

ALTO BACINO DEL FIUME MONTONE

Cartografia idrogeologica per la protezione
delle risorse idriche sotterranee
nelle unità torbiditiche

a cura di

Leonardo Piccinini, Alessandro Gargini, Luca Martelli, Valentina Vincenzi

con il contributo di

Maria Teresa De Nardo

revisori scientifici

prof. Fulvio Celico, prof. Marco Petitta



ALMA MATER STUDIORUM
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA
E GEOLOGICO-AMBIENTALI



Regione Emilia-Romagna



servizio geologico
sismico e dei suoli

Responsabile del progetto

Raffaele Pignone

Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna

Coordinatore scientifico

Alessandro Gargini

Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali - Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Autori

Leonardo Piccinini

Dipartimento di Geoscienze - Università degli Studi di Padova

Alessandro Gargini

Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali - Alma Mater Studiorum Università di Bologna

Luca Martelli

Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna

Valentina Vincenzi

Geologo, libero professionista

Contributi scientifici

Maria Teresa De Nardo

Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna

Revisori scientifici

prof. Fulvio Celico

Università degli Studi del Molise

prof. Marco Petitta

Università degli Studi di Roma "La Sapienza"

Coordinamento redazionale

Angela Angelelli, Simonetta Scappini

Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli - Regione Emilia-Romagna

Allestimento e stampa



InfoCartoGrafica S.n.c., Piacenza - 2012

Leonardo Piccinini è il primo autore dell'opera, in quanto è colui che ha sostenuto, di gran lunga, il maggior impegno sia sul campo sia in fase di elaborazione e modellazione. Nella stesura del testo ha redatto i capitoli su: regime climatico, monitoraggio in continuo dei flussi sorgentiferi e fluviali, modellazione numerica del flusso della sorgente Brenziga 1 assieme al confronto tra le metodologie. Ha curato l'allestimento grafico di tutte le mappe e grafici dell'opera.

Alessandro Gargini, coordinatore scientifico, ha redatto i capitoli su: censimento e classificazione delle sorgenti, monitoraggio e analisi del deflusso di base, aree di ricarica e zone di rispetto delle sorgenti e ha curato, con il contributo di tutti i co-autori, la proposta di metodologia di cartografia idrogeologica e mappatura delle aree di ricarica e protezione.

Luca Martelli ha curato il supporto geologico dell'opera, la vestizione geologica della carta e la interpretazione e realizzazione del profilo geologico. Ha redatto interamente la I parte della monografia.

Valentina Vincenzi ha contribuito, assieme a Leonardo Piccinini, alla modellizzazione del flusso della sorgente Brenziga 1 e ha redatto il capitolo sullo studio del chimismo delle acque sotterranee e superficiali.

Maria Teresa De Nardo ha contribuito alla revisione dell'opera e i suoi suggerimenti preziosi hanno permesso di adattare, nel modo terminologicamente e tecnicamente corretto, la proposta di metodologia al contesto della Regione Emilia-Romagna.

I professori Fulvio Celico e Marco Petitta hanno revisionato scientificamente il lavoro apportando puntuali e significativi suggerimenti, e per questo hanno un caloroso ringraziamento da parte degli autori.

Gli autori ringraziano

- dr. Silvia Rosselli che ha curato i primi rilevamenti geologici e strutturali di dettaglio presso le principali sorgenti;
- Publiacqua S.p.A., nelle persone di: Filippo Landini, Alessandro Agnelli, Pietro Pampaloni, per il supporto tecnico al monitoraggio delle sorgenti del versante toscano;
- dr. Alessandro Pontin che ha effettuato una parte del monitoraggio preliminare delle sorgenti nella parte bassa del bacino;
- i tesisti (ora già laureati): Matteo Verlicchi, Michele Carlin, Sandro Carraro (Università di Ferrara) che hanno contribuito alla raccolta dei dati sul campo.

Presentazione

La presentazione di questa monografia, dedicata allo studio quantitativo e qualitativo delle risorse idriche sotterranee di un settore dell'alto Appennino forlivese, suggerisce alcune riflessioni che, a mio parere, ben si adattano anche al particolare momento socio-economico che stiamo attraversando.

Nell'intervenire sul territorio per ripristinarne la sicurezza, questo Assessorato si trova più spesso a programmare e finanziare interventi finalizzati a stabilizzare i versanti, rimodellare e rinaturalizzare i corsi d'acqua, allontanando e contenendo le acque. D'altro canto, si devono affrontare anche interventi emergenziali determinati da gravi eventi siccitosi, i cui effetti si manifestino in ambito sovracomunale. In entrambi i casi, sempre di acqua si discute....Quando gli interventi riguardano il settore montano, si deve essere consapevoli di operare in un contesto in cui vengono determinati origine, disponibilità quantitativa e qualità della risorsa acqua, condizionando la disponibilità della stessa nelle aree densamente popolate della pianura. Va sottolineato, infatti, il legame esistente tra montagna e pianura determinato dalle acque superficiali e sotterranee: diventa quindi prioritario predisporre politiche regionali di tutela delle risorse idriche dedicate in particolare al settore montano e tali da armonizzarsi, negli intenti e nei contenuti, con i temi della difesa del suolo e della valorizzazione della montagna. Un'istanza, quest'ultima, che fa in particolare riferimento alla delega recentemente attribuita alla Vicepresidenza della Regione, in ragione della trasversalità del tema rispetto alle competenze di più Assessorati. Tra questi, l'Assessorato che si occupa della Sicurezza Territoriale è certamente interessato a mettere in campo le proprie competenze per sviluppare azioni che promuovano la montagna emiliano-romagnola con rinnovata efficacia. Le aree montuose, pari al 40% del territorio regionale, non sono solo la sede preferenziale di svantaggi naturali e fragilità territoriali, ma anche aree ricche di risorse naturali capaci di contribuire a compensare tali problematiche divenendo occasioni di sviluppo, miglioramento della qualità di vita e crescita economica locale, anche stabilendo stretti legami con le imprese che operano nel settore dell' "Economia Verde".

L'acqua è, per l'appunto, una delle risorse della montagna; presso il Servizio Geologico negli ultimi anni si è lavorato per colmare un ingiustificato divario conoscitivo rispetto alle risorse idriche sotterranee della pianura, trovando recentemente una condivisione di intenti ed obiettivi all'interno del Dipartimento di Scienze della Terra e Geologico-Ambientali dell'Università di Bologna.

Non è quindi più possibile classificare gli acquiferi montani regionali come "misteriosi" o "inconoscibili", rinunciando implicitamente ad effettuare investimenti per caratterizzarli dal punto di vista idrogeologico. Si dispone ormai di una base conoscitiva sull'area vasta, utilizzabile anche per promuovere collaborazioni tra Assessorati e strutture regionali e di enti locali: un elemento indispensabile per ottenere quell'ottimizzazione degli investimenti di risorse che è indispensabile nell'attuale scenario di difficoltà economica. È questo l'unico modo per potere provare a "fare di più con meno", la vera sfida del nostro tempo.

Lo studio presentato in questo volume vuole portare il proprio contributo conoscitivo per venire incontro alle istanze sopra descritte, aprendo il fronte di una ricerca applicativa che, partendo da un quadro conoscitivo generale, si dedichi anche all'ambito comunale o sovracomunale, come è tipico degli studi di dettaglio sulle risorse idriche montane.

Paola Gazzolo

*Assessore alla Sicurezza Territoriale,
Difesa del Suolo e della Costa, Protezione Civile*

Premessa

La monografia qui presentata è un'opera di idrogeologia "povera".

Ho deciso di iniziare così, in modo provocatorio, questa breve premessa introduttiva. Non è per sminuire l'argomento trattato ma per fare meglio risaltare, successivamente, le sfide di indagine che noi autori abbiamo affrontato.

Nella monografia vengono presentati i risultati di una ricerca scientifica di "idrogeologia", progettata, finanziata ed eseguita secondo lo spirito di un approccio geologico applicativo, e quindi quantitativo. Al tempo stesso, l'idrogeologia coinvolta è definibile come "povera" perché gli acquiferi oggetto di studio non sono considerati corpi idrici significativi in senso assoluto, come lo possono essere quelli ghiaiosi e sabbiosi della pianura o le rocce carsiche e vulcaniche di molte aree alpine e appenniniche. L'oggetto della ricerca è infatti rivolto alle torbiditi, rocce sedimentarie di origine marina, costituenti l'ossatura principale dell'Appennino settentrionale (e quindi anche dell'Appennino emiliano-romagnolo), che sono sempre state oggetto di numerosi studi geologici di interesse internazionale ma che non hanno mai ricevuto alcuna attenzione da chi si occupa di acque sotterranee. Che interesse infatti potevano avere sorgenti appenniniche con portate di pochi litri al secondo (in morbida) alimentanti piccoli acquedotti rurali, se non frazioni isolate, se non addirittura abbeveratoi e fontane? Che interesse potevano avere, per l'analisi della consistenza delle risorse idriche, torrenti montani con portate estive di decine di litri al secondo al massimo, pensati tutt'al più come fonti di svago o di recreazione ambientale, pesca inclusa? E tali domande sorgono spontanee se si pensa, in tema di captazioni di acqua sotterranea e come termine di raffronto, alla vicinanza dei campi pozzi di pianura di molte città emiliane oppure, in tema di derivazioni di acqua superficiale, al Fiume Po.

Bene, assodato, quindi, che l'idrogeologia delle torbiditi sia certamente "povera" in termini quantitativi e relativi rispetto ad altre realtà, però vorrei sviluppare il concetto di quanto sia "preziosa" l'acqua sotterranea dell'Appennino emiliano-romagnolo, e in termini assoluti, questa volta, e non relativi. Il suo pregio, che è ciò che ha spinto Raffaele Pignone del Servizio Geologico, Simico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna nel 2002 a finanziare questo studio, e anche ciò che poi ha spinto tutti gli autori, che qui rappresento, a fare lo sforzo, non semplice, di sintetizzare una notevole e variegata mole di lavoro in un'opera monografica come quella qui presentata, risiede in 2 aspetti, uno idrogeo-politico (mi sia concesso questo termine) e uno scientifico.

Aspetto idrogeo-politico: le acque sotterranee dell'Appennino emiliano-romagnolo, le acque della "montagna", sono la risorsa idrica di maggior pregio di tutta la regione, anche se volumetricamente meno consistenti di quelle di pianura. E in un contesto di sfruttamento della risorsa in cui le acque di pianura sono aggredite da (o sono cause esse stesse di) salinizzazione, inquinamento, problematiche di subsidenza, il "pregio" dell'acqua di montagna risalta di più. E inoltre: povera, sì, spesso, ma non sempre. Il sistema di tunnel TAV della linea Firenze-Bologna, nel tratto toscano, con un drenaggio operato su ammassi rocciosi torbiditici, quindi "poveri" secondo il comune sentire, drena circa 500 l/s, al minimo (quindi in condizioni di magra), di acque montane di ottima qualità, in grado di soddisfare un acquedotto di una città emiliana capoluogo (nell'ordine dei 100.000-150.000 abitanti).

Aspetto scientifico: qui sono ancora provocatorio. Studiare l'idrogeologia "ricca" è più facile; studiare quella "povera" è una sfida. Definire volumetricamente l'estensione di corpi geologici ghiaiosi o sabbiosi nel sottosuolo, parametrizzarli e modellarli per scopo di gestione e protezione è ormai procedura codificata. Individuare i limiti e le soglie di permeabilità in acquiferi carsici, anche modellizzandoli, può essere difficoltoso ma è fortemente aiutato dal forte contrasto di permeabilità fra le litologie acquifere e dalla nettezza dei contatti geologici fra acquiferi e acquitardi. L'idrogeologia delle torbiditi, di contro, oltre che povera è anche sfuggente. Individuare, con i classici metodi di rilevamento geologico, geomorfologico e idrogeologico, all'interno delle vaste e monotone plaghe appenniniche, le idrostrutture più favorevoli per consistenza della risorsa non è semplice. In conseguenza di ciò non esiste, di fatto, un approccio codificato di studio dell'idrogeologia delle torbiditi e questo implica una serie di effetti negativi, quali, ad esempio, la mancanza di un orientamento condiviso su come affrontare il dimensionamento delle aree di protezione delle sorgenti in tali aree, a fronte della molteplicità ed evidenza degli strumenti presenti invece per altri contesti.

Per cui l'opera nasce come risposta a questa sfida.

La monografia si basa su un approccio di idrogeologia quantitativa, impostata sul monitoraggio e sulla modellizzazione dei processi. Si inserisce e si innesta nella robusta banca dati geologica della Regione Emilia-Romagna sviluppando una analisi basata soprattutto sullo studio della recessione estiva, unico momento idrologico del sistema capace di permetterle una classificazione adeguata.

È suddivisa in una parte introduttiva e di inquadramento del sito, in una descrizione dell'acquisizione dei dati sul campo, sia con monitoraggio continuo che discontinuo, in una caratterizzazione idrochimica e in una modellazione. L'interesse che ne deriva è che, come verificherà chi leggerà l'opera, conclusioni simili arrivano dall'uso di strumenti diversi, convergenti assieme.

Il prodotto di sintesi, la vera sfida che ci siamo prefissi, è una metodologia di cartografia idrogeologica per l'area appenninica con una carta allegata. La carta, sovente sintesi di molti lavori di geologia, è semplicemente l'interpretazione locale che gli autori hanno dato al contesto dell'Alto Montone, in base comunque a delle regole di approccio che proponiamo di estendere a qualsiasi contesto di *hard rock* torbiditico.

Alessandro Gargini

Indice

1	Introduzione	pag. 9
2	<i>Test-site</i> e metodo di studio	» 11

Parte I Inquadramento geologico del bacino di studio

3	Inquadramento geologico	» 15
3.1	L'Appennino settentrionale	» 15
3.2	L'Appennino tosco-romagnolo	» 16
4	L'alto bacino del Montone	» 17
4.1	Stratigrafia	» 17
4.1.1	<i>La Formazione Marnoso-Arenacea</i>	» 18
4.1.2	<i>I depositi continentali</i>	» 22
4.2	Tettonica	» 22
4.2.1	<i>Analisi mesostrutturale</i>	» 24

Parte II Inquadramento idrogeologico del bacino e dati di monitoraggio idrologico

5	Regime climatico e termini del bilancio idrologico	» 25
5.1	Afflussi meteorici (P)	» 25
5.2	Evapotraspirazione reale (E_r) e precipitazione efficace (P_e)	» 27
6	Censimento e classificazione idrogeologica delle sorgenti	» 33
6.1	Modalità di conduzione del monitoraggio delle sorgenti	» 34
6.2	Descrizione delle sorgenti censite e monitorate	» 34
6.2.1	<i>Sorgenti ricadenti entro il bacino dell'Alto Montone</i>	» 38
6.2.2	<i>Sorgenti ricadenti nel versante tirrenico (bacino dell'Arno)</i>	» 54
6.3	Analisi sintetica dei dati raccolti e classificazione idrogeologica delle sorgenti	» 59
7	Studio del chimismo delle acque sotterranee e superficiali	» 63
7.1	Premessa	» 63
7.2	Classificazione di Piper	» 63
7.3	Isotopi ambientali	» 65
7.4	Contenuto in Trizio	» 66
7.5	Considerazioni conclusive	» 67
8	Monitoraggio e analisi del deflusso di base	» 67
8.1	Modalità di conduzione del monitoraggio delle sezioni d'alveo	» 67
8.2	Descrizione delle sezioni monitorate e dati acquisiti	» 69
8.2.1	<i>Sezioni d'alveo a monte di San Benedetto in Alpe</i>	» 69
8.2.2	<i>Sezioni d'alveo a valle di San Benedetto in Alpe</i>	» 71
8.2.3	<i>Sezioni d'alveo monitorate in continuo</i>	» 72
8.3	Analisi comparata per sottobacino delle caratteristiche geologiche, idrologiche e idrogeologiche	» 73
8.4	Analisi della produttività idrogeologica (<i>base yield</i>) dei sottobacini	» 74
8.5	Valutazione della ricarica dei sottobacini	» 77
8.6	Commento sulla distribuzione della produttività idrogeologica e della ricarica	» 79
9	Monitoraggio in continuo di flussi sorgentiferi e fluviali	» 80
9.1	Analisi degli idrogrammi sorgivi	» 80
9.1.1	<i>Sorgente Brenziga 1</i>	» 81
9.1.2	<i>Sorgente Brenziga 2</i>	» 82
9.1.3	<i>Sorgente Brenziga 3</i>	» 83
9.1.4	<i>Sorgente Castello</i>	» 84
9.2	Analisi degli idrogrammi fluviali	» 85
9.2.1	<i>Scale di deflusso</i>	» 86

9.2.2	<i>Ricostruzione dell'idrogramma</i>	» 87
9.2.3	<i>Stima del deflusso di base</i>	» 88
9.2.4	<i>Analisi degli idrogrammi di deflusso sotterraneo ricostruiti</i>	» 89
9.3	Verifica sperimentale della metodologia di stima della ricarica	» 89

Parte III

Dimensionamento delle aree di alimentazione/zona di rispetto e cartografia idrogeologica in torbiditi

10	Mappatura e tutela dalla risorsa idrica in acquiferi fratturati	» 91
10.1	Aree di ricarica e zone di rispetto delle sorgenti di <i>hard rock aquifers</i>	» 91
10.1.1	<i>Metodi geometrici</i>	» 92
10.1.2	<i>Metodi morfologici</i>	» 92
10.1.3	<i>Metodi idrogeologici</i>	» 92
10.1.4	<i>Metodi idrogeologici</i>	» 93
10.1.5	<i>Metodi cronologici</i>	» 93
10.1.6	<i>Metodi numerici</i>	» 95
10.1.7	<i>Metodi ibridi</i>	» 95
10.1.8	<i>Metodi applicati attualmente in Italia per le sorgenti</i>	» 96
11	Modellazione numerica del flusso	» 97
11.1	Implementazione del modello	» 97
11.1.1	<i>Discretizzazione</i>	» 98
11.1.2	<i>Parametrizzazione</i>	» 98
11.1.3	<i>Condizioni al contorno</i>	» 99
11.1.4	<i>Simulazioni e calibrazione</i>	» 100
11.2	Risultati	» 101
12	Confronto tra le metodologie	» 103

Parte IV

Proposta di legenda per cartografia idrogeologica in Appennino settentrionale

13	Cartografia idrogeologica per l'Appennino settentrionale	» 107
13.1	Metodologia di definizione delle aree di alimentazione e zone di rispetto delle sorgenti appenniniche	» 107
13.1.1	<i>Principi generali del metodo e base bibliografica</i>	» 107
13.1.2	<i>Regole di applicazione del metodo</i>	» 108
14	Struttura di legenda per una cartografia idrogeologica in torbiditi	» 108
14.1	Tematismo L - Litologia dell'ammasso roccioso	» 109
14.2	Tematismo F - permeabilità per Frattura dell'ammasso roccioso	» 109
14.3	Tematismo P - soglie di Permeabilità	» 110
14.4	Tematismo D - Dinamica di versante	» 110
14.5	Tematismo S - Sorgenti	» 110
14.6	Tematismo R - Ricarica	» 111
14.7	Tematismo V - Vettori di flusso	» 111
14.8	Tematismo A - Aree di alimentazione e zone di rispetto delle principali sorgenti	» 111
	Extended abstract	» 113
	Bibliografia	» 116



1 - Introduzione

L'Emilia-Romagna, da un punto di vista morfologico, è costituita per poco meno della metà da un territorio di pianura (circa 48% della superficie complessiva) mentre la rimanente parte è divisa in parti uguali fra collina e montagna. La risorsa idrica sotterranea, in termini di prelievi ad uso idropotabile, è invece in prevalenza "risorsa di pianura", attinga da pozzi perforati nei complessi acquiferi alluvionali quaternari: circa il 70% del totale prelevato dagli acquedotti della regione è acqua di pozzo contro un 24% circa di prelievi da acque superficiali (in prevalenza rappresentate dal Po, dall'invaso di Ridracoli e da altri invasi minori) e da solo un 6% circa di prelievi da sorgenti (ISTAT, 2004; Regione Emilia-Romagna, 2005). Pertanto si può affermare che, in Emilia-Romagna, l'idrogeologia di pianura, in termini di studi, prospezioni e progettazione, è quella dominante in contrapposizione all'idrogeologia di montagna, sovente considerata minore o "povera".

Questo fatto discende non solo dalla distribuzione della popolazione e delle attività economiche nel territorio regionale ma anche da un indubbio fattore geologico: l'Appennino emiliano-romagnolo, come buona parte di tutto l'Appennino settentrionale, è costituito da litotipi caratterizzati da medio-bassa permeabilità in grande (maggiore solo localmente, laddove il grado di fratturazione è sufficientemente elevato) e dalla sostanziale assenza di fenomeni carsici o, comunque, di circolazioni idriche in rete acquifera con portate specifiche elevate (come ad esempio avviene in vulcaniti, rocce carbonatiche ad elevato grado di fratturazione e dissoluzione). La ricerca idrogeologica nelle aree montane in Italia, anche in relazione alla redazione di una legenda codificata di cartografia idrogeologica, è stata rivolta per la maggior parte agli acquiferi carsici o vulcanici dell'Appennino centro-meridionale e delle Alpi (per esempio, Boni *et alii*, 1986; Angelini & Dragoni, 1997; Petitta & Tallini, 2002; Civita, 2005) e scarsa attenzione è stata rivolta a litotipi quali torbiditi, metamorfiti, arenarie.

Nella bibliografia idrogeologica internazionale il termine "*hard rock aquifers*" si riferisce a graniti, metamorfiti o rocce sedimentarie stratificate con presenza di livelli poco permeabili, caratterizzati da una medio-bassa permeabilità in grande ma anche, per fatti tettonici o di alterazione-detensionamento, da una forte discontinuità delle proprietà idrogeologiche con presenza di fasce o zone molto permeabili e dalla capacità di rifornire d'acqua pozzi di produttività variabile fra 0,5 e 5 l/s; tali acquiferi vengono anche chiamati "acquiferi discontinui" (Krasny *et alii*, 2003; Neuman, 2005; Shakeel *et alii*, 2008), intesi come rocce lapidee fratturate non carsiche e con porosità primaria trascurabile. In Italia, ricca di acquiferi carsici, vulcanici e porosi, la ricerca su questo tipo di acquiferi è stata oggetto solo di pochi e recenti studi (Gargini *et alii*, 2008; Petrella & Celico, 2009; Vincenzi *et alii*, 2009), al contrario di quanto da tempo avviene in altre realtà: metamorfiti scandinave, scozzesi e svizzere (Rodhe & Bockgard, 2006; Tetzlaff & Soulsby, 2008; Masset & Loew, 2010) o *bedrock aquifers* del nord America (Tiedeman *et alii*, 1998; Oxtobee & Nowakowski, 2002; Praamsma *et alii*, 2009), tanto per citare alcuni esempi.

Nel contesto idrogeologico dell'Appennino settentrionale, le torbiditi rappresentano uno degli *hard rock*

aquifers di riferimento e il caso di studio descritto nelle pagine seguenti illustra tale situazione.

Essendo costituite da alternanze di areniti (se fratturate, certamente potenziali acquiferi) e peliti (definibili come *aquitard/aquiclude*), le torbiditi manifestano in grande una permeabilità medio-bassa e la produttività media del deflusso di base per unità areale non è elevata: conseguenza di ciò è la presenza di sorgenti numerose ma di esigua portata e di un indice di variabilità annua del deflusso di base assai elevato (Gargini *et alii*, 2006). È pur vero, però, che recenti studi ed evidenze, maturati a seguito di alcuni progetti in sotterraneo effettuati in contesti torbiditici silico-clastici (sistema di Tunnel AV Bologna-Firenze, galleria di derivazione di Ridracoli), hanno messo in luce che, in compresenza di fattori predisponenti ben definiti, l'ammasso roccioso torbiditico (marnoso-arenaceo nello specifico) diviene sede di una circolazione idrica assai attiva, anche se fortemente eterogenea e anisotropa, che dà luogo, in condizioni naturali, all'emergenza di sorgenti rilevanti (magnitudo Meinzer IV-V in estate) e, soprattutto, ad un deflusso di base consistente nei torrenti alimentati dall'ammasso roccioso (Gargini *et alii*, 2006, 2008; Ermini *et alii*, 2009; Vincenzi *et alii*, 2009).

Di fatto, quindi, a luoghi, l'idrogeologia delle torbiditi da "povera" diventa "ricca" dando luogo a sistemi di circolazione idrica sotterranea (GFS, *Groundwater Flow Systems*, *sensu* Tóth, 1963) dal comportamento idrologico molto "attivo", con una immediata risposta alla ricarica fino a risposte di tipo pseudo-carsico (Gargini *et alii*, 2008). Localmente si possono creare serbatoi sotterranei estesi con portate di base elevate e velocità effettiva di flusso dell'acqua nell'ordine di varie decine di metri al giorno (nelle fratture di apertura maggiore), con bacino idrogeologico non più coincidente con quello idrografico e coefficienti di esaurimento bassi (nell'ordine di 10^{-3} g⁻¹), indice di un'elevata capacità di immagazzinamento dell'acquifero (Civita, 2005).

Gli studi sopra citati hanno anche evidenziato la estrema anisotropia ed eterogeneità dell'ammasso roccioso per cui è possibile, all'interno della medesima unità litologica, passare in poco spazio da condizioni acquifere a condizioni di acquiclude. Inoltre la circolazione idrica più attiva si manifesta talvolta in aree ove sembrano assenti strutture idrogeologiche geologicamente evidenti (soglie e limiti di permeabilità, limiti di ricoprimento di coltri allocitone), come è il caso della ben più studiata circolazione carsica; sovente in nord Appennino è comune trovare emergenze sorgentizie importanti in contesti geologici e morfologici apparentemente privi di strutture o soglie in grado di giustificarne la localizzazione e, del resto, molti dei principali *inrush* che si sono verificati nei tunnel del sistema AV Bologna-Firenze non presentavano una "risposta" in evidenze geologiche alla superficie.

Tali condizioni intrinseche, unite alla limitata importanza degli acquiferi montani nord-appenninici (in termini di produttività idrogeologica e di abitanti serviti), hanno sempre ostacolato la codifica di una cartografia idrogeologica per la tutela della risorsa idrica valida per il contesto specifico e basata su regole e simbologie condivise. Nel contesto socio-economico attuale, comunque, è maturata

l'esigenza di porre termine a tale carenza, in virtù delle seguenti considerazioni di contorno:

- le sorgenti appenniniche e gli acquiferi che le alimentano, pur se allo stato attuale risorsa idrica minoritaria nel panorama regionale, sono comunque **risorse strategiche e insostituibili** (Anzalone *et alii*, 1997), al servizio di sparsi e numerosi insediamenti montani, da poche unità a poche migliaia di abitanti residenti, con presenza di attività spesso legate al turismo o, comunque, alla residenza stagionale (alberghi, seconde case, agriturismi etc.); tali insediamenti, in mancanza di fonti idriche locali, potrebbero essere serviti da reti di acquedotto solo a seguito di ingenti investimenti e progetti invasivi (invasi, dorsali di acquedotto, centri di pompaggio); inoltre le sorgenti appenniniche hanno anche un ruolo primario paesaggistico, turistico, ricreativo e ambientale;
- le risorse idriche ospitate negli acquiferi montani della regione **sono di gran lunga quelle di migliore qualità**, in quanto alimentate in contesti integri da un punto di vista ambientale e privi di fonti di inquinamento: l'estesa copertura boschiva, la bassa antropizzazione e l'esistenza di aree di pregio dal punto di vista ambientale e naturalistico sono sicuramente una garanzia in merito alla qualità della risorsa idrica ricavabile; da notare, inoltre, che il contesto geochemico nord appenninico è esente dalla presenza di elementi in tracce nelle acque sorgive (quali fluoro, uranio, arsenico), caratteristici di ambiti geologici vulcanici o cristallini e responsabili di numerose situazioni di non conformità delle acque per uso umano nel territorio nazionale;
- risorse strategiche e di buona qualità, quali le sorgenti appenniniche, richiedono l'adozione di programmi e azioni di monitoraggio e tutela, come indica la stessa *Groundwater directive* dell'Unione Europea (Quevauviller, 2007), in cui **diviene fondamentale la scelta e applicazione di metodologie di definizione delle aree di salvaguardia**, con particolare riferimento a quelle di rispetto, adattabili al contesto idrogeologico specifico; tali approcci non possono non basarsi sulla redazione di cartografie idrogeologiche operative;
- laddove le risorse idriche sotterranee sono pingui e sottoposte ad elevato consumo, quindi negli acquiferi di pianura, il sovrasfruttamento, causa di subsidenza, intrusione salina lungo le coste, richiamo d'inquinanti e depauperamento estivo della risorsa idrica (Molinari *et alii*, 2007), ha da tempo evidenziato **la necessità di individuare zone strategiche ove sviluppare risorse idriche alternative, integrative e di emergenza** in occasione di annate climatiche sfavorevoli o di episodi di inquinamento; anche se, in alcune situazioni idrogeologiche particolari (paleo-alvei olocenici di rilevante spessore ricaricati a breve distanza dal Po, cave dismesse di inerti alimentate da circolazione idrica sotterranea), è ancora possibile reperire risorse interessanti da un punto di vista acquedottistico (Colombani *et alii*, 2007), è certamente in montagna la sede delle risorse idriche di pregio del futuro;
- ove si verificano situazioni di concomitanza di fattori predisponenti, di tipo geologico e idrogeologico, a luoghi **le unità torbiditiche del nord Appennino, sia**

silico-clastiche sia calcaree e calcareo-marnose, divengono sede di sistemi di flusso idrico sotterraneo ad elevata portata specifica in grado di fornire, a seguito della messa in opera di schemi di captazione adeguati in acquifero, risorse rilevanti di importanza acquedottistica e non solo strettamente locale; e ciò appare un fatto di rilievo se messo in parallelo con l'estremo rischio d'inquinamento cui gli acquiferi di pianura sono sottoposti, a causa dell'elevato carico antropico, e con gli elevati costi di potabilizzazione delle acque superficiali e delle acque di pozzo di pianura (basti pensare che, in stato sostanzialmente stazionario, le quattro gallerie TAV Bologna-Firenze, che forniscono il maggior volume di acqua drenata, scaricano circa 500 l/s, in grado di soddisfare ca. 120000 abitanti equivalenti, pari ad una città media emiliana capoluogo di provincia, Ermini *et alii*, 2009);

- **le unità torbiditiche costituiscono l'ossatura dell'Appennino settentrionale e coprono territori assai vasti senza soluzione di continuità**; ad esempio la Formazione Marnoso-Arenacea, lungo l'Appennino tosco-romagnolo fino all'area umbromarchigiana, ha un areale di affioramento che supera i 4500 km², l'estensione di una piccola regione italiana;
- da un punto di vista strettamente scientifico, se, da una parte, il modello concettuale della storia e struttura geologica delle torbiditi dell'Appennino settentrionale è assai avanzato, frutto com'è di studi e ricerche di lungo corso (Ricci Lucchi, 1986; Castellarin, 2001; Cibirin *et alii*, 2004), lo stesso non può essere detto per quanto concerne gli aspetti idrogeologici ed è **avvertita la carenza di una cartografia idrogeologica codificata**, valida non solo per i contesti carsici e vulcanici dell'Italia centro-meridionale (Celico *et alii*, 2003; Scalise & Martarelli, 2010) o Alpina (Civita, 2005), ma anche per gli *hard rock aquifers* della catena appenninica.

Alla luce delle suddette considerazioni, nel 2002 il Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna (SGSS) ha avviato, in collaborazione con il Gruppo di Idrogeologia dell'Università di Ferrara, uno studio pilota per la cartografia idrogeologica nell'Appennino emiliano-romagnolo. Scopii principali della ricerca sono la messa a punto di metodologie innovative per la valutazione delle risorse idriche nelle unità torbiditiche nonché il conseguimento di uno standard metodologico e di lavoro applicabile allo studio delle risorse idriche sotterranee negli *hard rock aquifers* dell'Appennino settentrionale.

La ricerca è quindi confluita in un filone più generale di attività, compreso tra i compiti istituzionali del SGSS, per lo studio e la tutela delle risorse idriche sotterranee nelle aree montane della regione. Una documentazione sugli studi e risultati di questo filone di ricerca applicativa è disponibile sul sito del SGSS regionale (http://www.regione.emilia-romagna.it/wcm/geologia/canali/cartografia/sito_cartografia/sito_sorgenti.htm).

La scelta dell'area in cui condurre lo studio è ricaduta sull'alto bacino del Fiume Montone, nell'Appennino tosco-romagnolo, sulla base di motivazioni illustrate nel capitolo

successivo. Le attività di indagine e monitoraggio sul campo si sono sviluppate su tre anni, dal 2002 al 2005; successivamente sono state condotte elaborazioni in ambiente GIS e simulazioni numeriche.

La presente opera monografica illustra le attività di indagine effettuate, documenta i dati raccolti e, sulla base dei dettagliati studi effettuati su un bacino campione di poco più di 100 km², propone una metodologia di cartografia idrogeologica e di definizione di aree di ricarica e di protezione delle sorgenti, equiparabili queste ultime, come significato, alle zone di rispetto, prescritte dalla normativa del settore per quelle captate; la metodologia è valida per il contesto nord appenninico e in particolare per litologie a dominante torbiditica.

La carta idrogeologica per la protezione delle risorse idriche sotterranee dell'Alto Montone, acclusa in allegato alla monografia, sintetizza graficamente la pluriennale ricerca.

2- Test-site e metodo di studio

L'area oggetto di studio corrisponde alla porzione superiore del bacino idrografico del Fiume Montone, geograficamente collocato sul versante adriatico del crinale appenninico (fig. 2.1). Si tratta di un'area estesa 89,74 km² (102,80 km² la superficie reale stimata tramite analisi del modello digitale del terreno - DEM), a cavallo tra le regioni Emilia-Romagna e Toscana, amministrativamente compresa nei territori comunali di Portico e San Benedetto (Forlì-Cesena), San Godenzo, Dicomano, Marradi (Firenze).

L'area è collocata tra il crinale appenninico, nel tratto compreso tra il Monte Peschiera (1198 m slm) e il Passo del Muraglione, e una sezione poco a monte di Portico di Romagna, considerata il limite verso valle della porzione superiore del bacino (quota 304 m slm). Tale sezione è stata considerata il limite settentrionale dell'alto bacino del Montone, oltre che per la minore distanza tra gli spartiacque laterali, soprattutto per la presenza di una struttura tettonica di importanza regionale (*thrust* di S. Sofia, vedi Cap. 3) che forma una struttura antiforme il cui nucleo è costituito da membri a prevalenza pelitica (membri di Biserno, Corniolo e Galeata) e quindi relativamente tamponanti da un punto di vista idrogeologico.

Si tratta, nel complesso, di un territorio scarsamente popolato e particolarmente integro dal punto di vista naturalistico e paesaggistico. Se si escludono le frazioni di San Benedetto in Alpe, Bocconi e Portico di Romagna, gli insediamenti abitativi sono a carattere sparso, la quasi totalità del territorio è occupata da boschi cedui a faggio e castagno e in misura minore da abetaie. Una porzione rilevante dell'alto bacino del Fiume Montone rientra entro i confini del Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi, Monte Falterona e Campigna. Le principali fonti di reddito per gli abitanti del luogo sono rappresentate dalla zootecnia e, in percentuale minore, dal turismo, concentrato esclusivamente nel periodo estivo.

Come verifica sperimentale di travasi di acqua sotterranea attraverso il crinale appenninico principale verso la Toscana sono stati anche effettuati monitoraggi delle

principali sorgenti situate a sud del crinale e dei deflussi nel bacino del Fosso di Petrognano (8,46 km²), torrente minore del bacino Sieve-Arno e la cui testata è situata subito a sud del bacino del Montone. In tal modo l'areale di studio viene a costituirsi come bacino idrogeologico, al netto del travaso sotterraneo verso la Toscana.

L'approvvigionamento idrico dell'Alto Montone avviene attraverso lo sfruttamento delle sorgenti *Brenziga*, presso San Benedetto in Alpe, del pozzo di subalveo *San Pietro* presso Portico di Romagna (poche centinaia di metri oltre la sezione di chiusura del bacino) e delle sorgenti *Pian di Rupino* presso Bocconi, utilizzate solamente nei periodi di crisi idrica; la gestione delle captazioni è ora in capo a Romagna Acque - Società delle Fonti, che vende l'acqua a Hera S.p.A. per la distribuzione in rete.

In alcuni insediamenti sparsi l'approvvigionamento avviene da sorgenti minori gestite dagli stessi proprietari.

A sud del crinale appenninico principale l'approvvigionamento idrico è ad opera di Publicacqua S.p.A. tramite 9 sorgenti: la sorgente *Soagi* serve la frazione del Passo del Muraglione mentre 8 sorgenti (*Giogo*, *Frassine*, *Trattoio*, *Castello*, *Piancava 1 e 2*, *Gorgogliosa*, *Vetriceto*; fig. 6.1) sono captate al servizio delle reti di acquedotto dei comuni di San Godenzo e Dicomano (FI).

La scelta del bacino dell'Alto Montone come area test si basa sulle seguenti motivazioni:

- l'area è interessata interamente dall'**affioramento di torbiditi silico-clastiche** (Marnoso-Arenacea) rappresentative degli *hard rock aquifers* dell'Appennino settentrionale; in particolare è presente la successione più antica dell'unità, prevalentemente langhiano-serravalliana, per caratteristiche litologiche dotata della maggiore vocazione acquifera (vedi capitolo 3);
- il bacino si trova proprio al **centro dell'ampia finestra tettonica di affioramento della Formazione Marnoso-Arenacea** (fig. 2.2), estesa, praticamente senza soluzione di continuità, lungo tutto l'arco orientale dell'Appennino settentrionale dalla valle del Torrente Sillaro (Appennino bolognese) fino alle alte valli dei fiumi Chienti e Nera (Appennino umbromarchigiano); pertanto è interamente circondato, nei bacini contigui, da una litologia analoga, per cui non vi sono soglie di permeabilità di importanza regionale che interrompano o frammentino i sistemi di circolazione idrica sotterranea;
- il buon **dettaglio dell'informazione geologica** utilizzabile, a seguito della disponibilità della banca dati tratta dalla cartografia geologica a scala 1:25.000 (con rilevamenti originali a scala 1:10.000), preparatoria all'allestimento dei Fogli 1:50.000 della nuova Carta Geologica d'Italia (CARG) nn. 253 Marradi, 254 Modigliana, 264 Borgo S. Lorenzo, 265 Bagno di Romagna, a cura del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna;
- ampie porzioni della testata del bacino sono inserite all'interno del **Parco Nazionale delle Foreste Casentinesi, Monte Falterona e Campigna** (fig. 2.1), quindi in un'area di protezione della risorsa idrica e di scarse interazioni antropiche (derivazioni, prelievi, sbarramenti) con un regime dei deflussi sufficientemente "naturale";

