

MENICHINI M. (2012) - A multidisciplinary approach to define the hydrogeological model of aquifer systems in the "Fiume Versilia" catchment and the adjacent coastal plain (Northwest Tuscany, Italy).

Riassunto

INTRODUZIONE E SCOPO DELLA RICERCA: In un contesto caratterizzato da una forte pressione antropica, con conseguenti fenomeni di degradazione delle varie matrici ambientali, tra cui quella idrica, molti dei sistemi acquiferi convenzionalmente sfruttati, con particolare riferimento a quelli delle pianure costiere, presentano condizioni di forte criticità, sia per la qualità delle acque, sia sotto l'aspetto delle quantità. In questo scenario si inserisce la presente ricerca che vede coinvolti sia i sistemi acquiferi costieri della pianura della Versilia che gli acquiferi carsici della zona montana prospiciente la pianura stessa. Generalmente gli acquiferi carsici costituiscono un'importante alternativa per l'approvvigionamento idrico sia per l'elevata qualità delle acque in essi contenuti, garantita anche da una limitata antropizzazione dei territori in cui questi generalmente si sviluppano, sia per i quantitativi idrici che questi sistemi sono in grado di contenere. I rilievi delle Alpi Apuane sono caratterizzati da ingenti risorse idriche (CIVITA et al., 1991, PICCINI et al., 1999) grazie all'elevata piovosità caratteristica dell'area, alla medio-alta permeabilità delle rocce presenti e, infine, all'elevato coefficiente di infiltrazione efficace, che, secondo alcuni autori (PICCINI et al., 1999) può arrivare fino al 75%. Nonostante la grande quantità di risorse idriche disponibili, l'area è caratterizzata da una rilevante densità di popolazione e di attività produttive, ovvero da un ingente fabbisogno idrico, particolarmente elevato durante la stagione turistica, peraltro coincidente col periodo di minimo idrologico. In questo contesto in passato si sono verificate ricorrenti crisi idriche sia in termini quantitativi che qualitativi, questi ultimi riconducibili anche al fenomeno dell'intrusione marina. Per far fronte a dette problematiche e per la protezione di tale risorsa è necessaria una gestione ottimale perseguibile solo attraverso una dettagliata conoscenza dei sistemi acquiferi in esame.

Lo scopo principale del presente studio è di definire un modello idrogeologico concettuale mediante un approccio multidisciplinare che veda coinvolte discipline geologico/stratigrafiche, idrogeologiche e geochimiche isotopiche sia per i sistemi acquiferi porosi della pianura costiera che per gli acquiferi carsici della zona montana. In particolare per gli acquiferi carsici della zona montana i due scopi principali consistono nella descrizione e modellazione dei processi di interazione acqua roccia e la definizione delle aree di alimentazione delle principali sorgenti carsiche. Per gli acquiferi porosi della pianura costiera lo scopo principale è quello di definire un dettagliato modello concettuale che sottolinei le principali componenti di alimentazione del sistema e i principali processi in atto. Sulla base del modello idrogeologico concettuale definito, è stato in seguito implementato e calibrato un modello di flusso in stato stazionario, sulla base del quale sarà possibile sviluppare un modello in stato transitorio, strumento utile per simulare scenari futuri per la pianificazione e gestione della risorsa idrica evitando un suo depauperamento sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo.

INQUADRAMENTO DELL'AREA: L'area di studio ricade nel settore nord-occidentale della Toscana e si sviluppa in particolare nel versante tirrenico del massiccio apuano che comprende il bacino montano del Fiume Versilia e la prospiciente pianura costiera. L'assetto geologico-strutturale delle Alpi Apuane si colloca nel contesto dell'orogenesi dell'Appennino Settentrionale che si sviluppa tra l'Oligocene superiore e il Pliocene nel corso di fasi tettoniche a carattere prima compressivo, o transpressivo, con sovrascorrimento delle unità interne su quelle esterne, e successivamente distensivo, a basso e ad alto angolo. L'Appennino settentrionale è una catena polifasica NE-vergente costituita dall'impilamento di unità tettoniche di derivazione parzialmente oceanica (Unità Liguri s.l.), tettonicamente sovrascorse sulle unità derivanti dalla deformazione del margine della placca Adria (Unità Toscane e Umbro-Marchigiane). In corrispondenza del massiccio apuano la Fase di raccorciamento tangenziale dell'Oligocene superiore - Aquitaniano genera la strutturazione di un edificio tettonico costituito dall'alto al basso, di sotto le Unità liguri (s.l.), dalla Falda Toscana, dall'Unità di Massa e dall'Unità delle Apuane (CARMIGNANI et al., 1978). A questa fase è da ricondurre il metamorfismo in facies scisti verdi delle unità inferiori (Unità di Massa e Unità delle Apuane) e il metamorfismo di grado molto basso (anchizona) della Falda toscana (CERRINA FERONI et al., 1983). Nel Miocene medio a una fase estensionale a basso angolo, a carattere probabilmente duttile nei livelli strutturali più profondi, è ricondotta la destrutturazione dell'edificio tettonico, con il denudamento e sollevamento del complesso metamorfico (CARMIGNANI & KLIGFIELD, 1990). Ancora non ben conosciuta nelle Apuane è la fase tardiva (Messiniano e Plio-Pleistocene) caratterizzata da sistemi di faglie ad alto angolo (MOLLI et al., 2010). Il principale acquifero è rappresentato dalla successione Grezzoni-Marmi dell'Unità delle Apuane caratterizzato da una permeabilità secondaria crescente per carsismo e di grado elevato, ed è stratigraficamente compreso tra un basamento praticamente impermeabile costituito da Filladi e Porfiroidi ed un tetto rappresentato da Diaspri con bassa permeabilità secondaria decrescente. Le complesse strutture a pieghe coricate e con asse molto inclinato fanno sì che il basamento cristallino abbia funzione di substrato impermeabile solo in aree ristrette, mentre costituisce uno sbarramento per molte delle sorgenti maggiori (PICCINI & PRANZINI, 1989; CIVITA *et al.*, 1991; BALDACCI *et al.*, 1993). Nella Falda Toscana le formazioni carbonatiche corrispondenti (Calcere Cavernoso- Breccie poligeniche, Calcere Massiccio e Maiolica) costituiscono un acquifero di potenzialità leggermente inferiore a causa di una minore permeabilità relativa e, principalmente, di spessori inferiori. Nell'area in studio sono presenti numerose sorgenti assimilabili a diverse tipologie di circolazione. Alcune sorgenti drenano acquiferi che si sviluppano principalmente nei detriti superficiali di versante o in rocce mediamente permeabili e sono caratterizzate generalmente da portate molto basse (< 10 l/s), altre sorgenti drenano

acquiferi ospitati in rocce carbonatiche di media/alta permeabilità con portate di alcune decine di l/s, spesso interessati da fenomeni di carsismo.

L'origine ed evoluzione della pianura costiera è legata alle fasi tardive della tettonica dell'Appennino settentrionale, quando, dal Miocene Superiore, tali strutture sono state interessate da una tettonica distensiva a larga scala che ha dato origine a strutture tipo "horst" e "graben". Le morfostrutture negative si sono realizzate principalmente attraverso un sistema di faglie dirette, con direzione appenninica (NW-SE), associate a sistemi secondari di faglie a carattere trascorrente con direzione antiappenninica. Il sistema acquifero della pianura è caratterizzato quindi da un'alternanza di depositi incoerenti di origine continentale, marino transizionale e marini, localmente in connessione idraulica con gli acquiferi in roccia della parte montana. La presenza di un'alternanza fra depositi caratterizzati da diversi gradi di permeabilità comporta la presenza di acquicludi, acquitardi e acquiferi e quindi nel complesso un sistema acquifero multistrato.

SISTEMI ACQUIFERI MONTANI: Le principali risorse idriche dell'area montana sono ospitate negli acquiferi carbonatici dell'Unità Apuana e della Falda Toscana, mentre acquiferi secondari sono ospitati nelle rocce fratturate non carbonatiche e nelle coperture di versante. Lo studio ha previsto una prima fase di ricerca bibliografica e analisi critica dei principali lavori idrogeologici e geochimici svolti nell'area (ORSINI, 1987; FORTI et al., 1990; DOVERI, 2000; CIVITA *et al.*, 1991; PICCINI *et al.*, 1999; MUSSI *et al.*, 1998; FST, 2002; DOVERI *et al.*, 2005; FST, 2005). Sono state, quindi, selezionate alcune sorgenti che drenano sia gli acquiferi carsici principali, sia gli acquiferi secondari minori. In particolare sono state condotte 2 campagne di campionamento nel 2009 e 1 nel 2010 per un totale di 49 campioni. Durante il periodo di campionamento sono stati, inoltre, prelevati 8 campioni di roccia rappresentativi delle formazioni costituenti l'acquifero, 2 campioni di stream sediments, 3 di piogge e 3 di particolato atmosferico (PM10). Questi ultimi campioni sono stati prelevati per lo studio dei processi d'interazione pioggia/particolato atmosferico, mentre i campioni di roccia sono stati raccolti per la caratterizzazione chimico-isotopica delle formazioni costituenti l'acquifero nello studio dei processi d'interazione acqua/roccia.

Per quanto riguarda le acque sono stati analizzati i contenuti dei componenti maggiori (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, NO₃ e SiO₂), alcuni minori e/o presenti a livello di tracce (B, F, Fe, Mn, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn) presso i laboratori dell'Istituto di Geoscienze e Georisorse (IGG) del CNR di Pisa; mentre le analisi per la determinazione dei rapporti isotopici della molecola dell'acqua (²H/¹H e ¹⁸O/¹⁶O) e del carbonio totale inorganico disciolto TDIC (¹³C/¹²C) sono state effettuate presso il centro Demokritos di Atene. Per quanto riguarda le rocce sono state effettuate le analisi chimiche per la determinazione dei componenti maggiori (Na₂O, MgO, Al₂O₃, SiO₂, P₂O₅, K₂O, CaO, TiO₂, MnO, Fe₂O₃), dei

componenti presenti a livello di tracce (As, Cr, Cu, Mn, Ni, Pb, Zn, Fe) e le analisi per la determinazione del rapporto isotopico $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$. Infine i filtri di particolato atmosferico sono stati analizzati al microscopio a scansione elettronica con rilevatore a raggi X (SEM-EDS, Scanning Electron Microscope – Energy Dispersive Spectrometer), effettuate presso il Centro Interdipartimentale di Microscopia e Microanalisi (MEMA) dell'Università di Firenze. Tale metodologia consente non solo di eseguire un'analisi circa la forma e la morfologia delle particelle, ma anche di effettuare un'analisi puntuale della composizione chimica delle particelle stesse raccolte sul filtro.

L'elaborazione dei dati relativi al particolato atmosferico hanno permesso di osservare che il particolato riflette effettivamente le litologie affioranti e che anche a tali altitudini (comprese fra 700-850 m) sono evidenti arricchimenti in K e Na dovuti probabilmente a fenomeni di inquinamento atmosferico. Per quanto riguarda l'interazione del particolato con le piogge non sembra esserci una chiara ed evidente interazione, poiché la composizione delle acque di pioggia è derivata quasi esclusivamente dallo spray marino.

Per quanto riguarda le sorgenti, sulla base delle composizioni chimiche delle acque campionate e sulla base di calcoli di speciazione, sono state identificate 3 principali facies chimiche: Ca-HCO₃, Ca-SO₄ e Na-Cl. Le prime due sono facies rappresentative di acque che hanno interagito con calcari e rocce evaporitiche per un tempo sufficientemente lungo per acquisire tale chimismo e per raggiungere le condizioni di saturazione o sovrasaturazione in calcite e dolomite. Le acque a Na-Cl mostrano invece una composizione chimica non molto diversa da quella delle acque di pioggia, anch'esse appartenenti a tale facies chimica, e sono indicative di acque che hanno interagito con rocce carbonatiche per un tempo non sufficiente a raggiungere le condizioni di saturazione rispetto la calcite e dolomite. I rapporti isotopici $^2\text{H}/^1\text{H}$ e $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ confermano l'origine meteorica delle acque; i diversi valori che si riscontrano sono dovuti essenzialmente alla diversa quota delle acque di infiltrazione che confluiscono alle sorgenti. Il rapporto isotopico $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ed i risultati ottenuti da una modellizzazione geochemica, che vede coinvolti sia il rapporto $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ che le concentrazioni in HCO₃ a partire da un'acqua meteorica locale per aggiunte di CO₂ biogenica e dissoluzione di una roccia carbonatica, individua due principali raggruppamenti di sorgente, confermando le due tipologie individuate precedentemente sulla base delle caratteristiche chimiche. In particolare è stato individuato un primo raggruppamento, assimilabile alle acque a Na-Cl descritte precedentemente, il cui TDIC è dovuto quasi esclusivamente all'aggiunta di CO₂ biogenica per interazione con i suoli, mentre una seconda tipologia, assimilabile alle acque a Ca-HCO₃ e Ca-SO₄, il cui TDIC è dovuto non solo ad interazione con i suoli, ma anche per dissoluzione della roccia carbonatica costituente l'acquifero, indicando quindi una interazione maggiore e quindi maggiori tempi di residenza in acquifero.

Per la modellizzazione dei processi di interazione acqua/roccia è stato utilizzato l'approccio del doppio reagente solido (ACCORNERO & MARINI, 2008; LELLI et al. 2008) seguendo due trend teorici, sistema aperto e sistema chiuso. Il progresso di reazione descrive la dissoluzione di una roccia media locale a seguito dell'interazione con la sorgente "FP", considerata come rappresentativa di una pioggia media locale. I trend teorici così prodotti sembrano spiegare le caratteristiche degli elementi chimici maggiori delle principali sorgenti in studio; tranne che per il magnesio, dovuto probabilmente alla forte variabilità di tale costituente nel reagente solido nel sistema naturale. Relativamente ai metalli in tracce (As, Fe, Ni, Zn) i trend teorici così calcolati non mostrano sostanziali incrementi in concentrazione di tali elementi nella soluzione acquosa per dissoluzione della roccia carbonatica, indicando che la loro presenza nelle acque non è dovuta alla dissoluzione di una roccia carbonatica media locale.

La seconda finalità prevista per gli acquiferi montani consiste nella individuazione e definizione dei bacini di alimentazione delle principali sorgenti carsiche mediante un approccio multidisciplinare (geologico/idrogeologico/geochimico isotopico). Sono stati quindi selezionati i 4 sistemi idrogeologici principali (Sistema Idrogeologico del M.Altissimo; Sistema Idrogeologico delle Mulinette/S.Anna; Sistema Idrogeologico del M.Corchia e Sistema Idrogeologico delle Sorgenti di Porta). È stato quindi inizialmente effettuato uno studio molto dettagliato della cartografia geologica disponibile in scala 1:10.000 della Regione Toscana e, se presenti, di lavori specifici svolti nelle aree suddette (MECCHERI et al., 2008). In particolare sono state realizzate numerose sezioni idrogeologiche trasversali e longitudinali rispetto alle direzioni di sviluppo delle principali strutture dei vari sistemi. Questa prima fase, che ha permesso di definire e ricostruire le geometrie delle principali idrostrutture, testimonia l'importanza che questa tesi riconosce alla geologia strutturale per una corretta analisi e definizione dei sistemi idrogeologici, non fermandosi all'adozione passiva delle soluzioni disponibili in letteratura, ma mediante lo sviluppo di interpretazioni geologiche originali sulla base della carta geologica e dei dati alla mesoscala disponibili. La ricostruzione delle principali idrostrutture ha permesso di delineare non solo le geometrie ed estensioni dei principali acquiferi, ma anche di identificare la possibile presenza di spartiacque idrogeologici non facilmente individuabili se non attraverso uno studio geologico-strutturale di dettaglio. Un ulteriore contributo per la definizione dei bacini di alimentazione è dato dalle prove di tracciamento effettuate nel passato (RONCIONI, 2002; COMITATO APUANE, 2007; STEINBERG et al., 2011; PICCINI et al., 2011) che permettono di verificare il collegamento idraulico fra la zona di immissione del tracciante e la zona di recapito. Infine per la conoscenza delle caratteristiche idrogeologiche dei sistemi carsici, come mostrato da numerosi lavori in letteratura (WOOD & SANFORD, 1995; MARFIA et al., 2004; DOVERI et al., 2005; TARRAGONI, 2006), un importante contributo può essere ottenuto con le applicazioni isotopiche. In riferimento

agli isotopi della molecola dell'acqua, veri e propri traccianti naturali, in studi volti alla definizione dei bacini di alimentazione è infatti possibile sfruttare a pieno la loro proprietà di variare i relativi valori nelle acque meteoriche in funzione della quota di precipitazione (FRITZ & FONTES 1980). La metodologia consiste nell'individuare le sorgenti caratteristiche di circuiti superficiali brevi rappresentative di acque meteoriche locali con bacini di alimentazione poco estesi e facilmente delineabili. Sulla base dei rapporti isotopici di queste sorgenti in funzione della quota media del bacino di alimentazione definito in base alle caratteristiche morfologiche e geologiche delle litologie affioranti è possibile calcolare la relazione lineare esistente fra queste due variabili. Sono state quindi considerate le sorgenti appartenenti alla facies a Na-Cl rappresentative di acque meteoriche medie locali individuate dall'elaborazione geochimica e sulla base del $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ descritta precedentemente e per ognuno di esse è stata calcolata la quota media del bacino di alimentazione ottenendo una relazione lineare descritta dalla seguente equazione: $\text{quota} = -579.09 * \delta\text{O}^{18}\text{‰} - 3356.3$ ($R^2 = 0.98$). Sulla base di questa relazione così individuata in funzione dei rapporti isotopici delle principali sorgenti carsiche è stato possibile calcolare la quota media del bacino di alimentazione. Riassumendo, le valutazioni scaturite dall'analisi geologico-strutturale, le prove di tracciamento reperite in letteratura e le quote media del bacino di alimentazione calcolate in base ai rapporti isotopici hanno permesso di delineare i bacini di alimentazione dei 4 sistemi idrogeologici selezionati. Le aree di alimentazione così individuate sono del tutto coerenti con i dati di portata delle sorgenti stesse, come è stato verificato per mezzo di considerazioni di bilancio basate sui dati idrometeorologici raccolti ed elaborati, nonché sui coefficienti d'infiltrazione efficace riportati nella letteratura (PICCINI et al., 1999) riguardante l'area apuana.

SISTEMI ACQUIFERI COSTIERI: I sistemi acquiferi della pianura costiera della Versilia sono stati oggetto di numerosi studi dagli anni '80 ad oggi (GIARDI et al., 1983, DUCHI & FERRARI, 1984; MUNETTI, 1985, FERRARI et al. 1987; SALVATORI, 1994, SALVATORI, 1997, TABBÌ, 1999; GIUNTINI, 1999; TESSITORE, 2002; PRANZINI, 2004, REGIONE TOSCANA, 2008). La totalità di questi studi, che fornisce un quadro conoscitivo piuttosto completo per quanto riguarda l'evoluzione nel tempo sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo, è risultata essere una solida base di partenza sulla quale è stato impostato il presente studio. Il primo passo è stato quello di ricostruire le geometrie del sottosuolo per definire il multistrato mediante l'utilizzo delle stratigrafie disponibili. In particolare sono state reperite oltre 500 stratigrafie, ma la maggior parte non sono risultate affidabili per quanto riguarda la descrizione delle litologie attraversate e raggiungono profondità non oltre i 10m. Sono state quindi selezionate poco meno di 100 stratigrafie sulla base delle quali sono state ricostruite 12 sezioni idrogeologiche (3 longitudinali e 9 trasversali rispetto la linea di costa) per la definizione di un modello idrostrutturale del multistrato.

Successivamente tutti i dati a disposizione e le sezioni stesse elaborate sono state implementate all'interno un software di modellizzazione idrogeologica (GMS) e sono stati ricostruiti i solidi e calcolati i volumi dei vari orizzonti che costituiscono il sistema. In particolare è stato individuato un orizzonte in affioramento nella fascia pedemontana e che si approfondisce andando verso la linea di costa. Tale orizzonte è costituito principalmente da ghiaie e sabbie con un'importante matrice limo-argillosa, caratterizzato quindi da una permeabilità medio/alta. Al di sopra di tale orizzonte, nella fascia intermedia e costiera della pianura è presente un'alternanza di depositi diversamente permeabili. La non continuità laterale e lo spessore generalmente ridotto degli interstrati poco permeabili comporta generalmente una connessione idraulica fra i vari acquiferi, costituendo nel complesso un acquifero monofalda. Laddove la presenza di tali interstrati consentirebbe una circolazione in diversi livelli, la frequente presenza di pozzi multifenestrati favorisce tuttavia uno scambio idrico tra i livelli stessi oltre che l'instaurarsi di un unico potenziale idraulico. La ricostruzione in 3D ha permesso di calcolare per ogni strato così individuato i volumi e la composizione granulometrica. Inoltre sulla base dello spessore saturo dei vari orizzonti, definito in base alle mappe piezometriche elaborate, e il valore di porosità efficace, sulla base delle percentuali granulometriche definite nella fase precedente, è stato possibile effettuare una stima dei volumi idrici immagazzinati.

Per la realizzazione delle mappe piezometriche sono state effettuate due campagne di misura dei livelli piezometrici per un totale di 83 misure nella stagione di morbida (aprile 2009) e 74 misure nella stagione di magra (settembre 2009). Dall'analisi della carta piezometrica elaborata si possono individuare sostanzialmente, per entrambe le stagioni, 3 minimi piezometrici di cui i primi due sono dovuti all'emungimento effettuato per scopi idropotabili di pozzi appartenenti alla rete dell'acquedotto e l'ultimo, quello più a sud, dovuto all'azione di bonifica ad opera delle idrovore. Inoltre è da evidenziare che nella parte pedemontana è presente una forte componente di alimentazione, soprattutto quella legata al conoide del Fiume Versilia, ma anche da parte del Torrente Montignoso, con un gradiente compreso tra il 2-3%. La zona intermedia e quella costiera invece hanno un gradiente molto più basso, generalmente inferiore 0.5%. Questa marcata differenza riflette le diverse condizioni dinamiche dell'acquifero: nell'area pedecollinare l'elevata trasmissività dell'acquifero comporta un flusso elevato, mentre nella fascia costiera e intermedia il flusso, se non è disturbato da pompaggi localizzati, riflette il basso gradiente topografico.

Per la caratterizzazione idrodinamica dell'acquifero è stata effettuata nel Maggio 2010 una prova di emungimento a portata costante in un pozzo ubicato nella parte centrale del conoide del F.Versilia. L'elaborazione dei dati raccolti ha permesso di definire i seguenti valori di trasmissività, permeabilità e coefficiente di immagazzinamento:

$$T = 1,4 \text{ E-}02 \text{ m}^2/\text{sec} \quad K = 2,7\text{E-}04 \text{ m/sec} \quad S = 7,1\text{E-}03$$

Inoltre sulla base delle caratteristiche idrodinamiche così definite e sulla base delle piezometrie appena descritte è stato possibile calcolare la portata dell'acquifero all'entrata in pianura che è risultata essere pari a 0.378 m³/s e 0.177 m³/s in periodo di morbida (aprile 2009) e periodo di magra (settembre 2009) rispettivamente.

In concomitanza con le misure dei livelli piezometrici sono state effettuate due campagne di misura dei parametri fisico-chimici (temperatura, conducibilità elettrica e pH) per 134 pozzi in aprile 2009 e 120 in settembre 2009. L'elaborazione di tali dati ha permesso di effettuare uno screening sull'intera area per quanto riguarda la qualità delle acque e in base alla quale pianificare le successive campagne di campionamento per analisi più specifiche. Inoltre durante questo primo periodo di campionamento sono state effettuati anche alcuni profili verticali in pozzi selezionati mediante una sonda multiparametrica per la misura della conducibilità elettrica e della temperatura al variare della profondità. Questi profili, anche se le caratteristiche tecniche dei pozzi disponibili non sempre erano favorevoli, hanno permesso di ottenere indicazioni relativamente alla profondità della zona di mescolamento fra acqua dolce/acqua di mare nell'area di Forte dei Marmi, che generalmente si attesta intorno ai 30 m.

Nel 2009 sono state effettuate due campagne di campionamento che ha previsto la raccolta di 16 campioni in aprile e 24 campioni a settembre in pozzi ubicati in prossimità dell'area di Forte dei Marmi. Nel 2010 è stata effettuata una ulteriore campagna che ha previsto la raccolta di 100 acque di pozzi distribuiti nell'intera area in studio per una caratterizzazione geochemica ed isotopica. Infine nel 2011 è stata effettuata una campagna specifica per studiare i rapporti fra le acque di falda e le acque dei principali corsi d'acqua che ha previsto la raccolta di campioni di acqua di falda (14 campioni) ubicati in prossimità dei corsi d'acqua e campioni dei corsi d'acqua stessi (12 campioni). Sui campioni raccolti durante tutte queste campagne sono state effettuate le analisi per la determinazione delle concentrazioni dei componenti maggiori (Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, NO₃ and SiO₂), alcuni minori e/o presenti a livello di tracce (B, F, Fe, Mn, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn) presso i laboratori dell'IGG del CNR di Pisa mentre le analisi per la determinazione dei rapporti isotopici della molecola dell'acqua (²H/¹H e ¹⁸O/¹⁶O) sono state effettuate presso il centro Demokritos di Atene.

L'elaborazione dei dati geochemici ha permesso di individuare le seguenti facies chimiche:

- acque a Ca-HCO₃. Le acque appartenenti a questa facies sono ubicate principalmente nella fascia pedecollinare e centrale dell'area in studio e sono riconducibili a dissoluzione di calcite, mentre nella fascia costiera le acque appartenenti a questa facies sono solo quelle prelevate dai pozzi con profondità minori di 10m.

- acque a Na-Cl-HCO₃, mix-Cl-HCO₃, mix-HCO₃ e Na-HCO₃ che sono attribuibili a fenomeni di freshening (APPELO & POSTMA, 1996; APPELO, 1996). Questi campioni sono localizzati nella fascia costiera e soprattutto in prossimità dell'abitato di Forte dei Marmi.
- acque a Na-Cl, campioni prelevati da pozzi ubicati lungo la linea di costa e con profondità generalmente maggiore di 30m. Le acque appartenenti a questa facies sono ovviamente interessate dal fenomeno dell'intrusione marina come mostrato anche dai diagrammi di correlazione fra i costituenti disciolti e cloruri.

L'elaborazione dei dati isotopici ha permesso di individuare le differenti componenti in gioco nel sistema acquifero in esame. In particolare è stata individuata una componente caratterizzata da bassi rapporti isotopici riconducibili ad acque infiltrate a quote maggiori e rappresentata principalmente dalle acque del Fiume Versilia (<-6.20 ‰). Il Fiume Versilia sembra alimentare in maniera predominante l'acquifero impostato sui depositi alluvionali del conoide del fiume stesso. Acque di falda che risentono di questa componente di infiltrazione sono state riscontrate sia nella zona pedecollinare che nella zona intermedia. Questa elevata estensione areale sottolinea l'importanza dell'apporto ad opera del conoide del Fiume Versilia e il Fiume Versilia stesso, in accordo con le indicazioni fornite dalle mappe piezometriche. Una ulteriore componente, anche se di minore entità rispetto alla precedente, è rappresentata dalle rocce carbonatiche permeabili che si attestano alla pianura e dagli apparati di conoide dei corsi d'acqua minori. I dati isotopici indicano, inoltre, una componente significativa rappresentata dalle acque meteoriche locali caratterizzata da un rapporto isotopico ben specifico (-5.4 o -5.7 ‰). Questo input è ben riconoscibile nella fascia costiera anche se talvolta è evidente anche nella parte più interna.

Lo studio dei dati isotopici ha contribuito, inoltre, ad investigare con maggiore dettaglio sia il fenomeno dell'intrusione marina, direttamente in acquifero o per infiltrazione dagli alvei dei corsi d'acqua, sia i rapporti fra i principali corsi d'acqua e la falda. In particolare è stato riscontrato un mescolamento con acque marine nei pozzi aventi una profondità maggiore di 25-30 m e ubicati in una fascia ampia circa 1 km dalla linea di costa. L'ingressione delle acque marine lungo gli alvei dei corsi d'acqua è particolarmente evidente lungo il Fiume Versilia che raggiunge la fascia intermedia per oltre 2 km dalla linea di costa con una percentuale di mescolamento all'altezza del Lago di Porta del 15%. Ingressione marina è evidente anche lungo il corso Fosso Motrone/Torrente Baccatoio per oltre 1 km dalla linea di costa. I dati geochimici ed isotopici indicano, inoltre, che i corsi d'acqua sono in connessione idraulica con l'acquifero. In particolare il Fiume Versilia sembra alimentare la falda dalla parte apicale del conoide fino alla zona dell'area del Lago di Porta e nella fascia costiera. Nell'area del lago di Porta il Fiume Versilia invece non risulta essere in connessione idraulica con l'acquifero probabilmente per la presenza dei depositi fini presenti in quest'area.

In conclusione, sulla base di considerazioni idrostrutturali, idrogeologiche e geochimiche isotopiche i principali input al sistema possono essere così riassunti:

- un' importante componente di alimentazione dal conoide del Fiume Versilia, essenzialmente alimentato dal fiume stesso;
- una componente meno importante che si sviluppa nei conoidi minori e ad opera di rocce carbonatiche permeabili che si attestano alla pianura
- un' importante componente dovuta ad acque meteoriche locali
- una componente di infiltrazione dai corsi d'acqua
- una componente marina, anche se di minore importanza, che si sviluppa sia direttamente dalla linea di costa in acquifero che indirettamente per infiltrazione dai corsi d'acqua.

Sulla base del modello idrogeologico concettuale delineato ed appena descritto è stato implementato un modello numerico in stato stazionario, utilizzando il codice di calcolo MODFLOW ad elementi finiti (HARBAUGH et al., 2000) e come interfaccia grafica il software Groundwater vistas 6. I risultati del processo di calibrazione confermano il modello concettuale delineate precedentemente, anche se in alcune zone la differenza fra il valore misurato e quello calcolato dal modello suggerisce la necessità di un ulteriore miglioramento. Questo è essenzialmente dovuto all'insufficiente e non omogenea distribuzione di alcuni tipi di dati, come ad esempio i parametri idraulici e logs stratigrafici. In seguito sarà possibile implementare un modello in stato transitorio, grazie anche alla quantità e qualità dei dati prodotti da questo studio.

CONCLUSIONI: I risultati ottenuti da questa ricerca non solo rivestono un importante interesse scientifico, ma possono anche fornire indicazioni pratiche ed utili per la protezione e corretta gestione della risorsa idrica. Per esempio il multidisciplinare approccio usato per la definizione dei bacini idrogeologici di alcune sorgenti carsiche della zona montana risponde alla necessità di definire le zone di protezione delle risorse idriche, come raccomandato dalle normative italiane e della Comunità europea. Sull'altro lato il modello concettuale/numerico ottenuto per i sistemi acquiferi della pianura costiera costituisce un importante strumento per una corretta pianificazione e regolamentazione dello sfruttamento della risorsa idrica, al fine di evitare un depauperamento sia in termini qualitativi che quantitativi di questa indispensabile risorsa.