

MATIA MENICINI\*, LINDA FRANCESCHI\*, ROBERTO GIANNECCHINI\*\*, MARCO DOVERI\*

## L'ACQUA SULLE ALPI APUANE: RISORSA PREGIATA E FATTORE DI RISCHIO

**Riassunto** — Negli ultimi anni, le risorse idriche sotterranee stanno acquisendo sempre più importanza a seguito della continua crescita demografica e quindi dell'aumento della richiesta di acqua potabile. In questo contesto, le Alpi Apuane risultano di particolare interesse grazie alla presenza di ingenti risorse idriche ospitate in acquiferi carsici e caratterizzate da una buona qualità. Molte sorgenti che scaturiscono nell'area apuana vengono da tempo captate per uso idropotabile, tuttavia la loro tutela è messa fortemente a rischio anche dalla presenza di numerose attività antropiche impattanti, quali le aree estrattive, nonché dai cambiamenti climatici in atto. Per una corretta gestione e salvaguardia di tale preziosa risorsa è necessario disporre di elevate conoscenze del sistema ambiente che possono essere raggiunte solo attraverso studi integrati multidisciplinari. Questo articolo vuole offrire una breve panoramica delle conoscenze attuali acquisite mediante l'utilizzo di metodologie geologiche, idrogeologiche e geochimiche isotopiche. Gli studi effettuati hanno permesso di ottenere già importanti risultati: individuare i diversi sistemi acquiferi che alimentano le principali sorgenti delle Alpi Apuane; comprendere le condizioni idrodinamiche degli acquiferi e di conseguenza le loro condizioni di vulnerabilità sia all'inquinamento che ai cambiamenti climatici; individuare le aree di alimentazione delle principali sorgenti con il fine di definirne le zone di protezione. I cambiamenti climatici attesi, fra i quali l'aumento della frequenza ed intensità degli eventi estremi, avrà inevitabilmente conseguenze anche sull'area apuana e sulle sue risorse, con impatto sull'incremento del dissesto idrogeologico e sulla potenziale diminuzione delle risorse idriche. Ciò rende sempre più indifferibile l'aumento della conoscenza sul territorio, sulle sue risorse e sulle sue esigenze, e in secondo luogo una presa di coscienza definitiva da parte della popolazione e soprattutto degli enti che ne sono preposti alla gestione.

**Abstract** – In recent years, groundwater is becoming increasingly important as a result of the continuous population growth and the consequent increase in drinking water. In this context, the Apuan Alps are of particular interest thanks to the presence of large, good quality water resources hosted in karst aquifers. Many springs in the Apuan area have long been captured for drinking water use, but their protection is also strongly jeopardised by the presence of numerous anthropogenic activities, such as mining, as well as climate change. In order to correctly manage and safeguard this precious resource, an in-depth knowledge of the environmental system is necessary, which can only be acquired through integrated multidisciplinary studies. This article aims to provide a brief overview of the current knowledge acquired by means of geological, hydrogeological and isotopic geochemical methodologies. The studies carried out have already obtained important results: identification of the different aquifer systems feeding the main springs of the Apuan Alps; an understanding of the hydrodynamic conditions of the aquifers and consequently their vulnerability to both pollution and climate change; identification of the feeding areas of the main springs with the aim of defining their protection zones. The expected climate changes, among which the increase in the frequency and intensity of extreme events, will inevitably have effects on the Apuan area and its resources too, with an impact on the increase in hydrogeological instability and potential decrease in water resources. This makes the increase in knowledge about the territory, its resources and its needs more and more urgent. In addition, it is necessary to raise awareness among the population and, above all, the authorities responsible for its management.

**Key words** – Apuan Alps, karst aquifers, karst springs, groundwater, hydrodynamic, isotopes

### Introduzione

A seguito di un'inarrestabile crescita demografica a livello globale, che ha portato anche ad un estremo sviluppo della produzione industriale e delle attività agricole, si è avuto un forte incremento della richiesta di acqua potabile e un conseguente sensibile aumento nello sfruttamento delle risorse idriche superficiali e sotterranee (quasi triplicato negli ultimi 50 anni).

Attualmente le acque sotterranee sopperiscono al fabbisogno idrico per uso idropotabile di circa il 70% della popolazione, mentre per uso industriale ed agricolo contribuiscono per il 40% ed il 38%, rispettivamente (WBCSD, 2006; Siebert *et alii*, 2010). Questo continuo aumento della domanda idrica sta causando sempre più problemi sia a livello quantitativo che qualitativo delle risorse idriche sotterranee, dovuti non solo ad un loro sovrasfruttamento, ma

\*) Istituto di Geoscienze e Georisorse – Consiglio Nazionale delle Ricerche – via G. Moruzzi, 1 – 56124 Pisa.

\*\*) Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Pisa – via S. Maria, 53 – 56126 Pisa.

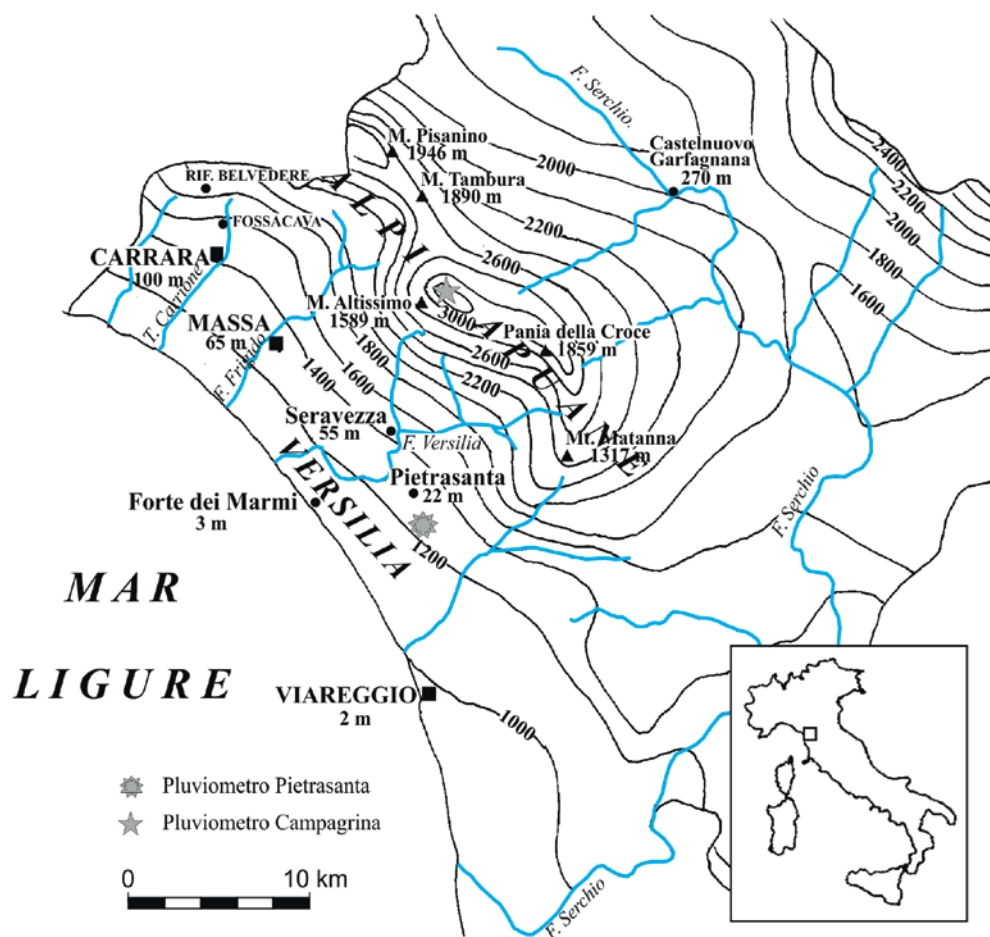


Fig. 1 – Carta delle isoiete medie annue delle Alpi Apuane (da Baldacci et alii, 1993, mod., ricostruita sulla banca dati 1951-1980). Ad ogni toponimo è associata la relativa quota in metri sopra il livello medio marino

anche a processi di contaminazione ed inquinamento ad esso correlati, ad esempio il fenomeno dell'ingressione marina. Queste problematiche trovano la loro massima espressione nelle zone maggiormente antropizzate come le pianure alluvionali e le pianure costiere (Prinz e Malik, 2003; Zhu e Balke, 2008). Gli acquiferi costieri risultano, infatti, particolarmente vulnerabili al fenomeno dell'intrusione marina che può essere amplificato non solo dal sovrasfruttamento della risorsa, ma anche per gli effetti legati ai cambiamenti climatici (Menichini e Doveri 2020). In questo contesto gli acquiferi in roccia, come quelli che si ritrovano nelle Alpi Apuane, costituiscono un'importante alternativa per l'approvvigionamento idrico in aree particolarmente idro-esigenti. In aggiunta, le Alpi Apuane, per la loro collocazione geografica e per le loro caratteristiche fisiografiche e climatiche, costituiscono un'area ricca di precipitazioni, che contribuiscono quindi a una significativa ricarica di questi acquiferi particolarmente permeabili. Molte sorgenti che scaturiscono nell'area apuana vengono da tempo captate per uso idropotabile, tuttavia la loro tutela è messa fortemente a rischio anche dalla presenza di numerose attività antropiche impattanti, quali le aree estrattive dove ancora oggi viene estratto principalmente il marmo (Baroni et alii, 2001;

Doveri et alii, 2013). D'altra parte, l'abbondanza di precipitazioni dell'area apuana è anche associata alla frequenza di eventi piovosi molto intensi, che spesso hanno portato a conseguenze importanti sul territorio e sulla popolazione (D'Amato Avanzi e Giannecchini, 2003; 2006; Giannecchini e D'Amato Avanzi, 2012). A tal proposito, effettuare studi approfonditi sulle sorgenti e sui sistemi acquiferi delle Alpi Apuane risulta di particolare importanza per una buona gestione futura della risorsa idrica e per la sua tutela.

#### Caratteristiche climatiche dell'area apuana

Le peculiarità climatiche delle Alpi Apuane sono state descritte da vari autori, tra cui Baldacci et alii (1993), Rapetti e Rapetti (1996) e Rapetti (2017-2019). Per effetto della collocazione geografica e delle caratteristiche fisiografiche, esse godono di un microclima particolare, che le porta a ricevere abbondanti precipitazioni, tra le più copiose in Italia, con valori medi annui intorno a oltre 2500-3000 mm (fig.1, costruita su banca dati 1951-1980).

I grafici di fig. 2 mostrano la distribuzione delle precipitazioni medie mensili in due stazioni pluviometriche.

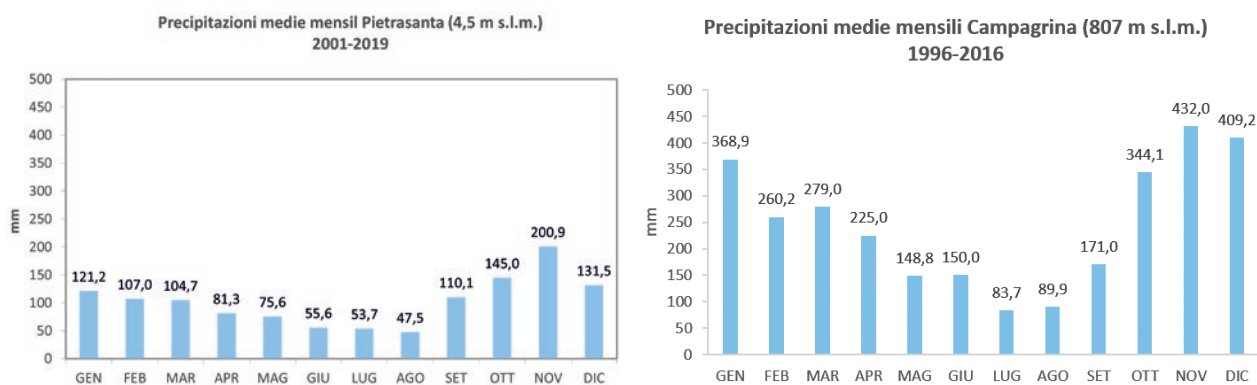


Fig. 2 – Precipitazioni medie mensili nelle stazioni pluviometriche di Pietrasanta (a sinistra) e Campagrina (a destra) (banca dati SIR – Regione Toscana)

metriche di riferimento per la zona, poste a quote sensibilmente differenti (fig. 1): Pietrasanta (4,5 m s.l.m.) e Campagrina (807 m s.l.m.), quest'ultima una delle stazioni più in quota dell'area apuana. Esse registrano una precipitazione media annua rispettivamente di 1236 mm (periodo 2001-2019) e 2962 mm (periodo 1996-2016).

I grafici, ricostruiti sulla base di serie dati più recenti, concordano ancora con la carta di fig. 1, che si riferisce a un periodo di osservazione precedente (1951-1980), anche se si osserva una certa riduzione delle precipitazioni in quota.

Per le sue caratteristiche, già accennate in precedenza, quest'area è frequentemente esposta a nubifragi di una certa intensità, talvolta piuttosto elevata, come ha ricordato l'evento noto come Alluvione della Versilia del 19 giugno 1996 (Giannecchini, 1998; 2003; D'Amato Avanzi *et alii*, 2004).

Una approfondita indagine storica di Giannecchini e D'Amato Avanzi (2012) ha evidenziato la frequenza di eventi meteorici con conseguenze in termini di frane, alluvionamenti e vittime nel comprensorio apuo-versiliese. Per il periodo 1328-2009 gli autori hanno censito almeno 186 eventi intensi (di cui almeno 30 hanno coinvolto gran parte dell'intera area apuana), provocando la morte di 34 persone. La distribuzione stagionale degli eventi calamitosi evidenzia che nessun periodo dell'anno è a pericolosità nulla, ma che certamente la stagione autunnale, contraddistinta dall'arrivo delle perturbazioni di origine atlantica e da un più marcato contrasto termico, è quella con le maggiori probabilità (54,3% dei casi) che si verificano eventi con danni (fig. 3).

Ad ogni modo, grazie alla elevata permeabilità di molte delle rocce che affiorano nell'area apuana, le precipitazioni che cadono durante gli stessi eventi intensi sono in parte assorbite dai sistemi acquiferi, con ripercussioni positive sui volumi delle riserve idriche sotterranee, che si manifestano in consistenti aumenti della portata delle sorgenti. Ciò fu analizzato anche in seguito dell'Alluvione della Versilia, dove, pur a fronte di copiose precipitazioni estremamente concentrate (dell'ordine dei 500 mm in circa 12 ore), gli speleologi della Federazione Speleologica Italiana ravvisarono significativi aumenti di portata in

diverse sorgenti della zona (Giannecchini, 1998). Ciò dimostra come, in una regione con le caratteristiche come quelle delle Alpi Apuane, i potenziali idrici dei serbatoi acquiferi siano considerevoli, pur in presenza di eventi particolarmente concentrati, che tendono quindi a favorire il ruscellamento superficiale.

In generale, come si osserva anche dai grafici di fig. 2, la stagione autunnale è quella in cui le precipitazioni iniziano ad incrementare, dando l'avvio anche al periodo di ricarica degli acquiferi, che si protrae, pur nella variabilità meteorologica, fino a tutto l'inverno e talvolta anche in parte alla primavera.

#### Inquadramento geologico e idrogeologico

Le Alpi Apuane rappresentano la principale finestra tettonica dell'Appennino Settentrionale, dove affiorano le unità metamorfiche più profonde dell'orogene (fig. 4), originatesi in seguito a due principali fasi tettoniche: la prima di tipo collisionale (Eocene-Miocene inf.), con messa in posto di Unità Liguri e della Falda Toscana al di sopra dell'Unità di Massa e dell'Unità delle Alpi Apuane, ed una seconda fase di tipo distensivo che, a partire dal Tortoniano, ne determina l'esumazione (Carmignani e Kligfield, 1990; Carmignani *et alii*, 2010). L'Unità delle Alpi Apuane

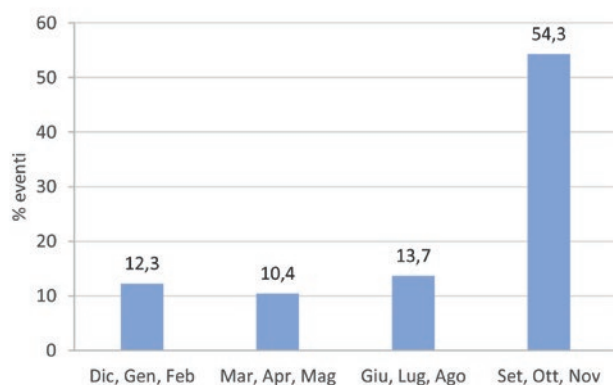


Fig. 3 – Percentuale degli eventi calamitosi nell'area apuo-versiliese in riferimento alla stagionalità (rielaborazione di dati in Giannecchini e D'Amato Avanzi, 2012)

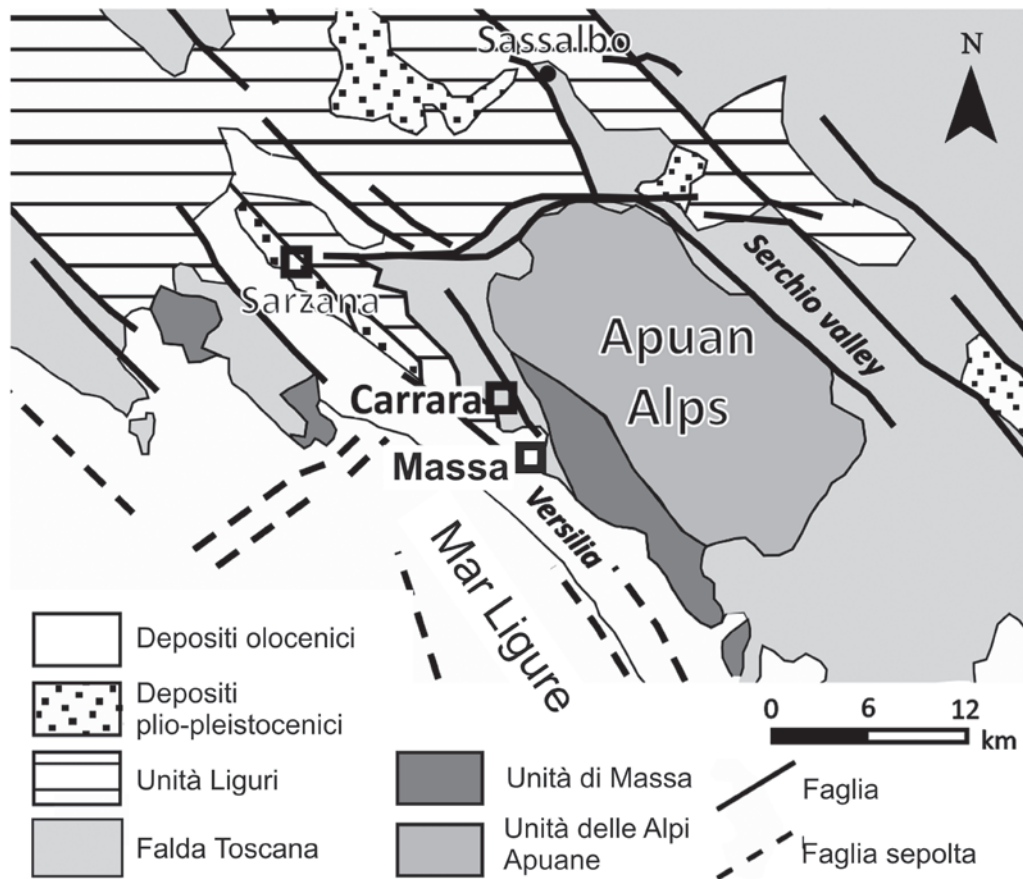


Fig. 4 – Carta delle unità tettoniche delle Alpi Apuane

(o “Autoctono” *Auctt.*) è formata da un basamento paleozoico scistoso filladico (Cambriano) sul quale poggia in discordanza una successione metasedimentaria mesozoica (Trias sup.-Oligocene sup.) costituita da rocce metamorfiche in facies scisti verdi (Carmignani *et alii*, 1978, 2010). A questa unità appartengono metaconglomerati poligenici, metarenarie calcaree e dolomie che costituiscono la formazione di Vinca, seguita dai Grezzoni (dolomie e marmi dolomitici rappresentanti la piattaforma carbonatica tardo-triassica) e da una successione di marmi, metacalcari e quarziti (Marmi dolomitici, Marmo Zebrino, Calcari selciferi, Calcescisti e Diaspri). Tale successione si conclude con i metacalcari a liste e noduli di selce, calcescisti e metarenarie quarzo-feldspatiche (Calcari selciferi a Entrochi, Cipollini, Scisti sericitici e Pseudomacigno), che rappresentano i depositi pelagici e di avanfossa (Carmignani *et alii*, 2010). L’Unità di Massa è formata da un basamento simile a quello dell’Unità delle Alpi Apuane, sul quale poggiano in discordanza rocce sedimentarie triassiche e metavulcaniti (Trias medio). L’unità è contraddistinta da un grado metamorfico leggermente più elevato, tipico di una facies metamorfica a scisti verdi di alta pressione ed è costituita da metaconglomerati quarzosi associati a metarenarie, metasiltiti e quarziti seguiti da livelli prevalentemente carbonatici, talvolta intercalati con metabasiti alcaline (Carmignani *et alii*, 2010; Patacca *et alii*, 2011). Sovrapposta a queste due

unità si trova la Falda Toscana che rappresenta l’unità non metamorfica del Dominio Toscano ed è formata da una sequenza stratigrafica costituita per lo più da carbonati (Calcare cavernoso e breccie poligeniche con alla base le Anidriti di Burano, Calcari e Marne a Rhaetavicula Contorta, Calcare massiccio, Calcare selcifero, Maiolica, Scaglia toscana) di età comprese tra il Triassico superiore e l’Oligocene. La successione si chiude con le facies torbiditiche arenacee che costituiscono la formazione del Macigno (Oligocene sup.-Miocene inf.).

Molte delle formazioni carbonatiche citate contengono importanti sistemi acquiferi ricchi di ingenti risorse idriche (fig. 5), sviluppatasi grazie alla permeabilità medio-alta delle rocce, all’elevato coefficiente di infiltrazione efficace (in alcuni casi raggiunge il 75%) e all’elevata piovosità (oltre i 2000-3000 mm/anno) caratteristica dell’area apuana (Civita *et alii*, 1991; Baldacci *et alii*, 1993; Forti *et alii*, 1994; Doveri *et alii*, 2013).

Il complesso acquifero principale è rappresentato dalle formazioni dei Grezzoni, Marmi e Marmi dolomitici appartenenti all’Unità delle Alpi Apuane, caratterizzate da una permeabilità secondaria elevata, localmente molto elevata, dovuta a fenomeni di fessurazione e carsismo. Tale complesso è delimitato inferiormente dal substrato impermeabile costituito da Filladi e Porfiroidi. Un secondo complesso acquifero si sviluppa all’interno della successione

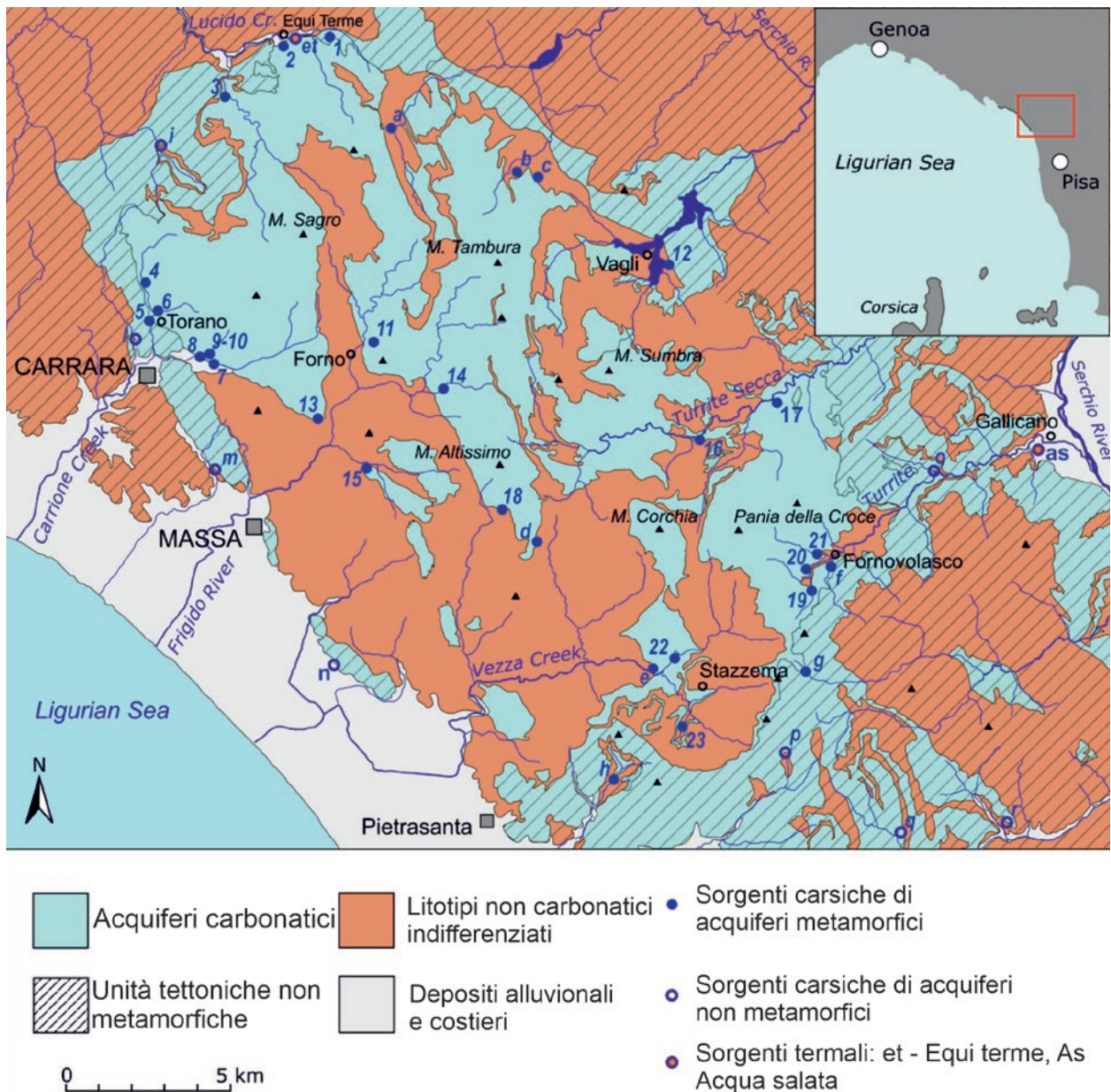


Fig. 5 – Carta idrogeologica delle Alpi Apuane con la distribuzione degli acquiferi carbonatici e delle principali sorgenti (portata maggiore di 10-20 L/s). Da Doveri et alii (2019), modificata

carbonatica della Falda Toscana ed è caratterizzato da una permeabilità relativamente più bassa rispetto alla corrispondente serie metamorfica, ma presenta una maggiore fratturazione che porta ad una circolazione idrica sotterranea più dispersa (Conti *et alii*, 2005; Piccini, 2007; Doveri *et alii*, 2013). I due complessi acquiferi, che non sempre sono separati ed indipendenti tra loro, sono drenati da numerose sorgenti che bordano il massiccio apuano e che si concentrano nella fascia altimetrica tra 200 e 300 m s.l.m. sul versante rivolto verso la costa e nella fascia altimetrica tra 500 e 600 m s.l.m. sul versante interno rivolto verso NE (Menichini *et alii*, 2016). Molte di queste sorgenti, caratterizzate da portate medie piuttosto elevate che superano i 100 L/s, vengono captate ad uso idropotabile ed alimentano le reti idriche dei centri abitati delle Alpi Apuane e delle aree circostanti (Doveri *et alii*, 2019).

### Le principali sorgenti delle Alpi Apuane

Gli acquiferi carbonatici delle Alpi Apuane alimentano oltre ottanta sorgenti spesso localizzate in corrispondenza dei contatti tra l'acquifero carbonatico e i litotipi a bassa permeabilità e caratterizzate da un regime tipicamente carsico (molto irregolare) con portate medie comprese tra i 10 ed i 1600 L/s. La temperatura media delle sorgenti è generalmente compresa tra 8,4 °C (sorgente Pollaccia, Isola Santa, LU) e 14,4 °C (sorgente Cartaro, Canevara, MS); tuttavia alcune scaturigini, localizzate lungo le faglie normali che delimitano la valle del Serchio e caratterizzate da un regime di portate piuttosto regolare, mostrano temperature più elevate comprese tra i 20 ed i 30 °C (sorgenti Prà di Lama, Acqua Salata e Acqua Sciocca). Temperature così elevate sono dovute al fatto che tali sorgenti vengono alimentate da flussi idrici più lenti

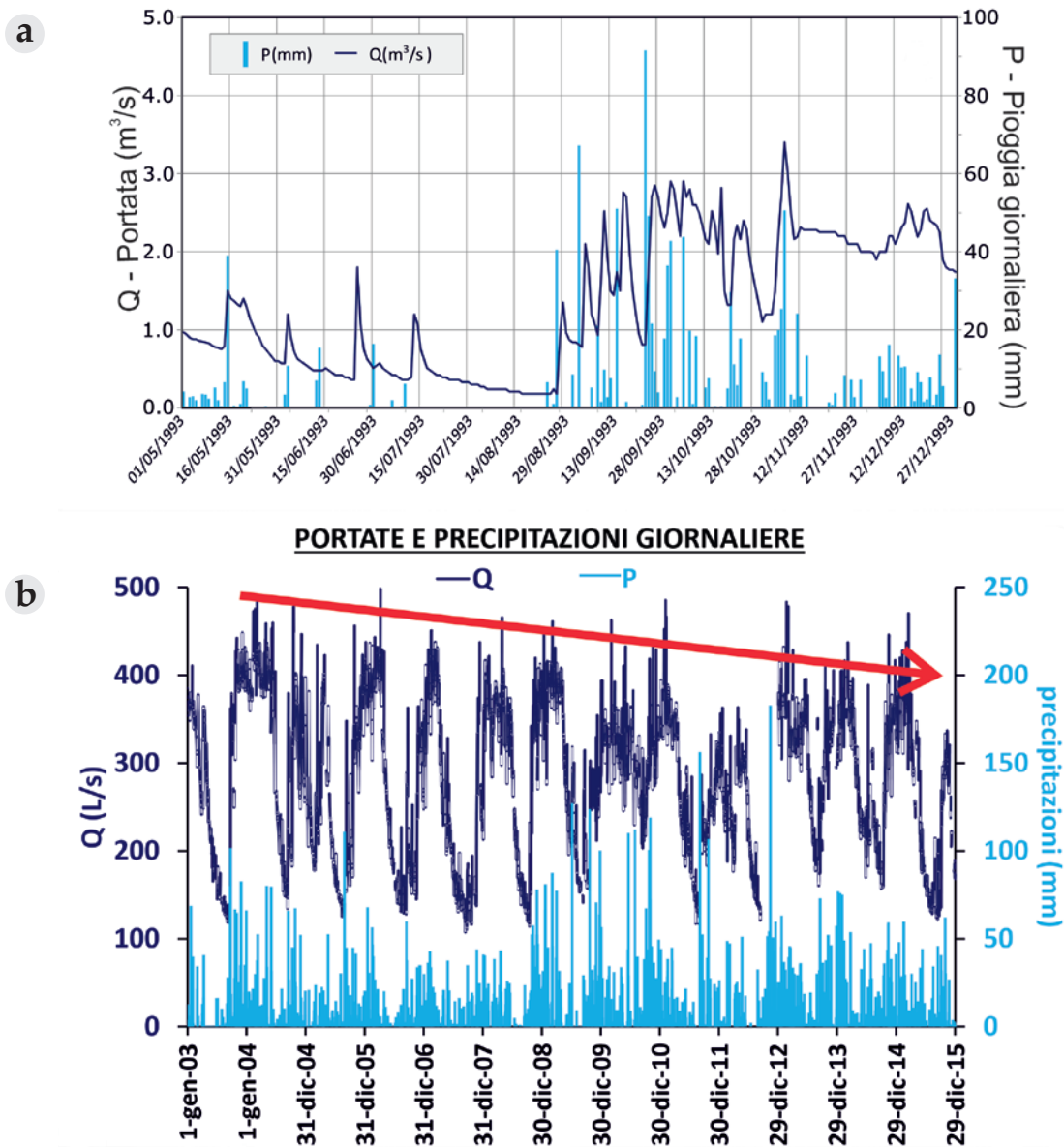


Fig. 6 – a) Idrogramma relativo alla sorgente Forno (Doveri et alii, 2019); b) Idrogramma relativo alla sorgente Cartaro. La freccia rossa indica la tendenza alla diminuzione delle portate massime della sorgente nel tempo (Doveri et alii, 2017)

che circolano a profondità molto maggiori (Civita et alii, 1991; Piccini, 2007; Doveri et alii, 2013; Menichini et alii, 2016; Doveri et alii, 2019). Queste sorgenti, inoltre, mostrano una conducibilità elettrica elevata (7000-7500  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a 25 °C), mentre la maggior parte delle sorgenti carsiche presenti nell'area apuana è caratterizzata da valori compresi tra 100 e 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Menichini et alii, 2016; Doveri et alii, 2019; Ghezzi et alii, 2019; Natali et alii, 2019).

Tra le sorgenti più importanti dell'area apuana ci sono quelle di Forno, Pollaccia, Buca di Equi e Cartaro, che drenano il complesso acquifero carbonatico metamorfico e sono caratterizzate da portate molto elevate e variabili nel tempo (da 500 a 1600 L/s) (tab.1). La sorgente di Forno si trova a monte della città di Massa ad una quota di 230 m s.l.m. ed è quella con portate medie più elevate (1600 L/s); ha un bacino di alimentazione molto esteso (circa 35 km<sup>2</sup>), che va oltre gli spartiacque superficiali del

bacino del fiume Frigido in cui ricade (Menichini et alii, 2016). L'idrogramma (fig. 6a) mostra che tale sorgente è caratterizzata da significative variazioni di portata e da tempi di risposta alle precipitazioni molto brevi, suggerendo la presenza di numerosi condotti carsici molto sviluppati all'interno della zona satura. La complessità del sistema acquifero che alimenta tale sorgente è testimoniata dalle curve di esaurimento caratterizzate da numerose oscillazioni, che possono essere dovute a tempi di arrivo leggermente diversi da parte di sistemi di alimentazione indipendenti tra loro. L'esistenza di sistemi diversi e distinti può essere verosimilmente imputabile alla complessità geometrica del sistema acquifero (Forti et alii, 1994; Menichini et alii, 2016; Doveri et alii, 2019). Le sorgenti Pollaccia e Buca di Equi, che si trovano rispettivamente alle quote di 545 e 257 m s.l.m. nei versanti interni delle Alpi Apuane, mostrano portate medie inferiori rispetto alla sorgente Forno, tuttavia

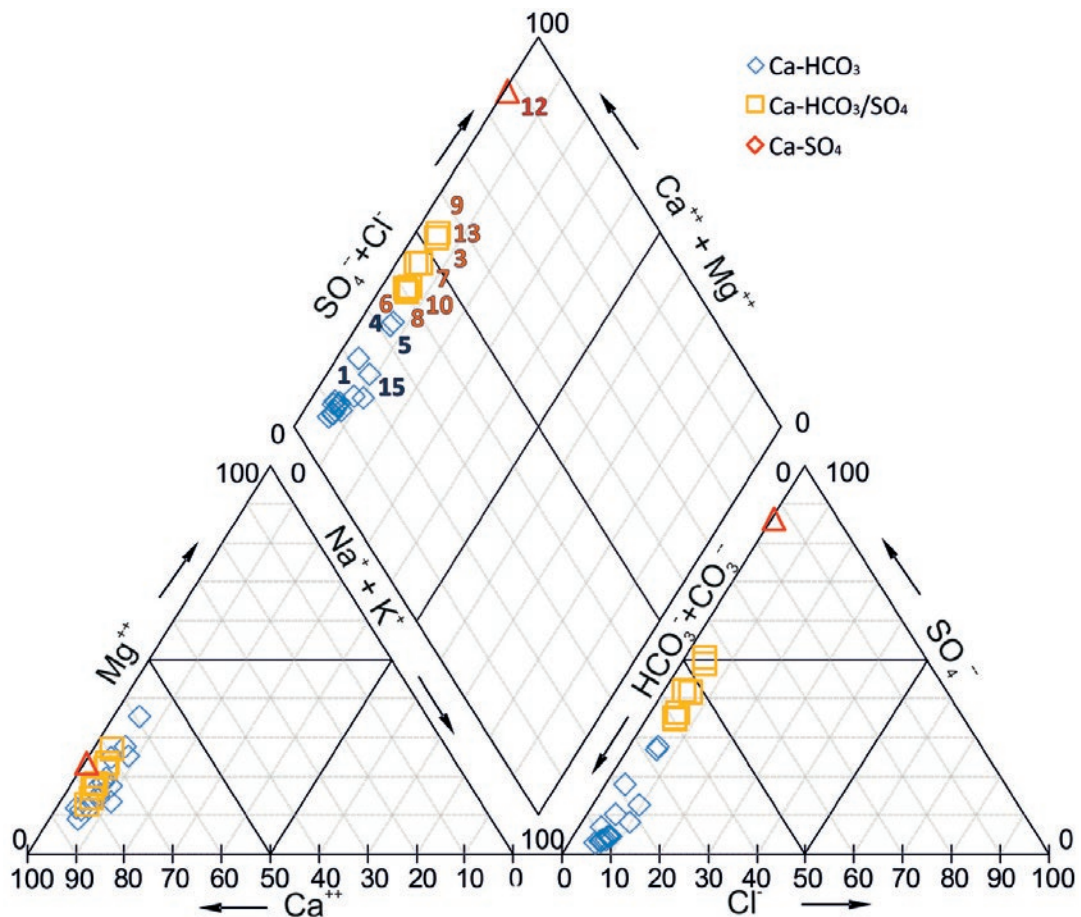


Fig. 7 – Diagramma di classificazione delle acque di Piper (Doveri et alii, 2019 – mod.)

sono caratterizzate da una maggiore variabilità (tab. 1). (Piccini et alii, 2013; Poggetti et alii, 2015; Menichini et alii, 2016). La sorgente Cartaro (205 m s.l.m.), anch'essa all'interno del bacino del fiume Frigido, è caratterizzata da portate medie di circa 400 L/s con regime tipicamente carsico caratterizzato da repentini aumenti di portata durante gli eventi meteorici e tempi di risposta alle precipitazioni molto brevi (fig. 6b) (Menichini et alii, 2016; Doveri et alii, 2017). Inoltre, analizzando l'idrogramma in fig. 6b, è stata osservata una graduale diminuzione nel tempo delle portate massime (indicata nel grafico di fig. 6 con la freccia rossa) registrate durante i periodi piovosi verosimilmente associata ad una riduzione della ricarica da parte delle precipitazioni. Peraltro, non si osserva un analogo andamento per le portate minime registrate alla fine dei periodi secchi, significando un'azione di compensazione da parte dell'acquifero utilizzando le riserve regolatrici (Doveri et alii, 2017). Tale comportamento indica che la sorgente del Cartaro sembra essere particolarmente sensibile ai cambiamenti climatici (Doveri et alii, 2017). Questo testimonia come anche le risorse idriche sotterranee delle Alpi Apuane, che rivestono un ruolo strategico per l'approvvigionamento idrico della zona, inizino a risentire dei cambiamenti climatici in atto.

### Composizione chimica delle acque

I numerosi studi condotti nell'area apuana hanno permesso di ricavare importanti informazioni anche dal punto di vista della composizione chimica delle acque recapitate alle varie sorgenti. Analizzando la concentrazione degli elementi maggiori disciolti e riportando i risultati sul classico diagramma di classificazione di Piper, sono state identificate 3 principali facies geochimiche: Ca-HCO<sub>3</sub>, Ca-SO<sub>4</sub> e Ca-HCO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub> (fig. 7). Buona parte delle sorgenti dell'area, tra cui Pollaccia, Forno e Buca di Equi, appartengono alla facies bicarbonato-calcica (Ca-HCO<sub>3</sub>), indicativa di una circolazione idrica all'interno di acquiferi carbonatici ad elevata permeabilità, che in questo caso sono rappresentati principalmente dai Grezzoni, dai Marmi e dai Marmi dolomitici appartenenti all'Unità delle Alpi Apuane. Le sorgenti che drenano i sistemi acquiferi che si sviluppano principalmente nei litotipi dolomitici possono mostrare un maggiore rapporto Mg/Ca, la cui variazione dipende dal grado e dal tempo di interazione tra le acque e questo tipo di rocce. L'acquifero carbonatico metamorfico (Grezzoni, Marmi e Marmi dolomitici) viene drenato anche da numerose sorgenti appartenenti ad una facies bicarbonato-solfato-calcica (Ca-HCO<sub>3</sub>/SO<sub>4</sub>), come

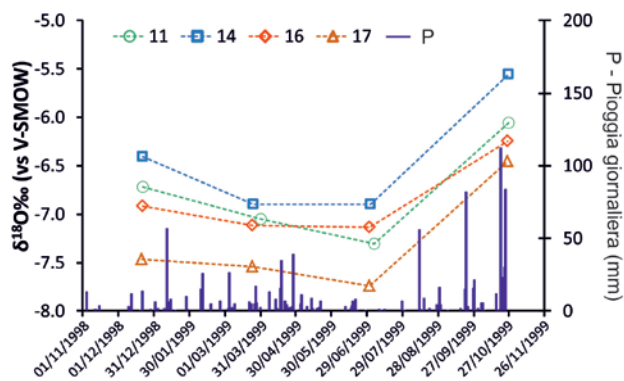


Fig. 8 – Variazione della composizione isotopica delle sorgenti Forno (A), Renara (B), Pollaccia (C) e Fontanaccio (D) confrontata con le piogge giornaliere (P) (Doveri et alii, 2019 – mod.)

per esempio le sorgenti Cartaro, Martana, Gorgoglio e Ratto. Esse, pur essendo alimentate dallo stesso sistema acquifero delle sorgenti bicarbonato-calciche, mostrano una conducibilità elettrica più elevata (tra 300 e 375  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a fronte di valori compresi tra 200 e 300  $\mu\text{S}/\text{cm}$  delle prime) ed un maggiore contenuto in solfati (Menichini et alii, 2016; Doveri et alii, 2019). La concentrazione in  $\text{SO}_4^{2-}$  più elevata è principalmente dovuta ad un'interazione delle acque con le mineralizzazioni a solfuri (pirite-barite ed ossidi di ferro) che nell'area apuana sono particolarmente diffuse (D'Orazio et alii, 2015; Perotti et alii, 2018; Ghezzi et alii, 2019; Natali et alii, 2019; Nigro et alii, 2020). La facies solfato-calcica ( $\text{Ca-SO}_4$ ) è invece indicativa di interazioni con rocce carbonatico-evaporitiche. Infatti, le sorgenti delle Alpi Apuane che appartengono a tale facies sono spesso alimentate da circuiti idrici che si sviluppano in profondità e che permettono un'interazione delle acque con i livelli evaporitici (Evaporiti di Burano) posti alla base della formazione del Calcere cavernoso. Tra le sorgenti appartenenti alla facies solfato-calcica si trovano quella dell'Aiarone, quella di Porta e, nella zona meridionale apuana, una delle sorgenti Moresco. La prima è alimentata dal sistema acquifero che si sviluppa principalmente nelle unità metamorfiche, tuttavia, essendo l'emergenza della scaturigine localizzata nei pressi del contatto tettonico tra l'Unità delle Apuane e la Falda Toscana, è possibile che le acque abbiano interagito anche con le rocce carbonatico-evaporitiche del Calcere cavernoso. La sorgente di Porta invece drena il sistema acquifero che si sviluppa proprio nella serie carbonatica non metamorfica ed è alimentata da circuiti idrici che si approfondiscono (testimoniato anche dalle temperature medie oltre i 15°C) andando ad interagire con i livelli evaporitici posti alla base della serie (Menichini et alii, 2016; Doveri et alii, 2019). La sorgente Moresco sembra drenare anch'essa il sistema del Calcere Cavernoso, anche se la presenza nella zona di molte mineralizzazioni a solfuri ne richiede ulteriori approfondimenti (Natali et alii, 2019; Nigro et alii, 2020).

## Composizione isotopica delle acque

Le acque delle sorgenti delle Alpi Apuane sono state studiate anche dal punto di vista isotopico, analizzando in particolare gli isotopi stabili dell'ossigeno e dell'idrogeno. I risultati di queste analisi hanno permesso di discriminare i diversi sistemi acquiferi presenti nell'area, di ricavare importanti informazioni sulle loro condizioni idrodinamiche e individuare le quote medie delle aree di alimentazione delle sorgenti. In generale, le sorgenti mostrano una composizione isotopica compresa tra -6,42 e -7,85‰ per quanto riguarda il  $\delta^{18}\text{O}$  e tra -37,1 e di -51,4‰ per il  $\delta^2\text{H}$  (Menichini et alii, 2016; Doveri et alii, 2019). Un intervallo compositivo così ampio è dovuto principalmente ad una diversa esposizione verso il mare o verso l'entroterra del bacino idrogeologico ed all'effetto dell'altitudine, poiché con l'aumentare della quota e della distanza dal mare si ha un maggiore effetto del frazionamento isotopico, perciò le acque tendono ad essere arricchite in isotopi leggeri (valori più negativi).

Gran parte delle sorgenti, come ad esempio le sorgenti Forno, Pollaccia, Renara e Fontanaccio, mostra una composizione isotopica molto variabile nel tempo (fig. 8) e che riflette la variabilità isotopica stagionale delle piogge, suggerendo la presenza di circuiti idrici sotterranei piuttosto superficiali e/o condotti carsici ben sviluppati che permettono lo sviluppo di una circolazione idrica sotterranea particolarmente rapida (Menichini et alii, 2016; Doveri et alii, 2019).

Altre sorgenti, come ad esempio le sorgenti delle Canalie (Martana, Ratto, Ravenna e Pero) e di Torano (Gorgoglio, Pizzutello, Carbonera e Tana dei Tufi), localizzate nella zona a nord di Carrara, sono, invece, caratterizzate da una variazione della composizione isotopica minore e dell'ordine dell'errore di misura, ovvero  $\pm 0,1$ ‰. In particolare, le sorgenti di Torano si trovano all'interno del bacino idrografico del torrente Carrione e drenano l'acquifero carbonatico metamorfico che si sviluppa principalmente nelle formazioni dei Grezzoni e Marmi ed in parte in quella del Calcere selcifero, caratterizzato da una permeabilità minore rispetto ai Grezzoni e ai Marmi. La formazione del Calcere selcifero rappresenta il nucleo della struttura sinclinale, nota in letteratura come Sinclinale di Carrara (fig. 9). Tale nucleo si trova poco a monte della zona delle sorgenti e di fatto si interpone tra i Marmi e i Grezzoni dell'ampia zona d'infiltrazione posta alle quote medio-alte del bacino (fianco diritto della sinclinale) e le medesime formazioni che sul fianco rovescio della struttura coprono in affioramento la zona immediatamente a ridosso delle emergenze. Questo assetto e la permeabilità relativamente inferiore del nucleo della struttura possono condizionare l'idrodinamica del sistema. In effetti, una composizione isotopica così costante nel tempo, riscontrata nelle acque sorgentizie, in particolare se confrontata con la composizione isotopica del canale La Piastra e del pozzo La Piastra che riflettono la variabilità



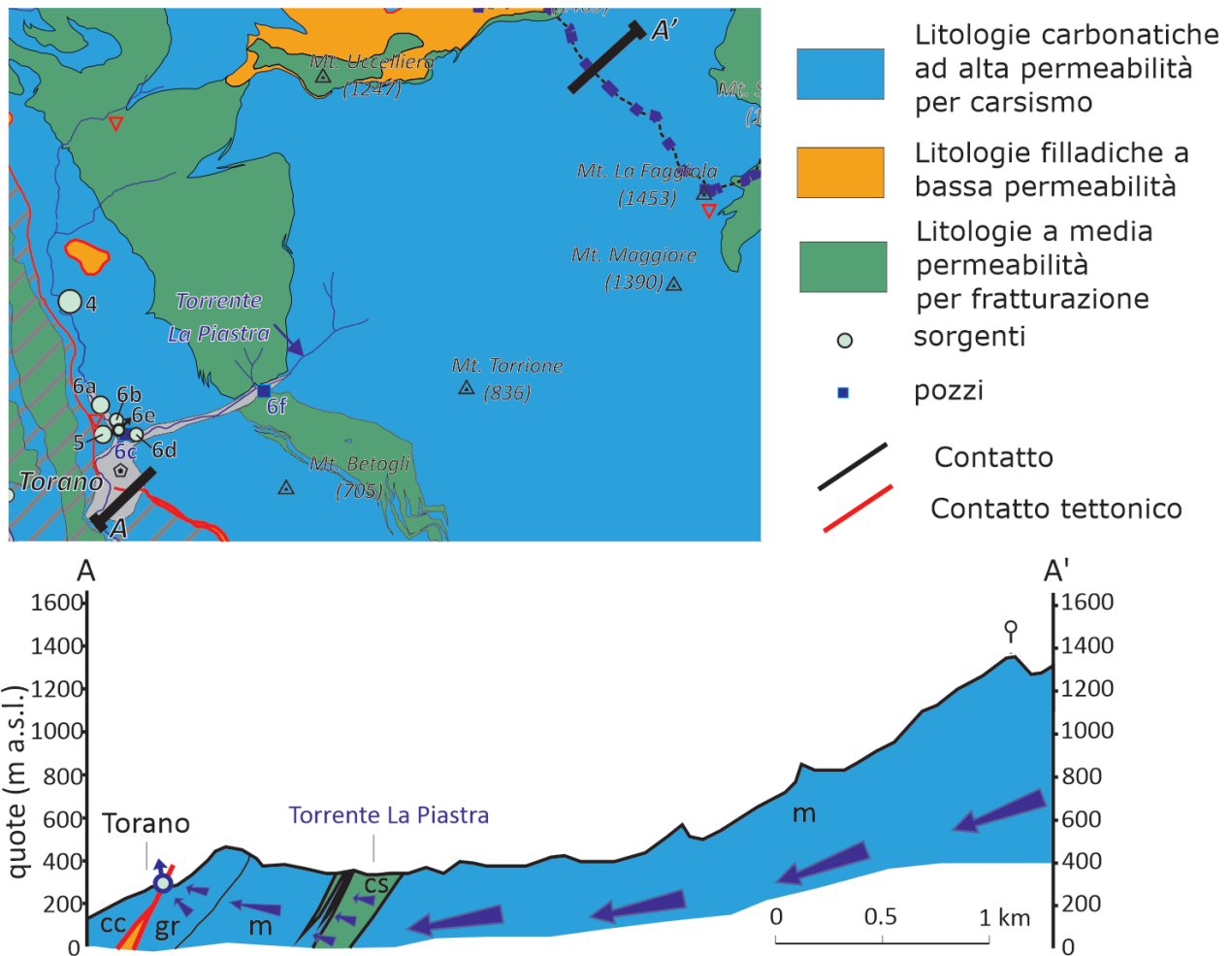


Fig. 9 – Carta idrogeologica della zona a nord di Carrara e relativa sezione (Doveri et alii, 2019, mod.)

isotopica delle piogge (fig. 10), suggerisce la presenza di un sistema di circolazione idrica profondo e con tempi di residenza in acquifero piuttosto lunghi (uno o più anni) che favoriscono un'omogeneizzazione delle acque di ricarica e quindi una forte attenuazione della variabilità del segnale isotopico stagionale tipica delle precipitazioni meteoriche. I processi di omogeneizzazione ed i lunghi tempi di residenza in acquifero sono, appunto, verosimilmente da imputare alla presenza del Calcare selcifero al nucleo della sinclinale, che esercitando per la minore permeabilità un'azione di rallentamento delle acque infiltrate e di provenienza da monte, ne favorisce un mescolamento ed un'omogeneizzazione prima che le stesse raggiungano le sorgenti poste a valle dello stesso nucleo selcifero.

L'analisi della composizione isotopica può fornire, inoltre, indicazioni sulle quote medie delle aree di alimentazione delle sorgenti, una volta definita la relazione esistente tra il  $\delta^{18}\text{O}$  e la quota di infiltrazione delle acque meteoriche (Mussi et alii, 1998; Doveri, 2004; Doveri et alii, 2013). Andando a confrontare, ad esempio, i contenuti isotopici delle sorgenti di Torano e delle Canalie con tale relazione (fig. 11), è possibile osservare che queste sorgenti, pur essendo molto simili da un punto di vista fisico-chimico, nonché

ubicate molto vicine fra loro, presentano contenuti isotopici rappresentativi di bacini di alimentazione caratterizzati da quote medie ben diverse. Nello specifico, la sorgente Pero (gruppo Canalie) mostra una quota media dell'area di alimentazione di circa 900 m s.l.m., quella delle sorgenti Carbonera e Tana dei Tufi (gruppo Torano), nonché Martana e Ratto (gruppo Canalie) di circa 1100 m s.l.m., mentre la quota media di alimentazione delle scaturigini Gorgoglio e Pizzutello (gruppo Torano) si colloca a circa 1500 m s.l.m., che corrisponde alla quota più alta raggiunta all'interno del bacino idrografico del Torrente Carrione. Ciò significa che l'area di alimentazione di quest'ultime sorgenti si estende al di là del bacino lungo i versanti più interni delle Alpi Apuane.

### Vulnerabilità degli acquiferi

Numerose sorgenti presenti nelle Alpi Apuane vengono utilizzate a scopo idropotabile, come, ad esempio, le sorgenti Cartaro, Gorgoglio e Moresco. La tutela di tali risorse è tuttavia messa fortemente a rischio dalla presenza di attività antropiche decisamente impattanti, quali numerose cave dove ancora oggi viene estratto principalmente il marmo, in

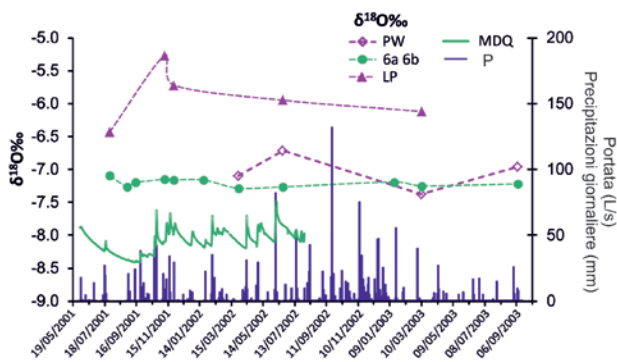


Fig. 10 – Variazione isotopica delle sorgenti Gorgoglio e Pizzutello (G-P) confrontata con le piogge giornaliere (P), con la portata media giornaliera delle sorgenti Gorgoglio-Pizzutello (MDF) e del Torrente La Piastra (LP) e con la variazione della composizione isotopica delle acque del Pozzo La Piastra (PW - Doveri et alii, 2019, mod.)

particolare nell'entroterra di Carrara e Massa e nella zona di Vagli, ma anche da miniere abbandonate, specialmente nella zona meridionale delle Alpi Apuane (Perotti et alii, 2018). Nelle aree estrattive del marmo vengono prodotte e riversate lungo i versanti enormi quantità di detrito di scarto, la cui porzione più fine, localmente denominata "marmettola" (prodotto della segazione del marmo), viene presa in carico dalle acque di scorrimento superficiale e dispersa nell'ambiente (Baroni et alii, 2001; Cortopassi et alii, 2008; Doveri et alii, 2013). Le figg. 12a e 12b mostrano che le sorgenti che si trovano nei pressi di Carrara, ovvero l'area in cui avviene la principale attività estrattiva di marmo, mostrano fenomeni di torbidità anche molto intensi, con picchi anche superiori a 100 NTU registrati principalmente durante gli eventi meteorici; tuttavia, in alcune sorgenti, come la Carbonera, si

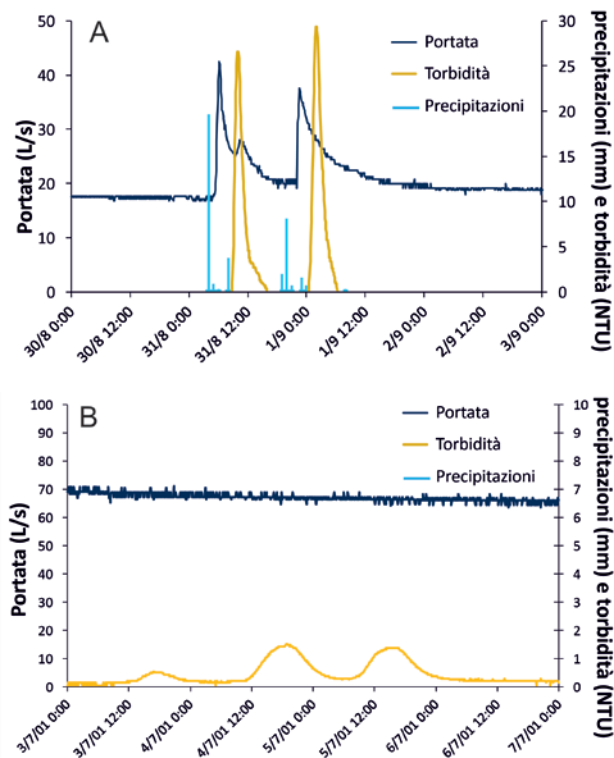


Fig. 12 – a) Portata e torbidità della sorgente Gorgoglio durante gli eventi meteorici; b) Portata e torbidità della sorgente Carbonera in periodi di assenza di precipitazioni (Doveri et alii, 2019)

osserva una certa torbidità anche in periodi privi di particolari eventi meteorici. Ciò significa che il detrito proveniente dalle cave è stato diffuso all'interno dei sistemi idrici sotterranei minacciando la qualità delle acque delle sorgenti. Inoltre, durante eventi meteorici particolarmente intensi è stato registrato un inquinamento da idrocarburi, anch'esso riconducibile alle attività estrattive (Doveri et alii, 2019).

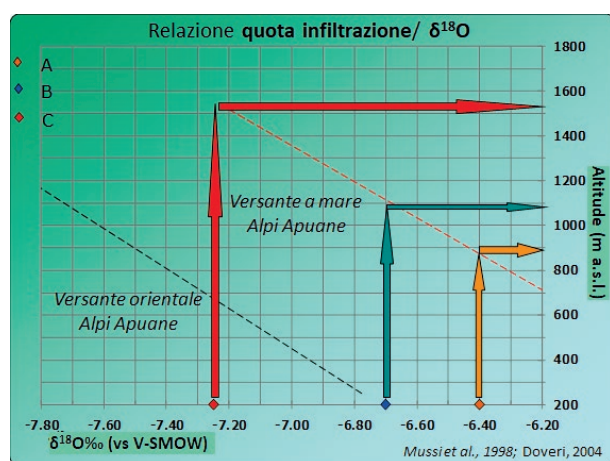


Fig. 11 – Relazione tra quota di infiltrazione e  $\delta^{18}O$  rappresentativa del versante orientale delle Alpi Apuane (Mussi et alii, 1998) e del versante a mare delle Alpi Apuane (Doveri, 2004). Sulla base di queste relazioni è stato possibile stimare la quota media dell'area di alimentazione della Sorgente Pero (A – frecce rosse); del raggruppamento Carbonera, Tana dei Tufi, Martana e Ratto (B – frecce color verdi petrolio); e delle sorgenti Gorgoglio e Pizzutello (C – frecce arancioni)

## Conclusioni

Le Alpi Apuane rappresentano un'area strategica per la Toscana nord-occidentale in quanto ospitano ingenti risorse idriche, generalmente di buona qualità, che possono essere sfruttate per l'approvvigionamento idrico. Tuttavia, i cambiamenti climatici in atto e la presenza di numerose cave di marmo attive e miniere dismesse mettono fortemente a rischio tali risorse, sia da un punto di vista quantitativo che qualitativo. Nella sorgente Cartaro negli ultimi anni si è già osservata una significativa riduzione della ricarica da parte delle precipitazioni, che si traduce in una graduale diminuzione nel tempo delle portate e un consumo delle riserve regolatrici, mentre alcune sorgenti come la Gorgoglio e Carbonera mostrano fenomeni di torbidità dovuta al detrito di scarto delle cave. Nella zona più meridionale, la sorgente Molini di S. Anna, captata ad uso idropotabile per decenni, è stata recentemente dismessa per il ritrovamento di elevate concentrazioni di tallio associato alle mineralizzazioni dell'area coltivate per numerosi anni e

poi abbandonate (Ghezzi *et alii*, 2019).

Pertanto, per far fronte a suddette problematiche, ai fini di una corretta e sostenibile gestione della risorsa idrica, nonché mitigazione del rischio, è necessaria un'adeguata conoscenza del sistema ambiente perseguibile sulla base di un continuo monitoraggio dei sistemi naturali e dei processi in atto. A tal proposito, risulta di particolare importanza effettuare studi multidisciplinari come quelli realizzati sulle Alpi Apuane, tutt'ora in via di sviluppo. Questi studi hanno permesso di ottenere già importanti risultati: individuare i diversi sistemi acquiferi che alimentano le numerose sorgenti delle Alpi Apuane; comprendere le condizioni idrodinamiche degli acquiferi e di conseguenza le loro condizioni di vulnerabilità sia all'inquinamento che ai cambiamenti climatici; effettuare una classificazione di tipo qualitativo delle acque delle sorgenti e di individuare le loro aree di alimentazione con il fine

di creare eventuali zone di protezione e di rispetto.

I cambiamenti climatici attesi, in termini di aumento delle temperature, diverso regime delle precipitazioni ed aumento della frequenza ed intensità di eventi estremi, avrà inevitabilmente conseguenze anche sull'area apuana e sulle sue risorse, con impatto sull'incremento del dissesto idrogeologico e sulla potenziale diminuzione delle risorse idriche e forse della loro stessa qualità. Ciò rende indifferibile prima di tutto l'aumento della conoscenza sul territorio, sulle sue risorse e sulle sue esigenze, e in secondo luogo una presa di coscienza definitiva da parte della popolazione e soprattutto degli enti che ne sono preposti alla gestione. Il tempo dei "si vedrà...", "si farà..." è finito, ed è iniziato un conto alla rovescia di cui non conosciamo esattamente l'entità temporale, ma che avrà ripercussioni verosimilmente irreversibili sulla vita delle persone.

Tab. 1 – Caratteristiche di alcune delle sorgenti più importanti delle Alpi Apuane

sorgente	comune	quota (m s.l.m.)	Qmedia (L/s)	Qmin (L/s)	Qmax (L/s)
Buca di Equi	Fivizzano	257	500	50	15.000
Forno	Massa	230	1.600	135	8.000
Cartaro	Massa	205	400	135	800
Pollaccia	Stazzema	545	880	40	6.000

## BIBLIOGRAFIA

- BALDACCI F., CECCHINI S., LOPANE G., RAGGI G. (1993) – *Le risorse idriche del bacino del Fiume Serchio ed il loro contributo all'alimentazione dei bacini idrografici adiacenti*, Memorie della Società Geologica Italiana, XLIX, 365-391.
- BARONI C., BRUSCHI G., CRISCUOLO A., RIBOLINI A. (2001) – *Il rischio geomorfologico indotto dall'attività estrattiva nei bacini marmiferi apuani (Alpi Apuane, Toscana)*, Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, memorie, ser. A, CVII, 87-96.
- CARMIGNANI L., GIGLIA G., KLIGFIELD R. (1978) – *Structural evolution of the Apuane Alps: an example of continental margin deformation in the Northern Apennines, Italy*, The Journal of Geology, LXXXVI (4), 487-504.
- CARMIGNANI L., KLIGFIELD R. (1990) – *Crustal extension in the Northern Apennines: the transition from compression to extension in the Alpi Apuane core complex*, Tectonics, IX (6), 1275-1303.
- CARMIGNANI L., CONTI P., MASSA G., VASELLI L., MANCINI S. (2010) – *Lineamenti geologici delle Alpi Apuane*, in “Geositi tra valorizzazione e conservazione della natura”, a cura di A. Amorfini, Acta apuana, V suppl., 9-23.
- CIVITA M., FORTI P., MARINI P., MECCHERI M., MICHELI L., PICCINI L., PRANZINI G. (1991) – *Carta della vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi delle Alpi Apuane: note illustrative*, Firenze, 1-28.
- CONTI P., CARMIGNANI L., MASSA G., MECCHERI M., FANTOZZI P.L., MASETTI G., ROSSETTO R. (2005) – *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000. Foglio 260 Viareggio*, Servizio Geologico d'Italia, Roma, 1-145.
- CORTOPASSI P.F., DADDI M., D'AMATO AVANZI G., GIANNACCHINI R., LATTANZI G., MERLINI A., MILANO P.F. (2008) – *Quarry waste and slope instability: preliminary assessment of some controlling factors in the Carrara marble basin (Italy)*, Italian Journal of Engineering Geology and Environment, n. speciale a cura di W. Dragoni e P. Tacconi P, I, 99-118.
- D'AMATO AVANZI G., GIANNACCHINI R. (2003) – *Eventi alluvionali e fenomeni franosi nelle Alpi Apuane (Toscana): primi risultati di un'indagine retrospettiva nel bacino del Fiume Versilia*, Rivista Geografica Italiana, CX, 527-559.
- D'AMATO AVANZI G., GIANNACCHINI R., PUCCINELLI A. (2004) – *The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides, An example in a temperate climate environment: the June 19, 1996 event in north-western Tuscany (Italy)*, Engineering Geology, LXXIII (3-4), 215-228.
- D'ORAZIO M., BIAGIONI C., VEZZONI S., DINI A. (2015) – *Inside the mine: interactions between hydrosphere, atmosphere, biosphere and the thallium-rich pyrite ores from southern Apuan Alps*, Abstract Congresso SIMP-SGI-So.Ge.I.-AIV, Firenze.
- DOVERI M. (2004) – *Studio idrogeologico e idrogeochimico dei sistemi acquiferi del bacino del Torrente Carrione e dell'antistante piana costiera*, Università di Pisa, tesi di dottorato, 1-178.
- DOVERI M., MENICHINI M., CERRINA FERONI A. (2013) – *Gli isotopi stabili dell'acqua come strumento fondamentale nello studio degli acquiferi carsici: alcuni esempi di applicazione sui complessi carbonatici delle Alpi Apuane (Toscana NW)*, Italian Journal of Engineering Geology and Environment, I, 33-50.
- DOVERI M., MENICHINI M., PROVENZALE A., SCOZZARI A. (2017) – *Groundwater response to climate changes: examples of observed and modeled trends on Tuscany aquifers (central Italy)*, in Atti del Convegno “XVII Giornata Mondiale dell'Acqua – Strategie di adattamento alla domanda e alla disponibilità di risorse idriche”, Accademia dei Lincei, Roma.
- DOVERI M., PICCINI L., MENICHINI M. (2019) – *Hydrodynamic and geochemical features of metamorphic carbonate aquifers and implications for water management: The Apuan Alps (NW Tuscany, Italy) case study*, in “Karst Water Environment. Advances in Research, Management and Policy”, a cura di T. Younos, M. Schreiber, K. Kosič Ficco, Cham (Switzerland) 209-249.
- FORTI P., PICCINI L., PRANZINI G. (1994) – *Le risorse idriche di emergenza delle Alpi Apuane (Toscana, Italia)*, in Atti del 2° Convegno Internazionale di Geoidrologia, Firenze, 1993, 303-318.
- GHEZZI L., D'ORAZIO M., DOVERI M., LELLI M., PETRINI R., GIANNACCHINI R. (2019) – *Groundwater and potentially toxic elements in a dismissed mining area: thallium contamination of drinking spring water in the Apuan Alps (Tuscany, Italy)*, Journal of Geochemical Exploration, CXCVII, 84-92.
- GIANNACCHINI R. (1998) – *L'evento meteorologico estremo del 19 giugno 1996 nel bacino del Torrente del Cardoso (LU): censimento e studio degli effetti derivati sui versanti e negli alvei*, Università di Pisa, tesi di laurea, 1-172.
- GIANNACCHINI R. (2003) – *Contributo alla valutazione della pericolosità e alla determinazione delle soglie d'innesco dei soil slip-debris flows nelle Alpi Apuane meridionali (Toscana): caratterizzazione geotecnica, idrogeologica e pluviometrica*, Università di Pisa, tesi di dottorato, 1-236.

- GIANNACCCHINI R. (2006) – *Relationship between rainfall and shallow landslides in the southern Apuan Alps (Italy)*, *Natural Hazards and Earth System Sciences.*, VI, 357-364.
- GIANNACCCHINI R., D'AMATO AVANZI G. (2012) – *Historical research as a tool in estimating the flood/landslide hazard in a typical small alpine-like area: the example of the Versilia River basin (Apuan Alps, Italy)*, *Physics and Chemistry of the Earth*, XLIX, 32-43.
- MENICCHINI M., DOVERI M., PICCINI L. (2016) – *Hydrogeological and geochemical overview of the karst aquifers in the Apuan Alps (Northwestern Tuscany, Italy)*, *Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater*, V (1), 15-23.
- MENICCHINI M., DOVERI M. (2020) – *Modelling tools for quantitative evaluations on the Versilia coastal aquifer system (Tuscany, Italy) in terms of groundwater components and possible effects of climate extreme events*, *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, IX (3), 35-44.
- MUSSI M., LEONE G., NARDI I. (1998) – *Isotopic geochemistry of natural water from the Alpi Apuane- Garfagnana area, Northern Tuscany, Italy*, *Mineralogica et petrographica acta*, LXI, 163-178.
- NATALI S., FRANCESCHI L., DOVERI M., GIANNACCCHINI R. (2019) – *Hydrogeological, chemical and water isotopes survey to characterize the groundwater flow system of Moresco springs (Apuan Alps - NW Tuscany)*, *Rendiconti Online Società Geologica Italiana*, XLVIII, 17-22.
- NIGRO M., MENICCHINI M., DOVERI M., GIANNACCCHINI R. (2020) – *Hydrodynamic and geochemical behavior of a karst aquifer system exposed to contamination: analysis of the response of the Moresco Springs (Apuan Alps, Italy) to rainfall*, *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*, LII,
- PATACCA E., SCANDONE P., MECCHERI M. (2011) – *Stratigraphic and structural revision of the Massa “Schuppenzone” (Alpi Apuane, Northern Apennines)*, *Rendiconti online della Società Geologica Italiana*, XV, 102-105.
- PEROTTI M., PETRINI R. D'ORAZIO M., GHEZZI L., GIANNACCCHINI R., VEZZONI S. (2018) – *Thallium and other potentially toxic elements in the Baccatoio Stream catchment (Northern Tuscany, Italy) receiving drainages from abandoned mines*, *Mine Water and the Environment*, XXXVII (3), 431-441.
- PICCINI L., PRANZINI G., TEDICI L., FORTI P. (1999) – *Le risorse idriche dei complessi carbonatici del comprensorio apuo-versiliese*, *Quaderni di Geologia Applicata*, IX, 1.
- PICCINI L. (2007) – *Le sorgenti carsiche delle Alpi Apuane*, in “Apuane e dintorni – Guida incompleta al fenomeno carsico”, Borgo a Mozzano, 47-68.
- PICCINI L., GIANNINI E., MALCAPI V., POGGETTI E., STEINBERG B. (2013) – *Monitoraggio idrodinamico di un sistema carsico: risultati preliminari di un anno d'indagini alla sorgente Pollaccia (Alpi Apuane-Toscana)*, in *Atti del Congresso Nazionale “La ricerca carsologica in Italia”*, Frabosa Soprana-Bossea 147-154.
- POGGETTI E., LAZZARONI M., VEROLE M., PICCINI L. (2015) – *Risultati e interpretazione idrodinamica del monitoraggio in continuo delle sorgenti carsiche di Equi Terme (Alpi Apuane)*, in *proceedings of the 22 Congresso Nazionale di Speleologia*, Pertosa, Auletta (Salerno), 369-374.
- PRINZ D., MALIK A.H. (2003) – *Water and Development: a Global Perspective*. In “Water and Development” a cura di K.D. Balke e Y. Zhu, Beijing, 93-99.
- RAPETTI F. (2017-2019, ma 2021) – *Il clima del versante marittimo delle Alpi Apuane (Toscana, Italia)*. *Acta Apuana*, XVI-XVII, 9-29.
- RAPETTI C., RAPETTI F. (1996) – *L'evento pluviometrico eccezionale del 19 giugno 1996 in Alta Versilia (Toscana) nel quadro delle precipitazioni delle Alpi Apuane*, *Atti della Società Toscana di Scienze Naturali, memorie, ser. A*, CIII, 143-159.
- SIEBERT S., BURKE J., FAURES J., FRENKEN K., HOOGEVEEN J., DÖLL P., PORTMANN T. (2010) – *Groundwater use for irrigation – a global inventory*, *Hydrology and Earth System Sciences*, XIV, 1863–1880.
- WBCSD (2006) – *Facts and Trends: Water*, World Business Council for Sustainable Development, Geneva.
- ZHU Y., BALKE K.D. (2008) – *Groundwater protection: What can we learn from Germany?*, *Journal of Zhejiang University Science B*, IX (3), 227-231.

