terremoti.

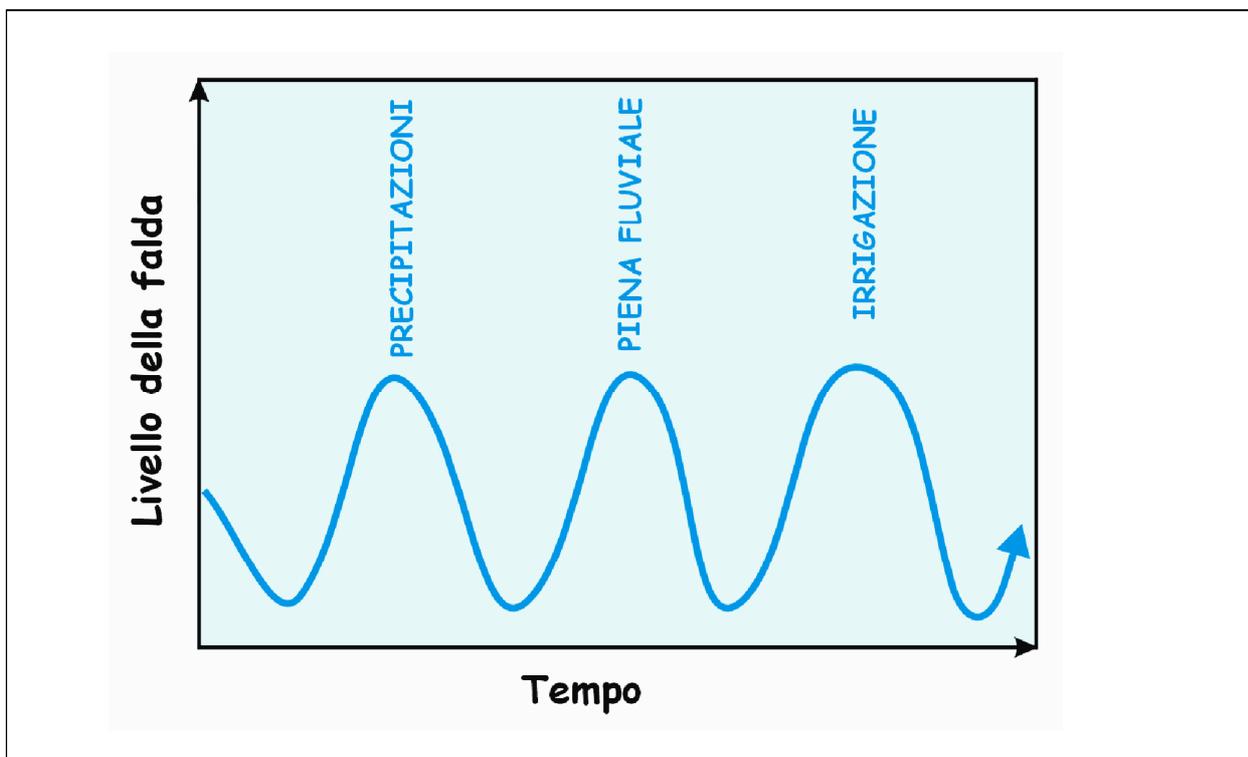
Mentre questa ultima causa ha un carattere accidentale, le altre hanno carattere ciclico.

Le principali variazioni dovute a cause artificiali sono, invece, legate a:

- utilizzazione delle falde;
- irrigazione;
- alimentazione artificiale;
- costruzione di trincee e gallerie drenanti.

Le oscillazioni di livello dipendono dall'equilibrio esistente tra drenaggio e alimentazione. Infatti, la piezometrica si mantiene stabile se i quantitativi d'acqua che affluiscono in falda

compensano quelli che defluiscono verso i punti di recapito; il suo livello si deprime se le uscite superano le entrate e si eleva nel caso opposto.



**Figura 22 – Possibili cause della variazione del livello piezometrico nel tempo.**

### **1.5.2 - Definizione di falde superficiali e falde profonde**

La Legge della Regione Piemonte 7 aprile 2003, n. 6, Disposizioni in materia di autorizzazione agli scarichi delle acque reflue domestiche e modifiche alla legge regionale 30 aprile 1996, n. 22 (Ricerca, uso e tutela delle acque sotterranee), così definisce, all'articolo 5, la falda freatica e la falda profonda:

*“Per falda freatica, superficiale o libera, si intende la falda più vicina alla superficie del suolo alimentata direttamente dalle acque di infiltrazione superficiali ed in diretta connessione con il reticolo idrografico.*

*Per falde profonde si intendono quelle poste al di sotto della falda freatica ove presente e cioè le falde confinate, le falde semiconfinate e le falde ospitate nelle porzioni inferiori dell'acquifero indifferenziato, caratterizzate da una bassa velocità di deflusso, da elevati tempi*

di ricambio e da una differente qualità idrochimica rispetto a quelle ospitate nelle porzioni più superficiali del medesimo.

Per la tutela e la protezione della qualità delle acque sotterranee è vietata la costruzione di opere che consentano la comunicazione tra le falde profonde e la falda freatica."

Inoltre, all'articolo 6 si precisa che:

"Le acque sotterranee da falde profonde sono riservate ad uso potabile, ad eccezione di quelle individuate dal Piano di tutela delle acque di cui all'articolo 44 del decreto legislativo 11 maggio 1999, n. 152 (Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole), in quanto, in base alla vigente normativa, non destinabili a tale uso per le loro caratteristiche chimiche naturali."

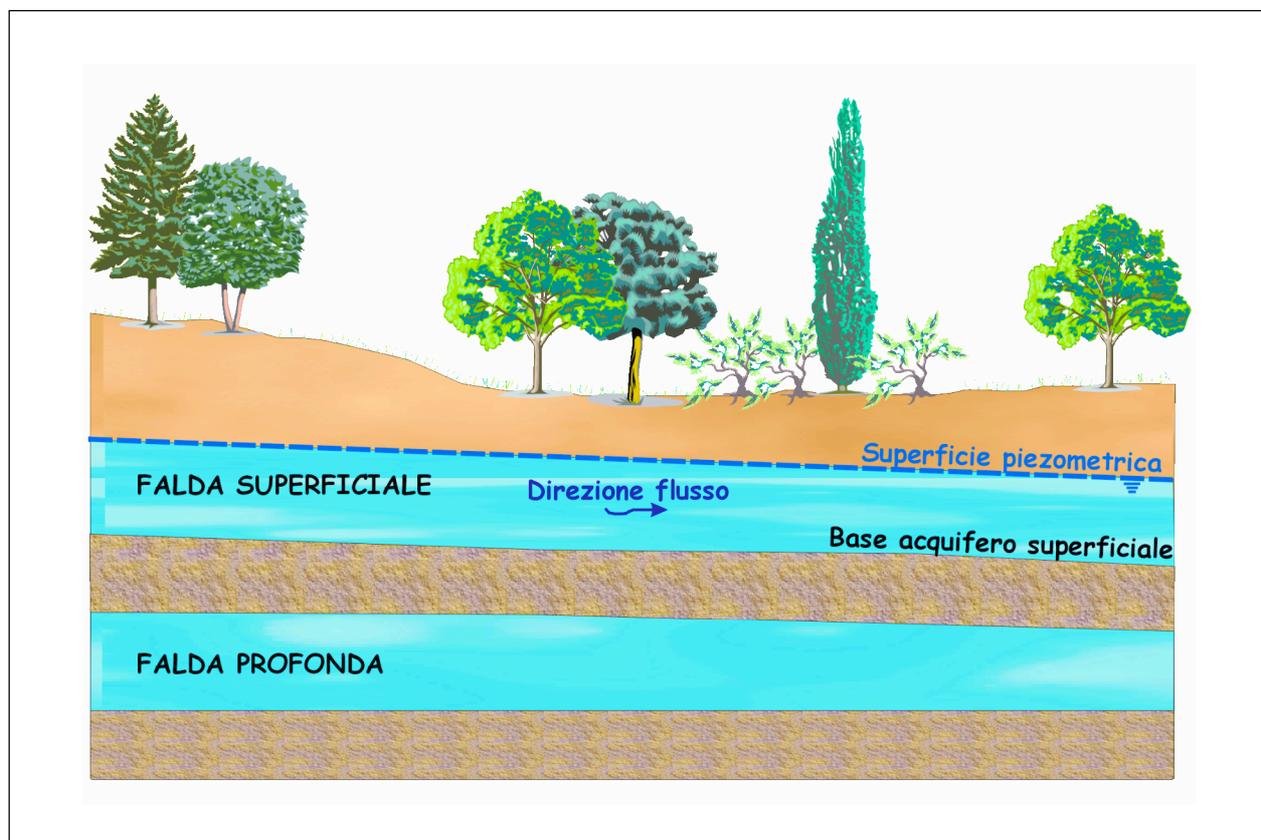
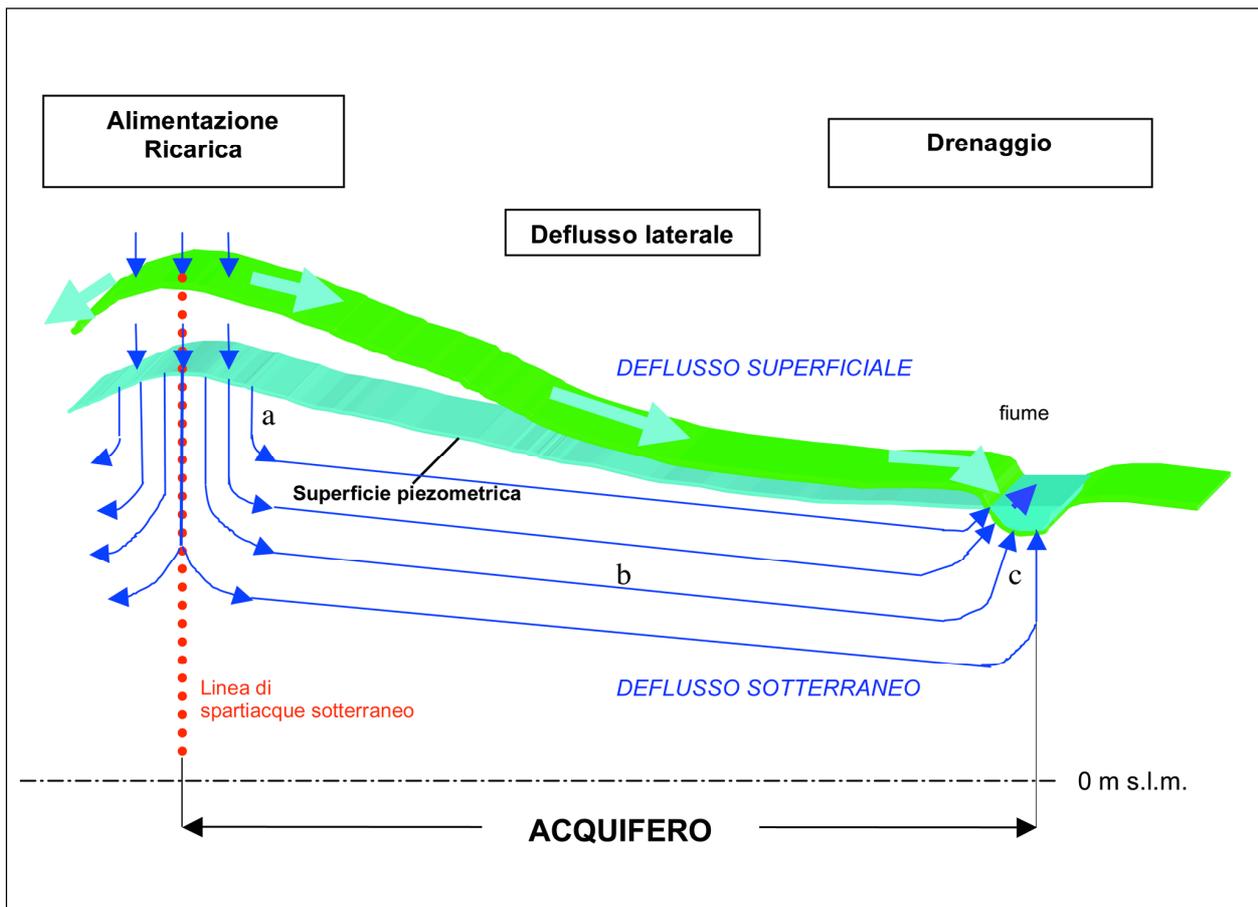


Figura 23 – Rappresentazione schematica della falda superficiale e della falda profonda.

### 1.5.3 - Componenti di un sistema di flusso

Il deflusso idrico sotterraneo avviene da **zone** dette **di ricarica** o **alimentazione** verso le zone dette **di drenaggio** attraverso una zona **di deflusso laterale**; l'unità, così definita, costituisce un **sistema di flusso** e può corrispondere ad uno o più acquiferi (Figura 24).

Il motore del deflusso è la differenza di livello piezometrico che genera gradienti idraulici.



**Figura 24 – Schema semplificato del deflusso dell'acqua sotterranea in un acquifero di subsuperficie: sistema di flusso laterale delle zone di alimentazione o ricarica, verso le zone di drenaggio, con i suoi tre rami, discendente (a), laterale (b) e ascendente (c).**

Le zone di ricarica o aree di alimentazione coincidono con le aree in cui le acque sotterranee sono alimentate per infiltrazione delle precipitazioni efficaci o per perdite dei corsi d'acqua. In tale zone il flusso ha una forte componente verticale verso il basso (**flusso discendente**).

Nelle zone di deflusso laterale prevale la componente laterale del flusso; esse rappresentano il raccordo tra le zone di ricarica e quelle di drenaggio.

Le zone di drenaggio si localizzano nelle vallate generalmente occupate dai corsi d'acqua o dalle superfici di acqua libera (laghi, mari, oceani). In tale zone il flusso ha una forte componente verticale verso l'alto (**flusso ascendente**).

La tipologia di flusso (discendente, laterale e ascendente) è identificabile con l'analisi della superficie piezometrica. Questa permette di riconoscere le zone di alimentazione e di drenaggio e i grandi assi di deflusso.

#### **1.5.4 - Schema idrogeologico generale per l'individuazione delle aree di ricarica**

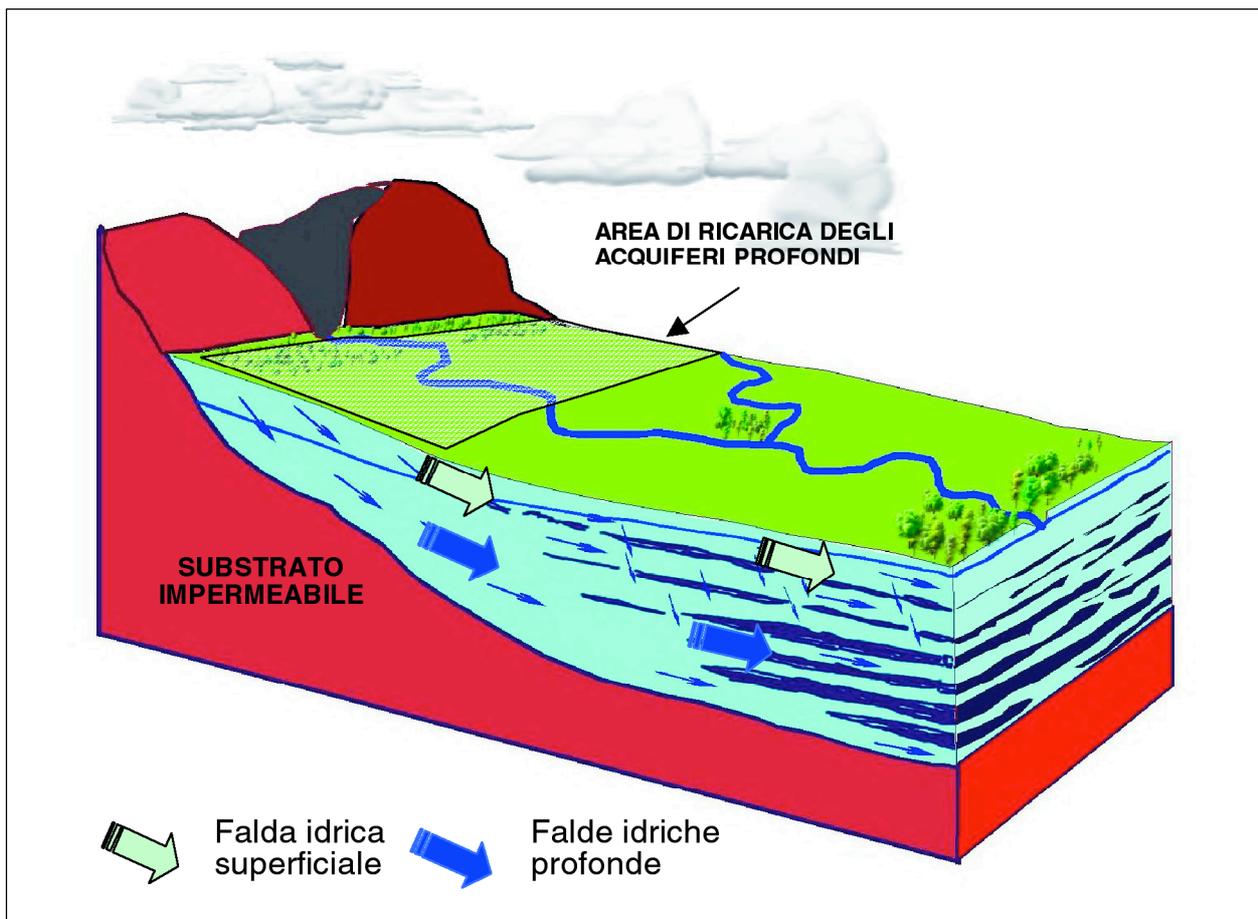
Le risorse idriche sotterranee costituiscono una risorsa rinnovabile perché ricaricate per infiltrazione dalla superficie.

L'acquifero superficiale, che ospita in genere la falda libera, è caratterizzato da un'ampia area di ricarica corrispondente, nella pratica, a quasi tutta l'area di pianura (Figura 25).

Gli acquiferi profondi, spesso in pressione, sono comunemente ricaricati in una fascia stretta e ben delimitata ai margini delle pianure.

In prima approssimazione è possibile affermare che i principali livelli impermeabili con significato regionale in grado di separare un acquifero superficiale dagli acquiferi profondi sono quelli che individuano in superficie le aree di ricarica diretta.

Nella realtà l'assetto idrogeologico delle pianure è riferibile ad un modello multistrato formato da una successione complessa di corpi acquiferi ed orizzonti impermeabili con continuità laterale variabile.



**Figura 25 – Schematizzazione concettuale dell'ubicazione delle aree di ricarica dell'acquifero superficiale e degli acquiferi profondi.**

La fascia di ricarica delle falde acquifere profonde, in dettaglio, corrisponde in genere alle **zone di alta pianura** comprese tra i rilievi delimitanti l'area montana e la zona di media e bassa pianura; tali zone sono formate dalle potenti conoidi alluvionali costituite da materiali prevalentemente grossolani depositati dai corsi d'acqua all'uscita del bacino montano. La zona di alta pianura è, per tale particolare struttura morfologica, un grande serbatoio d'acqua che alimenta le falde profonde della pianura sottostante. Nella zona di alta pianura, a causa dei terreni ad elevata permeabilità, si ha il massimo contributo all'alimentazione delle falde idriche sotterranee anche da parte dei corsi d'acqua e, quindi, diventa imprescindibile la conoscenza dei complessi rapporti fiume-falda.

L'idrografia superficiale si fa essenziale: in particolare i corsi d'acqua maggiori divagano su ampi alvei ghiaiosi, disperdendo quote talora notevoli delle portate raccolte nel bacino montano, mentre la rete naturale di drenaggio delle acque meteoriche è praticamente inesistente e, comunque, non significativa; si hanno, invece, ampie reti di distribuzione di

acque irrigue che, aprendosi a ventaglio, vanno a servizio di un territorio tendenzialmente arido.

È necessario, tuttavia, rimarcare come le caratteristiche di permeabilità di questa fascia possano variare enormemente, in particolare per la locale presenza di strati superficiali del terreno con tessitura più fine.

Nella pratica l'acqua sotterranea di falda da "superficiale" diviene "profonda" quando, facendo parte di un circuito regionale o intermedio, ad un certo punto può penetrare in profondità dove trova condizioni tali (minori apporti di inquinanti a causa della minore vulnerabilità, diverse velocità di flusso, maggiore pressurizzazione, diverso ambiente biochimico e geochimico, ecc..) da condurre a una differenziazione idrochimica; le falde idriche profonde si differenziano così dalle falde idriche che rimangono invece all'interno di un circuito di flusso locale e quindi relativamente superficiale.

In ogni caso una maggiore differenziazione litologica dell'acquifero, cioè la presenza di una forte anisotropia verticale e di livelli impermeabili, favorisce la separazione del flusso idrico sotterraneo in sistemi di flusso separati.

È importante notare che la presenza di differenti sistemi di flusso può avvenire anche in assenza di una sostanziale differenziazione litologica del sistema idrogeologico. Per tale motivo è possibile trovare in porzioni profonde di sistemi acquiferi litologicamente indifferenziati acque sotterranee invece molto differenti da un punto di vista idrochimico da quelle appartenenti a circuiti locali.

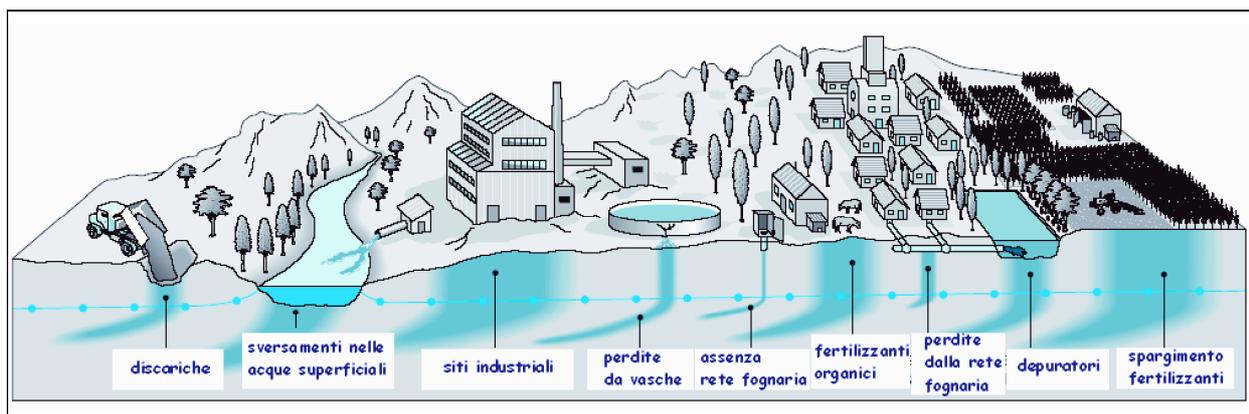
## **1.6 - IL DEGRADO DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE**

La contaminazione delle risorse idriche sotterranee può essere attribuita, in funzione delle caratteristiche proprie dell'inquinamento, a sorgenti puntiformi o a sorgenti diffuse (non puntiformi) (Figura 26).

Le sorgenti puntiformi di inquinamento presentano una geometria puntuale e sono, ad esempio, legate a scarichi industriali, perdite da condotte fognarie, impianti di depurazione delle acque, sversamenti intenzionali o accidentali sulla superficie topografica ecc. Sono facilmente identificabili, misurabili e suscettibili di controlli pratici.

Le sorgenti non puntuali (non point sources) o diffuse sono quelle attività, insediamenti ecc. che provocano una diffusione notevole dell'inquinamento, con distribuzione lineare o areale.

Tali sorgenti sono legate principalmente all'industrializzazione e alle pratiche agricole. Per la loro natura, queste sorgenti sono molto più difficili da identificare, misurare e controllare.



**Figura 26 – Possibili fonti di contaminazione delle risorse idriche sotterranee (modificato da Foster et alii, 2002).**

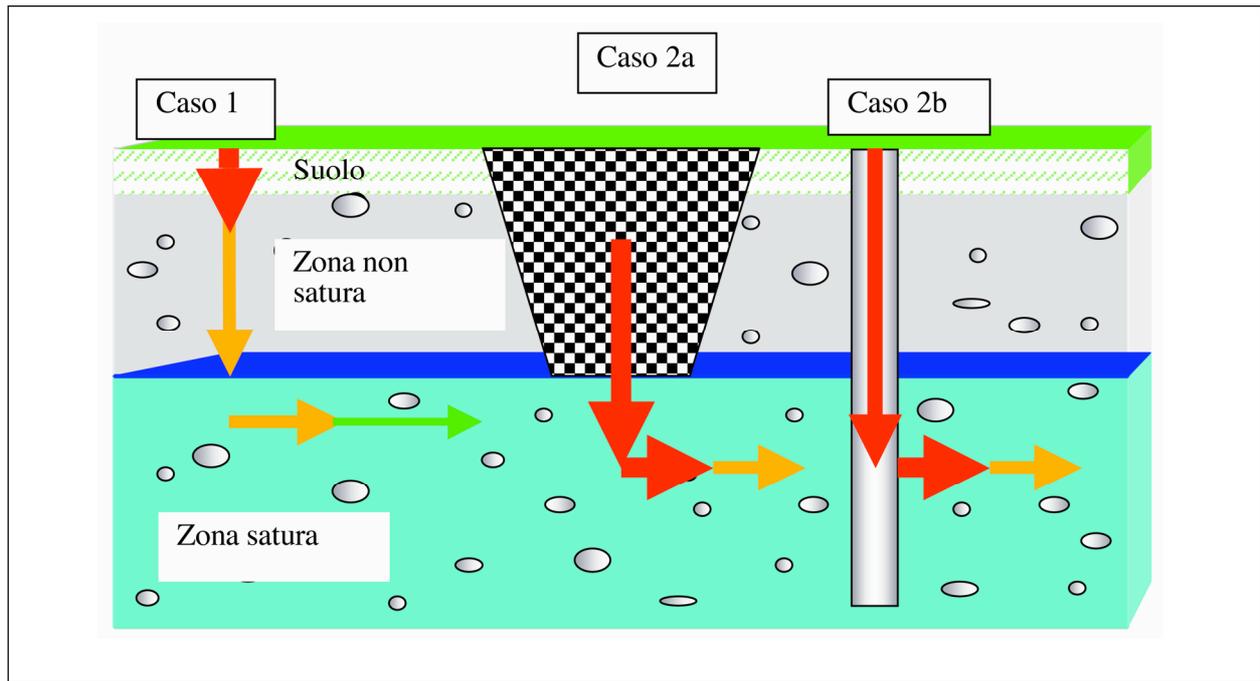
Tra i principali contaminanti che si possono rilevare nelle falde idriche vi sono i composti organici (in particolare gli idrocarburi, i solventi clorurati, i pesticidi...) e i composti inorganici (metalli pesanti, nitrati, solfati, fluoruri, cianuri...).

### **1.6.1 - Modalità di arrivo di un inquinante in falda e processi di attenuazione**

Un inquinante può penetrare nel sottosuolo e raggiungere gli acquiferi con modalità differenti, a seconda che esso venga rilasciato sulla superficie del suolo o immesso nel sottosuolo.

Si possono così distinguere i seguenti casi (Figura 27):

1. rilascio sulla superficie del suolo;
2. immissione diretta nell'acquifero tramite:
  - 2a) il fondo di uno scavo o di una discarica;
  - 2b) un pozzo perdente.

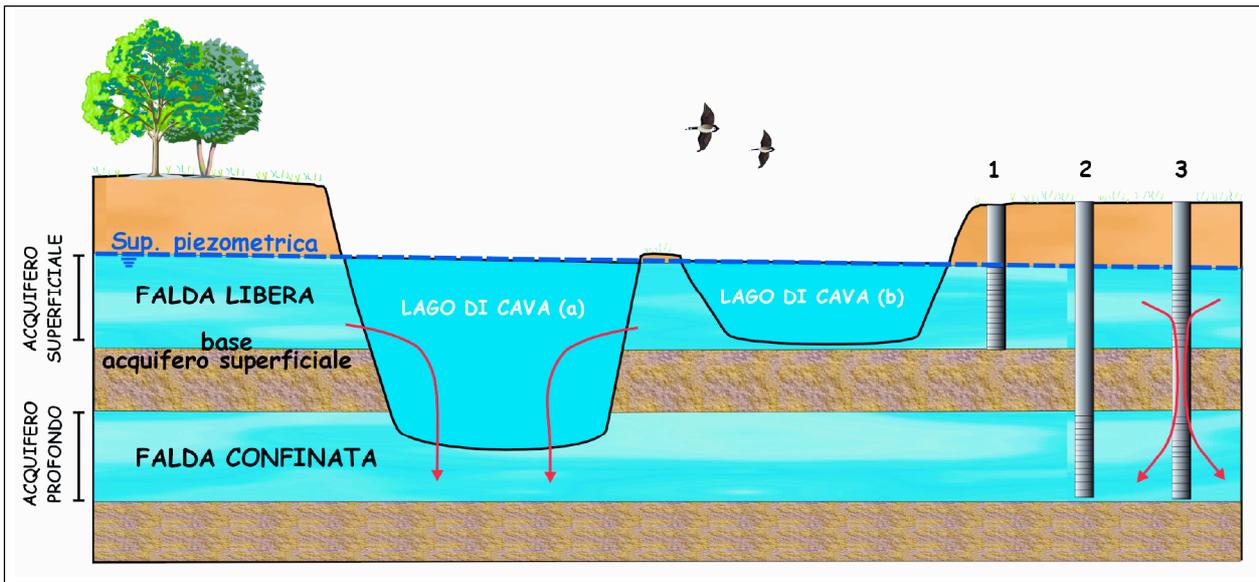


**Figura 27 - Modalità di immissione e penetrazione di un inquinante nel sottosuolo.**

Le cave sotto falda che attraversano la base dell'acquifero contenente la falda freatica, in particolare, generano una condizione di rischio per la falda confinata, aumentando il rischio di un eventuale degrado della stessa (Figura 28). Nella pratica, quindi, lo scavo della cava non dovrebbe superare la base dell'acquifero superficiale, in modo da impedire la messa in comunicazione con gli acquiferi profondi.

Le stesse considerazioni valgono nel caso di un piezometro che filtri sia la falda superficiale che la falda profonda: in questa situazione potrebbero verificarsi fenomeni di cortocircuitazione delle acque che, a partire dall'acquifero superficiale, si muovono velocemente e senza possibilità di attenuazione verso l'acquifero profondo.

Per tale motivo un'opera di captazione deve interessare un solo tipo di acquifero, superficiale o profondo, senza mai mettere in comunicazione le due falde idriche.



**Figura 28 - Al fine di preservare la qualità della falda confinata, le opere di scavo (cave sotto falda e piezometri/pozzi) non devono mettere in comunicazione la falda superficiale e quella profonda. In Figura il lago di cava (a) e il pozzo 3 presentano caratteristiche non idonee, in quanto la cava sotto falda attraversa la base dell'acquifero superficiale e il pozzo ha filtri sia nell'acquifero superficiale che profondo. Al contrario la cava (b) e i pozzi 1 e 2 sono stati rispettivamente approfonditi e completati in modo corretto.**

Nel suo movimento attraverso il suolo, la zona non satura e, infine, la zona satura l'inquinante può subire una serie di processi che possono portare a:

- diminuzione della concentrazione iniziale;
- totale o parziale trasformazione di stato fisico o di composizione chimica;
- completa eliminazione.

Tali processi vanno sotto il nome di **processi di attenuazione** (o processi di autodepurazione) e dipendono da:

- caratteristiche idrogeologiche del sistema;
- caratteristiche chimico-biologiche del sistema;
- caratteristiche del contaminante;
- quantità e modalità di immissione del contaminante.

Gran parte dei processi di attenuazione avvengono con efficacia nel suolo e nella zona non satura.

In generale, minore è il tempo di transito delle acque nella zona non satura (e quindi più lungo è il tempo di residenza), maggiore sarà il tempo disponibile per l'attivazione dei processi di attenuazione.

Nel caso in cui l'immissione dell'inquinante avvenga direttamente nella zona satura, le concentrazioni attese nelle acque sotterranee saranno, quindi, molto maggiori.

### 1.6.2 - Concetto di vulnerabilità

La vulnerabilità di un acquifero rappresenta, secondo la definizione originariamente data da Albinet e Margat (1970), *“la possibilità di penetrazione e propagazione, in condizioni naturali, negli acquiferi ospitanti la prima falda generalmente libera, di inquinanti provenienti dalla superficie del suolo”*.

Tale definizione è stata successivamente modificata ed integrata da vari Autori (Olmer e Rezac, 1974), (Villumsen *et al.*, 1983), (Civita, 1987), (Foster, 1987), (Celico, 1988).

Secondo il National Research Council degli Stati Uniti (1993), la vulnerabilità degli acquiferi rappresenta *“la tendenza o la probabilità per i contaminanti di raggiungere una specificata posizione nel sistema idrico sotterraneo dopo la loro introduzione in una qualche posizione sopra l'acquifero superficiale”*

Nella ASTM Standard Guide D6030-96 (2002), la vulnerabilità rappresenta la *“possibilità di un acquifero di essere contaminato in base alle sue caratteristiche idrogeologiche”*.

In sintesi, la vulnerabilità rappresenta **la facilità con cui un acquifero può essere raggiunto da un inquinante introdotto sulla superficie del suolo** (Figura 29).

Maggiore è la vulnerabilità di un acquifero, più facilmente esso potrà essere contaminato da un carico inquinante rilasciato dalla superficie.

Nella valutazione della vulnerabilità di un acquifero non viene, quindi, contemplato il caso in cui l'inquinante venga direttamente iniettato nel sottosuolo attraverso, ad esempio, un pozzo perdente, poiché in tal caso tutti gli acquiferi possono essere immediatamente vulnerati.

La vulnerabilità finora delineata viene definita **vulnerabilità intrinseca o naturale**, in quanto slegata dalla presenza e dalla tipologia di possibili attività antropiche esistenti sul territorio o in fase di realizzazione che possano incidere sulle condizioni naturali delle falde. La valutazione della vulnerabilità intrinseca degli acquiferi considera essenzialmente le

caratteristiche litostrutturali, idrogeologiche e idrodinamiche del sottosuolo e degli acquiferi presenti. Essa è riferita a inquinanti generici e non considera le caratteristiche chemio-dinamiche delle sostanze. Quando questi ultimi fattori vengono presi in considerazione nella valutazione della vulnerabilità, allora essa è definita **vulnerabilità specifica**.

In effetti, la capacità di autodepurazione del non saturo nei confronti della qualità e della quantità del carico inquinante dipende dal tipo di sorgente inquinante, dalle caratteristiche chimico-fisiche del contaminante, dal meccanismo di rilascio, dai quantitativi e dalla velocità di immissione del contaminante. Tali fattori devono essere presi in considerazione nel caso si voglia prevedere non solo se un determinato inquinante possa raggiungere l'acquifero, ma anche valutare la distribuzione delle concentrazioni nel tempo e nello spazio.

Le fasi in cui è possibile schematizzare il processo di contaminazione di un acquifero sono sostanzialmente due:

- veicolazione attraverso la zona non satura;
- veicolazione e dispersione nell'acquifero vero e proprio.

I metodi per il calcolo della vulnerabilità si differenziano, pertanto, sulla base della rispettiva capacità di approfondimento di tali fasi, espressa dal numero di parametri utilizzati per caratterizzarle.

La zona non satura svolge un ruolo primario come fattore di protezione naturale sia perché è localizzata al di sopra dell'acquifero, sia perché, normalmente, costituisce un ambiente favorevole allo sviluppo di processi di biodegradazione, assorbimento e scambio ionico.

Nel caso la propagazione avvenga in un mezzo non saturo, la sostanza inquinante si infiltra nel terreno muovendosi in direzione per lo più verticale e riempiendo, in una certa percentuale, i vuoti del terreno. Prima di arrivare in falda, la soluzione inquinante dovrà saturare completamente il terreno, il quale ha una diversa capacità di ritenzione in base alle proprie caratteristiche litologiche e granulometriche (bassissima per le ghiaie e molto alta per le argille).

In questa prima fase del percorso di un ipotetico inquinante, i principali fattori che condizionano la vulnerabilità di un acquifero sono:

- natura del suolo della zona non satura;
- soggiacenza della superficie piezometrica (corrispondente alla potenza della zona non satura);
- entità dell'infiltrazione efficace, che aumenta la possibilità di veicolazione fino alle falde di eventuali inquinanti immessi sulla superficie del suolo.

Questi fattori influenzano il tempo di percolazione di un eventuale inquinante fino alla superficie della falda ed il grado di attenuazione del contaminante operato dai terreni lungo tale tragitto.

Nella zona satura, invece, il movimento delle sostanze inquinanti dipende dalla velocità della falda, dai suoi tempi di rinnovamento e dalla capacità di diluizione ed, inoltre, da fenomeni di reazione che si instaurano con il materiale costituente l'acquifero.

I principali fattori da prendere in considerazione in questo caso sono:

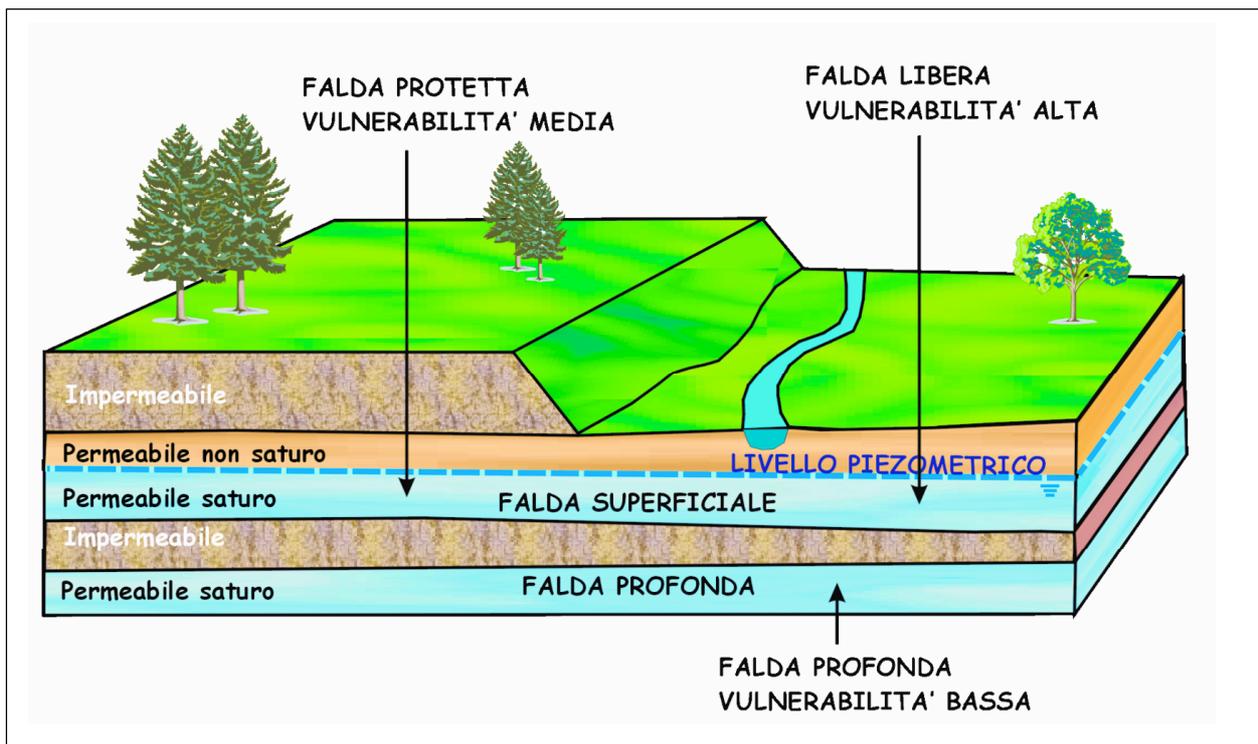
- tipologia idraulica dell'acquifero, cioè il suo grado di confinamento;
- tipo e grado di permeabilità dell'acquifero;
- spessore dell'acquifero;
- idrodinamica delle acque sotterranee.

Tali fattori condizionano la velocità di propagazione e l'estensione, sia verticale che orizzontale, dell'inquinante una volta raggiunto l'acquifero.

In linea di principio, i metodi disponibili per la stima della vulnerabilità tendono ad identificare i meccanismi fondamentali attraverso cui può avvenire il passaggio delle sostanze indesiderate in falda e a caratterizzarli attraverso i parametri più significativi.

Da un punto di vista generale, si può ritenere che:

- la veicolazione attraverso la zona non satura può essere caratterizzata dalla soggiacenza e dalla conducibilità idraulica del mezzo non saturo;
- la veicolazione nell'acquifero vero e proprio dipende dalla tipologia idraulica dell'acquifero, dalla conducibilità idraulica e dal gradiente idraulico.



**Figura 29 - Schema di alcune possibili situazioni di vulnerabilità degli acquiferi in funzione del tipo di falda presente (falda libera, falda protetta, falda profonda).**

## 1.7 - CONCLUSIONI

Le acque sotterranee costituiscono circa il 95% delle acque dolci del nostro pianeta, escluse quelle intrappolate nelle calotte polari.

Circa due miliardi di persone dipendono direttamente dalle acque sotterranee a fini potabili.

Tuttavia il riconoscimento del ruolo centrale delle acque sotterranee è relativamente recente.

In effetti, l'acqua immagazzinata negli acquiferi non è direttamente osservabile e una eventuale contaminazione della stessa non è evidente, come nel caso di un inquinamento di un fiume o di un lago.

È necessario, quindi, conoscere i concetti fondamentali dell'idrogeologia, per poter comprendere e capire il complesso mondo delle acque sotterranee; di particolare rilievo sono i concetti di falda idrica, acquifero e le diverse componenti dei sistemi di flusso, la conoscenza del chimismo delle acque sotterranee e delle metodologie per la misura e cartografia dei livelli piezometrici.

Infine non si possono trascurare argomenti come i fattori di degrado delle acque sotterranee e le modalità di immissione e penetrazione di un inquinante nel sottosuolo. Solamente la conoscenza delle acque sotterranee, con i suoi numerosi risvolti, può permettere di tutelare e proteggere questa risorsa che, una volta perduta, difficilmente può essere recuperata.

## 1.8 - BIBLIOGRAFIA

- Albinet M., Margat J. (1970). *Cartographie de la vulnérabilité à la pollution des nappes d'eau souterraine*. Bulletin BRGM 2nd Series 3(4): pp. 13–22. Orleans, France.
- ASTM Standard Guide D6030-96 (2002). *Standard Guide for Selection of Methods for Assessing Ground Water or Aquifer Sensitivity and Vulnerability*. ASTM Book of Standards (Print and CD-ROM), Volume 04.09, April 2004, Soil and Rock (II): D5780 - latest; Geosynthetics.
- BURP, Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte, 8 maggio 1996, n. 19. *Decreto del Presidente della Giunta Regionale 30 aprile 1996 n. 22. Ricerca, uso e tutela delle acque sotterranee*.
- Castany G. (1982). *Idrogeologia – principi e metodi*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, 243 pp.
- Celico P. (1988). *Prospezioni idrogeologiche*. Liguori Editore, Napoli, 2 vol.
- Civita M. (1987). *La previsione e la prevenzione del rischio d'inquinamento delle acque sotterranee a livello regionale mediante le Carte di Vulnerabilità*. Atti Conv. "Inquinamento delle Acque Sotterranee: Previsione e Prevenzione", Mantova, pp. 9-18.
- De Luca D.A., Verga G. (1991). *Una metodologia per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi*. Acque Sotterranee, marzo 1991, Fascicolo 29, pp. 30-33.
- Fetter C.W. (2001). *Applied Hydrogeology*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 598 pp.
- Foster S.S.D. (1987). *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. Proc. Int. Conf. vulnerability of soil and groundwater to pollutants, Noordwijk, The Netherlands, pp. 69-86.
- Foster S., Hirata R., Gomes D., D'Elia M. and Paris, M (2002). *Groundwater Quality Protection: a Guide for Water Utilities, Municipal Authorities and Environment Agencies*. World Bank Publication: Washington D.C., USA, 103 pp.

- Morris B. L., Lawrence A. R. L., Chilton P. J. C., Adams B., Calow R. C., Klinck B. A. (2003). *Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management*. Early warning and assessment report series, RS. 03-3. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- National Research Council (1993). *Groundwater Vulnerability Assessment: Predicting Relative Contamination Potential under Conditions of Uncertainty*. National Academy Press, Washington, DC., USA, pp. 204.
- Olmer M., Rezac B. (1974). *Methodical principles of maps for protection of groundwater in Bohemia and Moravia scale 1/200.000*. Mem. I.A.H., 10, 1, pp. 105-107.
- Repubblica Italiana (1999). *Disposizioni sulla tutela delle acque dall'inquinamento e recepimento della direttiva 91/271/CEE concernente il trattamento delle acque reflue urbane e della direttiva 91/676/CEE relativa alla protezione delle acque dall'inquinamento provocato dai nitrati provenienti da fonti agricole*. D.Lgs. 11 maggio 1999, n. 152, G.U. 29 maggio 1999, n. 124, Roma.
- Villumsen A., Jacobsen O.S., Sønderskov C. (1983). *Mapping vulnerability of groundwater reservoir with regard to surface pollution*. Danm. Geol. Unders. Arbog 1982. pp. 17-38, 2 Tavole.
- Zampetti M. (1983). *Informazioni e dati relativi alla quantità e alla qualità delle acque sotterranee nella Comunità Europea*. Inquinamento delle acque sotterranee da composti organo-clorurati di origine industriali.