

L'utilizzo degli isotopi stabili da reti pluviometriche per la definizione degli areali di ricarica delle acque sorgive: problemi e possibili soluzioni da casi di studio nell'Appennino settentrionale

Gli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno sono ampiamente utilizzati in idrogeologia per la definizione degli areali di ricarica di acque sorgive in ambienti montani. Nella quasi totalità dei casi, vengono utilizzate relazioni pregresse o gradienti isotopici medi, deducibili da letteratura, che legano la variazione con la quota degli isotopi in acque meteoriche raccolte presso pluviometri campionatori, ricavando, con le sole analisi delle acque sotterranee, la quota media di infiltrazione delle acque sorgive campionate. Tale approccio, seppur di facile utilizzo, non tiene in considerazione i meccanismi di ricarica delle acque sotterranee, assumendo le acque campionate ai pluviometri come totalmente equiparabili alle acque sorgive. Dal punto di vista idrogeologico, tale assunzione non tiene in considerazione l'equazione del bilancio idrogeologico, trascurando gli effetti dell'evapotraspirazione e del deflusso superficiale. La presente nota riporta una comparazione preliminare tra isotopi stabili in acque meteoriche (1 pluviometro) e sotterranee (2 sorgenti) nel medio-alto Appennino emiliano. I risultati evidenziano come, nel caso in esame, le relazioni comunemente applicate in bibliografia forniscano valori di quote di alimentazione fuorvianti, in entrambi i casi superiori alle rispettive quote massime dei bacini idrogeologici delle sorgenti. Le stime dell'evapotraspirazione potenziale, e la successiva procedura dei weighting del dato isotopico meteorico, sottolineano come le anomalie nella stima della quota di alimentazione siano solo in parte da ricercare in questo parametro del bilancio e che, ad oggi, sia preferibile, per l'Appennino settentrionale, l'utilizzo di gradienti isotopici ricavati da piccole sorgenti alimentate da depositi superficiali di dimensioni ridotte.

Parole chiave: ?????

The use of stable water isotopes from rain gauges network to define the recharge areas of springs: problems and possible solutions from case studies from the northern Apennines. The water stable isotopes are widely exploited in hydrogeology to define the recharge area of mountain springs. In almost all cases, pre-existing relationships linking the isotopic contents of meteoric water that were collected in several rain gauges located at different altitudes are used. Although such approach is straightforward, it assumes that the water aliquots collected in the rain gauges fully recharge the groundwater. From the hydrogeological point of view, this assumption does not take into account the water balance equation, as it neglects evapotranspiration and runoff. This manuscript deals on the preliminary comparison of water stable isotopes in meteoric water (1 rain gauge) and groundwater (2 springs) from the northern Apennines of Italy. Results highlight that the pre-existing isotopic relationships commonly used in northern Apennines largely overestimate the mean altitudes of recharge of springs. This fact may be only in part due to the evapotranspiration processes taking place during summer period so that isotopic gradients obtained from weighting procedure linking effective rainfall with isotopic contents in rain gauges are still not recommended. To date, isotopic gradients obtained from ephemeral springs fed by reduced surficial deposits seem to be the most reliable tool.

Keywords: water isotopes, springs, recharge areas, northern Apennines, Italy

Federico Cervi*
 Francesco Ronchetti**
 Marco Doveri***
 Mario Mussi****
 Marco Marcaccio****
 Alberto Tazioli*****

* Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica, Ambientale e dei Materiali DICAM, Università di Bologna

** Dipartimento di Scienze Chimiche e Geologiche DSCG, Università di Modena e Reggio Emilia

*** Istituto di Geoscienze e Georisorse IGG, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Pisa

**** Agenzia Regionale per l'Ambiente e il Territorio ARPAE, Bologna

***** Dipartimento di Scienze e Ingegneria della Materia, dell'Ambiente ed Urbanistica SIMAU, Università Politecnica delle Marche, Ancona

1. Introduzione

Gli isotopi stabili dell'ossigeno (^{18}O e ^{16}O) e dell'idrogeno (^2H e ^1H) costituiscono le molecole d'acqua e sono ampiamente utilizzati come traccianti naturali (*environmental tracers*) in idrogeologia (Celico, 1986; Civita, 2005). Tra le diverse applicazioni, una delle più comuni è la definizione della quota media di alimentazione delle acque sorgive (Gonfiantini *et al.*, 2001) per la perimetrazione delle aree di ricarica e la definizione delle aree di salvaguardia (McKenzie *et al.*, 2001; Tazioli *et al.*, 2007; Menichini *et al.*, 2015; Doveri *et al.*, 2016; Mussi *et al.*, in stampa). Tale applicazione sfrutta il frazionamento isotopico che avviene durante la condensazione del vapore acqueo nelle masse d'aria in transito sulla terraferma, processo strettamente controllato dalla temperatura (Craig, 1961). In particolare, e a causa delle diverse tensioni di vapore delle mole-

Lavoro basato su un contributo presentato al Convegno IAH AQUA 2015, Roma, 13-18 September 2015.

cole di acqua composte dai differenti isotopi dell'ossigeno e dell'idrogeno, ad una temperatura di condensazione più bassa corrisponde un contenuto minore di isotopi pesanti (^{18}O e ^2H ; acque isotopicamente più "leggere") viceversa ad una temperatura più elevata corrisponde un maggior contenuto degli stessi (acque isotopicamente più "pesanti"). Ciò provoca un marcato fenomeno di variazione stagionale del contenuto isotopico delle acque di precipitazione, che sono generalmente più impoverite in isotopi pesanti in inverno rispetto a quelle estive. Inoltre, se una massa di aria satura incontra un rilievo montuoso, essa risale in modo adiabatico, raffreddandosi progressivamente e condensando molecole di acqua; le piogge iniziali alle quote meno elevate, originate durante la prima fase della condensazione (temperature più elevate), sono arricchite negli isotopi più pesanti (^{18}O e ^2H) diventando progressivamente più "leggere" (ovvero con maggior contenuto di ^{16}O e ^1H) con l'aumentare della quota (temperature più basse). Il fenomeno, definito "effetto altitudine", permette di identificare gradienti isotopici verticali di "alleggerimento" della composizione isotopica con la quota, che permettono quindi il calcolo della quota di infiltrazione delle acque sorgive campionate.

Tale approccio richiederebbe l'installazione di una rete di pluviometri localizzati a quote diverse per la definizione del gradiente di "alleggerimento" del dato isotopico (con il campionamento da effettuare per almeno 2-3 anni idrologici, per disporre di dati sufficientemente solidi) e la successiva comparazione con il valore isotopico delle acque sotterranee prelevate alle sorgenti naturali o da pozzi. Ad oggi, viste anche le note difficoltà nell'installazione e mantenimento di una rete di campionamento apposita in ambito montano (Nanni *et al.* 2013), le acque sorgive vengono confrontate con i gradienti medi ricavati da studi pregressi sulle diverse aree geografiche della penisola ita-

liana (per esempio: Bortolami *et al.* 1978; Celico, 1986; Longinelli e Selmo, 2003; Tazioli *et al.* 2007; Tazioli *et al.* 2012) o da datasets isotopici a libero accesso, come quelli scaricabili dalla rete pluvio-isotopica GNIP-IAEA (Global Network of Isotopes in Precipitations della International Atomic Energy Agency di Vienna: http://www-naweb.iaea.org/napc/ih/IHS_resources_gnip.html). Un ulteriore approccio, alternativo a quello dei pluviometri campionatori, consiste nell'utilizzo di dati isotopici da piccole sorgenti localizzate a quote diverse e i cui bacini di alimentazione risultino di dimensioni molto ridotte (Mussi *et al.*, 1998; Doveri e Mussi, 2014; Vespasiano *et al.*, 2015).

In tutti i casi, prima di utilizzare gli isotopi stabili di ossigeno e idrogeno per la definizione delle aree di ricarica delle acque sotterranee sarebbe opportuna una adeguata conoscenza dell'idrogeologia dell'area ed, in particolare, dei meccanismi con cui la ricarica meteorica (precipitazioni solide e liquide) si trasferisce nell'acquifero indagato.

Infatti, le acque campionate ai pluviometri (e i rispettivi valori isotopici) non sono pienamente rappresentative dell'input meteorico che alimenta effettivamente l'acquifero. Pensiamo ad esempio ai processi di evapotraspirazione che hanno luogo nel suolo o al deflusso superficiale: in entrambi i casi, aliquote più o meno importanti di precipitazione raccolta dai pluviometri non pervengono all'acquifero.

Invece, nel caso in cui si utilizzino sorgenti al posto dei pluviometri, le stesse dovrebbero essere alimentate da acquiferi di dimensioni estremamente ridotte (come piccoli depositi composti da detrito di versante) e la cui differenza di quota tra zona di alimentazione e recapito sia esigua.

Recentemente, per alcuni corsi d'acqua dell'Appennino settentrionale, Iacumin *et al.* (2011) e Martinelli *et al.* (2014) hanno riscontrato valori isotopici di ossigeno e idrogeno sensibilmente più "leggeri" rispetto alle precipitazioni raccolte

nei corrispondenti bacini idrologici. Lo stesso effetto (minore contenuto di isotopi pesanti rispetto alle acque campionate ai pluviometri anche a quote di crinale) è stato segnalato in diverse sorgenti dell'alto Appennino Modenese (Cervi *et al.*, 2014; Cervi *et al.*, 2015) e del medio Appennino Reggiano (Cervi *et al.*, 2012).

La presente nota si propone di indagare l'influenza dell'evapotraspirazione sul valore medio isotopico della ricarica di due sorgenti appenniniche (alto Appennino modenese e medio Appennino reggiano) e le conseguenti ripercussioni sull'utilizzo di gradienti isotopici verticali proposti da bibliografia per la zona in esame.

In particolare, sono stati presi in considerazione tre punti di campionamento, ovvero un pluviometro e due sorgenti ritenute rappresentative della maggioranza delle acque sotterranee presenti in Appennino settentrionale (i.e., sorgenti alimentate da acquiferi ospitati in ammassi rocciosi fratturati; Corsini *et al.* 2009). Queste ultime presentano numerose caratteristiche che le rendono idonee al confronto con il valore isotopico nelle acque di precipitazione. Infatti (a) le portate seguono fedelmente il pattern di ricarica meteorica, annullandosi (o quasi) nei mesi di Settembre/Ottobre; ciò permette di considerare come ininfluenti le precipitazioni antecedenti agli anni idrologici presi in considerazione. Inoltre (b), e come già segnalato da Cervi *et al.* (2015), presentano scarsa variabilità del dato isotopico nel corso dell'anno idrologico. Ciò rende superfluo l'utilizzo di tecniche di weighting del dato isotopico con le portate per tenere in opportuna considerazione il "peso" di ciascun campione isotopico durante l'anno idrologico (Tekleab *et al.*, 2014).

2. Metodi

Nella presente nota sono state raccolte ed analizzate le acque meteori-

che e sotterranee prelevate negli anni 2014 e 2015 presso un pluviometro e due sorgenti nell'Appennino settentrionale. I dati isotopici sono stati inizialmente confrontati mediante l'utilizzo di grafici box-plots per verificare le loro distribuzioni e la presenza di eventuali anomalie tra acque superficiali e sotterranee. Successivamente, si sono pesati i dati isotopici delle acque meteoriche (in particolare i rapporti isotopici dell'ossigeno) con l'ammontare delle precipitazioni totali e effettive nei rispettivi intervalli temporali per verificare l'eventuale influenza di tali procedure sulla corretta disamina dei dati.

2.1. Sito di studio e attività di campionamento

Il pluviometro campionario per la raccolta delle acque di precipitazione e di scioglimento nivale è stato installato presso Frassinoro (fig. 1; 1.100 m s.l.m.). Il modello utilizzato, autocostruito, rispetta le direttive IAEA (International Atomic Energy Agency di Vienna) per il campionamento delle acque meteoriche da sottoporre ad analisi isotopiche. Esso è composto da un raccoglitore di 10 L in PE-HD collegato ad un imbuto di diametro 20 cm a cui è stato aggiunto, nel periodo invernale, un ulteriore tubo di 50 cm per la raccolta delle acque di fusione nivale; per evitare l'evaporazione delle acque meteoriche, nel campionario sono stati preventivamente inseriti 200 mL di olio di paraffina. Le acque sono state campionate a partire dal Febbraio 2014 rispettando una cadenza mensile. La raccolta dei campioni è terminata in Ottobre 2015. Il pluviometro campionario è stato posto a fianco della stazione meteorologica di Frassinoro appartenente alla rete ARPAE-EMR (Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Regione Emilia Romagna; www.arpae.emr.it). I dati raccolti consistono nei valori giornalieri di precipitazione (mm)

e temperatura (°C), processati successivamente per ottenere la precipitazione mensile e la precipitazione efficace mensile, oltre alla temperatura media mensile.

La sorgente Lusino (SL) è una piccola sorgente che perviene all'esaurimento completo (portate nulle) in Settembre inoltrato. È localizzata nel basso Appennino reggiano (coordinate: 44°31'37.43"N - 10°36'45.08"E; fig. 1), ad una distanza di 18 km N dal pluviometro di Frassinoro. La captazione (rappresentata da una fontana in muratura) è a 450 m di quota e drena le acque di un versante in calcareniti fratturate, densamente vegetato (boschi a prevalenza di querce caducifoglie), la cui quota massima è di circa 650 m s.l.m. Le portate seguono fedelmente la ricarica efficace e raggiungono i valori massimi in Febbraio/Marzo/Aprile (5 Ls⁻¹). I campionamenti hanno interessato il periodo Aprile 2014-Novembre 2015 e hanno avuto luogo ogni due mesi.

La sorgente Venano (SV) è localizzata a quote decisamente più alte rispetto alla prima (1.050 m s.l.m.; coordinate: 44°19'12.98"N - 10°33'39.64"E; fig. 1) e raccoglie le acque infiltratesi in un ammasso roccioso arenaceo fratturato, con quota massima di circa 1.340 m. La distanza rispetto al pluviometro di Frassinoro è di circa 3 km O. Una densa foresta di (boschi a latifoglie) ricopre il versante fino alla quota massima mentre la sorgente prende origine al contatto con argilliti impermeabili. Le portate massime (di circa 2 Ls⁻¹) si hanno in Aprile, in seguito allo scioglimento del manto nevoso che, in alcune annate particolari, può raggiungere valori cumulati al suolo di oltre 2 metri. Come nel caso di SL, le portate minime si hanno in Settembre/Ottobre, ma non raggiungono mai valori nulli (0,05 Ls⁻¹). I campionamenti hanno interessato il periodo Aprile 2014 - Ottobre 2015 mentre la frequenza di campionamento è stata bimensile.

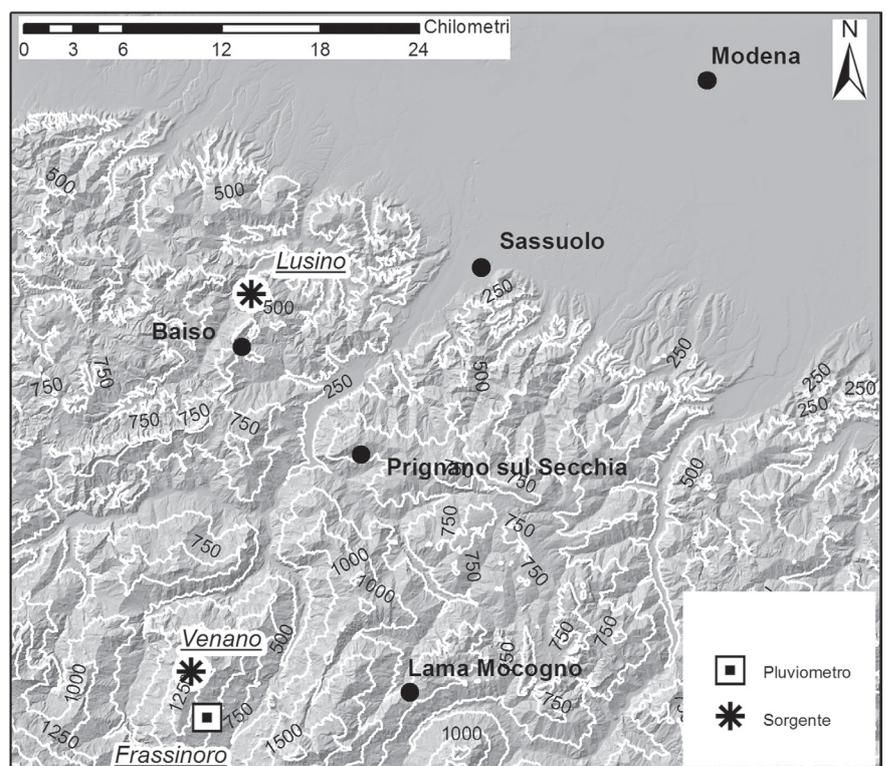


Fig. 1. Localizzazione geografica delle due sorgenti e del pluviometro campionati nel presente studio.

dida inglese

Sia per le acque meteoriche, sia per quelle superficiali, i campioni sono stati raccolti in contenitori di PE-HD dotati di tappo e contro-tappo e conservati a temperatura di 4°C fino all'analisi di laboratorio.

2.2. Laboratorio

Tutte le analisi sugli isotopi stabili di ossigeno e idrogeno delle acque di precipitazione e sotterranee (sorgenti) sono state effettuate all'Istituto di Geoscienze e Georisorse (IGG-CNR) di Pisa mediante spettrometria di massa (IRMS-Isotope Ratio Mass Spectrometry). La concentrazione isotopica è espressa come differenza relativa $\delta(\text{‰})$ tra il singolo rapporto isotopico R_{SAMPLE} nel campione analizzato (es: $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ o $^2\text{H}/^1\text{H}$) e il corrispondente valore in uno standard di riferimento ($R_{\text{V-SMOW}}$ dove V-SMOW è acronimo di Vienna Standard Mean Ocean Water):

$$\delta(\text{‰}) = [(R_{\text{SAMPLE}}/R_{\text{V-SMOW}}) - 1] \times 1000$$

Il valore di $\delta^{18}\text{O}$ è stato determinato mediante analisi della $\text{CO}_2(\text{g})$, precedentemente equilibrata con acqua a 25°C (Epstein e Mayeda, 1953). La $\text{CO}_2(\text{g})$ è stata misurata con uno spettrometro di massa MAT252-Finnigan, con precisione analitica di 0,08‰.

$\delta^2\text{H}$ è stato ottenuto con la riduzione delle molecole di acqua in idrogeno gassoso (Coleman *et al.*, 1982) e successiva analisi con uno spettrometro GEO 20-20 Europa Scientific. L'errore analitico per $\delta^2\text{H}$ è di 1,5‰.

2.3. Elaborazione dei dati isotopici

I valori isotopici di $\delta^{18}\text{O}$ delle precipitazioni sono stati ottenuti mediante (1) media aritmetica A_R , (2) media ponderata sulle precipitazioni mensili M_{wR} e (3) media ponderata sulle precipitazioni efficaci mensili

M_{wER} (ove per precipitazione efficace si intende l'aliquota di acqua di precipitazione che è disponibile al suolo per successiva infiltrazione o deflusso superficiale dopo i processi di evapotraspirazione). Nell'ultimo caso, la precipitazione efficace del singolo mese è stata ottenuta calcolando l'evapotraspirazione con la formula di Thornthwaite and Mather (1957).

Le formule utilizzate sono le seguenti:

$$A_R = \frac{\sum_{i=1}^n \delta^{18}\text{O}_i}{n} \quad (1)$$

$$M_{wR} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta^{18}\text{O}_i R_i}{\sum_{i=1}^n R_i} \quad (2)$$

$$M_{wER} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i R_i \delta^{18}\text{O}_i}{\sum_{i=1}^n \alpha_i R_i} \quad (3)$$

Dove n ($=20$) è il numero di campioni di prelevati nel pluviometro di Frassinoro, R_i è la precipitazione mensile (in mm), $\delta^{18}\text{O}_i$ è il valore isotopico nell' i -esimo mese, α_i è il rapporto tra la precipitazione efficace ER_i e quella mensile R_i ($0 \leq \alpha_i \leq 1$) nell' i -esimo mese. È da sottolineare come, con $\alpha_i = 1$ (ovvero no evapotraspirazione) la formula (3) diventa uguale alla (2).

3. Risultati

3.1. Confronto tra le acque di precipitazione e le acque sotterranee

Tutti i valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ ricavati nello studio sono riportati nel grafico box-plot di fig. 2a,b. Con riferimento al $\delta^{18}\text{O}$ nelle acque di precipitazione (fig. 2a), la distribuzione dei valori è asimmetrica, con valore medio (i.e. A_R) uguale a $-8,07\text{‰}$ e mediana di $-8,39\text{‰}$. Le acque sotterranee campionate alle due sorgenti (SL e SV) mostrano invece una distribuzione decisamente più concentrata, con valori medi di $\delta^{18}\text{O}$ pari a

$-9,41\text{‰}$ (SL; mediana: $-9,46\text{‰}$) e $-10,45\text{‰}$ (SV; mediana: $-10,42\text{‰}$), sensibilmente più negativi rispetto a quelli delle precipitazioni raccolte presso il pluviometro. Tutti i valori di $\delta^{18}\text{O}$ raccolti presso SL ricadono tra la mediana e il 75-esimo percentile delle acque di precipitazioni; nel caso di SV ricadono tutti all'interno del 75-esimo percentile e il 90-esimo percentile delle precipitazioni. Le stesse peculiarità caratterizzano le tre distribuzioni di $\delta^2\text{H}$ (fig. 2b), con una marcata asimmetria nelle precipitazioni (media: $-54,0\text{‰}$; mediana: $-59,1\text{‰}$) e un importante impoverimento nell'isotopo pesante nelle acque sotterranee. La sorgente SL è caratterizzata infatti da valori di media e mediana di $\delta^2\text{H}$ $-64,0\text{‰}$ e $-64,4\text{‰}$ (ricadente tra il 50-esimo e il 75-esimo percentile della distribuzione delle precipitazioni) mentre SV presenta valori di $-69,5\text{‰}$ (media) e $-69,3\text{‰}$ (mediana), prossimi al 75-esimo percentile della distribuzione delle precipitazioni.

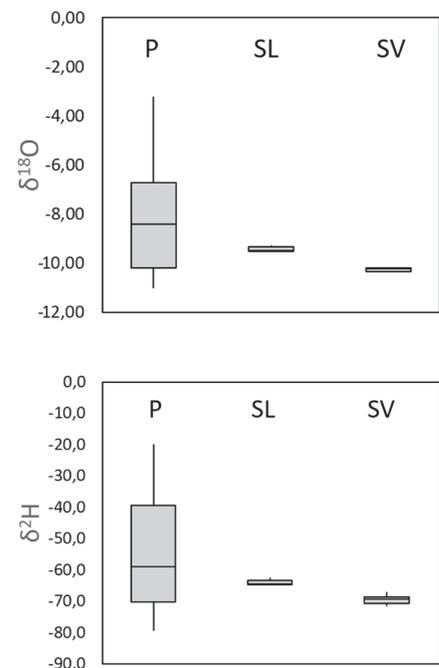


Fig. 2. Box-plots (Fig. 2a: $\delta^{18}\text{O}$; Fig. 2b: $\delta^2\text{H}$) della ricarica meteorica (P) e delle acque sotterranee prelevate alle due sorgenti (SL, SV). Gli areali (in grigio) sono delimitati dal 25-esimo e 75-esimo percentile della ????

dida inglese

3.2. Pattern meteorico e valori isotopici dell'input meteorico

Nel periodo Gennaio 2014 – Ottobre 2015, le precipitazioni totali registrate al pluviometro di Frassinoro sono state corrispondenti a 2130 mm. I massimi picchi di precipitazioni hanno riguardato i mesi invernali (290 mm in Gennaio 2014; fig. 3) ed autunnali (270 mm in Novembre 2015), mentre le precipitazioni minime si sono avute nei mesi estivi (27 mm in Agosto 2014 e 21 mm in Luglio 2015). Tenendo in considerazione l'evapotraspirazione, il valore totale delle precipitazioni efficaci per il medesimo periodo ammonta a 1085 mm, con una riduzione del 49,4% rispetto agli apporti meteorici totali. I periodi caratterizzati da precipitazione efficace nulla riguardano l'intero intervallo estivo (Giugno 2014-Settembre 2014 e Luglio 2015-Settembre 2015), con sensibili riduzioni rispetto alla precipitazione totale mensile già a partire dal mese di Aprile (fig. 3; Aprile 2014: 57 mm a fronte di 99 mm; Aprile 2015: 42 mm a fronte di 82 mm). Nei mesi invernali, i valori di precipitazione totale mensile equivalgono la precipitazione ef-

ficace in quanto l'evapotraspirazione è praticamente inesistente.

Come anticipato nella sezione 1, nelle precipitazioni sono confermate le variazioni isotopiche stagionali, in risposta alla evoluzione delle temperature. In particolare, il $\delta^{18}\text{O}$ (non viene riportato il $\delta^2\text{H}$ per sostanziale corrispondenza del pattern) delle acque meteoriche presenta massimi nei periodo estivi (-5,82‰ in Luglio 2014; -4,37‰ in Settembre 2014; -3,52‰ in Luglio 2015) e minimi (-10,59‰ in Aprile 2014; -10,29‰ in Gennaio 2015; -11,00‰ in Aprile 2015) in quelli invernali e primaverili (fig. 3). Il valore medio (A_R) è pari a $-8,08 \pm 2,36\text{‰}$. I valori di $\delta^{18}\text{O}$ nelle acque sotterranee delle due sorgenti sono pressoché costanti, e sensibilmente più negativi di quelli medi registrati al pluviometro di Frassinoro (valori medi di $-9,41 \pm 0,11\text{‰}$ e $-10,45 \pm 0,09\text{‰}$, rispettivamente).

4. Discussione

Sulla base dei dati isotopici riportati, l'utilizzo dei gradienti del $\delta^{18}\text{O}$ con la quota presenti in bibliografia

condurrebbe a quote medie delle zone di alimentazione fuorviante. Infatti, nel caso in cui si considerasse la relazione di Longinelli e Selmo (2003) per l'Appennino settentrionale (gradiente di altitudine del $\delta^{18}\text{O}$ di circa $-0,15\text{‰}/100\text{ m}$ e $\delta^{18}\text{O} = -0,0015 * \text{altitudine} - 6,7561$), i valori medi di $\delta^{18}\text{O}$ di SL (-9,41‰) e SV (-10,45‰) identificerebbero quote medie di alimentazione di circa 1770 m s.l.m. (SL) e 2570 m (SV). Si tratta di valori ampiamente sovrastimati, che delimiterebbero le quote medie di alimentazione al di sopra dei rispettivi crinali delle sorgenti (650 m per SL e 1340 m per SV).

Come anticipato nel capitolo 3.2, e nel caso della zona in esame, una aliquota delle precipitazioni raccolte presso il pluviometro non ha possibilità di pervenire all'acquifero, in quanto reintrodotta in atmosfera a causa dei processi evapotraspirativi che hanno luogo al suolo. Si tratta delle precipitazioni che generalmente ricadono nel periodo compreso tra Maggio e Ottobre, ovvero le precipitazioni caratterizzate da valori isotopici sensibilmente più positivi. Ciò induce ad un sensibile effetto di negativizzazione del dato isotopico in ingresso nelle acque sotterranee che non può essere spiegato nemmeno prendendo in considerazione la media ponderata alla precipitazioni totali mensili ($M_{wR} = -8,18\text{‰}$).

I dati di $\delta^{18}\text{O}$ riscontrati presso SL si avvicinano ai valori di $\delta^{18}\text{O}$ ottenuti ponderando i valori isotopici al pluviometro di Frassinoro con le precipitazioni efficaci ($M_{wER} = -9,61\text{‰}$). I valori di SV rimangono invece sensibilmente più negativi di quasi una unità delta.

I dati isotopici di SL e SV sono in accordo con i valori isotopici riscontrati per 10 sorgenti localizzate nelle vicinanze dei siti in esame (valori medi di $\delta^{18}\text{O}$ compresi tra $-9,67\text{‰}$ e $-10,42\text{‰}$; Cervi *et al.*, 2014; Cervi *et al.*, 2015). Nello specifico, e utilizzando i dati di alcune piccole sorgenti per il periodo 2005-2008, Cervi *et al.* (2014) hanno riscontrato, per il

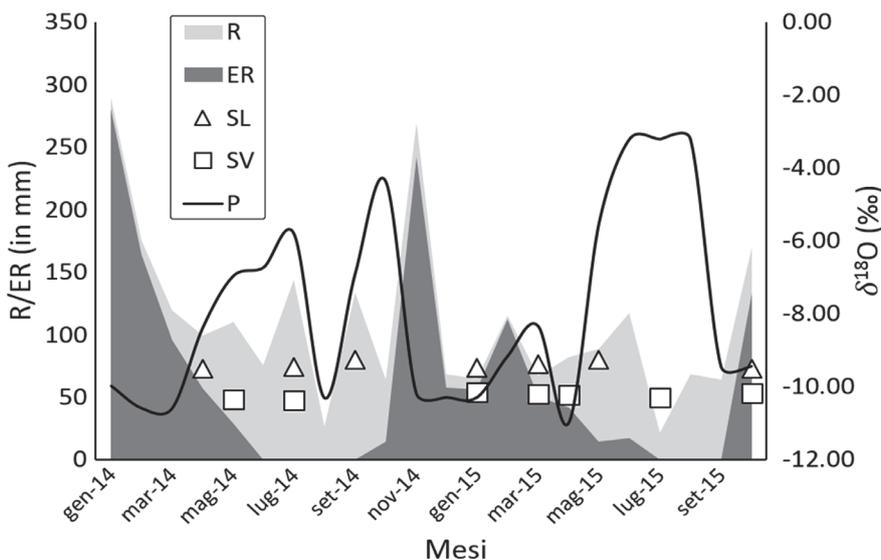


Fig. 3. Evoluzione mensile del $\delta^{18}\text{O}$ (‰) nel periodo dal Gennaio 2014 all'Ottobre 2015 per la ricarica meteorica (P) e le acque sotterranee prelevate alle due sorgenti (SL, SV). Sono riportate anche le precipitazioni totali (R) ed efficaci mensili (ER) (in mm).

didata inglese

medio-alto Appennino modenese e reggiano, un gradiente isotopico di negativizzazione del $\delta^{18}\text{O}$ con la quota pari a $-0,15\text{‰}/100\text{m}$ e proposto la seguente relazione: $\delta^{18}\text{O} = -0,0015 \cdot \text{altitudine} - 8,4441$. Utilizzando questa relazione, le aree di alimentazione delle sorgenti SL e SV ricadrebbero a quote medie di circa 620 m e 1,330 m, del tutto plausibili con i contesti idrogeologici in esame. Ad ogni modo, riportando il valore M_{wER} del pluviometro di Frassinoro sulla relazione proposta da Cervi *et al.* (2014), la quota di ricarica corrispondente dovrebbe essere localizzata a circa 800 m, ovvero ad altitudine sensibilmente più bassa di quella effettiva (1100 m). Ciò induce a ritenere che la sola procedura di weighting di dati isotopici da pluviometri con i valori di precipitazione efficace non sia in grado, per il contesto in esame, di spiegare completamente la forte negativizzazione dei valori di $\delta^{18}\text{O}$ riscontrati nelle acque sorgive. Diversi fattori potrebbero in effetti portare ad una ulteriore negativizzazione dei valori isotopici in questione. In primo luogo, Goodi-

son *et al.* (1997) hanno evidenziato che, per fenomeni fisici peculiari, solo una aliquota minima delle precipitazioni solide riesce ad entrare all'interno dei comuni pluviometri cosicché non sarebbe considerata, nei calcoli di A_R , M_{wR} e M_{wER} , una aliquota di ricarica meteorica che è sempre molto più negativa, dal punto di vista isotopico, rispetto alle precipitazioni liquide (Stichler *et al.*, 1981). In secondo luogo, è utile sottolineare come l'utilizzo dei valori isotopici delle acque meteoriche da pluviometri, seppur ponderati con la precipitazione efficace, non tenga in considerazione il deflusso superficiale. Quest'ultimo, nel caso delle litologie comunemente affioranti in Appennino settentrionale, ovvero rocce e depositi superficiali caratterizzati da matrice argillosa sempre preponderante, può condurre ad un importante effetto di selezione isotopica sulle precipitazioni anche a seconda della durata e dell'intensità dei singoli eventi meteorici (Gat, 1995; Kendall e McDonnell, 2012).

Ulteriori informazioni possono essere ottenute dal confronto simul-

taneo dei valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ campionati presso le acque meteoriche e sotterranee. In particolare, i valori di $\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$ nelle acque meteoriche campionate presso il pluviometro di Frassinoro si allineano secondo la retta di equazione $\delta^2\text{H}(\text{‰}) = 7,7\delta^{18}\text{O} + 8,2$ ($R^2=0,98$; fig. 4) prossima alla relazione riportata da Craig (1961; Global Meteoric Water Line GWML: $\delta^2\text{H}(\delta) = 8,0\delta^{18}\text{O} + 10$) per le acque di precipitazione a scala mondiale e, più in dettaglio, all'interpolazione dei valori isotopici per precipitazioni del nord Italia (Longinelli e Selmo, 2003; northern Italy Meteoric Line NIML: $\delta^2\text{H}(\text{‰}) = 7,7\delta^{18}\text{O} + 9,4$). Le acque sotterranee prelevate in entrambe le sorgenti giacciono a ridosso delle tre rette meteoriche e non sono state caratterizzate da fenomeni di evaporazione pre-infiltrativi (Celico, 1986; Gibson *et al.*, 2005). Questi fenomeni, causati dalla evapotraspirazione di una aliquota delle acque interstiziali nei primi decimetri di suolo, indurrebbero ad una modifica del segnale isotopico in ingresso nelle acque sotterranee, con un arricchimento del

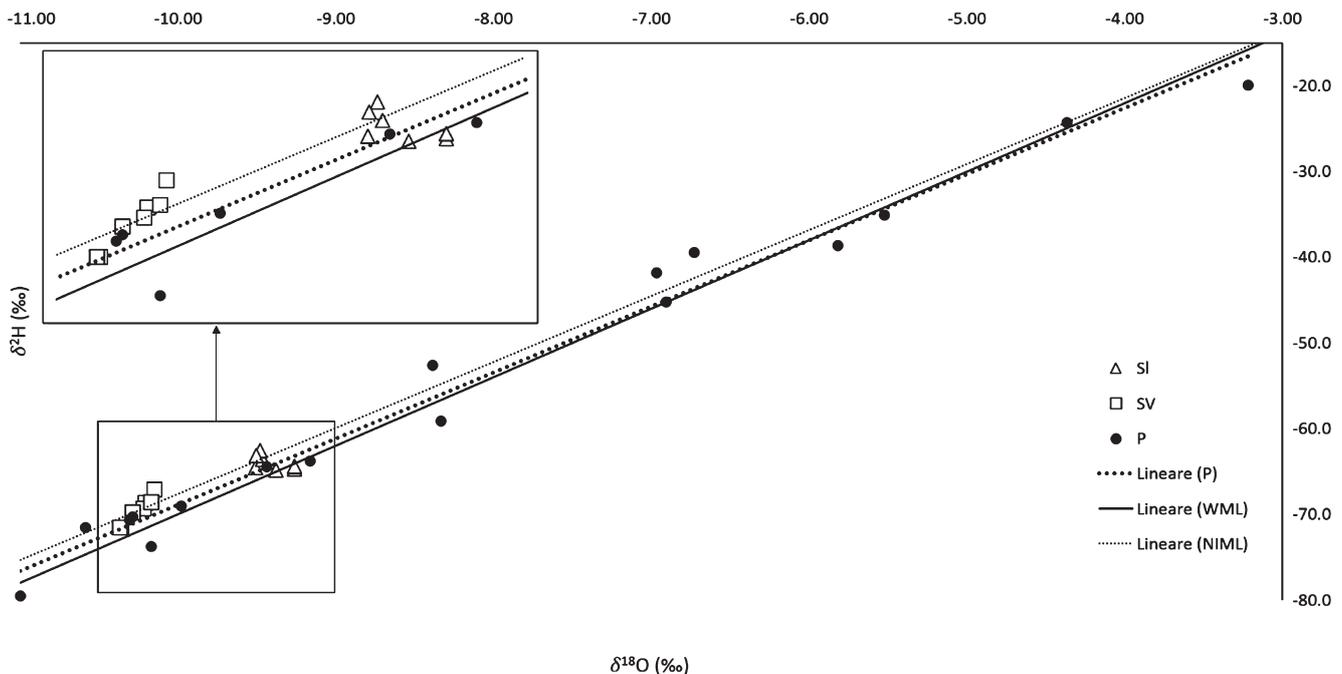


Fig. 4. Grafico $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ per i campioni prelevati al pluviometro di Frassinoro (P) e alle due sorgenti (SL e SV). Sono riportate l'interpolazione per il pluviometro di Frassinoro (P), oltre alla GMWL (Craig, 1961) e la NIML (Longinelli e Selmo, 2003).

didata inglese

valore di $\delta^{18}\text{O}$ rispetto alle precipitazioni e lo spostamento delle coppie $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ al di sotto delle linee meteoriche.

Ciò è in accordo con la procedura di weighting basata sul calcolo della evapotraspirazione di Thorntwaite and Mater (1957), e suggerisce come l'alimentazione delle falde che ricaricano le sorgenti SL e SV avvenga sostanzialmente nei mesi caratterizzati da eventi di precipitazione intensi e temperature sufficientemente basse da non innescare l'evapotraspirazione, ovvero il periodo compreso tra il tardo Autunno e la Primavera.

5. Conclusioni

I dati isotopici delle acque meteoriche (1 pluviometro) e sotterranee (2 sorgenti) campionati tra Gennaio 2014 e Ottobre 2015 nel medio-alto Appennino settentrionale, hanno permesso di verificare che nella definizione degli areali di ricarica delle acque sorgive le relazioni $\delta^{18}\text{O}$ -quota ricavate da pluviometri campionatori derivanti dal semplice utilizzo di dati isotopici relativi alle precipitazioni meteoriche hanno scarsa rappresentatività. Dalla comparazione dei valori isotopici, emerge, infatti, una negativizzazione importante del valore di $\delta^{18}\text{O}$, che indurrebbe a identificare altitudini medie di ricarica ampiamente superiori a quelle dei rispettivi bacini idrogeologici delle sorgenti considerate. Da una stima mensile dell'evapotraspirazione e della precipitazione efficace, è stato quantificato come solo il 50.6% delle precipitazioni raccolte al pluviometro di Frassinoro nel periodo Gennaio 2014 – Ottobre 2015 fossero effettivamente disponibili per la successiva infiltrazione nel sottosuolo e il deflusso superficiale. Le procedure di weighting del dato isotopico campionato al pluviometro applicate con la precipitazione efficace hanno evidenziato come il $\delta^{18}\text{O}$ in input all'acquifero sia

decisamente più negativo ($M_{\text{WER}} = -9,61\%$) rispetto a quello ottenuto con la media aritmetica ($A_R = -8,07\%$) o ponderata alle precipitazioni totali ($M_{\text{WR}} = -8,18\%$) in quanto le precipitazioni nei periodi caratterizzati da temperature più elevate (da Maggio a settembre compreso), ovvero quelle con valori di $\delta^{18}\text{O}$ più positivi, vengono re-immesse in atmosfera tramite evapotraspirazione. Ciononostante, l'effetto di negativizzazione del $\delta^{18}\text{O}$ dovuto all'evapotraspirazione non è sufficiente a spiegare i valori ancora più impoveriti in isotopi pesanti che si dovrebbero riscontrare alla quota del pluviometro di Frassinoro.

È dunque inopportuno, nel caso si debbano definire gli areali di ricarica di sorgenti in Appennino settentrionale, utilizzare relazioni da bibliografia ottenute con medie o medie ponderate alla precipitazione totale di valori isotopici da pluviometri, anche nel caso in cui venga presa in considerazione la precipitazione efficace. È invece preferibile, nel caso in cui siano disponibili piccole sorgenti il cui bacino di alimentazione sia ridotto e ben delimitato (come nel caso di sorgenti alimentate da piccoli depositi di versante), utilizzare i dati isotopici di queste acque sorgive per la costruzione della relazione $\delta^{18}\text{O}$ – quota.

Bibliografia

Bortolami, G.C., Ricci, B., Susella, G.F., Zuppi G.M. (1978). Isotope hydrology of the Val Corsaglia, Maritime Alps, Piedmont, Italy. In: Isotope Hydrology, IAEA Vienna, 1, pp. 327-348.

Celico, P. (1986) Prospezioni idrogeologiche, Vol. I. Pitagora, Napoli, Italy, 735 pp.

Cervi, F., Borgatti, L., Martinelli, G., Ronchetti, F. (2014) Evidence of deep-water inflow in a tectonic window of the northern Apennines (Italy). *Environmental Earth*

Sciences, 72(7), pp. 2389-2409.

Cervi, F., Corsini, A., Doveri, M., Mussi, M., Ronchetti, F., Tazioli, A. (2015) Characterizing the recharge of fractured aquifers: a case study in a flysch rock mass of the northern Apennines (Italy). In *Engineering Geology for Society and Territory*-Volume 3, pp. 563-567.

Cervi, F., Ronchetti, F., Martinelli, G., Bogaard, T. A., Corsini, A. (2012) Origin and assessment of deep groundwater inflow in the Ca' Lita landslide using hydrochemistry and in situ monitoring. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, pp. 4205-4221.

Civita, M. (2005) *Idrogeologia applicata e ambientale*, Casa Editrice Ambrosiana, Milano, 794 pp.

Coleman, M.L., Shepherd, T.J., Durham, J.J., Rouse, J.E., Moore, G.R. (1982) Reduction of water with zinc for hydrogen isotope analysis. *Analytical Chemistry*, 54, 6, pp. 993-995.

Corsini, A., Cervi, F., Ronchetti, F. (2009) Weight of evidence and artificial neural networks for potential groundwater spring mapping: an application to the Mt. Modino area (Northern Apennines, Italy). *Geomorphology*, 111(1-2), pp. 79-87.

Craig, H. (1961) Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, pp. 1702-1703.

Doveri, M., Menichini, M., Scozzari, A. (2016) Protection of groundwater resources: worldwide regulations, scientific approaches and case study. In: Scozzari A, Dotsika E (Eds): "Threats to the quality of groundwater resources: prevention and control" – The handbook of environmental chemistry, pp. 13-30, ISSN: 1867-979X

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*, 6, pp. 2255 – 2277.

Epstein, S., Mayeda, T. (1953) Variation

- of O 18 content of waters from natural sources. *Geochimica et cosmochimica acta*, 4 (5), pp. 213-224.
- Gat, J.R. (1995) The relationship between the isotopic composition of precipitation, surface runoff and groundwater for semiarid and arid zones. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences*, 232, pp. 409-416.
- Gibson, J. J., Edwards, T. W. D., Birks, S. J., St Amour, N. A., Buhay, W. M., McEachern, P., Wolfe, B. B., and Peters, D. L. (2005) Progress in isotope tracer hydrology in Canada. *Hydrological Processes*, 19, pp. 303-327.
- Gonfiantini, R., Roche, M.-A., Olivry, J.-C., Fontes, J.-C., Zuppi, G.M. (2001) The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology*, 181, pp. 147-167.
- Goodison, B. E., Louie P.Y.T., Yang D. (1997) The WMO solid precipitation measurement intercomparison. *World Meteorological Organization-Publications-WMO TD*, pp. 65-70.
- Iacumin, P., Venturelli, G., Selmo, E. (2009) Isotopic features of rivers and groundwater of the Parma Province (northern Italy) and their relationships with precipitation. *Journal of Geochemical Exploration*, 102, pp. 56-62.
- Kendall, C., McDonnell, J. J. (2012). *Isotope tracers in catchment hydrology*. Elsevier.
- Longinelli, A., Selmo, E. (2003) Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map. *Journal of Hydrology*, 270, pp. 75-88.
- Martinelli, G., Chahoud, A., Dadomo, A., Fava, A. (2014) Isotopic features of Emilia-Romagna region (North Italy) groundwaters: Environmental and climatological implications. *Journal of Hydrology*, 519(B), pp. 1928-1938.
- Menichini, M., Da Prato, S., Doveri, M., Ellero, A., Lelli, M., Masetti, G., Nisi, B., Raco, B. (2015) An integrated methodology to define Protection Zones for groundwater based drinking water sources: an example from the Tuscany Region, Italy. *Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater*, 4(1), pp. 21 – 27.
- Mussi M, Leone G., Nardi I. (1998). Isotopic geochemistry of natural waters from the Alpi Apuane-Garfagnana area, Northern Tuscany, Italy. *Mineralogica Petrografica Acta*, 16, pp. 163-178
- Mussi, M., Nanni, T., Tazioli, A., Vivalda, P.M. (2016) The Mt Conero limestone ridge: the contribution of stable isotopes in the identification of the recharge area of aquifers. *Italian Journal of Geosciences*, in stampa.
- Nanni, T., Tazioli, A., Vivalda, P.M. (2013) Problems in the application of environmental isotopes to the hydrogeology of high mountain aquifers. *Aqua Mundi*, 4(1), pp. 55-66.
- Stichler, W., Rauert, W., Martinec, J. (1981) Environmental isotope studies of Alpine snowpack. *Nordic Hydrology*, 12, pp.297-308.
- Tazioli, A., Mosca, M., Tazioli, G.S. (2007) Location of recharge area of Gorgovivo Spring, Central Italy. A contribution from Isotope Hydrology. *Int. Symp. "Advances in Isotope Hydrology and its role in sustainable Water resources Management (IHS-2007)"*, 2, pp. 27-35.
- Tazioli, A., Conversini, P., Peccerillo, A. (2012) Hydrogeological and geochemical characterisation of the Rock of Orvieto. *Environmental Earth Sciences*, 66, pp. 55-65.
- Tekleab, S., Wenninger J., Uhlenbrook, S. (2014) Characterisation of stable isotopes to identify residence times and runoff components in two meso-scale catchments in the Abay/Upper Blue Nile basin, Ethiopia, *Hydrology and Earth System Science*, 18, pp. 2415-2431.
- Thorntwaite, C.W., Mather, J.R. (1957) Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Publication in Climatology Drexel Institute of Technology*, 10, pp. 185-311.
- Vespasiano, G., Apollaro, C., De Rosa, R., Muto, F., Larosa, S., Fiebig, J., Mulch A., Marini, L. (2015). The Small Spring Method (SSM) for the definition of stable isotope-elevation relationships in Northern Calabria (Southern Italy). *Applied Geochemistry*, 63, pp. 333-346.