

# Modellistica delle acque sotterranee: gestione dei modelli ed esempi applicativi in Emilia-Romagna (Italia)

## *Groundwater flow model management and case studies in Emilia-Romagna (Italy)*

Andrea Chahoud, Luca Gelati, Addolorata Palumbo, Giuseppe Patrizi, Immacolata Pellegrino, Giacomo Zaccanti

**Riassunto:** L'utilizzo della modellistica delle acque sotterranee a supporto della pianificazione e gestione della risorsa idrica è il possibile traguardo di un percorso di studio e ricerca lungo ed articolato. In questo contesto si colloca il presente lavoro che riguarda alcune applicazioni realizzate nell'ambito degli acquiferi della pianura della Regione Emilia-Romagna, nell'Italia settentrionale. Le principali caratteristiche dei modelli matematici realizzati ed ora disponibili sono riportate unitamente al necessario inquadramento geologico ed idrogeologico degli acquiferi analizzati.

Sono discusse le principali scelte operative che hanno caratterizzato l'implementazione iniziale di tutti i modelli e che permettono ad oggi il loro continuo sviluppo ed aggiornamento. Occorre mantenere attivi i flussi di dati che li alimentano e che ne conservano la funzionalità (gestione del modello).

I modelli descritti sono stati utilizzati in diversi ambiti applicativi dai quali emerge la potenzialità di un loro utilizzo

**Parole chiave:** Emilia-Romagna, modellazione numerica, bilancio idrico, gestione dei modelli, flusso delle acque sotterranee.

**Keywords:** Emilia-Romagna, numerical modeling, water budget, model management, groundwater flow.

**Andrea CHAHOUD** 

Arpa Emilia-Romagna, Direzione Tecnica  
Largo Caduti del Lavoro, 6-40122, Bologna  
Tel: 051.5281217-Fax: 051.5281261  
achahoud@arpa.emr.it

**Luca GELATI**

**Giacomo ZACCANTI**

Arpa Emilia-Romagna, Direzione Tecnica  
Largo Caduti del Lavoro, 6-40122, Bologna  
lgelati@arpa.emr.it  
gzaccanti@arpa.emr.it

**Addolorata PALUMBO**

**Immacolata PELLEGRINO**

Regione Emilia-Romagna,  
Direzione Generale Ambiente e Difesa del Suolo e della Costa  
Viale della Fiera, 8-40127 Bologna  
apalumbo@regione.emilia-romagna.it  
ipellegrino@regione.emilia-romagna.it

**Giuseppe PATRIZI**

Servin Soc. Coop. p. A.  
via Circonvallazione Piazza d'Armi, 130-48122 Ravenna  
Tel: 0544.1882201-Fax: 0544.422417  
b.patrizi@servin-c.it

Ricevuto: 5 dicembre 2012 / Accettato: 14 febbraio 2013

Publicato online: 31 marzo 2013

© Associazione Acque Sotterranee 2013

mirato ad obiettivi di pianificazione e di gestione della risorsa idrica sotterranea. Sono riportati due esempi, alle due diverse scale alle quali sono disponibili i modelli. Il primo mostra come il modello alla scala dell'intero acquifero emiliano-romagnolo, sia stato in grado di adattarsi ai nuovi corpi idrici sotterranei definiti in base alla Direttiva 2000/60/CE, attuale quadro normativo di riferimento per la pianificazione della risorsa idrica. Tale quadro prevede la definizione di programmi di misure il cui livello di efficacia può essere stimato col supporto dei modelli. Il secondo riguarda invece l'utilizzo di un modello a scala di singola conoide in riferimento ad una valutazione specifica di fattibilità di un intervento di ricarica artificiale delle falde.

La tecnologia qui impiegata, legata all'esperienza maturata in oltre 10 anni di sviluppo ed applicazione di modelli numerici per le acque sotterranee, permette ora di utilizzarli nel ruolo di servizio sistematico a supporto degli enti preposti alla gestione e pianificazione della risorsa idrica sotterranea.

**Abstract:** *The use of groundwater modeling to support the planning and management of water resources is a possible goal of a long and detailed course of study and research. The present work concerns some applications carried out within the aquifers of the Emilia-Romagna plain in northern Italy.*

*The main features of the developed and available mathematical models are reported as well as the geological and hydrogeological description of the analyzed aquifers.*

*The main operational choices that have characterized the implementation of all models and their continuous development and updating are discussed. Activity has been focused to maintain active the data stream between the models to improve their functionality along with time to give a basis for models management.*

*Models have been used in different applications which indicate the potential for their use with targeted objectives of planning and management. Two examples at two different scales are given: the first shows the application to the entire aquifer of the Emilia-Romagna region, which has been able to adapt simulations to new groundwater bodies defined in accordance with 2000/60/EC directive, the current regulatory framework for the planning of water resources. This framework provides for the establishment of programs of measures whose level of effectiveness can be estimated with the support of models. The second concerns a more detailed scale model in reference to a specific evaluation of feasibility of an intervention of artificial recharge.*

*The management approach used here is the result of over 10 years development and application and now allows to apply numerical models in a role of systematic service in support of the institutions involved in planning and management of groundwater resources.*

## Introduzione

L'utilizzo sistematico della modellistica delle acque sotterranee a supporto della gestione e pianificazione della risorsa idrica è il traguardo di un processo di studio e ricerca molto lungo ed articolato; per fare in modo che i modelli non rimangano esercizi fini a se stessi, il processo di sviluppo deve rimanere sempre aperto mediante l'aggiornamento e le verifiche degli effetti delle nuove conoscenze e dei nuovi dati.

Il quadro internazionale su questo tema porta gli esempi dell'USGS (United States Geological Survey) ma anche validi esempi in ambito europeo, dati dai "Servizi Geologici" di Francia e Danimarca (Borsi e Rossetto, 2012). In particolare quest'ultimo prevede al 2020 la completa integrazione della modellistica delle acque sotterranee all'interno di un unico sistema modellistico dedicato all'intero ciclo delle acque (Refsgaard et al., 2010).

Il panorama nazionale propone alcuni esempi circoscritti a territori e realtà locali dove il percorso appare avviato o per lo meno impostato nelle sue fasi preliminari (Borsi e Rossetto, 2012). La Water Framework Directive (2000/60/EC) indica che le Autorità di Bacino devono dotarsi di strumenti modellistici per la gestione della risorsa (Puma e Bertolo, 2012). Altri esempi di modellistica orientata alla gestione delle acque sotterranee sono presenti in Barazzuoli et al. (2008), Bonomi et al. (2012), Passadore et al. (2012), Lecca et al. (2009). Questo è il quadro di riferimento all'interno del quale si colloca il presente lavoro, che intende descrivere, mediante alcuni modelli di flusso sotterraneo degli acquiferi della pianura dell'Emilia-Romagna, il processo di sviluppo sopra citato. Le applicazioni ricadono nella fascia compresa tra il margine dell'Appennino a Sud, il Fiume Po a Nord ed il Mare Adriatico ad Est (Fig. 1), che ospita, in ampie porzioni del sottosuolo, le principali risorse idriche sotterranee della regione. Un ulteriore utilizzo operativo di un modello idrogeologico associato ad un modello meteorologico per la previsione e gestione di emergenze idriche dovute a prolungate condizioni siccitose, è attivo nella parte orientale della Regione Emilia-Romagna (Chahoud et al., 2012b).

Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna, quest'ultima nell'ambito delle proprie attività di pianificazione e gestione della risorsa idrica, hanno avviato attorno al 2001 uno specifico percorso di sviluppo ed implementazione della modellistica matematica per le acque sotterranee, percorso che è attivo tuttora ed in continua evoluzione. Nello specifico, in Regione Emilia-Romagna le attività di pianificazione e gestione della risorsa idrica sono svolte, in coerenza con gli orientamenti dell'Unione Europea e della più recente legislazione nazionale, dal Servizio Tutela e Risanamento Risorsa Acqua che supporta l'azione di governo regionale delle risorse idriche al fine di garantire, nella prospettiva di un futuro sostenibile, la disponibilità di acqua di buona qualità. In questo contesto la modellistica rappresenta un valido strumento da utilizzare sia a scala regionale sia a scala locale.

L'obiettivo principale del presente lavoro è quello di evidenziare le scelte operative ed i principali elementi che hanno caratterizzato l'implementazione iniziale dei modelli e per-

nesso il loro continuo sviluppo ed aggiornamento negli anni successivi. Tutto ciò realizza anche la possibilità di conservare nel tempo la funzionalità di gran parte dei modelli realizzati nella prospettiva di consolidare il loro utilizzo operativo nell'ambito della gestione e pianificazione della risorsa idrica. Ad esemplificazione delle potenzialità di utilizzo di tali strumenti sono riportate due applicazioni realizzate a scala molto diversa.

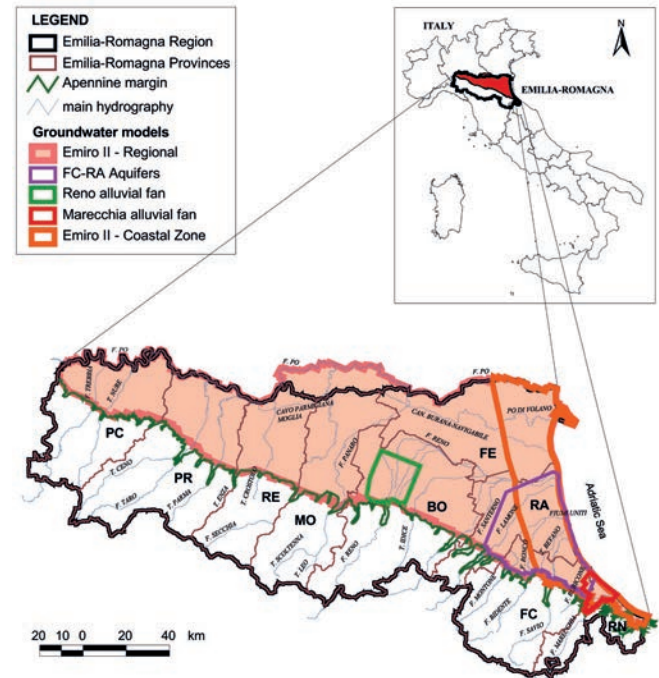


Fig. 1 - Modelli di flusso delle acque sotterranee disponibili in Emilia-Romagna.

Fig. 1 - Available groundwater flow models in Emilia-Romagna (Italy).

## Modellazione ed inquadramento

### Le applicazioni modellistiche realizzate in Emilia-Romagna

Le principali fasi di sviluppo e gestione di un modello di flusso delle acque sotterranee sono rappresentate in Fig. 2. Le prime due fasi sono dedicate alla costruzione ed alla calibrazione del modello, ed afferiscono alla fase dello sviluppo (*model developing*). Vengono qui definite la geometria e la struttura del sistema, la discretizzazione spaziale e temporale, la parametrizzazione e le condizioni al contorno. La fase della gestione (*model management*) consiste nella realizzazione di attività di aggiornamento dei dati, di revisione della taratura (*Update/Verification*) e, soprattutto, nell'esecuzione di simulazioni e previsioni (*Utilization*). L'aggiornamento riguarda ovviamente le variabili che dipendono dal tempo (carico idraulico ai bordi, prelievi e ricariche), mentre l'acquisizione di nuove serie del carico idraulico attraverso il monitoraggio consente di proseguire il lavoro di taratura per migliorare le prestazioni del modello.

ARPA Emilia-Romagna negli ultimi 10 anni ha realizza-

to diversi modelli di flusso a supporto degli enti competenti, applicati poi con finalità sia di pianificazione sia di gestione ordinaria o di emergenza della risorsa idrica sotterranea. Queste esperienze sono state condotte a due livelli distinti di scala spaziale:

1. la scala dell'intero acquifero regionale, applicata per il Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna, sulla base del modello concettuale definito in quella circostanza (Regione Emilia-Romagna, 2005). La prima versione è stata seguita da successivi e ripetuti aggiornamenti, l'ultimo dei quali nel 2009 (Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna, 2009; Chahoud et al., 2012a);
2. la scala di dettaglio (generalmente la singola conoide), applicata in situazioni ritenute strategiche per le locali necessità di sfruttamento della risorsa e dove è emersa la necessità di dover disporre di adeguati strumenti di supporto (Cibin et al., 2006; Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna, 2006).

La Tab. 1 riporta le caratteristiche principali di queste applicazioni. Nella parte alta della tabella sono indicate le modalità di costruzione e di calibrazione: la superficie, la discretizzazione spaziale e temporale, la disponibilità dei dati nella fase di calibrazione. Queste caratteristiche fanno riferimento alla fase di sviluppo del modello (Fig. 2). In relazione alla successiva fase di gestione del modello, la Tab.1 indica anche il livello di aggiornamento raggiunto (*Last model update*) e la

possibilità di aggiornamenti successivi sulla base del numero di punti disponibili (misure manuali e automatiche) per la costante e continua fase di verifica della calibrazione che sempre accompagna l'aggiornamento dati.

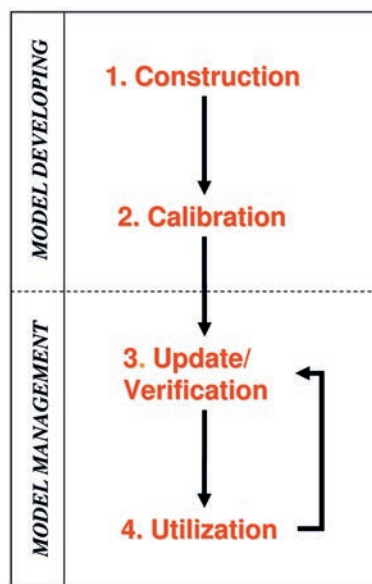


Fig. 2 - Le principali fasi di sviluppo e gestione di un modello matematico per le acque sotterranee.

Fig. 2 - Main steps in groundwater flow model developing and management.

Tab. 1 - Principali caratteristiche dei modelli di flusso per le acque sotterranee realizzati da Arpa Emilia-Romagna.

Tab. 1 - Main features of groundwater flow models developed by Arpa Emilia-Romagna.

	Groundwater model name	Emiro II - Regional	FC-RA Aquifers	Reno Alluvial Fan	Marecchia Alluvial Fan	Emiro II - Coastal Zone
MODEL DEVELOPING	Years of work	2003/2007/2009	2004	2005/2008	2006/2008-12	2010
	Model extension (km <sup>2</sup> )	12.000	1.600	420	140	2.400
	Cells dimension (m)	1.000x1.000	1.000x1.000	500x500	350x350	1.000x1.000
	Cells number (active)	401.000	64.000	120.000	48.000	68.000
	Number of layers	35	40	70	50	35
	Calibration period	2002-2003	1997-1998	1983-1998	2001-2002	2002-2006
	Number of stress periods per year (average)	4	4	1	4	4
	Number of calibration wells	442	52	25	83	82
	Average annual calibration data	900	158	75	375	189
MODEL MANAGEMENT	Last model update	Oct-Dec/2006	Sep-Dec/1998	Dec/2006	Dec/2011	Oct-Dec/2006
	Actual number of stress period per year	4	4	12	12	4
	Actual number of observation wells (manual/automatic)	(484/40)	(68/6)	(40/5)	(72/3)	(96/9)
	Coupled model available	Nitrate transport	-	Soil compaction	Nitrate transport	Soil compaction

### **Inquadramento geologico ed idrogeologico**

La Pianura Padana costituisce il riempimento di sedimentazione plio-quadernaria del bacino perisuturale padano (Bally e Snelson, 1980). Questo deriva da un più ampio bacino terziario, esteso a gran parte dell'area appenninica e prealpina, e legato all'orogenesi dell'Appennino Settentrionale. L'assetto strutturale di questo bacino e la copertura sedimentaria plio-pleistocenica sono descritti dettagliatamente in letteratura (Pieri e Groppi, 1981; Cremonini e Ricci Lucchi, 1982).

La successione plio-quadernaria ha carattere regressivo e può essere schematizzata in sette fasi principali (Regione Emilia-Romagna e Eni-Agip, 1998) in cui il riempimento del bacino marino e il passaggio alla sedimentazione continentale non avvengono in modo continuo, ma sono legati all'alternanza di eventi tettonici di sollevamento regionale e di eventi di subsidenza bacinale-quiescenza tettonica. I primi eventi provocano importanti regressioni forzate e la rapida progradazione della zona di transizione scarpata sottomarina-piana bacinale (TSB), lasciando via via alle spalle prismi sedimentari fluvio-deltizi progradanti, sormontati sul Margine da una vasta superficie subaerea d'erosione e/o non deposizione. I secondi eventi danno luogo ad una rapida aggradazione e ad un allargamento delle aree deposizionali. Nella Fig. 3 si può osservare la progradazione E-NE-vergente della TSB dalla posizione TSB1 alla TSB3, alimentata dal paleodelta del Fiume Po e dai sistemi deltizi appenninici.

Dal punto di vista stratigrafico si distinguono tre Sequenze Deposizionali principali, a cui corrispondono i rispettivi cicli trasgressivo-regressivi (Supersistemi) cartografati in affioramento sul Margine Appenninico Padano da Cremonini e Ricci Lucchi (1982). I sedimenti che caratterizzano i Supersistemi sono per lo più clastici (marini e continentali) di grande spessore, a sedimentazione prevalentemente grossolana e torbidity nella sua parte centrale. Questa è la sede degli acquiferi della pianura emiliano-romagnola, che sono costituiti principalmente dai depositi di origine alluvionale presenti nella porzione più superficiale della pianura, per uno spessore di circa 400-500 metri e, in minima parte, da depositi marino marginali.

La distribuzione di questi corpi sedimentari nel sottosuolo è schematicamente rappresentata nella sezione di Fig. 4 che attraversa tutta la pianura da Sud a Nord, dal margine appenninico al Fiume Po.

Sulla base di analisi sedimentologiche e idrogeologiche sono stati identificati tre complessi idrogeologici, appartenenti a distinti sistemi deposizionali, che corrispondono alle conoidi alluvionali appenniniche, alla pianura alluvionale appenninica ed alla pianura alluvionale e deltizia padana (Fig. 4).

Sempre in Fig. 4 è riportata la struttura idrostratigrafica dei depositi della pianura emiliano-romagnola che individua lo sviluppo verticale di tre unità idrostratigrafiche principali,

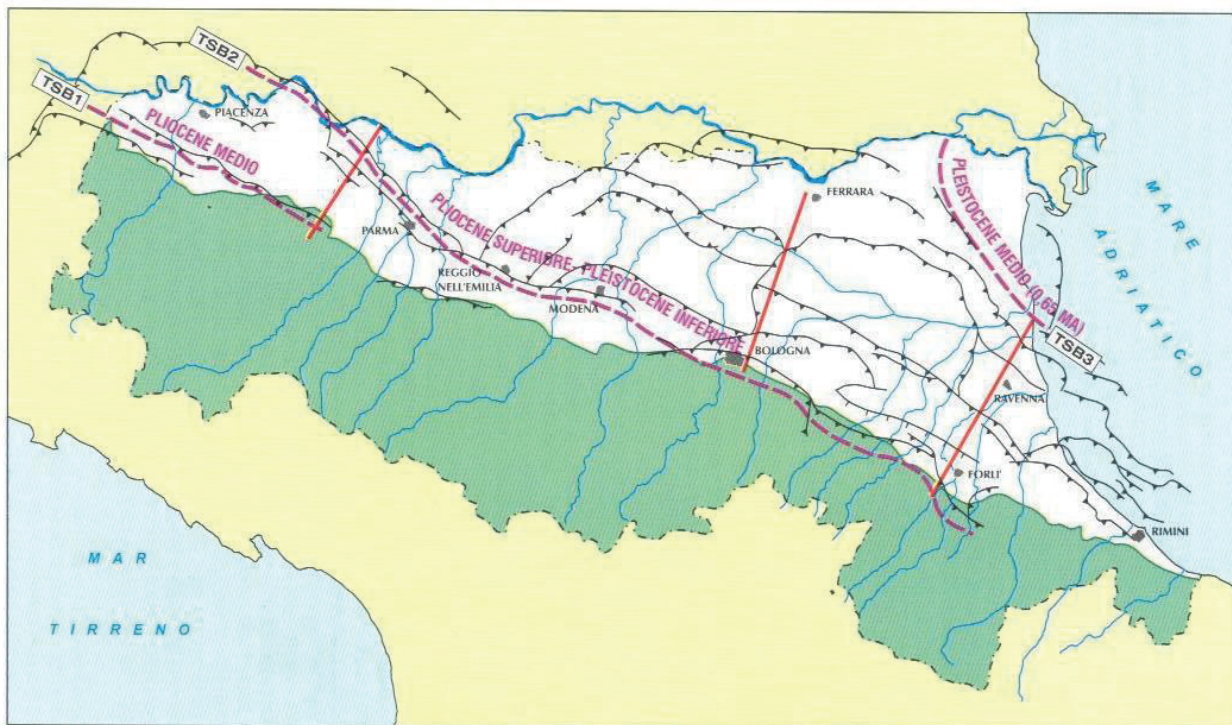


Fig. 3 - Fasi di migrazione della Transizione Scarpata Sottomarina (TSB)-Piana Bacinale dal Pliocene medio al Pleistocene medio e principali strutture sepolte dell'Appennino Settentrionale (da Regione Emilia-Romagna e Eni-Agip 1998).

Fig. 3 - Migration phases of Transition Submarine Escarpment (TSB)-Basinal Plain from middle Pliocene to Pleistocene and main underground structures of the Northern Apennines.

denominate Gruppi Acquiferi A, B e C, che corrispondono ad altrettante unità stratigrafiche (Regione Emilia-Romagna e Eni-Agip 1998). Il Gruppo Acquifero A corrisponde all'unità idrostratigrafica compresa nei primi 150-200 metri dal piano campagna; al di sotto di questa, il Gruppo Acquifero B, arriva fino ai 300-350 metri ed ancora più in profondità si trova il Gruppo Acquifero C. Strutture idrostratigrafiche minori, denominate Complessi Acquiferi, sono riconosciute all'interno di ciascun Gruppo Acquifero. La Fig. 4 evidenzia i quattro complessi acquiferi del Gruppo acquifero A, denominati dal più superficiale al più profondo: A1, A2, A3 ed A4.

All'interno di ciascun gruppo acquifero sono presenti depositi appartenenti ai diversi sistemi deposizionali. Nel dettaglio, il Gruppo Acquifero A ed il Gruppo Acquifero B sono costituiti principalmente da depositi alluvionali ed in particolare dalle ghiaie delle conoidi alluvionali, dai depositi fini di piana alluvionale e dalle sabbie della piana del Fiume Po.

La D.G.R. n. 350/2010 (Regione Emilia-Romagna, 2010a) ha recepito le indicazioni della Direttiva 2000/60/CE che ha portato alla definizione dei corpi idrici sotterranei. L'acquifero regionale di pianura è stato suddiviso lungo la verticale raggruppando le porzioni confinate dei complessi acquiferi più superficiali (A1 ed A2) a formare la porzione superiore del sistema (corpi idrici confinati superiori), e le restanti porzioni confinate dei complessi acquiferi A3, A4 e dei Gruppi Acquiferi B e C a formare la porzione inferiore dell'intero sistema (corpi idrici confinati inferiori). A monte di entrambi viene definito un unico corpo idrico, per tutto lo sviluppo verticale del sistema, corrispondente all'acquifero libero presente in conoide alluvionale appenninica. La delimitazione dei corpi idrici sotterranei è riportata nella sovrapposizione cartografica di Fig. 5.

## Materiali e metodi

L'esperienza maturata nell'implementazione dei modelli di Tab. 1 ha permesso di delineare alcuni elementi comuni nelle applicazioni che riguardano sia la fase di sviluppo sia quella di aggiornamento e verifica del modello (Fig. 2).

### Aspetti legati alla fase di sviluppo

Tutti i modelli realizzati hanno in comune la struttura tri-dimensionale. Questa scelta, operata sin dall'inizio, ha permesso nel tempo il continuo aggiornamento delle caratteristiche litologiche seguendo l'evoluzione delle conoscenze sedimentologiche e idrostratigrafiche a partire dalla prima sintesi regionale (Regione Emilia-Romagna e Eni-Agip, 1998) utilizzata per la prima applicazione di Emiro II - Regional (Tab. 1).

La stessa struttura di riferimento è stata impiegata anche per altri modelli basati sul campo di moto dell'acqua generato dal modello di flusso. In tal senso alcune esperienze sono state condotte relativamente al trasporto di nitrati sia a livello regionale (Emiro II - Regional in Tab. 1; Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna, 2007), sia a livello di dettaglio nella conoide alluvionale del Marecchia (Marecchia Alluvial Fan in Tab. 1; Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna, 2006). Analogamente, sono state realizzate due applicazioni per il calcolo della compattazione del suolo a scala di dettaglio. Un primo modello di subsidenza è stato associato al modello di flusso della conoide del Reno (Reno Alluvial Fan in Tab. 1; Cibir et al., 2006; Chahoud et al., 2010), in provincia di Bologna, nel 2005, poi aggiornato nel 2008 ed esteso in termini metodologici ed operativi al mo-

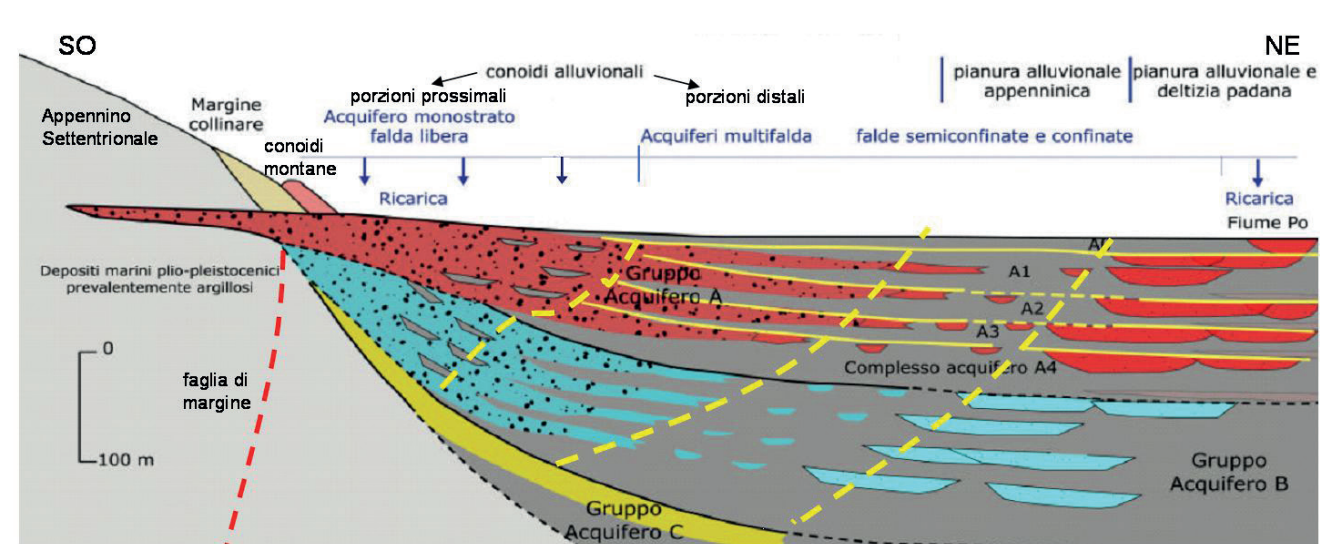


Fig. 4 - Sezione idrostratigrafica schematica degli acquiferi della pianura emiliano-romagnola ed identificazione dei complessi idrogeologici.

Fig. 4 - Schematic hydrostratigraphic section of the Emilia-Romagna Plain aquifers and hydrogeological complex identification.

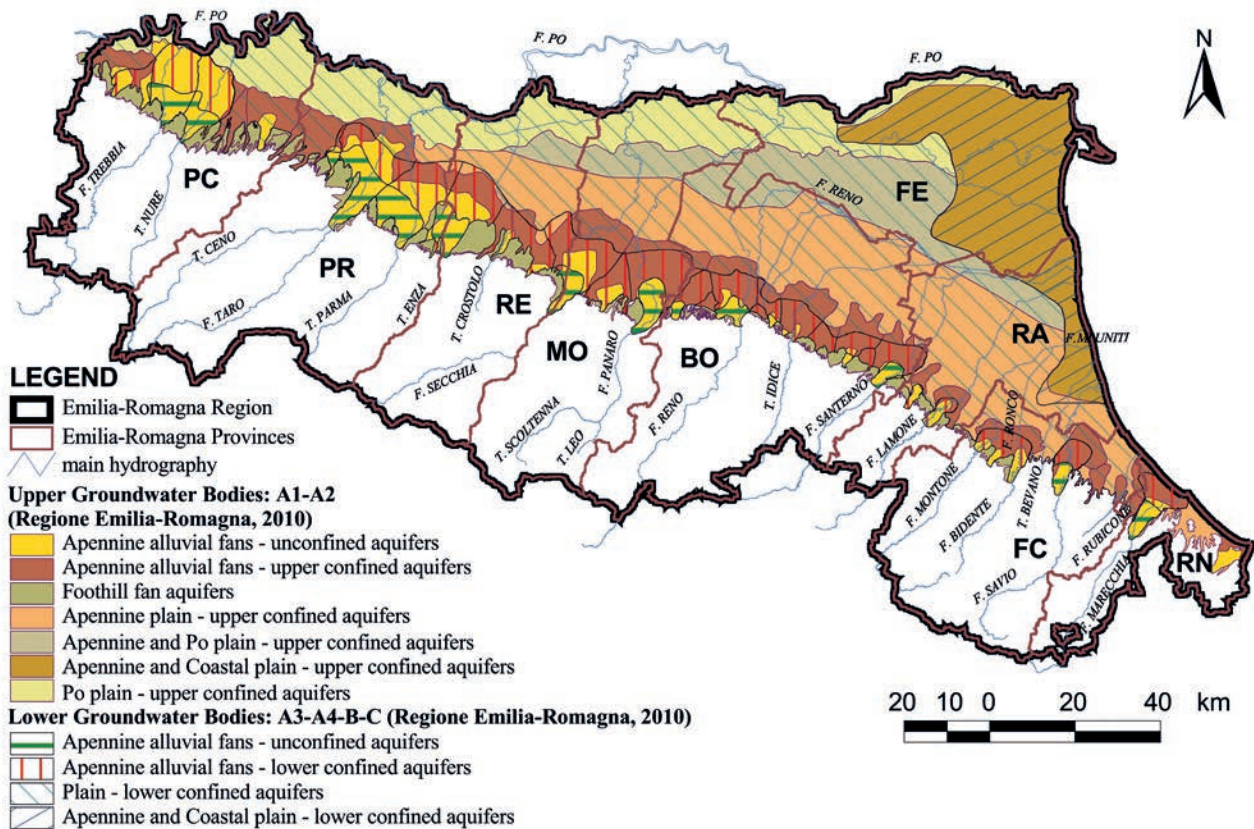


Fig. 5 - Definizione dei corpi idrici sotterranei della Regione Emilia-Romagna (Regione Emilia-Romagna 2010a).

Fig. 5 - Definition of Emilia-Romagna Region groundwater bodies.

dello della zona costiera (Emiro II - Coastal zone in Tab. 1; Chahoud et al., 2012a).

La struttura tridimensionale è tenuta in collegamento tra le varie applicazioni. Il modello Emiro II - Regional può ricevere i dati dai modelli a scala locale, dove affinamenti della calibrazione possono essere ottenuti grazie anche ad una più efficiente operatività. Viceversa, un modello a scala locale può essere inizializzato a partire dal modello regionale. Un esempio di questo tipo è stato realizzato col passaggio da Emiro II - Regional ad Emiro II - Coastal Zone (Tab. 1) per la sola fascia costiera, quest'ultimo derivato dal primo attraverso un taglio lungo una linea parallela alla linea di costa e posta a circa 20 km nell'entroterra (Fig. 1); in questo caso il modello "figlio" è stato estratto dal modello "padre" i cui risultati delle simulazioni (carichi idraulici) sono stati utilizzati per la costruzione delle condizioni al contorno del modello figlio.

Tutte le applicazioni sono state realizzate in regime di moto transitorio, ovvero mantenendo attivo il termine dell'equazione di bilancio contenente la derivata nel tempo e il coefficiente di immagazzinamento.

Inizialmente, la disponibilità dei dati e la necessità di contenere i tempi di calcolo (soprattutto nella fase di calibrazione trial&error) ha fatto sì che la calibrazione venisse condotta con intervalli di tempo "stagionali", comunque tali da cogliere

le principali variabilità temporali nel comportamento del sistema così come descritte dalle osservazioni disponibili. Le successive fasi di aggiornamento sono state poi condotte con passi temporali più ridotti, in ragione sia della disponibilità effettiva dei dati sia delle necessità di utilizzo del modello stesso (Tab. 1).

Per tutte le applicazioni riportate in Tab. 1 è stato adottato come codice di calcolo il MODFLOW-2000 (Harbaugh et al. 2000) che risolve l'equazione del moto dei fluidi nei mezzi porosi, cui è possibile assimilare i depositi alluvionali costituenti gli acquiferi del contesto della pianura emiliano-romagnola. Il flusso dell'acqua è considerato per le sole condizioni di saturazione ed a densità costante.

### Aspetti legati alla fase di aggiornamento/verifica

La fase di sviluppo di ogni modello prevede la valutazione delle ricariche e dei prelievi. Particolare attenzione è stata posta nella condizione di ripetibilità del processo di stima alla base della quantificazione di questi termini in modo tale da poter garantire la successiva fase di aggiornamento del modello.

Per la valutazione del contributo meteorologico alla ricarica del sistema viene utilizzato il modello giornaliero di bilancio idrico del suolo CRITERIA messo a punto dal Servizio Idro-

Meteo-Clima di Arpa Emilia-Romagna. Il bilancio tiene conto di tutti i fenomeni che regolano gli apporti e le perdite d'acqua che interessano il profilo verticale di suolo: l'infiltrazione, il ruscellamento, il drenaggio profondo, l'evapotraspirazione e la risalita capillare (Dottori et al., 2007; Tomei et al., 2007). Il modello è associato alla banca dati meteorologica regionale (precipitazioni e temperature) e nel calcolo del bilancio tiene conto delle particolari caratteristiche tessiturali del suolo e quindi della sua capacità a trattenere/rilasciare l'acqua. La voce di bilancio corrispondente al drenaggio profondo rappresenta quindi il quantitativo di acqua in eccesso che dal suolo si rende disponibile ad essere rilasciato verso il basso e quindi costituisce una valida stima per il termine di ricarica da imporre al modello di flusso delle acque sotterranee.

A titolo di esempio, qui di seguito sono riportati i caratteri salienti dell'applicazione di CRITERIA utilizzata per la stima della ricarica del modello della conoide alluvionale del Fiume Reno (Reno Alluvial Fan in Tab. 1). Elaborazioni analoghe sono state condotte per gli altri modelli elencati in Tab. 1.

Nella Fig. 6 è riportata la griglia meteorologica di riferimento per le serie storiche dei dati pluviometrici e termometrici giornalieri utilizzata da CRITERIA. L'elemento della griglia meteorologica evidenziato è riportato in dettaglio ed in sovrapposizione alla carta dei suoli della Regione Emilia-

Romagna (Regione Emilia-Romagna, 2010b), che individua la distribuzione delle diverse proprietà tessiturali presenti sul territorio, organizzate in una apposita banca dati gestita all'interno di CRITERIA. Dalla combinazione di dati meteorologici e delle caratteristiche del suolo derivano i diversi valori delle voci del bilancio idrico, tra le quali viene analizzata quella costituente il drenaggio verso la falda sottostante. Nella Fig. 7 sono riportati i valori di ricarica relativi alla cella meteo evidenziata in Fig. 6. Ogni istogramma mostra il contributo alla ricarica annuale dovuto ai singoli tipi di suolo presenti all'interno della cella meteorologica ed è posto in relazione al dato di precipitazione. Eseguendo poi il calcolo per ogni cella meteorologica appartenente all'area di studio di Fig. 6 (Reno Alluvial Fan) e per ogni tipo di suolo in essa presente si ottiene la stima della ricarica complessiva da imporre al modello di flusso (Fig. 8).

Relativamente ai prelievi di acque sotterranee un aspetto rilevante è legato alla struttura 3D del modello che ne richiede la conoscenza anche in funzione della profondità. E' quindi determinante la conoscenza completa delle caratteristiche dei punti di prelievo (ubicazione e profondità dei filtri) cui associare la portata estratta. Dove ciò non è possibile è necessario elaborare adeguate procedure di stima per compensare la mancanza di informazioni. Il livello base delle informazioni

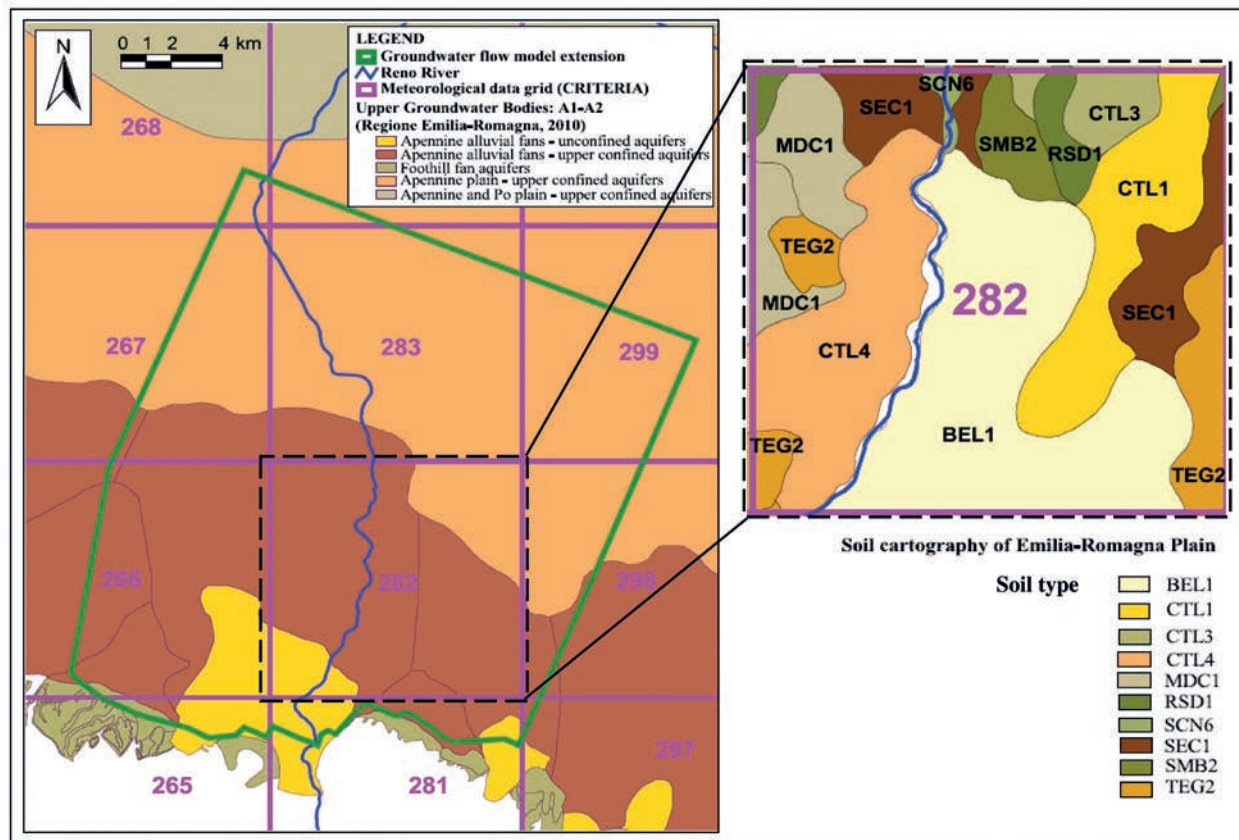


Fig. 6 - Ubicazione delle celle meteorologiche di CRITERIA e dettaglio locale della carta dei suoli della pianura emiliano-romagnola.

Fig. 6 - Meteorological CRITERIA data grid and local example of soil cartography of Emilia-Romagna Plain.

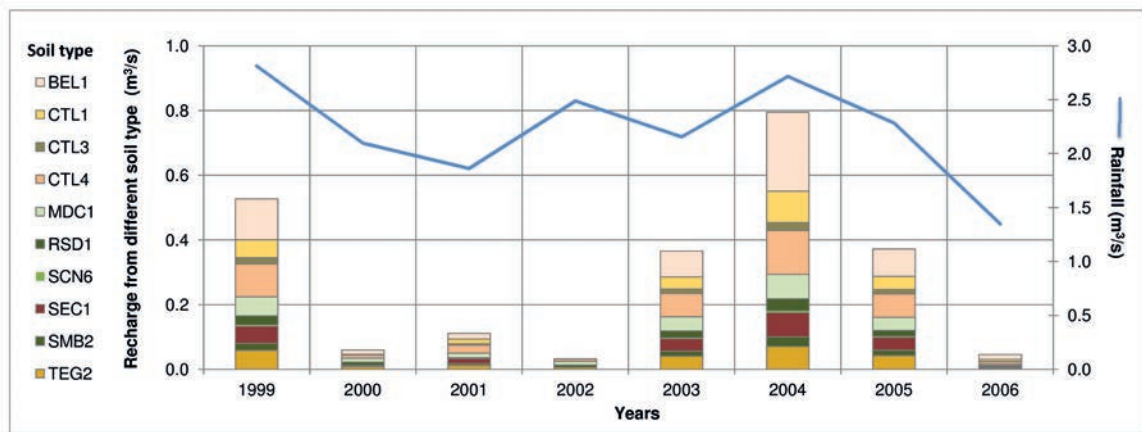


Fig. 7 - Dati annuali di precipitazione e ricarica dai diversi tipi di suolo ( $m^3/s$ ). Risultati del bilancio idrico del suolo effettuato con CRITERIA all'interno della cella meteorologica evidenziata in Fig. 6.

Fig. 7 - Yearly rainfall and recharge data from different soil types ( $m^3/s$ ). Results of soil water balance performed by CRITERIA on meteo cell highlighted in Fig. 6.

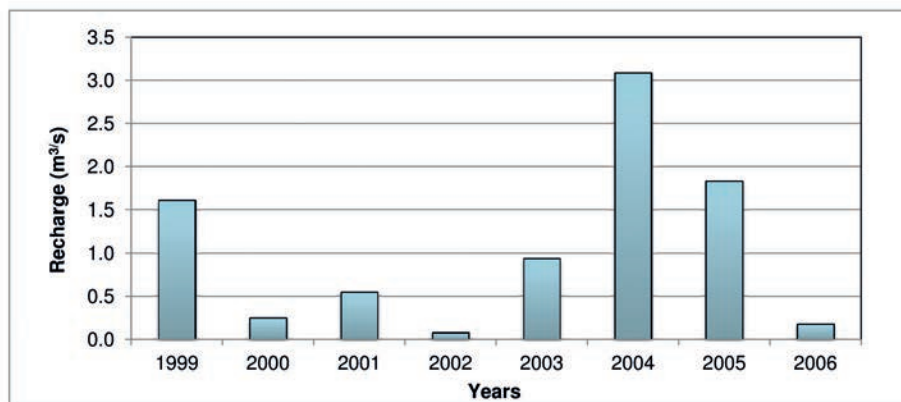


Fig. 8 - Stima della ricarica complessiva da imporre al modello di flusso della conoide alluvionale del Fiume Reno (Reno Alluvial Fan in Tab. 1).

Fig. 8 - Meteorological recharge evaluation in the Reno Alluvial Fan groundwater flow model.

disponibili per i prelievi è quello messo a punto nel tempo nell'ambito dello sviluppo del modello Emiro II - Regional di Tab.1. In particolare:

- per i prelievi ad uso civile vengono utilizzati i dati forniti periodicamente dagli Enti Gestori e relativi al prelievo di acqua dai campi pozzi acquedottistici presenti sul territorio regionale. I volumi di acqua prelevata (Tab. 2) possono essere attribuiti direttamente alle celle del modello dato che l'ubicazione e la profondità sono note (Fig. 9);
- i prelievi ad uso industriale (Tab. 2) delle attività maggiormente idroesigenti sono anch'essi attribuibili direttamente alle maglie del modello (Fig. 9). I restanti prelievi, noti su base comunale, vengono distribuiti sui pozzi industriali del catasto pozzi regionale;
- i prelievi ad uso irriguo (Tab. 2) sono disponibili su base comunale; la loro stima dipende dall'evoluzione del sistema delle colture e dalla presenza di periodi siccitosi. L'attribuzione nello spazio 3D anche in questo caso fa riferimento alle caratteristiche di settore desunte dal catasto pozzi regionale.

L'ultimo aspetto è legato alle osservazioni piezometriche disponibili nello spazio e nel tempo. La disponibilità di serie storiche è garantita dalla Rete Regionale di Monitoraggio (Regione Emilia-Romagna, 2010a) con cui si provvede a misure manuali del livello piezometrico, recentemente integrate con le misure automatiche di 40 centraline (Arpa Emilia-Romagna e Regione Emilia-Romagna, 2008).

Tutti i pozzi della rete sono perfettamente conosciuti per ubicazione e posizionamento dei filtri. Le frequenze dei rilievi manuali sono in linea con le necessità di aggiornamento e di verifica di Emiro II - Regional. L'integrazione col rilievo automatico permette inoltre, su di un sottoinsieme di punti, di meglio precisare le dinamiche stagionali dei livelli piezometrici e gli abbassamenti riscontrabili nei periodi di prolungata siccità.

La rete regionale può essere affiancata e integrata, nello spazio e nel tempo, con misure ad hoc. Un esempio è fornito dal monitoraggio piezometrico che dal 2002 permette una descrizione di dettaglio del comportamento degli acquiferi della conoide del Fiume Marecchia, in provincia di Rimini (Fig. 10).



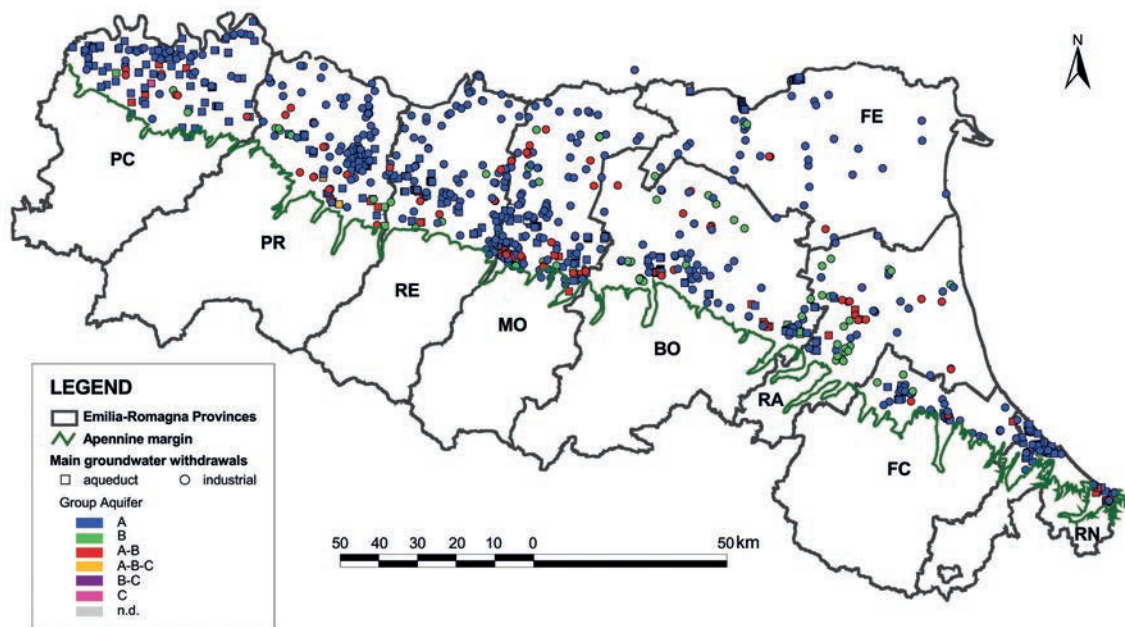


Fig. 9 - Ubicazione e gruppo acquifero captato secondo lo schema idrostratigrafico di Regione Emilia-Romagna e Eni-Agip (1998) dei principali prelievi di acque sotterranee a scopo idropotabile ed industriale.

Fig. 9 - Location and captured aquifer group of the main drinking water and industrial withdrawals.

Ai 15 pozzi appartenenti alla Rete Regionale di Monitoraggio si sovrappone una rete di 72 pozzi gestita dall'amministrazione locale con 2 campagne di misura all'anno (generalmente in aprile e settembre). Tra queste si interpongono altre quattro misure su una rete sottinsieme della precedente (36 pozzi) aumentando così la frequenza delle osservazioni a favore di una più accurata analisi del comportamento stagionale del sistema. Tutto ciò in ragione della riconosciuta importanza della Conoide del Marecchia all'interno delle strategie di gestione dell'approvvigionamento idropotabile dell'intero territorio della Romagna, dove negli ultimi 10 anni il verificarsi di prolungati periodi siccitosi ha portato a diverse situazioni di crisi idrica (Chahoud et al., 2012b).

Provinces	Groundwater withdrawals (million m <sup>3</sup> /y)			
	Aqueduct	Industrial	Agricultural	Total
Piacenza	26.0	13.9	56.1	96.0
Parma	46.5	47.4	37.2	131.0
Reggio-Emilia	54.8	19.8	39.3	114.0
Modena	65.9	31.1	16.6	114.0
Bologna	56.0	22.0	21.7	100.0
Ferrara	0.1	7.8	3.7	12.0
Ravenna	4.9	15.4	4.7	47.0
Forlì-Cesena	7.6	9.6	15.9	33.0
Rimini	26.1	3.9	5.2	35.0
<b>Total</b>	<b>288.0</b>	<b>171.0</b>	<b>208.0</b>	<b>681.0</b>

Tab. 2 - Stima dei prelievi da acque sotterranee per i diversi usi (fonte Piano di Tutela delle Acque della Regione Emilia-Romagna 2005).

Tab. 2 - Groundwater withdrawals by use, from Emilia-Romagna Water Protection Plan (Regione Emilia-Romagna 2005).

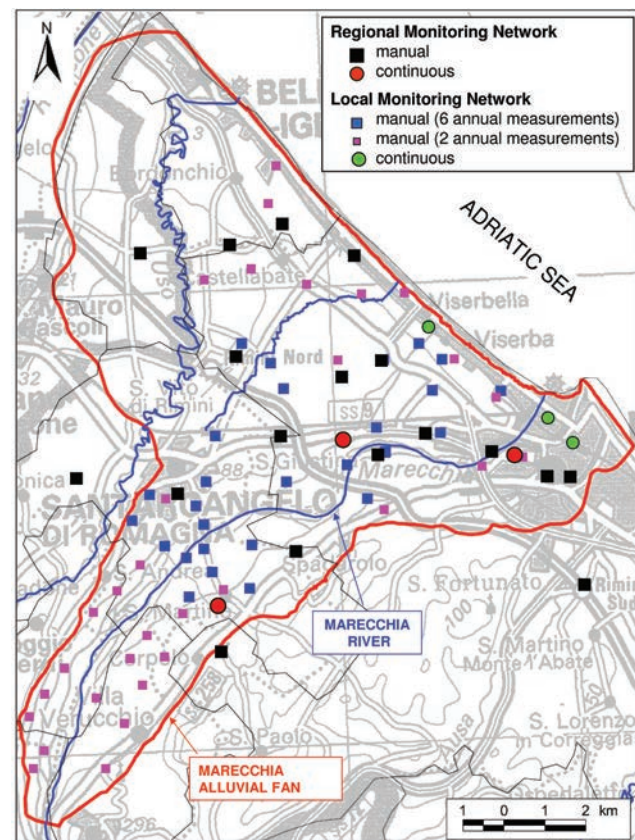


Fig. 10 - Integrazione del monitoraggio regionale/locale e manuale/automatico della conoide alluvionale del Fiume Marecchia.

Fig. 10 - Integration of regional/local and manual/automatic monitoring networks of the Marecchia Alluvial Fan.

## Risultati

I modelli descritti in Tab. 1 sono stati utilizzati in diversi ambiti applicativi. Il primo è quello solitamente legato alla verifica ed al miglioramento del livello di conoscenza idrogeologica del sistema idrico sotterraneo; ogni implementazione modellistica ha permesso, attraverso l'analisi del bilancio idrogeologico, di tracciare la dinamica di circolazione dell'acqua nel sottosuolo. I riferimenti bibliografici precedentemente richiamati nella parte introduttiva di presentazione dei modelli numerici documentano questo aspetto e ad essi si rimanda per specifici approfondimenti.

In questa sede si vogliono evidenziare, attraverso due situazioni esemplificative realizzate con due tra i modelli di Tab.1, le possibili modalità e le potenzialità di utilizzo di questi per la pianificazione e la gestione della risorsa idrica sotterranea. Ciò attraverso l'esecuzione di simulazioni che rappresentano le alternative o gli scenari da analizzare. Diventa quindi cruciale la capacità di poter rappresentare i risultati in termini chiari e sintetici, in modo da fornire gli elementi utili ai fini decisionali.

Il primo esempio di applicazione e successiva analisi dei risultati del modello numerico riguarda il modello Emiro II - Regional di Tab. 1. L'analisi è stata impostata per riuscire a schematizzare il flusso sotterraneo nei corpi idrici recentemente identificati all'interno del processo di implementazione della Direttiva 2000/60/CE (Fig. 4 e Fig. 5). In questo caso è stato preventivamente necessario verificare la possibilità, da parte del modello Emiro II - Regional, di poter descrivere adeguatamente il comportamento dei sottosistemi che lo costituiscono nel loro insieme.

A titolo di esempio, nella Fig. 11 è riportata la discretizzazione dell'insieme delle conoidi parmensi dello Stirone, del Taro, e del Parma-Baganza unitamente alla conoide dell'Enza prevalentemente in territorio reggiano.

In particolare, la parte sinistra della figura mostra la delimitazione dei corpi idrici per i Complessi Acquiferi superiori A1 ed A2 (in alto) e la sua proiezione sulle celle del modello (in basso), con la delimitazione delle porzioni libere delle conoidi (in azzurro) attribuite ai Complessi Acquiferi "superiori" (A1 ed A2), il passaggio da queste verso gli acquiferi confinati superiori (in blu) e da questi ultimi verso i sistemi di pianura (in verde). La parte destra della figura evidenzia le medesime transizioni relativamente però ai Complessi Acquiferi "inferiori" A3, A4, B, C.

Le delimitazioni appena descritte sono state utilizzate per analizzare nel tempo il bilancio idrico di ciascun corpo idrico sotterraneo (in Fig. 12 è riportato l'esempio degli acquiferi liberi del raggruppamento di conoidi di Fig. 11). I termini del bilancio sono sia quelli "esterni" ovvero l'alimentazione, i prelievi e gli immagazzinamenti, sia quelli "interni" intendendo con questi gli scambi tra parti del sistema principale.

Nella Fig. 13, invece, i termini del bilancio sono stati mediati sull'intero periodo di simulazione (dal 2002 al 2006) e sono riportati all'interno di uno schema attraverso il quale è possibile ricostruire gli scambi di acqua tra un corpo idrico sotterraneo e l'altro.

In sintesi, l'analisi dell'insieme degli elaborati prodotti relativamente al bilancio idrogeologico del sistema, consente di delineare i principali caratteri del flusso idrico sotterraneo,

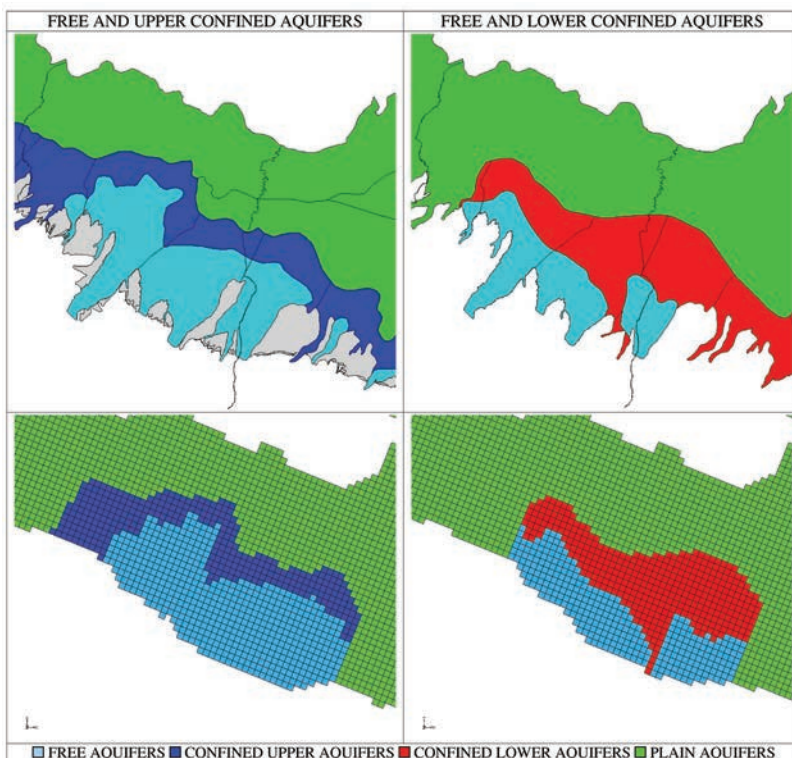


Fig. 11 - Discretizzazione della delimitazione dei corpi idrici sotterranei del raggruppamento Stirone, Taro, Parma-Baganza ed Enza.

Fig. 11 - Groundwater bodies boundary discretization of the Stirone, Taro, Parma-Baganza ed Enza alluvial fans group.

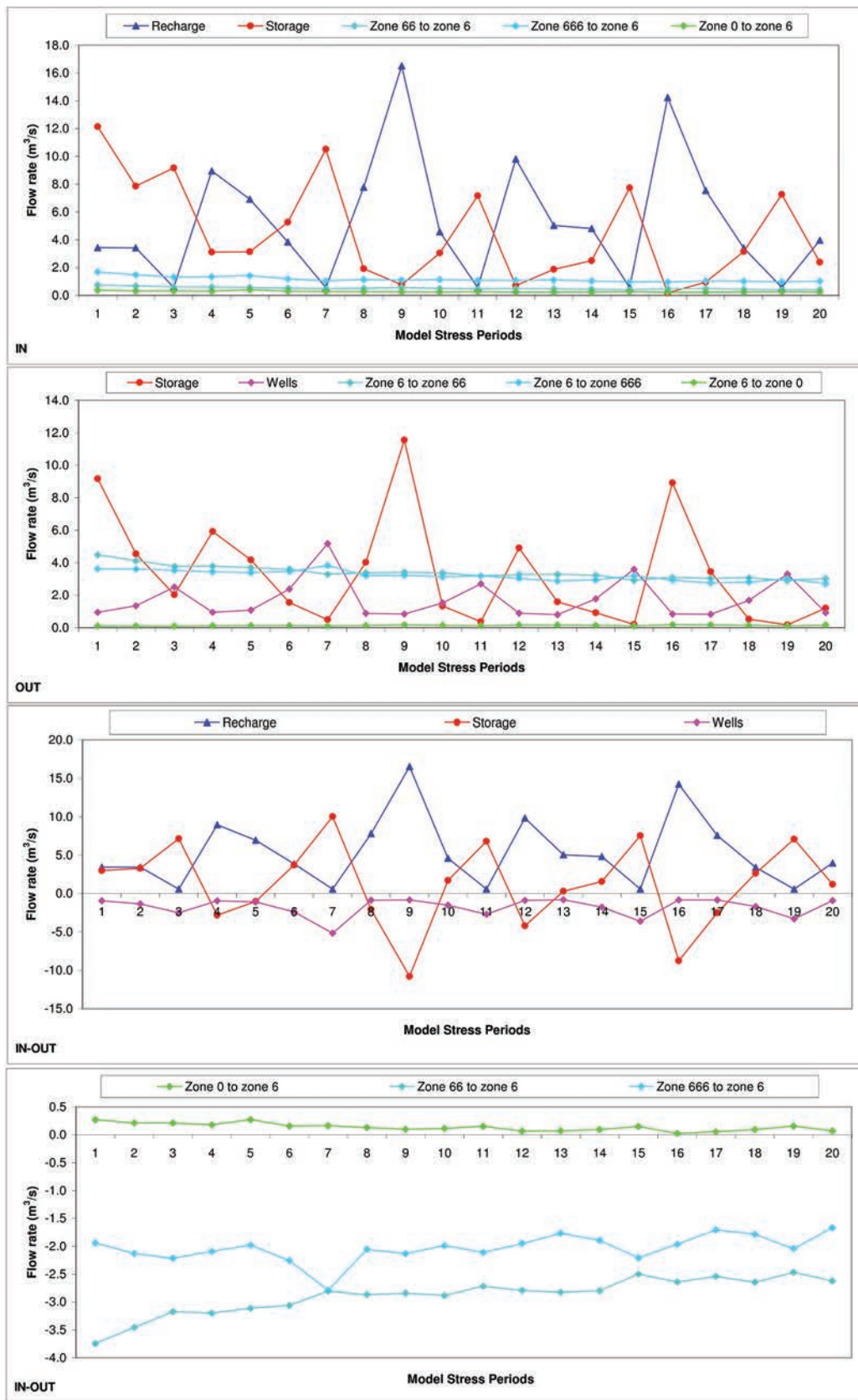


Fig. 12 - Analisi del water budget degli acquiferi liberi del raggruppamento Stirone, Taro, Parma-Baganza ed Enza, (6=libero, 66=confinato superiore; 666=confinato inferiore; 0=bordo laterale).

Fig. 12 - Water budget analysis for unconfined aquifers of Stirone, Taro, Parma-Baganza and Enza alluvial fans group, (6=unconfined aquifers, 66=upper confined aquifers; 666=lower confined aquifers; 0=surrounding boundary).

che nell'esemplificazione relativa al raggruppamento delle conoidi esaminate possono essere così sintetizzati:

- i prelievi di acqua sotterranea (circa  $4.5 \text{ m}^3/\text{s}$ ), sono ben distribuiti tra le porzioni di conoide libera (40%) e quelle confinate (60%) ed in queste ultime in ugual misura tra le parti superiori ed inferiori;
- parte dell'alimentazione che ricarica gli acquiferi liberi viene trasferita nelle porzioni confinate poste più a valle, in misura maggiore in quelle superiori rispetto a quelle inferiori e con una dinamica regolata anche dalla stagionalità dei prelievi;
- gli acquiferi confinati, soprattutto la parte superiore, che per l'analisi del bilancio comprende anche il sovrastante sistema freatico superficiale, cedono acqua ai sistemi di pianura situati più a valle;
- l'analisi degli immagazzinamenti in funzione del tempo mostra la consueta ciclicità stagionale caratterizzata dall'alternanza dei periodi a prevalente ricarica con quelli a prevalente consumo della risorsa;
- l'analisi evidenzia inoltre un deficit idrico a carico delle porzioni libere pari a  $1.16 \text{ m}^3/\text{s}$  come valore medio per l'intero periodo 2002-2006; le porzioni confinate superiori tendono invece ad immagazzinare acqua (anche quella che alimenta la corrispondente parte del sistema freatico di pianura), mentre quelle inferiori sono mediamente in equilibrio.

Il secondo esempio riguarda il modello di flusso delle acque sotterranee della conoide del Fiume Marecchia (Marecchia Alluvial Fan di Tab. 1) che è stato utilizzato per valutare le possibilità di realizzazione di un intervento di ricarica artificiale operabile attraverso l'utilizzo dei laghetti di cave esauste situati in destra idrografica del fiume nella zona in cui questo esercita la propria azione di ricarica verso la conoide (Fig. 14).

Una volta verificata la fattibilità per quello che riguarda i laghi (dimensioni, rapporti con la falda freatica, rapporti col

fiume, permeabilità del fondo e delle sponde ecc.) e la disponibilità di risorsa idrica per l'alimentazione, l'utilizzo del modello di flusso ha permesso di:

- verificare la risposta degli acquiferi all'ingresso di un maggiore quantitativo di acqua ed in relazione all'intensità e posizione dell'impianto di ricarica;
- effettuare una valutazione dei recuperi piezometrici e l'analisi del bilancio idrogeologico per stimare l'efficienza dell'impianto di ricarica artificiale.

Ciò è stato possibile grazie a due simulazioni di scenario realizzate col modello numerico rispettivamente in assenza (caso 0) ed in presenza (caso 1) dell'intervento di ricarica artificiale e confrontando i risultati sia in termini di carico idraulico, sia in termini di bilancio. Per il caso 1 si è valutata la risposta del sistema rispetto ad una portata in ingresso pari a  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  (che è tutta la disponibilità derivabile dal Fiume Marecchia ed un valore comparabile con le necessità idropotabili della zona) imposta nei laghi per il periodo da ottobre a maggio (che è quello in cui vi è disponibilità di risorsa idrica superficiale) e per due anni consecutivi (2007 e 2008).

La Fig. 15 mostra la variazione del carico idraulico indotta dalla ricarica artificiale, nel piano geografico; si nota che il recupero piezometrico superiore ad 1 m si sposta sempre più verso valle e lateralmente.

La Fig. 16 mostra invece l'analisi del bilancio idrogeologico dell'intera conoide su base mensile per i due anni di simulazione. Gli istogrammi rappresentano, per ciascun termine del bilancio, le differenze tra i valori ottenuti dalle due simulazioni e quindi individuano il destino dell'acqua costituente la ricarica artificiale ( $1 \text{ m}^3/\text{s}$ , istogrammi in blu) operata da ottobre a maggio attraverso i laghetti. Negli otto mesi in cui avviene la ricarica, gran parte di questa viene immagazzinata all'interno del sistema (istogrammi in rosso ed arancione,  $0.6 \text{ m}^3/\text{s}$ ), mentre una quota via via crescente genera un maggior deflusso verso valle e quindi una maggiore uscita dai confini

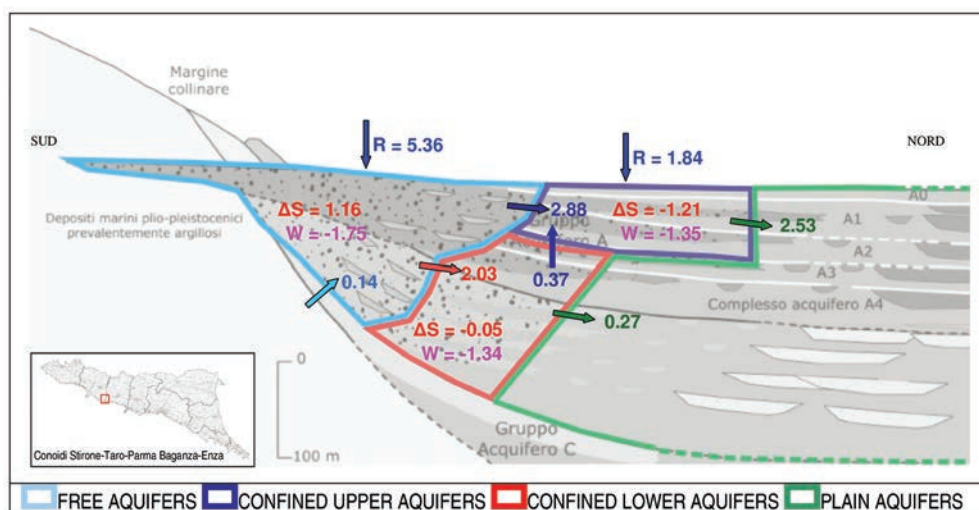


Fig. 13 - Schema di flusso delle acque sotterranee all'interno del raggruppamento di conoidi Stirone, Taro, Parma-Baganza ed Enza (portate in  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

Fig. 13 - Groundwater flow scheme within the Stirone, Taro, Parma-Baganza and Enza alluvial fans group (flow rate in  $\text{m}^3/\text{s}$ ).

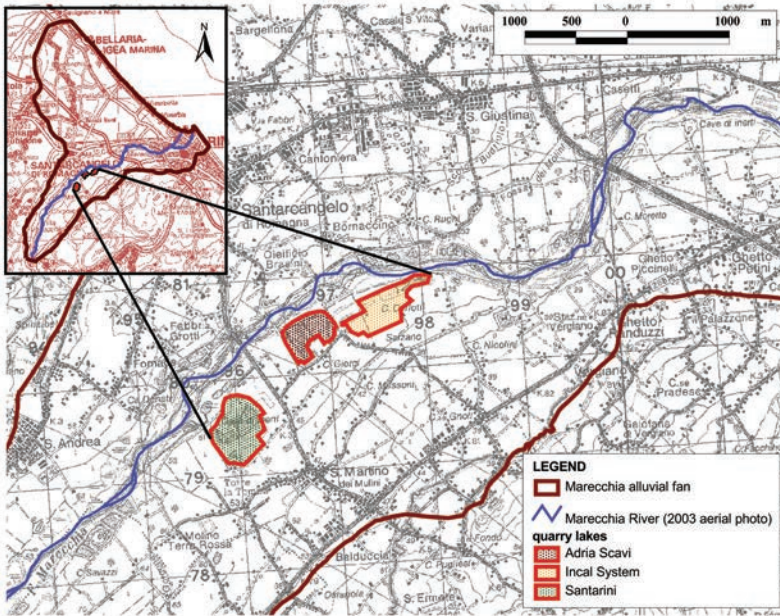


Fig. 14 - Inquadramento territoriale dell'area di studio con i tre laghi di ex cava possibili oggetto di interventi di ricarica artificiale della conoide alluvionale del Fiume Marecchia.

Fig. 14 - Study area for Marecchia Alluvial Fan artificial recharge intervention and quarry lake position.

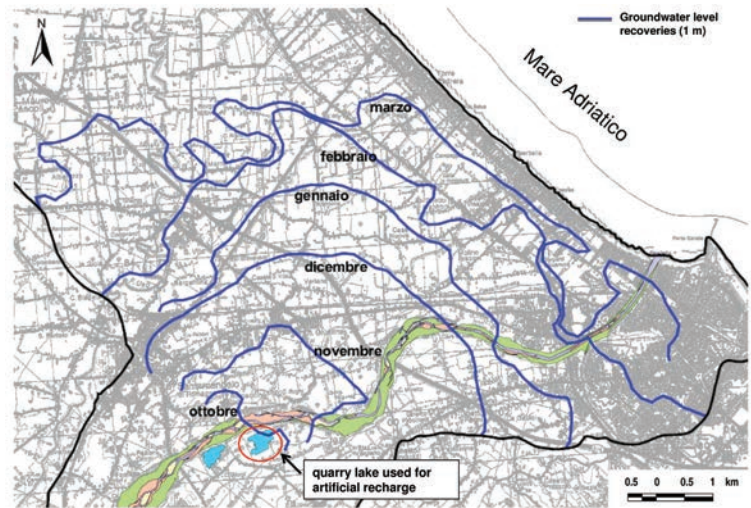


Fig. 15 - Recupero (di 1 metro) del livello della falda freatica nel tempo durante il primo ciclo (primo anno) di ricarica artificiale della conoide alluvionale del Fiume Marecchia.

Fig. 15 - 1 meter recoveries of groundwater level over time during the first Marecchia Alluvial Fan artificial recharge cycle.

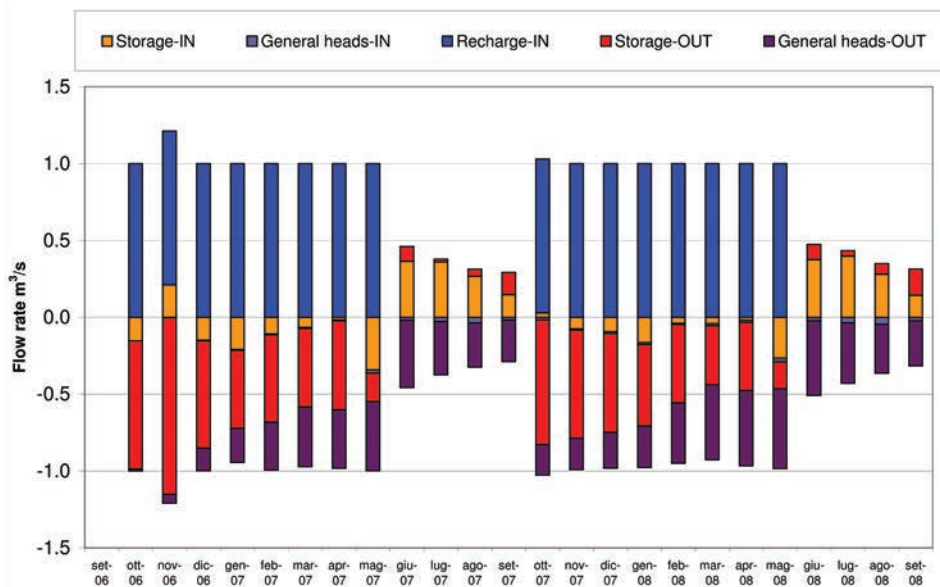


Fig. 16 - . Analisi del bilancio idrogeologico della conoide alluvionale del Fiume Marecchia su base mensile, caso 1 (con ricarica artificiale) in rapporto al caso 0 (senza ricarica artificiale).

Fig. 16 - Monthly water budget analysis of Marecchia Alluvial Fan, case 1 (artificial recharge) related to case 0 (no artificial recharge).

lateral (istogrammi in viola, 0,30 m<sup>3</sup>/s). Nei quattro mesi di intervallo tra i due cicli di ricarica, continua la maggiore uscita dai bordi del sistema a scapito dell'acqua immagazzinata (0,35 m<sup>3</sup>/s). Aggregando i dati di Fig. 16 su base annuale l'analisi del bilancio idrogeologico mostra che mediamente il sistema è in grado di mantenere all'interno degli immagazzinamenti il 53% dell'acqua in ingresso con la ricarica artificiale.

## Discussione

I risultati precedentemente esposti costituiscono un esempio di come i modelli idrogeologici siano un supporto operativo nella pianificazione della risorsa idrica. Il primo esempio ha mostrato come il modello Emiro II - Regional, alla scala dell'intero acquifero emiliano-romagnolo, sia stato in grado di adattarsi al nuovo quadro normativo di riferimento per la pianificazione, potendo grazie alla struttura tridimensionale, descrivere i nuovi corpi idrici sotterranei definiti dalla D.G.R. n. 350/2010 (Regione Emilia-Romagna, 2010a). L'analisi del bilancio nello spazio e nel tempo ha permesso di stimare la variazione del quantitativo di risorsa idrica ospitata nei corpi idrici sui quali sono impiegate sia la pianificazione sia l'organizzazione del monitoraggio delle acque.

Il secondo esempio riguarda l'utilizzo di un modello di maggior dettaglio (Marecchia Alluvial Fan in Tab. 1) in riferimento ad una valutazione specifica di fattibilità di un intervento di ricarica artificiale delle falde. In questo caso risulta metodologicamente rilevante la modalità di costruzione degli scenari di simulazione con i quali è impostata la valutazione finale e le modalità attraverso le quali questa viene restituita.

I due modelli sono tra loro relazionati, nel senso che hanno subito, nel corso della loro evoluzione, ripetute verifiche di coerenza sia dal punto di vista della geometria impiegata, sia dal punto di vista delle informazioni utilizzate. Particolarmente importante è l'intervallo di tempo utilizzato per le realizzazioni, sia per verificare la congruità dei sistemi tra loro, sia per necessità operative: infatti, tanto più l'aggiornamento della calibrazione è vicino nel tempo alla situazione da simulare, tanto maggiore risulterà l'utilità della stessa valutazione, soprattutto in termini previsionali. Da qui la necessità di mantenere aggiornati i modelli secondo lo schema inizialmente richiamato in Fig. 2.

Complessivamente, queste attività rientrano nel processo aperto di "gestione del modello", intendendo con ciò l'insieme delle operazioni necessarie a mantenerne attivi l'aggiornamento e le funzionalità. In questo modo lo stato quantitativo della risorsa idrica sotterranea può essere analizzato durante la sua evoluzione nel tempo. Risulta in tal senso di fondamentale importanza il governo del flusso di dati che alimenta i modelli, sia per quel che riguarda i dati delle reti di monitoraggio (Tab. 1), sia per i termini in *input* (prelievi di acque sotterranee, stima delle alimentazioni da fiume e da pioggia) che ne regolano il funzionamento quali principali termini

di sollecitazione. Relativamente a questi ultimi particolare attenzione è stata posta già nelle fasi di sviluppo iniziale di tutte le applicazioni realizzate: ad esempio la stima dell'alimentazione dovuta alla pioggia può essere costantemente aggiornata attraverso il modello di bilancio idrico del suolo CRITERIA, che viene a sua volta tenuto aggiornato dal Servizio Idro-Meteo-Clima di Arpa Emilia-Romagna per scopi agro-meteorologici (Arpa Emilia-Romagna, 2012a) e come osservatorio della siccità (Arpa Emilia-Romagna, 2012b), in entrambi i casi per la redazione dei bollettini periodici.

## Conclusioni

La tecnologia impiegata e l'esperienza maturata in oltre 10 anni di sviluppo ed applicazione dei modelli matematici nel contesto delle acque sotterranee della Regione Emilia-Romagna, permettono ora di proporre un loro ruolo di servizio sistematico a supporto degli enti preposti alla gestione e pianificazione della risorsa idrica sotterranea. Questo è possibile perché, fin dalla fase di organizzazione di ciascuna applicazione, tutte le scelte di fondo sono state legate alla necessità di mantenere attiva la fase di gestione dei modelli (Fig. 2), quindi all'interno di un flusso di informazioni che devono permetterne il continuo aggiornamento e verifica. Nella gestione rientrano anche le verifiche incrociate tra le applicazioni di dettaglio e quelle regionali.

Obiettivo principale della gestione è quello di poter realizzare, a richiesta, applicazioni mirate ad obiettivi di pianificazione e gestione della risorsa idrica, sia a scala regionale, sia di dettaglio. Ogni occasione permette inoltre di verificare la coerenza reciproca tra i due livelli, assumendo le applicazioni di dettaglio come fonte di aggiornamento e miglioramento dello schema regionale. L'utilizzo avviene attraverso la costruzione di opportuni scenari di riferimento realizzati ad hoc in funzione delle valutazioni che di volta in volta vengono richieste, ed ottenute per elaborazione comparata dei risultati delle diverse simulazioni, sia in termini di carico idraulico, sia in termini di bilancio idrogeologico. In alcune situazioni specifiche la simulazione può tendere ad una vera e propria previsione ed in questo caso l'aggiornabilità del modello deve essere continuamente garantita attraverso un adeguato flusso dati.

L'uso sistematico delle simulazioni a questo livello contribuisce a soddisfare la Direttiva 2000/60/CE che prevede che, per ciascun distretto idrografico, venga predisposto un programma di misure finalizzato al raggiungimento degli obiettivi ambientali che coinvolgono sia lo stato chimico che quantitativo. La modellistica matematica di simulazione costituisce quindi un utile supporto per stimare l'efficacia delle misure stesse, esprimendo in termini chiari e sintetici i risultati ottenuti dai modelli. Quest'ultimo aspetto, legato alla comunicazione dei risultati dei modelli, è altrettanto importante in quanto in grado di valorizzare l'intero lavoro e di tradurre questo in un adeguato ed efficace supporto decisionale.

## Bibliografia

- Arpa Emilia-Romagna (2012a). Bollettino agrometeorologico settimanale "The weekly agrometeorological bulletin". A cura del Servizio Idro-Meteo-Clima di Arpa Emilia-Romagna. [http://www.arpa.emr.it/sim/?agrometeo/bollettino\\_settimana](http://www.arpa.emr.it/sim/?agrometeo/bollettino_settimana). Citato il 3/12/2012.
- Arpa Emilia-Romagna (2012b). Bollettino regionale della siccità "The regional drought bulletin". A cura del Servizio Idro-Meteo-Clima di Arpa Emilia-Romagna. <http://www.arpa.emr.it/siccita/?bollettini>. Citato il 3/12/2012.
- Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2006). Studio della conoide alluvionale del fiume Marecchia: analisi quali-quantitativa a supporto della corretta gestione della risorsa idrica "Study of the Marecchia River alluvial fan: qualitative and quantitative analysis to support water resources management". Rapporto tecnico, 155 pp. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/informazioni/documenti>. Citato il 3/12/2012.
- Arpa Emilia Romagna, Regione Emilia-Romagna (2007). Modello di flusso e trasporto di nitrati nelle acque sotterranee della regione Emilia-Romagna "Groundwater flow and nitrate transport model of Emilia-Romagna aquifers". Rapporto tecnico. 75 pp. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/informazioni/documenti>. Citato il 3/12/2012.
- Arpa Emilia-Romagna, Regione Emilia-Romagna (2008). Rete regionale di monitoraggio delle acque sotterranee. "Groundwater regional monitoring network". A cura di Marco Marcaccio. Rapporto tecnico. 59 pp. [http://www.arpa.emr.it/dettaglio\\_documento.asp?id=2309&idlivello=216](http://www.arpa.emr.it/dettaglio_documento.asp?id=2309&idlivello=216). Citato il 3/12/2012.
- Arpa Emilia Romagna, Regione Emilia-Romagna (2009). Applicazione della modellistica matematica di simulazione. Fase I: analisi del flusso delle acque sotterranee in relazione a scenari caratterizzati da particolari criticità nel rapporto ricarica-prelievi "Groundwater flow numerical modeling application. Part I: groundwater flow scenario analysis referring to critical ratio between withdrawals and recharge". Rapporto tecnico. 140 pp. <http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/informazioni/documenti>. Citato il 3/12/2012.
- Bally A.W., Snelson S. (1980). Realm of subsidence. In: A.D. Miall (Ed.), Facts and Principles of World Petroleum Occurrence. Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir 6, pp. 9-94.
- Barazzuoli P., Nocchi M., Rigati R., Salleolini M. (2008) A conceptual and numerical model for groundwater management: a case study on a coastal aquifer in southern Tuscany, Italy. *Hydrogeology Journal*, 16(8), pp 1557-1576.
- Bonomi T., Fumagalli L., Capodoglio P. (2012). Preliminary groundwater model of the Aosta Valley aquifer (Northern Italy). Proc. of FLOWPATH 2012, Percorsi di idrogeologia. Bologna, 20-22 giugno 2012.
- Borsi I., Rossetto R. (2012). L'utilizzo della modellistica nella gestione della risorsa idrica "Use of modeling in water resource management". Acque sotterranee, *Italian Journal of Groundwater*, n.2/129, pp 67-68.
- Chahoud A., Bonsignore F., Gelati L., Zaccanti G., Patrizi B., Albertazzi C. & Palumbo A. (2012a). Groundwater modelling: Emilia-Romagna resources planning and managing support tools. Proc. of 7th European Congress on Regional Geoscientific cartography and Information systems. Bologna (Italy). June 12-15, 2012.
- Chahoud A., Di Lorenzo M., Grazzini F., Zaccanti G. (2012b). Numerical Modelling Tools for Water Crisis Prediction and Management, Proc. of 7th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems; Bologna, 12-15 giugno 2012.
- Chahoud A., Gelati L., Patrizi G. & Zaccanti G. (2010). Land Subsidence Modelling of The Reno River Plain (Bologna, Northern Italy). Abstracts. of the Eighth Int. Symp. On Land Subsidence, Queretaro-Mexico, October 2010, p. 20.
- Cibin U., Severi P., Chahoud A., Frassinetti G., Marcaccio M. (2006). Water Deficit and Subsidence in a Intensive-Exploited Alluvial Fan (Reno River, Italy): Subsurface Hydrogeological Analysis to Support Groundwater Resource Management. Proc. of 5th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems; Barcelona, June 13-16, 2006.
- Cremonini G., Ricci Lucchi F. (1982). Guida alla geologia del margine appenninico-padano. "Guide to the geology of the Apennine - Po margin". Guida Geologica Regionale, Società Geologica Italiana, 247 pp.
- Dottori F., Marletto V., Van Soetendael M., Tomei F., Antolini G., (2007). CRITERIA 2007, Manuale tecnico "CRITERIA 2007, Technical reference manual". [http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/\\_cerca\\_doc/meteo/software/criteria\\_bdp\\_manualetecnico.pdf](http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/meteo/software/criteria_bdp_manualetecnico.pdf). Citato il 3/12/2012.
- Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C. & McDonald M.G., (2000). MODFLOW-2000, The U.S. Geological Survey Modular Groundwater model – User Guide to Modularization concepts and the Ground-water Flow Process. U.S. Geological Survey, Open-File Report 00-92.
- Lecca G., Lai C., Murgia F., Biddau R., Fanfani L., Maggi P. (2009). AQUAGRID: an extensible platform for collaborative problem solving in groundwater protection. *Earth Science Informatics*, 2, pp. 83-95.
- Passadore G., Monego M., Altissimo L., Sottani A., Putti M., Rinaldo A. (2012). Alternative conceptual models and the robustness of groundwater management scenarios in the multi-aquifer system of the Central Veneto Basin, Italy. *Hydrogeology Journal*, 20(3), pp. 419-433.
- Pieri M., Groppi G. (1981). Subsurface geological structure of the Po Plain. C.N.R., Prog. Fin. Geodinamica, Pubbl. 414, 23 pp., Roma.
- Puma F., Bertolo B. (2012). Il Piano di Gestione del Distretto del Fiume Po "The management plan of the Po River district". *Ecoscienza*, n.6 anno 2012, pp 75-77.
- Refsgaard J.C., Højberg A. L., Møller I., Hansen M. Søndergaard V. (2010). Groundwater Modeling in Integrated Water Resources Management—Visions for 2020. *Ground Water*, vol. 48, n.5, pp 633-648.
- Regione Emilia-Romagna (2005). Piano di Tutela delle Acque "Water Protection Plan of Emilia-Romagna Region". Approvato dall'Assemblea Legislativa con deliberazione n° 40 del 21/12/2005. Relazione Generale.
- Regione Emilia-Romagna (2010a). Delibera di Giunta n. 350 del 8/02/2010, Allegato 2 Tipizzazione /caratterizzazione e individuazione dei corpi idrici superficiali e sotterranei, prima individuazione delle reti di monitoraggio "Surface and groundwater bodies definition and characterization, first monitoring network set-up". [http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/temi/piani\\_di\\_gestione](http://ambiente.regione.emilia-romagna.it/acque/temi/piani_di_gestione). Citato il 3/12/2012
- Regione Emilia-Romagna (2010b). Carta dei suoli della pianura emiliano-romagnola in scala 1:50.000, edizione 2005 "Soil cartography of Emilia-Romagna Plain, scale: 1:50.000". a cura di Guermandi M. e Tarocco P.. Rapporto tecnico. 14 pp.
- Regione Emilia-Romagna, ENI-AGIP, (1998). Riserve idriche sotterranee della Regione Emilia-Romagna "Groundwater reserves of Emilia-Romagna Region". A cura di G. Di Dio, Selca, Firenze.
- Tomei F., Antolini G., Bittelli M., Marletto V., Pasquali A., Van Soetendael M. (2007). Validazione del modello di bilancio idrico CRITERIA "Validation of CRITERIA water balance model". AIAM 2007 - 10° Convegno nazionale di Agrometeorologia.