

Impact of climate change on the water balance of the Apuo-Versilia plain aquifer (Tuscany, Italy)

Impatto del cambiamento climatico sul bilancio idrico dell'acquifero della pianura Apuo-Versiliese (Toscana, Italia)

Giovanni Pranzini, Francesco Di Martino, Ester Della Santa, Katia Fontanelli, Gianni Fucci

Riassunto: Gli autori hanno redatto il bilancio idrico dell'acquifero multistrato della Pianura Apuo-Versiliese, Province di Lucca e Massa-Carrara, estesa per circa 152 km². Il bilancio idrico, relativo all'anno medio del triennio 2010-2012, comprende sia i termini naturali sia quelli antropici. La disponibilità di dati ha permesso di calcolare con buona approssimazione alcuni termini (infiltrazione areale, emungimenti, perdite della rete acquedottistica e delle fognature) mentre altri (infiltrazione dai corsi d'acqua, pompaggi dei sistemi di bonifica) sono stati calcolati con metodologie pensate ad hoc ma con poca validazione. Il bilancio si chiude con un saldo positivo fra le entrate e le uscite di circa 56 milioni di mc l'anno, che è stato considerato corrispondere al deflusso dalla falda al mare meno l'intrusione marina: questo termine non può essere calcolato con i dati disponibili ed è stato

assunto come termine incognito. Conseguentemente il bilancio è approssimativo, ma ha permesso comunque di stimare gli effetti del cambiamento climatico per due decenni del prossimo futuro (2030-2040 e 2050-2060) secondo due scenari di emissione, RCP4.5 e RCP8.5: la ricarica si ridurrebbe del 11% nel 2036 e del 15% nel 2056. Per questi bilanci di previsione, in assenza di elementi attendibili, abbiamo considerato stabili i valori dei termini antropici, ma è probabile che il cambiamento climatico, che comporta anche un aumento dell'intrusione marina, causi un maggiore ricorso alle acque di sottosuolo, con possibile alterazione dell'equilibrio testimoniato finora dalla sostanziale stabilità dei livelli piezometrici nella Pianura.

Keywords: water balance, coastal aquifer, Apuo-Versilia Plain, climate change.

Parole chiave: bilancio idrico, acquifero costiero, pianura Apuo-Versiliese, cambiamento climatico.

Giovanni PRANZINI ✉

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze
giovanni.pranzini@gmail.com

Francesco DI MARTINO

Ester DELLA SANTA
Gaia S.p.A. Servizio Idrico Toscana
francesco.dimartino@gaia-spa.it
ester.dellasanta@gaia-spa.it

Katia FONTANELLI

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze
katiafontanelli@gmail.com

Gianni FUCCI

Consulente attività di pianificazione e asset management di Gaia S.p.a
gfucci21@gmail.com

Ricevuto/Received: 12 June 2020-Accettato/Accepted: 27 September 2020
Pubblicato online/Published online: 30 September 2020

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© Associazione Acque Sotterranee 2020

Abstract: The authors drafted the water balance of the multi-layer aquifer of the Apuo-Versilia Plain, (Provinces of Lucca and Massa-Carrara) extending for about 152 km². The water budget, relating to the average year of the period 2010-2012, includes both natural and anthropic terms. Availability of data allowed to calculate with a good approximation some terms (rain water infiltration, groundwater pumping, losses of aqueduct pipelines and sewers) while others (infiltration from water courses, draining of land reclamation systems) have been calculated with methods designed ad hoc but with poor validation. The budget closes with a positive balance of 56 million m³/year, which correspond to the outflow from the aquifer to the sea minus the marine intrusion: there is no data to calculate this term, which we have taken as the unknown term of the balance equation. Therefore, the budget is rough, but it allowed us to estimate the effects of climate change for two decades in the near future (2030-2040 and 2050-2060) according to two emission scenarios, RCP4.5 and RCP8.5: the recharge would be reduced 11% in 2036 and 15% in 2056. In these budgets, we have not considered the variations in anthropic terms because we have no elements to predict them. Climate change, which also will bring about an increasing of marine intrusion, will probably cause a greater use of groundwater. This could alter the balance of the hydrogeological system, which has so far shown a substantial stability, as demonstrated by the monitoring of piezometric levels in the Plain.

Introduzione

Il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze ha eseguito, fra il 2014 e il 2016, una ricerca per conto di Gaia S.p.A., ente gestore del Servizio Idrico Integrato della Conferenza Territoriale n.1 "Toscana Nord" (province di Massa-Carrara e Lucca), avente come finalità la valutazione delle risorse idriche sotterranee del territorio di competenza, anche in relazione al cambiamento climatico in atto (Università di Firenze DST, 2016). La ricerca fa parte degli studi promossi da Gaia e finalizzati alla redazione di uno strumento (Master Plan) di pianificazione delle risorse e delle infrastrutture del servizio idrico integrato sull'intera area in gestione, nel medio e lungo periodo (25 e 40 anni).

Uno studio approfondito ha riguardato l'acquifero multistrato della Pianura Apuo-Versiliese, che costituisce la maggiore risorsa idrica del comprensorio di competenza Gaia. Per valutare l'impatto del cambiamento climatico sulla risorsa idrica sotterranea è stato redatto il bilancio idrico dell'acquifero per il triennio 2010-2012, per poi ricalcolarlo inserendo i dati di precipitazione e temperatura previsti per i decenni 2031-2040 e 2051-2060 e secondo due diversi scenari di emissione dei gas serra. Questi dati climatici sono stati forniti dal Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura dell'Università di Parma, che ha svolto una ricerca parallela relativa alle risorse idriche di superficie (Università di Parma DICATeA 2016).

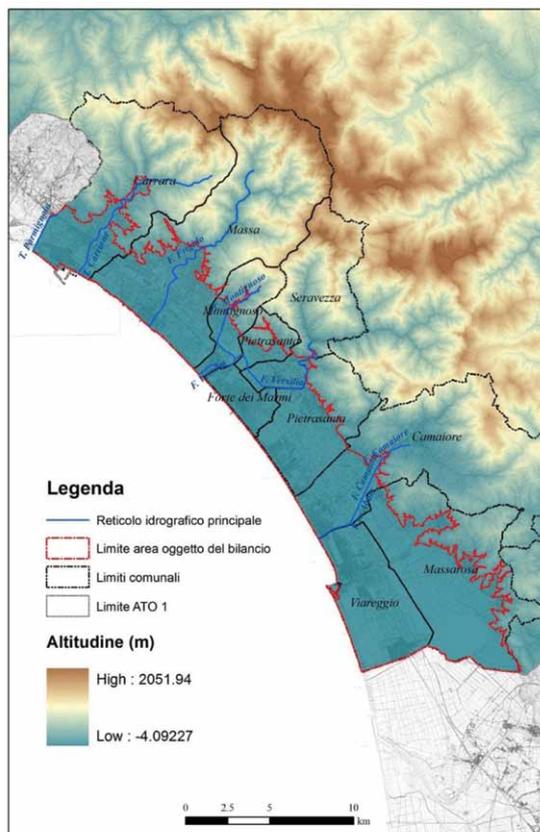


Fig. 1 - La Pianura Apuo-Versiliese interessata dal bilancio idrico.

Fig. 1 - The Apuo-Versilia Plain covered by the water balance.

Inquadramento geologico e idrogeologico

La Pianura costiera Apuo-Versiliese (Fig. 1), di seguito anche solo "Pianura", è lunga circa 34 km ed ha una larghezza che passa da 3 km circa a Carrara a 8 km a Viareggio. La superficie è di circa 152 km². Il Fiume Versilia separa la Riviera Apuana dalla Versilia.

La Pianura corrisponde a un graben formatosi probabilmente nel Miocene superiore e tuttora in subsidenza. La costruzione della pianura è avvenuta sia per l'accumulo dei materiali portati dai corsi d'acqua che scendono dalle Apuane sia per l'apporto di sabbia dall'Arno e dal Magra, sabbia distribuita dalle correnti lungo costa e dal drift litoraneo. Nel Quaternario, fasi di subsidenza rapida alternate a fasi di prevalenza dell'apporto sedimentario e variazioni del livello marino legate alle fasi glaciali e interglaciali, hanno determinato la successione di sedimenti continentali (ghiaie, sabbie e limi) con depositi marini (soprattutto sabbie).

La Figura 2 mostra la geologia della Pianura, semplificata a partire dalla Carta Geologica Regionale.

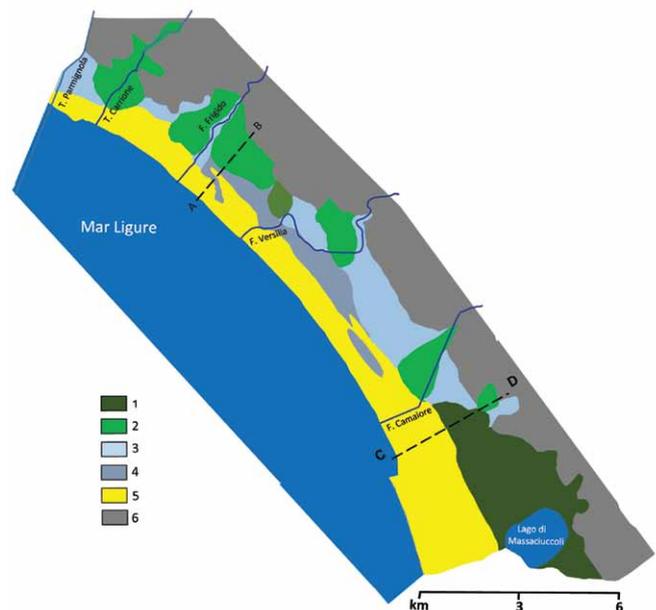


Fig. 2 - Carta Geologica semplificata della Pianura Apuo-Versiliese. Sono riportate le tracce delle sezioni della Fig.3. 1- Depositi palustri e lagunari: argille e limi con torba. 2 - Depositi di conoide e Depositi alluvionali terrazzati: ghiaie e ciottoli, a luoghi fortemente cementati, e sabbie. 3 - Depositi alluvionali attuali e recenti: sedimenti eterometrici dove prevale la frazione grossolana (ghiaie) rispetto alla frazione medio e fine (sabbie, argille e limi). 4 - Depositi alluvionali di colmata: sedimenti a grana prevalentemente fine, deposti nelle aree topograficamente depresse. 5 - Sabbie eoliche e marine: nella parte interna, le sabbie sono intercalate da sottile strisce di limi, deposti nelle fasce interdunali. 6 - Rocce consolidate delle Alpi Apuane.

Fig. 2 - Simplified Geological Map of the Apuo-Versilia Plain. A-B, C-D: traces of the sections (in Fig.3). 1-Marshy and lagoon deposits: clay and silt with peat. 2 - Conoid deposits and terraced alluvial deposits: gravel and pebble, somewhere cemented, and sand. 3 - Current and recent alluvial deposits: heterometric sediments where the coarse fraction (gravel) prevails over the medium and fine fraction (sand, clay and silt). 4 - Flood deposits: mainly fine-grained sediments, deposited in topographically depressed areas. 5 - Aeolian and marine sand: in the inner part, thin strips of silt deposited in the interdunal belts are present. 6 - Consolidated rocks of the Apuan Alps.

La fascia interna della Pianura è formata dai conoidi alluvionali dei fiumi che provengono dalle Apuane. Nella Riviera Apuana i conoidi sono terrazzati, con scarpate alte fino a 8 m. Procedendo verso SE questa fascia di depositi fluviali diminuisce di larghezza fino a annullarsi. La fascia intermedia della Pianura è quella topograficamente più bassa, in certe zone al disotto del livello marino. È formata da argille, anche con torba, e corrisponde alle aree lagunari e paludose isolate dal mare a seguito dello sviluppo dei cordoni sabbiosi litorali e delle dune. Le aree umide sono state in massima parte “bonificate”, restano solo il Lago di Massaciuccoli e il piccolo Lago di Porta. La fascia litorale è costituita da sabbie marine ed eoliche. Nella Versilia, la fascia intermedia si allarga fino ad arrivare ai contrafforti delle Apuane, in conseguenza della maggiore subsidenza della Pianura procedendo verso SE.

Nonostante il sollevamento del livello marino, la Pianura ha visto un rapido aumento di superficie durante gli ultimi 4000 anni come conseguenza della deforestazione e dell'introduzione dell'agricoltura, che hanno causato un aumento dell'erosione delle terre e un forte incremento della portata solida dei corsi d'acqua. La tendenza all'avanzamento si è invertita con la costruzione del porto di Marina di Carrara negli anni '20 del secolo scorso, che ha provocato l'interruzione del trasporto litoraneo dei sedimenti da nord. L'estrazione di inerti in alveo del Fiume Magra iniziata nel dopoguerra ha peggiorato ulteriormente la situazione. Attualmente siamo di fronte a

un'erosione delle spiagge che da Marina di Carrara procede verso SE piuttosto velocemente, nonostante gli interventi eseguiti, ed in parte anche a causa di questi.

Nel sottosuolo della Pianura è presente un acquifero multistrato potente alcune centinaia di metri. Nella fascia interna le ghiaie e sabbie alluvionali, intercalate da limi e più raramente da argille, formano un acquifero di alta permeabilità e trasmissività. Scendendo verso il litorale, i depositi di conoide s'immergono sotto i depositi di colmata o direttamente sotto le sabbie marine, meno permeabili, formando un unico acquifero. Nella parte SE della Pianura, le stratigrafie indicano la presenza delle “Sabbie inferiori” (Fig. 3), a testimoniare due fasi trasgressive.

Nella fascia interna l'acquifero è sfruttato dai pozzi dell'acquedotto pubblico e da quelli delle industrie. Le sabbie marine della fascia esterna sono interessate soprattutto da pozzi ad uso agricolo o domestico.

Nella Pianura sono state effettuate diverse ricostruzioni piezometriche parziali (Giardi et al. 1983; Serretti 1983; Materozzi 1991; Geoser 1995; Salvatori 1997) e quella di Pranzini (2004) riguarda tutta la pianura del Bacino Toscana Nord, da Carrara a Camaiore. La Regione Toscana (2008) ha eseguito, nella stessa area, il monitoraggio piezometrico biennale (aprile e settembre) dal settembre 2002 all'aprile 2009. Tutte le ricostruzioni hanno evidenziato la presenza di una superficie piezometrica unica, con deflusso verso il mare. In Versilia, l'ampia zona della bonifica ha la superficie piezometrica costantemente sotto il livello del mare, fino a più di un metro. Un forte depressione piezometrica ha interessato per molti anni l'area industriale fra Massa e Carrara. Negli ultimi 25 anni, la crisi dell'industria e il relativo abbandono delle attività hanno fatto notevolmente ridurre la depressione. Il confronto fra le ricostruzioni piezometriche dei diversi anni mostra che, negli ultimi 30 anni il livello di falda in alcune zone si è abbassato mentre in altre è rimasto più o meno lo stesso o è risalito per effetto della riduzione dei pompaggi.

L'intrusione marina interessa soprattutto la Versilia, a causa della depressione piezometrica. Il confronto fra le diverse ricostruzioni della salinità dell'acqua di falda (Giardi et al. 1983; Salvatori e Spandre 1995; Cortopassi 1998; Giuntini 1999; Tabbi 1999; Ferrari et al. 1999; Pranzini 2002 e 2004; Doveri 2004; Tambellini 2008; Regione Toscana 2008) indicano che, fino ad ora, non si registra una chiara tendenza all'incremento della salinizzazione delle acque.

Materiali e metodi

Il bilancio idrico

Il bilancio idrico di un acquifero sotterraneo comprende sia componenti naturali (infiltrazione delle acque meteoriche, evapotraspirazione, afflussi e deflussi sotterranei) sia componenti antropici (infiltrazione da irrigazione, emungimenti, perdite delle reti acquedottistiche e della rete fognaria). Per un acquifero esteso, è praticamente impossibile misurare direttamente questi componenti del bilancio, ma si possono stimare con diverso grado di approssimazione che rendono difficile stabilire se, in particolare, un acquifero è

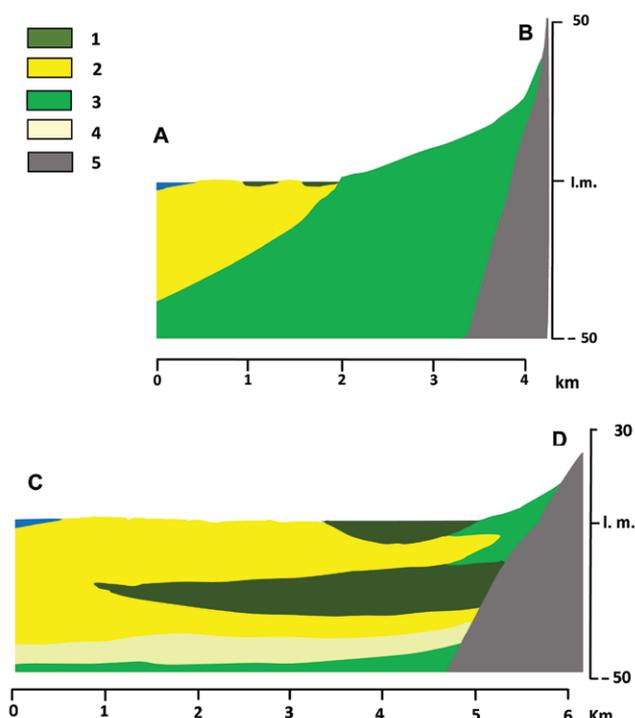


Fig. 3 - Sezioni geologiche semplificate. 1 - Depositi palustri e lagunari. 2 - Sabbie Superiori: sabbie eoliche e marine 3 - Depositi di conoide e alluvionali. 4 - Sabbie Inferiori: sabbie marine limose. 5 - Rocce delle Alpi Apuane.

Fig. 3 - Simplified geological sections. 1 - Marshy and lagoon deposits. 2 - Upper sands: aeolian and marine sand. 3 - Conoid and alluvial deposits. 4 - Lower sands: silty marine sand. 5 - Rocks of the Apuane Alps.

sovrasfruttato o meno. La risposta la fornisce con maggiore affidabilità il monitoraggio piezometrico: se la superficie piezometrica dell'acquifero tende ad abbassarsi negli anni è evidente che i prelievi idrici non sono compensati dalla ricarica.

Il bilancio redatto si riferisce all'anno medio 2010-2012 perché per questo triennio Gaia S.p.A. ha fornito i dati delle "idroesigenze", ovvero dei prelievi misurati o calcolati dalle acque sotterranee per ciascun comune della Pianura, oltre alle perdite delle reti acquedottistica e fognaria. Questa condizione ci ha suggerito di redigere il bilancio per ciascuna area dei nove comuni e la scelta operata ha permesso di valutare meglio alcuni termini del bilancio e di evidenziare le aree con diversa entità della risorsa idrica. Il calcolo dei valori distribuiti è stato eseguito in ambiente GIS su celle di 100 m di lato e con un approccio analitico mediante una stima dei valori per ogni voce del bilancio.

Alcuni termini del bilancio sono stati calcolati con una metodologia elaborata ad hoc, in relazione alla particolarità del contesto. Pur registrandosi una approssimazione della stima, si osserva che l'obiettivo era quello di valutare gli effetti del cambiamento climatico sulla risorsa idrica, quindi si è preferito redigere un bilancio, seppure approssimativo, invece di limitarsi a valutare la variazione della ricarica su una risorsa indefinita.

Per gli acquiferi della Pianura il bilancio è dato dalla seguente equazione simbolica, nella quale i termini di sinistra rappresentano le entrate e quelli di destra le uscite:

$$Ia + Av + Ac + Ica + As + Pa + Im = Dca + Ds + Dm + Pi + Em \pm \Delta R$$

dove le entrate in unità di misura congruenti sono:

- Ia = infiltrazione diretta delle acque di pioggia;
- Av = acque di ruscellamento sui versanti che alimentano la falda nella fascia pedecollinare;
- Ac = apporti dal substrato calcareo confinante con la pianura;
- Ica = infiltrazione negli alvei dei corsi d'acqua;
- As = apporti sotterranei dalle falde dai settori dei Comuni confinanti;
- Pa = perdite delle reti acquedottistiche e fognarie;
- Im = intrusione delle acque dal mare.

Le uscite sono:

- Dca = drenaggio da parte dei corsi d'acqua;
- Ds = deflusso sotterraneo verso le falde dei Comuni confinanti;
- Pi = prelievi delle idrovore della bonifica idraulica;
- Em = emungimenti dei pozzi;
- Df = drenaggio della falda da parte della rete fognaria;
- Dm = deflusso sotterraneo al mare;
- ΔR = variazione della riserva nei tre anni di studio considerati.

Alcuni termini del bilancio (Ia, Av, Ica, Dca,) sono stati calcolati utilizzando i dati idrologici forniti dal gruppo dell'Università di Parma DICATeA (2016). Altri (Pa, Em, Df) sono stati inseriti o calcolati sulla base del documento di Gaia

S.p.A. "Sintesi dei Prelievi Medi 2010-2012", che riporta per ciascun comune i prelievi dei pozzi acquedottistici, le perdite delle condutture e le portate delle acque fognarie. Per il calcolo di alcuni termini è stato utilizzato il modello concettuale dell'acquifero costruito dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze (Rapporto conclusivo 2016) per conto di Gaia. Il modello è basato su 230 log stratigrafici, 181 dei quali presenti nel data base della Regione Toscana (<http://sira.arpato.toscana.it/sira/>) e 49 reperiti allo scopo. In particolare, i valori del coefficiente di conducibilità idraulica K ottenuti per i diversi intervalli litostratigrafici dei 230 log sono stati utilizzati per calcolare le infiltrazioni in falda (Ica), il drenaggio della falda (Dca) e dei corsi d'acqua e i deflussi sotterranei da un settore comunale all'altro (As e Ds).

Dato che nel documento di Gaia sopra riportato i valori sono espressi in milioni di m³ con tre decimali, per omogeneità anche tutti gli altri valori dei termini del bilancio sono stati espressi nello stesso modo.

la: Infiltrazione diretta dell'acqua di pioggia

L'infiltrazione è stata calcolata tramite i coefficienti d'infiltrazione efficace

$$Cie = I / (P - E)$$

utilizzando i valori distribuiti delle precipitazioni e dell'evapotraspirazione per il triennio 2010-2012 forniti dal Gruppo di ricerca dell'Università di Parma. I coefficienti Cie (Tab.1) per le diverse unità geologiche della Pianura sono tratti dallo studio di Pranzini (2004).

Nelle aree col terreno coperto da manufatti (tetti, strade, piazzali cementati), una parte dell'acqua meteorica viene raccolta dal reticolo idrografico e dalla rete fognaria senza

Tab. 1 - Valori del coefficiente d'infiltrazione efficace per le diverse unità geologiche della Pianura.

Tab. 1 - Values of the effective infiltration coefficient for the different geological units of the Plain.

	Formazione geologica <i>Geologic Unit</i>	Granulometria <i>Grain size</i>	Cie
b	Depositi alluvionali attuali	b) Ghiaia prevalente	0.50
		c) Ghiaia e sabbia	0.45
		d) Sabbia prevalente	0.40
bna	Depositi alluvionali recenti terrazzati e non	b) Ghiaia prevalente	0.45
		c) Ghiaia e sabbia	0.40
		d) Sabbia prevalente	0.35
		e) Sabbia e limo	0.20
		f) Limo e argilla prevalenti	0.15
bnb	Depositi alluvionali terrazzati	g) Ghiaia con limo	0.25
		c) Ghiaia e sabbia	0.35
da	Depositi eolici	e) Sabbia e limo	0.25
		g) Ghiaia con limo	0.30
		Senza descrizione	
e2a	Depositi lacustri	a) Sabbia prevalente	0.60
e3a	Depositi palustri		0.75
g2a	Depositi di spiaggia		0.15
			0.08
			0.90

infiltrarsi; pertanto il Cie è stato moltiplicato per 0.5 nelle aree urbane e per 0.7 nelle aree miste, cioè quelle urbane con spazi verdi pari ad almeno il 40% del totale (Civita et al.1999). I valori distribuiti dell'infiltrazione media annua sono nella Fig.4 e, per ogni comune, nella Tab.2.

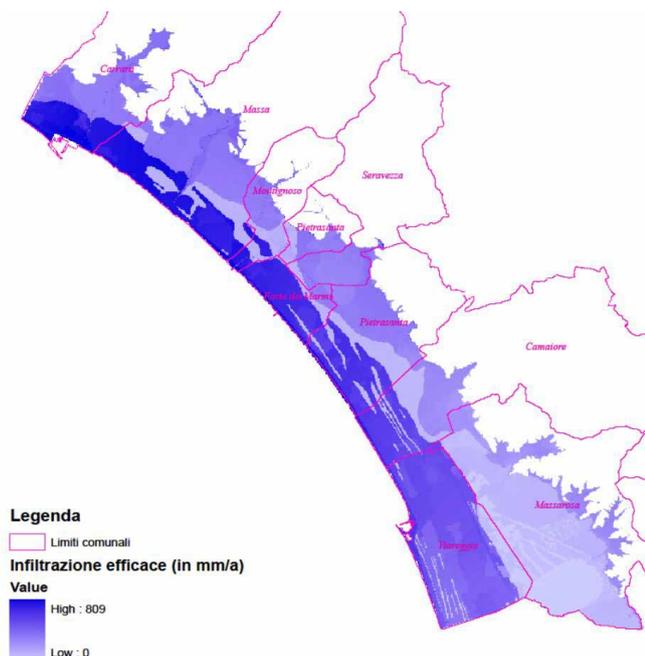


Fig. 4 - Infiltrazione efficace nella Pianura, valore medio 2010-2012 (mm/a).

Fig. 4 - Effective infiltration in the Plain, average value 2010-2012 (mm/y).

Tab. 2 - Infiltrazione annua nelle aree comunali, valore medio del triennio 2010-2012.

Tab. 2 - Infiltration in municipal areas, average value 2010-2012.

Comune Municipality	Area, km ² Area, km ²	Infiltrazione, Mm ³ /a Infiltration, Mm ³ /y
Camaiore	15.976	3.468
Carrara	17.114	4.839
Forte dei marmi	8.879	3.095
Massa	30.911	8.584
Massarosa	42.338	2.742
Montignoso	6.875	1.456
Pietrasanta centro *	16.294	5.135
Pietrasanta Strettoia	8.217	0.566
Seravezza	5.993	1.077
Viareggio	32.267	8.563
TOTALE	184.864	39.525

* Il Comune di Pietrasanta è diviso in due parti da quello di Seravezza

Av: Apporto del ruscellamento dai versanti.

Dalle rocce che delimitano un acquifero alluvionale arriva, per ruscellamento superficiale e deflusso ipodermico, un contributo di alimentazione non trascurabile. Il calcolo di questo apporto si può fare se si dispone di ricostruzioni

piezometriche dettagliate e di valori attendibili della permeabilità dei depositi marginali della pianura, applicando la legge di Darcy ad una sezione dell'acquifero parallela al contatto. Capecchi e Pranzini (2001), avendo calcolato con questo metodo il valore di Av per alcune pianure alluvionali del bacino dell'Arno, hanno osservato che il volume delle precipitazioni cadute in una fascia di 100 m delle rocce incassanti (in proiezione sull'orizzontale, cioè misurati sulla cartografia), meno l'evapotraspirazione, corrisponde grosso modo al volume calcolato con la legge di Darcy. Questo metodo è stato applicato per il bilancio idrico in oggetto:

1. per ogni comune è stato calcolato in ambiente GIS lo sviluppo del margine della pianura;
2. questa lunghezza è stata moltiplicata per 100 m;
3. l'area così ottenuta è stata moltiplicata per il valore di P-Er relativo alla media annua del triennio.

I contributi dai versanti, così calcolati (Tab. 3), non comprendono i deflussi sotterranei dalle rocce permeabili che delimitano la pianura, che sono calcolati nel successivo parametro Ac.

Tab. 3 - Apporto d'acqua di ruscellamento dai versanti, media annua del triennio 2010-2012.

Tab. 3 - Water supply from the slopes runoff, annual average 2010-2012.

Comune Municipality	Area, km ² Area, km ²	P-Er, Mm ³ /a P-Er, Mm ³ /y
Camaiore	8.417	0.369
Carrara	23.659	1.534
Massa	23.747	1.551
Massarosa	52.840	2.008
Montignoso	10.686	0.711
Pietrasanta Centro*	11.457	0.880
Pietrasanta Strettoia	10.616	0.410
Seravezza	3.154	0.222
TOTALE	144.576	7.685

* Il Comune di Pietrasanta è diviso in due parti da quello di Seravezza

Ac: Apporti dal substrato calcareo delle Alpi Apuane

Le formazioni geologiche che affiorano al contatto con i sedimenti della pianura hanno diverso grado di permeabilità. Il contributo all'alimentazione alle falde della pianura delle rocce a permeabilità bassa (Filladi, Metaquarziti) o media (Macigno, Rosso Ammonitico) è trascurabile e comunque possiamo ritenere che sia inclusa nel termine Av precedente. Può essere invece consistente l'apporto diretto dai calcari, permeabili sia per fessure che per carsismo (Marmi, Grezzoni, Calcari Selciferi). Questo apporto è stato calcolato, per ogni affioramento di rocce carbonatiche a contatto con la Pianura (Fig. 5), calcolando l'infiltrazione efficace in questi affioramenti e sottraendo la portata delle sorgenti alimentate da detta infiltrazione. Si è tenuto anche conto degli studi precedenti sulle risorse idriche dei complessi carbonatici delle Alpi Apuane (Forti et al. 1989; Piccini et al. 1997 e 2000). In qualche caso il calcolo è approssimativo perché sono incerte,

e comunque non aggiornate al triennio 2010-2012, le portate delle sorgenti. I valori sono riportati nella Tab.4.

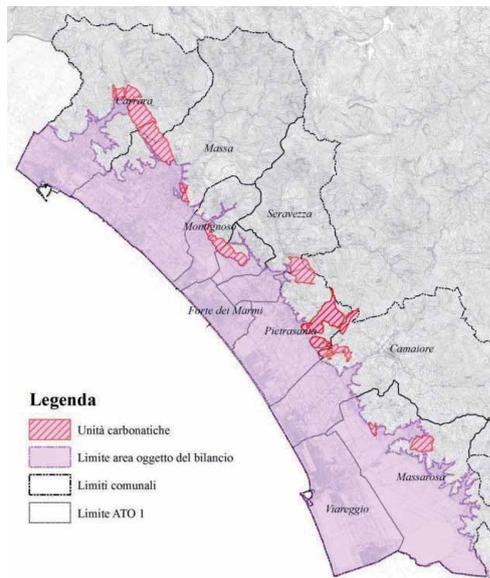


Fig. 5 - Affioramenti di rocce carbonatiche a contatto con i depositi della Pianura.

Fig. 5 - Outcrops of carbonate rocks in contact with the Plain's deposits.

Tab. 4 - Apporto d'acqua di ruscellamento dai versanti, media annua del triennio 2010-2012.

Tab. 4 - Water supply from the slopes runoff, annual average 2010-2012.

Comune Municipality	Apporto, Mm ³ /a Contribution, Mm ³ /y
Camaiore	0.275
Carrara	1.426
Massa	0.844
Massarosa	0.201
Montignoso	1.325
Pietrasanta Centro*	0.984
Pietrasanta Strettoia	0.883
Seravezza	0.703
TOTALE	6.641

* Il Comune di Pietrasanta è diviso in due parti da quello di Seravezza

Altri apporti sotterranei arrivano probabilmente all'acquifero dai vasti affioramenti di calcari delle Alpi Apuane, oltre quelli confinanti con la Pianura. Tuttavia gli studi idrogeologici sulle Alpi Apuane (Baldacci et al. 1993; Pranzini e Buchignani 2002) concordano con l'ipotesi di un flusso idrico profondo diretto in prevalenza verso SE, seguendo le strutture con direzione appenninica. Perciò riteniamo che verso la pianura Apuo-Versiliese defluisca una parte minore, comunque non attualmente quantificabile con i dati a disposizione. È inoltre probabile che una parte di questo flusso profondo arrivi al mare passando al di sotto dell'acquifero per il quale si è calcolato il bilancio idrico, il cui spessore non supera i 100 m.

Ica: Infiltrazione negli alvei dei corsi d'acqua.

Dca: Drenaggio della falda da parte dei corsi d'acqua

I corsi d'acqua che scorrono in una pianura sono generalmente in comunicazione idraulica diretta con la falda freatica. L'andamento delle isofreatiche nella fascia di terreno ai lati del corso indica se il fiume drena o alimenta la falda, anche se si hanno variazioni stagionali del loro rapporto. Inoltre interventi in alveo possono cambiare la permeabilità del letto e quindi il tasso d'infiltrazione. Ne è un esempio il Fiume Frigido: nel 2002 il suo alveo fu ripulito dalla marmettola (detriti fini scaricati dalla lavorazione del marmo) che lo intasava parzialmente; i risultati furono evidenti nell'incremento di produzione dei pozzi in prossimità del fiume e nel fatto che, in condizioni di magra, al mare arriva ora un deflusso molto inferiore a quello che c'era prima dell'intervento.

La difficoltà di arrivare ad una valutazione corretta degli scambi fiume-falda è dimostrata dai valori molto diversi che Autori diversi hanno fornito per l'infiltrazione del Fiume Versilia:

- Cavazza and Geoscienze (1984): Versilia dallo sbocco in pianura alla zona paludosa del Lago di Porta, 2,5 Mm³/a;
- Salvatori (1994): infiltrazione nell'alveo del Versilia, 63,2 Mm³/a;
- Pranzini (2004): infiltrazione nell'alveo del Versilia, 18,6 Mm³/a.
- Tessitore (2004): infiltrazione nell'alveo del Versilia, 6,16 Mm³/a.
- Menichini (2012): infiltrazione nell'alveo del Versilia, 1,58 Mm³/a; drenaggio, 0,084 Mm³/a.

Tessitore e Menichini hanno ottenuto i loro valori da un modello numerico dell'acquifero.

Nel presente studio non è stato possibile eseguire misurazioni nel tempo della portata dei fiumi nella Pianura, quindi è stato necessario ricorrere a un metodo di calcolo indiretto, di seguito descritto.

Le ricostruzioni piezometriche del monitoraggio 2003-2009 della Regione Toscana nella Pianura Apuo-Versiliese non tengono conto della quota degli alvei fluviali, ma solo dei livelli misurati nei pozzi. Quindi non permettono di distinguere i tratti di fiume drenanti o alimentanti la falda. Per la distinzione abbiamo dovuto usare le piezometrie del 1999 (Pranzini 2004), che invece raccordano le isofreatiche con la quota degli alvei fluviali. La Figura 6 mostra la ricostruzione primaverile in Versilia. Si ritiene che i rapporti fiume-falda non siano cambiati di molto in 10 anni, avendo verificato che, negli stessi pozzi, i livelli idrici del 2009 non sono molto diversi da quelli del 1999.

Inoltre, per verificare la connessione idraulica fiumi-falda, è stato fatto il confronto fra la quota degli alvei fluviali e la soggiacenza distribuita della falda, parametro utilizzato per la redazione della Carta della Vulnerabilità all'Inquinamento della Pianura (Pranzini et al. 2019).

Al loro arrivo in pianura i tre corsi d'acqua principali (Carrione, Frigido e Versilia) e il Canale di Montignoso incidono i depositi alluvionali terrazzati e, per un primo

tratto, l'alveo si trova a una quota più bassa della superficie freatica circostante: una situazione che comporta il drenaggio della falda da parte dei fiumi. Procedendo verso la costa, la situazione s'inverte perché gli alvei fluviali si trovano circa alla stessa quota del piano di campagna e la superficie freatica è depressa dai pompaggi: quindi i corsi d'acqua alimentano l'acquifero. Più verso valle gli alvei fluviali diventano pensili rispetto alla superficie freatica, che infatti non risulta influenzata dal loro corso. Solo nel tratto finale, dove i corsi d'acqua attraversano le sabbie eoliche della fascia costiera, i fiumi sono in equilibrio con la falda o la drenano.

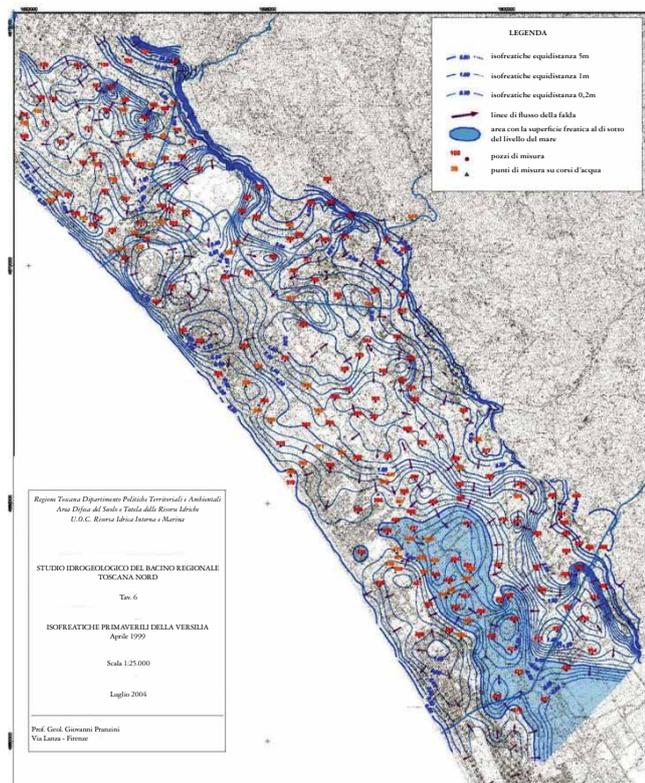


Fig. 6 - Carta delle isofreatiche in Versilia, Aprile 1999, m s.l.m. (Pranzini 2004).

Fig. 6 - *Isophreatic Map of Versilia, April 1999, m a.s.l.. (Pranzini 2004).*

Il Torrente Parmignola alimenta la falda nel suo tratto entro il comune di Carrara. Il Fiume Camaiole, nel suo tratto di pianura (nel quale prende il nome di Fosso dell'Abate), ha

un percorso rettilineo artificiale e le isofreatiche non ne sono influenzate. Si può presumere che, avendo perso la connessione idraulica con il proprio paleo alveo, esso scorra sui terreni poco permeabili del primo strato di terreno, quindi che si fossa infiltrare poca acqua in falda.

Per il calcolo delle portate infiltrate o drenate nei diversi tratti fluviali è stata applicata la legge di Darcy

$$Q = K \cdot S \cdot i$$

dove (in unità di misura congruenti):

- K è la conducibilità idraulica dei terreni su cui scorre il corso d'acqua (non dell'alveo);
- S è la superficie bagnata dell'alveo fluviale;
- i è il gradiente idraulico medio della falda nell'intorno del corso d'acqua

I valori di K utilizzati sono quelli della Carta delle Permeabilità realizzata per la redazione della Carta di Vulnerabilità della Pianura (Pranzini et al. 2019) in base alla composizione granulometrica ripresa da 336 stratigrafie. I corsi d'acqua che percorrono la Pianura hanno generalmente un alveo ghiaioso, quindi molto permeabile; ma il flusso idrico fra il subalveo e l'acquifero è condizionato dalla permeabilità di quest'ultimo, che è minore e quindi condiziona la velocità del flusso.

Per il calcolo della superficie bagnata S nei diversi tratti fluviali, sono state fatte più osservazioni dirette durante la stagione estiva e sono state eseguite misure indirette dalle immagini di Google Earth. Con le stesse immagini da satellite sono stati misurati i tratti con caratteristiche omogenee.

Per la larghezza S della superficie bagnata sono stati usati due valori diversi per ciascun semestre, considerato che la portata dei fiumi è di norma maggiore nel semestre da novembre ad aprile. I gradienti idraulici delle piezometrie di morbida e di magra sono stati utilizzati per il calcolo dell'infiltrazione di 6 mesi ciascuno.

Nei tratti in cui i corsi d'acqua risultano disconnessi dalla falda, una certa infiltrazione dall'alveo si verifica comunque: Un calcolo approssimativo è stato fatto assegnando un tasso d'infiltrazione (m^3/km), sulla base delle esperienze fatte su altri corsi d'acqua della Toscana (Capecchi e Pranzini 1986, Pranzini 1990, Landini e Pranzini 1991, Pranzini 2004a).

La Tab. 5 contiene i valori ottenuti per i sei corsi d'acqua considerati; quelli minori non dovrebbero incidere in maniera significativa nel bilancio idrogeologico.

Tab. 5 - Bilancio idrico dei corsi d'acqua, Mm^3/a .

Tab. 5 - *Water balance of the rivers, Mm^3/y .*

	Parmignola	Carrione	Frigido	Montignoso	Versilia	Camaiole
alimenta la falda <i>feeds groundwater</i>	1.268	23.814	18.206	0.407	12.143	1.360
drena la falda <i>drains groundwater</i>		14.734	6.618	0.473	2.665	
saldo <i>balance</i>	-1.268	-9.080	-11.588	0.066	-9.478	-1.360

Tab. 6 - Volumi d'acqua drenati o infiltrati dai corsi d'acqua nei comuni, Mm³/a.Tab. 6 - Volumes of water drained by the rivers or infiltrated in the river's bed in the municipal territories, Mm³/y.

	Carrara	Massa	Montignoso	Pietrasanta Strettoia	Pietrasanta Centro	Seravezza	Forte dei Marmi	Camaioere
drenati <i>drained</i>	5,637	5,558	1.060		2,325	1,332		
infiltrati <i>infiltrated</i>	15,985	18,206	1,063	0,875	4,627	1,951	2,125	1,360
saldo <i>balance</i>	10.348	12.648	0.003	0,875	2,302	0,619	2,125	1,360

As: Apporto sotterraneo dalle aree dei Comuni confinanti**Ds: Deflusso sotterraneo ai comuni confinanti**

I due termini corrispondono al volume d'acqua dell'acquifero della Pianura che passa da un comune all'altro. Questo volume non è molto grande dato che il flusso di falda prevalente è dalle Alpi Apuane verso il mare, quindi per lo più circa parallelo ai limiti comunali. Fa eccezione il confine fra il comune di Forte dei Marmi e i comuni di Pietrasanta e Seravezza, che è circa parallelo alla linea di costa, nonché quello fra i comuni di Massarosa e Viareggio.

Il calcolo è stato fatto con il metodo seguente:

- individuazione e misura dei tratti nei quali l'andamento delle isopiezometriche indica un flusso di falda non parallelo al limite comunale; sono state considerate le due ricostruzioni piezometriche più recenti, ottobre 2008 e aprile 2009;
- calcolo del flusso con la relazione di Darcy $Q = K \cdot S \cdot i$ in unità di misura congruenti, dove:
 - K è il valore medio del coefficiente di conducibilità idraulica nella sezione, ricavato dal modello concettuale dell'acquifero multistrato della Pianura;
 - S è la sezione di flusso, pari al prodotto del tratto considerato per 100 m (spessore dell'acquifero assunto nel modello);
 - i è il gradiente idraulico medio nella sezione.

Sono stati calcolati due valori: uno con la piezometria di magra (ottobre 2008), uno con quello di morbida (aprile 2009), presi ciascuno per una durata di 6 mesi. Nel bilancio è stata assunta la somma dei due valori (Tab.7).

Tab. 7 - Flussi di falda attraverso i limiti comunali (Mm³/a), media dei valori calcolati con le piezometrie di ottobre 2008 e di aprile 2009.Tab. 7 - Groundwater flows through the municipal limits (Mm³/y), average of the values calculated with October 2008 and April 2009 piezometric contours.

Flussi di falda fra i comuni <i>Underground flow between the municipalities</i>	Mm ³ /a <i>Mm³/y</i>
Da Carrara a Massa	0.450
Da Montignoso a Massa	0.237
Da Seravezza a Forte dei Marmi	0.462
Da Viareggio a Massarosa	0.700

Pa: Perdite delle condotte degli acquedotti.

Le perdite della rete acquedottistica danno un contributo di alimentazione non trascurabile alle falde, specie nelle aree urbane. Gaia S.p.A. ha fornito il valore delle perdite nella Pianura Apuo-Versiliese: il totale è di 20,648 Mm³/a (Tab. 8). Ma non tutta quest'acqua arriva ad alimentare la falda, perché una parte viene ripresa dai condotti fognari, di solito posti a quota inferiore rispetto a quelli dell'acquedotto. Ai fini del bilancio abbiamo considerato tutte le perdite come infiltrazione alla falda; nei termini in uscita del bilancio abbiamo poi considerato il termine Df, drenaggio della falda da parte della rete fognaria, assumendo i valori stimati dalla stessa Gaia S.p.A.

Poiché il comune di Pietrasanta è diviso in due aree da quello di Seravezza, Pietrasanta Strettoia e Pietrasanta Città, le perdite degli acquedotti sono stati divisi in maniera proporzionale alle aree.

Tab. 8 - Perdite d'acqua della rete degli acquedotti.

Tab. 8 - Water losses by the aqueduct network.

Comune <i>Municipality</i>	Perdite, Mm ³ /a <i>Losses, Mm³/y</i>
CARRARA	5.218
MASSA	6.226
MONTIGNOSO	0.691
PIETRASANTA Centro	1.668
PIETRASANTA Strettoia	0.269
FORTE DEI MARMI	1.677
SERAVEZZA	0.696
CAMAIERE	1.047
MASSAROSA	1.221
VIAREGGIO	1.935
TOTALE	20.648

Im: Intrusione dal mare.

L'ingressione di acqua marina nell'acquifero della Pianura è dimostrata dalla salinità dell'acqua di falda, soprattutto in Versilia. Ma il fenomeno è complesso, perché altri meccanismi, oltre al classico cuneo salino, concorrono a questa salinità: risalita di acqua di mare lungo i fiumi e i canali, drenaggio di acqua connata dai sedimenti marini a granulometria fine.

Gli scambi d'acqua fra l'acquifero e il mare non possono essere calcolati con i dati disponibili. Sarebbe necessario avere informazioni dettagliate del sottosuolo in corrispondenza della linea di costa: ricostruzione idrogeologica (stratigrafia e parametri idrodinamici) fino alla base del sistema acquifero, posta a profondità molto maggiore di quella raggiunta dalle stratigrafie disponibili; distribuzione verticale della salinità dell'acqua. Di conseguenza, la differenza fra l'acqua che defluisce al mare nel sottosuolo e quella che entra dal mare è stata assunta come saldo del presente bilancio. Nell'analisi del bilancio, questo saldo sarà confrontato con la situazione idrogeologica dei tratti costieri dei Comuni per una conferma qualitativa.

Per quanto riguarda le uscite del bilancio idrico. Il drenaggio della falda da parte dei corsi d'acqua Dca e il deflusso sotterraneo alle falde dei comuni confinanti Ds sono stati già considerati insieme con le corrispondenti entrate.

Pi: Prelievi delle idrovore di bonifica idraulica.

Ampie aree della Pianura, soprattutto in Versilia, sono morfologicamente depresse e attraversate da una rete di "canali delle acque basse", che drenano la falda freatica. Gli impianti idrovori sollevano queste acque e le immettono nei "canali delle acque alte" che le portano al mare. Gaia S.p.A. ha fornito l'ubicazione delle idrovore e la loro funzione: sollevamento delle acque meteoriche o di bonifica idraulica (Fig. 7). Infatti ci sono impianti che sollevano solo le acque di pioggia dalle aree topograficamente depresse.

Per gli impianti della Riviera Apuana non ci sono dati relativi alle portate sollevate. Per i 14 impianti del Consorzio di Bonifica Versilia-Massaciuccoli telecontrollati sono disponibili, per un periodo più o meno completo che comprende gli anni dal 2004 al 2013, le seguenti informazioni

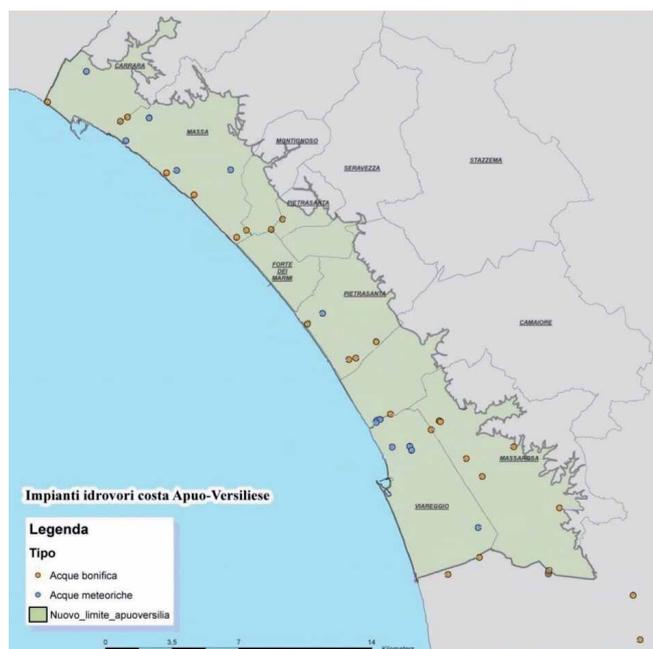


Fig. 7 - Impianti idrovori della Pianura Apuo-Versiliese.

Fig. 7 - Hydraulic remediation plants of the Apuo-Versilia Plain.

ad intervalli di 15 o 30 minuti: livello di aspirazione, livello di scarico e potenza assorbita dalle pompe.

Partendo da questi dati sono stati fatti alcuni tentativi per calcolare la portata sollevata da alcuni impianti e per anni diversi (Tessitore 2004; Autorità di Bacino del Fiume Serchio 2007; Università di Parma DICATeA 2016) ma con risultati molto diversi, anche del 100%, per gli stessi anni e gli stessi impianti.

Ai fini del bilancio del sistema acquifero della Pianura, occorre comunque considerare che gli impianti di bonifica idraulica raccolgono anche le acque meteoriche del bacino idrografico sotteso. Per il bilancio della falda della pianura, occorre quindi sottrarre dai volumi sollevati quelli di origine meteorica, come effettuato da Tessitore (2004) per due aree di bonifica (Tab. 9).

Tab. 9 - Volumi d'acqua sollevati (m^3) nel periodo aprile 2002-aprile 2003 da due sistemi di bonifica (Tessitore 2004).

Tab. 9 - Volumes of water raised (m^3) in the period April 2002-April 2003 by two hydraulic remediation systems (Tessitore 2004).

Impianti <i>Remediation plants</i>	Acqua da ruscellamento <i>Runoff water</i>	Acqua di falda <i>Groundwater</i>	Totale <i>Total</i>
Bonifica (Quadrellara, Mandriato, Teso e Magazzeno)	7.518.000	3.166.520	10.684.520
Bonifica ex Porta Nord (Fossetto e Ranocchiaia)	4.530.750	2.900.000	7.430.750

Quindi, le acque di falda sarebbero state circa il 30% del totale sollevato dagli impianti della Bonifica e il 39% dagli impianti della Bonifica ex Porta Nord. Le acque di falda sarebbero il 42% di quelle di ruscellamento nel primo impianto e il 64% nel secondo. Secondo Tessitore (comunicazione orale), il prelievo dalla falda così calcolato è risultato molto vicino a quello fornito dal modello numerico dell'acquifero.

A partire da questi dati è stata fatta una stima dei volumi sollevati dagli impianti di bonifica idraulica. Il calcolo è stato fatto come segue:

1. Delimitazione dei bacini idrografici dei canali delle "acque basse" che fanno capo ad una stessa idrovora o gruppo di idrovore; per gli impianti del Consorzio di Bonifica Versilia-Massaciuccoli era disponibile (ora non più) la rete dei canali delle "acque basse" (Regione Toscana: <http://www.regione.toscana.it/-/consorzi-di-bonifica-reticolo-idrografico-e-di-gestione>), mentre per quelli della Riviera Apuana la delimitazione è stata fatta sia utilizzando il dettaglio del reticolo idrografico alla scala 1:2000 e relative quote topografiche (Regione Toscana: <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>), sia seguendo su Google Earth i canali delle "acque basse" a partire dagli impianti idrovori.
2. Calcolo del ruscellamento medio annuo 2010-2012 nei bacini delimitati, come differenza fra la risorsa idrica disponibile P-Er e l'infiltrazione efficace: è l'acqua meteorica che arriva alle idrovore.

3. Calcolo del volume d'acqua di falda sollevato dalle idrovore, moltiplicando il volume dell'acqua meteorica per un fattore compreso fra 0,3 e 0,7, diverso per le diverse situazioni morfologico-idrauliche: il valore è massimo nelle aree sotto il livello del mare con la minima soggiacenza della falda; il valore è minimo nelle aree meno depresse e con la maggiore soggiacenza, dove probabilmente l'acqua di falda sale fino ai canali delle acque basse solo per pochi mesi nell'anno. La soggiacenza distribuita della superficie freatica era stata calcolata per la redazione della Carta di Vulnerabilità (Pranzini et al. 2019).

I volumi di acqua di falda sollevati nei diversi impianti sono stati assegnati ai diversi comuni di appartenenza (Tab. 10). Per il solo comune di Massarosa, nel quale si trova il sistema delle idrovore del Lago di Massaciucoli, il dato è stato ricavato per differenza dagli altri termini: il territorio comunale non arriva al mare quindi non ha un saldo di bilancio da attribuire al

Tab. 10 - Volumi annui medi dell'acqua di falda sollevati dalle idrovore nel triennio 2010-2012.

Tab. 10 - Average annual volumes of groundwater raised by the water pumps in the period 2010-2012.

Volumi di acqua di falda sollevati <i>Groundwater volumes raised</i>	Mm ³ /a <i>Mm³/y</i>
CARRARA	0.108
MASSA	1.296
MONTIGNOSO	0.668
PIETRASANTA CENTRO	3.076
PIETRASANTA STRETTOIA	0.161
FORTE DEI MARMI	1.360
SERAVEZZA	0.157
CAMAIORE	1.355
MASSAROSA	5.955
VIAREGGIO	1.605
TOTALE	15.741

Tab. 11 - Prelievi d'acqua da pozzi nella Pianura, Mm³/a.

Tab. 11 - Water withdrawals from wells in the Plain, Mm³/y.

Comune <i>Municipality</i>	Acquedotto <i>Civil water supply</i>	Agricoltura <i>Agriculture</i>	Orti e giardini <i>Truck farms and gardens</i>	Stabilimenti balneari <i>Bathing facilities</i>	Industrie idroesigenti <i>Water-demanding industries</i>	Totale <i>Total</i>
Camaiole		0.386	0.114	0.261	0.020	0.781
Carrara	1.886	0.026	0.227	0.124	2.490	4.753
Forte dei Marmi		0.011	0.035	0.148	0.031	0.223
Massa	5.873	0.043	0.243	0.269	2.417	8.845
Massarosa	0.433	0.097	0.075		0.081	0.685
Montignoso	1.272	0.013	0.034	0.035	0.216	1.569
Pietrasanta-Centro	1.941	0.029	0.084	0.214	0.625	2.894
Pietrasanta-Strettoia	2.860	0.004	0.011	0.028	0.080	2.983
Seravezza	1.840	0.010	0.040		0.512	2.403
Viareggio		0.546	0.245	0.294	0.048	1.133
TOTALE	16.105	1.164	1.107	1.372	6.520	26.269

deflusso al mare e non ci sono corsi d'acqua i cui scambi con la falda costituiscono il termine di maggiore incertezza.

Em: Emungimenti di acqua dai pozzi

I dati sono stati forniti da Gaia S.p.A. con il documento "Sintesi dei Prelievi Medi 2010-2012", che riporta i prelievi da acque sotterranee degli 8 Comuni della pianura costiera, divisi per categorie di utenza e/o di uso. Gaia ha calcolato, per questi Comuni, i prelievi dei soli pozzi situati nella pianura (Tab. 11).

Df: Drenaggio da parte della rete fognaria

Fra i termini in entrata del bilancio sono state considerate tutte le perdite dell'acquedotto Pa, anche se una parte viene ripresa dalle condotte fognarie e quindi non alimenta la falda. Gaia S.p.A. ha calcolato le acque "parassite" raccolte dalla rete fognaria, riuscendo anche a separare quelle da pioggia da quelle da infiltrazioni dalla falda; queste ultime sono riportate nella Tabella 12.

Tab. 12 - Volumi di acqua di falda drenati dalle condotte fognarie.

Tab. 12 - Groundwater volumes drained from sewer pipes.

Comune <i>Municipality</i>	Mm ³ /a <i>Mm³/y</i>
CAMAIORE	5.218
CARRARA	6.226
FORTE DEI MARMI	0.691
MASSA	1.668
MASSAROSA	0.269
MONTIGNOSO	1.677
PIETRASANTA-CENTRO	0.696
PIETRASANTA-STRETTOIA	1.047
SERAVEZZA	1.221
VIAREGGIO	1.935
TOTALE	20.648

Quindi, la differenza fra le perdite degli acquedotti e le infiltrazioni dalla falda nella rete fognaria Df corrisponde al saldo netto del contributo della rete degli acquedotti alle falde della pianura.

ΔR: Variazione della riserva

Per calcolare questo termine sarebbero necessarie le ricostruzioni piezometriche all'inizio e alla fine del periodo del bilancio, che non sono disponibili, ma si dispone solo del monitoraggio freaticometrico della Regione Toscana di 5 piezometri, la cui distribuzione è disomogenea nell'area di studio.

Osserviamo che sia i piezometri con i livelli piezometrici superficiali (Fig. 8), sia quello che registra un livello più profondo (Unimin, Fig. 9), mostrano variazioni legate all'andamento delle precipitazioni, ma i livelli iniziali e finali sono sostanzialmente gli stessi.

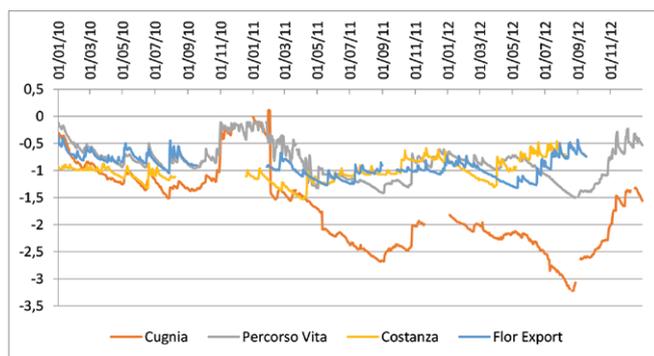


Fig. 8 - Livelli idrici della prima falda in 4 piezometri del sistema di monitoraggio della Regione Toscana.

Fig. 8 - Water levels of the first aquifer in 4 piezometers of the monitoring system of the Tuscany Region.

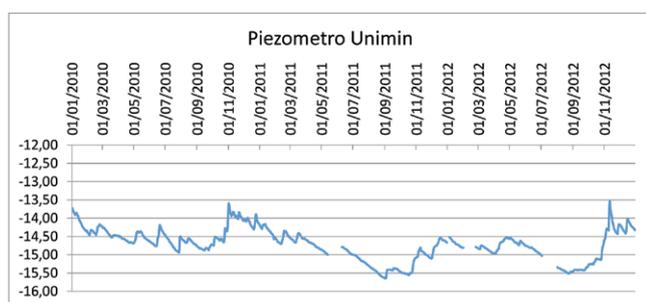


Fig. 9 - Livello idrico di un acquifero confinato del sistema di monitoraggio della Regione Toscana.

Fig. 9 - Water level of a confined aquifer of the monitoring system of the Tuscany Region.

Fa eccezione il piezometro Cugnia (Tab. 13), che registra un abbassamento di circa un metro dal gennaio 2010 al dicembre 2012 (Fig. 8). È probabile che l'abbassamento sia dovuto all'incremento di pompaggio nei pozzi gestiti da Gaia S.p.A., molto vicini al piezometro (Tab. 13).

Tab. 13 - Volumi estratti dai pozzi di Cugnia.

Tab. 13 - Volumes pumped by the Cugnia wells.

Volumi estratti dai pozzi di Cugnia Volumes pumped by the Cugnia wells			
	2010	2011	2012
Mm ³ /a			
Mm ³ /y	2.590	2.669	2.866

In conclusione, i livelli di falda sono cambiati di poco nel triennio di stima del bilancio idrico, almeno nei pozzi monitorati, quindi possiamo ritenere che la riserva idrica non abbia subito una significativa variazione; pertanto nel bilancio possiamo trascurare numericamente la sua variazione ΔR .

Dm: Deflusso sotterraneo al mare

Tutta l'acqua di falda che non viene prelevata artificialmente (pozzi, idrovore, drenaggio delle fognature) o naturalmente (drenaggio da parte dei corsi d'acqua, evaporazione dalle aree di affioramento della falda) viene convogliata al mare. Come descritto per il termine Im, intrusione marina, i dati a disposizione non permettono un calcolo, seppure approssimativo, dei volumi d'acqua coinvolti. Quindi, nel presente bilancio idrico, il saldo corrisponde alla differenza fra l'acqua che defluisce al mare attraverso l'acquifero di sottosuolo e l'acqua di mare che entra nell'acquifero.

Risultati

La Tabella 14 sintetizza il bilancio idrico dell'acquifero della Pianura per ogni comune. Il bilancio dell'intero acquifero della Pianura Apuo-Versiliese vede un saldo positivo di circa 56 Mm³/a, pari al 46% delle entrate, che dovrebbe corrispondere alla differenza fra il deflusso a mare e l'intrusione marina. Osserviamo che i saldi di bilancio sono relativamente piccoli per i due territori comunali che non hanno contatto col mare: Pietrasanta Strettoia (12% delle entrate) e Seravezza (5% delle entrate). Questo fa ritenere che i bilanci "comunalmente" non siano lontani da valori sufficientemente approssimati, nonostante che alcuni parametri siano stati calcolati con criteri e parametri derivanti dall'esperienza degli Autori.

Un altro elemento che giustifica questa conclusione è che i saldi dei Comuni affacciati sul mare, corrispondenti ai deflussi al mare, sono coerenti con la situazione idrogeologica della Pianura. Infatti, i maggiori deflussi "specifici" (volume di flusso per km di costa) sono dei comuni della Riviera Apuana, specialmente quello di Carrara, mentre in Versilia sono nettamente inferiori (Fig. 10). Questo è in accordo con la situazione idrogeologica, che vede una superficie piezometrica più alta e con maggiore gradiente idraulico nella fascia costiera apuana rispetto a quella della Versilia. Poco al largo del porto di Carrara sono segnalate zone in mare con acqua poco salata e più fredda in estate: si tratta evidentemente di sorgenti sottomarine. È probabile che buona parte del deflusso a mare avvenga in corrispondenza dei depositi di ciottoli fluviali della trasgressione Wurmiana, quando il mare era circa 100 m più basso dell'attuale.

Tab. 14 - Sintesi del bilancio idrico dei territori comunali.

Tab. 14 - *Sintesis of water balance of the municipal areas.*

	area Km ²	Entrate, Mmc/a <i>In, Mcmly</i>							TOTALE
		Ia	Av	Ac	Ica	As	Pa	Im	
Camaioere	15.976	3.468	0.369	0.275	1.360		1.047	?	6.519
Carrara	17.114	4.839	1.534	1.426	15.985		5.218	?	29.003
Forte dei Marmi	8.879	3.095			2.125	0.462	1.677	?	7.359
Massa	30.911	8.584	1.551	0.844	18.206	0.687	6.226	?	36.098
Massarosa	42.338	2.742	2.008	0.201		0.700	1.221	0	6.872
Montignoso	6.875	1.456	0.711	1.325	1.063		0.691	?	5.245
Pietrasanta Centro	21.111	5.135	0.880	0.984	4.627		1.668	?	13.294
Pietrasanta Strettoia	3.400	0.566	0.410	0.883	0.875		0.269	0	3.003
Seravezza	5.993	1.077	0.222	0.703	1.951		0.696	0	4.649
Viareggio	32.267	8.563					1.935	?	10.498
TOTALE	184.863	39.525	7.685	6.641	46.192	1.849	20.648	?	122.540

	area Km ²	Uscite, Mmc/a <i>Out, Mcmly</i>							Saldo, Mmc/a <i>Balance Mcmly</i>
		Dca	Ds	Pi	Em	Df	Dm	TOTALE	
Camaioere	15.976			1.355	0.781	1.072	?	3.208	3.311
Carrara	17.114	5.637	0.450	0.108	4.753	1.468	?	12.416	16.587
Forte dei Marmi	8.879			1.360	0.223	0.884	?	2.467	4.892
Massa	30.911	5.558		1.296	8.845	1.334	?	17.033	19.065
Massarosa	42.338			5.955	0.685	0.232	0	6.872	0.000
Montignoso	6.875	1.060	0.237	0.668	1.569	0.067	?	3.601	1.644
Pietrasanta Centro	21.111	1.332		3.076	2.894	1.369	?	8.671	4.623
Pietrasanta Strettoia	3.400			0.161	2.983	0.220	0	3.364	-0.361
Seravezza	5.993	1.332	0.462	0.157	2.403	0.065	0	4.419	0.230
Viareggio	32.267		0.700	1.605	1.133	1.027	?	4.465	6.033
TOTALE	184.863	14.920	1.849	15.741	26.269	7.738	?	66.516	56.024

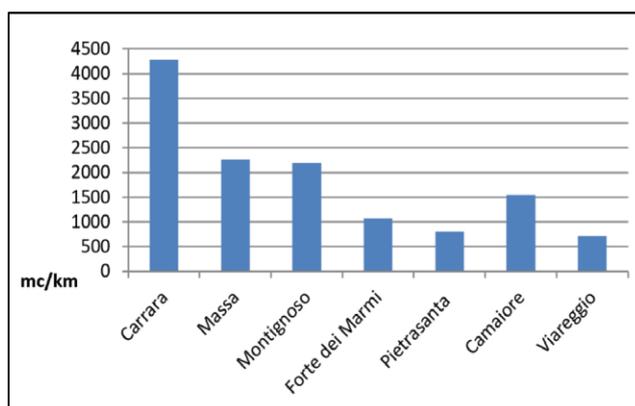


Fig. 10 - Deflusso "specifico" a mare (deflusso idrico/lunghezza della costa) dai comuni.

Fig. 10 - *Specific outflow to the sea (water outflow /length of the coast) from the municipalities.*

Bilanci di previsione

Il Gruppo di ricerca dell'Università di Parma ha fornito i file raster contenenti i valori di precipitazione ed evapotraspirazione reale prodotti dai modelli climatici, con riferimento all'area di competenza Gaia S.p.A. e ai due scenari di emissione RCP4.5 e RCP8.5 (Representative Concentration Pathway). Gli orizzonti temporali sono il decennio 2031-2040 (anno di riferimento 2036) e il decennio 2051-2060 (anno di riferimento 2056) (International Panel on Climate Change 2001). Pertanto gli scenari di previsione sono 4. Tutti prevedono un aumento della temperatura e una riduzione delle precipitazioni. Con tali raster è stato calcolato in ambiente GIS il valore distribuito di P-Er dell'area del bilancio idrico e ricalcolati i termini che dipendono dalla ricarica meteorica: l'infiltrazione areale Ia, l'apporto dai versanti Av e l'apporto dai calcari Ac. Per i corsi d'acqua, il saldo fra l'infiltrazione Ica e il drenaggio Dca è stato calcolato applicando la riduzione percentuale della infiltrazione areale.

Pur con le approssimazioni dovute ai valori del bilancio precedentemente illustrati, per effetto della riduzione della ricarica il saldo positivo si ridurrebbe, come media dei due scenari di emissione considerati, dell'11% nel 2036 e del 15% nel 2056 (Fig. 11).

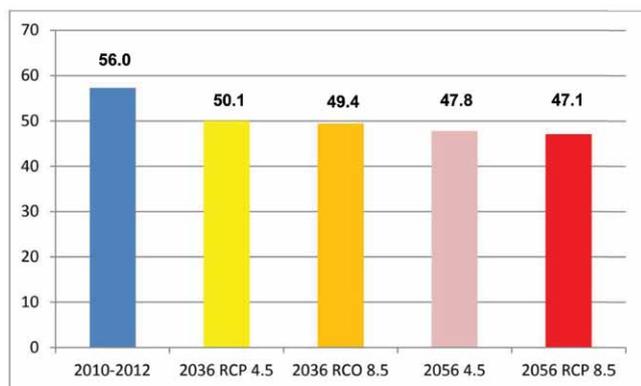


Fig. 11 - Confronto dei saldi di bilancio previsti a medio termine con quello del triennio 2010-2012, Mm³/a.

Fig. 11 - Comparison of the budget balances expected in the medium term with the 2010-2012 one, Mm³/a.

Questi bilanci di previsione non considerano le variazioni dei termini del bilancio non direttamente dipendenti dal clima. Nel primo decennio del nuovo millennio ci sono stati notevoli cambiamenti nello sfruttamento dell'acquifero di sottosuolo (Fig. 12). Il più evidente riguarda la riduzione degli emungimenti industriali, conseguenza della crisi congiunturale e abbandono delle grandi industrie chimiche e metallurgiche nel comprensorio di Massa e Carrara. Le segherie che lavorano i marmi attuano il riciclo dell'acqua. L'agricoltura, che non ha qui colture irrigue ma soprattutto colture in serra, ha ridotto i prelievi avendo incrementato le pratiche di irrigazione che limitano il consumo d'acqua, come quella "goccia a goccia". L'unico incremento è quello dai pozzi degli acquedotti, per soddisfare la maggiore domanda d'acqua dovuta principalmente all'aumento del turismo estivo: infatti la domanda aumenta di 2-3 volte nei mesi di luglio e agosto.

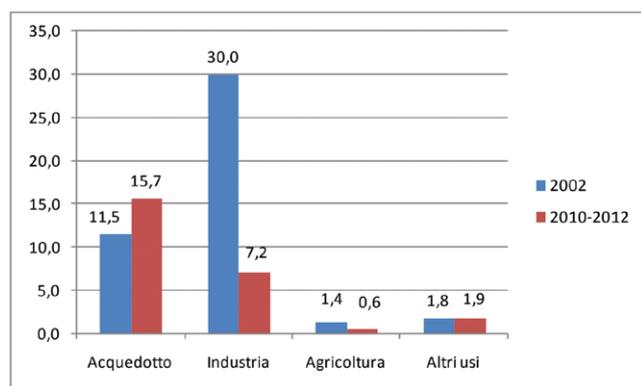


Fig. 12 - Confronto fra i prelievi dalle falde del 2002 con quelli del triennio 2010-2012, Mm³/a.

Fig. 12 - Comparison of groundwater withdrawals of 2002 with those of 2010-2012, Mm³/a.

La domanda nei settori industriale e agricolo è da considerarsi invariante nelle proiezioni future. Si tratta di una prassi tecnicamente accettata nella pianificazione di settore, stante le tendenze analizzate che sono in diminuzione; quindi l'invarianza rappresenta un'ipotesi cautelativa.

Gaia S.p.A., nel suo Master Plan, ha elaborato le proiezioni dei fabbisogni futuri per tutto il territorio di competenza, secondo due Scenari di crescita della popolazione e nelle condizioni di Anno Normale e di Anno Asciutto (Gaia S.p.A. 2019). Con riferimento al dato medio del triennio 2012-2014 (31.413.739 m³), le elaborazioni hanno dato i seguenti fabbisogni (Tab. 15)

Tab. 15 - Fabbisogni idrici futuri (Mm³/a) nel comprensorio gestito da Gaia S.p.A.

Tab. 15 - Future water needs, Mm³ /y, in the area managed by Gaia S.p.A.

	2036		2056	
	Bassa crescita <i>Low growth</i>	Alta crescita <i>High growth</i>	Bassa crescita <i>Low growth</i>	Alta crescita <i>High growth</i>
Scenario anno normale <i>Normal year scenario</i>	29.318.551	31.408.388	29.829.768	33.589.704
Scenario anno asciutto <i>Dry year scenario</i>	32.204.741	34.484.560	32.672.381	36.762.137

Inoltre, le elaborazioni evidenziano come la domanda di picco nei 4 mesi estivi richiede una maggiore disponibilità di risorsa per gli Scenari di Alta Crescita, che ai due orizzonti temporali viene stimata in circa 820.000 m³ (+7%) per il 2036 e di 1.480.000 m³ (+13%) al 2056. Quindi i fabbisogni cresceranno, in maniera più significativa per lo scenario dell'anno asciutto 2056 e alta crescita demografica e soprattutto per la domanda di picco.

Le acque di sottosuolo rappresentano oltre il 90% dell'acqua distribuita dagli acquedotti nella Pianura. Il cambiamento climatico comporterà la necessità di fare un maggiore ricorso alle acque di falda, che comporterà un'ulteriore riduzione della risorsa idrica in base alle seguenti considerazioni:

- l'aumento della temperatura farà aumentare l'evapotraspirazione, quindi le colture necessiteranno di più acqua;
- il riscaldamento globale è accompagnato da un maggiore frequenza e durata dei periodi siccitosi, che riducono la disponibilità delle risorse idriche di superficie;
- il cambiamento climatico comporta anche un cambiamento nel regime delle precipitazioni: negli ultimi 20 anni si sono ridotte le precipitazioni invernali e primaverili, quelle che forniscono la maggiore ricarica agli acquiferi di sottosuolo, mentre sono aumentate quelle

autunnali, ma queste ultime sono spesso di breve durata e di forte intensità, quindi con una minore percentuale di acqua che infiltra nel sottosuolo (e maggiore rischio alluvionale),

Questo presumibile incremento dei pompaggi potrebbe nel tempo rompere l'equilibrio quantitativo della risorsa sotterranea, equilibrio che la sostanziale stabilità dei livelli medi di falda ha finora testimoniato. Un altro fattore di rischio è rappresentato dal rialzo relativo del livello del mare, che farà aumentare l'intrusione marina. Questo rischio è molto alto in Versilia (Nisi et al. 2003), dove le aree di bonifica idraulica sono in gran parte già sotto il livello del mare e dove la subsidenza ha valori elevati per la compattazione dei terreni a granulometria fine, compattazione sia naturale sia per effetto del drenaggio operato dai sistemi di bonifica. La maggiore salinità dell'acqua di sottosuolo la renderà meno idonea all'irrigazione, di fatto riducendo la disponibilità della risorsa idrica.

Conclusioni

Il calcolo del bilancio idrico dell'acquifero multistrato della Riviera Apuo-Versiliese per l'anno medio del triennio 2010-2012 ha fornito un volume in ingresso di circa 123 milioni di m³/anno e in uscita di circa 67 Mm³/a, con un saldo positivo di circa 56 Mm³/a. Questo saldo corrisponde al deflusso della falda al mare meno l'intrusione marina: lo scambio della falda col mare è stato preso come l'incognita del bilancio, non avendo elementi certi per poterlo calcolare o valutare.

Il bilancio è il risultato di un progetto molto "ambizioso", in quanto si è dimostrato che non sono attualmente disponibili dati completi utilizzabili per stime significative e maggiormente significative rispetto a quelle effettuate nello studio. Quindi il bilancio è approssimativo, ma ha permesso comunque di ipotizzare gli effetti del riscaldamento atmosferico nel prossimo futuro. Il cambiamento climatico comporta una riduzione della ricarica dell'acquifero: tenendo ferme le uscite del bilancio 2010-2012, il saldo si ridurrebbe del 11% nel 2036 e del 15% nel 2056, valori medi dei due scenari di emissione considerati. Il saldo positivo resterebbe ancora importante, ma bisogna considerare che solo una parte di questa riserva idrica può essere sfruttata. Inoltre il cambiamento comporterà anche un maggiore ricorso alle acque di falda che, insieme con il probabile aumento dell'intrusione marina legata al rialzo del livello del mare, farà molto probabilmente ridurre ulteriormente la risorsa idrica.

Occorre anche considerare che la maggiore risorsa attuale del comprensorio è il campo pozzi i Frati di Camaiole, che fornirebbe da 250 a 550 l/s. Ma la Provincia di Lucca, la cui competenza in materia è stata trasferita alla Regione Toscana, ha chiesto che la portata dei pozzi venga ridotta a 250 l/s al fine di mantenere il deflusso minimo vitale al F. Camaiole, che riceve buona parte dell'alimentazione proprio dalla falda sfruttata dal campo pozzi (Gaia S.p.A 2006).

Per questo il Master Plan di Gaia S.p.A comprende studi e progetti per la ricerca di altre risorse idriche e per la interconnessione delle risorse. In particolare sono stati

individuati gli acquiferi più promettenti per integrare la disponibilità di risorse per la Pianura, che sono:

1. Gli acquiferi carbonatici del versante marino delle Alpi Apuane: è stato accertato (Piccini et al. 2000) che alcuni di questi acquiferi hanno importanti riserve permanenti sotto la quota di sfioro delle relative sorgenti, e che, data l'alta permeabilità per carsismo di questi acquiferi, le precipitazioni sono in grado di ricostituire queste riserve nei mesi autunnali e invernali. Quindi sono risorse importanti per fare fronte alla domanda dei mesi estivi.
2. L'acquifero carbonatico della conca di Camaiole le cui acque non vanno ad alimentare il campo pozzi i Frati.
3. I conoidi dei maggiori corsi d'acqua del versante marino delle Alpi Apuane: l'obiettivo principale sono i probabili depositi ciottolosi della regressione wurmiana.

BIBLIOGRAFIA

- Autorità di Bacino del Fiume Serchio(2007) Piano di Bacino Stralcio Bilancio idrico del bacino del lago di Massaciuccoli "Water balance of the Massaciuccoli Lake basin"
- 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 "Water resources of the Serchio River Basin and their contribution to supplying the adjacent hydrographic basins". Mem. Soc. Geol. It., 49, 365-391.
- Capecchi F, Pranzini G (1986) Studi geologici e idrogeologici nella pianura di Pistoia. "Geological and hydrogeological studies in the Pistoia Plain". Boll. Soc. Geol. Ital., CIV (4), 1985, 601-620.
- Capecchi F, Pranzini G (2001) Carta della Vulnerabilità all'Inquinamento delle falde idriche della Pianura Pistoiese. In: Valutazione dell'impatto ambientale delle pratiche vivaistiche e studio della vulnerabilità intrinseca della falda del territorio pistoiese. "Map of Vulnerability to Pollution of the Pistoia Plain aquifers. In: Assessment of the environmental impact of nursery practices and study of the intrinsic vulnerability of the groundwater in the Pistoia area". Quaderni ARPAT, luglio 2001.
- Cavazza S, Geoscienze (1984) Rapporto idrogeologico del Settore Nord del territorio consortile. "Hydrogeological report of the Northern Sector of the consortium territory". Consorzio Acquedotto Marina di Pietrasanta, Lido e Capezzano di Camaiole e Forte dei Marmi.
- Civita M, Gargini A, Pranzini G (1999) Metodologia di redazione della Carta della Vulnerabilità intrinseca e del Rischio d'inquinamento degli acquiferi del Valdarno Medio. "Methodology for drafting the Map of Intrinsic Vulnerability and Risk of Pollution of aquifers in the Middle Valdarno". Atti 3° Conv. Naz. Protezione e Gestione delle acque sotterranee per il III millennio. Vol. 1, 1999. Quaderni di Geologia Applicata, 59-73.
- Cortopassi P (1998) Acque salate nella falda superiore della pianura meridionale della Versilia. "Salty waters in the upper aquifer of the southern plain of Versilia". Comune di Massarosa.
- Doveri M (2004) Studio idrogeologico e geochemico dei sistemi acquiferi del bacino del Torrente Carrione e dell'antistante piana costiera. "Hydrogeological and geochemical study of the aquifer systems of the Carrione stream basin and of the coastal plain in front". Tesi di dottorato, Università di Pisa.
- Ferrari R, Morelli G, Duchi G (1999) Area del territorio di Viareggio, Primi risultati derivanti dal monitoraggio della falda acquifera in funzione della salinizzazione. "South area of the territory of Viareggio, First results deriving from the monitoring of the aquifer as a function of salinization". Comune di Viareggio.
- Forti P, Pranzini G, Piccini L (1989) Hydrogeology of the Apuane Alps (Toscana, Italy). Proc. Intern. Symp. "Problems of karst complex study of montane countries". Tblisi, URSS, Oct. 5-12, 1987, 39-42.

- Gaia S.p.A. (2006) Richiesta di concessione di acque sotterranee dal campo pozzi in loc. Frati, Camaiore (Lucca). Relazione idrogeologica (Prof. Giovanni Pranzini). "Request for concession of groundwater withdrawal from the Frati well field (Camaiore, Lucca). Hydrogeological report (Prof. Giovanni Pranzini)".
- Gaia S.p.A. (2019) La domanda idrica del Comprensorio Apuo-Versiliese. Prospettiva storica e di sviluppo e le problematiche di salinizzazione della Piana. Convegno "Gestione della Risorsa idrica nel territorio Apuo-Versiliese". "Water demand of the Apuo-Versiliese district. Historical and development perspective and problems of salinization in the Plain. Conference "Management of water resources in the Apuo-Versilia area". Seravezza, October 2-4, 2019.
- Geoser (1995) Piano per il corretto e razionale uso delle acque. Studio idrogeologico ed idrochimico degli acquiferi della piana di Lucca e della Versilia, Provincia di Lucca. "Plan for the correct and rational use of water. Hydrogeological and hydro-chemical study of the aquifers of the Lucca Plain and Versilia, Lucca Province".
- Giardi M, Pranzini G, Serretti L (1983) Salt water intrusion in the coastal plains of Versilia and Elba Island (Tuscany). Geol. Appl. e Idrogeol., XVIII (2).
- Giuntini D (1999) Salinizzazione da cloruri delle acque sotterranee della Versilia: studio idrogeologico e idrochimico finalizzato all'elaborazione di un modello concettuale d' intrusione marina delle acque mineralizzate nell' acquifero costiero. "Salinization by chlorides of Versilia's underground waters: hydrogeological and hydrochemical study aimed at developing a conceptual model of marine intrusion of mineralized waters in the coastal aquifer". Tesi di laurea inedita, Università di Pisa.
- Landini F, Pranzini G (1991) Hydrogeologic balance of an overexploited aquifer (Prato Fan, Italy) and corrective measures for the water resources management. Atti XXII Congr. A.I.H. "Aquifer overexploitation", Canary Island, Spain, April 1991, 227-230.
- International Panel on Climate Change (2001) WGI Third Assessment Report. Summary for Policymakers, Climate Change 2001: The Scientific Basis. IPCC, Ginevra, 13-16 Febbraio 2001.
- Materozzi C (1991) La falda della Riviera apuana. "Groundwater of the Apuan Riviera". Tesi di laurea inedita, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze.
- 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). Tesi di dottorato, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Pisa.
- Nisi MF, Aminti P, Cipriani L D, Donatis M, Devoti S, Gabellini M, Ballerini G, Pranzini E, Rossi L, Silenzi G (2003) La valutazione del rischio da RSLR in Versilia. "The risk assessment from RSLR in Versilia". Studi Costieri, 6 (2003), 133-162.
- Piccini L, Pranzini G, Tedici L, Forti P (1997) Carta delle risorse idriche degli acquiferi carbonatici del Comprensorio Apuo-Versiliese. Carta in scala 1:50.000. "Map of water resources of the carbonate aquifers of the Apuo-Versilia district, 1: 50,000". ARCA, Firenze.
- Piccini L, Pranzini G, Tedici L, Forti P (2000) Le risorse idriche dei complessi carbonatici del comprensorio Apuo-Versiliese. "Water resources of the carbonate complexes of the Apuo-Versilia area". Quaderni di Geologia Applicata, 6- 1. Pitagora, Bologna, 61-78.
- Pranzini G (1990) I rapporti fiumi - falde. "Relation between rivers and groundwater". Convegno "Tutela dei corsi d'acqua". Consorzio Risorse Idriche Schema 23, Firenze, 39-50.
- Pranzini G (2002) Groundwater salinization in Versilia (Italy) - Proceedings SWIM 17th, Delft, Nederland. 5-10 maggio 2002, 412-421.
- Pranzini G (2004) Studio idrogeologico del Bacino Regionale Toscana Nord. Relazione conclusiva. "Hydrogeological study of the Tuscany North Regional Basin. Final report". Studio per conto della Regione Toscana, Dipartimento delle politiche territoriali e ambientali, Protezione del suolo e Protezione delle risorse idriche.
- Pranzini G. (2004a) Studio idrogeologico del Bacino del Fiume Cecina. "Hydrogeological study of the Cecina River Basin". Relazione per Regione Toscana, Dipartimento delle Politiche Territoriali e Ambientali, in qualità di Autorità di Bacino Toscana Costa.
- Pranzini G, Buchignani V (2002) Bilancio idrogeologico della conca di Camaiore (Lucca) in relazione alla voragine del 1995. "Hydrogeological balance of the Camaiore basin (Lucca) in relation to the sinkhole of 1995". Quaderni di Geologia Applicata, 9 - 2 (2002), Pitagora Ed., Bologna, 133-156.
- Pranzini, G, Di Martino F, Fanti R, Fontanelli K (2019) Map of the vulnerability to pollution of the Apuo-Versilia Aquifer (Tuscany-Italy). Acque Sotterranee-Italian Journal of Groundwater 1/156, 53-63. DOI: 10.7343/as-2019-384.
- Regione Toscana, Segreteria Tecnica del Bacino regionale Toscana Nord (2008) Ottimizzazione del monitoraggio della falda costiera Apuo-Versiliese e formazione della banca dati. "Optimization of the monitoring of the Apuo-Versiliese coastal aquifer and carrying out of the database".
- Regione Toscana. Data base stratigrafie Bacino Toscana Nord. "Data base stratigraphies Basin Toscana Nord" (<http://sira.arpat.toscana.it/sira/>) ultimo accesso 27/09/2020
- Regione Toscana, area "Difesa del suolo"- Reticolo idrografico e di gestione dei Consorzi di bonifica. "Hydrographic network and management of remediation consortia". <http://www.regione.toscana.it/-/consorzi-di-bonifica-reticolo-idrografico-e-digestione>.
- Regione Toscana, area "Informazione geografica" - Quote topografiche da cartografia alla scala 1:2000. "Topographic altitude from cartography, scale 1: 2000". <http://www502.regione.toscana.it/geoscopio/cartoteca.html>. Ultimo accesso 27/09/2020
- Salvatori I, Spandre R (1995) Aspetti idrogeologici e idrochimici delle acque sotterranee della Pianura Apuana. "Hydrogeological and hydrochemical aspects of the underground waters of the Apuan Plain". Atti Soc. Tosc. Sc. Naturali, Mem., Serie A, 102.
- Salvatori P (1994) Studio idrogeologico della piana versiliese compresa fra Viareggio e Forte dei Marmi con particolare riguardo al fenomeno dell'intrusione marina. "Hydrogeological study of the Versilia Plain between Viareggio and Forte dei Marmi with particular regard to the phenomenon of marine intrusion". Tesi di laurea inedita, Dip. di Scienze della Terra, Università di Pisa.
- Serretti L (1983) La falda freatica della Versilia. "Groundwater of Versilia". Tesi di laurea inedita, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze.
- Tabbì R (1999) Salinizzazione da Cloruri nelle acque sotterranee della Versilia: analisi idrogeologica dei meccanismi di tale salinizzazione, con particolare riguardo al ruolo dei corsi d'acqua. "Salinization by Chlorides in the underground waters of Versilia: hydrogeological analysis of the mechanisms of salinization, with particular regard to the role of watercourses". Tesi di laurea inedita, Università di Pisa.
- Tambellini S (2008) Indagini sul fenomeno dell'intrusione marina nel litorale di Forte dei Marmi (Lucca) nella stagione estiva 2008. "Investigations on the phenomenon of marine intrusion in the Forte dei Marmi (Lucca) coast in 2008 summer season". Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Facoltà di Scienze M.F.N., Università di Pisa.
- Tessitore S (2004) Caratterizzazione idrogeologica e sviluppo di un modello numerico del sistema acquifero costiero della Versilia. "Hydrogeological characterization and development of a numerical model of the Versilia coastal aquifer system". Tesi di dottorato inedita, Università di Pisa.
- Università di Firenze DST (2016) Valutazione delle risorse idriche di sottosuolo del territorio di competenza GAIA, delle variazioni indotte dal cambiamento climatico e ricerca di nuove risorse" Rapporto conclusivo, Aprile 2016. "Assessment of the GAIA territory groundwater resources, of the changed induced by the climate change and investigation for new resources". Final Report, April 2016.
- Università di Parma DICATeA (2016) Formulazione del bilancio idrologico del territorio di competenza di Gaia volto alla valutazione delle variazioni indotte dal cambiamento climatico. Rapporto per Gaia S.p.A. non pubblicato. "Formulation of hydrological balance of the territory under the jurisdiction of Gaia aimed at assessing the changes induced by climate change". Report for Gaia S.p.A not published.