

Acquisizione ed interpretazione dei dati di monitoraggio delle sorgenti

Original

Acquisizione ed interpretazione dei dati di monitoraggio delle sorgenti / Vigna, Bartolomeo. - In: GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA. - ISSN 1121-9041. - GEAM 143:(2014), pp. 43-58.

Availability:

This version is available at: 11583/2593959 since: 2016-09-16T10:14:24Z

Publisher:

Pàtron Ed.

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Acquisizione ed interpretazione dei dati di monitoraggio delle sorgenti

Bartolomeo Vigna*

* Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture – Politecnico di Torino, Torino

Il lavoro vuole illustrare l'importanza dei sistemi di monitoraggio in campo idrogeologico, in particolare per gli studi riguardanti la captazione e l'utilizzo delle risorse sorgive. Dopo un breve accenno alle apparecchiature utilizzate per il monitoraggio dei parametri fondamentali per lo studio di un circuito idrogeologico (sonde multiparametriche e pluviografi), si passa alla descrizione dei "traccianti naturali" e dei modelli concettuali di funzionamento dei differenti sistemi acquiferi. Si conclude con un breve accenno a due differenti metodologie, basate sui dati di monitoraggio, per valutare la vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi e dimensionare le aree di salvaguardia di una sorgente.

Parole chiave: monitoraggio acquiferi, pluviometri, sonde multiparametriche, traccianti naturali, vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento

Acquisition and interpretation of the springs monitoring data. The work illustrates the importance of monitoring in the hydrogeological field, in particular for studies concerning tapping and utilization of spring resources. First, it is mentioned the equipment used to monitor the principal parameters for an aquifer study (multiparametric data-logger and pluviographs). Then it is described "natural tracers" and conceptual models in which different aquifer systems operate. At last it is briefly described two different methodologies to assess the aquifer vulnerability to pollution and the size of a spring protection areas. To apply these methods are needed monitoring data.

Keywords: aquifer monitoring, rain gauges, multiparameter data-logger, natural tracers, aquifer vulnerability to pollution.

Acquisition et interprétation de données de monitoring des sources. Le travail vise à illustrer l'importance des systèmes de monitoring dans le domaine de l'hydrogéologie, notamment pour les études relatives au captage et à l'utilisation des ressources de source. Après une brève mention de l'équipement utilisé pour le monitoring des principaux paramètres impliqués dans l'étude d'un circuit hydrogéologique (sondes multiparamétriques et pluviographes), nous passons à la description des "traceurs naturels" et des modèles conceptuels de fonctionnement des différents systèmes aquifères. On conclut par une brève mention à deux méthodes différents, basées sur les données de monitoring, pour évaluer la vulnérabilité à la pollution des aquifères et le dimensionnement des zones de protection des sources.

Mots-clés: monitoring des aquifères, pluviographes, sondes multiparamétriques, traceurs naturels, vulnérabilité à la pollution des aquifères.

1. Premessa

Il termine **monitoraggio** deriva dal latino *monitor*, derivato di *monere*, con il significato di *ammonire, avvisare, informare, consigliare*. Con questo termine si intende un controllo nel tempo dei fenomeni fisici, chimici e biologici mediante apparecchiature o con l'ausilio di tecniche analitiche. Al **sistema di monitoraggio** possono essere affiancati **sistemi di controllo** con i quali si predispongono dei valori assoluti o

di soglia che, in continuo o ad intervalli regolari, vengono usati per controllare l'**andamento** (valori effettivi) del contesto che viene monitorato.

Il monitoraggio può essere effettuato **in continuo** quando viene eseguito con uno strumento che rileva o senza discontinuità o ad intervalli brevissimi (generalmente uguali o inferiori ad un minuto) un valore che viene poi registrato su carta o su supporto informatico. Quando la rilevazione non è esattamente continua, ma a frequenza sufficientemente alta

rispetto al processo monitorato, tale da rendere significative le variabili misurate, si parla di **monitoraggio ad alta frequenza**.

Quando la cadenza della misura o del campionamento (e le successive analisi) sono giornaliere, mensili, trimestrali o altro, si parla di **monitoraggio a medio-bassa frequenza**. In questi casi i parametri in gioco sono generalmente molto numerosi.

Il presente lavoro è finalizzato a illustrare la tecnica del monitoraggio ad alta frequenza nel campo delle acque sotterranee, con particolare attenzione allo studio delle sorgenti. I dati acquisiti sono indispensabili per:

- Individuare la portata, i principali parametri chimico-fisici delle acque sorgive e le loro variazioni temporali per comprendere il funzionamento di un acquifero prima di eseguirne le opportune opere di captazione.
- Seguire l'andamento dei principali parametri idrogeologici di una sorgente captata per approfondire le conoscenze del sistema e rilevare nel tempo eventuali cambiamenti di alcuni parametri legati a possibili interferenze per cause naturali o antropiche.
- Controllare in continuo alcuni parametri qualitativi delle acque captate ad uso potabile (es. torbidità) per intervenire molto rapidamente in occasione del superamento di soglie di allarme.
- Valutare la vulnerabilità dell'acquifero all'inquinamento che alimenta una sorgente per dimensionare in modo appropriato le aree di salvaguardia.

Generalmente nello studio di una sorgente le informazioni che si hanno a disposizione sono unicamente legate alla situazione geologico-strutturale dell'ammasso roccioso e soltanto attraverso la realizzazione di un adeguato sistema di monitoraggio si possono raccogliere i dati fondamentali relativi ai parametri idrodinamici o idrogeochimici delle acque sotterranee.

I principali parametri che vengono misurati nel tempo sono quelli relativi agli apporti (precipitazioni), alle portate sorgive e alla variazione di alcuni valori chimico-fisici delle acque sotterranee (temperatura, conducibilità elettrica specifica, torbidità, pH, ecc.), fondamentali per comprendere il funzionamento di un dato acquifero.

In questo lavoro non viene preso in esame il monitoraggio relativo ai parametri geochimici e batteriologici delle acque sotterranee, dati che rivestono, per altro, un ruolo altrettanto importante per la definizione della qualità della risorsa idrica.

2. Le apparecchiature

Nello studio relativo alla caratterizzazione idrogeologica di una sorgente non sono necessarie strumentazioni dotate della trasmissione dei dati in tempo reale, fatta eccezione per la necessità di un monitoraggio in continuo di alcuni parametri, come quello della torbidità delle acque, finalizzato ad un controllo molto dettagliato per un eventuale interruzione del flusso idrico verso la rete acquedottistica, nel momento in cui si oltrepassano determinate soglie di allarme. I costi complessivi delle strumentazioni da installare (pluviografi e sonde multiparametriche) sono contenuti e si aggirano intorno ad alcune migliaia di euro. Le apparecchiature devono essere ovviamente affidabili, la deriva dei sensori deve essere modesta e garantire un corretto funzionamento

per tempi molto lunghi. Attenzione perché sul mercato sono presenti numerose strumentazioni inadeguate (finalizzate ad esempio ad altri utilizzi come il monitoraggio delle acque di scarico), con accuratezza delle misure non elevata o piuttosto delicate per funzionare per numerosi anni in situazioni ambientali difficili come quelle che sono presenti all'interno di un'opera di presa (dove spesso l'umidità raggiunge valori del 100%). Le sonde multiparametriche sono in genere costituite da due corpi distinti, all'interno dei quali si trovano da una parte i sensori e l'acquisitore automatico, dall'altra il vano batterie e il terminale per lo scarico dei dati. Le due parti sono collegate mediante un cavo di lunghezza variabile in funzione della situazione morfologica della zona sorgiva. All'interno del cavo si trova anche un piccolo tubicino che serve per la compensazione della pressione atmosferica, fondamentale per la precisione della misura dei livelli idrici. Le strumentazioni possono misurare differenti intervalli di pressioni (a seconda se vengono installate in piezometri o presso bocche calibrate). Nel monitoraggio di livelli idrici presso sorgenti si devono utilizzare *range* piuttosto ridotti (0.1-0.2 bar) per avere una maggiore precisione del dato. La risoluzione dell'acquisitore automatico di livello deve essere di almeno 1 mbar (circa 1 mm) e la strumentazione deve essere dotata di controllo di taratura della pressione atmosferica.

L'accuratezza della misura della conducibilità elettrica specifica è in funzione della normalizzazione o meno del parametro misurato: $\pm 1\%$ FS (fondo scala) a 25°C (diversi sono gli intervalli di misura che sono da scegliere sulla base delle oscillazioni dei valori della mineralizzazione delle acque sorgive) mentre la risoluzione deve essere di $1\ \mu\text{S}/\text{cm}$. Per la temperatura, l'accuratezza deve essere elevata, almeno intorno a $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ con una risoluzione di 0.1°C .

Qualsiasi apparecchiatura ha bisogno di un controllo periodico di

manutenzione e taratura. Anche un semplice misuratore di livello o un acquisitore di conducibilità elettrica specifica delle acque è soggetto ad una deriva, in genere piuttosto regolare, che può essere corretta solo se si hanno a disposizione le misure manuali. Per tale motivo si preferisce scaricare i dati ad intervalli regolari di 3-4 mesi effettuando sempre le misure di taratura in modo che, se eventualmente l'apparecchiatura non funziona in modo adeguato, non si rischia di perdere dati per lunghi periodi. Solitamente non conviene modificare la curva di taratura della strumentazione, in quanto è difficile operare in modo corretto sui valori impostati dalla casa costruttrice, la correzione del dato viene eseguita a posteriori sui dati scaricati. Per alcuni parametri come ad esempio il pH delle acque, questi controlli devono essere ancora più ravvicinati nel tempo con intervalli inferiori anche a 30 giorni. Sono preferibili le apparecchiature dotate di alimentazione a batteria (anche perché, presso i punti da monitorare, spesso la rete elettrica è assente). Se è presente la corrente elettrica occorre dotare le strumentazioni di un gruppo di continuità in quanto nelle zone montuose spesso si verificano sbalzi di tensione letali per gli acquisitori (legati ad esempio ai fulmini) o interruzioni di alimentazione in particolare nella stagione invernale. Tutte le strumentazioni sono programmabili con intervalli di registrazione da pochi secondi a diverse ore. Ovviamente tempi di acquisizione molto ravvicinati permettono di seguire quasi in continuo l'andamento di un dato parametro mentre utilizzando intervalli piuttosto lunghi si rischiano di perdere preziose informazioni. La regola generale dice che la frequenza di acquisizione è legata alla variabilità temporale del parametro che si deve misurare, ma spesso questa variabilità non si conosce o può cambiare in particolari situazioni (come ad esempio in seguito ad apporti infiltrativi eccezionali). Sulla base di speri-

tazioni effettuate su sorgenti alimentate da acquiferi molto permeabili e caratterizzati da variazioni temporali molto rapide dei parametri idrogeologici, è risultato che un intervallo di registrazione di 30 minuti è più che sufficiente per seguire fedelmente l'andamento nel tempo dei diversi valori. Emergenze alimentate da acquiferi meno permeabili e caratterizzate da variazioni temporali anche molto contenute dei parametri idrodinamici o chimico-fisici delle acque devono ugualmente essere monitorate con una cadenza piuttosto dettagliata (1 ora) per rilevare eventuali variazioni significative.

Nella situazione di sorgenti diffuse, non provviste di un'opera di captazione, la misura della portata può essere effettuata a valle delle singole emergenze dove l'intero flusso idrico viene raccolto in un'unica sezione di misura, mentre i rilevamenti dei valori di temperatura e conducibilità elettrica specifica dovranno essere eseguiti direttamente presso l'emergenza più rappresentativa. La misura di questi parametri ad una certa distanza dal punto sorgivo non è significativa in quanto condizionata dall'andamento meteorologico stagionale, in particolare per il valore della temperatura dell'acqua. Occorre fare sempre molta attenzione nel posizionare questi sensori che devono essere ubicati in zone di flusso continuo evitando settori di ristagno delle acque caratterizzati da valori non significativi. Per comprendere il funzionamento di un sistema idrogeologico vengono in genere misurati gli apporti (valori delle precipitazioni) e le uscite (portate e valori chimico-fisici delle acque sotterranee).

2.1. Monitoraggio degli apporti

Per rilevare i millimetri di acqua legati alle precipitazioni liquide o solide che interessano una determinata area di alimentazione di una sorgente si utilizzano i pluviografi, quando l'apporto è legato prevalentemente

alle precipitazioni, o i misuratori di livello di un corso d'acqua quando l'emergenza viene prevalentemente ricaricata dalle perdite del reticolo idrico superficiale. I dati orari rilevati da queste strumentazioni vengono poi confrontati con i valori orari della portata sorgiva e degli altri parametri chimico-fisici delle acque per conoscere in dettaglio il funzionamento di un dato sistema acquifero evidenziando la risposta idrodinamica e geochimica di un sistema acquifero agli input infiltrativi. I valori annuali delle precipitazioni permettono poi di calcolare la quantità d'acqua assorbita dall'acquifero attraverso un bilancio idrogeologico (Civita *et al.*, 1984) e di confrontare poi il volume infiltrato con quello scaturito alla sorgente. Possono essere utilizzati i dati acquisiti dalle reti pluviometriche regionali, quando la stazione ricade in prossimità dell'area di interesse, in genere però sono forniti gratuitamente solo i valori giornalieri di precipitazione mentre i dati orari sono a pagamento. Generalmente queste stazioni si trovano a notevoli distanze dall'area di interesse per cui è necessario installare un pluviografo in una posizione ideale e rappresentativa rispetto agli apporti che interessano il bacino di alimentazione di una determinata sorgente. Queste apparecchiature presentano ormai costi molto ridotti e sono in grado di memorizzare dati orari per molti mesi ma hanno bisogno di manutenzione in particolare per quanto riguarda l'intasamento del piccolo orifizio sul fondo dell'imbutto. In genere viene aggiunto un ulteriore filtro in geotessuto per garantire un buon funzionamento. Molto spesso le sorgenti si trovano in zone montuose e la loro area di ricarica è in quota dove per tutto il periodo invernale le precipitazioni sono nevose. Nelle aree alpine il manto nevoso può condizionare per oltre sei mesi/anno il processo infiltrativo: nei mesi più freddi la neve si accumula progressivamente fino a quando le temperature iniziano a salire innescando la fusione della neve che si protrae

per diversi mesi, iniziando a quote più basse e sui versanti con maggiore soleggiamento. Le condizioni climatiche di alta quota controllano quindi profondamente le modalità di alimentazione e il processo infiltrativo dei diversi acquiferi (Hottelet *et al.* 1993, Braun & Lang 1986, Moindrot 1989, Chauve *et al.* 1990). Gli apporti legati alla fusione nivale, insieme al contributo delle piogge primaverili, costituiscono la principale aliquota annuale di ricarica di un sistema acquifero e danno origine ad una importante piena che si protrae fino alla stagione estiva (Fig. 1) o nei sistemi caratterizzati da una permeabilità più ridotta, che si esaurisce solo ad inizio autunno. Le sorgenti alimentate da sistemi altamente permeabili presentano, ad esempio, portate caratterizzate da oscillazioni giornaliere di diverse centinaia di l/s condizionate dal processo di fusione nivale (Fig. 2). Per rilevare i valori delle precipitazioni nevose vengono utilizzati i pluviografi dotati di riscaldatore, che permettono di misurare, con precisione l'equivalente in acqua degli apporti effettivamente caduti. Questi dati non possono essere correlati con l'andamento delle portate sorgive, essendo il fenomeno della fusione nivale molto ritardato rispetto al valore registrato dai pluviometri. Tra l'altro per il funzionamento del riscaldatore occorre la corrente elettrica che nelle zone montuose non è facile reperire. I pannelli solari possono alimentare la strumentazione ma a volte non riescono a fornire la necessaria energia a causa del ridotto irraggiamento legato all'esposizione del versante o in seguito a diversi giorni di copertura nuvolosa. Spesso inoltre sono soggetti a furti. Da alcuni anni si sta sperimentando, presso la Stazione Scientifica della Grotta di Bossea, una nuova strumentazione in grado di misurare direttamente la quantità di acqua legata alla fusione nivale, denominata "pluvionivografo interrato" (Vigna & Suozzi, 2009, Vigna & Banzato 2012). Tale strumentazione fornisce dati molto simili

a quelli ottenuti dai lisimetri come quelli descritti nei lavori di Engelen et al 1984, Kirnbauer & Bloschl 1990, Hottel et al 1993). L'attrezzatura è costituita da un pluviografo modificato, alimentato da proprie batterie, che viene posizionato nel sottosuolo con l'imbutto che sporge di alcuni centimetri dal piano campagna per evitare la raccolta delle acque di ruscellamento superficiale. Nella stagione fredda lo strumento viene ricoperto dal manto nevoso e, quando inizia il naturale processo di fusione o in seguito ad apporti piovosi sulla copertura nevosa, registra la quantità d'acqua derivata (Fig. 3). Per verificare l'attendibilità dei dati acquisiti da questa apparecchiatura sperimentale sono stati rilevati e poi confrontati i valori acquisiti, durante la stagione invernale, da un pluviometro dotato di bocca termoriscaldata posizionato accanto al primo strumento. I valori complessivi stagionali sono risultati

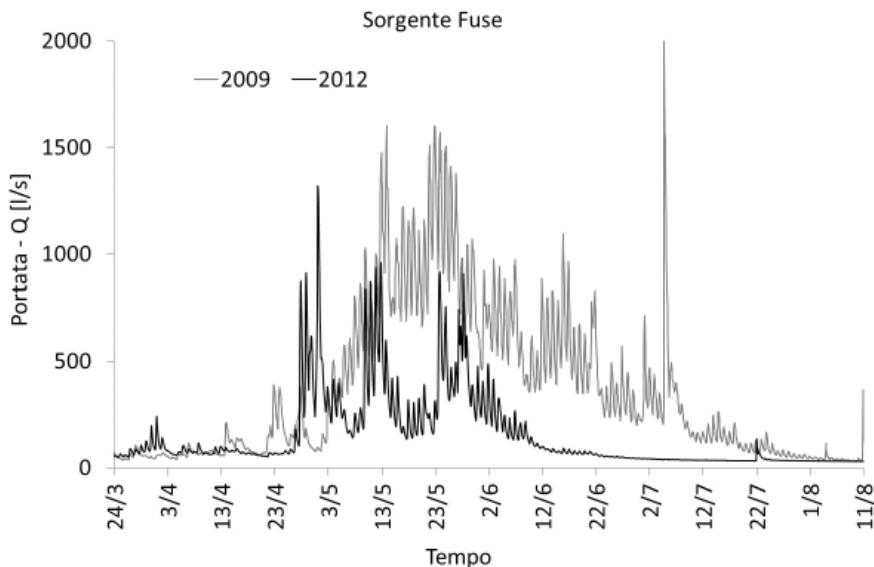


Fig. 1. Andamento della portata di una sorgente (anni 2009 e 2012) con area di alimentazione in quota (Sorgente Fuse, Valle Tanaro, CN).
Flow rate trend (2009 and 2012 year) of a spring with a high altitude recharge area (Fuse spring, Tanaro Valley, CN).

essere del tutto simili mentre il loro andamento temporale è ovviamente risultato essere molto differente

(Fig. 4) anche se le strumentazioni erano localizzate ad una quota altimetrica piuttosto bassa, a circa 820

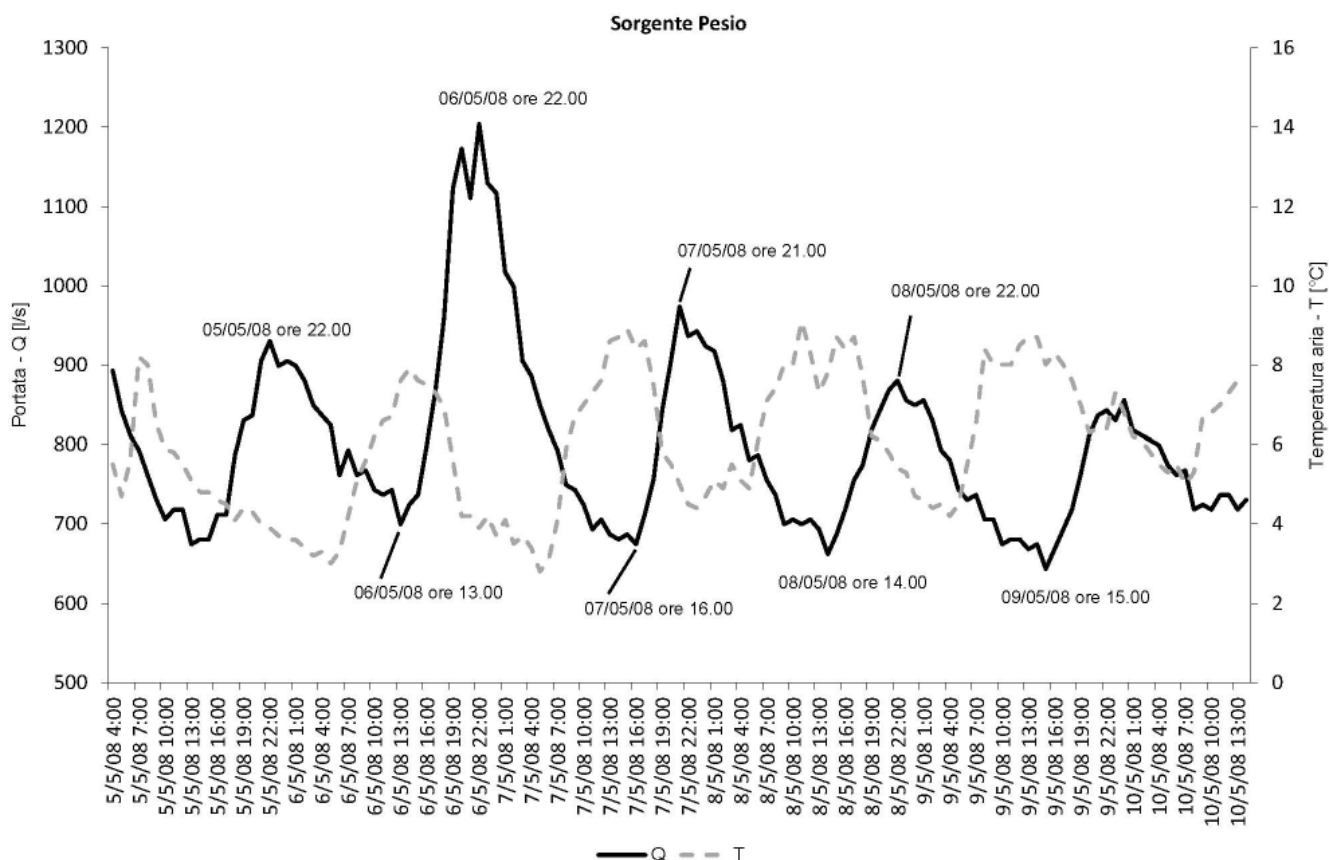


Fig. 2. Andamento giornaliero della portata di una sorgente alimentata dal processo di fusione nivale. In tratteggio la temperatura dell'aria (Sorgente del Pesio, Valle Pesio, CN).
Daily flow rate of a spring fed by snow melting process. The air temperature is in dotted line (Pesio spring, Pesio Valley, CN).

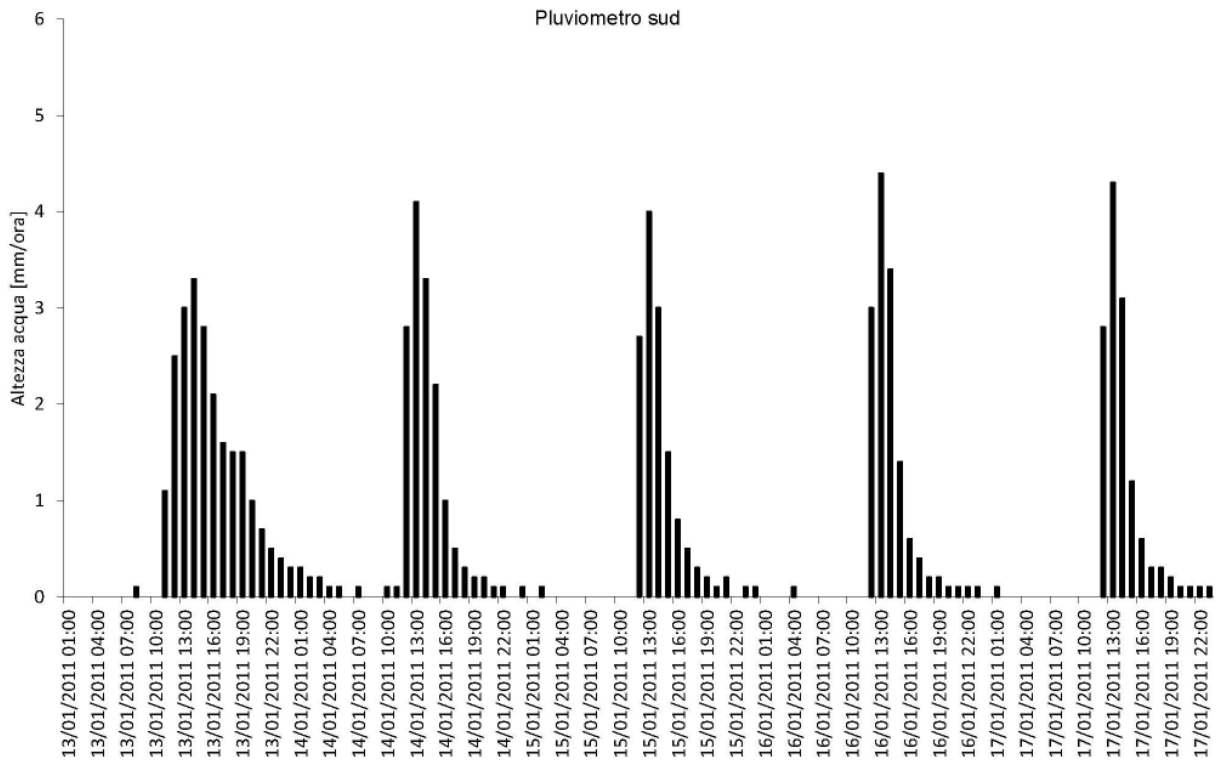


Fig. 3. Andamento orario relativo alla quantità di acqua derivata dal processo di fusione nivale registrato da un "pluvionivometro interrato".

Trend of the amount of water derived from snow melting process recorded by a "interred snowpluviometer".

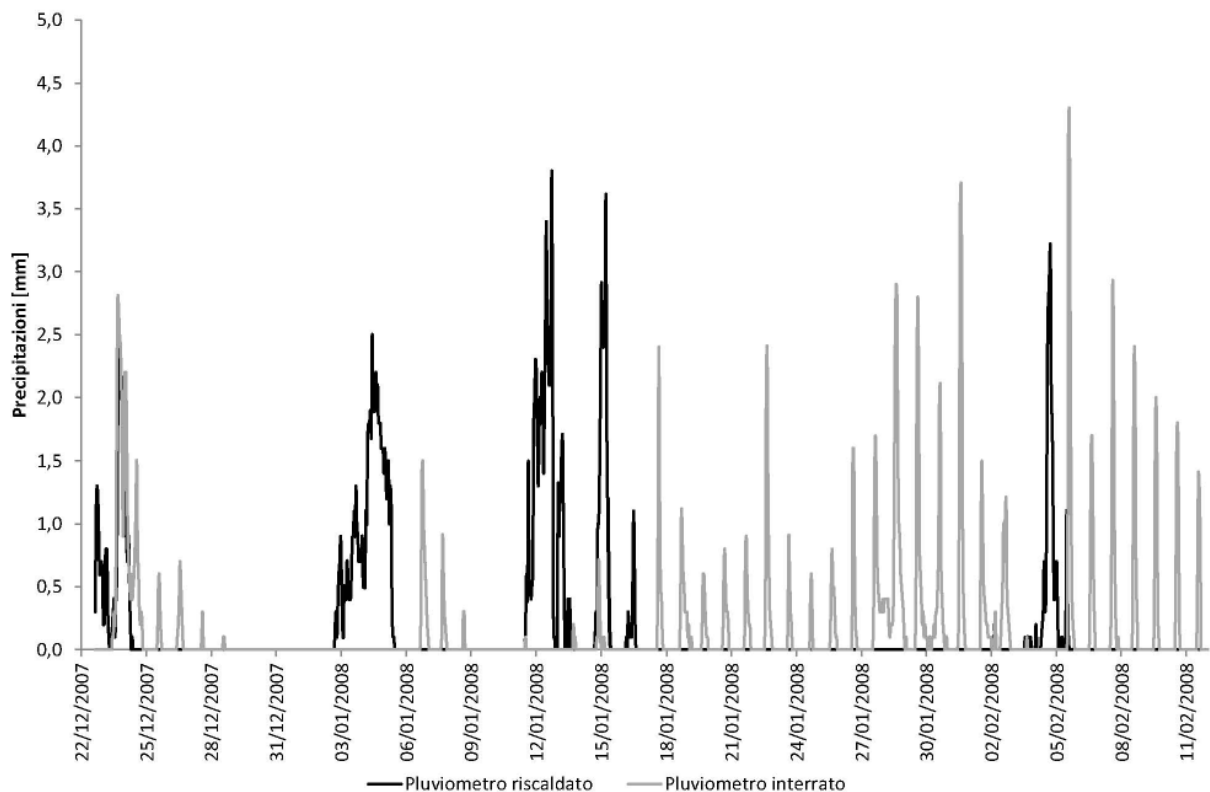


Fig. 4. Confronto tra i dati registrati da un pluviometro riscaldato e di un "pluvionivometro interrato" (Stazione di Bossea, Valle Corsaglia, a quota 820 m s.l.m.).

Comparison between the data recorded by a heated rain gauge and a "interred snowpluviometer" (Bossea, Corsaglia Valley, altitude of 820 m asl).

m s.l.m.. I risultati hanno evidenziato come questa strumentazione fornisca dati estremamente significativi caratterizzati da valori giornalieri in genere piuttosto contenuti variabili tra apporti nulli nei giorni in cui la temperatura rimane ben al di sotto dello zero e valori massimi orari di 12-15 mm in seguito a giornate particolarmente calde. Questo processo, che prosegue anche per diverse settimane o mesi, favorisce una notevole infiltrazione delle acque anche in acquiferi dotati di una permeabilità piuttosto ridotta. Al contrario delle precipitazioni liquide che in genere si verificano per brevi periodi, con una intensità generalmente elevata e con un conseguente ruscellamento delle acque nei settori a scarsa permeabilità, gli apporti di fusione forniscono al sottosuolo un contributo relativamente continuo e di lunga durata. Il picco massimo giornaliero dell'apporto di fusione si registra di solito alcune ore dopo il periodo di massima insolazione, mentre durante le ore notturne il processo risulta essere nullo o molto ridotto.

2.2. Monitoraggio delle portate sorgive

Le misure di portata presso una sorgente possono essere eseguite, attraverso l'utilizzo un mulinello idraulico o di un contenitore a volume noto, ad intervalli di tempo più o meno lunghi (misure istantanee) o in continuo impiegando un acquirente automatico dei livelli idrici. Le misure istantanee forniscono un valore molto indicativo essendo in genere le sorgenti soggette a cambiamenti della portata nel tempo in seguito agli apporti infiltrativi.

La misura della portata in continuo di una sorgente può essere eseguita prima della realizzazione dell'opera di presa attraverso una sezione di flusso naturale o di una bocca a stramazzo provvisoria debitamente allestita o all'interno di un'opera di captazione dove è presente una sezio-

ne di misura calibrata (bocca a stramazzo o canale Venturi). Requisito fondamentale è che la misura deve interessare l'intero flusso sorgivo.

La portata degli stramazzi è determinata attraverso il rilevamento dell'altezza del liquido nella vasca di calma a monte della sezione di misura caratterizzata da geometrie differenti (triangolare, rettangolare, trapezoidale) e dal successivo calcolo utilizzando le opportune formule elaborate per le diverse geometrie della sezione di misura calibrata.

L'acquirente automatico deve essere posizionato nella vasca di calma ad una distanza dalla bocca di 3-4 volte l'altezza massima del livello idrico rilevata sulla sezione di misura. In prossimità della bocca a stramazzo si verifica infatti un abbassamento della superficie libera legato alla viscosità e alla tensione superficiale dell'acqua (variazioni anche di alcuni centimetri) e quindi il rilevamento dei livelli idrici in tale sezione è errato.

Le bocche a stramazzo a forma triangolare sono le più precise, ma possono essere utilizzate solamente con portate massime inferiori a 100 l/s. La bocca a geometria rettangolare può essere impiegata sia con stramazzi a pareti larghe sia con stramazzi a pareti sottili (Bazin) che possono essere utilizzati per portate anche molto elevate. La precisione della misura è legata al rapporto larghezza/altezza della bocca stramazzo.

Nella situazione in cui la zona sorgiva è caratterizzata dalla presenza di più emergenze con portate anche piuttosto variabili nel tempo, occorre realizzare una sezione di misura che raccolga tutte le acque defluenti dal fronte sorgivo per caratterizzare con precisione il regime della sorgente.

Il sensore di misura della strumentazione automatica viene ancorato ai bordi della vasca di calma attraverso l'impiego di una staffa costituita da materiale non ossidabile (acciaio o alluminio) e deve essere ubicato alcuni decimetri al di sotto del livello

lo zero della bocca a stramazzo. In prossimità della staffa si posiziona una stadia con intervallo di misura millimetrico per la taratura dell'apparecchio, costituita anch'essa da materiale non ossidabile.

Nella situazione in cui non è possibile realizzare presso la sorgente una sezione calibrata di misura, si deve ricorrere all'installazione di un acquirente automatico all'interno di una sezione di flusso naturale con ridotta velocità di flusso e con assenza di moti turbolenti. In corrispondenza di essa si deve rilevare la geometria della sezione bagnata a partire dalle condizioni di magra fino a quelle di piena. Per correlare i dati dei livelli idrici registrati con le portate, si devono eseguire diverse misure di portata con l'utilizzo di mulinello idraulico al fine di realizzare la curva di taratura livello/portata. La strumentazione installata presso una sezione naturale deve essere protetta (anche per evitare eventuali furti o danneggiamenti) ed in genere viene alloggiata in una tubazione che funziona anche da vasca di calma per evitare continue oscillazioni dei livelli. L'imbocco della tubazione deve essere protetto con un cappello di chiusura e dotato di lucchetto.

2.3. Monitoraggio dei traccianti naturali

L'idrodinamica di una sorgente viene pesantemente controllata dalle trasmissioni delle pressioni idrauliche (onde di pressione) in particolare nei mezzi fratturati e/o carsificati. Per comprendere il funzionamento di un dato sistema occorre quindi acquisire nel tempo, oltre l'entità della portata, alcuni parametri chimico-fisici delle acque sotterranee, come i valori della temperatura e della conducibilità elettrica specifica. Questi parametri, che vengono riconosciuti come tipici "traccianti naturali", sono in stretta relazione con il tipo di ricarica (autigenica o allogena), con le caratteristiche

litologiche dell'ammasso roccioso e con il tipo e le modalità di circolazione dell'acquifero (Bakalowicz, 1976; Bakalowicz, 1977; Boegli, 1980; Gabrovsek, 2000, 2002; Klimchouck et alii, 2000; Vigna e Calandri, 2001; Palmer, 2007). Non sono tanto importanti i valori assoluti, quanto le variazioni che questi parametri nel tempo possono subire in seguito all'incremento della portata.

La temperatura delle acque sorgive è un parametro facile da misurare in continuo, le interazioni roccia-acqua sono regolate da leggi relativamente semplici legate alla intimità di contatto acqua-roccia e ai tempi di residenza. Scambi termici tra la roccia (caratterizzata da bassa conduttività termica) e l'acqua (elevata conduttività termica) condizionano la temperatura alla sorgente.

La conducibilità elettrica specifica è relativamente più difficile da misurare in continuo ed è legata alla mineralizzazione totale dell'acqua. È un parametro fisico che dipende dal contenuto degli ioni principali disciolti (essenzialmente bicarbonati, calcio, magnesio, sodio, potassio, cloruri, solfati): rispecchia quindi indirettamente il carico chimico delle acque sotterranee. Sono quindi le concentrazioni di questi ioni e le loro variazioni nel tempo che determinano l'andamento della conducibilità elettrica alla sorgente.

Le variazioni più o meno marcate di questi due "traccianti naturali" durante gli eventi di piena permettono la distinzione tra i diversi tipi di acque che sono presenti in un circuito idrico sotterraneo: *le acque di neoinfiltrazione*, *le acque delle riserve regolatrici* e *le acque a lento movimento*.

Le acque di neoinfiltrazione, legate agli apporti di piogge o di fusione nivale, sono caratterizzate da una mineralizzazione molto ridotta e da una temperatura condizionata dall'andamento stagionale (in genere alle nostre latitudini più bassa rispetto a quella dell'ammasso roccioso). Sono presenti nella porzione più superficiale dell'acquifero ma posso-

no raggiungere rapidamente le parti profonde in corrispondenza di settori altamente permeabili.

Le acque delle riserve regolatrici o della *circolazione attiva* presentano una mineralizzazione ed una temperatura che è in equilibrio con l'ammasso roccioso, equilibrio che è continuamente condizionato da variazioni nella concentrazione di una o più componenti (Boegli, 1980) legate prevalentemente agli apporti di acque provenienti dalle diverse zone dell'idrostruttura. Le acque delle riserve regolatrici sono presenti nella porzione profonda del sistema, in corrispondenza della zona di variazione dei livelli idrici della zona satura. Alla sorgente i valori dei due parametri sono quindi il prodotto di mescolamenti di acque relativamente diverse che hanno perso l'impronta delle acque di infiltrazione.

Le acque a lento movimento (o *acque di fondo*) sono caratterizzate da valori di mineralizzazione e di temperatura più elevati rispetto alle altre acque circolanti nel sistema, a causa della loro ridotta velocità ed alla estrema intimità di contatto con la roccia incassante. In genere sono presenti nelle porzioni più profonde o laterali delle idrostrutture dove sono presenti reticoli meno trasmissivi.

I dati più interessanti vengono registrati in seguito ai principali eventi meteorologici quando nel sistema si infiltrano importanti volumi idrici che possono perturbare più o meno pesantemente la circolazione sotterranea. Sulla base dell'organizzazione del reticolo di drenaggio del sistema alla sorgente giungeranno, in tempi diversi, acque con valori di mineralizzazione e temperatura che possono variare o meno rispetto alle situazioni di magra (Vigna, 2007; Galleani et al, 2011).

Nei sistemi caratterizzati da una notevole organizzazione del reticolo di drenaggio e dalla presenza di una ridotta zona satura, in seguito ad un notevole incremento della portata sorgiva, si osserva una evidente diminuzione della mineralizzazione

ed in genere della temperatura delle acque che evidenzia l'arrivo alla sorgente delle acque di neoinfiltrazione che si mescolano con quelle della circolazione attiva. Questa risposta viene chiamata "*sostituzione prevalente*" (Fig. 5).

Nei sistemi dove la circolazione sotterranea delle acque è impostata in reticoli fratturati e/o carsificati ed è presente una estesa rete a pieno carico (quindi una zona satura piuttosto sviluppata) l'onda di pressione, legata ad importanti eventi infiltrativi, rimobilizza le acque intrappolate nei settori a minore permeabilità del sistema o quelle presenti nelle porzioni più profonde della struttura acquifera caratterizzate da mineralizzazione e temperature maggiori rispetto alle acque delle riserve regolatrici. Alla sorgente si osserva un aumento della portata e parallelamente un incremento dei due traccianti naturali legato al mescolamento tra i due tipi di acque. Questo fenomeno è conosciuto con il nome di "*pistonaggio*". Successivamente a tale fenomeno si possono osservare evidenti decrementi della mineralizzazione e della temperatura per l'arrivo di una porzione delle acque di neoinfiltrazione quando il sistema è caratterizzato da una zona satura di dimensioni non elevate. Nei circuiti dove invece è presente una estesa rete a pieno carico, i valori dei due traccianti naturali ritornano ai tenori pre-evento sottolineando l'importanza delle riserve regolatrici e il mancato arrivo delle acque legate agli apporti superficiali (Fig. 6).

Nei sistemi caratterizzati da una permeabilità piuttosto ridotta la circolazione delle acque avviene molto lentamente nel complesso reticolo delle microfratture di rocce lapidee o semi-coerenti o nei micropori di sedimenti fini: le acque di neoinfiltrazione scendendo in profondità in tempi molto lunghi perdono del tutto il segnale esterno e raggiungono un notevole equilibrio con l'ammasso roccioso legato alla notevole intimità acqua-roccia: alla sorgente si osserva nel

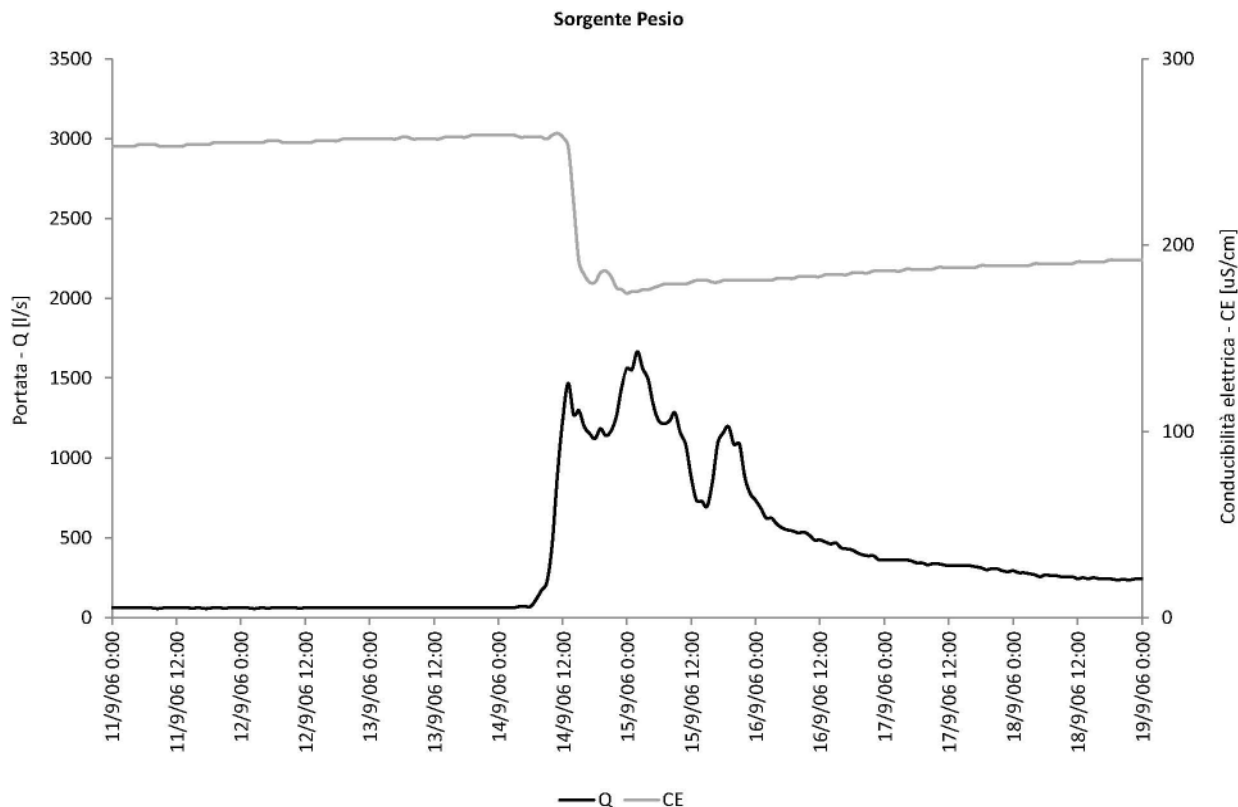


Fig. 5. Andamento della portata e della conducibilità elettrica delle acque in seguito ad un evento di piena. La caduta della mineralizzazione si verifica dopo 6 ore dall'incremento della portata con una risposta "a sostituzione prevalente" (Sorgente del Pesio, Valle Pesio, CN).

Discharge and electric conductivity trend of spring water after a flood. The fall of mineralization occurs after 6 hours from the beginning of the increase of the discharge. This is "prevailing replacement" response of a spring (Pesio spring, Pesio Valley, CN).

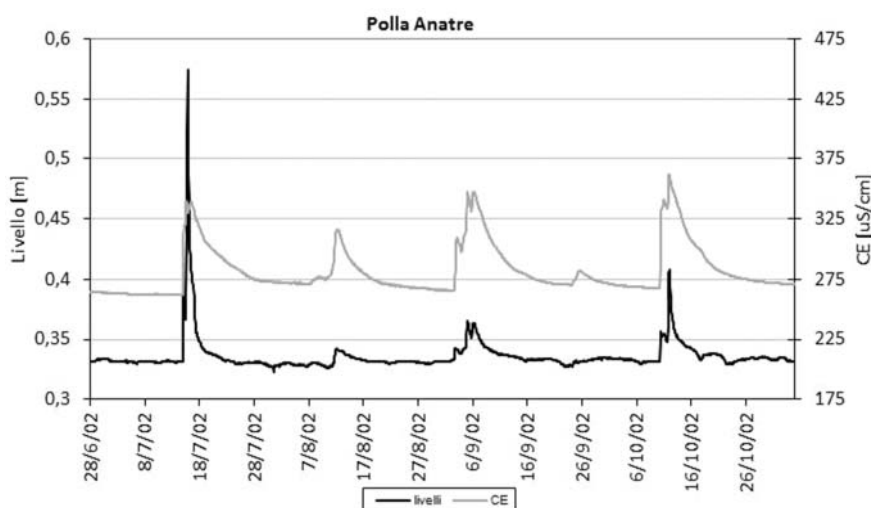


Fig. 6. Andamento della portata e della conducibilità elettrica delle acque in seguito ad alcuni eventi di piena. L'incremento della portata e della mineralizzazione evidenzia una risposta "a pistonaggio" (Polla delle Anatre, Valle Corsaglia, CN).

Discharge and electric conductivity trend of spring water following some floods. The increase of discharge and mineralization shows a piston flow response (Polla delle anatre, Corsaglia Valley, CN).

tempo un blando aumento della portata mentre il valore della mineralizzazione e della temperatura delle acque

rimangono piuttosto costanti. Questo particolare tipo di risposta viene chiamata "omogenizzazione" (Fig. 7).

3. Modelli concettuali di funzionamento degli acquiferi alimentanti una sorgente

I modelli concettuali relativi al funzionamento degli acquiferi descrivono in modo piuttosto semplificato le complesse situazioni idrogeologiche che in genere caratterizzano i diversi sistemi. Diversi sono i valori che possono essere presi in esame, ma i dati più utili provengono dal monitoraggio dei parametri precedentemente descritti. In letteratura sono numerosi i lavori che esaminano le differenti risposte che caratterizzano gli acquiferi agli input infiltrativi, in particolare è doveroso ricordare i lavori di White, 1969; Mangin, 1974; Bakalowicz, 1979; Bakalowicz & Mangin 1980; Mangin, 1984; Mangin, 1998; Ford e Williams, 1989, 2007, riguardanti gli acquiferi carsici.

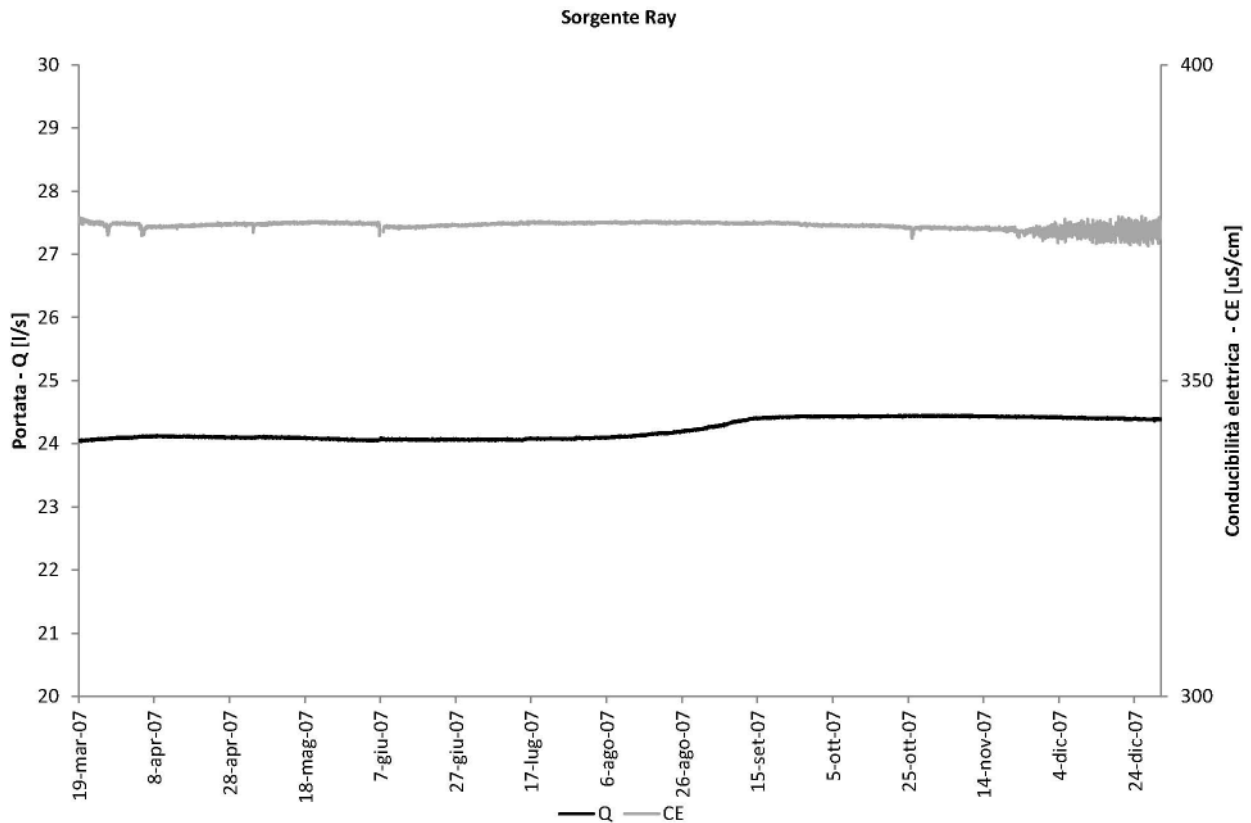


Fig. 7. Andamento annuale della portata e della conducibilità elettrica delle acque con notevole costanza dei valori che evidenzia una risposta "a omogeneizzazione" (Sorgente Rai, Valle Lurisia, CN).
Annual trend of flow rate and electric conductivity of spring water, in which is highlighted a remarkable constancy of the values. This behavior is called "homogenization" (Ray spring, Lurisia Valley, CN).

Questi lavori si basano prevalentemente sull'analisi idro-chimigrafica ed in particolare si servono dell'analisi spettrale ed autocorrelativa di un idrogramma sorgivo. Nel presente lavoro vengono invece brevemente descritti una serie di modelli concettuali basati sulle modalità di circolazione delle acque sotterranee o sulle modalità di alimentazione di un acquifero e che prendono in considerazione soprattutto la correlazione tra la portata sorgiva e l'andamento dei traccianti naturali.

3.1. Modelli basati sulle modalità di circolazione delle acque

Le caratteristiche litologiche di un acquifero, lo stato di fratturazione e/o di carsificazione di un ammasso roccioso, la geometria e l'architettura dell'intero reticolo di drenaggio,

lo spessore e il dimensionamento della zona satura condizionano pesantemente sia la risposta dei parametri idrodinamici che di quelli chimico-fisici delle acque. Sulla base dei dati di monitoraggio è possibile distinguere tre diversi modelli concettuali di base (Civita *et al.*, 1991; Vigna, 2002; Galleani *et al.*, 2011) sinteticamente descritti di seguito.

3.1.1. Sistemi con elevata organizzazione di flusso

Sono caratterizzati da una elevata permeabilità dell'acquifero (ammassi in rocce carbonatiche altamente carsificate, depositi clastici grossolani poggianti su substrato impermeabile). La zona satura è molto ridotta con una serie di vie di drenaggio in grado di smaltire rapidamente gli apporti infiltrativi. Questi sistemi alimentano sorgenti impostate in

corrispondenza di un limite di permeabilità definito con un contatto tra rocce impermeabili ed il sovrastante acquifero, generalmente ubicato ad una quota più elevata rispetto al livello di base locale (*sorgenti sospese*). Le variazioni di portata di queste emergenze sono molto marcate, strettamente condizionate dal regime meteorologico locale. In assenza di apporti infiltrativi il flusso idrico è ridotto mentre in occasione di precipitazioni abbondanti, nell'arco anche di poche ore, la portata presenta incrementi notevoli, con picchi pronunciati ma di durata limitata. Sovente nell'area sorgiva sono presenti altre emergenze che funzionano da esattori temporanei, attivandosi unicamente durante le piene maggiori, denominate *sorgenti di troppo-pieno*, che smaltiscono una parte del flusso idrico che non riesce ad essere evacuato dalla sorgente principale. Anche la geochi-

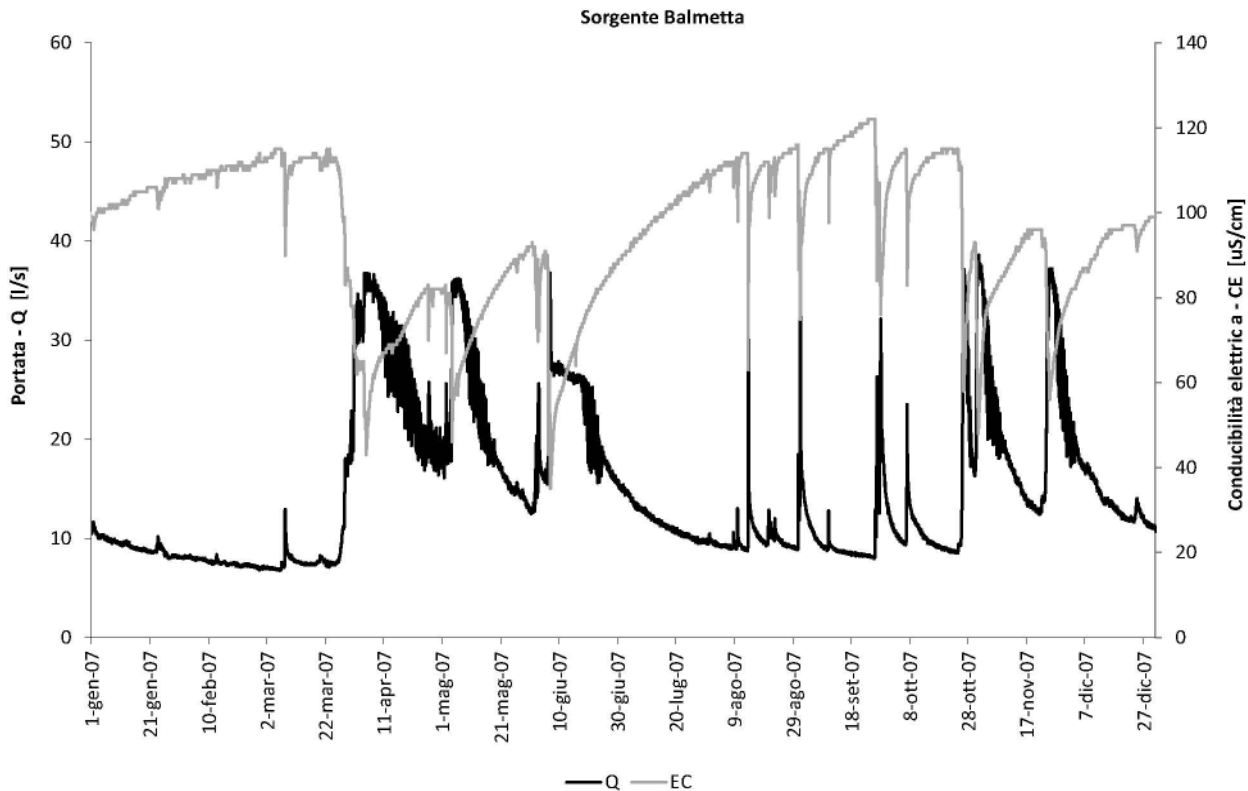


Fig. 8. Andamento annuale delle portate e della conducibilità elettrica delle acque di una sorgente alimentata da un sistema con elevata organizzazione di flusso: Sorgente Balmetta (Valle Ellero, CN).

Annual trend of flow rate and the electric conductivity of a spring water fed by an aquifer with high organization of flow: aquifer is set in detrital deposits (Balmetta spring, Ellero Valley, CN).

mica delle acque sorgive risente pesantemente della presenza di vie di drenaggio preferenziali e di una zona satura molto ridotta: in occasione di eventi infiltrativi importanti, anche dopo un prolungato periodo di siccità si osserva, parallelamente all'incremento della portata, una repentina diminuzione dei valori della mineralizzazione (Fig. 8) ed in genere anche della temperatura in quando giungono all'emergenza le acque di neoinfiltrazione poco o nulla tamponate, ancora aggressive, che sostituiscono in breve tempo le acque circolanti nel sistema (risposta a sostituzione prevalente). In tali periodi è possibile che si verifichi talora un sensibile aumento della carica batterica o del tenore della torbidità delle acque legato all'intenso dilavamento anche della materia organica presente nelle aree assorbenti. Esauritosi il fenomeno infiltrativo, evidenziato dalla diminuzione della portata, molto lentamente i diversi parametri chimico-fisici delle acque torna-

no progressivamente ad aumentare, condizionati dalla diminuzione delle velocità del flusso sotterraneo, da una maggiore intimità di contatto acqua-roccia e da più lunghi tempi di permanenza.

3.1.2. Sistemi con moderata organizzazione di flusso

Si trovano in ammassi rocciosi fratturati e/o carsificati con presenza di diverse vie di drenaggio (dreni interconnessi) o in acquiferi porosi caratterizzati da una permeabilità non particolarmente elevata. È presente una zona satura piuttosto sviluppata: in ammassi carbonatici essa è impostata in una serie di condotti e fratture a "pieno carico", mentre in ammassi porosi si sviluppa in potenti successioni detritiche. Essa genera un importante serbatoio con cospicue riserve idrogeologiche. Generalmente le sorgenti sono posizionate in prossimità di una soglia di perme-

abilità, caratterizzata da contatti subverticali tra le rocce impermeabili e l'acquifero. Le portate sorgive mostrano ancora, in occasione dei principali eventi infiltrativi, incrementi significativi ma con una decrescita della curva di esaurimento che testimonia l'importanza delle riserve regolatrici nonché una discreta capacità di autoregolazione del sistema acquifero. I rapidi incrementi della portata che si osservano in alcune sorgenti alimentate da acquiferi in rocce carbonatiche o in acquiferi in pressione non sono legati all'arrivo delle acque di neoinfiltrazione bensì all'effetto della trasmissione delle pressioni idrauliche nelle fratture o nei condotti a pieno carico (onde di pressione). I valori idrogeochimici alle emergenze possono mostrare, durante le piene, temporanei aumenti della mineralizzazione e della temperatura delle acque in seguito a fenomeni di pistonaggio (Fig. 9). Gli importanti volumi delle acque di neoinfiltrazione fanno infatti aumen-

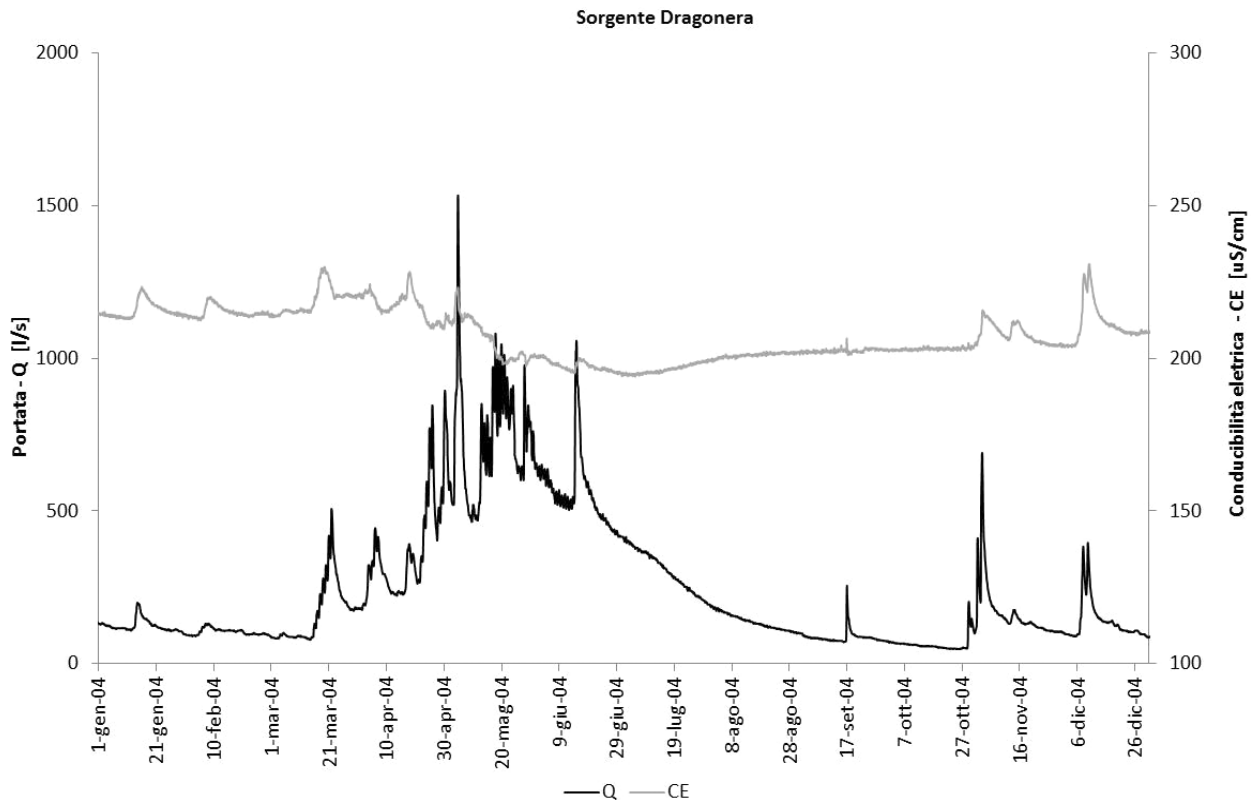


Fig. 9. Andamento annuale delle portate e della conducibilità elettrica delle acque di una sorgente alimentata da un sistema con moderata organizzazione di flusso: Sorgente Dragonera (Valle Gesso, CN).
Annual trend of flow rate and the electric conductivity of spring water fed by a system with a moderate organization of flow: aquifer is set in fractured and karst limestone (Dragonera spring, Gesso Valley, CN).

tare in modo considerevole i carichi idraulici nella rete di drenaggio, con conseguente rimobilizzazione anche di acque più mineralizzate presenti nei vasti e complessi settori della zona satura (acque di fondo). Non si osserva alla sorgente il segnale esterno, in quanto questi volumi diventano progressivamente parte delle riserve geologiche transitando con velocità piuttosto ridotte nel sistema acquifero.

3.1.3. Sistemi con bassa organizzazione di flusso

Sono presenti in acquiferi caratterizzati da una permeabilità piuttosto ridotta. Si trovano in ammassi rocciosi impostati in una rete di microfrazioni con numerose famiglie di discontinuità interconnesse o in sedimenti porosi con depositi piuttosto fini o con abbondante matrice limosa. Questi sistemi hanno una

zona satura estesa e sono caratterizzati da velocità di flusso molto ridotte. Le portate mostrano variazioni piuttosto contenute nel tempo, con incrementi non correlabili con i singoli eventi infiltrativi o comunque sfasati di diversi mesi rispetto ad essi. Questi sistemi alimentano sorgenti, generalmente non puntuali e localizzate in corrispondenza dei settori altimetricamente più bassi della struttura acquifera, in molti casi ubicati in corrispondenza del fondovalle principale. Alcune emergenze, denominate *sorgenti lineari*, incrementano la portata dei corsi d'acqua attraverso innumerevoli venute distribuite in ampi tratti dell'alveo fluviale. I parametri fisico-chimici delle acque sotterranee presentano una notevole costanza temporale dei valori (Fig. 10), con blande variazioni a carattere stagionale (fenomeno di *omogeneizzazione del segnale chimico*). La mineralizzazione delle acque è in genere piuttosto elevata a causa del-

la lenta circolazione idrica nell'ammasso roccioso.

3.2. Modelli basati sulle modalità di alimentazione di un acquifero

Le modalità di ricarica di un acquifero possono condizionare pesantemente sia l'idrodinamica sia la chimica delle acque sorgive e sono legate prevalentemente agli apporti primari e/o secondari. Con il termine di *apporti primari* (o *alimentazione autigenica*) si intende la ricarica proveniente da piogge o fusione nivale che interessa direttamente l'acquifero mentre con *apporti secondari* (o *alimentazione allogena*) si indica la ricarica proveniente dalle acque di ruscellamento superficiali che contribuiscono in modo continuativo alla ricarica dell'acquifero. Sulla base del tipo di alimentazione che un sistema riceve è quindi possibile riconoscere tre modelli concettua-

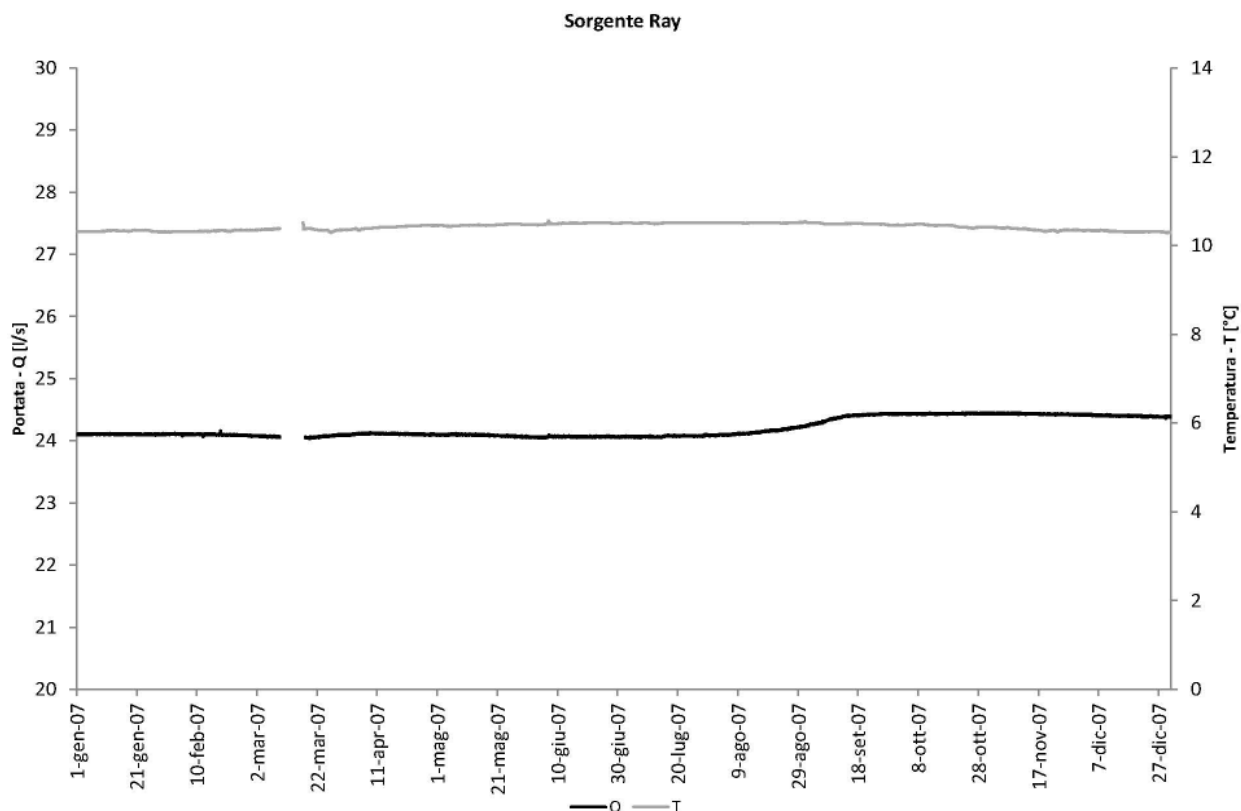


Fig. 10. Andamento annuale delle portate e della temperatura delle acque di una sorgente alimentata da un sistema con bassa organizzazione di flusso: Sorgente Rai (Valle Lurisia, CN).

Annual trend of flow rate and temperature of spring water fed by a system with a low organization of flow: aquifer is set in highly fractured dolomite (Ray spring, Lurisia Valley, CN).

li: sistemi con alimentazione primaria prevalente, sistemi con alimentazione primaria e secondaria, sistemi con alimentazione secondaria prevalente. È in particolar modo il monitoraggio della temperatura dell'acqua sorgiva che evidenzia le modalità di alimentazione dei diversi sistemi in quanto gli apporti legati alle acque superficiali sono pesantemente condizionati dall'andamento climatico stagionale.

3.2.1. Sistemi con alimentazione primaria prevalente

Sono caratterizzati da un'infiltrazione diffusa e distribuita in modo omogeneo sull'intera idrostruttura. La ricarica dell'acquifero avviene solo in occasione delle precipitazioni o dei periodi di fusione nivale. L'andamento della portata, della mineralizzazione e della temperatura delle acque sorgive è quindi legata unica-

mente alle modalità di circolazione sotterranea ed alla litologia dell'ammasso roccioso (Fig. 11).

3.2.2. Sistemi con alimentazione primaria e secondaria

Vengono ricaricati dalle precipitazioni liquide o solide che interessano direttamente l'acquifero e dagli apporti di corsi d'acqua superficiali attraverso una serie di inghiottitoi in subalveo situati in prossimità dei contatti tra le rocce permeabili e quelle impermeabili. L'andamento della portata e della mineralizzazione delle acque sorgive sono quindi strettamente legate anche all'alimentazione allogenica e si caratterizzano in genere per valori di portata e di mineralizzazione relativamente costanti a causa degli apporti piuttosto continui delle acque superficiali. Al contrario la temperatura può subire temporanee e marcate variazio-

ni in seguito al mescolamento tra i due differenti apporti (Fig. 12). Nel territorio piemontese sono numerose le sorgenti captate ad uso idropotabile che vengono alimentate con tali modalità.

3.2.3. Sistemi con alimentazione secondaria prevalente

Si trovano in genere in prossimità dei fondovalle dove corsi d'acqua piuttosto importanti scorrono, per tratti più o meno lunghi, sulle rocce dell'acquifero. Questi correvi, quando intercettano le porzioni dell'ammasso roccioso caratterizzate da maggiore permeabilità, presentano perdite progressive in subalveo che possono essere, nelle stagioni asciutte, totali o parziali. La portata ed il chimismo delle acque sorgive vengono di conseguenza pesantemente condizionate dalle caratteristiche idrodinamiche e qualitative delle ac-

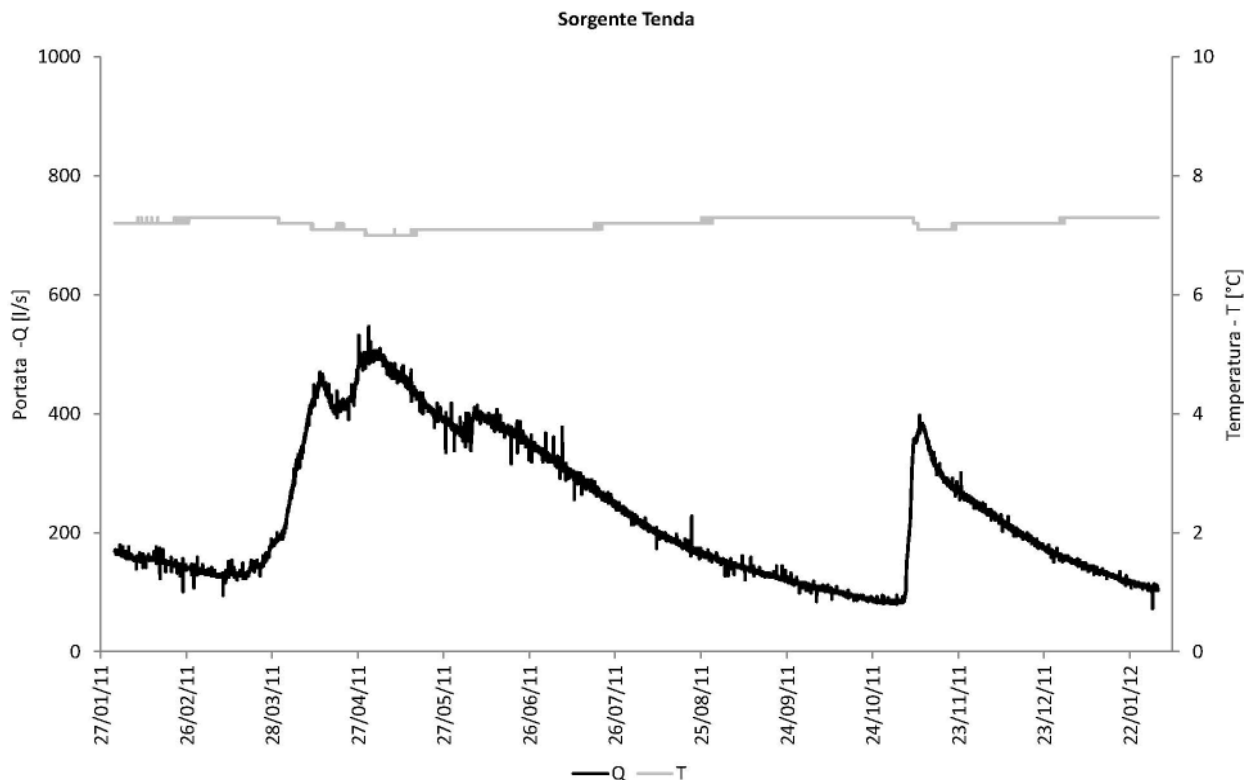


Fig. 11. Andamento annuale della portata e della temperatura delle acque di un sistema con alimentazione primaria prevalente. (Sorgente del Colle di Tenda, Valle Vermenagna, CN).

Annual trend of flow rate and temperature of spring water fed by a prevalent primary input (Colle di Tenda spring, Vermenagna Valley, CN).

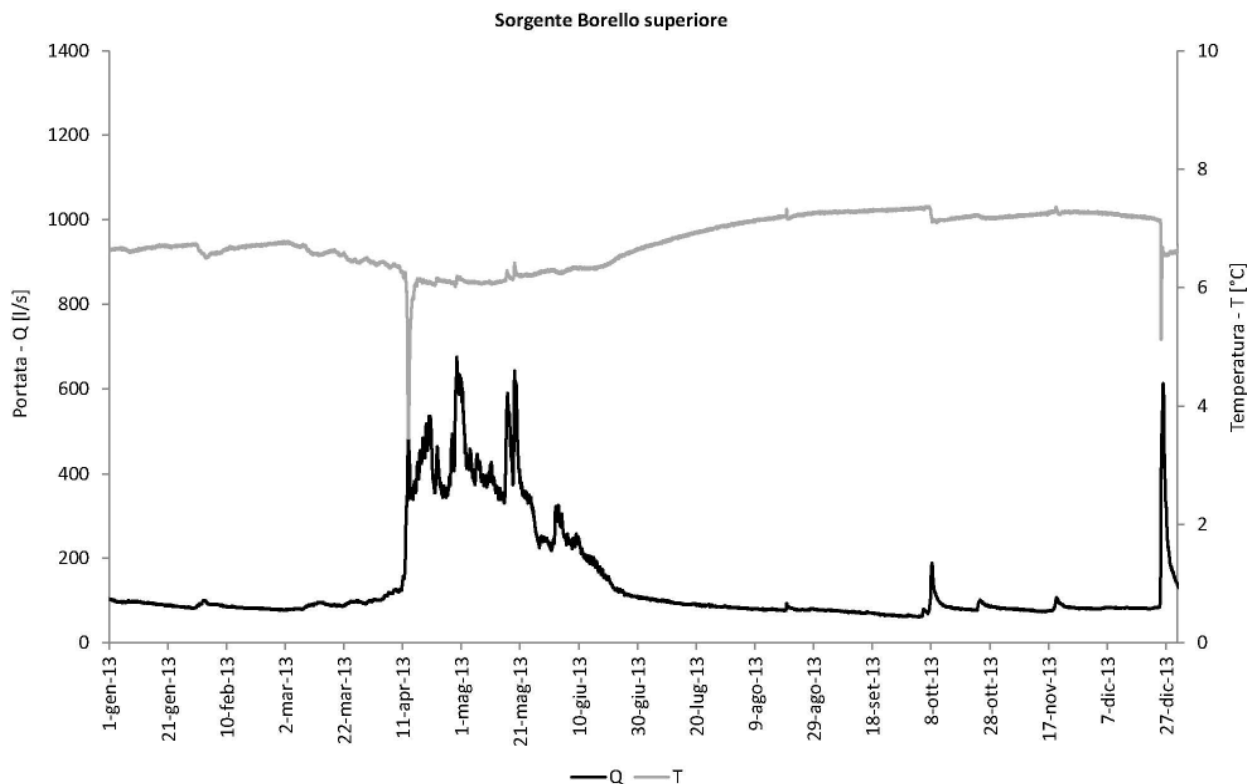


Fig. 12. Andamento annuale della portata e della temperatura delle acque di un sistema con alimentazione primaria e secondaria. (Sorgente di Borello Superiore, Valle Corsaglia, CN).

Annual trend of flow rate and temperature of spring water fed by primary and secondary input. (Borello superiore spring, Corsaglia Valley, CN).

que superficiali essendo l'alimentazione primaria del tutto trascurabile. La temperatura delle acque sorgive mostra, in genere, importanti variazioni annuali, strettamente legate alla situazione climatica della zona di ricarica (Fig. 13). Alcune importanti sorgenti presenti nel territorio piemontese, captate ad uso idropotabile, sono legate prevalentemente all'alimentazione allogena.

4. Individuazione delle aree di salvaguardia delle sorgenti

Il dimensionamento delle aree di salvaguardia di una sorgente è funzione della *vulnerabilità intrinseca dell'acquifero* che alimenta una sorgente oggetto di captazione. Per valutare la vulnerabilità di un acquifero all'inquinamento sono stati proposti numerosi metodi, in particolare i metodi parametrici quali GOD

(Foster, 1987); DRASTIC (Aller *et al.*, 1985); SINTACS (Civita & De Maio, 1977) utilizzano una serie di informazioni che non sono in genere a disposizione per un acquifero posto in zone montuose. In queste situazioni gli unici dati utili, oltre alle informazioni geologico-strutturali dell'ammasso roccioso, provengono dai risultati del monitoraggio. Questi dati, in ogni caso, forniscono indicazioni più precise rispetto alle altre metodologie che si basano su informazioni meno strettamente legate alle reali situazioni idrogeologiche dell'acquifero.

La vulnerabilità all'inquinamento di un acquifero può essere calcolata attraverso il metodo del tempo di dimezzamento della portata massima annuale (Civita, 1988), adottato dalla Regione Piemonte, che utilizza unicamente i valori del flusso idrico sorgivo, o con il metodo VESPA (Galleani *et al.*, 2011) che prende in considerazione oltre al dato idrodinamico anche le misure

annuali relative alla temperatura ed alla conducibilità elettrica specifica delle acque sorgive. In funzione della vulnerabilità calcolata attraverso queste due metodologie vengono poi opportunamente dimensionate le aree di salvaguardia di una sorgente.

Il metodo del tempo di dimezzamento si basa sul calcolo di ϵ , parametro utilizzato nella formula per la caratterizzazione di una sorgente secondo Mangin (1974), che è funzione dell'eterogeneità del sistema acquifero e quindi della velocità di ricarica dell'acquifero stesso, nonché della curva che meglio si adatta all'idrogramma registrato. Calcolando in giorni il tempo intercorso tra la portata massima e il raggiungimento di una portata pari alla metà di questa, Civita ha individuato quattro situazioni-base di vulnerabilità (estremamente elevata, elevata, media e bassa). Questo metodo fornisce risultati abbastanza attendibili, ma in alcune situazioni

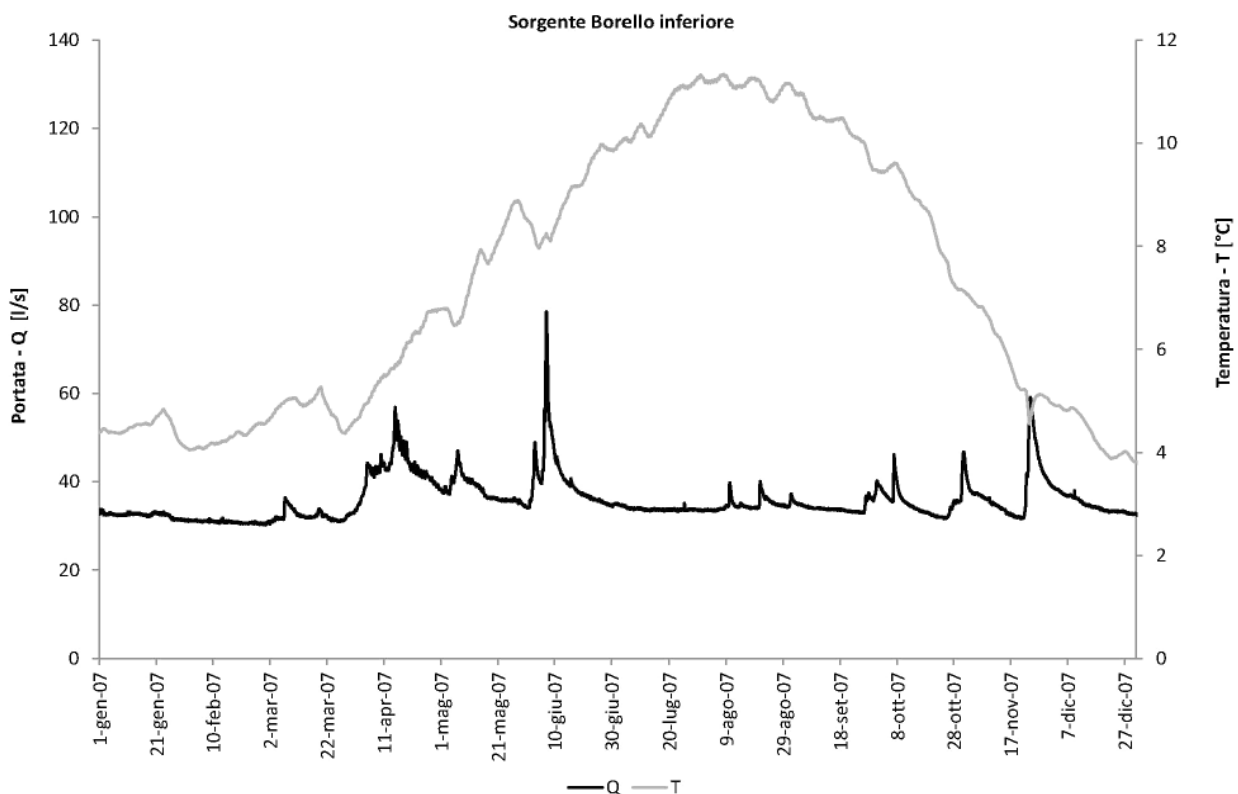


Fig. 13. Andamento annuale della portata e della temperatura delle acque di un sistema con alimentazione secondaria prevalente. (Sorgente di Borello inferiore, Valle Corsaglia, CN)

Annual trend of flow rate and temperature of spring water fed by prevalent secondary input. (Borello inferiore spring, Corsaglia Valley, CN).

i valori che si ricavano sono poco precisi. Nelle zone montane la portata massima annuale viene in genere raggiunta nel periodo primaverile, quando alle precipitazioni si somma il contributo della fusione nivale. Questo fenomeno avviene per un lungo periodo, condizionando pesantemente la curva di decremento del flusso idrico con conseguenti errori nella valutazione dei tempi di dimezzamento della portata massima. Anche nei sistemi dove l'alimentazione di una sorgente è prevalentemente legata alle perdite in sub-alveo di un corso d'acqua, questo metodo è poco preciso in quanto la portata presenta, in genere, valori piuttosto costanti (tempi di dimezzamento lunghi e quindi vulnerabilità calcolata bassa) mentre i tempi di deflusso sotterraneo sono piuttosto veloci ed indicano una situazione di vulnerabilità elevata.

Il metodo VESPA (Vulnerability Evaluation for Spring Protection Area) si basa sulla moltiplicazione (Indicatore di vulnerabilità) di tre indici provenienti dall'elaborazione dei valori di variabilità annuale della portata sorgiva, dalla variazione massima della temperatura annuale e dalla correlazione tra valori di portata e conducibilità elettrica. In funzione del valore dell'indicatore di vulnerabilità calcolato vengono poi determinate le aree di salvaguardia delle sorgenti, così come proposto dalla metodologia del tempo di dimezzamento della portata massima annuale. Nonostante l'utilizzo dei tre parametri e quindi di una maggiore quantità di dati a disposizione, anche il metodo VESPA necessita di ulteriori affinamenti, in particolare per il calcolo della correlazione esistente tra la portata e la conducibilità elettrica, che dovrebbe evidenziare le differenti risposte dell'acquifero agli eventi infiltrativi (risposta a sostituzione prevalente, a pistonaggio o a omogenizzazione), indicando quindi diverse situazioni di vulnerabilità.

5. Conclusioni

Il monitoraggio in continuo dei parametri idrogeologici è di fondamentale importanza per comprendere il funzionamento di un acquifero e realizzare i diversi interventi di sfruttamento e protezione di una sorgente. Se questa indagine può sembrare apparentemente semplice, è doveroso evidenziare che per ottenere risultati validi e rispondenti alla realtà occorre scegliere strumentazioni adeguate, installarle correttamente, effettuare tarature e manutenzioni piuttosto frequenti, nonché fornire una interpretazione della situazione idrogeologica coerente con tutti i dati registrati ed eventualmente con altre informazioni come quelle fornite dai test con traccianti artificiali o dalle analisi chimico-fisiche delle acque sorgive.

Bibliografia

- Aller, L., Bennet, T., Lehr, J.H., Petty, R.J., Hackett, G., 1987. *DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollutant potential using hydrogeologic settings*, NWWA/EPA Ser., EPA600/287034, 11 Carte.
- Bakalowicz, M., 1976. *Geochimie des eaux karstiques. Une methode d'etude de l'organisation des ecoulements souterrains*. Annales Scientifiques Université de Besançon, 25: 49-58.
- Bakalowicz, M., 1977. *Etude du degre d'organisation des ecoulements souterrain dans les aquiferes carbonatés par une methode hydrogeochimique nouvelle*. C.R. Acad. Sc. Paris, 284 serie D: 2463-2466.
- Bakalowicz, M., Mangin, A., 1980. *L'aquifere karstique. Sa definition, ses caracteristiques et son identification*. Mem. Soc. Geol. France, 11: 71-79.
- Boegli, A., 1980. *Karst hydrology and physical speleology*. Springer Verlag: pp. 284.
- Braun, L. N. & Lang, H. 1986. *Simulation of snowmelt runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland*. In: *Modelling Snowmelt-Induced Processes* (ed. by E. M. Morris) (Proc. Budapest Symp., July 1986), 125-140. IAHS Publ. No. 155.
- Chauve, P., Mania, J., & Moindrot, D. 1990. *Modalités de fonte de neige en moyenne montagne et alimentation du karst sous-jacent*. Hydrogeology in Mountainous Regions I (p. 107-116). IAHS Publications n. 193.
- Civita, M., Peano, G., Vigna B., 1984. *La stazione sperimentale della Grotta di Bossea nel quadro delle ricerche idrogeologiche sui sistemi carsici del Monregalese (Alpi Marittime)*. Atti 72° Congr. Soc. Geol. It., 29, pp. 187-207.
- Civita, M., 1988. *Una metodologia per la definizione ed il dimensionamento delle aree di salvaguardia delle opere di presa delle sorgenti normali*. Boll. ASS. Min. Subalpina, 25,4, pp. 423-440.
- Civita, M., De Maio, M., 1977. *SIN-TACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento*. Metodologia & Automattizzazione, Pitagora, Bologna.
- Civita, M., Manzone, L.; Oliveo, G.; Vigna B. 1991. *Approcci sinergici nelle ricerche sui sistemi idrogeologici carbonatici del Piemonte meridionale*. Proc. Congr. "Ricerca e Protezione delle Risorse idriche sotterranee delle aree Brescia, pp. 53-86.
- Engelen, G., van der Griend, A., & P. V. 1984. *A lysimetric snow-pillow stations for continuous monitoring of the snow cover cycle and its processes at the "Seiser Alm", South Tyrol, N. Italy*. Schneehydrologische Forschung in Mitteleuropa, p. 129-143.
- Ford, D., Williams, P., 1989. *Karst geomorphology and hydrology*. Ed. Unwin Hyman: pp. 601.
- Ford, D., Williams, P., 2007. *Karst hydrogeology and geomorphology*. Ed. Wiley: pp. 562.

- Foster, S.S.D., 1987. *Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy*. Atti Int. Conf. Vulnerab. Of Soil and Groundw. To Pollutants, RIVM Proc. And Inf. 38, pp. 69-86.
- Gabrovšek, F., 2000. *Evolution of early karst aquifers: from simple principles to complex models*. Institute for Karst Research, ZRC SAZU, Postojna-Ljubljana, Slovenia: pp. 448.
- Gabrovšek, F., 2002. *Evolution of karst: from prekarst to cessation*. Institute for Karst Research. ZRC SAZU, Postojna-Ljubljana, Slovenia: pp. 150.
- Galleani, L., Vigna, B., Banzato, C., Lo Russo, S., 2011. *Validation of a Vulnerability Estimator for Spring Protection Areas: The VESPA index*, Journal of Hydrology, Elsevier, pp. 13, 2011, Vol. 396, ISSN: 0022-1694, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.11.012.
- Hottelet, C., Braun, L., Leibungdgut, C., & Rieg, A. 1993. *Simulation of Snowpack and Discharge in an Alpine Karst Basin*. Snow and Glacier Hydrology, 249-260.
- Kirnbaauer, R. e Bloschl, G. 1990. *A lysimetric snow pillow statio at Kuhtail Tyrol*. Hydrology in Mountainous Regions I (p. 173-180). IAHS Publication n. 193.
- Klimchouk, A., 2000. *The formation of the epikarst and its role in vadose speleogenesis*. In: Klimchouk, A., Ford D., Palmer A. N., Dreybrodt W., 2000. *Speleogenesis: evolution of karst aquifers*. National Speleological Society: 91-99.
- Mangin A., 1974. *Contribution a l'étude hydrodynamique des acquifères karstiques*. Annales de Spéléologie, 29/3-1974, 29/4-1974, 30/1-1975: 282-332; 495-601; 21-124.
- Mangin, A., 1984. *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale*. Journal of Hydrology, 67: 25-43.
- Mangin, A., 1998. *L'approche hydrogéologique des karsts*. Speleochronos, 9: 3-26.
- Moindrot, P., Chauve, P., & Mania, J. 1988. *Influence de l'enneigement sur l'hydrologie du bassin experimental des fourgs (Franche-Comtè, France)*. Quatrieme Colloque d'Hydrologie en pays calcaire et en milieu fissuré, (p. 121-129). Besancon.
- Palmer, A., N., 2007. *Cave Geology*. Cave books-Cave Research Foundation: pp. 454.
- Vigna, B., Calandri, G., 2001. *Gli acquiferi carsici*. Quaderni didattici della Società Speleologica Italiana, n. 12, ed. Erga: pp. 48.
- Vigna, B., 2002. *Monitoraggio e valutazione della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi carsici*. Atti Conv. "Le risposte idriche sotterranee delle Alpi Apuane: conoscenze attuali e prospettive di utilizzo, Forno, 22/6/2002: 23-35.
- Vigna, B., 2007. *Schematizzazione e funzionamento degli acquiferi in rocce carbonatiche*. In Cucchi, F., Forti, P., Sauro, U., 2007. *L'acqua nelle aree carsiche in Italia*. Memorie dell'Istituto Italiano di Speleologia, serie II, Vol. XIX: 21-26.
- Vigna, B., Suozzi, E. 2009. *The importance of the nival melting process on the recharging of acquifers*, In Epitome, Volume 3 Geoitalia 2009, Rimini, Italy 9-11 settembre, p. 41.
- Vigna B., Banzato C. 2012. *The snow melting process*, Flowpath 2012. Hydrogeology pathways, Bologna (Italy) 20-22 giugno 2012, pp. 1-2.
- White W.B., 1969. *Conceptual models for carbonate aquifers*. Ground Water 7(3): 15-21.