

ORDINE DEI GEOLOGI DELLA TOSCANA



LINEE GUIDA PER L'ELABORAZIONE
DEL MODELLO IDROGEOLOGICO CONCETTUALE

2015

indice

PREFAZIONE.....	2
-----------------	---

INTRODUZIONE.....	3
-------------------	---

1. LA NORMATIVA	4
-----------------------	---

1.1. Attività estrattiva.....	4
1.2. Pozzi.....	5
1.3. Infrastrutture a rete (strade, ferrovie, gallerie).....	6
1.4. Bonifiche ambientali.....	6
1.5. Discariche.....	7
1.6. Altre opere	7

2. LA TECNICA.....	7
--------------------	---

2.1. Analisi dell'assetto idrostrutturale.....	11
2.2. Porosità e porosità efficace.....	13
2.3. L'idrogeofisica.....	14
2.4. Analisi idrologica.....	16
2.5. Precipitazioni.....	17
2.6. Temperatura ed evapotraspirazione.....	19
2.7. Portate dei corsi d'acqua e ruscellamento superficiale.....	20
2.8. Livelli piezometrici.....	21
2.9. Portate delle sorgenti.....	22

3. GLI ASPETTI IDRAULICI ED IDRODINAMICI.....	23
---	----

3.1. Caratteristiche e tipologie di acquiferi.....	23
3.2. Comportamenti dell'acquifero.....	24
3.3. Movimento dell'acqua nei mezzi porosi - statica dei fluidi nei mezzi porosi saturi.....	24
3.4. Movimenti dell'acqua nel sottosuolo - dinamica dei fluidi.....	25
3.5. Trasmissività, coefficiente di immagazzinamento e diffusività.....	28
3.6. Superfici piezometriche.....	29
3.7. Interpretazione qualitativa della superficie piezometrica.....	30
3.8. Analisi quantitativa della superficie piezometrica.....	31
3.9. Idraulica dell'acquifero e prove di pompaggio.....	31

4. L'IDROGEOCHIMICA.....	33
--------------------------	----

4.1. Generalità su chimismo e proprietà chimico-fisiche delle acque.....	34
4.2. Generalità sugli isotopi della molecola dell'acqua.....	35
4.3. Elaborazioni e interpretazione del dato idrogeochimico.....	37

5. MODELLO CONCETTUALE.....	40
-----------------------------	----

6. MODELLO NUMERICO.....	43
--------------------------	----

4. BIBLIOGRAFIA	44
-----------------------	----

APPENDICE - GLOSSARIO.....	I
----------------------------	---

Presidente

dott. geol. Maria-Teresa Fagioli

Vicepresidente

dott. geol. Francesco Ceccarelli

Tesoriere

dott. geol. Maria Chiara Piccardi

Segretario

dott. geol. Simone Sartini

Consigliere

dott. geol. Silvano Becattelli

Consigliere

dott. geol. Marcello Brugioni

Consigliere

dott. geol. Giovanna Cascone

Consigliere

dott. geol. Mauro Chessa

Consigliere

dott. geol. Fabio Martellini

Consigliere

dott. geol. Nicoletta Mirco

Consigliere

dott. geol. Lando Pacini

COMMISSIONE IDROGEOLOGIA

Coordinamento

Maria Teresa Fagioli (OGT)

Componenti

Fausto Capacci (AR)

Francesco Consumi (FI)

Marco Doveri (PI)

Riccardo Fanti (FI)

Manuela Germani (FI)

Roberto Giannecchini (LU)

Florindo Granucci (LU)

Filippo Landini (FI)

Jenny Migliorini (SI)

Stefano Menichetti (FI)

Alberto Pedone (AR)

Prefazione

L'aggettivo "idrogeologico" è mediaticamente assurto, negli ultimi decenni, ad inattesa fama pressoché sistematicamente riferito al sostantivo "dissesto".

Sorvolando sul fatto che l'accoppiamento è spesso, se non sempre, forzato poiché il dissesto cui si riferiscono i media è in stragrande maggioranza ingegneristico, urbanistico, agronomico, impiantistico, idraulico e geotecnico più che idrogeologico, resta il fatto che l'idrogeologia, trascinata in giudizio senza colpe, sta diventando una star.

È però una star anomala perché, a differenza delle cugine e colleghe idrologia e meteorologia, che calcano palcoscenici visibilissimi e di grandissima audience, l'idrogeologia si occupa di qualcosa che non si vede.

"Occhio non vede cuore non duole". È forse proprio per questa sua invisibilità, che la ricerca ufficiale e quella volontaristico-artigianale in materia sono sempre state le cenerentole del finanziamento pubblico.

D'altra parte, in territori come l'Italia, ricchi d'acqua e con una cultura dell'acqua plurimillenaria, la scienza idrogeologica è sempre stata componente fondamentale di politiche e vicissitudini umane, almeno fin tanto che l'illusoria onnipotenza della disponibilità energetica degli ultimi due secoli non ha cercato di occultarla, se non cancellarla, forse in quanto pericolosa rivelatrice delle sue malefatte inconsapevoli o intenzionali che fossero.

In questo contesto "storico" di subdolo ostracismo e risurrezione mediatica della scienza idrogeologica, quando il nome stesso della materia scompare dai programmi accademici ministeriali, chi come noi geologi si occupa di sfuggita o a tempo pieno di idrogeologia (e più o meno, volenti o nolenti, finiamo per occuparcene tutti) ha il diritto/dovere di parlare con cognizione di causa e di disporre di tutti quegli approcci metodologici che non sempre il curriculum universitario e la carriera post-laurea ci hanno dato modo di acquisire. Ed è proprio nell'approccio metodologico che più spesso si manifesta la carenza delle indagini con la conseguente inconsistenza delle relazioni idrogeologiche; che si riferiscano a grandi opere o al pozzo per un giardinetto, poco conta.

È da questa constatazione che nasce il presente quaderno tecnico, realizzato, a totale titolo di volontariato, da colleghi per i colleghi, affinché quelli di noi che hanno avuto occasione di acquisire più esperienza possano aiutare le nuove leve. Non dimentichiamo che l'idrogeologia è prima di tutto geologia e quindi di competenza integrale dei geologi con buona pace delle altre categorie che, senza alcuna preparazione specifica al riguardo, e forti spesso solo di una distorta e capziosa traduzione del termine inglese "*groundwater hydrology*", stanno tentando di invadere il nostro campo.

Un sincero ringraziamento a tutti coloro che hanno contribuito all'elaborazione del quaderno ed un augurio a tutti i colleghi non solo di buon lavoro, ma che ogni loro lavoro sia buono.

Maria Teresa Fagioli

Presidente dell'Ordine dei Geologi della Toscana



*Valdicastello Carducci - drenaggi acidi di una galleria mineraria - miniera del pollon
Foto: Roberto Giannecchini*

Introduzione

Il presente quaderno tecnico affronta il tema del modello idrogeologico concettuale, ovvero di quel passaggio dalle categorie storicamente qualitative, naturalistiche della geologia classica, a quelle di un inquadramento stringente, coerente e quantificato dell'idrogeologia applicata e dei suoi corollari numerici.

Vengono di seguito descritti metodi, strumenti e concetti per una corretta elaborazione del modello concettuale, ovvero come conglobare l'informazione meteo-climatica, idrochimica, geochemica, agronomica, litologica, petrochimica ed idrologica in uno schema coerente che consenta la sintesi olistica della dinamica delle acque sotterranee e di quanto esse veicolano, in un quadro comprensibile anche ad altre categorie tecnico-professionali.

Un modello concettuale, correttamente concepito, agevola la comprensione dei fenomeni accaduti e la previsione di cosa potrà succedere anche, ma non solo, in conseguenza di azioni antropiche in atto o in programmazione.

Si è quindi affrontato anche il tema delle normative che trattano la materia in riferimento alla programmazione territoriale, alla progettazione di manufatti ed opere ed alla tutela ed al risanamento dell'ambiente.

Il modello concettuale è base imprescindibile per ogni successiva valutazione quantitativa. In assenza di un modello verificato e robusto, non solo il passaggio all'implementazione di un modello numerico è velleitario, ma anche i semplici calcoli deterministico-analitici, più ampiamente diffusi ed applicati, rischiano di perdere ogni significato pratico.

Ovviamente il quaderno non ha alcuna pretesa di esaustività né di formulare codici, ma cerca semplicemente di fornire ai colleghi una traccia utile, ancorché insufficiente se non corredata dagli approfondimenti che ciascuno di noi è sempre tenuto a fare, per soddisfare in scienza e coscienza le esigenze dei committenti. Il paragrafo bibliografia e l'annesso glossario servono proprio a questo.



*S. Anna di Stazzema - drenaggi acidi di gallerie minerarie - miniera di monte arsiccio
Foto: Roberto Giannecchini*

1. LA NORMATIVA

Da un punto di vista normativo, il contesto nel quale ci muoviamo è in continua evoluzione anche per il recepimento di direttive comunitarie nell'ordinamento giuridico nazionale e regionale. Vale la pena ricordare ad esempio la direttiva CE/2000/60, che ha portato alla redazione del Piano di Gestione delle Acque distrettuale con le azioni necessarie per il raggiungimento del buono stato ambientale dei corpi idrici, superficiali e sotterranei, previsto dalla direttiva al 2015. Il Piano contiene l'individuazione dei corpi idrici, superficiali e sotterranei, la loro classificazione (in base al quadro delle pressioni e dei monitoraggi ambientali) e quindi le azioni necessarie per il raggiungimento del buono stato ambientale, previsto dalla direttiva al 2015. Il termine del 2015 potrà essere prorogato a successivi aggiornamenti del Piano (2021/2027), purché dettagliatamente motivato e giustificato, anche con considerazioni di tipo economico. Nello specifico delle acque sotterranee, con la relativa Direttiva (2006/118/CE), recepita in Italia dal D.lgs. 30/2009, l'Unione Europea ha introdotto nuovi aspetti e punti di vista nell'indagine e nella valutazione della qualità delle acque sotterranee. La Direttiva sulle acque sotterranee definisce i valori soglia per il "buono stato chimico" delle acque sotterranee nell'Articolo 3, comma 1. La riduzione dell'immissione di contaminanti nelle acque sotterranee è considerata un obiettivo a lungo termine. Importanti elementi strategici delle direttive comunitarie sono rappresentati dal principio di considerare aree ampie e i corpi idrici nel loro complesso (in aggiunta all'approccio nazionale su specifici casi individuali, che ha prevalso fino a oggi). Ciò implica che gli Stati membri dell'Unione devono definire ed esaminare interi corpi idrici sotterranei o gruppi di essi e pertanto deve essere presa in considerazione la scala da adottare. A seconda della scala scelta, infatti, sussiste il rischio di rendere marginali vaste contaminazioni delle acque sotterranee: se la scala è sufficientemente grande, l'inquinamento può non risultare rivelabile. L'Articolo 5 della Direttiva sulle acque sotterranee introduce la procedura di individuazione delle tendenze significative (*trend*). Se, dall'esame del *trend*, si rileva una crescita delle concentrazioni di inquinanti è necessario intervenire per determinare un'inversione di tendenza. L'adeguata comprensione del sistema fisico, ovvero del modello concettuale, è fondamentale pertanto per il perseguimento degli obiettivi delle direttive sopra citate. Vale la pena di citare a tale proposito ancora il D.lgs. 30/2009, che nell'allegato 1 definisce il modello concettuale come elemento necessario per la valutazione dei rischi e delle tendenze degli inquinamenti.

È evidente pertanto come il contesto normativo nel quale ci muoviamo quando affrontiamo uno studio idrogeologico a supporto di una progettazione piut-

tosto che per la perforazione di un pozzo, già prevede obiettivi ambientali quantitativi e qualitativi precisi e scadenze fissate ed è quindi necessario che in tale contesto normativo questi aspetti siano trattati anche nello sviluppo di un modello concettuale idrogeologico. È altrettanto evidente che, affinché lo studio idrogeologico raggiunga le sue finalità, un robusto modello concettuale deve riuscire ad identificare correttamente le caratteristiche più determinanti delle falde acquifere indagate.

Il settore dove lo sviluppo di un modello idrogeologico concettuale si rende indispensabile è quello della salvaguardia della risorsa idrica, sia da un punto di vista quantitativo che qualitativo, in ambito di progetti che interagiscono con il deflusso sotterraneo. Si ricordano sia le infrastrutture a rete, siano esse ferroviarie che stradali, soprattutto laddove vengano previste opere quali gallerie, ma anche progetti di coltivazioni di cave o miniere, piuttosto che generiche opere di ingegneria che interessino la falda acquifera, come ad esempio i parcheggi interrati. La normativa comunitaria, italiana e regionale prevede nell'ambito delle procedure di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e di Valutazione Ambientale Strategica (VAS), che le componenti acqua e sottosuolo siano, al pari di altre, considerate ai fini della compatibilità dei suddetti progetti. Troppo spesso lo studio idrogeologico inserito negli studi di fattibilità ambientale non possiede i requisiti di completezza e dettaglio che permettano di valutare correttamente gli impatti e le conseguenti azioni di mitigazione. Nella normativa si fa riferimento esplicito al modello concettuale idrogeologico solo per quanto riguarda le bonifiche ambientali, a differenza di quanto accade in ambito geotecnico con l'esplicito riferimento al modello geotecnico di sottosuolo, del quale sono indicate caratteristiche e specifiche. Questo, a volte, si riflette anche nella qualità degli studi idrogeologici a supporto della progettazione di opere e infrastrutture nei quali, a fronte di una dettagliata trattazione geotecnica, non c'è altrettanto dettaglio in quella idrogeologica. La principale fonte normativa nell'ambito in oggetto è sicuramente il D.Lgsn. 152 del 3 aprile 2006 "Norme in materia ambientale", noto anche come test unico ambientale. Di seguito vengono esposti, suddivisi per tematiche di interesse, i principali ambiti professionali nei quali si ritiene necessario lo sviluppo di un modello concettuale idrogeologico e le principali caratteristiche che esso deve avere, in funzione degli obiettivi da raggiungere. Vengono anche elencati i principali dispositivi normativi che richiamano la necessità di uno studio idrogeologico di dettaglio, senza la pretesa di fornire un esaustivo elenco delle leggi collegate all'ambito descritto.

1.1. Attività estrattiva

Il geologo può svolgere funzioni diverse, siano queste

di natura tecnico-direttiva che di sorveglianza, sotto il profilo della qualità del processo produttivo, della sicurezza e dell'igiene sul lavoro, ma anche sotto il profilo della protezione del territorio. In particolare, il geologo svolge mansioni di verifica e sorveglianza per l'attuazione delle misure di tutela dell'ambiente secondo normative e disposizioni autorizzative che possano riguardare la salvaguardia della risorsa idrica. Nell'ambito delle attività estrattive la tematica "idrogeologia" riveste quindi una importanza notevole ai fini dell'analisi degli impatti che la stessa ha sulle risorse idriche sotterranee. In via generale, risulta necessario perseguire la compatibilità delle attività estrattive e di escavazione in genere con la salvaguardia delle risorse idriche, garantendo che tali attività non privino il corpo idrico sotterraneo della sua protezione, né che siano esse stesse fonte di deterioramento della risorsa. Gli strati di copertura hanno la funzione di impedire, ritardare e comunque attenuare la propagazione di sostanze inquinanti, sia di origine naturale che antropica, verso le falde acquifere stesse. Non deve essere, pertanto, aumentata la vulnerabilità dei corpi idrici sotterranei in seguito alle attività di escavazione. In linea di principio, l'attività estrattiva e/o i lavori di escavazione non devono inoltre modificare le caratteristiche quali-quantitative della risorsa idrica sotterranea. Più in generale occorre analizzare gli impatti potenziali che l'attività di coltivazione può determinare sui corpi idrici connessi. Per quanto riguarda le norme che in ambito di escavazione ne disciplinano l'interazione con le risorse idriche, si ricorda la normativa sulla Valutazione di Impatto Ambientale di cui al D.Lgs. 152/2006. Per quanto riguarda il Bacino del Fiume Arno, ad esempio, il Piano Stralcio "Bilancio Idrico" (allegato 5) fornisce gli "Indirizzi per la salvaguardia della risorsa idrica in ambito di escavazioni". Le finalità del modello concettuale sono quelle di fornire il quadro conoscitivo per la corretta salvaguardia della risorsa idrica in ambito di escavazione. Finalità dello studio è la valutazione della fattibilità degli interventi in relazione agli impatti quali-quantitativi sulla risorsa idrica. In linea con la normativa, riveste una particolare importanza la ricostruzione della geometria dei corpi idrici superficiali e sotterranei ed un buon inquadramento idrogeologico come punto di riferimento indispensabile su cui tarare il modello di valutazione e il sistema di controllo ambientale. L'impianto del sistema di controllo (piano di monitoraggio) deve essere dimensionato e organizzato dal punto di vista temporale, per essere in grado di ricostruire la situazione di "bianco" (ante operam), per monitorare il sistema acquifero durante le varie fasi di avanzamento dei lavori e, a conclusione, per accertare lo stato ambientale dopo aver ultimato la coltivazione e le operazioni di sistemazione a verde (post operam). Il piano di monitoraggio, essendo finalizzato al controllo

ed alla verifica dei cambiamenti provocati dall'attuazione del progetto su diverse matrici ambientali, per poter comprendere i meccanismi di impatto dell'intervento ed il loro eventuale protrarsi nel tempo, è possibile che necessiti di aggiornamenti periodici. Grazie ad un sistema di controllo puntuale, con l'evoluzione dei fenomeni monitorati si ha la possibilità di verificare l'efficacia delle opere di contenimento e mitigazione adottate e di rilevare fenomeni imprevisti che possono modificare il quadro ambientale in maniera significativa. Per quanto riguarda gli aspetti legati al monitoraggio questo dovrà comprendere la valutazione dei parametri chimici e fisici descritti nell'allegato 1 del D.Lgs. 152/2006. Lo studio deve essere condotto in un intorno significativo, opportunamente esteso oltre l'area di intervento, in funzione del contesto idrogeologico in cui esso è inserito; l'ampiezza dell'intorno deve essere funzione anche del valore e delle caratteristiche della risorsa idrica e del sistema degli utilizzi (prelievi) della stessa. In generale dal modello concettuale si dovranno evincere:

- il flusso idrico sotterraneo e i rapporti tra acque sotterranee e reticolo delle acque superficiali, in modo da verificare la connessione dell'attività estrattiva con i corpi idrici superficiali e sotterranei e valutare potenziali impatti su di essi e sul loro stato ambientale;
- l'effettiva natura, le caratteristiche idrogeologiche, la continuità areale e lo spessore dell'orizzonte insaturo che separa il fondo scavo dal livello di massima escursione dell'eventuale livello saturo;
- la vulnerabilità degli acquiferi;
- il valore della risorsa idrica rispetto agli utilizzi in atto e potenziali, con particolare attenzione a quelli idropotabili;
- le caratteristiche idrogeochimiche delle acque.

1.2. Pozzi

Pur non facendo esplicito riferimento al modello concettuale idrogeologico, si riportano di seguito le principali normative in materia di risorse. L'uso ed il prelievo delle acque pubbliche sono regolamentati da leggi specifiche dello Stato (R.D. 1775/33, D.Lgs.152/2006), regionali e provinciali (regolamenti demanio idrico), mentre, per quanto riguarda la pianificazione delle risorse idriche e le politiche di *governante*, si ricorda la direttiva 2000/60/CE, il già citato D.Lgs. 152/2006 e la pianificazione di bacino di cui ai Piani Stralcio "Bilancio Idrico". È ovvio che nella pratica professionale tutta la tematica di ricerca di acqua e le attività legate all'espletamento delle pratiche amministrative ad essa connesse, sono di piena pertinenza dell'idrogeologia. In particolare,

il modello concettuale deve rispondere a due finalità ben precise: il reperimento e la quantificazione della risorsa idrica sfruttabile e fornire agli enti deputati al controllo ed alla gestione della risorsa tutti gli elementi idrogeologici inerenti il caso in oggetto. Infatti, per fare un pozzo ad uso diverso dal domestico occorre richiedere agli uffici provinciali l'autorizzazione alla ricerca di acque sotterranee, nonché la richiesta di concessione di derivazione. L'istruttoria comprende anche la richiesta di pareri ad altri enti, come l'Autorità di Bacino sul bilancio idrico o, ad esempio, all'ente parco se la perforazione ricade nel territorio di competenza. Per quanto riguarda la necessità di difendere dall'inquinamento le acque sotterranee in prossimità delle opere di captazione ad uso acquedottistico e, più in generale, per il raggiungimento degli obiettivi di qualità dei corpi idrici, la normativa identifica le aree di salvaguardia. Queste sono in via preliminare definite con semplice criterio geometrico (ovvero con raggio dal pozzo di 10 m per la zona di tutela assoluta e di 200 m per la zona di rispetto). A seguire, un criterio idrogeologico, che consideri le caratteristiche del corpo idrico, della copertura e della direzione di flusso, tanto per citare solo alcuni aspetti, è in grado di restituire una determinazione certamente più efficace e realistica delle aree di salvaguardia. Il modello concettuale deve contenere gli elementi che descrivono il sistema idrogeologico nel quale si inserisce l'opera di prelievo, identificare l'acquifero (o gli acquiferi) che si mettono in produzione esplicitandone i parametri idrogeologici. Devono essere altresì esplicitati i rapporti tra reticolo superficiale e falda nei casi in cui il prelievo sia in vicinanza di fiumi. Lo studio deve sempre essere esteso ad un intorno significativo, in relazione alla problematica che si intende affrontare.

1.3. Infrastrutture a rete (strade, ferrovie, gallerie)

La realizzazione di un'opera viaria comporta delle modificazioni ambientali sia lungo il tracciato, che in un intorno che in alcuni casi può essere anche piuttosto esteso. In tal senso, uno degli aspetti più importanti riguarda certamente le condizioni di circolazione dell'acqua nei mezzi porosi e/o fratturati che vengono interessati dall'opera in costruzione, soprattutto per quanto riguarda le opere in sotterraneo. Le problematiche sono generalmente riconducibili a due aspetti principali: la stabilità dell'opera e le conseguenze che l'intervento provoca sulla circolazione idrica sotterranea. Queste ultime possono riguardare variazioni dei flussi idrici sotterranei, variazioni delle portate, mutamenti del chimismo delle acque, con effetti che possono essere devastanti per l'ambiente e gli ecosistemi, ma anche per opere di approvvigionamento idrico esistenti in un significativo intorno dell'area d'intervento. La normativa in materia di viabilità e, nello specifico, di opere in sotterraneo, non è particolarmente ampia, soprattutto per quanto concerne la tematica idrogeologica. Peraltro, mentre dal punto di vista geotecnico le

indagini risultano quasi sempre esaurienti in numero e qualità, spesso si assiste, nei progetti, ad una generale scarsa considerazione della problematica idrogeologica, mentre invece lo sviluppo di un modello idrogeologico può risultare di fondamentale importanza. Soprattutto per le opere in galleria. Le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008) non forniscono molte indicazioni in merito, pur riservando un paragrafo alle opere in sotterraneo, dove è richiesto comunque che venga "...accertato il regime delle pressioni interstiziali e l'eventuale presenza di filtrazioni..."; il decreto si occupa prevalentemente della progettazione geotecnica. Le opere in linea hanno in genere un impatto notevole sul territorio. Un particolare aspetto da valutare è l'interazione con il flusso idrico regionale e locale, in quanto particolari condizioni possono essere di ostacolo al naturale deflusso creando scompensi a monte e a valle dell'opera. Lo studio di fattibilità di un'opera in linea, nei casi più critici dovrà comprendere un ventaglio di ipotesi di tracciato, con individuazione degli scenari e delle criticità idrogeologiche dovute alle interferenze sulla circolazione idrica. Lo sviluppo di un corretto modello idrogeologico potrà essere lo strumento attraverso il quale confermare o modificare le ipotesi fatte in via preliminare; nei casi di opere particolarmente rilevanti lo studio di fattibilità dovrebbe già contenere dati tali da formulare ipotesi sufficientemente robuste sui probabili impatti. Per opere di tale rilevanza, la normativa (ad esempio quella di VIA) prescrive un monitoraggio. Il monitoraggio delle acque sotterranee, in termini di analisi delle portate e delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque, deve essere previsto in tutte le fasi di progetto ante e post operam, sia nell'opera in realizzazione, sia in pozzi, sorgenti e corsi d'acqua di un significativo intorno, da definire sulla base dell'interpretazione geologica e idrogeologica degli acquiferi attraversati. Le indagini devono permettere l'identificazione e la caratterizzazione dell'idrostruttura attraversata dall'opera in sotterraneo, il calcolo del bilancio idrogeologico del dominio sotteso all'opera insotterraneo, la caratterizzazione dei vari complessi idrogeologici attraversati, la previsione dei punti di venuta d'acqua e del relativo ordine di grandezza, la conseguente descrizione degli impatti sull'ambiente circostante, il progetto di captazione e adduzione di risorse idriche integrative o sostitutive, il progetto di smaltimento delle acque drenate.

1.4. Bonifiche ambientali

Le bonifiche dei siti inquinati rappresentano un importante ed attuale tema d'interesse ambientale. Il forte sviluppo delle attività antropiche negli ultimi decenni ha portato ad un lento degrado ambientale di cui hanno risentito soprattutto le falde acquifere. A queste si aggiunga lo scempio prodotto dalle aree minerarie dismesse, in cui il selvaggio rilascio dei flussi idrici spesso contaminati da metalli può avere un impatto considere-

vole sulle risorse idriche superficiali e sotterranee, nonché sulle altre matrici ambientali (suoli, piante, ecc.). Molti degli acquiferi presenti all'interno del nostro territorio risultano oggi contaminati e l'acqua estratta deve essere trattata prima di poterla sfruttare. Lo scopo principale delle bonifiche deve essere quello di risanare le condizioni ambientali in modo tale da non compromettere la fruizione, in atto o potenziale, della risorsa primaria acqua. L'Italia ha normato il settore delle bonifiche con l'emanazione del D.M. 471/99 (adesso abrogato); ad oggi, le bonifiche sono disciplinate dal D.Lgs. 152/2006 - parte IV, titolo V e allegati al titolo. In presenza di un superamento di determinate concentrazioni soglia di contaminazione (CSC), la normativa impone la caratterizzazione del sito potenzialmente contaminato. Attraverso la caratterizzazione e la successiva analisi di rischio, se i livelli dei contaminanti risultano comunque in eccesso rispetto alle concentrazioni soglie di rischio (CSR) sito specifiche, il sito è classificato come inquinato e va sottoposto a bonifica. L'iter di bonifica espresso dalla normativa vigente per i siti inquinati prevede dunque una progettazione della bonifica secondo approfondimenti tecnici progressivi: piano di caratterizzazione, progetto preliminare e progetto definitivo. Il modello concettuale definitivo rappresenta lo stadio finale del piano di caratterizzazione, in cui deve apparire chiara l'interazione che esiste tra lo stato di contaminazione delle varie matrici e l'ambiente circostante. Tale modello deve infatti fornire le sostanze chimiche inquinanti di cui si necessita in una bonifica, le loro concentrazioni in falda e nel terreno, il loro percorso verso i possibili soggetti a rischio, la reale interazione che esiste tra questi composti e la falda idrica (se idroveicolati, parzialmente solubili, più o meno densi dell'acqua, seguono il gradiente idraulico o quello di gravità, ecc.). Si devono avere infine informazioni sul tipo d'inquinamento, se è continuo nel tempo o se si sono verificati uno o più eventi singoli, a quale velocità si muove il/i pennacchio/i inquinante/i ricostruito/i in precedenza, come si modifica nel percorso e se esistono altre possibili fonti d'inquinamento che possono interagire o hanno interagito con l'attuale situazione monitorata.

1.5. Discariche

Le attività di smaltimento trattamento e recupero dei rifiuti sono normate dal D.Lgs. 152/2006 - parte IV, ma il principale riferimento normativo nazionale nell'ambito della costruzione e gestione di un impianto di discarica, così come previsto dall'Art. 182, comma 7 di suddetto decreto, è rappresentato dal D.Lgs. 36/2003 "Attuazione della direttiva 1999/31/CE relativa alle discariche di rifiuti". In esso, allo scopo di conseguire le finalità di cui all'articolo 2 del D.Lgs. 22/1997 "Attuazione delle direttive 91/156/CEE sui rifiuti, 91/689/CEE sui rifiuti pericolosi e 94/62/CE sugli imballaggi

e sui rifiuti di imballaggio", vengono definiti i requisiti operativi e tecnici per i rifiuti e le discariche, misure, procedure e orientamenti tesi a prevenire o a ridurre il più possibile le ripercussioni negative sull'ambiente. Il corretto sviluppo di un adeguato modello idrogeologico viene richiesto in tutte le fasi di lavoro di una discarica, da quella di autorizzazione a quella di gestione post-operativa. Il modello concettuale dovrà quindi contenere tutti gli elementi che contribuiscono a definire la compatibilità ambientale del sito da destinare a impianto di smaltimento.

1.6. Altre opere

Per quanto riguarda, più in generale opere edilizie, ma anche interventi di mitigazione dei fenomeni franosi, la fonte normativa principale è rappresentata dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) di cui al D.M. 14 gennaio 2008. Come accennato in precedenza, queste si riferiscono soprattutto alla modellazione geotecnica, ma vengono comunque fatti alcuni riferimenti anche alla componente idrogeologica. Ad esempio, quando si parla di caratterizzazione e modellazione geologica del sito (par. 6.2.1 - NTC, 2008) si richiama la necessità della ricostruzione dei caratteri idrogeologici del territorio; la circolare esplicativa specifica che la caratterizzazione e modellazione geologica del sito deve fornire lo schema di circolazione idrica superficiale e sotterranea. Nel caso di studi sui fenomeni franosi, il modello idrogeologico è importante per ricostruire lo schema di circolazione idrica nella zona di dissesto, al fine anche di progettare gli interventi di mitigazione e consolidamento del fenomeno franoso. Un'altra categoria di interventi sul territorio con potenziali riflessi negativi sulla risorsa idrica sotterranea è rappresentata dall'immissione di fluidi o energia termica nel sottosuolo. Gli impianti geotermici di condizionamento, siano essi a circuito chiuso od aperto, rappresentano una realtà in progressivo sviluppo ed il modello concettuale dovrà contenere tutte quelle informazioni necessarie alla valutazione dell'area di influenza dell'impianto, segnalando al contempo la presenza di potenziali bersagli dello scadimento della risorsa, come pozzi destinati all'estrazione di acqua. Oltre allo schema della circolazione idrica, è necessario caratterizzare i terreni presenti anche per il loro grado di conduttività termica e disporre di un esauriente programma di monitoraggio fisico-chimico, anche in questo caso distinto in un *ante e post operam*, nonché durante l'esercizio.

2. LA TECNICA

La modellazione per concetti costituisce un approccio scientifico ai problemi, che nasce in ambito informatico (Burnash et al., 1973) e da questo rapidamente diffuso a molteplici discipline che utilizzano sche-

matizzazione di processi e stati naturali, ai fini della realizzazione di modelli descrittivi di fenomenologie complesse, sia in stato transitorio che stazionario. Per questo motivo la locuzione “modello concettuale” può assumere significati differenti in differenti branche della scienza di base ed applicata. A partire dalla fine degli anni '80, quando anche in idrogeologia trovano applicazioni tali concetti (si veda, per tutti, Anderson & Woessner, 1992), essi devono rifarsi, per le risorse idriche sotterranee, all'impiego di un metodo descrittivo delle caratteristiche essenziali di un dominio idrogeologico, che identifica i principali processi che in esso avvengono considerando le loro variazioni nello spazio e nel tempo. *Reviews* esaustive sulla modellazione concettuale in idrogeologia possono essere reperite in Gosain (2009), Barnett et al. (2012), Singh (2013), cui si rimanda per approfondimenti. In generale, il fatto che un modello concettuale idrogeologico si concentri sui caratteri essenziali del sistema acquifero, non deve tuttavia essere inteso nel senso di un modello approssimato o, peggio, banalmente semplificato: il rigore e la fondatezza documentale e di dati della descrizione per concetti, al contrario, costituirà la solida base per le successive elaborazioni, tra cui, in special modo, l'eventuale modellazione numerica. Ciononostante, l'idrogeologia è una disciplina necessariamente semi-quantitativa, in cui molti parametri sono semplicemente descritti o ipotizzati e spesso non esistono metodi analitici per giungere a provare, in modo incontrovertibile, se le ipotesi avanzate sono corrette. Inoltre, l'idrogeologia si occupa di sistemi estremamente complessi, dei quali nessuna modellazione numerica, per quanto avanzata, può essere in grado di realizzare una piena traduzione delle interrelazioni tra i parametri che governano il sistema (Voss, 2005). Un efficace modello idrogeologico concettuale si raggiunge temperando tali opposte esigenze: una delle chiavi per giungere a questo risultato è quella di partire dalla raccolta di tutte le informazioni geologiche, stratigrafiche e idrogeologiche presenti nell'area di studio e reperibili nei vari archivi nazionali/regionali/provinciali/comunali/privati. Tali informazioni consentiranno infatti al geologo di ipotizzare in primis la geometria e le principali caratteristiche strutturali dell'acquifero, comprese le sue condizioni ai limiti, base fondamentale per la realizzazione di qualsiasi modello concettuale (e successivamente di quello numerico) di un acquifero. In una possibile successione di passi condizionati che conducano alla realizzazione di un modello concettuale, infatti, la raccolta di dati esistenti e di informazioni geologiche di base è preceduta soltanto dalla definizione, assolutamente preliminare, degli scopi del modello. Schematizzando infatti tale sequenza di passi, essi possono essere identificati in:

0. analisi delle finalità del modello;

1. raccolta e scelta di dati idrogeologici esistenti
2. integrazione dei dati di cui al punto 1 con ulteriori dati ipotizzati o estrapolati;
3. integrazione dei dati di cui ai punti 1 e 2 con nuovi dati misurati;
4. caratterizzazione e rappresentazione del sito con carte e schemi di base;
5. elaborazione del modello concettuale.

Tali passi possono trovare rappresentazione più esaustiva in schemi (a loro volta concettuali), quale quello di Figura 1, nel quale è rappresentato l'intero processo di raccolta di dati preliminari, costruzione del modello concettuale, sua validazione e conseguente output/input per l'eventuale modellazione numerica. Come risulta dallo schema, quando il geologo si trova a dover realizzare uno studio idrogeologico (a piccola o a grande scala) che consenta di realizzare un modello concettuale di un acquifero, deve dunque, come prima cosa, riuscire a caratterizzarne i tratti fisici e chimici, in modo il più possibile vicino alla realtà. Tale operazione può essere possibile mediante la raccolta di tutti i dati ancillari, idrologici, climatici e geologici di base, anche con riferimento alle banche dati esistenti: tra queste, a titolo di esempio, si riportano alcuni link di siti attivi alla data di redazione del presente documento:

<http://www.arp.at.toscana.it/datiemappe/banche-dati/monitoraggio-ambientale-acque-sotterranee>

<http://webgis.ar-tel.it/webwater/>

<http://www.lamma.rete.toscana.it/territorio/geologia/informazioni-di-base/banche-dati-sottosuolo#sottosuolo>

<http://www.risorsa-acqua.it/concessioni-di-derivazione/concessioni-regione-toscana/>.

A livello nazionale esiste la banca dati della L. 464/1984 dove sono disponibili le stratigrafie e i dati principali dei pozzi con profondità maggiori di 30 m al seguente link: <http://sgi1.isprambiente.it/GeoMapView>.

Tuttavia il quadro dei dati disponibili, consultabili e scaricabili in rete è in costante e rapida evoluzione, per cui non può che raccomandarsi l'aggiornamento continuo del geologo anche dal punto di vista delle banche dati pubbliche fornite da Enti e Agenzie territoriali e delle modalità di fruizione del dato. Al di là della fonte del dato, ciò che si rileva è in ogni caso l'importanza di un approccio multidisciplinare che consideri tutte le variabili e gli stati dei sistemi acquiferi: la fase delle indagini preliminari dovrà pertanto riguardare gli aspetti chimico-fisici della risorsa idrica sotterranea, in modo non solo da acquisire il quadro più esauriente possibile dell'esistente, ma anche di programmare le eventuali indagini di supporto che dovranno essere realizzate. Rimandando ai capitoli successivi per il dettaglio sulle tecniche e tipologie di indagine, può qui considerarsi che l'approccio integrato [raccolta dati esistenti] + [acquisizione dati da indagini in situ e in laboratorio] può consentire di adottare il metodo di modellazione concettuale

proposto primariamente da Haitjema (1995). In generale, il limite maggiore della modellazione concettuale risiede infatti nelle incertezze sui dati disponibili e si tende a considerare che la modellazione debba essere alimentata dai dati: conseguentemente si corre il rischio di un circolo vizioso in cui la modellazione (concettuale prima e numerica, eventualmente, dopo) appare sempre troppo approssimata e non confacente alle esigenze, parendo sempre necessaria l'acquisizione di nuovi e ulteriori dati. Tale corto circuito può essere risolto considerando la modellazione concettuale come un processo aperto e non

come la somma conclusiva della fase di raccolta ed elaborazione dati, in una sorta di schema a retroazione continua, in cui si parte da un modello concettuale iniziale che si ricalibra man mano che nuovi dati vengono acquisiti. In questo senso deve considerarsi come nuovo dato acquisito anche il dato indiretto, frutto dell'elaborazione del dato esistente. In sintesi, dunque, il modello concettuale affiancherà costantemente la fase di caratterizzazione del sistema geologico, nei suoi aspetti geometrici, litologici, strutturali, fisici e chimici, attraverso gli approcci di seguito descritti.



Parco San Rossore - tubo piezometrico Foto: Roberto Giannecchini



Isola di Pianosa - antico pozzo alla romana; interno con radici di albero di fico a cercare acqua Foto: Roberto Giannecchini

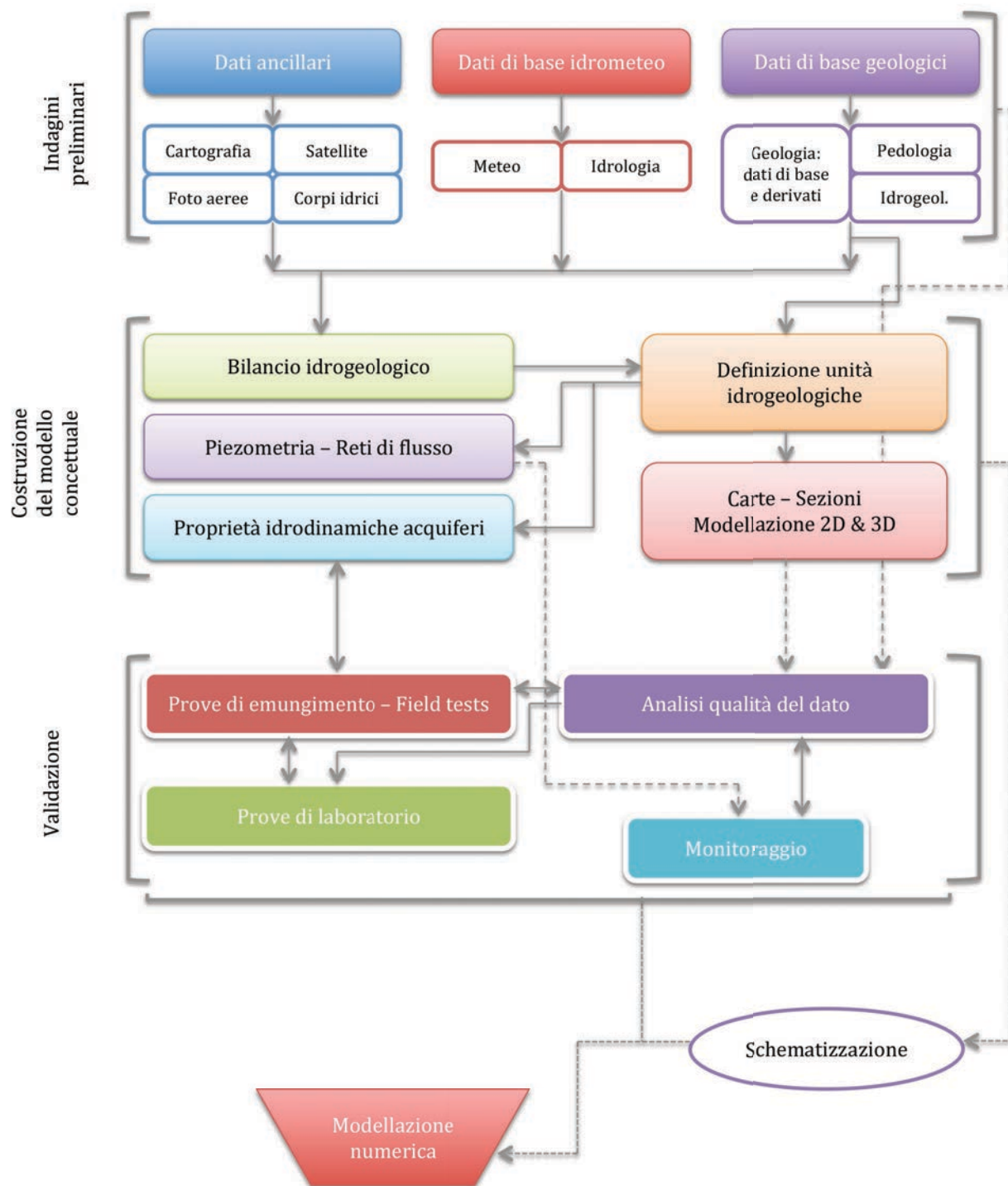


Figura 1 - Schema metodologico per la costruzione di un modello concettuale idrogeologico

2.1. *Analisi dell'assetto idrostrutturale*

Alla base di una corretta analisi finalizzata all'identificazione di un acquifero ci sono tre criteri: geologico, idrodinamico e idrochimico. L'alimentazione, lo stoccaggio ed il deflusso idrico sotterraneo sono imposti, in primo luogo, dalla geologia, base fondamentale dell'idrogeologia. La geologia identifica, per mezzo di studi stratigrafici e strutturali, gli orizzonti litostratigrafici che determinano sia la configurazione che la struttura dell'acquifero.

Un acquifero è un sistema idrogeologico identificato con un dominio di spazio sotterraneo finito e continuo, chiamato "serbatoio", dove possono transitare flussi idrici e può essere immagazzinata acqua sotterranea.

Dal punto di vista geologico un "serbatoio" è caratterizzato da tre insiemi di dati:

- 1) configurazione fisica, che ne descrive il suo contorno, il suo volume (dimensioni) e la natura dei suoi limiti geologici e idrogeologici; Le superfici limite di un "serbatoio" sono:
 - limite inferiore o substrato;
 - limite superiore o tetto (non presente negli acquiferi freatici);
 - limiti laterali: affioramento del serbatoio, passaggio laterale di facies, discontinuità strutturali (es. faglie).

Questi limiti fissi non corrispondono necessariamente a limiti crono stratigrafici, ma esclusivamente a variazioni di conducibilità idraulica. Tuttavia, appare evidente come una corretta ricostruzione geologica preventiva allo studio idrogeologico sia un supporto irrinunciabile per poter procedere, oltre alla ricostruzione geometrica del serbatoio, nella comprensione di aspetti più specifici come la mappatura di aree a maggiore o minore conducibilità idraulica o con diverse caratteristiche idrochimiche ed, infine, come guida effettiva per la correlazione di determinati livelli acquiferi.

È possibile rappresentare la morfologia di tali superfici tramite la redazione di carte strutturali a curve isoipse (uguale altitudine) e a curve isopache (uguale spessore).

- 2) localizzazione nel sottosuolo per mezzo della quota e della profondità dei limiti geologici e idrogeologici.

La localizzazione in profondità degli acquiferi è determinata dalla successione verticale alternata di formazioni idrogeologiche permeabili, semipermeabili ed impermeabili;

- 3) struttura interna o anatomia, identificata dalla litologia e dall'analisi strutturale:
 - caratteristiche fisiche del serbatoio (petrologia, granulometria, facies, ecc.);
 - caratteristiche geochimiche (natura e solubilità dei costituenti solidi);
 - caratteristiche strutturali (deforma-

zioni, fessurazioni e fratturazioni) dei materiali che costituiscono il serbatoio.

La distribuzione nello spazio dei dati è rappresentata per mezzo di sezioni e carte idrostrutturali. Queste informazioni vengono poi utilizzate come base per effettuare le interpolazioni dei dati puntuali per i parametri idrodinamici e idrochimici.

Al fine di procedere all'identificazione completa degli acquiferi è necessario completare il concetto geologico di orizzonti litostratigrafici con i dati idrodinamici sull'acqua sotterranea. L'insieme dei dati geologici, idrogeologici ed idrochimici identifica una formazione idrogeologica.

Una formazione idrogeologica è costituita da uno o più litotipi, aventi funzioni paragonabili nei confronti dello stoccaggio e del deflusso idrico sotterraneo. Si devono analizzare tre ordini di grandezza:

- una formazione idrogeologica che identifica un acquifero, con un tetto e un substrato, oppure un semi-permeabile;
- la combinazione di formazioni idrogeologiche permeabili e semi-permeabili intervallate da orizzonti poco permeabili o impermeabili che identificano un acquifero multi-falda;
- la combinazione di numerose formazioni idrogeologiche, che costituiscono una sistema idrogeologico.

Da questo si deduce che: il carattere identificativo principale di una formazione idrogeologica è il grado di permeabilità (ovvero l'attitudine del serbatoio a lasciarsi attraversare dall'acqua) come mostrato in Tabella 1.

In base a tale caratteristica si distinguono:

► formazioni idrogeologiche permeabili (acquiferi), ovvero quelle che hanno la proprietà di lasciarsi attraversare dall'acqua a velocità apprezzabili (da qualche metro a migliaia di metri annui), sotto l'azione della forza di gravità, e che costituiscono la sede delle riserve e riserve idriche sotterranee. Ammettono componenti di movimento sia orizzontale (con portate significative per le opere di captazione) che verticale. I parametri idrogeologici sono determinabili principalmente con prove di pompaggio;

► formazioni idrogeologiche semi-permeabili (acquitardi), che hanno un grado di permeabilità medio basso e permettono flussi idrici a velocità più modeste. Inoltre, se intercalate ad acquiferi, permettono scambi verticali (ascendenti e discendenti) tra acquiferi sovrapposti in condizioni idrodinamiche favorevoli; tale fenomeno naturale è chiamato drenanza o fuga (flusso d'acqua a componente essenzialmente verticale passante da un acquifero ad un altro attraverso uno strato semi-permeabile, da non confondere con il concetto di comunicazione tra falde). Tali scambi possono raggiun-

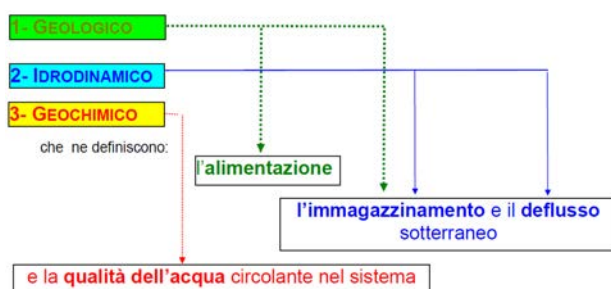
gere quantità rilevanti a scala di bacino idrogeologico, tenendo conto delle superfici (assai estese) e del tempo (molto lungo). La componente orizzontale è pressoché trascurabile. I parametri idrogeologici sono indirettamente determinabili con prove di pompaggio sugli acquiferi posti al tetto o al letto; possono essere utilizzati anche test di laboratorio e particolari prove in sito;

► formazioni idrogeologiche impermeabili (acquicludi), ovvero quelle dove la velocità di deflusso dell'acqua sotterranea è talmente bassa da essere praticamente non misurabile (qualche mm/anno) e che costituiscono alcuni dei limiti geologici degli acquiferi. Anche se spesso contengono grandi quantità d'acqua, presente sotto forma di ritenzione, essa non può essere sfruttata in quanto non è soggetta alla forza di gravità. Entrambe le componenti di moto sono trascurabili. I parametri idrogeologici non sono determinabili in alcun modo con prove di pompaggio, ma solo con test di laboratorio e con particolari prove in sito.

ACQUIFERI			ACQUITARDI			ACQUICLUDI					
Conducibilità idraulica (m/s)											
10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷	10 ⁻⁸	10 ⁻⁹ — 10 ⁻¹²			
Conducibilità idraulica (m/giorno)											
10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	10 ⁰	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴ — 10 ⁻⁵			
Relative hydraulic conductivity											
Very high			High			Low			Very low		
REPRESENTATIVE MATERIALS											
Unconsolidated deposits											
Clean gravel	Clean sand and sand and gravel	Fine sand	Silt, clay, and mixtures of sand, silt, and clay			Massive clay					
Consolidated Rocks											
Vesicular and scoriaceous basalt and cavernous limestone and dolomite	Clean sandstone and fractured igneous and metamorphic rocks	Laminated sandstone, shale, mudstone	Massive igneous and metamorphic rocks								

Tabella 1 - Conducibilità idraulica e materiali geologici per acquiferi, acquitardi e acquicludi.

L'identificazione di un acquifero si basa su tre criteri:



Con il termine acquifero (Figura 2) si intende quindi un insieme di rocce permeabili, non necessariamente coincidente con una formazione geologica, che presentano caratteristiche tali da permettere il deflusso significativo di una falda idrica sotterranea e la restituzione (o l'estrazione) di acqua in quantità apprezzabili. L'estensione del sistema acquifero può essere schematizzata mediante una sezione idrogeologica molto sviluppata in senso orizzontale nella quale tale sistema risulta suddivisibile in tre settori principali:

1) zona di alimentazione, la parte più a monte, generalmente a diretto contatto con l'atmosfera, nella quale avviene la ricarica dell'acquifero;

2) zona di deflusso, la parte intermedia, lungo la quale avviene il movimento delle acque di falda verso valle;

3) zona di recapito, la parte più a valle, che rappresenta l'area in cui le acque di falda confluiscono direttamente in un altro corpo idrico (fiume, lago, mare) o vengono alla superficie formando sorgenti.

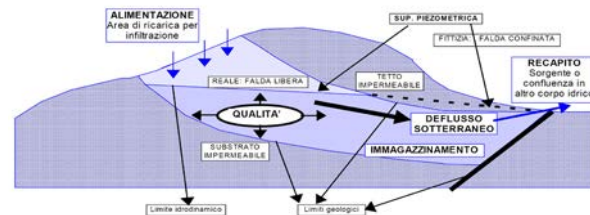


Figura 2. Schematizzazione acquifero (schema di P. Barzauoli tratto da dispense del corso di Idrogeologia).

Il mezzo fisico in cui avviene il deflusso e l'immagazzinamento dell'acqua sotterranea permette di distinguere:

- acquiferi granulari (porosi). L'immagazzinamento ed il movimento dell'acqua avvengono attraverso la porosità efficace intergranulare;

- acquiferi fratturati. Sono possibili diversi casi, secondo la natura litologica e le condizioni di fratturazione della formazione; il caso più frequente è quello della «doppia porosità». La circolazione principale avviene nel reticolo di macro-fratture; poiché queste occupano un volume trascurabile dell'ammasso roccioso, anche il loro immagazzinamento è trascurabile. L'immagazzinamento è invece a carico della micro-fessurazione dell'ammasso, in cui avviene anche una circolazione più lenta ma più estesa con caratteristiche simili a quella dei mezzi porosi. Un acquifero fratturato può essere freatico, semifreatico, semiconfinato o confinato in funzione dei rapporti idrogeologici con i litotipi di tetto. A differenza dei mezzi porosi, ciò che caratterizza il regime di flusso all'interno di un acquifero fratturato è la geometria e la distribuzione del reticolo di fratture. Negli acquiferi granulari la porosità è uniformemente distribuita e può essere definita da un numero, ma in un mezzo fratturato sono possibili più schemi geometrici (e più regimi di flusso) al variare di dimensione, distribuzione e spaziatura delle fratture. I casi limite sono:

- micro-fratturazione pervasiva dell'ammasso roccioso, con condizioni di flusso simili a quelle di un mezzo poroso;
- unica frattura beante di grandi dimensioni, che ha il serbatoio di immagazzinamento in una grotta o lago carsico.

Gli acquiferi sono inoltre distinguibili in base alle caratteristiche idrogeologiche del litotipo sovrastante (Figura 3):

- acquiferi freatici (o liberi). Non necessariamente si devono estendere fino al piano campagna, possono anche avere delle sottili coperture meno permeabili. La condizione determinante è che non siano saturi fino al tetto, ovvero che la superficie freatica, a contatto con la pressione atmosferica, sia libera di oscillare al loro interno;

- acquiferi semifreatici (o semiliberi). Si presentano nel caso in cui l'acquifero freatico sia sormontato da una copertura a bassa permeabilità relativa, nella quale cade la superficie freatica;

- acquiferi confinati. Al tetto presentano un acquicludo o comunque un acquitardo a permeabilità relativa sufficientemente bassa da rendere trascurabili, dal punto di vista pratico, gli scambi idrici con gli acquiferi sovrastanti. Se sono saturi, la superficie piezometrica virtuale, ovvero rappresentativa della pressione idrica all'interno dell'acquifero;

- acquiferi semiconfinati. Al tetto presentano un acquitardo che può estendersi fino al piano campagna o essere a sua volta sormontato da un acquifero freatico. Attraverso l'acquitardo, sono possibili scambi idrici verticali con l'acquifero freatico. Se l'acquitardo è dotato di immagazzinamento proprio, può cedere direttamente acqua all'acquifero semiconfinato;

- sistemi acquiferi multifalda. Sono molto diffusi in natura, caratterizzati da un acquifero freatico o semifreatico sovrapposto a più orizzonti successivi semiconfinati e/o confinati, ovvero separati da acquitardi e/o acquicludi. Nel caso di presenza di acquitardi, gli scambi fra i diversi livelli sono regolati dalle condizioni di carico piezometrico e dalle caratteristiche degli acquitardi.

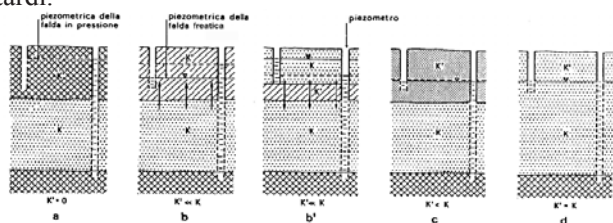


Figura 3 - Tipi di acquiferi: confinato (a), semiconfinato (b, b'), semifreatico (c), freatico (d) (Celico, 1986).

2.2. Porosità e porosità efficace

In relazione alle tipologie di acquifero descritte è necessario soffermarsi sui concetti di porosità e porosità efficace, essendo proprietà idrologiche delle rocce in grado di condizionare quantitativamente l'immagazzinamento ed il movimento delle acque che possono essere utilmente captate, e quindi intrinsecamente collegate al concetto di permeabilità.

La porosità è la proprietà delle rocce di contenere spazi vuoti (quali che siano forma, dimensioni e frequenza)

tra gli elementi solidi che le compongono; essa può essere distinta in primaria, quando i vuoti si sono formati contemporaneamente alla roccia, e secondaria, quando i vuoti si sono formati successivamente.

La porosità (n , p_t) viene generalmente espressa mediante il rapporto percentuale tra il volume dei vuoti (V_v) ed il volume totale della roccia (V_t):

$$n = V_v/V_t \cdot 100$$

Il coefficiente così calcolato rappresenta la porosità totale perché viene preso in considerazione il volume totale dei vuoti (intercomunicanti e non) che possono essere occupati dall'acqua e/o dall'aria. Nella tabella 2 che segue sono riportati gli ordini di grandezza dei campi di variazione della porosità totale in alcune rocce.

ROCCE INCOERENTI o SCIOLTE		ROCCE COERENTI o COMPATTE	
Roccia	Porosità totale %	Roccia	Porosità totale %
Ghiaie	25-40	Calcarei	3-20
Sabbie e ghiaie	25-30	Calcarei oolitici	5-20
Sabbie	25.95-47.64	Craie	15-45
Depositi alluvionali recenti	5-15	Basalti	0.1-3
Argille	45-50	Arenarie	5-25
Marne	45-50	Dolomie	2-10
Fanghi freschi	80-90	Graniti	0.02-1.5
limi	35-50	Gessi	2-8

Tabella 2 - Valori di porosità totale di rocce e terreni.

La capacità di percolazione è la proprietà delle rocce di cedere acqua per azione della forza di gravità. Essa viene quantitativamente rappresentata dal coefficiente di percolazione o porosità efficace (n_e , p_e), che è espresso dal rapporto percentuale tra il volume dei vuoti intercomunicanti, ovvero dell'acqua gravifica nella roccia satura (V_g), ed il volume totale della roccia (V_t):

$$n_e = V_g/V_t \cdot 100$$

Dato che:

$$V_g = V_v - V_r$$

Dove V_r rappresenta il volume totale dell'acqua di ritenzione; attraverso semplici passaggi si arriva alla seguente espressione:

$$n_e = n - R_s$$

dove R_s è il coefficiente di Ritenzione o Ritenzione specifica.

La porosità efficace corrisponde, quindi, al volume dei vuoti intercomunicanti contenenti acqua estraibile per gravità in rapporto al volume totale della roccia; essa può dunque rappresentare una porzione anche molto piccola della porosità totale (Tabella 3).

ROCCE INCOERENTI o SCIOLTE		ROCCE COERENTI o COMPATTE	
Roccia	Porosità efficace %	Roccia	Porosità efficace %
Ghiaie	20-30	Dolomie	2-5
Sabbie e ghiaie	15-20	Calcarei	2-10
Sabbie	5-20	Craie	2-5
Depositi alluvionali recenti	8-10	Rocce intrusive e metamorfiche	0.1-2
limi	1-5	Lave	8-10
Sabbie argillose	5-10	Calcarei mamosi	1-3

Tabella 3 - Valori di porosità efficace di rocce e terreni.

2.3. L'idrogeofisica

La geofisica applicata studia la parte solida più superficiale della Terra e rivolge le sue ricerche alla risoluzione di problemi nei campi della geologia applicata e dell'idrogeologia, dell'ingegneria civile e mineraria e nell'individuazione di strutture idonee per l'accumulo di idrocarburi e di fonti di energia geotermica.

Le prospezioni geofisiche (prospezioni sismiche, elettriche, elettromagnetiche, radiometriche, gravimetriche) rappresentano alcuni metodi fisici utilizzati nel campo dell'esplorazione geologica. Le indagini geofisiche si differenziano in due grandi categorie: indagini passive e indagini attive. Le prime si effettuano prevalentemente in magnetometria e in gravimetria, dove tramite delle apposite strumentazioni si rilevano eventuali anomalie (magnetiche o gravimetriche) rispetto all'ambiente circostante. Negli ultimi anni sono stati tuttavia sviluppati metodi di sismica passiva molto utili e dalle molteplici applicazioni come i metodi HVSr (Figura 4) (Nakamura, 2000) e delle antenne sismiche (ESAC), che consentono di determinare amplificazioni e contrasti di rigidità del sottosuolo permettendo la ricostruzione del profilo di velocità delle onde di taglio S mediante processi di inversione.

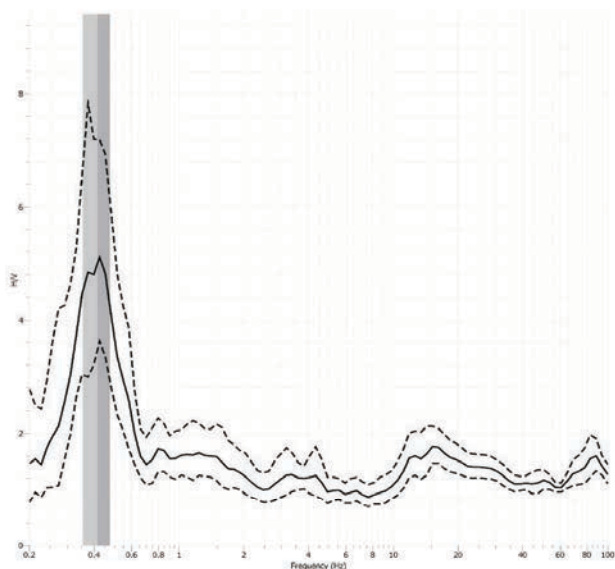


Figura 4 - Indagine HVSr, il picco rappresenta, in questo caso, il tetto dell'acquifero (calcare) al di sotto di coperture sedimentarie.

Tra le tecniche attive si fa riferimento ai rilievi di tipo geoelettrico e sismico che permettono, tramite l'attivazione nel sottosuolo di diverse forme di energia, di studiare come si comporta il materiale in esame al transito di tali forme di energia. In particolare, saranno analizzati i metodi geofisici più diffusi in idrogeologia, che possono fornire indicazioni per la ricostruzione del sottosuolo con riferimento alla geometria e ai limiti di un acquifero.

L'approccio più utilizzato in idrogeologia è certamente la prospezione geoelettrica. I metodi di prospezione geoelettrica utilizzano il passaggio di una corrente naturale o artificiale nel suolo analizzando la risposta del terreno al passaggio di questa corrente. Le tecniche sono numerose e possono essere suddivise in quelle che utilizzano le correnti naturali e quelle che utilizzano le correnti artificiali (metodi passivi e attivi). Al primo gruppo appartengono il metodo della polarizzazione spontanea e il metodo tellurico. Del secondo, invece, fanno parte il metodo dei potenziali, il metodo dei rapporti di caduta dei potenziali, il metodo della polarizzazione indotta e il metodo della resistività.

Tra tutti i criteri, quello della resistività è il più impiegato in idrogeologia in quanto, tramite le misure di resistività dei terreni mediante sondaggi elettrici verticali, orizzontali e tomografie elettriche, è possibile individuare quegli elementi che costituiscono i limiti inferiori e laterali dell'acquifero in oggetto.

La proprietà di condurre corrente elettrica varia largamente da una roccia all'altra. I parametri che la esprimono sono la conducibilità elettrica o, il suo inverso, la resistività.

Ogni corpo roccioso presenta un ampio campo di variabilità dei propri valori di resistività; essi dipendono infatti dal grado di omogeneità, dal livello di alterazione, dalla presenza di acqua e dal suo contenuto salino e, per rocce litoidi, dal grado di fratturazione. Nel caso di terreni sciolti, la resistività elettrica dipende dalla granulometria, dai fluidi in essi contenuti e dal quantitativo in sali disciolti. A questa regola fanno eccezione le argille che, anche se compatte, hanno sempre valori di resistività estremamente bassi; questo è dovuto principalmente all'abbondante acqua di ritenzione che generalmente le contraddistingue e alle caratteristiche del reticolo cristallino dei minerali che le compongono.

La conducibilità delle rocce, in particolare, è sia metallica che elettrolitica. La conducibilità metallica è caratterizzata dal trasporto di elettroni nella matrice stessa della roccia ed è dovuta alla presenza di minerali metallici. E' generalmente poco significativa nella maggior parte delle rocce. La conducibilità elettrolitica è dovuta, invece, al trasferimento degli ioni contenuti nell'acqua d'imbibizione della roccia e rappresenta il fenomeno più importante nella valutazione della resistività elettrica.

La resistività delle rocce sature a conducibilità elettrolitica è funzione decrescente della porosità comunicante (l'acqua contenuta in vuoti isolati non comunicanti non gioca alcun ruolo) e della conducibilità elettrica dell'acqua d'imbibizione. La resistività sarà comunque legata alla ripartizione e alla forma dei pori e delle fratture.

Per le rocce stratificate la resistività varia in funzione della direzione della corrente; i valori minimi e massimi

sono ottenuti rispettivamente quando la corrente scorre parallelamente e perpendicolarmente agli strati, con differenze anche di alcune unità. Si può quindi parlare di rocce micro o macro-anisotrope in funzione degli spessori degli interstrati.

La tabella 4 indica l'ordine di grandezza della resistività per alcuni tipi di acqua e per le rocce più comuni.

Nella pratica, il geologo si trova a dover effettuare indagini geofisiche allo scopo di realizzare un modello concettuale dell'acquifero.

Eaux ou roches	Resistivité (en ohm m)
Eau de mer	0,2
Eau de nappes alluviales	10-30
Eau de sources	50-100
Sables et graviers secs	1 000-10 000
Sables et graviers imbibés d'eau douce	50-500
Sables et graviers imbibés d'eau salée	0,5-5
Argiles	2-20
Marnes	20-100
Calcaires	300-10 000
Grès argileux	50-300
Grès, quartzites	300-10 000
Cinériles, tufs volcaniques	20-100
Laves	300-10 000
Schistes graphiteux	0,5-5
Schistes argileux ou altérés	100-300
Schistes sains	300-3 000
Gneiss, granite altérés	100-1 000
Gneiss, granite sains	1 000-10 000

Tabella 4 - Intervalli indicativi di resistività delle acque e di alcune rocce (Astier, 1971).

La resistività dell'acqua d'imbibizione delle rocce diminuisce quando la quantità dei sali disciolti e la temperatura aumentano, ma anche la natura dei sali incide sulla resistività. Analogamente, rocce con resistività elevata se secche, come per esempio i calcari, presenteranno valori più bassi se saturi d'acqua.

La metodologia più utilizzata nelle prospezioni geofisiche sono i sondaggi elettrici verticali (S.E.V.) con il dispositivo Schlumberger (Figura 5). Ciò deriva dal fatto che questo metodo è il più versatile, in considerazione dei tempi operativi, dei costi relativamente accettabili per la soluzione di problematiche per il corretto uso del territorio e delle sue risorse.

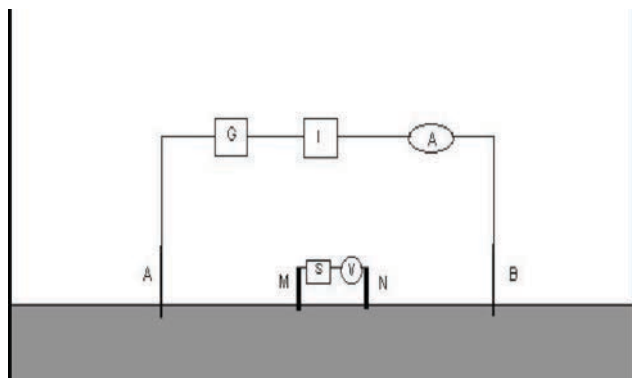


Figura 5 - Schema di strumentazione per misure di resistività: A e B elettrodi di corrente; M e N elettrodi di potenziale; A amperometro; V voltmetro; S soppressore dei potenziali naturali; G generatore di corrente; I invertitore di polarità.

Le limitazioni principali per l'esecuzione di un sondaggio elettrico sono quelle dovute alla topografia dell'area da studiare e alle possibilità di operare. Siccome l'allineamento elettrodico deve essere effettuato lungo un azimut costante, bisogna che ci siano le condizioni logistiche perché questo accada, quindi la presenza di strade con molte curve può rappresentare un ostacolo per la sua realizzazione. Inoltre, la topografia accidentata, specie in zone di montagna, rende questo tipo di prospezioni di difficile attuazione.

Il metodo di prospezione geofisica attiva determina il parametro resistività elettrica, relativo alle formazioni che costituiscono il sottosuolo, e permette la ricostruzione stratigrafica del sottosuolo (Figura 6). La resistività elettrica è un parametro indipendente dalle caratteristiche geometriche del litotipo cui si riferisce ed è definito come la resistenza elettrica per unità di lunghezza ($\Omega \cdot m$).

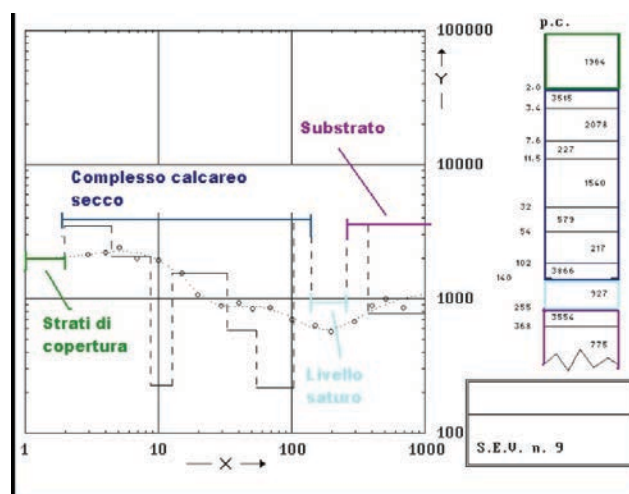


Figura 6 - Interpretazione ottimizzata di un sondaggio elettrico verticale e modello elettrostratigrafico del terreno.

L'elaborazione tomografica consiste nella suddivisione dello spazio bidimensionale della sezione in celle, secondo uno schema definito in riferimento alla distribuzione ed alla dispersione dei dati. Per ognuna delle celle viene determinata la resistività che soddisfa il complesso delle misure. Il grafico che ne deriva è una sezione in cui le zone sono raffigurate da aree caratterizzate dal medesimo colore racchiuse all'interno di isolinee (linee congiungenti punti con lo stesso valore), Figura 7.

Il risultato dell'acquisizione, secondo qualsiasi dispositivo, è una pseudo-sezione di resistività. Il termine deriva dal fatto che essa è costruita a partire dalle misure delle resistività apparenti misurate dal dispositivo. Il set di queste misure è possibile conoscerlo a priori, in quanto la pseudo-sezione è costruita a partire dai punti in cui è possibile avere una misura e la successiva suddivisione dello spazio, che sottende l'allineamento elettrodico, secondo celle che costituiscono una griglia.

Nella scala colorimetrica, solitamente le tinte blu rappresentano resistività basse, poi si passa a colori che vanno dal verde al giallo e infine al rosso ed al viola, che rappresentano litotipi con resistività via via maggiori.

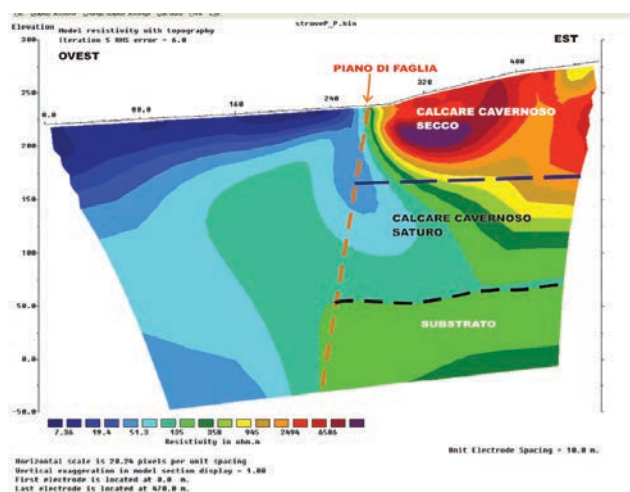


Figura 7 – Interpretazione con profilo tomografico Polo-Polo esempio di un caso che ha consentito di ricostruire la geometria ai limiti di un acquifero.

2.4. Analisi idrologica

Il principale postulato che deve essere assolutamente superato, prima di tutto da scienziati e tecnici di settore, dai gestori della risorsa idrica, dagli amministratori, ma anche dagli stessi cittadini, è quello di considerare l'acqua dolce una fonte inesauribile. Fermo restando che non lo è, non lo è anche e soprattutto in ragione del fatto che quando si vanno a concentrare i punti di prelievo della risorsa in un'area ristretta (ad es. un campo-pozzi, una zona industriale idroesigente ecc.), può accadere che la domanda idrica non riesca ad essere soddisfatta dalla disponibilità. E ciò non perché manchi effettivamente l'acqua, ma solo perché non viene adeguatamente quantificata la disponibilità di risorsa in rapporto alla effettiva esigenza.

Del resto, uno dei concetti fondamentali dell'idrogeologia è quello secondo cui la disponibilità di acqua nei mezzi acquiferi è un fattore assai più importante delle stesse precipitazioni. Queste, infatti, costituiscono il contributo di acqua ricevuta dall'atmosfera, ma è soltanto una delle voci che entrano in gioco in una valutazione più completa della disponibilità idrica nei sistemi acquiferi. In effetti, una parte di acqua che proviene dall'atmosfera prende direzioni diverse o viene perduta in vari modi, non potendo essere immagazzinata in un complesso idrogeologico.

In analogia con quanto avviene per un bilancio di natura economica, anche in un bilancio idrico se le perdite di acqua, in un determinato periodo ed in una determinata area, superano le entrate, ne risulterà un bilancio passivo, mentre nel caso opposto si avrà un bilancio attivo. Rendersi conto del perché si verificano

tali guadagni e tali perdite, quantificarle e prevederle, comporta lo studio dei processi fisici che riguardano l'acqua, non solo nell'atmosfera, ma anche nel suolo e nelle rocce, nonché nei fiumi, nei laghi e nei ghiacciai. Tale studio può essere fatto a livello di bacino idrografico, di bacino idrogeologico o di area generica; naturalmente, in funzione delle dimensioni dell'area da indagare varierà la consistenza e la numerosità dei dati necessari ad avere un quadro significativo in merito alle informazioni di natura idrologica richieste, in modo da poter effettuare un bilancio idrico il più fedele possibile alla realtà.

La differenza tra bacino idrografico e idrogeologico è importante e sostanziale. Infatti, in un bacino idrografico il bilancio tra entrate e uscite non è detto che si chiuda in parità; inoltre, anche una chiusura in parità non necessariamente indica la "chiusura idraulica" del bacino. Ciò si verifica a maggior ragione quando si operi a livello di area generica, indipendentemente dal suo spartiacque morfologico. Al contrario, in un bacino idrogeologico, correttamente individuato mediante uno studio multidisciplinare (geologico, idrogeologico e idrogeochimico-isotopico), il bilancio entrate-uscite deve chiudersi effettivamente in parità, al netto di errori ed approssimazioni che comunque in stime di questo tipo sono inevitabili.

La quantificazione dei volumi di acqua disponibili in una determinata area rappresenta quindi una base indispensabile per una corretta e razionale utilizzazione del patrimonio idrico. Tale quantificazione viene effettuata stimando il bilancio idrico. I termini del bilancio sono di per sé tanto semplici da comprendere concettualmente, quanto complicati nella loro quantificazione. L'espressione del bilancio è assai nota, consistendo in una semplice equazione entrate = uscite:

$$P = Er + R + I$$

dove:

- P:** precipitazioni (mm/anno);
- Er:** evapotraspirazione reale (mm/anno);
- R:** ruscellamento superficiale (mm/anno);
- I:** infiltrazione efficace (mm/anno)

Tutti i termini dell'equazione saranno tanto più verosimili quanto maggiore sarà il numero dei punti di osservazione, quanto più frequenti saranno le relative misure e quanto più ragionato sarà il periodo di riferimento. In ogni caso, l'equazione dovrebbe essere analizzata almeno su un ciclo idrologico; poiché frequentemente un unico ciclo idrologico non è rappresentativo dell'effettivo andamento delle entrate e delle uscite, si dovrebbe far riferimento ad un periodo di tempo più congruo, pluriennale (ad es. l'anno idrologico medio, valutato su circa venti-trenta anni).

Si pone però anche il problema della variabilità delle stagioni che sta caratterizzando almeno l'ultimo decennio,

per cui il regime delle precipitazioni e l'andamento delle temperature non sembrano seguire pienamente i trend di qualche decennio addietro. Si possono riscontrare infatti periodi particolarmente piovosi o particolarmente siccitosi, variazione nel numero di giorni piovosi in un anno, aumento dell'intensità delle piogge, sensibili variazioni termiche ecc. Questi aspetti possono incidere in maniera significativa nel computo del bilancio, con differenze ad esempio nei tassi di infiltrazione, nella quantificazione dei deflussi superficiali, ancorché nelle precipitazioni stesse. Da qui il motivo per cui potrebbe essere utile individuare un periodo di tempo in maniera "ragionata", compatibile con le caratteristiche meteorologiche "aggiornate" di una determinata area di studio e in grado di essere efficace nella stima quantitativa dei volumi idrici in gioco nel breve-medio termine, fermo restando il pur sempre imprevedibile scenario meteorologico di cui si "pretendono" previsioni.

Ciò che certamente non cambia, almeno nel periodo di tempo che si considera, è il contesto idro-strutturale, che solo un geologo virtuoso riesce a determinare con sufficiente attendibilità.

In questo capitolo saranno forniti elementi utili circa il reperimento e il trattamento dei dati idrologici di base, senza entrare nel merito dell'individuazione del bacino idrogeologico, per il quale è necessario l'approccio geologico e idro-strutturale, possibilmente affiancato da indagini idrogeochimico-isotopiche, attraverso il quale individuare i litotipi permeabili, semi-permeabili e impermeabili, i complessi idrogeologici, la loro disposizione e il loro assetto geometrico, le aree di alimentazione e recapito.

La quantificazione dell'equazione di bilancio comporta quindi la stima di ogni singola variabile dell'equazione, sia per quanto riguarda le entrate (precipitazioni **P**), sia per le uscite (evapotraspirazione reale **E_r**, ruscellamento o deflusso superficiale **R**, infiltrazione **I**). È tuttavia doveroso ricordare che, in presenza di aree o bacini idrografici (quindi non idrogeologici), il termine **I** può comportarsi sia da uscita che da entrata. Naturalmente, ricavare uno qualsiasi dei termini dell'equazione per differenza, noti gli altri tre, può essere fatto solo ed esclusivamente per un bacino idrogeologico chiuso; per qualsiasi area o bacino in cui non ci sia certezza della effettiva chiusura, ciò comporterebbe dichiararne la chiusura a priori, rischiando di commettere gravi errori nell'interpretazione dei dati e nella quantificazione della risorsa.

Buona parte dei fattori suddetti necessita di almeno tre informazioni basilari, ovvero precipitazioni, temperatura e deflussi superficiali, per cui si rende necessario reperirli. In considerazione dell'esigenza di avere dati pluriennali, la cosa migliore da fare è quella di attingere alle banche dati gestite dagli enti preposti al monitoraggio meteo-climatico. In Italia questo compito

viene di norma svolto dai Centri Funzionali Regionali, ma esistono anche diverse altre strutture, pubbliche e private, che gestiscono reti di monitoraggio dei dati idrologici, per cui, di volta in volta, è utile accertarsi degli strumenti di monitoraggio presenti in una data area verificandone anche la serie storica. Ad esempio, stazioni di monitoraggio, prevalentemente pluviometrico, talvolta anche idrometrico e termometrico, sono gestite anche dai consorzi di bonifica e dagli enti gestori delle reti acquedottistiche.

In Toscana, attualmente, il territorio è coperto da una rete assai fornita e ben distribuita di stazioni che operano in gran parte in telemisura, gestite principalmente dal Servizio Idrologico Regionale (S.I.R. - <http://www.sir.toscana.it>) (ex Ufficio Idrografico e Mareografico di Pisa) e dall'Agenzia Regionale per lo Sviluppo e l'Innovazione nel settore Agricolo-forestale (A.R.S.I.A. - www.arsia.toscana.it). Tutti questi dati, integrati da quelli rilevati da altre istituzioni pubbliche come il Laboratorio per la Meteorologia e la Modellistica Ambientale (La.M.M.A. - www.lamma.rete.toscana.it) e l'Istituto di Biometeorologia del C.N.R. (www.ibimet.cnr.it), convergono sul portale del Centro Funzionale Regionale (<http://www.cfr.toscana.it>) istituito dalla Regione Toscana con fini di Protezione Civile. Presso il Centro Funzionale è possibile accedere, liberamente o su specifica richiesta, alle banche dati relative ai dati pluviometrici, termometrici, idrometrici e piezometrici delle stazioni di monitoraggio gestite dall'ente. Oltre a questo, esistono anche altre importanti risorse di dati, in particolare pluviometrici e termometrici, tra cui si ricorda il servizio di Meteopuane (<http://www.meteopuane.it>) per la provincia di Massa-Carrara, che implementa significativamente la rete di monitoraggio e controllo regionale in un'area, quella apuana, particolarmente sensibile a differenze locali in termini di precipitazioni e temperatura.

2.5. Precipitazioni

Sempre con riferimento alla Regione Toscana, il Centro Funzionale gestisce attualmente diverse centinaia di stazioni pluviometriche, in buona parte automatiche (Figura 8), altre ancora di tipo tradizionale (Figura 9). Alcune di queste ultime sono dismesse, ma conservano significative serie storiche, utili nella elaborazione di dati climatici sul medio-lungo periodo. La disponibilità dei servizi on-line sta anche permettendo di accedere direttamente o su richiesta ai dati contenuti nei vecchi Annali Idrologici prodotti dagli ex Uffici Idrografici e Mareografici nazionali. In Figura 10 è riportata un esempio di schermata dei dati disponibili on-line per una stazione pluviometrica.



Figura 8 - Mappa delle stazioni pluviometriche automatiche gestite dal SIR (<http://www.sir.toscana.it>)

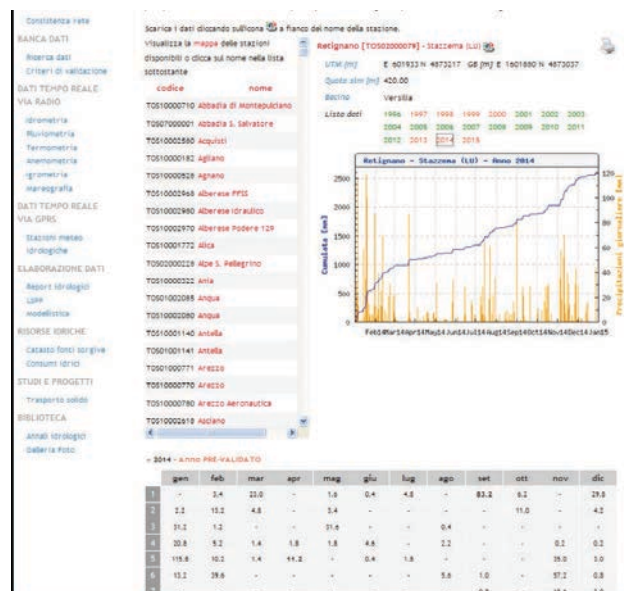


Figura 10 - Esempio di schermata di dati consultabili (ed estraibili) nella banca dati del Servizio Idrologico Regionale.



Figura 9 - Mappa delle stazioni pluviometriche tradizionali gestite dal SIR (<http://www.sir.toscana.it>).

La rete di monitoraggio pluviometrico della Regione Toscana è certamente di ottimo livello, tra le migliori sul territorio nazionale, anche se, come è fisiologico, non tutte le aree sono egualmente coperte. I problemi maggiori si riscontrano soprattutto con le alte quote, dove il numero delle stazioni è minore e dove invece le precipitazioni possono variare in maniera importante, sia per l'effetto quota, ma anche in luoghi vicini per effetto di locali microclimi. In altri casi, può capitare che alcune stazioni di monitoraggio non abbiano funzionato per un significativo lasso di tempo all'interno del periodo considerato. A fronte di queste problematiche possono essere adottate due procedure (rispettivamente dette di confronto e delle stazioni fittizie) finalizzate a migliorare, sia pur con una certa approssimazione, la distribuzione dei dati sia in termini temporali sia territoriali.

La procedura di confronto può essere utilizzata per completare le serie di dati relative a stazioni non funzionanti in periodi di interesse: disponendo ad esempio di due serie di osservazioni comparabili, delle quali una completa e l'altra con minor periodo di funzionamento, il metodo prevede che si possa ammettere, entro certi limiti, che il rapporto tra i rispettivi valori medi riferiti al periodo di funzionamento comune alle due stazioni sia valevole anche per il periodo di assenza di rilievi nella stazione carente di dati.

In aree prive di stazioni di monitoraggio, possono essere collocate stazioni fittizie allo scopo di una maggiore disponibilità di dati sul territorio. La metodologia prevede di attribuire a tali stazioni valori di pioggia calcolati mediante la ricostruzione di relazioni piovosità/quota. Si procede quindi nell'individuare la relazione $P = b_0 + b_1q$, che lega la piovosità (P) alla quota (q), attraverso analisi di quella

regressione basate sui dati pluviometrici ed altimetrici di stazioni esistenti. La scelta di quest'ultime avverrà essenzialmente sulla base della quota e dell'esposizione alle correnti umide predominanti. Poiché suddetta relazione varia da bacino a bacino e, all'interno di uno stesso bacino, da un versante all'altro, talvolta è opportuno determinare più relazioni P-q relative a zone ritenute omogenee sotto l'aspetto morfologico e di esposizione. Una volta completato e integrato il quadro dei dati pluviometrici disponibili sul periodo di tempo considerato, si deve passare da una distribuzione puntuale dei dati disponibili per ogni stazione ad una areale, con metodi di interpolazione ritenuti più opportuni (carte dei topoi, delle isoiete, ecc.). Questo permette di ottenere la lama d'acqua rappresentativa degli afflussi in entrata sull'area di studio.

2.6. Temperatura ed evapotraspirazione

Sulle banche dati gestite dal Centro Funzionale Regionale della Toscana, si possono ottenere anche le informazioni termometriche, che sono indispensabili per la quantificazione del termine evapotraspirazione nella relazione del bilancio idrico. Anche per il monitoraggio di questo parametro, la Regione ha in dotazione diverse stazioni (Figura 11), sia automatiche, sia tradizionali. Come per le stazioni pluviometriche, esistono alcune stazioni termometriche dismesse, ma che conservano significative serie storiche, utili nella elaborazione di dati sul medio-lungo periodo. I dati termometrici sono disponibili on-line o su richiesta.



Figura 11 - Mappa delle stazioni termometriche gestite dal SIR (<http://www.sir.toscana.it>).

Come si può notare anche dalla Figura 11, la rete termometrica della Regione Toscana, così come accade in generale, è meno fornita rispetto a quella pluviometrica. A tale inconveniente si può porre

rimedio accettabile sfruttando il maggior grado di correlazione tra variazione di temperatura e variazione di quota altimetrica (Figura 12).

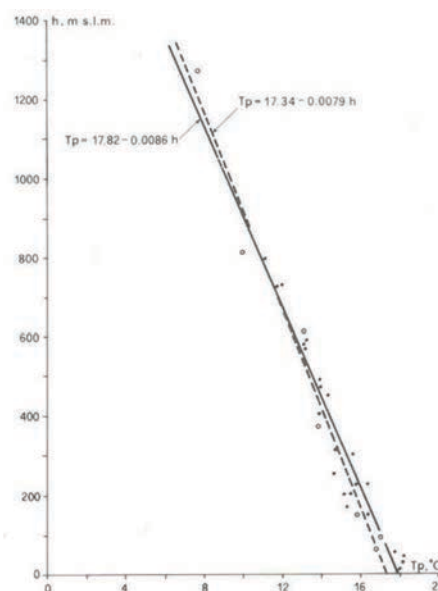


Figura 12 - Esempio di correlazione di dati termometrici, dove si nota una sostanziale similitudine tra la retta di regressione ottenuta dai dati termometrici medi di 30 stazioni funzionanti nei bacini tirrenici della Campania (linea continua) e quella riferita alle sette stazioni della zona dei monti di Sarno (linea tratteggiata) (Celico, 1986).

Dopo aver reso omogenee le informazioni circa i dati termometrici e pluviometrici, la stima dell'evapotraspirazione viene effettuata per ogni stazione termo-pluviometrica sulla base dei valori medi di tali dati, applicando metodologie e formule empiriche, tra cui quelle più usate sono ancora quelle di Turc e di Thornthwaite. La relazione di Turc valuta l'evapotraspirazione reale media annua E_r (in mm):

$$E_r = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

dove P è la precipitazione media annua (in mm) ed L è un parametro denominato potere evaporante dell'atmosfera, funzione cubica della temperatura secondo la relazione $L = 300 + 25T + 0,05T^3$, T è la temperatura media annua (in °C). Santoro (1970), a seguito di uno studio effettuato su 192 bacini idrogeologici della Sicilia, ha proposto una formula modificata per il calcolo di L , che si è dimostrata valida in ambiente arido e semi-arido, per temperature medie annue comprese tra 10 °C e 18 °C: $L = 586 - 10T + 0,05T^3$.

L'approccio di Thornthwaite (1948) permette di ricavare

l'evapotraspirazione reale (Er) tenendo conto anche di quella potenziale (Ep). Quest'ultima è valutata per tutti i mesi (Epm) dell'anno mediante l'equazione seguente:

$$E_{p_m} = K \times 16 \times \left(\frac{10T_m}{I} \right)^\alpha$$

dove: E_{p_m} : evapotraspirazione media mensile (mm);
 K: coefficiente dipendente dalle ore d'insolazione media mensile e funzione unicamente della latitudine e del mese (fornito da appositi abachi, tabella 5);
 I: indice termico annuo, dato dalla sommatoria degli indici termici mensili (i), ciascuno espresso da $i = (T_m/5)^{1,514}$;
 T_m : temperatura media mensile (°C);
 α : funzione cubica dell'indice termico annuo ($\alpha = 0,49239 + 1792 \times 10^{-5}I - 771 \times 10^{-7}I^2 + 675 \times 10^{-9}I^3$).

MESI	G	F	M	A	M	G	L	A	S	O	N	D
Lat. Nord												
36°	0.87	0.85	1.03	1.10	1.21	1.22	1.24	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84
37°	0.86	0.84	1.03	1.10	1.22	1.23	1.25	1.17	1.03	0.97	0.85	0.83
38°	0.85	0.84	1.03	1.10	1.23	1.24	1.25	1.17	1.04	0.96	0.84	0.83
39°	0.85	0.84	1.03	1.11	1.23	1.24	1.26	1.18	1.04	0.96	0.84	0.82
40°	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
41°	0.83	0.83	1.03	1.11	1.25	1.26	1.27	1.19	1.04	0.96	0.82	0.80
42°	0.82	0.83	1.03	1.12	1.26	1.27	1.28	1.19	1.04	0.95	0.82	0.79
43°	0.81	0.82	1.02	1.12	1.26	1.28	1.29	1.20	1.04	0.95	0.81	0.77
44°	0.81	0.82	1.02	1.13	1.27	1.29	1.30	1.20	1.04	0.95	0.80	0.76
45°	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
46°	0.79	0.81	1.02	1.13	1.29	1.31	1.32	1.22	1.04	0.94	0.79	0.74
47°	0.77	0.80	1.02	1.14	1.30	1.32	1.33	1.22	1.04	0.93	0.78	0.73
48°	0.76	0.80	1.02	1.14	1.31	1.33	1.34	1.23	1.05	0.93	0.77	0.72

Tab. 5 - Valori mensili del coefficiente K a diverse latitudini.

Dai valori di E_{p_m} si passa a quelli medi mensili di Er tenendo conto della capacità idrica di campo C (quantità massima di acqua di ritenzione contenuta nel terreno agrario), calcolata con metodi diretti e indiretti (vedi anche Celico, 1986). Nei mesi in cui le precipitazioni P sono superiori ai valori di C abbiamo un'eccedenza idrica D che si allontana dalla zona interessata dall'apparato radicale defluendo sia in superficie (ruscellamento R) che per via sotterranea (infiltrazione efficace Ie): in queste condizioni l'evapotraspirazione reale Er eguaglia quella potenziale (Ep). Nei mesi in cui le precipitazioni P non sono sufficienti ad eguagliare i valori di C si possono verificare i due casi seguenti:
 - nel generico mese (i) di riferimento $E_{r_i} = E_{p_i}$ se la somma tra le P_i e le riserve idriche rimaste nel terreno alla fine del mese precedente (A_{i-1}) riesce almeno ad eguagliare il valore di E_{p_i} ;
 - se ciò non avviene E_{r_i} è inferiore a E_{p_i} ed in particolare è uguale a $P_i + A_{i-1}$, se alla fine del mese precedente esiste ancora una certa riserva invasata nel terreno, oppure corrisponde al valore di P in caso che A_{i-1} sia uguale a zero.

Si giunge al valore dell'evapotraspirazione reale annua (Er) sommando i singoli valori mensili (E_{r_i}). Qualunque sia il metodo utilizzato per stimare il valore dell'evapotraspirazione, come già osservato per i dati pluviometrici anche in questo caso i dati puntuali ottenuti sulle singole stazioni devono essere estesi sull'areale di riferimento, in modo da ottenere la lama d'acqua che esce dal sistema attraverso il processo evapotraspirativo. Non è superfluo ricordare, tuttavia, che le formule utilizzate per la stima dell'evapotraspirazione derivano da sperimentazione in campo agronomico e forestale, per cui il loro utilizzo in campo idrogeologico deve essere considerato con le dovute cautele. Specialmente in bacini montani caratterizzati da affioramenti di rocce carbonatiche, quindi molto permeabili all'infiltrazione delle acque di precipitazione, caratterizzate da scarsa copertura pedologica e vegetazionale, i valori di Er ottenuti con tali formule potrebbero essere sensibilmente sovrastimati.

2.7. Portate dei corsi d'acqua e ruscellamento superficiale

Tra i dati idrologici di base da acquisire in idrogeologia, una voce importante, che rientra ancora nell'equazione del bilancio, è rappresentata dalle uscite dal bacino o dall'area di studio tramite la rete di deflusso o ruscellamento superficiale (R). Questo parametro è facilmente quantificabile per i bacini dei corsi d'acqua più importanti, in modo particolare laddove si consideri la sezione di chiusura del bacino per le analisi idrologiche in corrispondenza di una stazione di monitoraggio idrometrico. Infatti, i corsi d'acqua principali sono solitamente dotati di una o più stazioni di misura delle portate di deflusso, in genere ottenute attraverso l'acquisizione dell'altezza idrometrica del corso d'acqua. Anche per il monitoraggio dei deflussi superficiali, la Regione gestisce molteplici stazioni (Figura 13), sia automatiche (idrometri a ultrasuoni in telemisura), sia tradizionali (idrometrografi e aste idrometriche). I dati idrometrici sono disponibili on-line o su richiesta e, in parte, recepiscono anche le banche dati contenute negli Annali Idrologici (parte II), che fino ad alcuni anni fa rappresentavano la principale fonte anche dei dati idrometrici.

Il passaggio dall'altezza idrometrica misurata dagli strumenti al valore della portata di deflusso avviene generalmente tramite la ricostruzione della curva di deflusso per ogni sezione di misura, ottenuta sperimentalmente attraverso numerose misure delle portate e dei corrispondenti livelli idrici (la sezione del corso d'acqua viene generalmente regolarizzata).

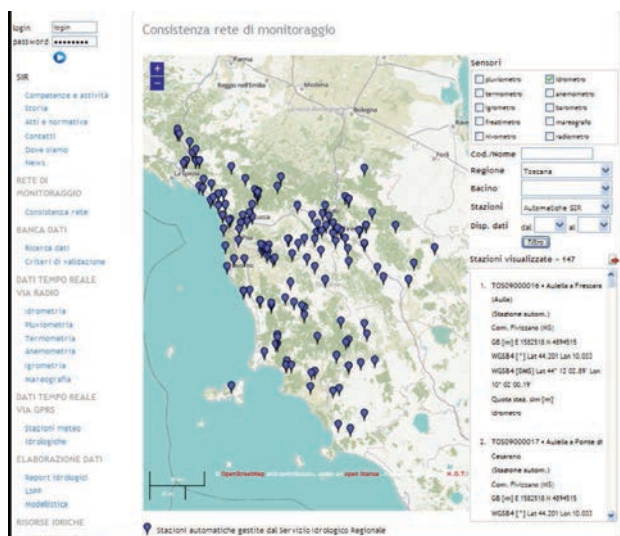


Figura 13 - Mappa delle stazioni idrometriche gestite dal SIR (<http://www.sir.toscana.it>).

Purtroppo, in considerazione della rete idrometrica regionale, significativa ma non sufficientemente capillare per gli obiettivi degli studi idrogeologici, spesso bisogna far ricorso a misure dirette in sito. Le misure consistono nell'analisi della sezione bagnata (S , in m^2) e della velocità media (V_m , in m/s) delle acque che la attraversano (Fig. 14), in modo da poter calcolare la portata (Q , in m^3/s) con l'espressione $Q = V_m \times S$.

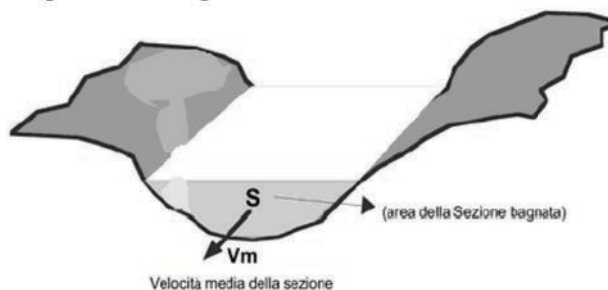


Figura 14 - Schema di sezione bagnata di un corso d'acqua.

Se possibile, è sempre opportuno scegliere sezioni con profilo d'alveo piuttosto regolare, in modo da garantire un'agevole misura delle dimensioni della sezione bagnata (ad es. con aste graduate, per le altezze, e rotella metrica per la larghezza) e di ridurre al minimo gli effetti di un'eventuale turbolenza, che condizionano la stima della velocità del flusso. Quest'ultima viene acquisita mediante mulinelli idrometrici o correntometri.

In alcuni casi, in particolare se gli alvei non sono troppo ampi, possono essere predisposti degli stramazzi, provvisori o permanenti, che regolarizzano la sezione idraulica e permettono valutazioni della portata liquida mediante l'acquisizione del dato del livello idrometrico a monte dell'apertura dello stramazzo. Questo dato viene poi inserito in formule che differiscono in funzione

del tipo di stramazzo usato (ad apertura triangolare, rettangolare, ecc.), dalle quali si ricava la misura della portata in uscita dallo stramazzo (Celico, 1986).

In un bilancio idrologico, anche i dati sui deflussi superficiali dovrebbero essere acquisiti in diverse stagioni e per diversi anni, in modo da disporre di valori medi su un congruo periodo di tempo, comunque compatibile con gli obiettivi del bilancio.

2.8. Livelli piezometrici

La misura dei livelli piezometrici consente di ricostruire la superficie piezometrica della falda oggetto di studio, ovvero di risalire ad una serie di informazioni importanti come la geometria del reticolo di flusso sotterraneo, i quantitativi della risorsa idrica o la portata della falda ad una determinata sezione, di controllare i rapporti tra falda e superfici d'acqua libera, le oscillazioni piezometriche stagionali, ecc.

I rilievi piezometrici si effettuano sia in piezometri che in pozzi, ma generalmente più in quest'ultimi vista la loro consistente presenza sul territorio. Per falde freatiche, l'acquisizione dei dati piezometrici deve comprendere anche le misure relativi alle acque superficiali (corsi d'acqua, laghi, stagni, ecc.), presupposti in collegamento idraulico con la falda.

In generale, il primo passo consiste nella raccolta sistematica delle informazioni relative sia al numero e alla distribuzione dei pozzi nell'area d'interesse, sia alle caratteristiche tecniche dei pozzi stessi (profondità, diametro, quota dei filtri, ecc.). Uno strumento più o meno corredato di tutta questa serie d'informazioni è il database gestito dagli uffici preposti presenti nelle varie province. L'informazione riguardante il condizionamento del pozzo, in particolare posizione dei filtri e sigillatura sovrastante, è essenziale al fine di selezionare i pozzi rappresentativi dell'acquifero oggetto di studio, anche mediante un confronto con la geometria del sistema acquifero nota o desunta. Un altro importante criterio da seguire riguarda la idonea distribuzione dei pozzi in funzione degli obiettivi dello studio; in tal senso, come principio generale può valere quello della distribuzione omogenea dei punti di rilevamento, anche se per problematiche specifiche, quali ad esempio la valutazione dei rapporti fiume-falda, o l'approfondimento di un'area soggetta a forti depressioni piezometriche, è utile infittire, se possibile, i punti di misura in porzioni specifiche dell'area.

Come noto, le misure si effettuano tramite una sonda piezometrica (freatimetro), costituita da una guaina centimetrata flessibile, contenente un circuito elettrico che si chiude una volta a contatto con l'acqua. La chiusura del circuito è avvertita in superficie tramite un segnale acustico e/o ottico. La lettura va effettuata rispetto ad un punto fisso di riferimento (ad es. la bocca pozzo); il valore di profondità della superficie

piezometrica rispetto a tale punto va poi trasformato in quota piezometrica, ovvero in m s.l.m., nota la quota assoluta del piano campagna e/o del punto fisso di riferimento della misura. La tecnologia moderna propone anche sonde piezometriche che, collocate al di sotto della superficie piezometrica in pozzi e piezometri, acquisiscono dati in continuo, con scansione temporale variabile a seconda degli scopi del lavoro. I dati acquisiti dalla sonda possono poi essere trasferiti in remoto all'operatore oppure essere acquisiti in sito mediante appositi supporti informatici. Spesso, tali sonde acquisiscono, oltre al dato piezometrico (acquisito come altezza della colonna d'acqua soprastante la sonda stessa), anche altri parametri utili in idrogeologia (es. temperatura, conducibilità elettrica, pH, ecc.). La Regione Toscana, attraverso il Servizio Idrologico, rende disponibili dati piezometrici acquisiti in continuo da sonde automatiche su una rete costituita da circa 130 punti distribuiti come in Figura 15.

Pur nella marcata variabilità che contrassegna da alcuni anni gli andamenti stagionali delle piogge (e conseguentemente anche l'entità e la variabilità dello sfruttamento delle falde acquifere), nell'ambito di uno studio idrogeologico vengono generalmente eseguite almeno due campagne piezometriche di riferimento, rispettivamente in regime di morbida (alla fine delle stagioni piovose) e in regime di magra (alla fine del periodo siccitoso).

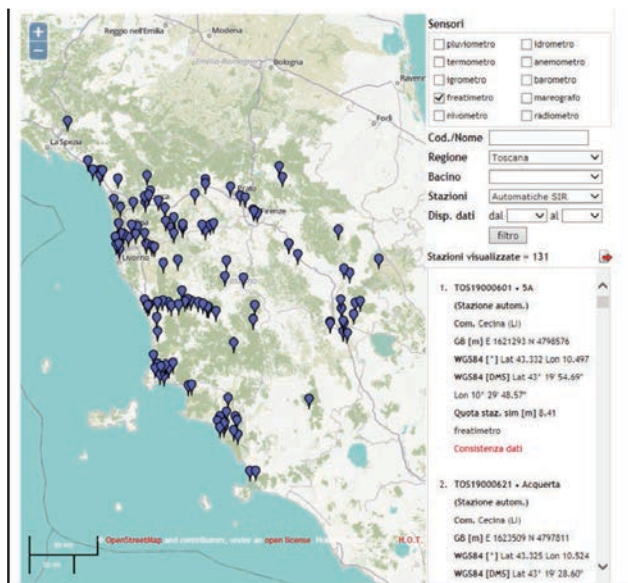


Figura 15 - Mappa delle stazioni freatimetriche gestite dal SIR (<http://www.sir.toscana.it>).

L'elaborazione delle misure permette di ottenere carte piezometriche, carte della soggiacenza (profondità del livello di superficie piezometrica rispetto al p.c.), carte degli abbassamenti (differenze tra i livelli piezometrici di morbida e di magra), tutti strumenti utili per la comprensione dei flussi idrici nel sottosuolo e in supporto agli strumenti di pianificazione e gestione della

risorsa idrica. Per un'adeguata costruzione delle curve isopiezometriche, sia attraverso metodi grafici sia con l'ausilio di algoritmi di calcolo, non è sufficiente la sola operazione di interpolazione dei dati sperimentali, ma devono essere valutati tutti i fattori che possono condizionare la morfologia della superficie piezometrica, quali limiti a flusso e a potenziale imposto, variazioni di permeabilità, presenza di zone di recapito della circolazione (es. sorgenti), restringimenti/allargamenti della sezione percorribile dalle acque, ecc.

2.9. Portate delle sorgenti

L'acquisizione del parametro riguardante la portata delle sorgenti è sempre piuttosto complessa per una serie di motivi. Innanzitutto, perché, salvo pochi casi di sorgenti importanti captate, non esiste una rete di monitoraggio di questa importante informazione. Inoltre, se la sorgente non è captata e quindi rappresenta una scaturigine naturale, non sempre è semplice raccogliere e quantificare tutta l'acqua in emergenza, specialmente laddove trattasi di emergenze diffuse. Per quanto concerne le sorgenti captate, si può far riferimento ai gestori delle reti acquedottistiche, che, in alcuni casi di sorgenti importanti, dispongono di misuratori di portata in continuo, che spesso si basano sulle differenze di pressione registrate con manometri differenziali tra le diverse sezioni di un tubo Venturi. In altri casi, se le sorgenti captate sono state costruite con vasche di raccolta munite di stramazzi, possono essere effettuate misure periodiche della portata.

Nei casi in cui la sorgente sia sprovvista sia di strumenti di misura, sia di stramazzi all'interno di un bottino di presa, per le misure di portata di emergenze naturali si può ricorrere all'utilizzo di mulinelli idrometrici e di idrometri nel flusso idrico nell'alveo in uscita dalla sorgente, qualora la sezione in cui confluiscono le acque sorgive abbia dimensioni e profilo tali da consentirle, analogamente a quanto visto per le misure di portata dei corsi d'acqua. Ugualmente, può essere realizzato sull'alveo uno stramazzo da utilizzare con gli stessi criteri.

I dati di portata delle sorgenti, oltre a poter essere utilizzati per lo sviluppo di bilanci idrologici, possono fornire utili indicazioni, anche se qualitative, riguardo dell'idrodinamica del sistema acquifero sotteso alle sorgenti stesse. Inoltre, l'analisi dei dati nei periodi di esaurimento (curve di esaurimento) permette di stimare i volumi delle risorse dinamiche, delle riserve regolatrici e dell'immagazzinamento dinamico, oltre che di ipotizzare i valori di portata nel periodo di massima magra delle sorgenti. Quest'ultimo aspetto è di indubbio vantaggio ad esempio nella gestione degli acquedotti, poiché consente di conoscere con largo anticipo le portate che saranno disponibili nei periodi di maggiore crisi idrica.

3. GLI ASPETTI IDRAULICI ED IDRODINAMICI

Nei paragrafi seguenti verranno descritte le tipologie di acquifero e le loro caratteristiche dal punto di vista dinamico. Gran parte del materiale utilizzato deriva dalle dispense del corso di Idrogeologia del Prof. Piero Barazzuoli.

3.1. Caratteristiche e tipologie di acquiferi

L'acquifero è un sistema idrologico dinamico identificabile da cinque aspetti principali:

- 1) un serbatoio, che è uno spazio finito caratterizzato dalle sue condizioni ai limiti, dalle sue dimensioni o configurazione, dalla sua organizzazione interna o struttura e si identifica con una formazione idrogeologica o con una combinazione di più formazioni idrogeologiche;
- 2) processi interni idrodinamici, idrochimici ed idrobiologici che regolano le sue funzioni rispetto all'acqua, cioè:
 - immagazzinamento di volumi d'acqua,
 - trasferimento di volumi d'acqua e di energia potenziale,
 - scambi geochimici;
- 3) sequenza del ciclo dell'acqua, caratterizzata dalla coppia input/risposta espressa in funzione del trasferimento;
- 4) variabilità spaziale di tutte queste caratteristiche;
- 5) condizioni di tempo, dato che tutte le misure delle caratteristiche vanno riferite ad uno stesso intervallo temporale, sia esso breve che lungo. In quest'ultimo caso i valori medi delle caratteristiche basate sull'analisi di dati riferiti a serie storiche potrebbero essere usati per fare previsioni.

La configurazione si basa sulle dimensioni dell'acquifero e sulle caratteristiche dei suoi limiti geologici ed idrodinamici:

- la base dell'acquifero (substrato) è costituita sempre da una formazione idrogeologica impermeabile o comunque assai meno permeabile rispetto all'acquifero;
- il limite superiore può essere invece di tre tipi:

- 1) idrodinamico con fluttuazioni libere: acquifero a falda libera o freatica (Figura 16). Il limite superiore della falda è costituito dalla superficie piezometrica, che è un limite idrodinamico. Essa può alzarsi ed abbassarsi liberamente nella formazione idrogeologica permeabile (fluttuazioni della sup. piezometrica), da cui il nome di acquifero a falda libera (o freatica).

La superficie piezometrica è determinata attraverso l'insieme dei livelli piezometrici misurati in vari punti di misura (pozzi e piezometri) ed è riferita al livello del mare.

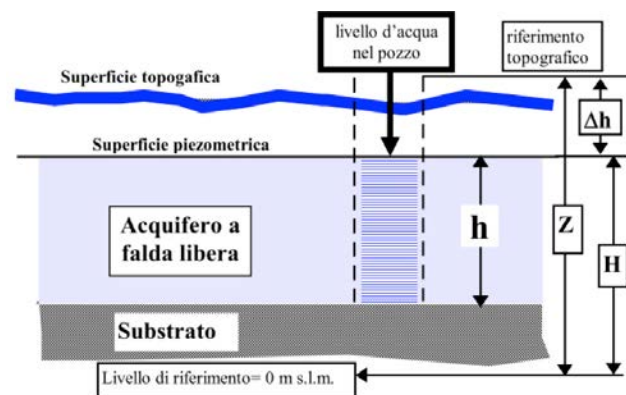


Figura 16– Acquifero a falda libera.

- 2) geologico impermeabile: acquifero a falda confinata (Figura 17). Il limite superiore della falda è costituito da un litotipo impermeabile. Se le condizioni di ricarica lo consentono, la falda contenuta nell'acquifero può essere sottoposta ad una certa pressione. Quando un sondaggio attraversa il tetto di tale tipologia di acquifero, la pressione dell'acqua di falda determina una risalita della colonna d'acqua nel foro, fin quando la pressione dell'acqua viene eguagliata dalla pressione atmosferica. Tale livello costituisce il livello piezometrico della falda in pressione. Nel caso in cui la pressione dell'acqua di falda è tale da far emergere l'acqua al di sopra del campagna (il livello piezometrico al di sopra della superficie del suolo), si parla di acquifero a falda artesianiana. In tal caso l'altezza del livello piezometrico rispetto al piano di campagna viene detta prevalenza.

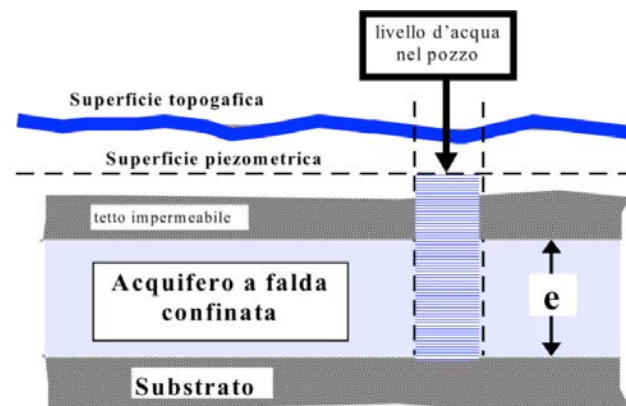


Figura 17 – Acquifero a falda confinata.

- 3) geologico semi-permeabile: acquifero a falda

semiconfinata o a fuga (Figura 18). Quando due falde separate sono messe idraulicamente in comunicazione da una formazione idrogeologica semi-permeabile, sono possibili tra queste (in condizioni idraulicamente favorevoli) scambi idrici chiamati fuga o drenanza. Il fenomeno avviene quando tra le due falde esiste una differenza di potenziale idraulico; in tal caso l'acqua si sposta attraverso il semi-permeabile nella direzione che va dall'acquifero a maggior potenziale a quello a minor potenziale idraulico.

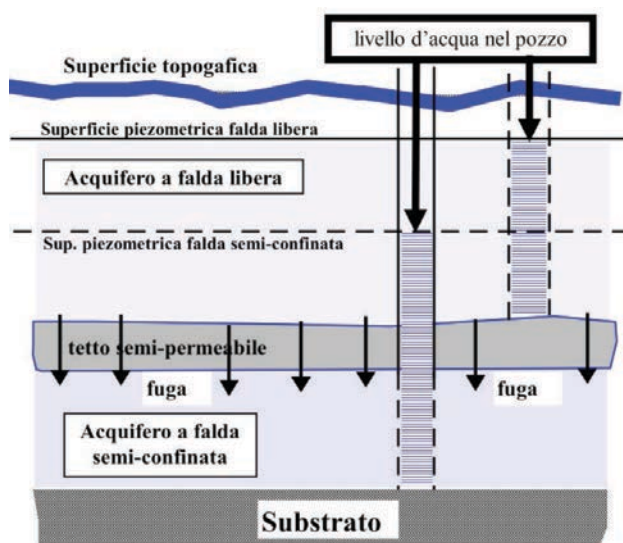


Figura 18 – Acquifero a falda semi-confinata.

Il serbatoio dell'acquifero, alimentato dall'infiltrazione o da corsi d'acqua o da falde affluenti, assolve tre funzioni nei confronti dell'acqua che lo attraversa. Esse sono la conseguenza di meccanismi imposti dalla sua struttura:

- 1) *funzione serbatoio o capacitiva*: immagazzinamento dell'acqua e variazione dell'immagazzinamento; questa funzione è associata al concetto di riserva;
- 2) *funzione di condotta*: cioè quella di permettere il movimento dell'acqua sotterranea di propagare due tipi di influenze:
 - il trasporto di quantità d'acqua, di sostanze minerali ed organiche in soluzione e sospensione e di micro-organismi, dai limiti di apporto (alimentazione) verso quelli di uscita (emergenze naturali ed artificiali);
 - la trasmissione di differenza di pressione e di carico (trasferimento di energia), funzione associata al concetto di deflusso idrico sotterraneo.
- 3) *funzione di scambi o di interazioni* fisico-chimiche tra il serbatoio e l'acqua sotterranea (calore, dissoluzione o precipitazione di sali, scambi ionici, ecc.). Nella zona non

saturo il serbatoio talvolta svolge un ruolo idrobiologico per il potere autodepurante dei suoli. Questa funzione è associata al concetto di qualità dell'acqua sotterranea.

3.2. *Comportamenti dell'acquifero*

L'acquifero è un sistema dinamico che, nei confronti dell'acqua sotterranea, presenta tre comportamenti risultanti dalle funzioni del serbatoio in relazione ad impulsi esterni imposti ai suoi limiti; impulso, trasferimento e risposta. Questi comportamenti assicurano una regolamentazione delle portate e delle caratteristiche idrochimiche, o addirittura idrobiologiche, dei deflussi all'uscita.

L'acquifero subisce ai suoi limiti degli impulsi idrodinamici attraverso apporti di quantità d'acqua (trasferimento di massa) o variazioni di pressione o carico (trasferimento di energia), che sono normalmente di forte intensità e breve durata (ad es. infiltrazione di acqua a seguito di un rovescio di pioggia).

Giocando sulle sue funzioni serbatoio e condotta, l'acquifero assicura una regolazione naturale (modulazione) nello spazio e nel tempo della sua risposta o deflusso. Questa funzione regolatrice, paragonabile a quella di una diga rispetto al regime di un corso d'acqua, svolge un'azione assai più importante (soprattutto se elevati sono i volumi della riserva idrica sotterranea) in quanto questa viene trasferita in tempi molto lunghi (a volte alcuni anni), per cui un solo anno di alimentazione al di sopra della media (anno umido) può compensare l'effetto di più anni deficitari (anni aridi).

I fattori del comportamento idrodinamico di un acquifero sono:

- le condizioni ai limiti: tipi di limite, quantità di ricarica e di deflusso;
- le variazioni dell'immagazzinamento sotterraneo o riserva regolatrice;
- il regime del deflusso idrico sotterraneo;
- lo stato iniziale e le variazioni nel tempo dei tre fattori precedenti: serie storiche delle portate, dei livelli piezometrici e della riserva regolatrice.

3.3. *Movimento dell'acqua nei mezzi porosi Statica dei fluidi nei mezzi porosi saturi*

Tra le leggi dell'idrostatica, quella fondamentale è la legge di Stevino per la quale: la pressione all'interno di un liquido posto alla profondità H è data dalla somma della pressione idrostatica (γH) e della pressione atmosferica che si esercita sulla superficie libera del liquido.

In ciascun punto di un mezzo poroso saturo con un fluido in condizioni statiche ed avente peso specifico γ , esiste

una pressione P tale che, introducendo nel mezzo saturo un tubo piezometrico, in esso l'acqua risale di un'altezza l tale che: $l = P/\gamma$ in modo che si mantenga un equilibrio di pressione.

Se prendiamo un certo piano di riferimento il livello h di acqua nel piezometro è:

$$h = l + Z = (P/\gamma) + Z$$

essendo Z l'altezza del punto in questione rispetto al piano di riferimento. Il valore di h così definito si chiama livello piezometrico (Figura 19).

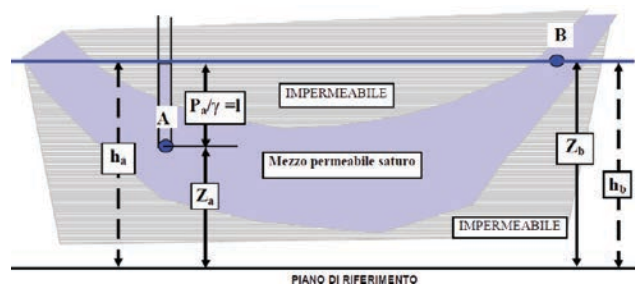


Figura 19 – Livello dell'acqua in un mezzo poroso con il fluido in quiete.

In un sistema statico è facile dimostrare che in ciascun punto del mezzo poroso si ha lo stesso valore di h , che è quindi costante.

Se si tratta di un acquifero a falda libera il livello piezometrico segnerà il passaggio tra la zona saturata e quella non saturata e si troverà semplicemente ad una pressione pari a quella atmosferica.

3.4. *Movimenti dell'acqua nel sottosuolo Dinamica dei fluidi*

Le acque che si infiltrano nel sottosuolo sono soggette a due tipi di movimenti prevalenti:

- movimenti sub-verticali, nei quali c'è una netta prevalenza della componente verticale rispetto a quella orizzontale e che riguardano la zona di aerazione (non saturata). Questi comprendono il movimento discendente legato alla percolazione delle acque verso la falda, il movimento ascendente dovuto alla capillarità e le oscillazioni del livello piezometrico (con alternanza di movimenti ascendenti e discendenti);
- movimenti sub-orizzontali, dove viceversa c'è una netta prevalenza della componente orizzontale rispetto a quella verticale. Essi avvengono nella zona di saturazione e riguardano lo spostamento dell'acqua di falda (o deflusso della falda) sotto l'azione della forza di gravità. Questi movimenti, quindi, comportano il trasferimento di quantitativi d'acqua, variabili nel tempo, dalle zone di alimentazione a quelle di recapito.

Gli studi idrogeologici riguardano soprattutto le acque di movimento sub-orizzontale perché sono più

facilmente ed utilmente estraibili. Quelle caratterizzate da movimenti sub-verticali interessano in particolare ai fini della valutazione della permeabilità della zona non saturata, delle risorse disponibili e nello studio dell'evoluzione dell'inquinamento nella zona non saturata. Infatti, le acque che percolano verso il basso rappresentano la ricarica dell'acquifero ed anche il mezzo principale di introduzione di sostanze inquinanti, mentre quelle che migrano verso l'alto coincidono con delle perdite in quanto si tratta di volumi idrici che sfuggono alla possibilità di utilizzazione.

Per quanto riguarda il deflusso della falda, a grande scala è possibile distinguere il movimento dato da una serie di piccolissimi tubi di flusso (filetti idrici o filetti liquidi), aventi sezione infinitesima, i quali seguono traiettorie diverse all'interno dei vuoti intercomunicanti della roccia/terreno; a piccola scala si ha il movimento della corrente idrica che, costituita dall'insieme dei filetti idrici della falda, si muove secondo direzione e verso derivanti dall'insieme di tutte le traiettorie esistenti a livello elementare e, quindi, secondo linee di corrente o linee di flusso (Figura 20).

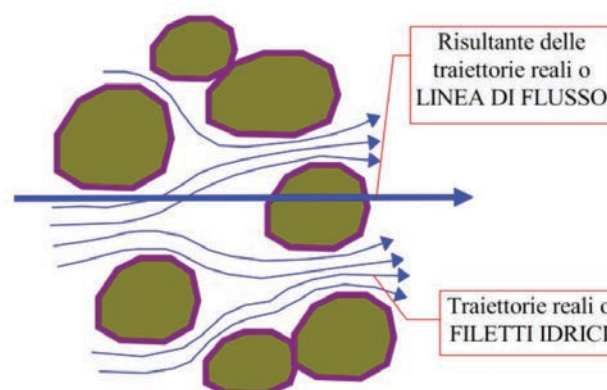


Figura 20 - Filetti idrici e linee di flusso.

Se in un punto qualsiasi della massa liquida, al tempo t , le particelle di un filetto liquido che si succedono hanno la stessa velocità, occupano posizioni identiche e presentano la stessa pressione, la falda si muove in moto permanente (anche se la velocità delle particelle può cambiare lungo la stessa traiettoria in funzione della larghezza dei tubi di flusso). Se la sezione dell'acquifero è costante e se la velocità delle particelle dei singoli filetti liquidi risulta anch'essa costante nelle diverse sezioni (ovvero non intervengono accelerazioni o decelerazioni), si ha un caso particolare di moto permanente che viene chiamato moto uniforme. Se, invece, velocità e pressione risultano variabili si ha il moto vario, che è quello che si riscontra nella realtà delle falde idriche; esso può comunque essere assimilato ad una successione di stati di moto permanente in quanto le acque di falda si muovono con estrema lentezza.

I filetti liquidi (e quindi le linee di flusso), la cui esistenza è quindi associata al concetto di moto permanente, sono tagliati ortogonalmente da linee equipotenziali o linee

di eguale carico piezometrico; filetti liquidi e linee equipotenziali formano un reticolo di flusso (Figura 21).

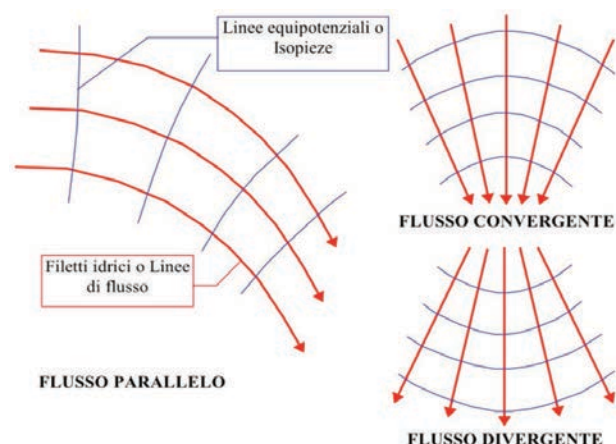


Figura 21 - Reticoli di flusso.

Si dice fluido perfetto un fluido incompressibile e che non presenta attriti interni. In natura non esiste alcun fluido del genere, ma nei casi di basse velocità ciò che segue è valido per molti liquidi, tra cui l'acqua, considerati con flusso stazionario, cioè con campo vettoriale delle velocità del fluido costante nel tempo (chiaramente in un flusso stazionario c'è movimento continuo del fluido e la velocità è in genere diversa nei vari punti).

Nei mezzi porosi saturi il percorso seguito da un elemento di fluido è normalmente una linea curva, cui si dà il nome di linea di flusso, che può essere evidenziata sperimentalmente disperdendo un colorante in acqua che si muove a basse velocità. Le linee di flusso sono fra loro, a seconda delle condizioni, parallele, convergenti o divergenti, ma non si intersecano mai (Figura 21).

In ogni punto del fluido, la sua velocità è rappresentabile come un vettore tangente alla linea di flusso che vi passa. L'insieme delle linee di flusso costituisce quindi il campo vettoriale delle velocità del fluido; esse rappresentano l'analogo delle linee di forza in un campo di forze.

Un fascio di linee di flusso viene comunemente chiamato tubo di flusso (Figura 22); lo si può visualizzare come un tubo flessibile nel quale scorre una parte del fluido e dalle cui pareti laterali non esce e non entra altro fluido. Il concetto di tubo di flusso è molto importante perché riduce lo studio del moto di un fluido ad un problema unidimensionale: l'unica direzione che interessa è quella parallela alle linee di flusso.

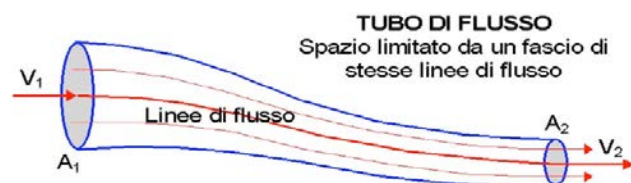


Figura 22 - Tubo di flusso.

Consideriamo il tubo di flusso in Figura 22 e supponiamo

che a tutte le linee di flusso competa la stessa velocità V_1 in entrata attraverso la sezione A_1 e V_2 in uscita attraverso la sezione A_2 . Poiché nel tubo è contenuta sempre la stessa quantità di liquido e poiché questo è praticamente incompressibile, la massa M_1 che entra nel tubo nell'intervallo di tempo Δt deve essere uguale alla massa M_2 che esce dal tubo nello stesso intervallo di tempo. Detto γ il peso specifico del fluido si ha:

$$M_1 = \gamma \cdot A_1 \cdot V_1 \cdot \Delta t \text{ e } M_2 = \gamma \cdot A_2 \cdot V_2 \cdot \Delta t$$

e quindi:

$$\gamma \cdot A_1 \cdot V_1 \cdot \Delta t = \gamma \cdot A_2 \cdot V_2 \cdot \Delta t,$$

da cui si ricava:

$$A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Questa relazione esprime il fatto che la velocità del fluido in un punto del tubo di flusso è inversamente proporzionale alla sezione del tubo di flusso in quel punto.

Tale equazione è detta "equazione di continuità" per i fluidi "perfetti" ed è l'espressione matematica del principio della conservazione della massa applicata al flusso stazionario di un fluido.

Nel campo dell'idrogeologia è importante riformulare tale equazione in termini di portata del tubo di flusso. La portata è definita come la quantità di fluido (Q) che fluisce attraverso una sezione del condotto nell'unità di tempo (t), cioè: $\Delta Q/\Delta t$. La quantità di liquido è quella contenuta in un cilindro di sezione A e lunghezza $L = V \Delta t$. La portata è quindi data da:

$$Q = \Delta Q/\Delta t = (A \cdot L)/\Delta t = (A \cdot V \cdot \Delta t)/\Delta t = A \cdot V.$$

Confrontando questa con l'equazione di continuità, possiamo affermare che: $Q_1 = Q_2$, cioè la portata di un tubo di flusso in cui fluisce un liquido è costante nel tempo. Pertanto, in un acquifero a sezione variabile dove la corrente idrica si muove di moto permanente, la portata Q (cioè il volume d'acqua che attraversa una sezione normale alla direzione di flusso nell'unità di tempo) non cambia e da questo si deduce che, in una corrente in moto permanente costituita da un liquido incompressibile, la portata è costante in qualunque sezione e che la velocità del liquido varia in proporzione inversa rispetto alla sezione.

Se si considera un cilindro di materiale poroso con un fluido in movimento, si può scrivere l'equazione di Bernoulli relativamente ai punti A e B posti ad una distanza ΔL nella direzione del flusso (Figura 23):

$$\frac{P_a}{\gamma a} + Z_a + \frac{V_a^2}{2g} = \frac{P_b}{\gamma b} + Z_b + \frac{V_b^2}{2g} + \Delta h$$

dove P è la pressione idrostatica e V è la velocità reale,

mentre Δh è la perdita di carico tra il punto A ed il punto B dovuta all'attrito tra fluido e granuli e γ è il peso specifico del fluido. Il livello piezometrico statico in ciascun punto sarà:

$$h = (P/\gamma) + Z$$

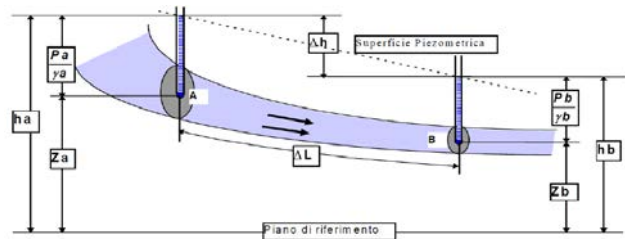


Figura 23 - Livello dell'acqua in due punti di un mezzo poroso con il fluido in movimento.

La perdita di carico (Δh) fra i punti A e B in rapporto alla loro distanza (ΔL) definisce il gradiente idraulico (i), vale a dire la pendenza della superficie piezometrica.

$$i = \Delta h / \Delta L$$

Tale principio è importante in quanto stabilisce direzione e verso del flusso in relazione a maggiori o minori perdite di carico (i), utili per l'analisi quali-quantitativa della superficie piezometrica.

Nel 1856, l'ingegnere francese Darcy, attraverso esperienze ed esperimenti di laboratorio (Figura 24), dimostrò che in un acquifero ideale teorico (poroso, continuo, omogeneo, isotropo e poggiante su di un substrato impermeabile orizzontale) di sezione A, nel quale la falda defluisce in regime laminare, la portata (Q) che vi defluisce è inversamente proporzionale alla lunghezza dell'acquifero (l) ed è direttamente proporzionale alla perdita di carico piezometrico (Δh), nonché funzione di un coefficiente di proporzionalità (K), detto coefficiente di permeabilità (o anche conducibilità idraulica), legato alle caratteristiche dell'acquifero ed avente dimensionai di una velocità (unità di misura più comune m/s o cm/s) secondo la Legge di Darcy:

$$Q = K A \Delta h / l$$

dove il rapporto $\Delta h / l = i$ è il gradiente idraulico (legge di conservazione dell'energia o di Bernoulli), o perdita unitaria di carico piezometrico o di potenziale. Pertanto, la Legge di Darcy può anche scriversi nella più nota forma:

$$Q = K A i$$

che può anche essere così espressa: $Q = K H L i$ dove H ed L sono, rispettivamente, l'altezza e la larghezza della sezione media dell'acquifero (A) perpendicolare alla direzione di flusso della falda.

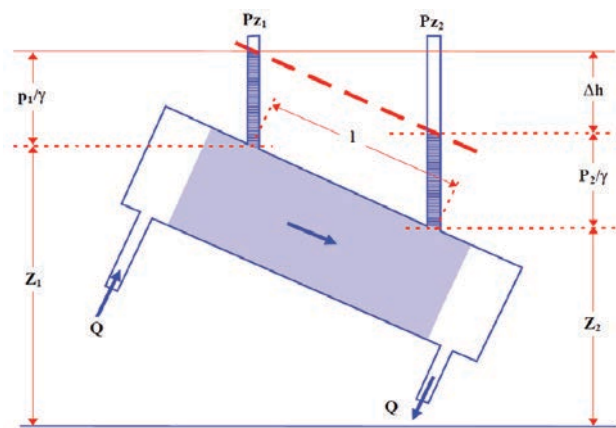


Figura 24 - Dispositivo di Darcy.

Come detto in precedenza, per l'applicazione della Legge di Darcy, il materiale dell'acquifero deve essere continuo, omogeneo ed isotropo, condizioni che raramente si realizzano in natura, dove i terreni sono generalmente eterogenei ed anisotropi. Tuttavia, nonostante l'eterogeneità dei terreni visti in dettaglio, in generale, considerando grandi masse di terreno, gli acquiferi reali possono essere frequentemente ricondotti con buona approssimazione alle condizioni ideali; di conseguenza, i parametri idrodinamici valutati in condizioni naturali e per volumi rilevanti di acquifero mostrano una ragionevole attendibilità.

Per una migliore comprensione, si deve ricordare che:

1.1. un mezzo permeabile è detto continuo quando è dotato di vuoti interconnessi nel senso del flusso dell'acqua. Le rocce sciolte, provviste di pori, e le rocce compatte, interessate da una rete di microfessure, costituiscono dei mezzi continui; al contrario, le rocce compatte a microfessure e quelle carsiche sono mezzi discontinui (tabella 6).

SCALA DI RIFERIMENTO	TIPI DI VUOTI		TIPI DI MEZZI	
Microscopica dell'ordine da 0.1 a 1mm	Pori	intercristalli intergranali	poroso	continuo
	Microfessure	diaclasti, giunti, scistosità	fessurato	
Macroscopica dell'ordine superiore a qualche mm	Macrofessure	macrofessure karst: canali, caverne		discontinuo

Tabella 6 - Mezzi continui e discontinui in rapporto alla circolazione idrica sotterranea.

1.2. un mezzo è detto isotropo quando le sue caratteristiche fisiche (nel nostro caso con particolare riferimento alla granulometria ed alla permeabilità, quindi in rapporto al flusso idrico sotterraneo) sono costanti nelle tre direzioni dello spazio (Figura 25); nel caso contrario, è detto anisotropo. Un mezzo è detto omogeneo in relazione al suo comportamento idraulico, quando presenta, in tutti i punti nel senso del flusso idrico sotterraneo, caratteristiche fisiche costanti; nel caso contrario, il mezzo è eterogeneo. Un mezzo omogeneo può essere isotropo od anisotropo, mentre un mezzo eterogeneo è sempre anisotropo.

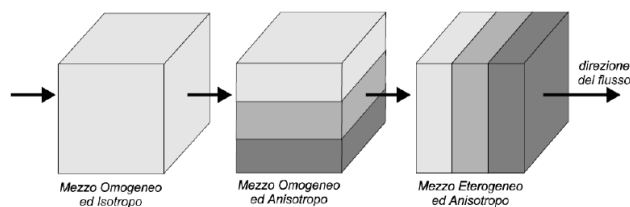


Figura 25 - Omogeneità ed isotropia in relazione al flusso idrico sotterraneo.

1.3. L'insieme delle condizioni alle quali è stata enunciata la Legge di Darcy, in particolare per quanto riguarda il regime laminare, può quindi sembrare molto restrittivo se si considerano le numerose discontinuità presenti nelle formazioni idrogeologiche (stratificazioni, passaggi laterali di facies, fratturazione, scistosità, ecc.): in realtà, i casi ai quali la Legge di Darcy non è applicabile (Figura 26) sono limitati a condizioni molto eterogenee, alle reti carsiche e, in generale, quando la velocità di flusso è molto elevata (come nelle vicinanze di sorgenti o opere di captazione).

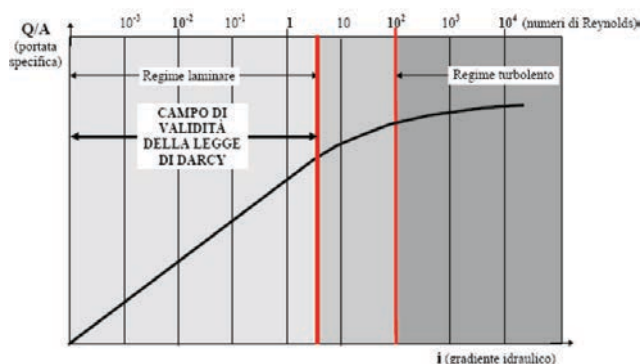


Figura 26 - Ambito di validità della Legge di Darcy in relazione al regime del flusso idrico sotterraneo.

3.5. Trasmissività, coefficiente di immagazzinamento e diffusività

Poiché la produttività di un acquifero è funzione non solo della sua permeabilità (K), ma anche dello spessore della sua parte satura (h), nei calcoli idrogeologici si tiene spesso conto di un altro importante parametro chiamato trasmissività (T), usualmente espresso in m²/s, che scaturisce dal prodotto:

$$T = K h \quad \text{per le falde libere (Figura 27)}$$

$$T = K e \quad \text{per le falde confinate (Figura 28)}$$

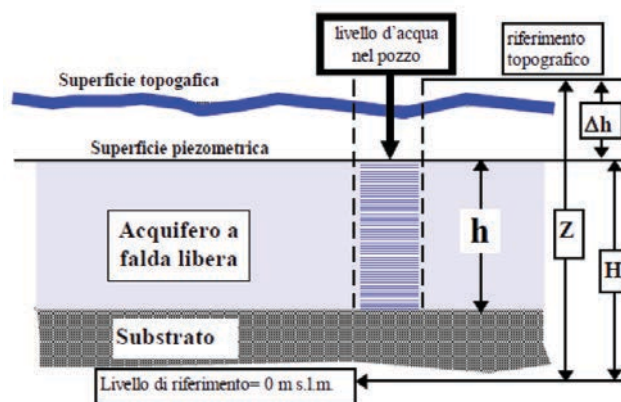


Figura 27 - La Trasmissività negli acquiferi a falda libera $T = K h$ dove h = spessore saturo dell'acquifero (corrispondente alla distanza tra il substrato impermeabile e la superficie piezometrica).

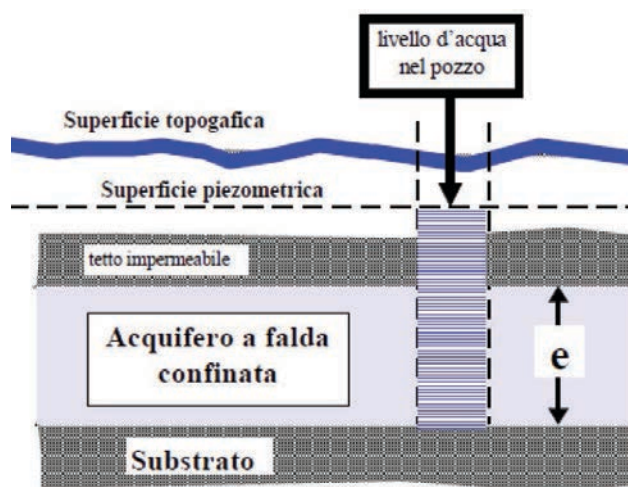


Figura 28 - La Trasmissività negli acquiferi a falda confinata $T = K e$ dove e = spessore dell'acquifero (corrispondente alla distanza tra il substrato impermeabile ed il tetto impermeabile).

L'utilità di questo parametro è dovuta soprattutto al fatto che, contrariamente a quanto si verifica con la permeabilità, esso consente di calcolare la portata della falda anche senza conoscere lo spessore saturo dell'acquifero, esprimendo la Legge di Darcy con la seguente espressione:

$$Q = T L i$$

In teoria, un mezzo poco permeabile può essere anche molto trasmissivo se il suo spessore saturo è sufficientemente grande; analogamente, due acquiferi aventi uguale permeabilità possono avere valori di trasmissività completamente diversi, se i loro spessori sono differenti.

Con riferimento al concetto di permeabilità espresso in precedenza, la trasmissività può essere definita come il volume di acqua gravifica che passa nell'unità di tempo, per effetto di un gradiente idraulico unitario, attraverso una sezione perpendicolare alla direzione di flusso

dell'acqua avente una larghezza unitaria ed un'altezza pari allo spessore saturo dell'acquifero: essa traduce la capacità che ha l'acquifero di trasmettere acqua.

Un altro parametro assai importante in idrogeologia è il coefficiente di immagazzinamento (S), adimensionale: esso è definito come il rapporto tra il volume d'acqua liberato o immagazzinato, a seguito di una variazione unitaria del livello piezometrico, in un prisma verticale di materiale acquifero saturo, ed il volume del prisma stesso. Nel caso di acquiferi liberi, esso è rappresentato dal volume d'acqua estraibile per gravità (Figura 27): infatti, la perturbazione indotta dalla depressione piezometrica si trasmette lungo le linee di flusso e provoca lo svuotamento di acqua gravifica. Pertanto, questa grandezza coincide in sostanza con la porosità efficace con valori solitamente compresi tra $3 \cdot 10^{-1}$ e 10^{-2} ; a tal proposito, si deve osservare che tale coefficiente si attesta su un valore costante soltanto se la prova di emungimento, con la quale viene solitamente valutato, è sufficientemente lunga e che tale valore risulta prossimo a quello della porosità efficace se la depressione piezometrica indotta durante la prova è relativamente grande.

Negli acquiferi confinati, invece, a parità di caratteristiche idrogeologiche con quelli liberi, il coefficiente di immagazzinamento assume valori molto bassi (generalmente compresi 10^{-3} e 10^{-6}); in tal caso, esso non è confrontabile con la porosità efficace perché è dovuto alla deformazione elastica del sistema acqua più roccia (vedi Figura 29).

Il fenomeno fisico può essere così sintetizzato. L'emungimento artificiale di acqua non provoca alcuno svuotamento dell'acquifero, ma determina soltanto una depressione piezometrica che si traduce in una diminuzione della pressione idrostatica; l'acqua rimasta nell'acquifero si dilata per espansione elastica e non equilibra più il peso degli strati sovrastanti. Conseguentemente, lo scheletro dell'orizzonte acquifero si deforma elasticamente a spese degli spazi interstiziali e la porosità dello stesso acquifero diminuisce a livello microscopico: si verifica, quindi, l'espulsione di ulteriori quantitativi d'acqua.

Jacob dimostrò che, negli acquiferi confinati, il coefficiente di immagazzinamento è dato dalla seguente espressione:

$$S = \gamma n_e e [\beta + (\alpha/n_e)]$$

dove: γ = peso specifico dell'acqua (10^{-3} kg/cm³)

β = coefficiente di compressibilità dell'acqua ($4.5 \cdot 10^{-5}$ cm²/kg);

α = coefficiente di compressibilità verticale del terreno ($1 \cdot 10^{-3}$ cm²/kg nelle sabbie e $1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-6}$ cm²/kg nei calcari);

n_e = porosità efficace dell'acquifero;

e = spessore dell'acquifero.

Negli acquiferi semiconfinati, il valore del coefficiente di immagazzinamento è determinato dalla somma dei

due fenomeni descritti in precedenza. Infatti, all'inizio dell'emungimento, la falda libera del mezzo superiore non reagisce mentre quella dell'acquifero inferiore si comporta come una falda confinata; dopo un certo tempo, che può essere anche molto lungo, la piezometrica della falda superiore tende anch'essa a deprimersi.

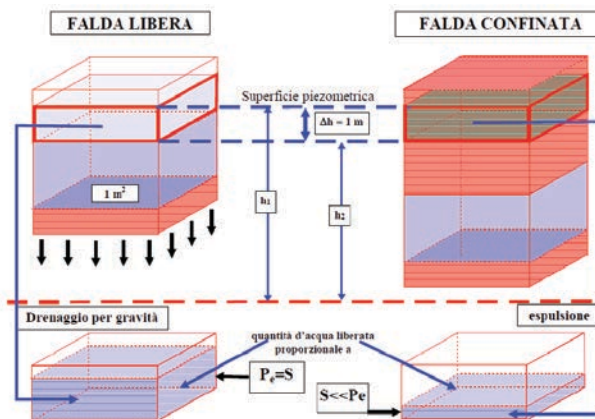


Figura 29 - Rapporto tra coefficiente di immagazzinamento (S) e porosità efficace (p_e o n_e) negli acquiferi a falda libera ed a falda confinata.

Un altro parametro di interesse idrogeologico è detto diffusività (D) ed è uguale al rapporto tra la trasmissività ed il coefficiente di immagazzinamento:

$$D = T/S$$

Questa grandezza, usualmente espressa in m²/s, tiene conto della propagazione delle perturbazioni indotte nell'acquifero.

3.6. Superfici piezometriche

Le linee isopieze (o isopiezometriche, o isofreatiche per le sole falde freatiche) sono linee equipotenziali che rappresentano il luogo dei punti aventi uguale livello piezometrico. Sulla carta topografica, nei punti indicanti la posizione dei pozzi e/o dei piezometri utilizzati, si segnano le altezze assolute del livello piezometrico ivi rilevato. Se si utilizza l'interpolazione lineare, si uniscono tra loro tutti i punti di controllo, così da formare una rete a maglie triangolari, con ai vertici i pozzi e/o i piezometri. A questo punto, agendo su ciascun lato delle maglie triangolari, si suppone che in esso, passando da un punto di misura all'altro, il potenziale (o altezza) piezometrico aumenti o diminuisca in maniera lineare (a pendenza o gradiente costante) e quindi in funzione della distanza tra i singoli punti di misura. Scelta l'equidistanza con la quale si ritenga più opportuno rappresentare la superficie piezometrica (ad es. 0,5, 1, 5, 10 m), si calcolano su ciascun segmento (in funzione del gradiente idraulico tra le stazioni poste agli estremi) i punti corrispondenti alla posizione di isopieze avente valore multiplo della equidistanza prescelta. A questo punto si uniscono con una linea tutti i punti che, nei

segmenti di interpolazione, risulteranno avere la stessa altezza piezometrica o potenziale, tracciando così le isopieze. Tale risultato è possibile ottenerlo, oltre che con il metodo manuale suddetto, anche attraverso l'utilizzo dei software di interpolazione (Figura 30). I software propongono in genere vari metodi di interpolazione, oltre a quello lineare, in modo da scegliere quello ritenuto più appropriato a descrivere la superficie piezometrica rilevata.

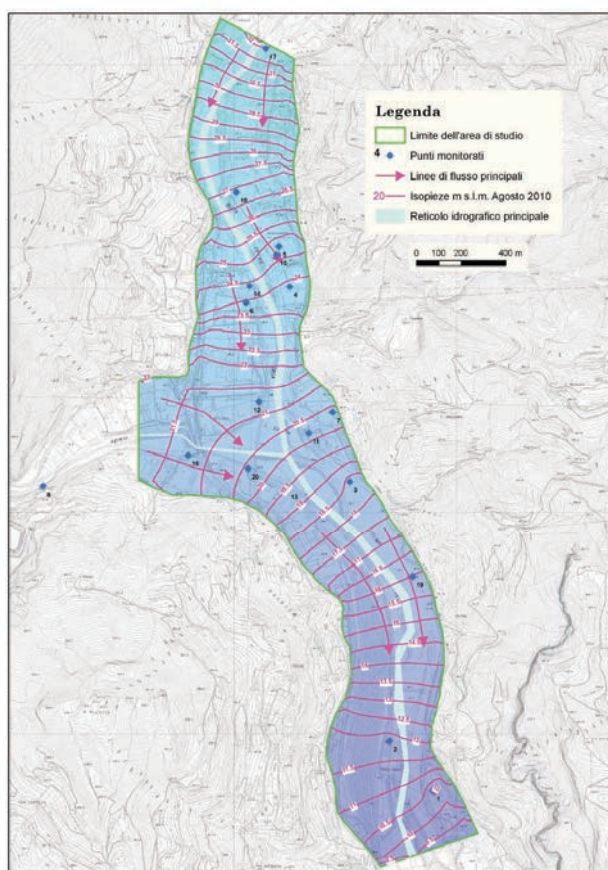


Figura 30 - Esempio di superficie piezometrica elaborata con software di interpolazione.

Nella pratica il geologo dovrà preoccuparsi di avere a disposizione un numero sufficiente e ben distribuito di punti di monitoraggio della soggiacenza della falda e che i valori misurati si riferiscano alla stessa falda idrica in caso di sistemi multifalda. Inoltre, le osservazioni dovrebbero essere ripetute almeno in stagione di morbida e di magra, in modo da valutare l'oscillazione della superficie piezometrica nell'anno idrologico.

3.7. Interpretazione qualitativa della superficie piezometrica

Lo studio delle superfici piezometriche permette di ottenere dei dati di base in relazione al movimento ed al comportamento dell'acqua sotterranea. Questi consentiranno un'interpretazione qualitativa della superficie piezometrica ed una interpretazione

quantitativa attraverso metodi analitici semplici o attraverso lo studio dell'evoluzione di tali superfici nel corso del tempo, con o senza l'ausilio di modelli matematici. In funzione della distanza tra le isopieze, della concavità e della disposizione relativa delle linee di flusso, si distinguono generalmente le seguenti morfologie della superficie piezometrica (Figura 31):

- cilindrica: le isopieze sono rette parallele;
- radiale: le isopieze sono curve e le linee di flusso tendono a convergere nel verso del flusso (radiale convergente) o nel verso opposto al flusso (radiale divergente);
- piana: la distanza tra le isopieze è costante;
- parabolica: la distanza tra le isopieze diminuisce quando il livello dell'acqua si abbassa;
- iperbolica: la distanza tra le isopieze aumenta quando il livello dell'acqua si abbassa;
- ellittica: la distanza tra le isopieze varia tanto verso un lato che verso l'altro, a partire da una di esse.

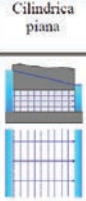
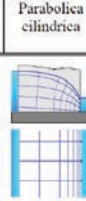
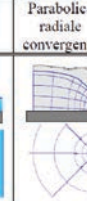
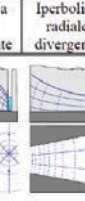
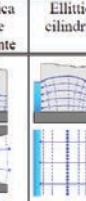
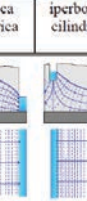






Tipo	Cilindrica piana	Parabolica cilindrica	Parabolica radiale convergente	Iperbolica radiale divergente	Ellittica cilindrica	Iperbolica cilindrica
Sezione secondo il flusso						
Isopieze						

Figura 31 - Alcuni tipi di superfici piezometriche.

Le superfici piezometriche reali possono essere semplici, miste o complesse a seconda dei tipi che si riscontrano nelle varie zone considerate.

L'andamento relativo delle linee isopieze non deve apparire come una semplice rappresentazione morfologica; infatti, esse sono l'evidenza del campo di moto dell'acqua sotterranea, in relazione alla variabilità spaziale delle caratteristiche idrodinamiche di un acquifero reale, il quale può ritenersi omogeneo solo nel suo insieme. In questo contesto, le variazioni di permeabilità, di spessore saturo e la presenza di limiti laterali inducono variazioni morfologiche sulla superficie piezometrica.

Tra queste variazioni riveste rilevante importanza quella inerente la distanza tra le isopieze in varie zone dell'acquifero. Infatti, quando in una zona dove le linee di flusso sono approssimativamente parallele, le isopieze tendono ad avvicinarsi nel verso in cui la falda diminuisce di potenziale, questo può essere messo in diretta relazione con una diminuzione della trasmissività. Tale diminuzione potrà essere indifferentemente causata da una diminuzione della permeabilità o da una riduzione dello spessore saturo o da entrambe le cause; per contro un allontanamento tra le isopieze è da mettere in relazione ad un aumento della trasmissività (Figura 32).

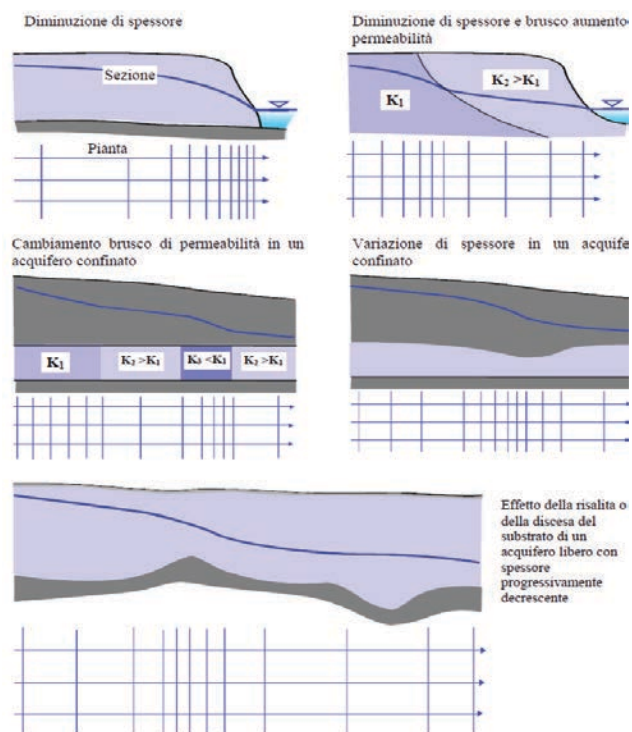


Figura 32 - Rapporti tra variazione di trasmissività e variazione del gradiente idraulico.

3.8. Analisi quantitativa della superficie piezometrica

L'analisi quantitativa della superficie piezometrica è basata sull'applicazione della Legge di Darcy, quando è possibile ammettere che essa sia valida e che il mezzo possa essere considerato isotropo in rapporto alla permeabilità. Si tratta, in pratica, di una tipica applicazione del principio di continuità (o di conservazione della massa) ad un tubo di flusso individuato da due linee di flusso contigue. Per tale principio, in assenza di interferenze esterne (alimentazione per infiltrazione o prelievi artificiali) la portata in uscita dal tubo di flusso è pari a quella in entrata. In esso quindi la portata $Q = TLi$ è costante e, di conseguenza, una variazione del gradiente idraulico i corrisponde ad un'opposta variazione della trasmissività T .

Se in una superficie piezometrica stazionaria si considerano due linee di flusso contigue, in assenza di interscambi, in entrata o in uscita, con le zone circostanti, il flusso al loro interno è costante.

Analizzando la maglia ABCD di Figura 33, di superficie S_i , avremo che: $Q_{AB} = Q_{CD}$, cioè:

$$T_{AB} AB i_{AB} = T_{CD} CD i_{CD}$$

Con questa equazione, note le larghezze delle sezioni AB e CD ed i rispettivi gradienti idraulici, nonché la trasmissività in corrispondenza di una delle due sezioni (es. T_{AB}), è possibile valutare la trasmissività in corrispondenza dell'altra sezione:

$$T_{CD} = (T_{AB} AB i_{AB}) / (CD i_{CD})$$

Se invece si hanno ricarica (entrate) o emungimenti (uscite), il flusso al loro interno varia della stessa quantità (senza per questo indurre interscambi con i tubi di flusso vicini). In tal caso, sempre con riferimento alla maglia ABCD di Figura 33 di superficie S_i , avremo che:

$$T_{AB} AB i_{AB} = T_{CD} CD i_{CD} \pm q S_i$$

(+ nel caso di alimentazione, - nel caso di emungimenti) dove q = portata per unità di superficie nella maglia ABCD. Questa relazione, come la precedente, consente di estrapolare le grandezze idrodinamiche note, da una porzione del tubo di flusso alle altre (Figura 33).

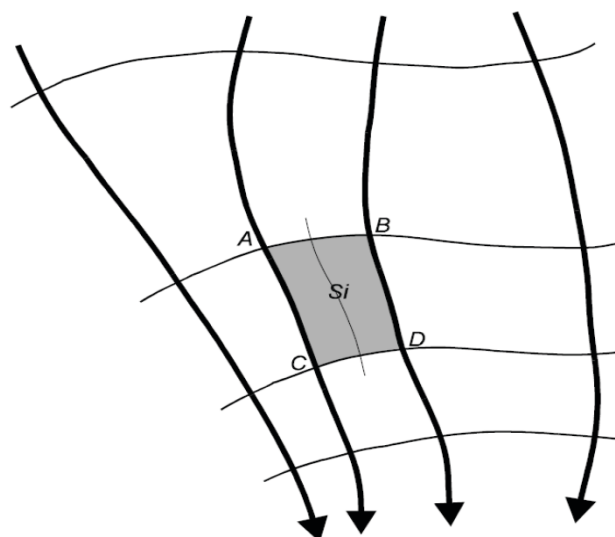


Figura 33 - schema applicativo dell'analisi quantitativa della superficie piezometrica.

3.9. Idraulica dell'acquifero e prove di pompaggio

Le prove di pompaggio (o di emungimento) costituiscono probabilmente l'approccio migliore per la determinazione della potenzialità dell'acquifero, anche perché consentono di visualizzarvi direttamente l'effetto dello sfruttamento tramite un sistema di pozzi ed eventualmente piezometri.

Il pompaggio in un acquifero, la cui superficie piezometrica iniziale è ipotizzata orizzontale, crea una depressione a forma di imbuto denominata cono di depressione (il cui asse coincide con quello dell'opera di captazione), che è virtuale nell'acquifero con falda confinata in pressione, mentre interessa il serbatoio in quello con falda libera.

Le prove di emungimento hanno come obiettivo quello di monitorare, a portata costante, lo sviluppo del cono di depressione in un dato istante e la sua evoluzione nel tempo; esse si occupano anche del suo annullamento, dopo l'arresto del pompaggio, fenomeno chiamato risalita (del livello piezometrico).

Il cono di depressione è delimitato dal dominio dove la superficie piezometrica è influenzata, cioè interessata da abbassamenti misurabili, e caratterizza un flusso

tridimensionale rappresentabile in sezione ed in piano: esso è rappresentato in sezione con una curva di depressione, in piano con curve di eguale abbassamento (cioè con cerchi concentrici all'asse del pozzo).

I principali parametri geometrici del cono di depressione, in un dato istante t , sono:

- l'abbassamento, indicato con Δh , misurato con la diminuzione del livello piezometrico nel pozzo in pompaggio e/o in un piezometro posto ad una certa distanza dall'asse dell'opera e comunque all'interno del cono di depressione. Il livello piezometrico misurato nel pozzo in emungimento è il livello dinamico, la cui profondità, rispetto al livello piezometrico iniziale (livello statico), in regime non influenzato (cioè non interessato da fenomeni di ricarica), è l'abbassamento Δh . L'abbassamento misurato nel corso della risalita è chiamato abbassamento residuale (Δh_r).

- il raggio d'influenza, indicato con R_i , ovvero la distanza dall'asse del pozzo alla quale l'abbassamento è nullo o trascurabile; in pratica, dove questo non è più misurabile.

In definitiva, il dato che viene misurato in un certo istante sul terreno è l'abbassamento del livello piezometrico (o la sua profondità), sia nel pozzo, sia in un eventuale piezometro. Poiché le prove di pompaggio devono essere sempre effettuate a portata costante (a gradini crescenti o ad un unico gradino), bisogna sempre monitorare anche la portata emunta.

Gli schemi della Figura 34 presuppongono che la superficie piezometrica iniziale sia orizzontale. In realtà, il flusso dell'acqua indica la presenza di un gradiente idraulico, quindi detta superficie è inclinata con una pendenza più o meno debole (Figura 35): ne risulta che il cono di depressione è deformato ed asimmetrico. La zona di richiamo, cioè la parte dell'area di influenza interessata dal flusso dell'acqua verso il pozzo, è molto estesa verso monte; tutto si svolge come se l'acqua che alimenta l'opera provenga da un fronte a monte, o fronte di richiamo, distante a volte diversi chilometri.

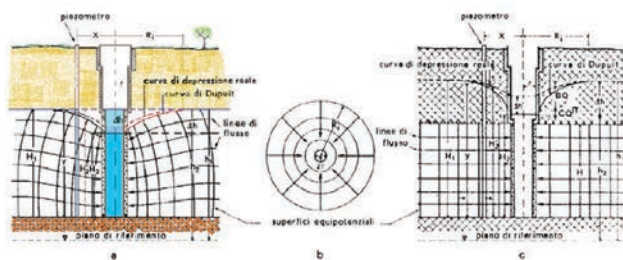


Figura 34 - Cono di depressione a superficie piezometrica orizzontale (da Celico, 1986, mod.).

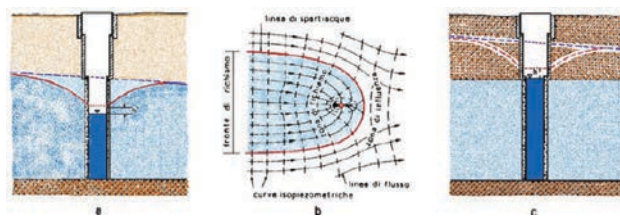


Figura 35 - Cono di depressione in falde a superficie piezometrica inclinata (da Celico, 1986, mod.).

Per l'acquisizione di dati quantitativi destinati al calcolo della portata di una falda, è valida l'ipotesi semplificatrice di una superficie piezometrica orizzontale: essa è giustificata dal grado di precisione delle misure e dagli usuali bassi gradienti idraulici. Al contrario, per il trasporto di sostanze, dunque per la propagazione dell'inquinamento, non è ammissibile una tale semplificazione. Le prove di pompaggio sono dei veri e propri test sull'acquifero e consistono nella captazione di acqua sotterranea per mezzo di pozzi, durante la quale vengono misurate le portate emunte ed i corrispondenti abbassamenti del livello piezometrico (dopo l'arresto dell'emungimento, vengono raccolti dati anche sulla risalita del livello). Le prove possono essere eseguite su singoli pozzi (nei quali avviene contemporaneamente il pompaggio ed il rilevamento piezometrico) o sulle cosiddette stazioni di prova; quest'ultime sono costituite da un pozzo in emungimento e da uno o più piezometri ubicati all'interno del suo raggio d'influenza, dove vengono misurati gli abbassamenti piezometrici nel tempo. Le prove di pompaggio perseguono quattro scopi, in ordine di complessità crescente:

- determinazione delle caratteristiche idrauliche del complesso acquifero/opera di captazione;
- quantificazione dei parametri idrodinamici dell'acquifero (trasmissività e coefficiente di immagazzinamento);
- studio quantitativo degli aspetti particolari dell'acquifero (condizioni ai limiti, eterogeneità, struttura, ecc.);
- osservazione diretta dello sfruttamento dell'acquifero, con previsioni sull'evoluzione degli abbassamenti piezometrici in funzione delle portate emunte (presenza di limiti, ed interferenze con pozzi adiacenti).

Le metodologie operative basate sul concetto di regime permanente sono utilizzate assai di rado sia perché esso si manifesta raramente nelle condizioni naturali di flusso, sia per il costo elevato delle operazioni connesse: di conseguenza, le sperimentazioni vengono attualmente effettuate basandosi principalmente sul concetto di regime transitorio. In tutti i casi, i pompaggi vanno eseguiti a portata costante, il cui valore dicesi gradino di portata, con misura dei relativi abbassamenti: differiscono soltanto i dispositivi di prova e la durata dei pompaggi.

In sintesi, vengono generalmente adottati due metodi di

sperimentazione e di interpretazione in relazione allo scopo perseguito: prova a gradini (test o prova di pozzo) e prova di lunga durata (test di acquifero).

La prova a gradini è finalizzata alla determinazione delle caratteristiche idrauliche del complesso acquifero/ opera di captazione, necessarie per mettere in esercizio il pozzo ottimizzandone lo sfruttamento dell'acquifero, controllare l'idoneità dell'attrezzatura tecnica o del completamento del pozzo. Come già detto, le condizioni di base per l'applicazione delle espressioni di idrodinamica sotterranea in regime transitorio, che devono essere soddisfatte dal complesso acquifero/ opera di captazione, sono principalmente quelle relative alla validità della Legge di Darcy: flusso laminare, mezzo continuo, isotropo ed omogeneo. Altre condizioni di base sono: pozzo completo, cioè prolungato fino al substrato e provvisto di filtro per tutto lo spessore della falda; pozzo correttamente sviluppato ed equipaggiato; superficie piezometrica suborizzontale; portata di pompaggio costante; raggio del pozzo il più piccolo possibile. La prova di pozzo viene eseguita a gradini di portata, aventi portata costante per una breve durata (alcune ore), (Figura 36). Durante la prova vengono raccolti due dati: la portata emunta (Q) ed il relativo abbassamento piezometrico nel pozzo (Δh).

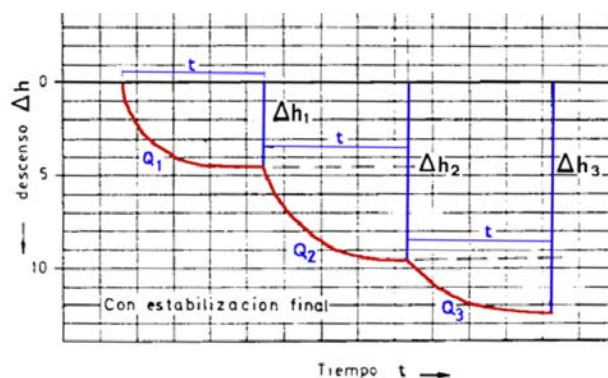


Figura 36 - Rappresentazione grafica di un prova gradini.

La curva caratteristica, che deriva dalla interpolazione delle coppie di valori ($Q_n, \Delta h_n$) per ogni gradino di portata, è una elaborazione fondamentale in quanto serve a determinare la portata ottimale di esercizio (in genere, pari al 90% di Q_c), funzione di un abbassamento massimo ammissibile (Figura 37).

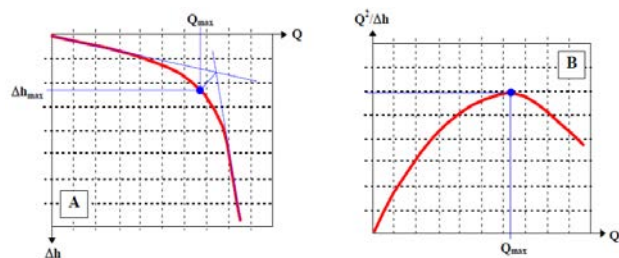


Figura 37 - Determinazione dell'abbassamento critico: A- metodo grafico delle tangenti sulla curva caratteristica del pozzo; B- diagramma Q^2/Dh vs Q dove la Q_{max} è univocamente definita in corrispondenza del punto massimo della relativa curva.

La forma stessa della curva caratteristica fornisce preziose informazioni sull'entità delle perdite di carico. Eseguita al tempo del collaudo del pozzo, è una vera scheda di identificazione che dovrebbe figurare obbligatoriamente nel dossier dell'opera: essa sarà ulteriormente utilizzata per rilevare i miglioramenti (sviluppi) o i peggioramenti (intasamento), conseguenti allo sfruttamento dell'opera (invecchiamento).

La prova di lunga durata viene eseguita con un solo gradino di portata, a portata costante, prolungata almeno per 48 ore (con un optimum di 72 ore), sempre con misura dei livelli dell'acqua nel pozzo, ma soprattutto in uno o più piezometri, ad intervalli prefissati. La portata utilizzata è di solito prossima a quella di esercizio. In questo tipo di prove è particolarmente utile l'osservazione, durante un'eguale durata, della risalita dei livelli dopo l'arresto dell'emungimento. Con questo tipo di prova si possono ottenere i parametri idrodinamici dell'acquifero (trasmissività e coefficiente di immagazzinamento), indicazioni sulle sue condizioni ai limiti (eterogeneità, struttura, ecc.) e l'osservazione diretta dell'effetto dello sfruttamento sull'acquifero con previsione dell'evoluzione dell'abbassamento in funzione delle portate emunte.

L'esecuzione delle prove e l'interpretazione dei dati misurati (abbassamenti e tempi) si basano sull'impiego dei numerosi modelli idrodinamici in regime transitorio (e relative equazioni) che sono stati sviluppati a partire da quello base di Theis, allo scopo di ottenere un sempre miglior adattamento delle leggi matematiche alle più svariate situazioni reali. Come già accennato, l'espressione di Theis si riferisce al tipo idrodinamico d'acquifero con falda confinata, illimitato e con pareti (substrato e tetto) impermeabili: essa può, tuttavia, essere estesa, sotto certe condizioni, all'acquifero con falda libera, sempre illimitato.

Fermo restando ciò, è da aggiungere che, nel caso in cui il tipo idrodinamico di acquifero sia limitato lateralmente (e che ciò sia in qualche modo riconoscibile sul terreno), questa espressione è comunque valida per l'interpretazione della parte iniziale della prova di pompaggio: in effetti, questa può essere considerata come svolta in un serbatoio illimitato, sino alla comparsa dell'effetto delle condizioni ai limiti.

4. L'IDROGEOCHIMICA

Per indagini idrogeochimiche si intende l'insieme delle attività che porta alla conoscenza delle caratteristiche chimiche, chimico-fisiche ed isotopiche delle acque, sulla base delle quali, oltre che definire la qualità dei corpi idrici, si effettuano valutazioni utili alla ricostruzione dei circuiti ipogei, alla definizione delle condizioni idrodinamiche in acquifero, all'individuazione delle principali componenti di alimentazione, all'identificazione delle zone di

interazione tra diversi sistemi di circolazione, ecc. In tal senso l'idrogeochimica rappresenta uno strumento fondamentale nella comprensione dei meccanismi che regolano la circolazione idrica in acquifero, ovvero per la ricostruzione di un modello idrogeologico. È tuttavia doveroso sottolineare che nessun parametro chimico e/o isotopico può di per sé risolvere una problematica idrogeologica e che è strettamente necessario contestualizzare e quindi comparare i dati di questa natura con gli aspetti idrostrutturali, idrodinamici, ecc., del sistema acquifero in studio. In sintesi, l'indagine idrogeochimica integra uno studio idrogeologico completo, del quale costituisce uno dei tasselli più importanti, ma non sostitutivi, per la definizione del modello idrogeologico concettuale di sottosuolo.

Come per altri strumenti d'indagine, l'applicazione di metodologie idrogeochimiche può essere condotta con diversi gradi di dettaglio in funzione del contesto e dell'obiettivo dello studio.

In questo documento si ricordano prima alcune nozioni di base relative all'idrochimica (§ 4.1) e agli isotopi dell'acqua (§ 4.2), rimandando ai testi specifici per ulteriori approfondimenti; successivamente (§ 4.3) si forniscono suggerimenti sull'elaborazione e sull'interpretazione dei dati idrogeochimici, soffermandosi maggiormente su quegli aspetti applicativi che concorrono alla comprensione dei meccanismi che regolano la circolazione idrica in acquifero e quindi alla definizione del modello concettuale.

4.1. Generalità su chimismo e proprietà chimico-fisiche delle acque

La composizione chimica delle acque sotterranee è condizionata da diversi fattori:

- in misura minore dal chimismo delle precipitazioni atmosferiche, a sua volta dipendente da una serie di fenomeni naturali e antropici;
- in misura preponderante dall'interazione con la roccia acquifero (e con l'eventuale suolo o regolite presenti in superficie), ovvero dai processi di dissoluzione, precipitazione, scambi ionici ecc., nonché dall'interferenza delle attività antropiche con i corpi idrici.

A parte situazioni di locale contaminazione, il tipo di roccia acquifero è di norma il principale fattore che determina l'abito chimico di un'acqua o facies idrochimica. In generale esiste una certa corrispondenza tra quest'ultima e le caratteristiche litologiche della roccia serbatoio, e ciò rende molto utile l'indagine idrogeochimica nella definizione dei percorsi e dei tempi di residenza in acquifero. Tuttavia, è necessario sottolineare che nessuno dei parametri chimico-fisici o chimici s.s. ha un significato idrogeologico univoco. Vi è infatti la possibilità che acque circolanti in una

stessa roccia abbiano composizioni marcatamente diverse a causa di differenti condizioni idrodinamiche nel sottosuolo (maggiore o minore approfondimento dei circuiti, tempi lunghi o brevi d'interazione acqua-roccia, diverse condizioni termometriche e barometriche, ecc.). È quindi evidente la necessità di una conoscenza idrogeologica del territorio.

La maggior parte delle sostanze presenti in soluzione acquosa si trova allo stato ionico.

Certi ioni, detti *fondamentali*, sono sempre presenti in soluzione e la loro somma rappresenta la quasi totalità degli ioni: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++} . Tra gli ioni *minori* i più importanti (concentrazioni in genere <10 mg/l) sono: K^+ , NO_3^- , CO_3^{2-} , NH_4^+ , Fe^{++} . Vi sono infine gli *elementi in traccia* con concentrazioni dell'ordine del mg/l o inferiori (Pb, Cr, Cu, ecc.).

A meno di particolari situazioni geologiche (es. presenza di giacimenti minerari, ecc.) o di fenomeni di inquinamento, che richiedono specifiche indagini ambientali, lo studio chimico delle acque è condotto con analisi di laboratorio finalizzate alla determinazione dei contenuti degli ioni fondamentali (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Na^+ , Ca^{++} , Mg^{++}), ai quali generalmente si aggiungono i nitrati (NO_3^-) e il potassio (K^+). La concentrazione di questi ioni è comunemente espressa attraverso una delle seguenti unità di misura:

- ppm (parti per milione) - esprime le parti di soluto in un milione di parti di soluzione (ad es. mg in 1 kg);
- mg/l (milligrammi/litro) - se la soluzione non è molto concentrata, fino a 15.000 ppm, la sua densità è approssimativamente uguale a 1 kg/l, pertanto 1 ppm sarà uguale ad 1 mg/l. Ad ogni modo, anche per concentrazioni maggiori l'errore che si commette nel considerare 1 ppm=1 mg/l è minimo;
- meq/l (milliequivalenti/litro) - il numero di equivalenti è dato dal rapporto tra il peso della sostanza o ione in soluzione e il relativo peso equivalente, a sua volta derivante dal rapporto tra il peso molecolare ed il numero di elettroni o valenze in gioco (es.: peso equivalente del $\text{Ca}^{++} = 40,08/2 = 20,04$). Questa unità di misura tiene quindi conto del comportamento chimico degli elementi.

Per il principio di elettroneutralità nella soluzione acquosa, la somma degli equivalenti dei cationi è uguale a quella degli anioni (bilancio ionico):

$$\sum \text{meq/l}_{[\text{cationi}]} = \sum \text{meq/l}_{[\text{anioni}]}$$

Come concetto generale in riferimento a un acquifero, tenendo conto anche del comportamento degli ioni fondamentali in termini di solubilità, possiamo ritenere validi i seguenti schemi (Figura 38):

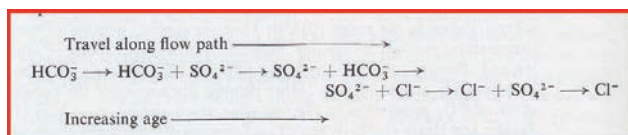
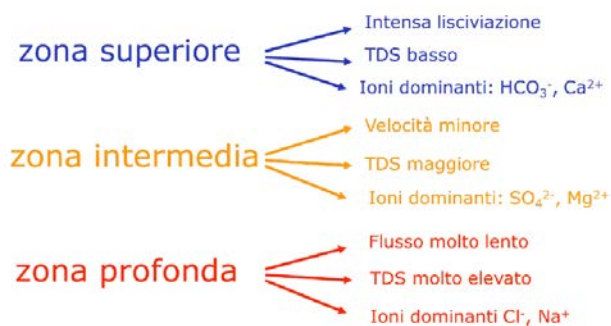


Figura 38 - Evoluzione tipo delle proprietà fisico-chimiche e chimiche delle acque sotterranee a fronte di un loro approfondimento ed incremento del tempo di residenza.

Queste considerazioni, concettualmente corrette, non possono ritenersi una regola. L'evoluzione chimica di un'acqua è infatti legata anche al tipo di matrice solida incontrata (ad es. in un'area in cui affiorano rocce anidritiche l'evoluzione del chimismo partirà da una composizione con prevalenza di solfati e non di bicarbonato, come sopra schematizzato). C'è inoltre una serie di processi fisici e fisico-chimici, quali ad esempio processi di ossido-riduzione o mescolamenti tra acque di diversa origine ed evoluzione, che possono condizionare fortemente lo schema generico sopra mostrato.

4.2. Generalità sugli isotopi della molecola dell'acqua

Il termine isotopo deriva dal greco e significa "stesso posto"; indica cioè che gli isotopi occupano la stessa posizione nella tavola periodica degli elementi. Gli isotopi sono infatti atomi dello stesso elemento che hanno un ugual numero di protoni ma differente numero di neutroni. Ogni elemento chimico può quindi esser rappresentato da più isotopi che differiscono l'un dall'altro solo per la loro massa. Per esempio l'ossigeno si considera comunemente possedere 8 protoni e 8 neutroni per ogni atomo, quindi ^{16}O , mentre ^{17}O e ^{18}O rappresentano gli isotopi che hanno rispettivamente 1 o 2 neutroni in più; il primo è chiamato isotopo leggero mentre i secondi vengono considerati isotopi pesanti. Gli isotopi si dividono in stabili e instabili: i primi restano immutati nel tempo, mentre i secondi tendono spontaneamente a trasformarsi in isotopi stabili mediante decadimento radioattivo, con emissione di particelle e/o energia.

L'acqua in natura è prevalentemente rappresentata da molecole contenenti gli isotopi leggeri dell'idrogeno e dell'ossigeno (^1H e ^{16}O). Tuttavia al suo interno è presente una piccola percentuale di isotopi pesanti

e tra questi quelli che trovano più ampie applicazioni nel campo dell'idrologia e dell'idrogeologia isotopica sono l'ossigeno-18 (^{18}O), il deuterio (^2H) e l'isotopo radioattivo dell'idrogeno, ovvero il tritio (^3H).

I contenuti in isotopi stabili sono espressi in $\delta\%$, cioè come differenza per mille tra il rapporto isotopico del campione rispetto a quello di uno standard di riferimento:

$$\delta\% = [(R_{cp}/R_{st}) - 1] \times 1000$$

dove R_{st} e R_{cp} sono, rispettivamente per l'ossigeno-18 e per il deuterio, i rapporti $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ e $^2\text{H}/^1\text{H}$ relativi allo standard ed al campione in esame. Lo standard utilizzato è il V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), che rappresenta il valore medio della composizione isotopica delle acque oceaniche, le quali costituiscono il punto iniziale e finale del ciclo idrologico (per definizione il $\delta\%$ del V-SMOW è uguale a zero).

Con i vari processi di evaporazione e condensazione che si verificano durante il ciclo idrologico le acque sono interessate da frazionamenti isotopici e di conseguenza da variazioni di composizione rilevate principalmente per gli isotopi stabili. In particolare con il processo dell'evaporazione, il vapor acqueo che si libera è sensibilmente più povero in isotopi pesanti ($\delta\%$ più negativo) rispetto all'acqua da cui si è originato; viceversa, durante la condensazione la fase liquida che si forma è più ricca in isotopi pesanti ($\delta\%$ più positivo) rispetto alla massa di vapore da cui trae origine. Come risultato si ha che all'interno dei continenti le piogge, avendo origine da vapori impoveriti in isotopi pesanti per effetto del susseguirsi delle condensazioni, risultano isotopicamente più leggere di quelle costiere.

Un fattore che condiziona in maniera rilevante i valori di $\delta^2\text{H}\%$ e $\delta^{18}\text{O}\%$ delle acque meteoriche è la temperatura; per questo motivo, i contenuti isotopici delle precipitazioni variano con la latitudine, con l'altitudine e con le stagioni. Le acque tendono quindi a diventare isotopicamente più leggere con l'aumentare della latitudine e dell'altitudine e, inoltre, le precipitazioni estive hanno contenuti medi in isotopi pesanti più elevati di quelle invernali. Anche il quantitativo della pioggia caduta incide sulla composizione isotopica delle acque, ovvero le piogge più abbondanti sono relativamente più povere di isotopi pesanti.

In studi a carattere idrogeologico tutte queste proprietà permettono di conoscere elementi importanti quali ad esempio la quota media d'infiltrazione e la dinamica dei circuiti sotterranei.

Un'ulteriore caratteristica riguardante il deuterio e l'ossigeno-18 è quella di essere legati tra loro, nelle acque meteoriche, da una relazione lineare avente espressione generale:

$$\delta^2\text{H}\% = A \times \delta^{18}\text{O}\% + d$$

dove "d" rappresenta l'eccesso di deuterio che può

variare in regioni diverse, mentre il coefficiente angolare della retta "A" generalmente si conserva uguale a 8 (dai valori medi mondiali delle precipitazioni risulta $d=10$ e $A=8$). Acque caratterizzate da contenuti in isotopi stabili che si discostano dalla retta meteorica di riferimento possono indicare particolari fenomeni di evaporazione o interazioni acqua roccia in condizioni di alta temperatura (superiore ai 200 °C).

A differenza degli isotopi stabili, il tritio è espresso in concentrazioni assolute attraverso l'unità di misura U.T. (unità tritio; 1 U.T. corrisponde ad un atomo di ^3H ogni 10^{18} atomi di ^1H). Il tritio decade in ^3He con emissione di particelle β^- ed è caratterizzato da un semi-periodo (tempo necessario affinché la sua quantità si dimezzi) di 12,3 anni. Il tritio si origina naturalmente nella stratosfera. Nei mesi primaverili si ha il maggiore trasferimento di tritio dalla stratosfera alla troposfera e ciò determina un massimo di concentrazione nelle precipitazioni di inizio estate ed un minimo nei mesi invernali. Il contenuto naturale in tritio nelle precipitazioni può variare a livello mondiale da 4 a 25 U.T. con i valori massimi registrati alle alte latitudini; non subisce invece sensibili variazioni con la quota di precipitazione.

Durante i numerosi esperimenti termonucleari avvenuti negli anni 1950-1970 le concentrazioni naturali di tritio in atmosfera, e quindi nelle precipitazioni, furono notevolmente alterati e raggiunsero i massimi valori (circa 10.000 U.T.) nel 1963. Successivamente al periodo degli esperimenti i contenuti di tritio iniziarono a decrescere in maniera approssimativamente esponenziale, secondo la legge di decadimento radioattivo, riportandosi, a partire dagli anni 1990, ai valori tipici naturali. Tenendo conto di questo andamento, noto grazie ai dati registrati dalle stazioni pluviometriche appartenenti alla rete mondiale IAEA (IAEA/WMO-2001- *Global Network for Isotopes in Precipitation*), nonché della legge esponenziale di decadimento radioattivo, è dunque possibile, per mezzo di analisi dei contenuti di tritio nelle acque sotterranee, avere indicazioni sull'età di quest'ultime ovvero sul loro tempo di permanenza in acquifero.

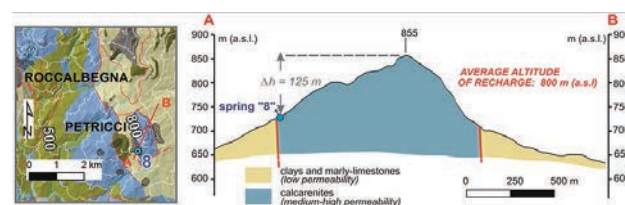
L'utilizzo degli isotopi della molecola dell'acqua nell'ambito delle prospezioni idrogeologiche è principalmente legato al fatto che le loro concentrazioni, ad eccezione di particolari condizioni di alte temperature, quali ad esempio quelle presenti in campi geotermici, non sono dipendenti dal tipo di roccia acquifero, ma sono direttamente legate alle caratteristiche intrinseche delle acque di infiltrazione. Si tratta in pratica di traccianti naturali le cui proprietà, sopra brevemente trattate, consentono elaborazioni finalizzate a comprendere molti dei fenomeni che regolano la circolazione delle acque sotterranee.

In particolare, le principali problematiche affrontate con i metodi dell'idrogeologia isotopica si riassumono in: localizzazione delle zone di ricarica; valutazione del grado di mescolamento di differenti corpi di acqua,

anche a salinità simili; fenomeni di mescolamento fra acque marine e continentali; vulnerabilità delle falde; età o tempi di residenza in acquifero; condizioni idrodinamiche in acquifero; misura ed entità dei fenomeni di evapotraspirazione; interazioni chimico-fisiche tra acqua e roccia-serbatoio.

A prescindere dagli obiettivi da raggiungere, una corretta applicazione delle metodologie isotopiche è strettamente dipendente dalla conoscenza di alcuni parametri di carattere locale, quali la distribuzione della composizione isotopica delle acque meteoriche ed il gradiente isotopico verticale. Questi dati di base sono ottenuti esaminando il contenuto in ossigeno-18, deuterio e tritio nelle acque di precipitazione, quest'ultime raccolte mensilmente ed a varie quote per un periodo di almeno due-tre anni. In mancanza di una rete pluviometrica ben distribuita, ma anche per ovviare ai lunghi tempi richiesti da questa metodologia, è possibile optare per una serie di prelievi (3-4 ogni anno) da effettuare in corrispondenza di sorgenti alimentate da un bacino poco esteso e drenanti circuiti relativamente superficiali e veloci (Figura 39). In questo modo i contenuti in isotopi stabili sono significativi di quote d'infiltrazione non molto diverse da quelle di emergenza ed individuabili attraverso l'esame del bacino di alimentazione delle sorgenti stesse. Il tenore medio annuo in ossigeno-18, deuterio e tritio può essere calcolato con una semplice media aritmetica purché nelle acque sorgive le oscillazioni stagionali di portata risultino attenuate.

(a)



(b)

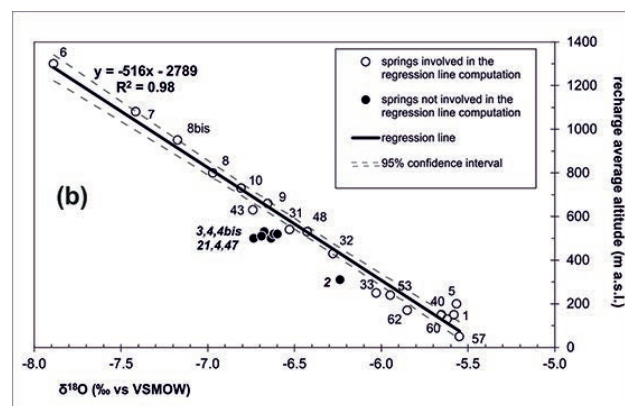


Figura 39 - Esempio di sorgente utile alla caratterizzazione isotopica delle acque d'infiltrazione (a) ed esempio di retta quota- $\delta^{18}\text{O}$ ‰ (b) rappresentativa di un'area di studio (da Doveri & Mussi, 2014).

4.3. Elaborazioni e interpretazione del dato idrogeochimico

Il classico approccio di analisi dei dati idrogeochimici inizia dalla classificazione delle acque, per mezzo di specifici diagrammi (quadrangolari, triangolari, a losanga; vedi esempi in Figura 40), che permettono di relazionare tra di loro le varie acque analizzate in funzione delle abbondanze percentuali delle specie ioniche principali. In questo modo si individuano i vari tipi di acque e, tenendo in debita considerazione la tipologia (acque superficiali, sorgenti, pozzi e loro profondità) e la distribuzione territoriale dei punti d'acqua analizzati, nel rispetto anche delle condizioni geologiche al contorno, si valuta in via preliminare la possibilità che queste acque siano rappresentative di diverse componenti che partecipano al sistema idrogeologico in esame e delle loro interazioni.

A tal proposito, può risultare utile rappresentare in carta i punti analizzati, tematizzandoli in funzione della classificazione chimica che, di conseguenza, può esser direttamente comparata con le caratteristiche fisiografiche, geologiche, piezometriche, ecc., della zona in esame (vedi esempio di Figura 41).

Queste prime valutazioni necessitano di una verifica ed un approfondimento da eseguire prendendo in esame le concentrazioni assolute dei vari composti chimici in soluzione. Si vanno di conseguenza a confrontare tra di loro su diagrammi binari due specie chimiche o somme di più specie chimiche (vedi esempi di Figura 42).

Il confronto tra i vari componenti chimici può esser guidato dalle informazioni geologiche ed idrogeologiche al contorno, nonché dagli obiettivi posti.

Nell'ottica di individuare le componenti di circolazione all'interno del sistema esaminato, in prima battuta sono da considerarsi i parametri chimici conservativi o quelli ritenuti tali nel contesto in esame (cioè quelli non soggetti a processi chimico-fisici, quali scambi ionici, riduzioni, ecc.).

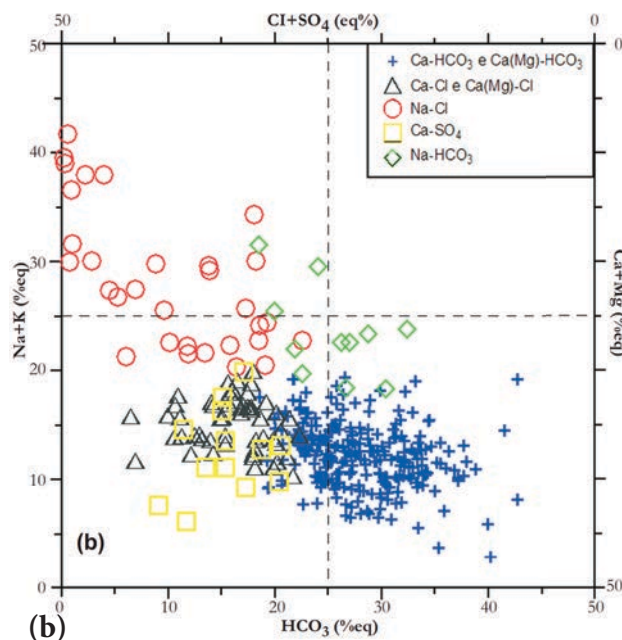
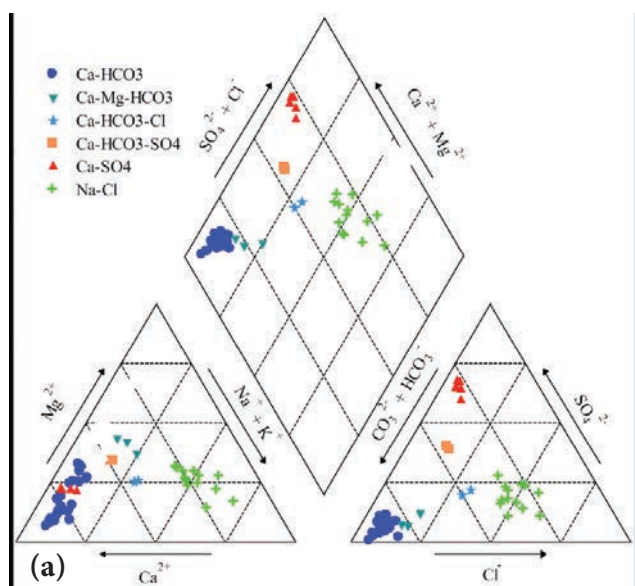


Figura 40 - Esempi di diagrammi di classificazione delle acque. (a) da Menichini et al., 2015, modificato; (b) da Doveri et al. 2015a, modificato.

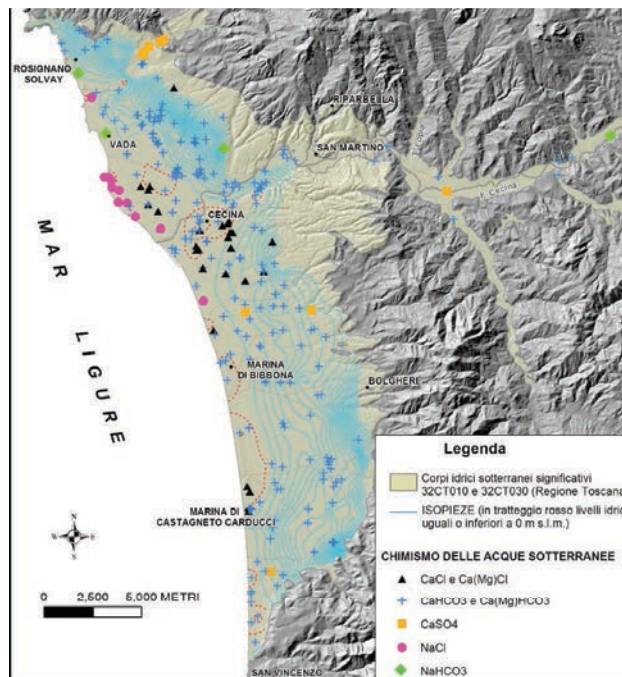


Figura 41 - Confronto tra chimismo dei punti d'acqua analizzati e condizioni piezometriche. Dalla figura si osserva come nella zona con maggior sfruttamento (contraddistinta da livelli piezometrici al disotto del livello medio marino) si riscontrino acque da cloruro-sodiche a cloruro-calciche, indicative di un'ingressione marina in atto (da Cerrina et al., 2010).

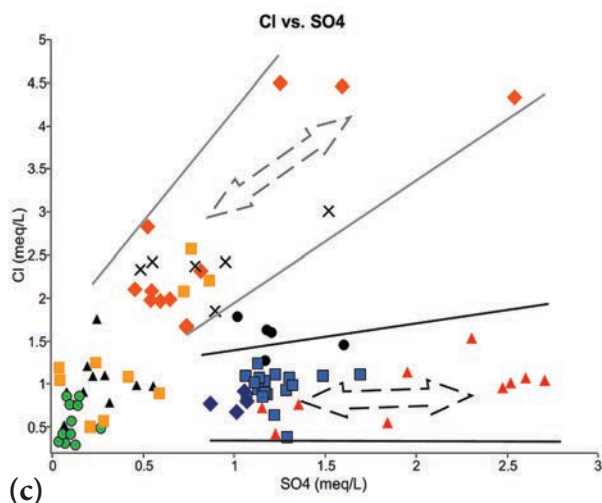
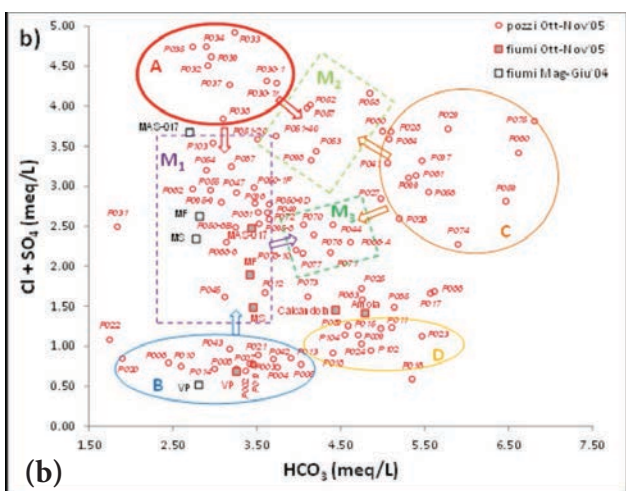
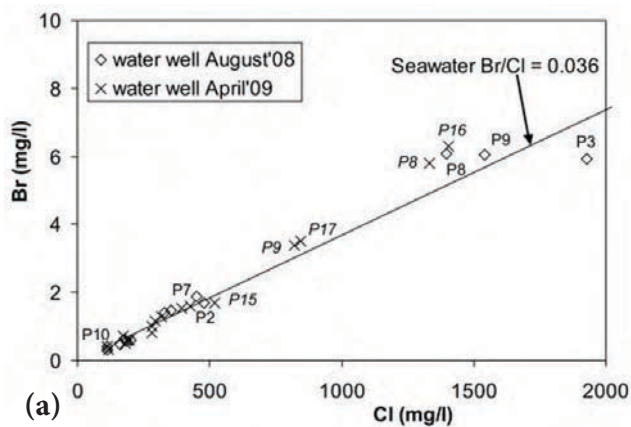


Figura 42 - Diagrammi di comparazione tra parametri o somme di parametri chimici. (a) diagramma Br vs. Cl (da Butteri et al., 2010) che identifica una serie di punti d'acqua rappresentativi di un mescolamento acqua di falda - acqua di mare; (b) diagramma Cl+SO₄ vs. HCO₃ (da Lelli et al., 2013) in cui sono evidenziate quattro componenti di alimentazione (A, B, C e D) e loro prodotti di miscelazione (M₁, M₂ e M₃); (c) diagramma Cl vs SO₄ (da Doveri et al., 2015b) in cui si identificano due trend distinti di mescolamento, in atto in specifici settori (identificati dalle diverse simbologie dei punti) di un'area

di studio.

Viceversa, se lo scopo è verificare che tali processi chimico-fisici interessano le acque in esame e quindi se quest'ultime si trovano a circolare in condizioni che favoriscono lo svilupparsi di tali processi, l'elaborazione terrà conto di quei parametri più sensibili ai processi stessi (ad es. il rapporto Na/Cl vs. il contenuto di calcio, per evidenziare fenomeni di scambio ionico favoriti dalla presenza di minerali argillosi, piuttosto che il rapporto HCO₃/(Ca+Mg) vs. il contenuto in solfati per evidenziare condizioni riducenti e presenza di materia organica con conseguente "riduzione" dei solfati).

Sempre al fine di individuare i principali input al sistema idrico in esame, l'utilizzo di dati isotopici diventa fondamentale. Con particolare riferimento agli isotopi stabili della molecola dell'acqua, questi, comportandosi come veri e propri traccianti e godendo delle proprietà di cui al § 2.4.2, permettono di verificare l'esistenza di più componenti in gioco indipendentemente dal chimismo (Figura 43). Inoltre, sfruttando in particolar modo la variazione isotopica con la quota, i dati isotopici possono dare utili indicazioni sulle quote medie di alimentazione di tali componenti.

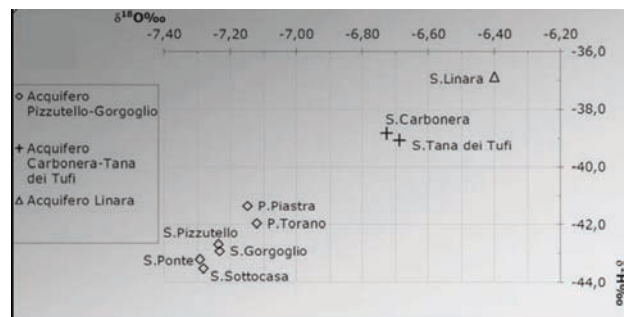
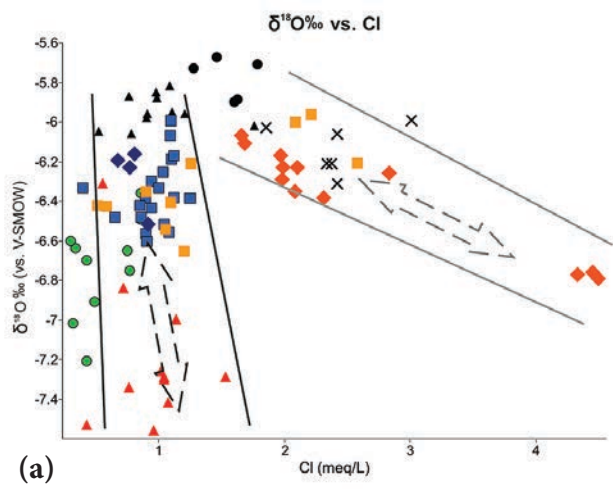


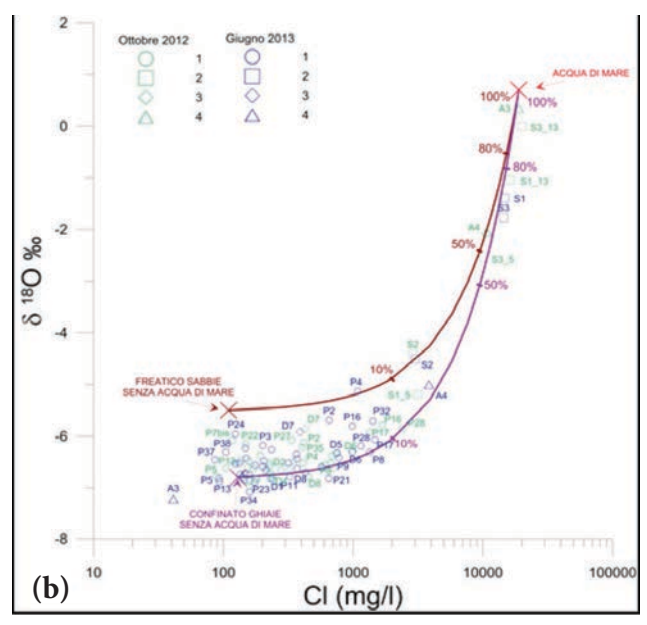
Figura 43 - Diagramma Deuterio vs. Ossigeno-18 in cui si riconoscono tre sistemi di circolazione idrica sotterranea (da Doveri, 2008).

Diagrammi di comparazione tra parametri chimici ed isotopici (Figura 44) possono contribuire ad una rifinitura dell'interpretazione degli aspetti fisici e chimici dei circuiti idrici (geometria, processi di interazione acqua-roccia, processi di mixing, ecc.).

Importanti informazioni sono inoltre reperibili dagli andamenti nel tempo dei valori relativi a parametri chimico-fisici e/o chimici e/o isotopici. Di fatto, il monitoraggio (discreto e/o continuo) idrogeochimico può contribuire significativamente a comprendere le relazioni tra componenti idriche in gioco e ottenere informazioni sulle condizioni idrodinamiche in acquifero (Figure 45-46).

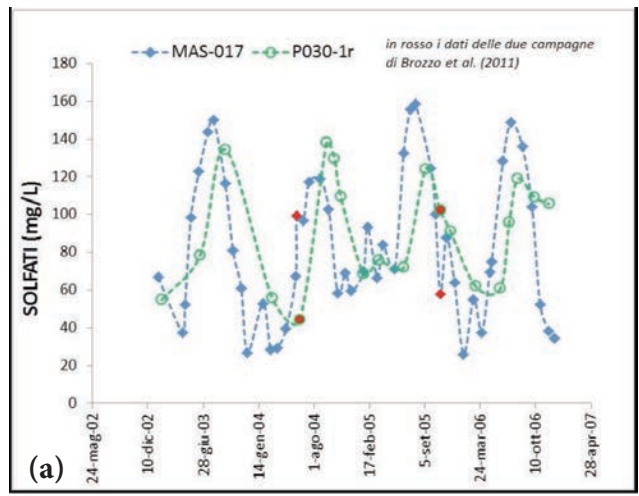


(a)

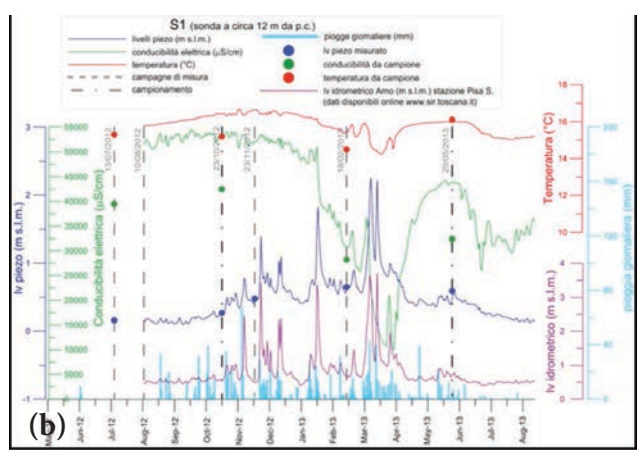


(b)

Figura 44 - Diagrammi di comparazione tra parametri chimici ed isotopici. (a) diagramma che evidenzia due trend principali di mescolamento in cui sono coinvolte almeno tre componenti: una che si origina da quote relativamente elevate ($\delta^{18}O\text{‰}$ relativamente basso) e che interagisce con una possibile fonte di cloruri (valori di Cl relativamente elevati), una che si origina da quote relativamente elevate e che non interagisce con la fonte di cloruri (bassi valori di Cl), una che si origina da quote relativamente basse ($\delta^{18}O\text{‰}$ relativamente alto) e che non interagisce con la fonte di cloruri (i diversi colori e le differenti forme dei vari punti in diagramma identificano l'appartenenza dei punti stessi a specifiche zone dell'area studiata; da Doveri et al, 2015b, modificato). (b) diagramma che evidenzia la presenza di processi di mescolamento tra acque di mare ed acque dolci sotterranee, a livello sia dell'acquifero freatico sia di quello confinato dell'area costiera pisana (da Doveri et al., 2014, modificato).

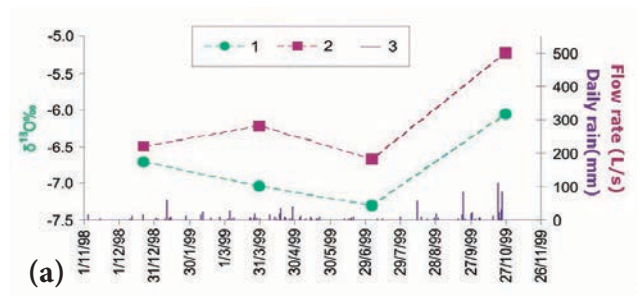


(a)



(b)

Figura 45 - Diagrammi di evoluzione nel tempo di parametri fisici, fisico-chimici e chimici. (a) variabilità dei contenuti in solfati che evidenzia la connessione tra fiume (MAS-017) e falda (P030-1r) e come le acque superficiali condizionino la qualità delle acque sotterranee (da Lelli et al., 2013). (b) diagramma di monitoraggio in continuo in cui si confrontano i dati piezometrici, di temperatura e conducibilità elettrica del piezometro S1 (situato in zona costiera pisana), con i livelli idrometrici del F. Arno e le piogge giornaliere. Le variazioni riscontrate nel piezometro testimoniano come l'acquifero freatico costiero sia fortemente condizionato dal regime idrografico dell'Arno, a sua volta dipendente dalla piovosità (da Doveri et al., 2014).



(a)

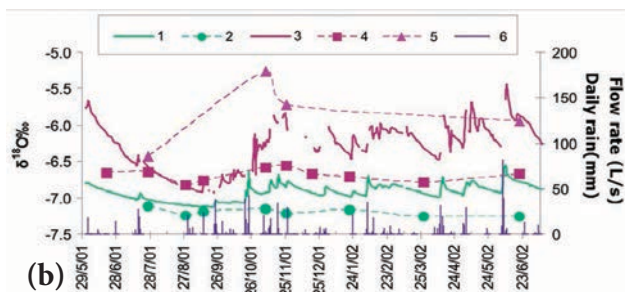


Figura 46 – Evoluzione nel tempo del $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ in sorgenti carsiche e confronto con portate sorgive e piovosità (da Doveri et al., 2013). (a) sorgente che mostra una significativa variabilità isotopica (vedi simbolo 1 nel diagramma) stagionale indicativa di un arrivo delle acque di infiltrazione nel breve medio periodo, ovvero di un elevato grado di vulnerabilità della sorgente stessa; (b) sorgenti che si mostrano pressoché stabili isotopicamente (vedi simboli 2 e 4 nel diagramma) benché interessate da una forte variabilità delle portate e benché le acque di un torrente vicino (vedi simbolo 5 nel diagramma) risultino molto variabili da un punto di vista isotopico. Ciò testimonia una indipendenza delle acque sotterranee dalle acque del torrente, nonché una capacità del sistema acquifero di omogeneizzare le varie ricariche stagionali caratterizzate da diversi contenuti isotopici. Quest'ultima caratteristica evidenzia tempi di residenza in acquifero relativamente elevati, che abbassano il grado di vulnerabilità delle sorgenti.

5. MODELLO CONCETTUALE

L'analisi e la modellazione dei corpi idrici sotterranei è una tematica che ha avuto uno sviluppo notevole negli ultimi anni, anche sulla spinta della necessità da parte degli enti che si occupano della tutela e della gestione delle risorse idriche di avere una descrizione quanto più accurata possibile delle falde, del loro grado di sfruttamento e stato ambientale.

Per tale analisi è basilare la conoscenza dettagliata della conformazione geologica e della disposizione spaziale degli acquiferi, sia in senso orizzontale che verticale.

Il modello idrogeologico concettuale (Reilly, 2001) riassume le nostre conoscenze sul sistema acquifero ed, in riferimento ad uno specifico problema limitato nello spazio e nel tempo, formula ipotesi e semplificazioni determinanti che permettono l'impiego di strumenti e tecniche di analisi numerica, talvolta sofisticate e complesse come codici di calcolo oppure sinteticamente riconducibili a relazioni analitiche

Il modello concettuale di un acquifero è dunque una tappa fondamentale nella modellizzazione numerica, in esso sono schematizzate e quantificate le entrate e le uscite dell'intero acquifero o della porzione in studio.

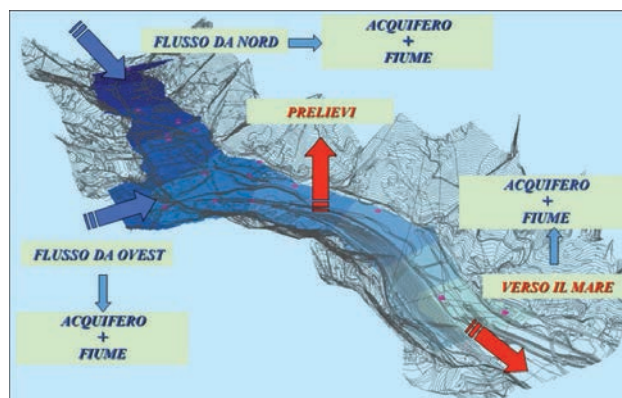


Figura 47: Esempio di un Modello Concettuale di un acquifero alluvionale poroso in collegamento idraulico con il fiume (Capacci F. et Alti, 2012)

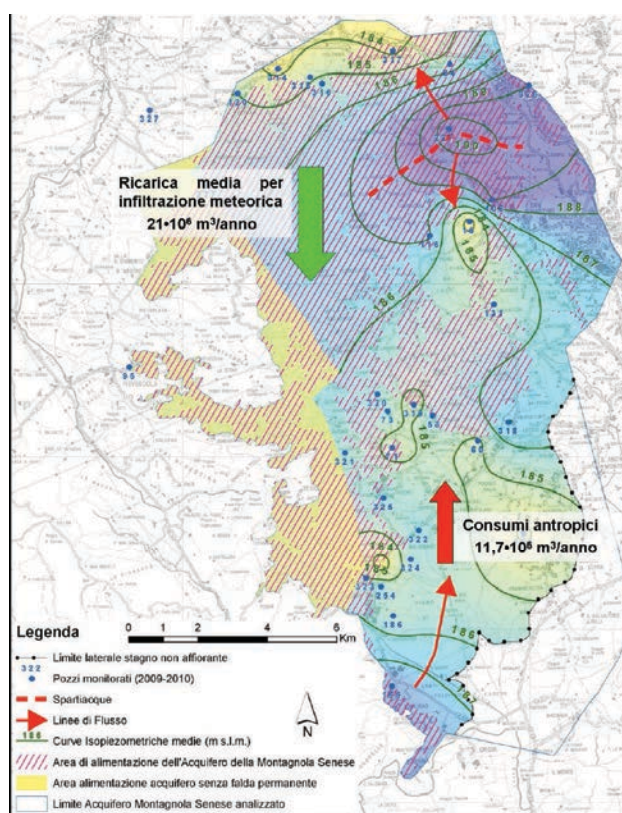


Figura 48: Esempio di un Modello Concettuale di un acquifero fratturato (Migliorini J. et Alti, 2012)

Una condizione importante è quella relativa ai prelievi. Nello sviluppo del modello concettuale, specialmente se questo è finalizzato alla successiva implementazione del modello numerico, questo aspetto va trattato come flusso in uscita dal dominio.

Un fattore che si presenta in aree antropizzate o urbanizzate è inoltre rappresentato dal contributo delle reti idriche e fognarie; in zone densamente infrastrutturate questo contributo può essere rilevante, anche in considerazione dello stato di obsolescenza delle reti nel nostro paese. Le dispersioni da reti idriche costituiscono sempre un elemento positivo del bilancio ovvero una fonte di alimentazione degli acquiferi; le reti

fognarie possono assumere una condizione exfiltrante o infiltrante della falda a seconda del rapporto geometrico della condotta con la superficie freatica.

Le ipotesi del modello concettuale sono, in tutti i casi, condizionate dal quadro conoscitivo disponibile e potranno essere verificate e riviste alla luce degli esiti delle simulazioni, non escludendo la necessità di un'integrazione del quadro conoscitivo (fig. 49).

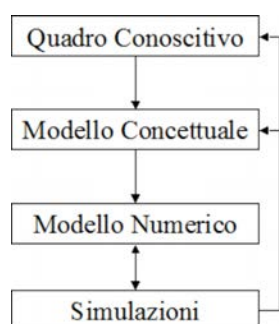


Figura 49

Per quanto non esista un modo standard di presentazione del modello concettuale e a questo non consegua necessariamente un modello numerico, la struttura di input dei dati, condizioni e semplificazioni richieste da quest'ultimo possono costituire un utile riferimento per la presentazione del MC.

Un modello numerico è, infatti, prima di tutto definito dalle sue **condizioni al contorno**, esso non si estende in modo infinito ma si limita, per ovvi motivi, ad un dominio specifico di studio e di calcolo.

Una "condizione al contorno", in matematica, corrisponde all'assegnazione del valore della soluzione di un'equazione differenziale ai margini dell'insieme di definizione dell'equazione. In idrogeologia, si utilizza spesso un sinonimo di "condizione ai limiti"

In ogni caso le condizioni sono di due tipi e cioè:

- **I tipo o carico costante**, dove si specifica il valore della soluzione (*Dirichelet*) quindi l'altezza piezometrica; da un punto di vista idrogeologico significa ammettere un'ampia possibilità di deflussi in ingresso od in uscita senza variazione di detto carico e l'esempio più classico è quello della presenza di un corpo idrico superficiale consistente (mare, lago, fiume);

- **II tipo o flusso costante**, si specifica il valore della derivata della soluzione (*Neumann*), in altre parole il gradiente e dunque il flusso; dal punto di vista idrogeologico corrisponde ai casi di limiti alimentanti secondo un gradiente regionale o più semplicemente alla presenza di pozzi;

Una terza condizione definita come flusso variabile o carico dipendente corrisponde a una combinazione delle due e in quel caso è specificata sia una quota di riferimento sia un termine generale di "conduttanza" (dipendente

dalla geometria e dalla conducibilità idraulica del mezzo) che media gli scambi con l'acquifero in ragione della differenza di carico tra quota piezometrica e quota di riferimento. Si tratta di una condizione utilizzata ad esempio per riprodurre gli scambi fiume falda attraverso un materasso alluvionale di natura e spessore variabile, i dreni con relativo filtro, limiti alimentanti per i quali è passibile specificare direttamente il gradiente, fenomeni di fuga tra acquiferi adiacenti o sovrapposti.

Uno schema di modello concettuale dovrebbe contenere dunque una **chiara distinzione**, con opportuna e relativa simbologia delle **diverse tipologie di limiti** mostrando ove possibile anche i relativi valori numerici che caratterizzano il limite (**carico, flusso, conduttanza, gradiente ...**)

Una rassegna delle condizioni ai limiti riconosciute più di frequente in idrogeologia, tutte riconducibili alle tre tipologie prima indicate, comprende (Fig.50):

A. Limiti geologici: detti anche chiusi, a posizione fissa o limiti stagni (a flusso nullo). Essi sono imposti dalle strutture dei complessi idrogeologici e sono:

- A1. Substrato impermeabile
- A2. Tetto impermeabile (nelle falde confinate)
- A3. Variazioni laterali di facies
- A4. Chiusure laterali di trasgressione
- A5. Faglie

B. Limiti idrodinamici: sono limiti aperti e quindi variabili nello spazio e nel tempo (fig. 51); sono classificabili appunto come:

B1. *limiti a flusso imposto o condizionati dalla portata* (fig. 51). Questi possono essere a flusso nullo o a flusso in entrata o in uscita. Le portate nulle sono normalmente imposte da un limite geologico stagno. Le portate uscenti sono identificabili con sorgenti, linee di emergenza diffusa, corpo d'acqua superficiale drenante, alimentazione di un altro acquifero. Le portate entranti possono identificarsi con falde affluenti limitrofe, aree di alimentazione per infiltrazione, corpo d'acqua superficiale infiltrante.

B2. *limiti a potenziale imposto o condizionati dal potenziale* (fig.52) Sono identificabili con una curva equipotenziale, o idroisoipsa, della superficie piezometrica: allineamenti di sorgenti, corpi d'acqua superficiali (laghi e fiumi), linee di costa.

B3. *la superficie piezometrica di una falda libera*, dove la pressione è pari a quella atmosferica e dove il flusso è normalmente nullo.

B4. *il fenomeno della fuga* che è a sua volta imposto da condizioni di flusso (limite geologico semipermeabile) e di potenziale (l'acqua si muove attraverso l'acquitarso dalla falda a potenziale più alto a quella a potenziale più basso).

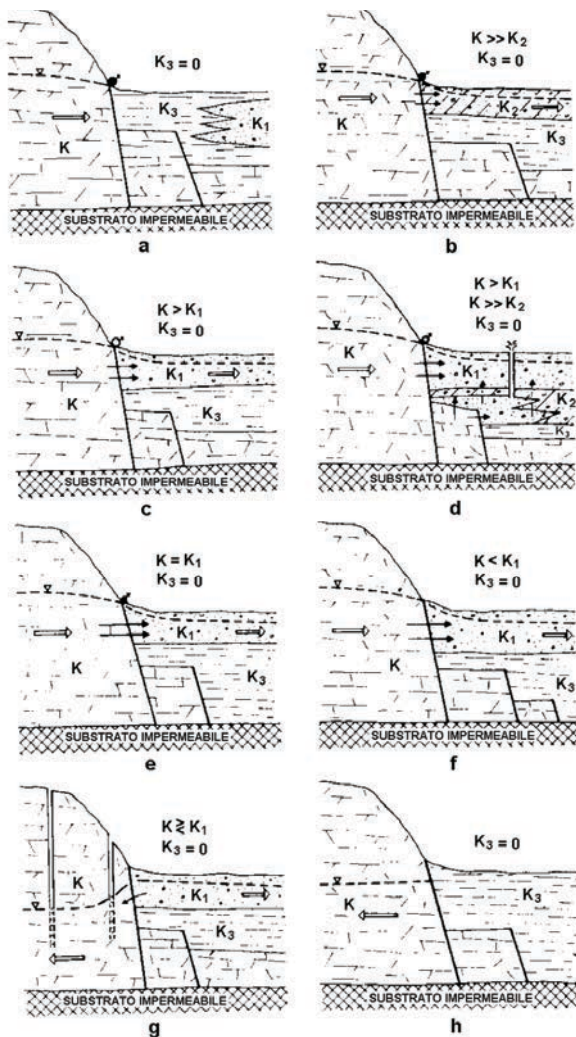


Figura 50: Esempi di rapporti idrogeologici tra strutture adiacenti che identificano varie tipologie di limiti idrodinamici (e quindi di condizioni al contorno dell'acquifero considerato).

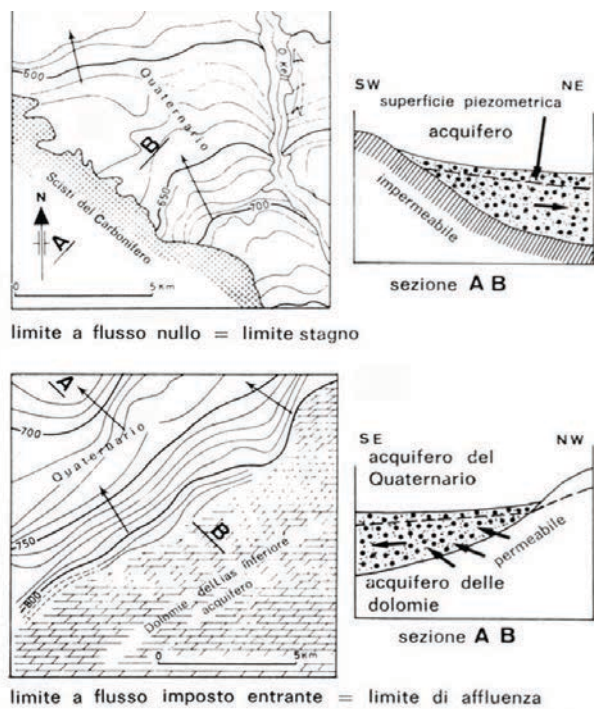


Figura 51: Esempi di limiti a flusso imposto.

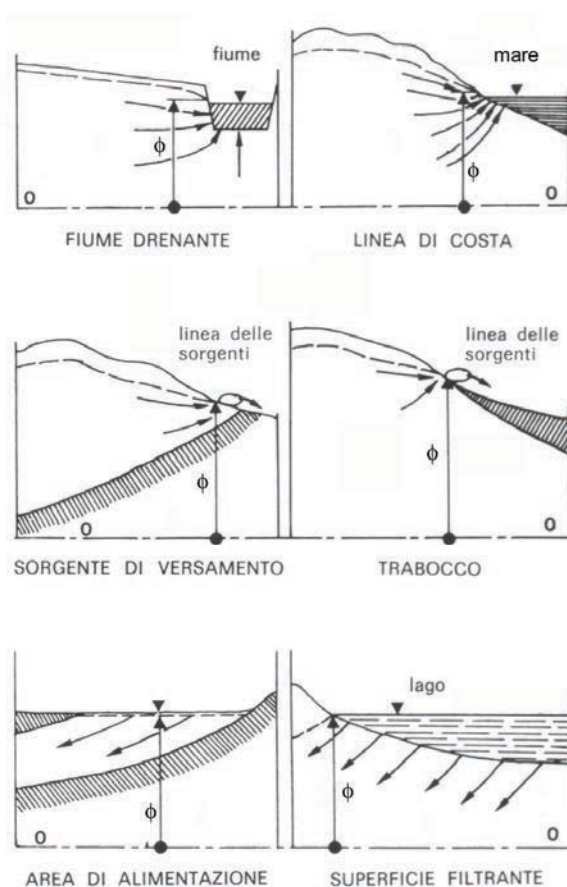


Figura 52: Esempi di limiti a potenziale imposto.

Come descritto nei paragrafi precedenti le condizioni sopra elencate sono individuabili sul terreno attraverso la ricostruzione delle strutture idrogeologiche, con l'analisi delle misure dei livelli piezometrici e delle relative fluttuazioni. Le condizioni ai limiti subiscono, infatti, variazioni sia nello spazio che nel tempo per:

- la fluttuazione della superficie piezometrica;
- la variazione del livello delle superfici d'acqua libere (fiumi, laghi);
- spostamento delle linee di spartiacque idrogeologici;
- variazioni quantitative delle portate entranti ed uscenti.

La seconda grande categoria di semplificazioni che rendono possibile la costruzione di un modello numerico è data dalle **proprietà** riferibili alle singole celle o comunque elementi finiti che compongono il modello.

Sono proprietà :

- **la geometria**, cioè le quote del tetto e del letto dei singoli layer che, in numero finito, vanno a rappresentare la c.d. discretizzazione verticale del dominio; in termini idrogeologici, occorre valutare attentamente la possibilità di riprodurre il modello come monostrato o multistrato in ragione soprattutto della reale disponibilità di misure variabili sulla verticale;

- si tratta anche in questo caso, di limiti, ma ai quali non è associata alcuna condizione;
- **le caratteristiche idrodinamiche:** conducibilità idraulica, storatività, porosità efficace.

Le proprietà derivano in grande maggioranza da misure puntuali che richiedono una opportuna interpolazione ed estrapolazione per renderle note ed estese al modello su tutto il dominio di calcolo. L'estensione delle proprietà dai dati puntuali può essere fatta, a seconda della maggiore o minore disponibilità di dati ed effettiva continuità spaziale delle variabili, per classi discrete corrispondenti a definite zone o secondo una superficie continua.

Nella figura 53 è riportata, in conclusione, una possibile legenda per gli elementi del modello concettuale; per alcune rappresentazioni si rimanda ai casi di studio.

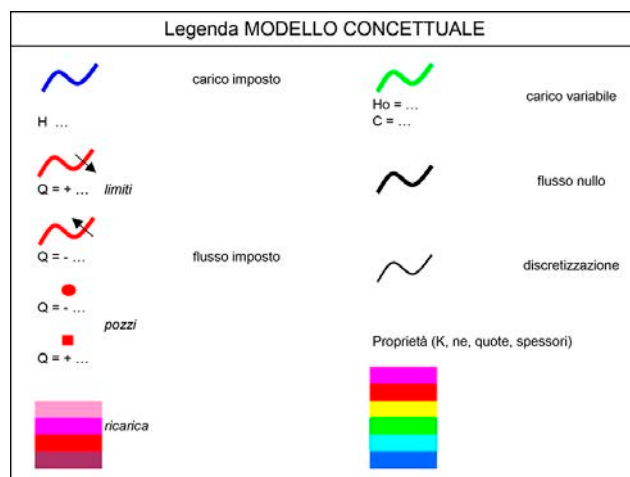


Figura 53

6. MODELLO NUMERICO

Un modello è uno strumento progettato per rappresentare alcuni specifici aspetti semplificati della realtà. Come ampiamente discusso nei paragrafi precedenti, esso deriva da un'approfondita analisi della geologia strutturale e stratigrafica, della geochimica ed idrogeologia dell'area sintetizzata in un modello concettuale

Le problematiche del passaggio da modello concettuale a modello numerico sono fondamentalmente 4:

- 1) ricostruzione, su base statistica e/o logico-deduttiva (produzione di sezioni di correlazione tra verticali con dati noti) della geometria delle superfici di separazione fra volumi con caratteristiche idrauliche significativamente differenziabili;
- 2) selezione dello strumento modellistico numerico con le migliori potenzialità di rappresentare le geometrie ipogee ricostruite;

- 3) attribuzione delle caratteristiche idrauliche a ciascun volume omogeneo significativo;
- 4) definizione dei rapporti dell'area-volume modellati (dominio di modellazione) con i contesti confinati idrogeologicamente influenti (definizione delle condizioni iniziali ed al contorno).

In generale la prima problematica può venir meglio affrontata con un approccio geostrutturale, la seconda comporta una valutazione delle caratteristiche specifiche dello strumento modellistico in termini di distorsioni indotte (orientamento della griglia) e livello di dettaglio (elementi finiti o differenze finite ed infittimenti locali), la terza si avvantaggia prevalentemente dell'impiego di tecniche geostatistiche, mentre per la quarta, geologia classica e statistica devono obbligatoriamente operare insieme e spesso, in assenza di dati sufficienti o sufficientemente affidabili, l'unica possibilità di raggiungere risultati è operare per tentativo ed errore.

Il punto 2, ovvero la scelta del codice di calcolo, avente pesanti riflessi sulla qualità della traduzione da modello concettuale a modello numerico, è stato per decenni un problema spinoso dei modellisti in quanto i codici più flessibili necessitavano di hardware costosissimo e raro e tempi di calcolo particolarmente estesi. L'esponenzialmente crescente disponibilità di potenza di calcolo, a costi accessibili a tutti, ha in parte mitigato il problema. Oggi la scelta è spesso subordinata solo all'esperienza specifica dell'operatore ed a scelte pregresse della committenza, in quei casi, non troppo frequenti, nei quali essa fosse già dotata di strumentazione modellistica, e non intendesse sostituirla.

La modellistica numerica, se opportunamente calibrata, è sicuramente uno dei metodi più accurati ed affidabili per la quantificazione dei fenomeni che interessano la progettazione di opere che interagiscono con la falda, per valutare il grado di rispondenza allo scopo ed eventuali effetti collaterali indesiderati dei vari progetti o per identificare le azioni necessarie per il recupero di risorse fortemente degradate per inquinamento e/o sfruttamento eccessivo.

Alla modellazione numerica verrà dedicato uno specifico approfondimento.

4. bibliografia

- Anderson, M.P., Woessner, W.W.** (1992) - Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport. Academic Press, San Diego. 381 pp.
- ANPA** (2001) - Linee guida per la redazione e l'uso delle carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Manuali e linee guida - 4/2001.
- Barazzuoli P.** - Dispense corso di Idrogeologia, Università degli Studi di Siena.
- Barnett, B., Townley, L. R., Post, V., Evans, R. E., Hunt, R. J., Peeters, L., Boronkay, A.** (2012) - Australian groundwater modelling guidelines. National Water Commission, Canberra.
- Beretta G.P.** (1992) - Idrogeologia per il disinquinamento delle acque sotterranee. Pitagora Editrice Bologna, Bologna, Italia, 812 pp.
- Burnash, R.J.C., Ferral, R.L., McGuire, R.A.** (1973) - A generalized streamflow simulation system, conceptual modeling for digital computers. U.S. Dept. of Commerce, NWS, and State of California, Dept. of Water Resources, 204 pp.
- Butteri M., Doveri M., Giannecchini R. & Gattai P.** (2010) - Hydrogeologic - hydrogeochemical multidisciplinary study of the confined gravelly aquifer in the coastal Pisan Plain between the Arno River and Scolmatore Canal (Tuscany). Memorie Descrittive della Carta Geologica d'Italia, Vol. 90, 51-66.
- Carrara E., Rampolla A., Roberti N.** (1992) - Le indagini geofisiche per lo studio del sottosuolo: metodi geoelettrici e sismici". Liguori Editore.
- Capacci F., Barazzuoli P., Migliorini J. e Rigati R.** - 'L'acquifero alluvionale della piana costiera del Fiume Roja a Ventimiglia: definizione del modello concettuale Roja' (pubblicazione su rivista, 2012) Giornale di Geologia Applicata, Vol.15, 31 - 40.
- Casadío M., Elmi E.** (2006) - Manuale del Geologo. Ed. Pitagora.
- Castany G.** (1985) - Idrogeologia. Flaccovio Editore.
- Castany G.** (1968) - Prospection et methodes de l'hydrogeologie. Dunod, Paris.
- Celico P.** (1986) - Prospezioni idrogeologiche voll. I-II. Liguori Editore.
- Cerbini G., Gorla M.** (2004) - Idrogeologia Applicata. Principi, metodi e misure. Edizioni Geo-Graph.
- Cerbini G. (1992) - Il manuale delle acque sotterranee. Edizioni Geo-Graph.
- Cerrina F. A., Da Prato S., Doveri M., Ellero A., Lelli M., Marini L., Masetti G., Nisi B., Raco B.** (2010) - Caratterizzazione Geologica, Idrogeologica e idrogeochimica dei corpi idrici sotterranei significativi della regione Toscana (CISS): 32CT010 "Acquifero costiero tra Fiume Cecina e San Vincenzo", 32CT030 "Acquifero costiero tra Fiume Fine e Fiume Cecina", 32CT050 "Acquifero del Cecina". Mem. Descr. Carta Geol. d'It, LXXXIX (2010), 5-80.
- Chiesa G.** (1991) - Pozzi per acqua. Ed. Hoepli.
- Chiesa G.** - Indagini geofisiche nei pozzi. Ed. Geo-Graph.
- Chiesa G.** (2001) - Specifiche tecniche per la chiusura di pozzi abbandonati. Acque sotterranee, Fasc 4, dicembre 2001.
- Civita M.** (1972) - Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di captazione. Memorie e note Ist. Geol. Appl. Napoli, 12, pp. 1-34.
- Civita M.** (1973) - L'infiltrazione potenziale media annua nel massiccio del Matese (Italia Meridionale). Atti 2° Conv. Intern. Acque Sotterr., Palermo, pp. 1-14.
- 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.
- Civita M.** (1994) - Le carte della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Teoria & Pratica. Pitagora Editrice, 325 pp.
- Civita M.** (2005) - Idrogeologia applicata ed ambientale. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.
- Civita M., De Maio M.** (1997) - SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia e automazione. Pitagora Editrice, 191 pp.
- Civita M., De Maio M.** (2000) - Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico - SINTACS R5 - A new parametric system for the assessment and automatic mapping of ground water vulnerability to contamination, Quaderni e Tecniche di Protezione ambientale, 72, Pitagora, Bologna, 226 pp., 1 CD ROM.
- Civita M., De Maio M., Fiorucci A., Pizzo S., Vigna B.** (2002) - Le opere in sotterraneo e il rapporto con l'ambiente: problematiche idrogeologiche. Meccanica e Ingegneria delle Rocce (M.I.R.), 73-106.
- Custodio E., LLamas M.R.** (1996) - Hidrologia Subterranea Vol. I-II Segunda edicion. Edicion Omega S.A. Barcelona.
- Custodio E., LLamas M.R.** (2005) - Idrologia Sotterranea, voll. I-II. Flaccovio Editore.
- Daly D., Dassargues A., Drew D., Dunne S., Goldscheider N., Neale S., Popescu I.C., Zwahlen F.** (2002) - Main concepts of the "European approach" to karst-groundwater-vulnerability assessment and mapping. Hydrogeology Journal, v. 10, 340-345.
- Doni S., Rossi S.** (2007) - Analisi degli impatti idrogeologici conseguenti alla realizzazione della galleria Vaglia - tratta appenninica FI-BO TAV. Acque Sotterranee, n. 106/2007.
- Doveri M.** (2008) - Studio idrogeologico e idrogeochimico dei sistemi acquiferi carbonatici nel bacino del Torrente Carrione (Alpi Apuane nord-

- occidentali). Proceedings del Simposio Stato del Territorio e delle risorse naturali in Toscana, Ottobre 2008, 167-176.
- Doveri M., Da Prato S., Ellero A., Lelli M., Masetti G., Menichini M., Nisi B., Raco B.** (2015a) - A multidisciplinary approach for aquifer system characterization aimed to the effective management of groundwater resources. 42nd IAH Congress - ROME, Sapienza University of Rome - 13/18 September 2015, Abstract Book, 564.
- Doveri M., Da Prato S., Ellero A., Lelli M., Masetti G., Menichini M., Nisi B., Raco B.** (2015b) - The application of integrated approach in managing regional groundwater resources: case study of Bientina aquifer system (North Tuscany, Italy). 42nd IAH Congress - ROME, Sapienza University of Rome - 13/18 September 2015, Abstract Book, 567.
- Doveri M., Giannecchini R., Giusti G., Butteri M.** (2009) - Studio idrogeologico-geochimico dell'acquifero freatico nella zona compresa tra il Canale Burlamacca ed il Fosso della Bufalina (Viareggio, Toscana). *EngHydroEnv Geology (Giornale di Geologia Applicata)*, 12, 101-117.
- Doveri M., Giannecchini R., Menichini M., Butteri M.** (2014) - Studio del fenomeno dell'intrusione marina nella falda confinata in ghiaie e dei rapporti tra sistema freatico e confinato nell'area del Parco MSRM compresa tra Fiume Arno e Canale Scolmatore. Relazione fine primo anno, 47 pp.
- Doveri M., Lelli M., Mussi M., Raco B.** (2008) - Le analisi isotopiche come strumento per la valutazione dell'impatto delle discariche RSU sui corpi idrici. *Giornale di Geologia Applicata* 2008, 9, 29-38.
- Doveri M., Menichini M., Cerrina Feroni A.** (2013) - Stable water isotopes as fundamental tool in karst aquifer studies: some results from isotopic applications in the Apuan Alps carbonatic complexes (NW Tuscany). *IJEGE*, 1 (2013), 33-50.
- Doveri M., Mussi M.** (2014) - Water isotopes as environmental tracers for conceptual understanding of groundwater flow: An application for fractured aquifer systems in the "Scansano-Magliano in Toscana" area (Southern Tuscany, Italy). *Water*, v. 6, 2255 – 2277.
- Drogue** (1972) - C. Drogue, Analyse statistique des hydrogrammes de décharge des sources karstiques, *J. Hydrol.* 15 pp.49-68.
- Federico F.** (1984) - Il processo di drenaggio da una galleria in avanzamento. *Rivista Italiana di Geotecnica*, 4, 191-208.
- Fritz P. and Fontes J.Ch.** (1980) - Introduction. In: *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry*, P. Fritz and J.Ch. Fontes (editors), Volume 1, THE TERRESTRIAL ENVIRONMENT, A. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-New York, 1 –19.
- Gat J.R.** (1981) - Properties of the isotopic species of water: the "isotope effect". In: *Stable Isotope Hydrology (Deuterium and Oxygen-18 in the Water Cycle)*, J.R. Gat & R. Gonfiantini editors, TECHNICAL REPORTS SERIE NO. 210, IAEA, Vienna, 7 – 19.
- Gattinoni P., Scesi L.** (2006) - Analisi del rischio idrogeologico nelle gallerie in roccia a media profondità. *Gallerie e grandi opere sotterranee*, 79, 69-79.
- Gosain, K.A.** (2009) *Hydrological Modelling - Literature Review*. Climawater Project, Report n. 1, Indian Institute of Technology, Delhi.
- Haitjema, H. M.** (1995) *Analytic element modeling of groundwater flow*. Academic Press.
- Lelli M., Doveri M., Raco B., Scozzari A., Menichini M.** (2013) - Database famiglie idrochimiche naturale e modello concettuale del trasporto soluti. Deliverable 2.9.2 Progetto Ministeriale ACQUASENSE, 31 pp.
- Menichini M., Doveri M., Piccini L.** (2015) - Hydrogeology and geochemistry of karst aquifers in geologically complex settings: the case of Apuan Alps (NW Tuscany, Italy). 42nd IAH Congress - ROME, Sapienza University of Rome - 13/18 September 2015, Abstract Book, 302.
- Maillet** (1905) - *Essais d'Hydraulique Souterraine et Fluviale*, Herfmann, Paris.
- Milsom J.** (2003) - *Field Geophysics*. Ed. Wiley.
- Migliorini J., Barazzuoli P., Capacci F e Rigati R.** - 'Modello concettuale dell'acquifero carbonatico della Montagnola Senese (Toscana, Italy)' (pubblicazione su rivista, 2012) *Giornale di Geologia Applicata*, Vol.15, 41 – 60.
- Meinzer** (1923) - *Outline of Ground-Water Hydrology with Definitions*. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper, 494 Washington.
- Molli, G., Doveri, M., Manzella, A., Bonini, L., Botti, F., Menichini, M., Montanari, D., Trumphy, E., Ungari, A., Vaselli, L.** (2015) - Surface-subsurface structural architecture and groundwater flow of the Equi Terme hydrothermal area, northern Tuscany Italy. *Ital. J. Geosci.*, Vol. 134, No. 3, 442-457.
- Mussi M., Leone G., Nardi I.** (1998). Isotopic geochemistry of natural water from the Alpi Apuane-Garfagnana area, Northern Tuscany, Italy. *Miner. Petrogr. Acta*, 41, 163–178.
- Nakamura Y.** (2000) - Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. In: *Proc. 12th World Conf. on Earthq. Eng.*, New Zeland, 8 pp., CD-ROM.
- Norinelli A.** (1996) - *Elementi di Geofisica Applicata*. Patron Editore.
- Picarelli L., Petrazzuoli S.M., Warren C.D.** (2002) - Interazione tra gallerie e versanti. *Meccanica e Ingegneria delle Rocce (M.I.R.)*, 219-248.
- Reilly T.E.** (2001) - System and Boundary Conceptualization in Ground-Water Flow Simulation. *Techniques of Water-Resources Investigations of the U.S. Geological Survey Book 3, Applications of*

Hydraulics Chapter B8

Ribacchi R., Graziani A., Boldini D. (2002) - Previsione degli afflussi in galleria e influenza sull'ambiente. *Meccanica e Ingegneria delle Rocce (M.I.R.)*, 143-199.

Santoro M. (1970) - Sulla applicabilità della formula di Turc per il calcolo dell'evapotraspirazione effettiva in Sicilia. *Atti I Conv. Intern. Acque Sott., I.A.H., Palermo*.

Singh, A. (2013) Groundwater modelling for the assessment of water management alternatives. *Journal of Hydrology*, 481, 220-229.

Tanzini M. (2001) - Gallerie. Aspetti geotecnici nella progettazione e costruzione. *Collana di Geotecnica e Ingegneria Geotecnica*. Flaccovio Editore, Palermo.

Thorntwaite C.W. (1948) - An approach toward a

rational classification of climate, *The Geogr. Review*, 38, 55-94.

Tison (1960) - Courbe de tarissement, coefficient d'écoulement et perméabilité du bassin. *AIHS Ass. Gener. Helsinki*, 1, pp

Tunnell G., Pazzagli G. (2001) - L'interazione tra opere in sotterraneo e falde idriche. Un recente caso di studio. *AITES-ITA 2001, Progress in tunnelling after 2000*, Ed. Teucher P., Colombo A., Pàtron, 2, 327-334.

U.S. Army Corps of Engineers - Geophysical Exploration for Engineering and Environmental Inves.

Voss, C. I. (2005) The future of hydrogeology. *Hydrogeology journal*, 13, 1-6.



Isola di Pianosa - antico pozzo alla romana Foto: Roberto Giannecchini

appendice - glossario

A

Abbattimento di falda. Abbassamento temporaneo (raramente permanente) del livello piezometrico di una falda libera sotto la quota di lavoro per permettere scavi e realizzazione di manufatti sotto falda.

Acidità. Caratteristica di una soluzione avente pH inferiore a 7.

Acquifero. Roccia o terreno dotato di porosità efficace e con una continuità spaziale fra i vuoti, tali da consentire l'accumulo ed il passaggio dell'acqua, per effetto della forza di gravità o di un gradiente di pressione.

Acque di prima pioggia. Per ogni evento meteorico si intendono le acque relative ai primi 5 mm di precipitazione distribuita sull'intera superficie scolante servita dalla rete di drenaggio.

Acque sorgive. Qualsiasi emergenza di acque sotterranee in superficie.

Acque sotterranee. Acque che si trovano al di sotto della superficie topografica, sia nella zona satura che nella zona non satura.

Acque superficiali. Acque stagnanti o scorrenti in superficie, incanalate in fiumi, torrenti, rii, fossi, canali, nonché quelle dei laghi e degli invasi.

Acque vadose. Acque incluse nel ciclo dell'acqua nella idrosfera-litosfera-atmosfera e caratterizzate da tempi di permanenza in acquifero relativamente brevi (contengono isotopi di corta vita, es. tritio, radiosilicio, ecc.). Hanno caratteristiche idrochimiche e isotopiche vicine a quelle dell'acqua piovana e quindi sono scarsamente mineralizzate. La loro mineralizzazione dipende dalle caratteristiche dell'acquifero e dai tempi di residenza. Il termine "vadose" fu introdotto da Schoeller nel 1962; altri autori, tuttavia, riservano questa definizione alle acque circolanti nel mezzo non saturo.

Adesione. Forza di attrazione molecolare che si esercita tra due corpi a contatto; quando uno dei due corpi è un liquido si ha il fenomeno dell'adsorbimento.

Adsorbimento. Fenomeno di ritenzione di acqua sulla superficie delle particelle fini del terreno, per effetto di polarizzazione dell'elemento bipolare H₂O.

Altezza piezometrica. Energia che possiede l'acqua sottoposta ad una certa pressione. È detta anche carico piezometrico. Ha le dimensioni di una lunghezza.

Anisotropia (in idrogeologia). Condizione per cui uno o più parametri idrogeologici variano nello spazio.

Aquiclude. Rocce e terreni dotati di porosità (ma con vuoti molto piccoli), per cui contengono una certa quantità di acqua, ma prevalentemente di ritenzione e quindi non sono in grado di trasmetterla (es. argille).

Aquifuge o acquifugo. Roccia sostanzialmente priva di porosità, per cui non contengono apprezzabili quantità di acqua né tanto meno sono in grado di trasmetterla.

Aquitard o acquitardo. Terreno o roccia semipermeabile ove il flusso d'acqua avviene molto lentamente.

alimentazione. Area totale dell'idrostruttura, dotata di porosità efficace e di permeabilità, in grado di ricevere acque superficiali e sotterranee e di trasmetterle ad un determinato acquifero ad essa sotteso.

Asse di drenaggio. Fascia di convergenza delle linee di flusso di una falda acquifera.

B

Bedrock (substrato). Roccia di spessore ed estensione relativamente elevati, presente nella sua posizione originaria al di sotto di una copertura (terra, suolo o altri materiali superficiali sciolti). Usato comunemente dai geologi per riferirsi a qualsiasi roccia/terreno diagenizzata/consolidato che non ha subito i processi di alterazione e degrado deformazioni tettoniche pervasive.

Bacino idrografico. Porzione di territorio che raccoglie le acque meteoriche e/o quelle provenienti

dallo scioglimento di nevi e ghiacciai le quali raggiungono, attraverso il reticolo idrografico, la sezione di chiusura del bacino stesso.

Bilancio idrologico. Comparazione, nel periodo di tempo considerato e con riferimento ad un determinato bacino o sottobacino, superficiale o sotterraneo, tra afflussi e deflussi naturali, ovvero deflussi che si avrebbero in assenza di pressione antropica.

Bilancio idrico. Comparazione, nel periodo di tempo considerato, fra le risorse idriche in un determinato bacino o sottobacino, superficiale o sotterraneo, al netto delle risorse necessarie, alla conservazione degli ecosistemi acquatici ed i fabbisogni per i diversi usi.

Bilancio idrogeologico. Comparazione, in un determinato bacino o in una determinata area, delle entrate e delle uscite di acqua per via superficiale e sotterranea.

Boccapozzo. Apertura superiore di un pozzo.

C

Capacità autodepurante. Capacità di un acquifero, di un corpo idrico o di un terreno di disinquinare naturalmente le acque.

Coefficiente di immagazzinamento (S). Rapporto tra il volume d'acqua liberato o immagazzinato (a seguito di una variazione unitaria del livello piezometrico) in un prisma verticale di materiale acquifero saturo ed il volume del prisma stesso.

Coefficiente di permeabilità (K). Vedi conducibilità idraulica.

Coefficiente di uniformità granulometrica (U). In una curva granulometrica, corrisponde al rapporto tra il diametro delle particelle corrispondente al 60% di passante e quello corrispondente al 10% di passante ($U = D_{60} / D_{10}$). Un terreno è considerato uniforme se < 2 .

Condizionamento o completamento (di un pozzo). Trasformazione di un foro in un pozzo mediante opportuno allestimento di tubi ciechi, tubi filtri e dreni, testata, con cementazione definitiva seguita allo sviluppo o espurgo del pozzo stesso.

Conducibilità elettrica (CE). Esprime la capacità dell'acqua di farsi attraversare da corrente elettrica (inverso della resistività elettrica) ed è proporzionale al contenuto in sali minerali disciolti. La conducibilità elettrica fornisce pertanto una stima approssimativa del contenuto salino. E' funzione della temperatura.

Conducibilità idraulica (K). Quantità di acqua che fluisce nell'unità di tempo e sotto un gradiente idraulico unitario attraverso una sezione unitaria di terreno. Esprime quindi la capacità di un mezzo di lasciarsi attraversare dall'acqua. Viene indicata con K (coefficiente di permeabilità) e ha le dimensioni di una velocità (vedi anche permeabilità).

Cono di depressione. Depressione a forma grossolanamente conica della superficie piezometrica di una falda acquifera per effetto dell'azione di pompaggio di un pozzo.

Contenuto d'acqua, (w). Rapporto percentuale tra peso dell'acqua di un dato volume di t. e il peso della parte.

Cuneo salino. Vedi Intrusione marina.

Curva caratteristica (di un pozzo). Relazione tra portata e abbassamenti del livello piezometrico dinamico in un pozzo ottenuta mediante effettuazione di una prova di pompaggio a gradini di portata. Permette di ottenere la portata critica e la portata di esercizio del pozzo in funzione delle caratteristiche del pozzo e del sistema pozzo-acquifero.

D

Deflusso di base. Portata restituita al reticolo superficiale dalle acque infiltrate nel sottosuolo, in assenza di piogge.

Densità. Rapporto tra la massa volumetrica di un corpo e il suo volume.

Diffusione. Processo di distribuzione di un soluto in soluzione.

Diffusione molecolare. Movimento delle sostanze disciolte in una soluzione causato dal gradiente di concentrazione.

Diffusività, D. Rapporto tra la trasmissività e il coefficiente di immagazzinamento.

Discontinuità sismiche. Superfici o strati sottili posti all'interno del profilo stratigrafico in studio,

attraverso i quali si verificano nette variazioni di velocità delle onde sismiche. Queste sono zone di brusca variazione delle proprietà elastiche delle rocce.

Direzione di flusso. Direzione verso cui fluisce l'acqua di falda (vedi anche linea di flusso).

Dispersione idrodinamica. Dispersione dinamica delle particelle di un liquido nel flusso attraverso un mezzo poroso, dovuta alla variazione di velocità entro il reticolo degli interstizi ed alla diffusione molecolare.

Dispersione meccanica. Parte di dispersione dinamica dovuta al solo flusso delle particelle di soluto.

Domanda d'acqua. Quantità di acqua necessaria, per un dato periodo di tempo, a soddisfare completamente una determinata richiesta.

Drenaggio. È il complesso dei sistemi naturali o artificiali che permettono lo smaltimento dell'acqua in eccesso del terreno, superficiale o sotterranea. Con lo stesso termine s'intende pertanto sia la proprietà intrinseca del terreno a lasciar percolare l'acqua gravitazionale, sia gli interventi di natura antropica atti ad emungere l'acqua in eccesso facendola defluire in un sistema di raccolta.

Drenanza. Fenomeno di scambi idrici tra falde acquifere intercomunicanti caratterizzate da diverso carico piezometrico. La drenanza può essere ascendente o discendente a seconda se la differenza tra i carichi piezometrici permettono la risalita di acqua dalla falda inferiore a quella superiore o viceversa.

Durezza (dell'acqua). Esprime la concentrazione di ioni Ca^{2+} e Mg^{2+} disciolti. Si distinguono: la durezza totale data da tutti gli ioni Ca^{+} e Mg^{2+} presenti (derivanti da carbonati, bicarbonati, solfati, cloruri, nitrati, ecc.); la durezza permanente, data dagli ioni Ca^{2+} e Mg^{2+} dovuti alla presenza di solfati e cloruri, talora nitrati, e che persiste dopo aver fatto precipitare i carbonati mediante ebollizione. La durezza dovuta ai soli carbonati è anche chiamata durezza temporanea, perché può essere eliminata tramite il processo di ebollizione.

E

Effetto arco. Trasferimento di sforzo da una parte cedevole di una massa di roccia o di terra a parti adiacenti meno cedevoli o meno compresse.

Efficienza del pozzo. Rapporto percentuale tra le perdite di carico lineari e quelle totali per una data portata di emungimento.

Emungimento (o pompaggio). Estrazione di acqua dalle falde acquifere mediante pozzi.

Evapotraspirazione potenziale. Tasso di evaporazione dal suolo e di traspirazione delle piante che si avrebbe in condizioni illimitate di acqua nel terreno.

Evapotraspirazione reale. Tasso di evaporazione dal suolo e di traspirazione delle piante che si ha in condizioni naturali.

F

Facies idrochimica. Composizione chimica di un'acqua definita dall'abbondanza relativa di anioni e cationi che consente la classificazione dell'acqua stessa all'interno di un sistema idrologico.

Falda acquifera. Acqua contenuta in un acquifero con continuità laterale assai maggiore di quella verticale; la falda può essere confinata, freatica (o libera) o semi-confinata. Una falda confinata può essere in pressione, ovvero la sua superficie piezometrica è posta al di sopra del tetto dell'acquifero. Una falda in pressione la cui superficie piezometrica è superiore alla superficie topografica viene definita falda artesianica.

Falda sospesa. Falda freatica di limitata estensione formatasi nella zona non satura per la presenza di una lente di terreno impermeabile.

Faglia. Superficie di discontinuità che si produce in seguito alla rottura di una massa rocciosa, con spostamento relativo dei due blocchi separati. La superficie lungo cui si è verificata la frattura si chiama *superficie di faglia* oppure *piano di faglia*, o anche *specchio di faglia*. Le rocce in prossimità di una faglia risultano spesso intensamente fratturate e cataclosate e si parla in questo caso di rocce di faglia quali le cataclasiti o le miloniti. Dal punto di vista

reologico, in prima approssimazione le rocce possono comportarsi in maniera fragile oppure in maniera duttile. Nel primo caso si ha la formazione di una faglia; nel secondo di una piega. Le faglie possono essere inverse o di compressione (*reverse, compressive fault*), normali (di trazione) o dirette (*normal fault*), di sovrascorrimento (*thrust*) o trascorrenti.

Fango di perforazione. Soluzione colloidale usata per la perforazione di pozzi a distruzione di nucleo.

Frangia capillare. Zona del terreno immediatamente sopra la superficie freatica, dove l'acqua viene sollevata per fenomeni di capillarità.

Freatimetro. Strumento per la misura del livello piezometrico. E' dotato di un circuito elettrico che si chiude appena il sensore piezometrico tocca l'acqua, determinando un segnale acustico e/o luminoso.

Fronte di contaminazione. Interfaccia o fronte di separazione tra acqua contaminata e acqua di falda.

G

Gradino di portata. Pompaggio a portata costante di durata relativamente breve durante una prova di pompaggio a gradini crescenti.

Gradiente idraulico. Diminuzione del carico idraulico per distanza unitaria lungo la direzione del flusso.

Grado di saturazione. Rapporto tra il volume di acqua contenuto in un mezzo poroso e il volume dei vuoti del mezzo stesso.

H

Hardpan. Strato di terreno estremamente addensato.

I

Idrometro. Strumento per la misura del livello dell'acqua dei fiumi o dei laghi. Qualora la stazione sia dotata di scala di deflusso, dalla misura del livello è immediatamente ricavabile la portata fluente in quella sezione.

Immagazzinamento dinamico. Insieme di tutte le risorse e riserve esistenti in un acquifero a una certa data che si trovano al di sopra della quota di sfioro (con esclusione quindi delle riserve permanenti).

Immagazzinamento globale. Insieme di tutte le risorse e riserve esistenti in un acquifero a una certa data.

Immissione continua. Immissione continuativa in falda di un tracciante nelle operazioni di tracciamento.

Immissione istantanea. Immissione in falda di un prefissato quantitativo di un tracciante nelle operazioni di tracciamento.

Impedenza sismica. Prodotto della densità del terreno per la velocità delle onde sismiche, che varia tra strati differenti di terreno, comunemente indicata con Z . Il contrasto di impedenza sismica fra strati di roccia adiacenti influisce sul coefficiente di riflessione.

Indice dei vuoti, e . Rapporto tra volume dei vuoti e volume della parte solida di un terreno.

Indice di consistenza, I_c . Rapporto tra differenza tra limite di liquidità e contenuto naturale d'acqua e indice di plasticità. $I_c = (w_l - w_n)/I_p$.

Indice di liquidità, I_l . Rapporto tra differenza tra contenuto naturale d'acqua e limite di plasticità e indice di plasticità. $I_l = (w_n - w_n)/I_p$.

Indice di plasticità, I_p . Differenza tra limite di liquidità e limite di plasticità.

Indice di qualità della roccia (Rock Quality Designation o R.Q.D.). Parametro che designa il grado di continuità di una roccia dalla misura della lunghezza delle carote di diametro intorno a 100 mm, valutandone la % di carotaggio nei vari tratti, considerando spezzoni di carota di

lunghezza ≥ 10 cm.

Indice di rigonfiamento, *Cr*. Pendenza del tratto di scarico della curva pressione-indice dei vuoti su grafico semilogaritmico.

Indice di rimaneggiamento (*remolding index*) *Ir*. Rapporto tra 1) modulo di deformazione (*v.*) di un terreno indisturbato e 2) quello di un terreno rimaneggiato.

Indice di ritiro *SI*. Differenza tra il limite di plasticità e il limite di ritiro.

Inelasticità. Deformazione nel campo della duttilità.

Infiltrazione efficace. Acqua che si infiltra nel terreno e che raggiunge la falda acquifera. Infiltrazione efficace. Frazione degli afflussi meteorici che si infiltra nei terreni di sottosuolo, alimentando le falde acquifere. Spesso viene quantificata in via teorica mediante il coefficiente di infiltrazione potenziale, ovvero una frazione della disponibilità idrica (precipitazione efficace) funzione della permeabilità della roccia.

Interfaccia acqua dolce/acqua salata. Superficie ideale che separa un corpo di acqua dolce da un corpo di acqua salata nel fenomeno dell'intrusione marina in una falda costiera. Vedi anche Zona di miscelazione.

Interferenza (tra pozzi). Effetto della sovrapposizione dei coni di depressione di due o più pozzi vicini tra loro che emungono acqua dalla stessa falda.

Interpolazione. Metodo per individuare nuovi punti del piano cartesiano a partire da un insieme finito di punti dati, nell'ipotesi che tutti i punti si possano riferire ad una funzione $f(x)$ di una data famiglia di funzioni di una variabile reale.

Interstizio (o vuoto, o poro). Vuoto presente all'interno di una roccia che si forma tra i grani di un terreno incoerente.

Intrusione marina (o cuneo salino). Penetrazione dell'acqua di mare nelle falde acquifere costiere.

Iperstatica (struttura). Indica che un generico corpo nello spazio possiede un numero di gradi di libertà inferiori al numero di gradi di vincoli.

Isocrona. Linea luogo dei punti aventi lo stesso tempo di arrivo ad un prefissato punto (es. pozzo in pompaggio).

Isofreatica. Linea luogo dei punti di una superficie freatica aventi la medesima quota rispetto a un piano di riferimento (generalmente il livello del mare).

Isopieza (o isopiezometrica). Vedi linea equipotenziale.

Isotopo. Atomo di uno stesso elemento chimico, e quindi con lo stesso numero atomico, ma con differente numero di massa, e quindi differente massa atomica. La differenza dei numeri di massa è dovuta ad un diverso numero di neutroni presenti nel nucleo dell'atomo a parità di numero atomico.

Isostatica (struttura). Indica che un generico corpo nello spazio possiede un numero di gradi di vincoli pari al suo numero di gradi di libertà.

Isotropia idrogeologica. Costanza delle stesse caratteristiche idrogeologico-idrauliche in tutte le direzioni.

Isotropia litologica. Costanza delle stesse caratteristiche litologiche in tutte le direzioni.

L

Legge di Darcy. Relazione relativa alla proporzionalità tra la portata di un fluido attraverso un mezzo poroso e il gradiente idraulico che genera il moto.

Limite a flusso imposto. Discontinuità idrogeologica che, in particolari condizioni idrodinamiche (naturali o indotte), favorisce, limita o impedisce il passaggio di determinate portate idriche sia in entrata che in uscita dall'acquifero. Coincide con passaggi laterali o verticali di facie che comportano variazioni di trasmissività, oppure con faglie (drenanti o tamponanti).

Limite a potenziale imposto. Discontinuità idrogeologica e/o idrologica che, in particolari condizioni idrodinamiche (naturali o indotte), consente di tenere fissi determinati livelli idrici, sia in entrata che in uscita dall'acquifero. Coincide con superfici di acqua libera (fiume, lago, mare, ecc. che drenano o alimentano la falda, oppure con sorgenti o fronti sorgivi).

Linea di flusso. Traiettoria teorica seguita da una particella d'acqua in un flusso laminare secondo il gradiente idraulico.

Linea equipotenziale. Luogo dei punti aventi medesimo potenziale idraulico, assimilata ad una

linea di uguale livello piezometrico (linea idroisoipsa o isopieza o isopiezometrica).

Liquefazione. Improvviso forte decremento di resistenza al taglio di un terreno granulare incoerente causato dal collasso della struttura per vibrazione (sismica) o altro tipo di deformazione e associato ad un improvviso e temporaneo aumento delle pressioni interstiziali.

Livello dinamico (nel pozzo). Livello piezometrico nel pozzo in condizioni di sfruttamento dello stesso.

Livello piezometrico. Quota, o elevazione al di sopra della quota 0 s.l.m., del livello dell'acqua nel sottosuolo.

Livello statico (nel pozzo). Livello piezometrico indisturbato nel pozzo in assenza di emungimento.

M

Misuratore di portata. Strumento per la misura delle portate di corsi d'acqua, sorgenti, ecc.

Modellizzazione. Analisi e risoluzione di un problema o di un fenomeno idrogeologico mediante simulazione con modelli matematici.

Modello geologico. Rappresentazione del sottosuolo ottenuta da una serie di indagini geologiche finalizzata alla ricostruzione dell'assetto geologico.

Modello idrogeologico. Rappresentazione del sottosuolo ottenuta da una serie di indagini geologiche e idrogeologiche finalizzata alla ricostruzione degli acquiferi e delle loro caratteristiche idrauliche.

Modello matematico (o numerico). Rappresentazione matematica di un processo mediante un certo numero di variabili e una serie di equazioni che descrivono l'interazione di queste variabili. Un modello idrogeologico numerico, se basato su una robusta base di dati reali, permette una simulazione ragionevole del fenomeno reale.

Monitoraggio. Controllo di un fenomeno con misure sistematiche nel tempo.

Morfogenesi. L'insieme dei processi di modellamento del paesaggio (ciclo morfogenetico).

N

Neutra (pressione). Vedi Pressione interstiziale.

Non saturo. Vedi zona non satura.

O

Omotermia. Situazione in cui la temperatura di un corpo d'acqua o di terreno non è influenzata dalle variazioni termiche dell'atmosfera.

Ossigeno disciolto. Quantità di ossigeno disciolto nell'acqua.

P

Perdita di carico (nel pozzo). Perdita di carico idraulico che subisce il flusso dell'acqua nel pozzo passando attraverso l'acquifero, il dreno, i filtri e i tubi di rivestimento.

Perdita di carico (tra due punti). Differenza di carico idraulico tra i due punti presi in considerazione.

Permeabilità. Capacità di un mezzo di lasciarsi attraversare, trasmettere e immagazzinare un fluido per effetto della gravità o di un gradiente di pressione; è misurata dal coefficiente di permeabilità K , funzione delle caratteristiche del mezzo e del fluido in questione (vedi anche conducibilità idraulica).

Permeabilità intrinseca. E' caratteristica solo del mezzo poroso, indipendentemente dalle proprietà del fluido.

Peso di volume (peso specifico apparente, peso dell'unità di volume totale), g ($F \cdot L^{-3}$). Peso dell'unità di volume della massa composta dai granuli o particelle, dal liquido e dal gas eventualmente contenuti. W/V o P/V .

Peso di volume della parte solida, γ_s . Rapporto tra il peso del terreno essiccato (P_s) ed il volume della parte solida o dei granuli (P_s/V_s).

Peso di volume secco, g_d . Rapporto tra il peso del terreno essiccato e il suo volume allo stato naturale di umidità. P_s/V .

Peso di volume del terreno immerso (o alleggerito) g' . Peso dell'unità di volume saturo diminuito del peso specifico dell'acqua: $\gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$.

Peso specifico dei granuli, G_s . Rapporto tra peso di volume della parte solida e peso di un uguale volume di acqua distillata a t° stabilita. $G_s = g_s/g_w$.

Peso specifico totale, G . Rapporto tra peso dell'unità di volume totale e peso di un uguale volume di acqua distillata a t . stabilita. $G_s = g/g_w$.

pH. Misura il grado di dissociazione in ioni H^+ e OH^- tramite il valore di $-\log_{10}[H_3O^+]$. Il pH di una soluzione fornisce informazioni relative alla basicità ($pH > 7$) o acidità ($pH < 7$) di un'acqua. $pH = 7$ indica acqua neutra.

Piezometro. Tubo condizionato similmente ad un pozzo (tubi filtri e ciechi) ma di diametro generalmente più piccolo, utilizzato per la misura del livello piezometrico, in modo discontinuo o continuo, ma in cui è possibile anche effettuare campionamenti, prove di portata, prove di permeabilità, misure dei parametri chimico-fisici, ecc.

Precipitazione efficace (o disponibilità idrica). Afflussi meteorici al netto dell'evapotraspirazione.

Porosità (o porosità totale), n . Rapporto tra volume dei vuoti di una massa di terreno e il volume totale. $n = (V_v/V)\%$.

Porosità primaria. Porosità originatasi contemporaneamente alla formazione del litotipo.

Porosità secondaria. Porosità originatasi successivamente alla formazione del litotipo.

Portata critica (di un pozzo). Portata massima ottenibile da un pozzo mantenendo il flusso ragionevolmente laminare. Si ottiene da una prova di pompaggio a gradini di portata.

Portata di esercizio (di un pozzo). Quota parte della portata critica (in genere 80-90%) ottimale per l'esercizio del pozzo in funzione di un corretto sfruttamento del sistema pozzo-acquifero e del rendimento del pozzo.

Porosità efficace, n_e . Rapporto tra il volume dei pori interconnessi e il volume totale.

Portata fluviale. Volume d'acqua che transita, nell'unità di tempo, attraverso una sezione trasversale del corso d'acqua.

Portata misurabile o attuale. Portata fluente nella rete idrografica, comprensiva di prelievi e scarichi in atto. E' la portata rilevata nelle stazioni di misura.

Portata naturale. Portata teoricamente fluente nella rete idrografica in assenza di alterazioni prodotte da usi antropici.

Portata specifica (di un pozzo). Rapporto tra la portata di un pozzo e il relativo abbassamento piezometrico misurato nel pozzo stesso.

Pozzo. Perforo ove è stata installata una tubazione munita di filtri in corrispondenza di un livello acquifero e dotato di sistema di pompaggio e di eduazione; alla sommità è provvisto di una testa stagna che impedisce la contaminazione con le acque superficiali.

Pressione di filtrazione. Incremento della pressione idrostatica dovuta alla filtrazione dell'acqua.

Pressione geostatica (o litostatica). È la pressione esercitata su ogni granulo di roccia in profondità dal carico di rocce sovrastanti. Essa si trasmette in ogni direzione e si misura con il peso della colonna di roccia che grava sull'unità di superficie (sinonimi: pressione litostatica, di seppellimento o di confine).

Pressione idrostatica. Pressione in un liquido in condizioni statiche. Per la legge di Stevino è il prodotto $\gamma * H$ del peso specifico del liquido per la differenza di quota tra un dato punto e la superficie piezometrica.

Pressione neutra o interstiziale, u ($F \cdot L^{-2}$). Pressione esercitata dall'acqua contenuta negli interstizi di un terreno poroso.

Prevalenza (di una pompa). Massima altezza a cui una pompa può sollevare l'acqua.

Prospezione geoelettrica. Indagine di sottosuolo finalizzata alla determinazione della resistività elettrica dei vari terreni (elettrostrati), utile nelle indagini idrogeologiche.

Prova a gradini di portata. Prova di pompaggio a tre o più gradini di portata costanti. Utile per avere informazioni sulle condizioni di sfruttamento del sistema pozzo-acquifero (portata critica, portata di esercizio, ecc.).

Prova di lunga durata. Prova di pompaggio ad un unico gradino di portata costante,

generalmente prossima alla portata di esercizio. Utile per avere informazioni sui parametri idrogeologici dell'acquifero (coefficiente di permeabilità, trasmissività, coefficiente di immagazzinamento).

Prova di permeabilità. Prova effettuata in sito (pozzo, piezometro, pozzetto superficiale, con permeametro, ecc.) o in laboratorio (permeametro) per determinare il coefficiente di permeabilità del mezzo indagato.

Prova di pompaggio. Estrazione di acqua sotterranea tramite pozzi (o anche piezometri), con relativa misura di portata emunta, abbassamento del livello piezometrico nel pozzo, risalita del livello piezometrico dopo l'arresto dell'emungimento, tempi di emungimento e di risalita. A seconda del tipo di prova, fornisce informazioni indispensabili per la produttività/gestione del sistema pozzo-acquifero, quale la portata di esercizio del pozzo (prova a gradini di portata), o sui parametri idrogeologici dell'acquifero (prova di lunga durata su stazione di prova, ovvero pozzo dotato di almeno un piezometro all'interno del cono di depressione).

Q

Qualità dell'acqua. Caratteristiche chimico-fisiche-biologiche dell'acqua.

R

Raggio di influenza (o di azione, di un pozzo). Raggio del cono di depressione di un pozzo misurato sulla superficie piezometrica. Può essere anche definito come la distanza dal centro del pozzo del punto più lontano in cui la superficie piezometrica non viene abbassata quando il pompaggio ha prodotto la massima portata costante.

Rapporto isotopico. Rapporto di massa tra l'isotopo più pesante e quello più leggero di uno stesso elemento.

Regime stazionario (o di equilibrio). Fase di emungimento di acqua da un pozzo in cui il livello dinamico e il cono di depressione si stabilizzano.

Regime transitorio (o di non equilibrio). Fase di emungimento di acqua da un pozzo in cui il livello dinamico si abbassa e il cono di depressione si allarga.

Residuo fisso (RF) o secco (RS). Corrisponde al peso in grammi dei composti solidi secchi presenti nell'acqua.

Rete di flusso (o di deflusso). Rappresentazione grafica di linee di flusso e linee equipotenziali (v.), utilizzata nello studio di fenomeni di filtrazione.

Rete piezometrica. Insieme di pozzi e/o piezometri utilizzati in una determinata area per il monitoraggio dei livelli piezometrici e di eventuali altre misure (parametri chimico-fisici, ecc.) o per campionamento delle acque.

Ricarica. Processo di ripascimento naturale di una falda per effetto del ciclo idrologico.

Ricarica artificiale. Operazione consistente nell'immettere artificialmente acqua in falda mediante pozzi di immissione.

Rilievi idrogeologici. I rilievi che integrano i dati dei rilievi litostratigrafici e strutturali con la raccolta di tutte le informazioni relative ai punti di acqua, quali pozzi, sorgenti, fontanili e simili. I rilievi idrogeologici permettono anche di raccogliere informazioni traducibili in elaborati che rappresentino la distribuzione areale dei terreni in funzione delle loro caratteristiche di permeabilità ed hanno lo scopo di definire la presenza e le modalità della circolazione idrica sotterranea, anche in rapporto all'idrografia superficiale. Il rilievo idrogeologico assume particolare importanza nel caso di realizzazione di gallerie e trincee profonde, che hanno maggiori capacità d'interferenza potenziale con l'idrologia sotterranea.

Risalita. Movimento ascendente del livello dinamico di un pozzo dalla cessazione dell'attività di pompaggio.

Riserva idrica (o sotterranea). Volume di acqua gravifica immagazzinata in un acquifero che non viene a giorno naturalmente per caratteristiche idrostrutturali dell'acquifero o perché il ciclo idrologico la ricarica prima del suo esaurimento. E' quindi un volume di acqua non rinnovabile nel sottosuolo.

Riserva permanente. Volume di acqua gravifica immagazzinata in un acquifero al di sotto della minima quota di sfioro delle acque sotterranee.

Riserva regolatrice. Volume di acqua gravifica immagazzinata tra il livello piezometrico minimo della quota di sfioro e il livello piezometrico misurato alla fine del periodo di esaurimento della falda o delle sorgenti, riferito all'anno medio o ad un determinato anno idrologico.

Risorsa dinamica. Volume di acqua gravifica immagazzinata in un acquifero che determina le variazioni di portata della sorgente e/o della falda nel corso del periodo di esaurimento.

Risorsa idrica. Volume di acqua gravifica rinnovabile ogni anno durante il normale ciclo idrologico.

Risorsa idrica utilizzabile. Risorsa destinabile agli usi, tenendo conto dei vincoli di carattere socio-economico, di tutela delle acque, di compatibilità ambientale e di qualità.

S

Salamoia. Soluzione salina con contenuto di sali disciolti molto elevato, superiore a quello dell'acqua di mare.

Salinizzazione. Aumento della concentrazione dei sali disciolti in acqua.

Sezione idrogeologica. Rappresentazione su un piano verticale dell'assetto e delle caratteristiche idrogeologiche dei litotipi presenti.

Sistema acquifero. Insieme di orizzonti acquiferi e di orizzonti più o meno impermeabili, sovrapposti, che formano un'unica unità idrogeologica.

Soggiacenza. Distanza tra la superficie topografica e la superficie piezometrica.

Solubilità. Si definisce solubilità (o miscibilità) di un soluto in un solvente, a determinate condizioni di temperatura e pressione, la massima quantità di un soluto che in tali condizioni si scioglie in una data quantità di solvente, formando in tal modo fase con esso. Il rapporto tra soluto e solvente per unità di soluzione è espressa dalla concentrazione.

Sorgente. Punto della superficie del terreno in cui le acque sotterranee vengono a giorno naturalmente. Rappresenta un punto di intersezione tra la superficie piezometrica e la superficie topografica.

Sostenibilità dei prelievi sotterranei. Situazione che si ha quando i prelievi idrici sono mediamente uguali o inferiori rispetto alla ricarica, in modo che si determini nel tempo un equilibrio nel bilancio della falda con una ragionevole stabilizzazione della sua superficie piezometrica.

Sovrasfruttamento della falda. Emungimento di acqua da una falda con portata superiore a quella della sua alimentazione.

Stratigrafia del pozzo. Descrizione dei terreni attraversati durante la perforazione di un pozzo.

Superficie piezometrica. Superficie in cui la pressione dell'acqua eguaglia la pressione atmosferica. In una falda libera o freatica la superficie piezometrica è definita anche superficie freatica o tavola d'acqua; in una falda confinata in pressione la superficie piezometrica è una superficie virtuale, individuabile solo per mezzo di pozzi o piezometriche intercettano la falda stessa e coincidente con il livello idrico raggiunto nel pozzo/piezometro.

Sviluppo (o espurgo o spurgo) di un pozzo. Operazioni effettuate in un pozzo per ripulire ed aumentarne l'efficienza idraulica e la durata.

T

TDS (Total Dissolved Solids). Concentrazione totale dei costituenti solidi disciolti in acqua, in genere espressa in mg/l.

Tempo di risposta. Tempo trascorso dal momento in cui si verifica un fenomeno e il momento in cui se ne riscontrano gli effetti.

Tetto impermeabile. Orizzonte impermeabile che delimita superiormente un acquifero confinata.

Torbidità. Condizione di un liquido dovuta alla presenza di particelle solide fini in sospensione.

Tracciamento (o tracciatura). Indagine idrogeologica consistente nell'immettere in falda un tracciante per ottenere informazioni su percorso e/o provenienza delle acque, sulla permeabilità degli acquiferi e sull'origine di fenomeni di inquinamento.

Tracciante. Sostanza naturale o artificiale utilizzata per avere informazioni sulle acque superficiali o sotterranee, quali percorso, velocità, provenienza, inquinamento, ecc.

Trammissività, T. Prodotto tra coefficiente di permeabilità e spessore della porzione datura dell'acquifero. La trammissività può anche essere definita come il volume di acqua gravifica che passa nell'unità di tempo, per effetto di un gradiente idraulico unitario, attraverso una sezione (ortogonale alla direzione di flusso) di larghezza unitaria e di altezza pari allo spessore saturo dell'acquifero (alla temperatura di 20°C).

Trizio (Tritio). Il trizio (simbolo ^3H o T) è un isotopo radioattivo dell'idrogeno con un nucleo formato da un protone e due neutroni. E' usato come tracciante e per datazioni dell'acqua.

Tubo cieco. Parte della tubazione di un pozzo, priva di fenestrature, in modo da evitare l'ingresso di acqua nel pozzo.

Tubo filtro. Parte della tubazione di un pozzo, munita di fenestrature, per permettere l'ingresso dell'acqua nel pozzo.

Tubazione telescopica. Rivestimento di un pozzo fatto con più tubazioni di diverso diametro.

U

Umidità (del suolo). Acqua contenuta nel terreno non saturo.

Unità idrogeologica. Porzione di territorio delimitabile per caratteristiche morfologiche nella quale sono presenti uno o più (normalmente sovrapposti) acquiferi che possono anche essere idraulicamente interconnessi.

Upconing. Processo per cui l'acqua marina viene richiamata all'interno della zona acquifera occupata da acqua dolce, in genere dovuto ad attività di pompaggio dell'acqua dolce.

V

Velocità apparente. Velocità dell'acqua di falda di Darcy, ovvero il prodotto del coefficiente di permeabilità K per il gradiente idraulico i .

Velocità reale o effettiva. Velocità effettiva dell'acqua di falda, data dal rapporto tra la velocità di Darcy e la porosità efficace. La velocità reale è dunque superiore a quella apparente.

Viscosità. Grandezza fisica che indica la resistenza di un fluido allo scorrimento.

Z

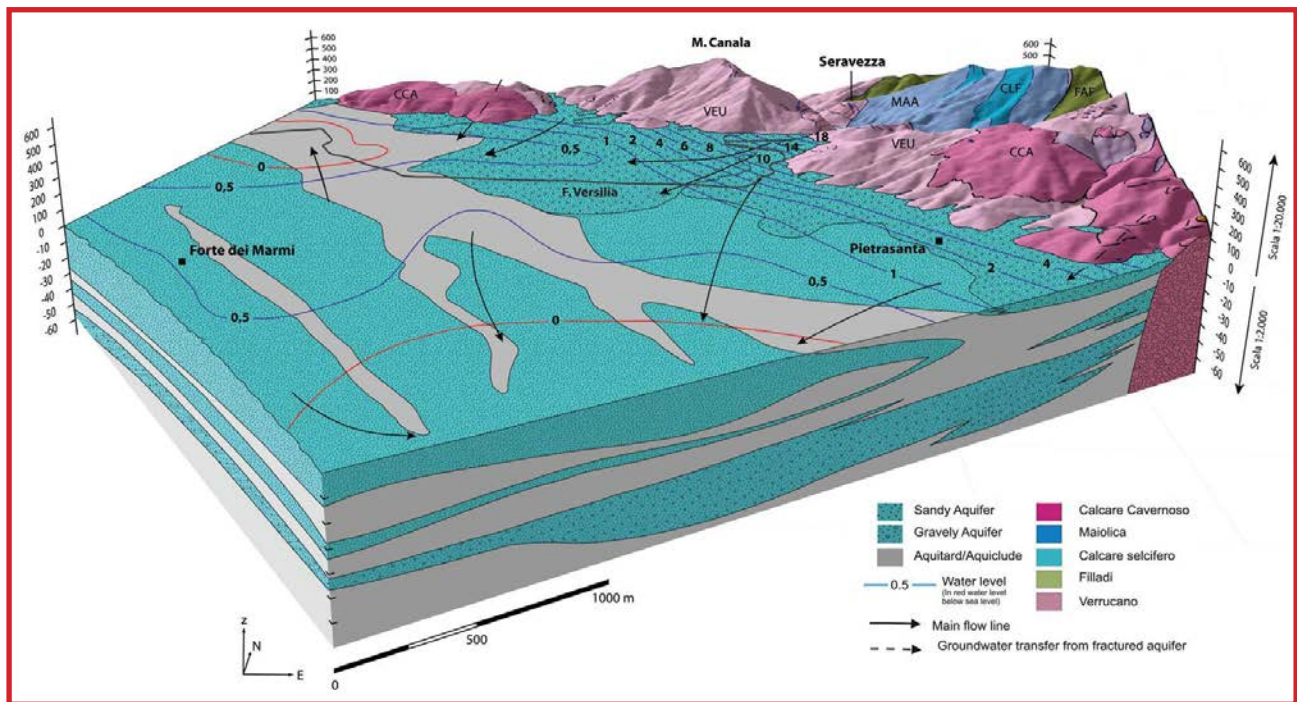
Zona di fluttuazione (o di oscillazione). Porzione di un acquifero che viene a trovarsi alternativamente nella zona satura e nella zona non satura, per effetto delle oscillazioni della superficie piezometrica di una falda libera, generalmente in funzione dei periodi di ricarica/scarica.

Zona di miscelazione. Zona che separa i domini occupati da due liquidi con caratteristiche chimico-fisiche differenti ed attraverso la quale le loro proprietà variano gradualmente dall'uno all'altro (es. nel fenomeno dell'intrusione marina).

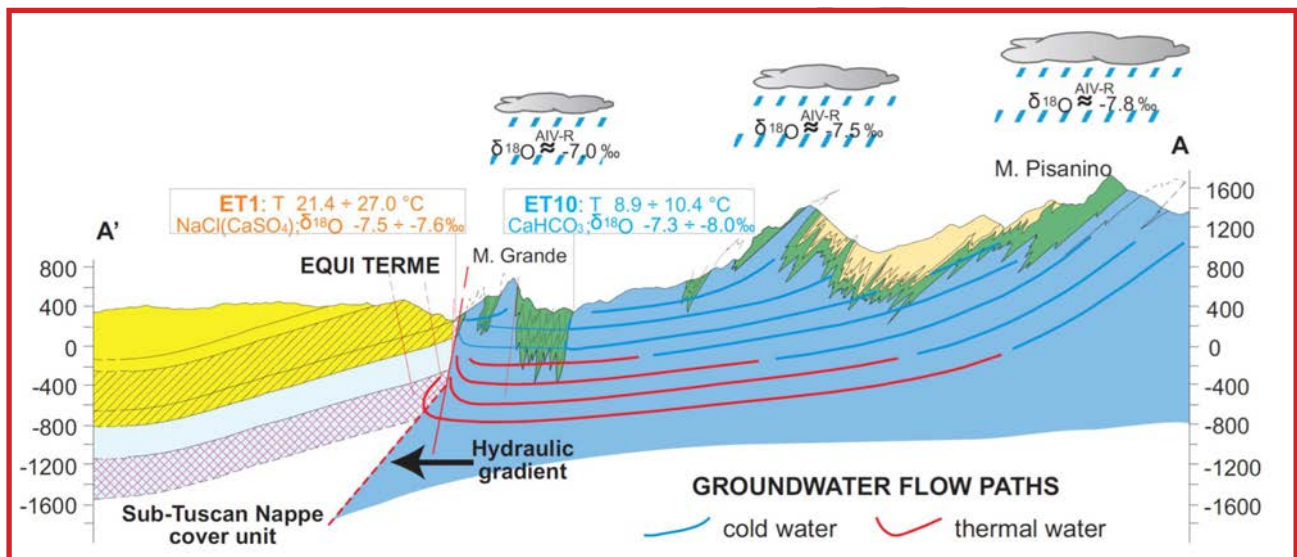
Zona non satura (o di aerazione). Porzione di acquifero libero situata tra la superficie topografica e la superficie piezometrica. La zona non satura può essere presente anche in un acquifero confinato non saturo e quindi senza falda acquifera in pressione.

Zona satura. Porzione di acquifero posta tal di sotto della superficie piezometrica di un acquifero libero o tra due orizzonti impermeabili di un acquifero confinato con falda in pressione, in cui tutti i vuoti comunicanti sono saturi d'acqua.

Zona vadosa. Vedi zona non satura.



Schema idrogeologico nell'area Versilia-Alpi Apuane (autori: Simone Da Prato, Marco Doveri, Matia Menichini, Giulio Masetti)



Schema idrogeologico del sistema idrotermale di Equi Terme -Toscana NW (da Molli et al, 2015)

S. Anna di Stazzema - canale dei mulini inquinato dai drenaggi acidi delle miniere Foto: Roberto Gianecchini

