

Accoppiamento stretto (*tight-coupling*) di motori di simulazione numerica di flusso e trasporto delle acque sotterranee con database spaziali e tecnologia GIS: un nuovo approccio per l'integrazione di Feflow ed ArcGIS

Tight-coupling of groundwater flow and transport modelling engines with spatial databases and GIS technology: a new approach integrating Feflow and ArcGIS

E. Crestaz, M. Pellegrini e P. Schätzl

Riassunto: L'implementazione di modelli numerici di flusso e trasporto delle acque sotterranee è impegnativa, in termini di tempo, risorse umane e finanziarie, coinvolgendo società di consulenza specializzate e modellisti esperti. Successivamente, nei limiti del proprio campo di applicabilità, è auspicabile che tali modelli siano resi accessibili a personale meno specializzato, per progettare ed eseguire scenari di simulazione, operando in ambienti di lavoro meno specializzati rispetto agli ambienti dedicati. Sistemi GIS accoppiati con database spaziali appaiono candidati ideali per affrontare il problema, in ragione della più ampia base di utilizzo.

L'articolo discute la questione dalla prospettiva di una architettura basata su un accoppiamento stretto (*tight-coupling*), funzionale alla integrazione di database spaziali, GIS e motori di simulazione numerica, affrontando gestione, interrogazione ed analisi spaziale dei dati osservati e calcolati.

Parole chiave: modellazione numerica, sistema informativo geografico, database spaziale, accoppiamento stretto, Feflow

Keywords: *numerical modeling, geographic information system, spatial database, tight coupling, Feflow*

I dati osservati possono essere migrati verso il database centralizzato ed utilizzati per impostare, dinamicamente a *run time*, condizioni transitorie di simulazione, limitando i rischi di violazione dell'integrità dei dati impliciti nel trasferimento via file. Gli stessi scenari di simulazione possono essere impostati in ambiente GIS ed immagazzinati nel database spaziale, per successivo riferimento.

Una volta accoppiato il motore di calcolo con l'ambiente GIS, le simulazioni possono essere eseguite all'interno di quest'ultimo ed i risultati immagazzinati nel database. L'analisi spazio-temporale (es. per scopi di *auditing* post-calibrazione), la produzione cartografica e la geovisualizzazione possono quindi essere condotti utilizzando i tradizionali strumenti GIS.

I benefici di tale approccio includono una gestione dei dati più efficace e robusta, l'integrazione di funzionalità modellistiche (e modelli numerici) in ambiente GIS, supportando una ottimale integrazione dei processi di analisi e visualizzazione. Tra i limiti figurano il modesto supporto GIS per 3D e tempo, nonché la mancanza di strumenti dedicati di calibrazione, analisi e visualizzazione.

Viene quindi presentata la progettazione ed implementazione di un sistema basato su tecnologia ESRI, geodatabase ed ArcGIS, e DHI-WASY Feflow, codice numerico di calcolo agli elementi finiti per il flusso ed il trasporto delle acque sotterranee, allo stato dell'arte nel settore.

Abstract: *Implementation of groundwater flow and transport numerical models is generally a challenge, time-consuming and financially-demanding task, in charge to specialized modelers and consulting firms. At a later stage, within clearly stated limits of applicability, these models are often expected to be made available to less knowledgeable personnel to support/design and running of predictive simulations within more familiar environments than specialized simulation systems. GIS systems coupled with spatial databases appear to be ideal candidates to address problem above, due to their much wider diffusion and expertise availability.*

Current paper discusses the issue from a tight-coupling architecture perspective, aimed at integration of spatial databases, GIS and numerical simulation engines, addressing both observed and computed data management, retrieval and spatio-temporal analysis issues.

Observed data can be migrated to the central database repository and then used to set up transient simulation conditions in the

Ezio CRESTAZ 

Saipem S.p.A. (ENI Group)
Via Toniolo 1, 61032 Fano (PU), Italy
Birkbeck, University of London
Malet Street, London WC1E 7HX, UK
Ezio.Crestaz@saipem.com

Michele PELLEGRINI

Saipem S.p.A. (ENI Group)
Via Toniolo 1, 61032 Fano (PU), Italy
Michele.Pellegrini@saipem.com

Peter SCHÄTZL

DHI-WASY
Waltersdorfer Straße 105, 12526 Berlin, Germany
P.Schaetzl@dhi-wasy.de

Ricevuto: 20 luglio 2012 / Accettato: 20 agosto 2012
Pubblicato online: 30 settembre 2012

© Associazione Acque Sotterranee 2012

background, at run time, while limiting additional complexity and integrity failure risks as data duplication during data transfer through proprietary file formats. Similarly, simulation scenarios can be set up in a familiar GIS system and stored to spatial database for later reference.

As numerical engine is tightly coupled with the GIS, simulations can be run within the environment and results themselves saved to the database. Further tasks, as spatio-temporal analysis (i.e. for post-calibration auditing scopes), cartography production and geovisualization, can then be addressed using traditional GIS tools.

Benefits of such an approach include more effective data management practices, integration and availability of modeling facilities in a familiar environment, streamlining spatial analysis processes and geovisualization requirements for the non-modelers community. Major drawbacks include limited 3D and time-dependent support in traditional GIS, and lack of dedicated calibration, analysis and visualization tools.

A system implementation based upon ESRI geodatabase, ArcGIS and state-of-the-art finite element 3D flow and transport numerical code Feflow is presented and critically assessed.

Introduzione

La progettazione e l'implementazione di modelli numerici di simulazione delle acque sotterranee (Bear and Verruijt, 1987; Anderson and Woessner, 1992; Pinder, 2002) richiede, oltre che a specifiche competenze ed una forte interdisciplinarietà, la disponibilità di ambienti di simulazione dedicati, che integrino funzionalità avanzate (es. 3D-tempo-dipendenti) di pre- e post - processamento con i motori di calcolo numerico.

I modelli, una volta calibrati, dovrebbero essere integrati all'interno di SDSSs (*Spatial Decision Support systems*), che ne consentano l'utilizzo in simulazione da parte di personale che non abbia specifica formazione sui metodi e strumenti della modellistica numerica delle acque sotterranee, ovviamente nei limiti di applicabilità e rappresentatività dei modelli stessi, nonché nel rispetto delle esigenze di riservatezza e dei diritti di proprietà degli sviluppatori.

In questa ottica, ambienti GIS (Worboys and Duckman, 2004; Maguire, 2005; Longley et al., 2010) risultano candidati ottimali ad una integrazione di dati osservati e calcolati nel contesto di database spazio-temporali di riferimento (Frank, 1998; Langran, 1992; Ott and Swiaczny, 2001; Maidment, 2002; Strassberg et al., 2011). Unitamente all'accoppiamento dei motori di calcolo numerico all'interno dell'ambiente GIS (Brandmeyer and Karimi, 2000; Cascelli et al., 2005), lo sviluppo di applicazioni utente di front-end può supportare da un lato la definizione degli scenari di simulazione, in stazionario ed in transitorio (es. emungimenti, ricariche, variazioni di condizioni al contorno in ragione di cambiamenti all'esterno del dominio di analisi), nonché la visualizzazione dei risultati e la produzione cartografica.

All'utente non viene quindi richiesta una conoscenza avanzata degli ambienti dedicati di implementazione modellistica, se non per quanto attiene visualizzazione ed interrogazione

spaziale 3D e tempo dipendente, per la quale i GIS forniscono tradizionalmente un supporto ancora limitato.

Dato il quadro generale di cui sopra, l'articolo presenta brevemente l'architettura e l'implementazione di un sistema, denominato Feflow-ArcGIS, basato su tecnologia GIS ESRI (2012), nello specifico geodatabase (MacDonald, 1999; Zeiler, 1999) ed ArcGIS 9.3/10, e codice di calcolo agli elementi finiti Feflow 6.1 (Diersch, 2006; WASY-DHI, 2012) di prossimo rilascio. Quest'ultimo è, più propriamente, un sistema di modellazione completo, con funzionalità avanzate, integrate e dedicate di pre- e post - processamento. Mentre la presente analisi si riferisce ad una integrazione in ArcGIS in forma di DLL (*Dynamic Linking Library*) del solo motore numerico di calcolo di Feflow, all'utente viene comunque dato accesso alle citate funzionalità avanzate di sola visualizzazione ed interrogazione (non è supportato l'editing), attraverso Feflow Viewer.

Per quanto attiene lo schema del database idrogeologico spazio-temporale, il riferimento concettuale è quello del *groundwater data model* (Strassberg et al., 2011), evoluzione recente OR (Object Relational) di più tradizionali implementazioni relazionali (Codd, 1970; Karanjac, 1993; Karanjac et al., 2003; Gocu et al., 2001). Per riferimenti più generali sui database spazio-temporali si faccia riferimento a Worboys (2005) e Rigaux et al. (2002).

Uno schema UML (*Unified Modelling Language*) di database spazio-temporale (Figura 1), ispirato al *groundwater data model* e poi ulteriormente sviluppato in PostgreSQL/PostGIS (Crestaz, 2011; Crestaz et al., 2011), documenta la semplicità e l'eleganza del modello.

Nell'esempio in questione, la tabella 'g' consente di immagazzinare le informazioni geografiche (es. punti di monitoraggio, corsi d'acqua) nel generico attributo *geom* che supporta tutte le geometrie vettoriali implementate in PostGIS (Obe and Hsu, 2011). Le tabelle 'Point', 'Polyline' e 'Polygon' costituiscono altrettante specializzazioni di 'g', implementazione del concetto nativo OO (Orientato ad Oggetti) di ereditarietà. Utilizzando specifiche funzionalità di PostGIS (*table inheritance*), i dati geografici inseriti nella tabella padre 'g' possono quindi essere automaticamente reindirizzati verso le tabelle figlie, in funzione del tipo di geometria. Il reindirizzamento è implementato mediante programmi (*triggers*), la cui esecuzione è condizionata a specifici eventi, quali, nel caso in esame, l'inserimento proprio nella tabella padre (Crestaz, 2011).

La tabella 'tsType' consente di gestire le informazioni relative ai tipi di variabili, inclusi simboli ed unità di misura (es. 'h' e 'm s.l.m.'), mentre tutti i dati relativi alle serie temporali, misurate o calcolate che siano, confluiscono nella tabella 'ts' (Time Series). In quest'ultima, i due attributi *gId* e *tsTypeId* costituiscono altrettante FKs (*Foreign Keys*), che risolvono le due relazioni 1:M (uno-a-molti), rispettivamente con le tabelle 'g' e 'tsType'.

In sintesi, il sistema proposto mette in condizione l'utente di:

- aggiornare il database spazio-temporale, integrando al suo interno *feature* e *object classes* dedicate, funzionali all'immagazzinamento dei modelli numerici, degli scenari di simulazione e dei dati calcolati;

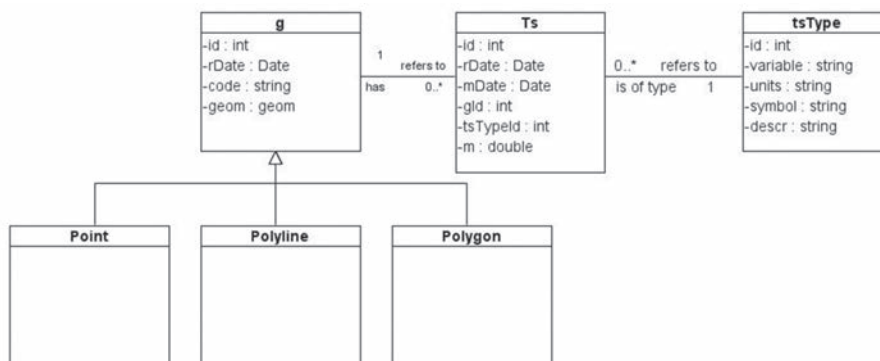


Fig. 1 - Modello UML di database spazio-temporale ispirato al Groundwater Data Model.

Fig. 1 - Spatio-temporal database UML schema based on Groundwater Data Model.

- impostare i propri scenari di simulazione direttamente all'interno di ArcMap, definendo i criteri di assegnazione delle condizioni al contorno ed interne direttamente sulla base dei dati osservati ed immagazzinati nel database spazio-temporale di riferimento;
- eseguire le simulazioni numeriche direttamente da ArcMap, salvando i risultati nel database spazio-temporale di riferimento, per i successivi scopi di analisi, produzione cartografica e/o geovisualizzazione;
- accedere ai risultati delle simulazioni attraverso Feflow Viewer, che garantisce una esperienza di geovisualizzazione più interattiva ed efficace rispetto all'ambiente GIS, particolarmente utile nel contesto di modelli 3D e transitori.

guendo in termini generali tra:

- accoppiamento leggero (*loose coupling*), nel quale le singole componenti del sistema mantengono la propria autonomia e ridotta o nulla conoscenza delle altre (Weick, 2000). Tipicamente si tratta di sistemi in cui il flusso informativo viene gestito in modo tradizionale, ad esempio via file, garantendo che l'architettura interna di ciascuna componente possa evolvere indipendentemente dalle altre;
- accoppiamento stretto (*tight coupling*), basato su una integrazione più spinta delle diverse componenti, il che implica una maggiore interdipendenza delle stesse garantendo però una più fluida esperienza dell'utente nell'interazione con il sistema.

Nell'ambito di questo contributo, si fa riferimento al concetto di *tight coupling* nell'accezione sopra riportata.

Tuttavia classificazioni più articolate sono disponibili in letteratura (es. Fisher, 1994; Figura 2), evidenziando come, al limite estremo del percorso di integrazione, le componenti

Architettura del sistema

Le modalità di accoppiamento di GIS e codici di calcolo possono essere classificate in funzione del grado di autonomia e/o integrazione delle diverse componenti del sistema, distin-

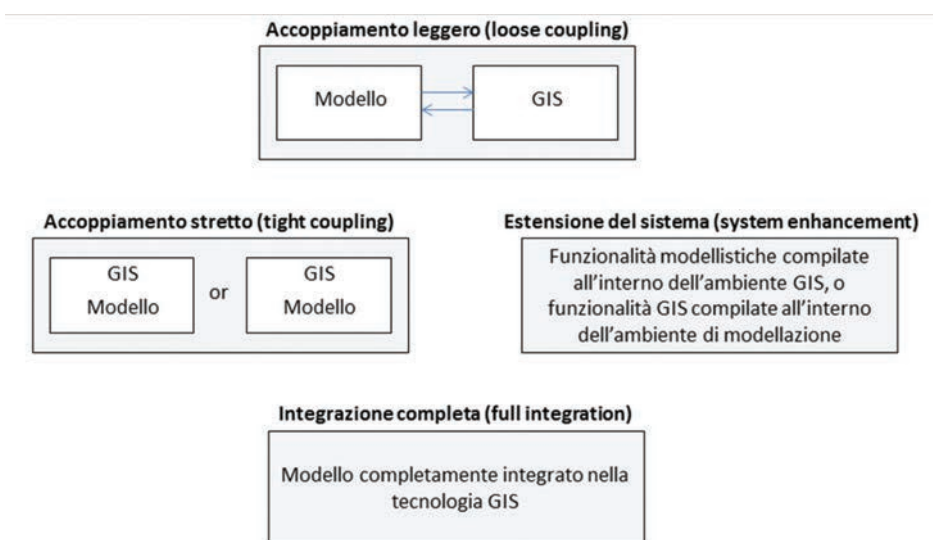


Fig. 2 - Strategie di accoppiamento GIS-modellistica (ripreso da Fisher, 1994).

Fig. 2 - GIS-modeling coupling strategies (modified after Fisher, 1994).

GIS tradizionali e di calcolo numerico possano di fatto essere implementate all'interno di un sistema nuovo e monolitico. Un esempio in tal senso è proprio l'ambiente di modellazione Feflow, piuttosto che il suo solo motore di calcolo numerico, di fatto identificabile come una estensione di sistema o integrazione completa, stando alla classificazione di Fisher. Esso dispone di molte funzionalità di gestione, visualizzazione, analisi ed interrogazione spaziale, perfettamente integrate, talora molto evolute e raramente disponibili nelle piattaforme GIS tradizionali. In tal senso, l'ambiente di modellazione di Feflow è assimilabile ad un GIS 3D tempo-dipendente, dotato di specifiche funzionalità di calcolo numerico e di analisi spazio-temporale.

Di contro, le potenzialità di gestione, analisi, interrogazione e visualizzazione (produzione cartografica e geovisualizzazione), nonché la flessibilità e scalabilità di molte piattaforme GIS tradizionali, quali ArcGIS, le rendono di fatto strumenti difficilmente sostituibili dagli ambienti di modellazione, pur in considerazione delle anzidette limitazioni (Cascelli et al., 2012).

Alla luce di quanto sopra, nonché della vasta base di utenza GIS se paragonata al ristretto dominio specialistico della modellistica delle acque sotterranee, l'architettura del sistema proposto si basa su un accoppiamento stretto (*tight coupling*) del (solo) motore di calcolo numerico di Feflow all'interno dell'ambiente GIS e di quest'ultimo con un geodatabase di riferimento, opportunamente progettato per la gestione sia dei dati osservati che di quelli calcolati. L'esperienza attesa per l'utente è quella di una interazione fluida con un sistema implementato in un contesto GIS tradizionale, che metta a disposizione tutte le necessarie funzionalità di gestione dati, definizione scenari di simulazione e calcolo numerico.

Lo schema di seguito (Figura 3) cattura la compattezza della soluzione proposta ed al contempo evidenzia la complessa interazione tra componenti, che caratterizza invece il tradizionale processo di lavoro.

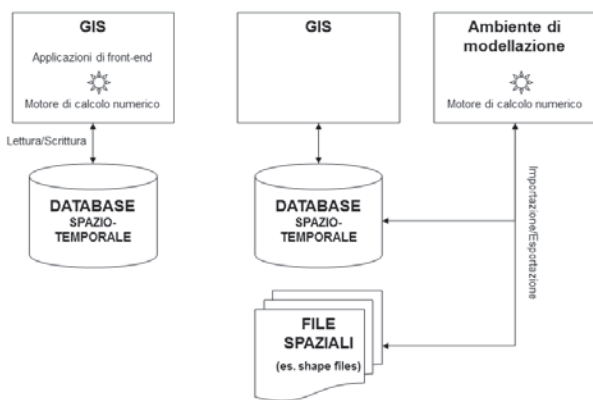


Fig. 3 - Architetture di sistema: accoppiamento stretto vs. leggero (*tight vs. loose coupling*).

Fig. 3 - System architectures: *tight vs. loose coupling*.

Feflow è un codice di calcolo agli elementi finiti 2D/3D, che consente di simulare flusso, trasporto e diffusione di calore nelle acque sotterranee, in condizioni sature, non sature e densità-dipendenti, con una lunga storia di sviluppo che inizia alla fine degli anni settanta con la sua prima versione commerciale. Per ulteriori dettagli si rimanda alla documentazione bibliografica (Diersch, 2006) ed al sito della DHI-WASY (2012).

Per quanto attiene lo schema del database spazio-temporale (Figura 4), ispirato al *Groundwater Data Model* (vedi sezione precedente), tra le componenti fondamentali figurano:

- una *object class* per la gestione dei modelli numerici (file di input a Feflow). Il sistema consente l'immagazzinamento di più modelli, tra i quali l'utente può successivamente scegliere quello di interesse per la simulazione. Un modello viene caricato dal *file system* in un campo binario di tipo BLOB (*Binary Long Object*), può essere protetto da password onde evitare accessi non autorizzati, ed è documentato con alcuni *metadata* fondamentali (es. numero di *layers*, data di inizio e periodo di simulazione)
- una *feature class* puntuale, per la gestione della geometria 3D dei nodi della *mesh* di discretizzazione. Una FK 'Model' fa riferimento al modello di pertinenza;
- una *object class* per la gestione degli scenari di simulazione. Anche in questo caso, tutti i dettagli di ciascun scenario (es. modello utilizzato, specifiche condizioni al contorno e/o interne, stazionarie o transitorie) sono immagazzinati in un campo binario di tipo BLOB;
- una *object class* per la gestione delle serie temporali calcolate in sede di simulazione (Figura 5). Due FKs, *NodeID* e *ScenarioID*, mantengono traccia del nodo e dello scenario di riferimento.

L'accesso al sistema è garantito attraverso due applicativi utente, funzionali rispettivamente alla amministrazione del sistema ed alla gestione/definizione degli scenari di simulazione. Tali applicativi, sviluppati in C++ ed ArcObjects (Burke, 2003; Zeiler, 2001^a, 2001^b), sono accessibili come estensioni di ArcCatalog ed ArcMap.

Amministrazione del sistema

L'amministrazione del sistema è garantita attraverso una estensione (Figura 6) di ArcCatalog, funzionale a:

- aggiornare la struttura del database, attraverso la creazione di oggetti dedicati per l'immagazzinamento dei modelli, scenari di simulazione e dati calcolati ("*Initialize Extension*"), oggetti che peraltro possono essere successivamente rimossi ("*Clear Extension*");
- definire i nomi delle *feature* ed *object classes* nelle quali immagazzinare i nodi della *mesh* di discretizzazione, i dati tempo-dipendenti calcolati (carichi piezometrici e concentrazioni) in sede di simulazione, le linee di flusso, il budget ed i risultati completi (files DAC di Feflow) (Figura 7);

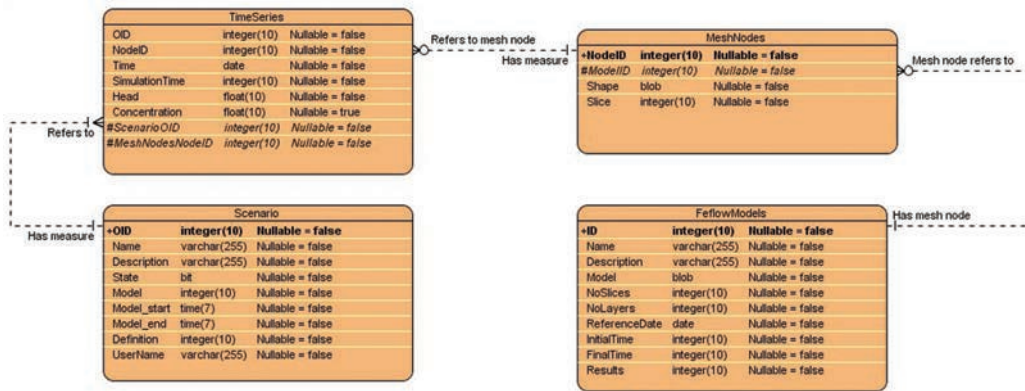


Fig. 4 - Feflow-ArcGIS: schema E-R (Entity-Relationship) del database spatio-temporale.

Fig. 4 - Feflow-ArcGIS: spatio-temporal database EAR schema.

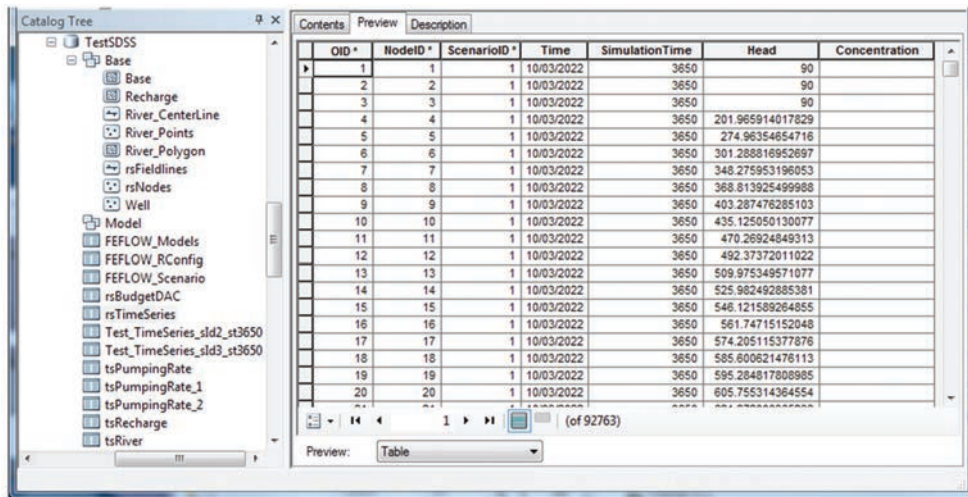


Fig. 5 - Feflow-ArcGIS: struttura del database spatio-temporale e dettaglio della tabella delle serie temporali in ArcCatalog.

Fig. 5 - Feflow-ArcGIS: spatio-temporal database architecture and details of time series table in ArcCatalog.

- migrare i modelli numerici (files FEM di Feflow; Figura 8) all'interno del database ("Add Model"). I modelli, di cui vengono visualizzate proprietà geometriche e tempo di riferimento nel caso di simulazioni in condizioni transitorie, possono essere protetti da password,

esportati sul *file system* e/o rimossi completamente dal database. L'utente del sistema potrà poi selezionare il modello di interesse, in sede di definizione dello scenario di simulazione.

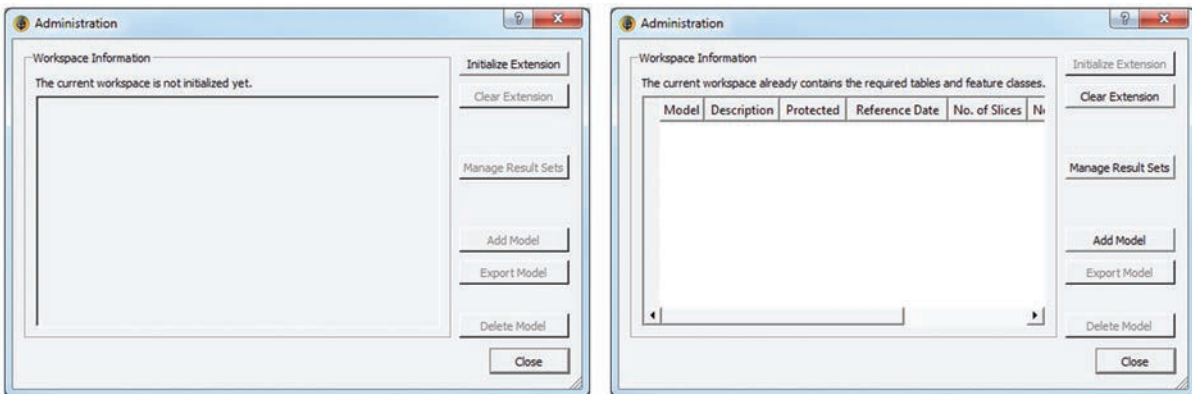


Fig. 6 - Amministrazione del sistema: funzionalità generali.

Fig. 6 - System administration: general features.

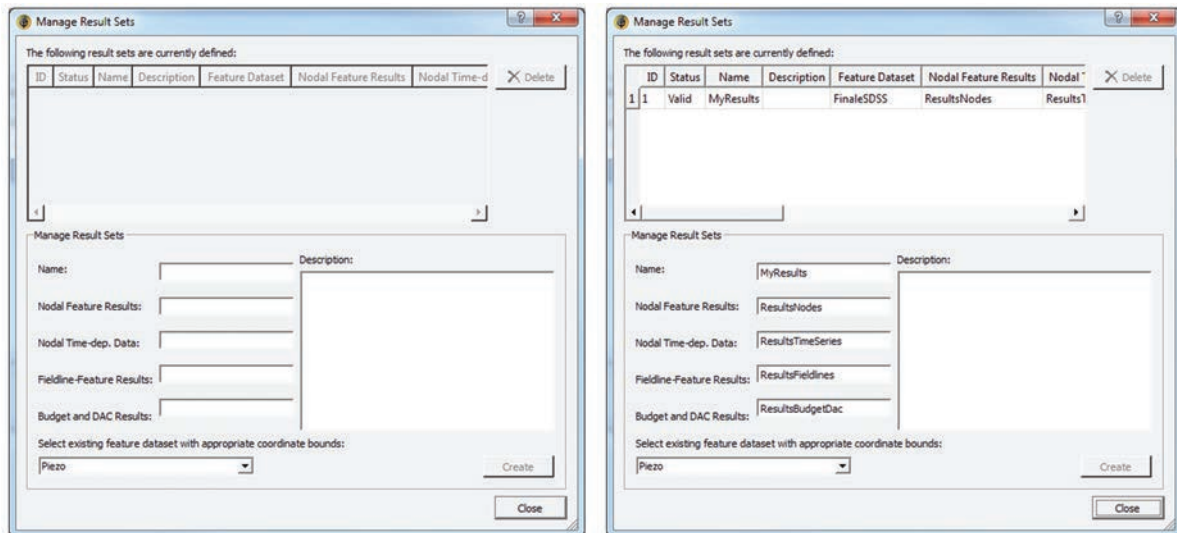


Fig. 7 - Amministrazione del sistema; gestione dei risultati delle simulazioni.

Fig. 7 - System administration: management of simulation outcomes.

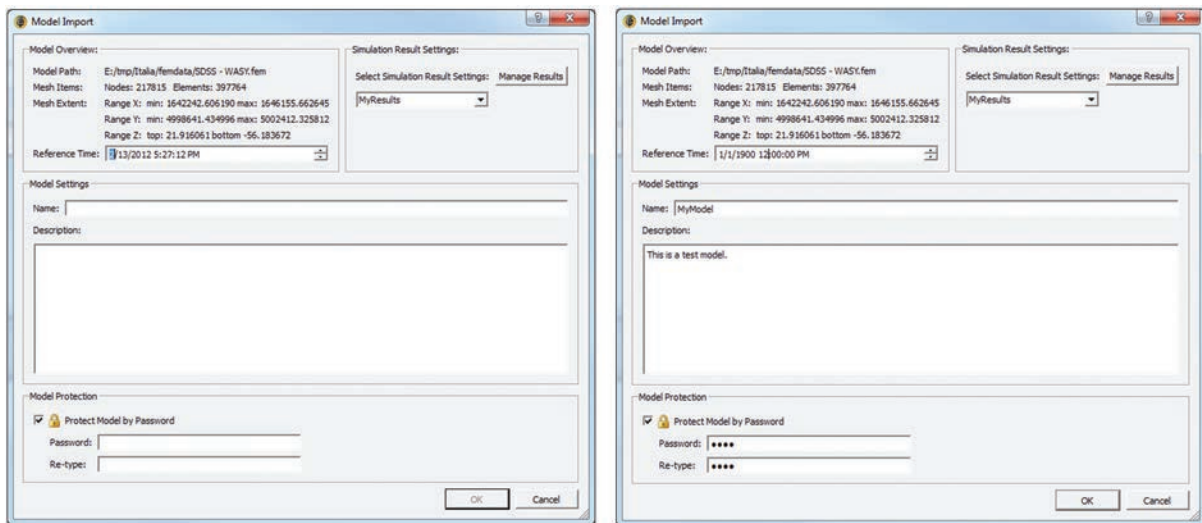


Fig. 8 - Amministrazione del sistema; importazione di modelli.

Fig. 8 - System administration: importing models.

Gestione degli scenari di simulazione

La gestione degli scenari di simulazione è garantita da una estensione di ArcMap, che opera direttamente sul database spazio-temporale di progetto. L'estensione accede ai dati osservati per la definizione delle condizioni al contorno ed interne in fase di simulazione, quali ad esempio i regimi di emungimento ai pozzi, l'andamento dei livelli sui corsi d'acqua e canali interni, o le condizioni di flusso lungo i limiti del modello.

I risultati di una simulazione numerica, una volta completata, vengono immagazzinati nel database spazio-temporale, specificatamente nelle *feature* ed *object classes* definite in sede di impostazione del sistema (Figura 7). In alternativa i risultati possono essere anche visualizzati in Feflow Viewer (Figura 9), che dà accesso alle funzionalità complete di post-processamento di Feflow.

Nel dettaglio, le funzionalità del sistema sono accessibili attraverso un editor degli scenari di simulazione (Figura 10), che consente di definirli (“*Create New*”), editarli (“*Edit*”), clonarli (“*Clone*”, utile base di partenza per la definizione di scenari di simulazione simili) ed eliminarli (“*Delete*”). Attraverso l'editor è altresì possibile accedere a Feflow Viewer per una esplorazione dei risultati completi della simulazione (“*Explore DAC*”), per ottenere informazioni sugli scenari (“*Scenario Info*”) e per l'esecuzione delle simulazioni (“*Execute*”) per il tramite del motore di calcolo integrato in ArcGIS in forma di DLL.

Gli scenari di simulazione riportati all'interno della finestra dell'editor possono essere filtrati, per scenari non ancora eseguiti (“*Pending*”), completati (“*Completed*”) o falliti (“*Failed*”), ad esempio in ragione di problemi di carattere numerico.

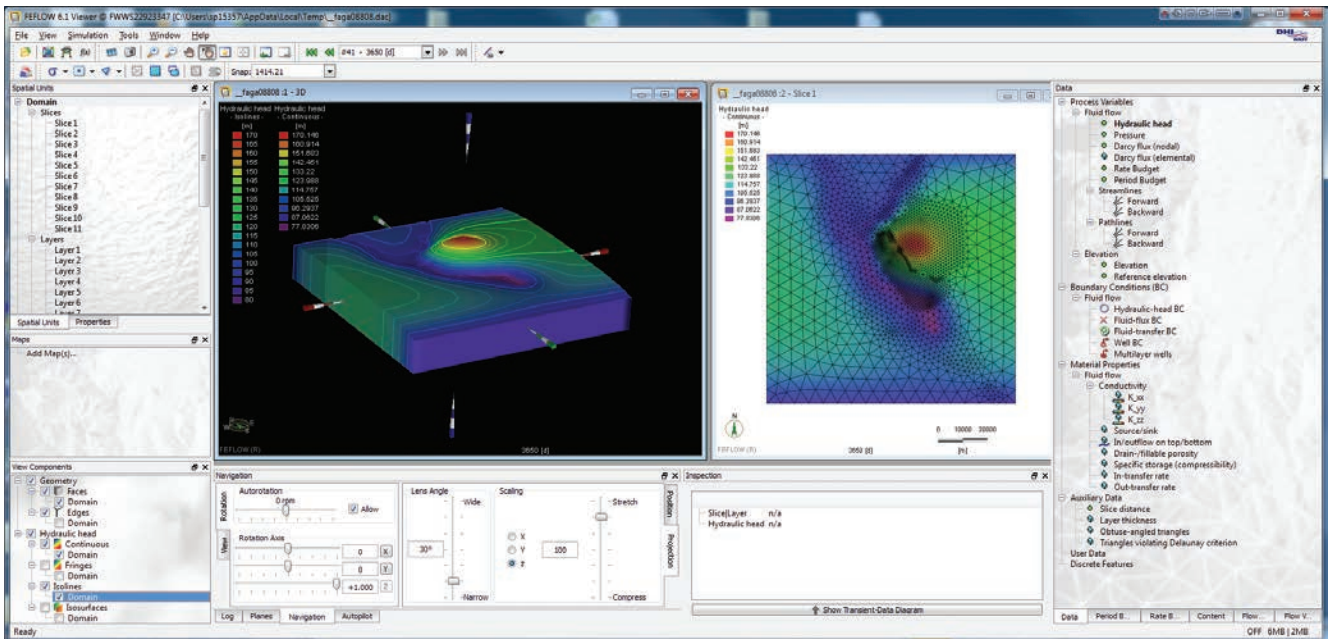


Fig. 9 - Feflow Viewer: visualizzazione di un modello di flusso.

Fig. 9 - Feflow Viewer: visualization of a flow mode.

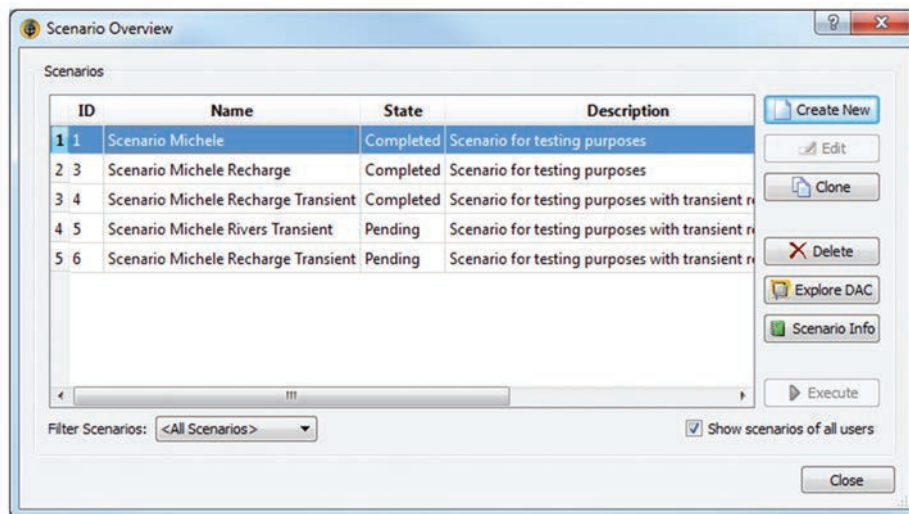


Fig. 10 - Editor degli scenari di simulazione.

Fig. 10 - Simulation scenarios editor: overview.

La creazione di un nuovo scenario (Figura 11; Figura 12) si articola in:

- assegnazione di un nome identificativo dello scenario di simulazione;
- selezione del modello da utilizzare, tra quelli caricati nel database;
- definizione delle condizioni temporali di simulazione, specificatamente data/tempo di inizio e periodo complessivo di simulazione. In ragione del fatto che i dati osservati ed immagazzinati nel database spazio-temporale costituiscono il riferimento per l'assegnazione delle condizioni di simulazione in corso di esecuzione,

è particolarmente importante garantire che i dati osservati coprano l'intero periodo di simulazione. Quando così non fosse, il sistema utilizza i dati osservati (es. emungimenti dai pozzi, ricarica dall'alto, livelli sui corsi d'acqua e/o canali) all'inizio o alla fine delle rispettive serie temporali onde coprire le parti residue dell'intervallo di simulazione. Lo scenario di simulazione parte dalle condizioni piezometriche e di qualità settate all'interno del modello, purché le date di inizio simulazione siano identiche. In caso contrario si rende necessario fornire anche una distribuzione iniziale dei carichi piezometrici;

- descrizione estesa dello scenario di simulazione;

- connessioni ai dati, che definiscono, in corso di esecuzione della simulazione, il flusso di informazione (osservata) dal database spazio-temporale alle condizioni al contorno ed interne del modello di Feflow. Le tipologie di dati che il sistema consente di settare includono le condizioni piezometriche iniziali, le condizioni al contorno che richiedano una interpolazione lineare spazio-temporale (es. livelli lungo i corsi d'acqua), le condizioni al contorno che vadano assegnate direttamente (es. un flusso specificato ad un nodo), i flussi entranti/uscenti sulla sommità del modello (es. ricarica naturale e/o antropica) ed i pozzi *multi-layer*. La definizione dei links per i diversi tipi di condizioni al contorno è generalmente simile, con la possibilità di:
 1. assegnare i valori ad una specificata *slice* del modello;
 2. assegnare i valori alle *slices* del modello sulla base di uno specifico attributo;
 3. assegnare valori costanti nel tempo;
 4. assegnare valori tempo-dipendenti, previa definizione della componente geografica (es. punti di osservazione) e relative serie temporali. Al fine di garantire l'accesso al sistema anche attraverso la licenza base di ArcGIS (ArcView), la relazione 1:M (1 a Molti) che tipicamente lega geometrie e serie temporali osservate deve essere esplicitata, attraverso la selezione diretta di PK (*Primary Key*), FK (*Foreign Key*) ed attributi di interesse (data di misura, misura).

L'assegnazione delle condizioni al contorno ad interpolazione lineare (Figura 12) ed ai pozzi multi-layer richiede ulteriori funzionalità. Per le prime, il sistema garantisce la possibilità di definire aree poligonali (es. geometria dei corsi d'acqua), funzionali a delimitare geograficamente i punti di osservazione (e relative serie temporali) da utilizzarsi in sede di interpolazione, nonché criteri di estrapolazione oltre i limiti coperti dai dati misurati, sulla base dei gradienti calcolati. Per quanto attiene invece i pozzi *multi-layer*, il sistema consente di definire esplicitamente la posizione dei filtri, sulla cui base il codice di calcolo opera una ripartizione automatica dei flussi sui nodi di pertinenza.

Infine i risultati delle simulazioni, specificatamente carichi piezometrici e concentrazioni, possono essere salvati nel database spazio temporale, per ogni passo temporale o, spesso in ragione di esigenze di ottimizzazione dello spazio su disco, solo al termine del calcolo. Possono altresì essere salvate le linee di flusso (*forward e backward*), definendo numero ed ubicazione iniziale delle particelle a partire da una semplice geometria lineare.

Nel dettaglio il sistema consente di immagazzinare sia *pathlines*, basate sul campo di flusso al passo temporale corrente, che *streamlines*, che seguono il campo di flusso variabile nel tempo.

I dati immagazzinati nel database spazio-temporale possono poi essere analizzati, visualizzati ed integrati normalmente in ambiente ArcMap.

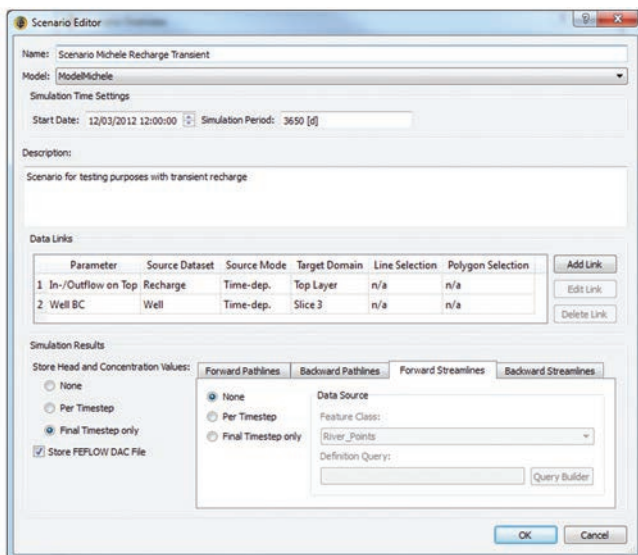


Fig. 11 - Editor degli scenari di simulazione: definizione scenario.

Fig. 11 - Simulation scenarios editor: scenario definition.

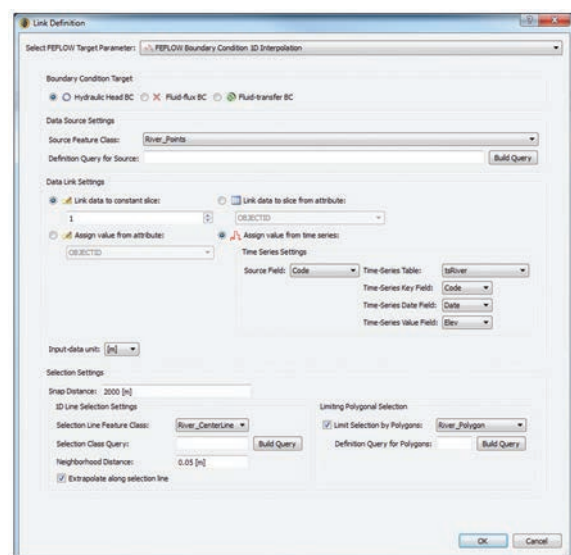


Fig. 12 - Editor degli scenari di simulazione: definizione condizioni interne.

Fig. 12 - Simulation scenarios editor: internal boundary conditions setup.

Conclusioni

Nella normale prassi operativa della modellistica numerica di flusso e trasporto delle acque sotterranee, le diverse componenti di un sistema di gestione e modellazione dei dati idrogeologici sono per lo più distinte e fortemente specializzate, oggetto al più di un accoppiamento leggero (*loose-coupling*) basato sull'interscambio dati via file. Tale approccio comporta molteplici problemi, tra cui l'accresciuto rischio di violazione dell'integrità dei dati nonché la necessità di disporre di specifiche competenze modellistiche, anche qualora l'esigenza sia quella unicamente di impostare ed eseguire simulazioni sulla base di modelli precedentemente calibrati da personale esperto.

Alla luce di quanto sopra, l'articolo ha presentato un progetto di accoppiamento, denominato Feflow-ArcGIS, del motore di calcolo numerico di FEFLOW 6.1, per il flusso ed il trasporto delle acque sotterranee, con ArcGIS 9.3/10, unitamente alla progettazione, implementazione ed integrazione di una architettura di geodatabase spazio-temporale funzionale alla gestione sia dei dati osservati che di quelli calcolati.

La disponibilità di applicativi di *front-end* consente una agevole amministrazione del sistema in ambiente ArcCatalog, e, in sede operativa in ambiente ArcMap, la definizione di scenari di simulazione, nonché la loro esecuzione, analisi e salvataggio. Il database spazio-temporale costituisce un unico riferimento per la gestione sia dei dati osservati (es. monitoraggio) che di quelli calcolati, limitando i rischi inerenti di duplicazione e favorendo i processi di analisi integrata e calibrazione modellistica.

L'utente del sistema, con solide competenze in campo idrogeologico e conoscenze GIS, può essere quindi messo in condizione di operare e valutare autonomamente, nei limiti di accettabilità della calibrazione del modello, l'impatto di diverse opzioni di intervento attraverso la progettazione e l'esecuzione di simulazioni di scenario.

Il sistema è attualmente in uso per lo sviluppo di un SDSS per la definizione delle politiche ottimali di gestione sostenibile e protezione delle risorse idriche sotterranee del sistema multiacquifero sottostante uno stabilimento multiproprietario ubicato all'interno di un SIN (Sito di Interesse Nazionale). In tale contesto, il sistema, basato su modellazione di flusso 3D, in effetti risponde alla esigenza di consentire un accesso agevole agli strumenti di modellazione numerica, in un'ottica di integrazione ottimale con la base dati spazio-temporale, cosa che non sarebbe altrimenti possibile in ambiente Feflow se non a fronte di una conoscenza approfondita dello stesso.

Una delle principali problematiche, peraltro inerente alla maggior parte dei modelli numerici applicati in contesti complessi, attiene alla mole dei dati prodotti in *output*, in ragione sia dalle dimensioni della *mesh* di discretizzazione che nello sviluppo in corso, sono dell'ordine dei 184.000 elementi e poco più di 100.000 nodi, che dei passi temporali di salvataggio durante simulazioni in condizioni transitorie. In tali condizioni, una analisi efficace/efficiente del dato e la produzione cartografica richiedono una integrazione delle funzionalità GIS native. In ambiente ArcGIS, tale obiettivo può essere agevolmente perseguito utilizzando i linguaggi di scripting supportati, quali il Python, onde automatizzare i processi. A titolo di esempio, sulla base dei dati calcolati ed osservati possono essere prodotte statistiche sul grado di convergenza, distribuzione spaziale funzionale ad evidenziare eventuali *cluster* anomali, diagrammi di confronto, e, non meno importante, cartografie di supporto e finali.

Ulteriori sviluppi del sistema, attualmente in corso di valutazione tecnico-economica, potranno riguardare in futuro l'integrazione diretta (non mediata attraverso un *middle tier* quale ArcSDE) di database spaziali nativi quali Oracle Spatial (Kothuri et al., 2004) e PostgreSQL/PostGIS (Obe and Hsu, 2011), in luogo del geodatabase ESRI.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson, M.P. and Woessner W.W., 1992. Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press Inc., San Diego CA, USA
- Bear, J. and Verruijt, A., 1987. Modelling Groundwater Flow and Pollution. Reidel, Dordrecht, Holland
- Brandmeyer, J.E. and Karimi, H.A., 2000. Coupling methodologies for environmental models, Environmental Modelling & Software 15, Elsevier, pp. 479-488
- Burke R., 2003. Getting to Know ArcObjects: Programming ArcGIS with VBA. ESRI Press, Redlands, CA, USA
- Cascelli E., Crestaz E., Fogliani F., Khalid F. and Power C., 2005. Geographical Information Systems and Groundwater Mathematical Modelling: ArcGIS-FEFLOW Integration Case Study. Proceedings of "GIS and Spatial Analysis - 2005 Annual Conference" of the International Association for Mathematical Geology (IAMG) - Toronto, Canada, August 21-26, 2005.
- Cascelli E., Crestaz E. and Tatangelo F., 2012. Cartography and Geovisualization in Groundwater Modelling. In "Geographic Information Analysis for Sustainable Development and Economic Planning: New Technologies", Edts Borruso G., Bertazzon S., Favretto A., Murgante B. and Torre C., IGI Global, USA
- Codd, E., 1970. A relational model for large shared data banks, Communications of the Association for Computing Machinery, 13 (6), pp. 377-387
- Crestaz E., 2011. Design and development of a prototype addressing spatio-temporal environmental vector data management, analysis and delivery using Open Source technology: General framework and case study focused on groundwater management in a coastal area. Unpublished MSc dissertation in Computer Science, Herfordshire Un., Hatfield, UK Available online from: http://www.giscience.it/en/pdf/DissertationMscComputerScience_CrestazE-zio_Supervisors.pdf
- Crestaz E., Veneziano V. and Gibin M., 2011. Spatio-temporal Environmental Monitoring Systems. A data management and delivery approach based on PostGIS database and Google Maps mashup. MODFLOW and More 2011: Integrated Hydrologic Modeling, June 5 - 8, 2011, Denver, Colorado, USA
- DHI-WASY, 2012. Company web site: <http://www.wasy.de/> Last visit: 20/07/2012
- Diersch H.J.G., 2006. FEFLOW, Finite Element Subsurface Flow & Transport Simulation System, White Papers Vol. I. Wasy, Institute for Water Resources Planning and Systems Research Ltd., Berlin, Germany
- ESRI, 2012. Company web site: www.esri.com Last visit: 20/07/2012
- Fisher, M.M., 1994. From conventional to Knowledge-based geographical information systems, Computing Environment and Urban Systems, Vol. 18, pp. 233-242
- Frank A.U., 1998. Different Types of Time in GIS. In Egenhofer M.J. and Golledge R.G. (eds.), 1998. Spatial and Temporal Reasoning in Geographic Information Systems, Oxford Un. Press, New York, pp. 40-62
- Gocu, R.C., Carabin, G., Hallet, V., Peters, V., Dassargues, A., 2001. GIS-based hydrogeological database and groundwater modelling. Hydrogeology Journal 9, pp. 555-569
- Karanjac, J., 1993. United Nations Ground Water Software. Ground Water, vol. 31, issue 2, pp. 311-315, 4 March 1993
- Karanjac, J. and Stanojkovic, S., 2003. The United Nations Ground Water for Windows, Software Version 1.31, Available on line from: <http://www.geocities.com/Eureka/8409/>
- Kothuri R., Godfrind A. and Beinat E., 2004. Pro Oracle Spatial: The essential guide to developing spatially enabled business applications. APress, Berkeley, CA, USA
- Langran G., 1992. Time in Geographic Information Systems. Taylor & Francis, London, UK
- Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J. and Rhind, D.W., 2010. Geographic Information: Systems and Science. 3rd Ed., John Wiley & Sons, USA
- MacDonald A., 1999. Building a geodatabase. ESRI Press, Redlands, CA, USA.
- Maguire D.J., 2005. GIS customisation. In Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J. and Rhind D.W. (eds.), 2005. Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications. 2nd Ed., John Wiley & Sons, NJ, USA, pp. 149-159
- Maidment, D.R., 2002. Arc Hydro: GIS for Water Resources. ESRI Press, Redlands, CA, USA
- Obe and Hsu, 2011. PostGIS in action. Manning, Stamford, CT, USA
- Ott T. and Swiaczny F., 2001. Time-integrative Geographic Information Systems – Management and Analysis of Spatio-Temporal Data. Springer Verlag, Berlin
- Pinder, G.F., 2002. Groundwater modelling using geographical information systems. Wiley & Sons, ISBN : 0-471-08498-0, 248 p.
- Rigaux P., School M. and Voisard A., 2002. Spatial Databases: With Application to GIS (The Morgan Kaufmann Series in Data Management Systems). Morgan Kaufmann Publishers, Elsevier, San Francisco, CA
- Strassberg, G., Jones, N.L. and Maidment, D.R., 2011. Arc Hydro Groundwater: GIS for Hydrogeology. ESRI Press, Redlands, CA, USA
- Weick K., 2000. Making sense of the organization. Blackwell Publishing, Maiden, MA, USA
- Worboys M.F. and Duckman M., 2004. GIS: A Computing Perspective. 2nd Ed., Boca Raton, CRC Press
- Worboys M.F., 2005. Relational databases and beyond. In Longley P.A., Goodchild M.F., Maguire D.J. and Rhind D.W. (eds.), 2005. Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications. 2nd Ed., John Wiley & Sons, NJ, USA, pp. 163-174
- Zeiler, M., 1999. Modeling our world. ESRI Press, Redlands, CA, USA
- Zeiler, M., 2001a. Exploring ArcObjects: Vol. 1 – Applications and Cartography. ESRI Press, Redlands, CA, USA
- Zeiler, M., 2001b. Exploring ArcObjects: Vol. 2 – Geographic Data Management. ESRI Press, Redlands, CA, USA