

Simulazione e sistemi idroinformatici per la gestione della risorsa idrica

Claudio Schifani (*), Iacopo Borsi (**), Rudy Rossetto (***)

(*) ISTI-CNR, via Moruzzi 1, cla.schifani@gmail.com

(**) Università degli Studi di Firenze, Viale Morgagni 67/a, borsi@math.unifi.it

(***) Scuola Superiore Sant'Anna, via Santa Cecilia 3, rudy.rossetto@sssui.it

Introduzione

A partire dagli anni '90 l'informazione geografica applicata alla gestione delle risorse idriche è stata ampiamente trattata in letteratura. Ricercatori di diversi paesi (Newell *et al.*, 1990; Gogu *et al.*, 2001; Karanjac, J. and Stanojkovic, S., 2003, Strassberg *et al.*, 2005; de Dreuzy *et al.*, 2006) hanno concentrato i loro sforzi verso la creazione di strumenti in grado di permettere una gestione dei dati necessari alla caratterizzazione idrologica. Tali strumenti devono consentire la rappresentazione spaziale dei principali parametri idrodinamici del sistema idrologico, la caratterizzazione in termini di qualità e quantità della risorsa idrica e le variazioni di tali caratteristiche nel tempo.

In questo scenario si colloca il progetto di ricerca SID&GRID (Simulazione e sistemi IDroinformatici per la Gestione delle Risorse Idriche, 2012), il cui obiettivo principale è di progettare e sviluppare un *framework open source* per l'integrazione del mondo GIS con la modellistica idrologica ed idrogeologica, per la pianificazione e gestione condivisa degli usi della risorsa idrica da parte di Enti pubblici e società preposte a tale ruolo.

Architettura GIS di SID&GRID

Lo studio dell'architettura di SID&GRID si è basato su un obiettivo ritenuto centrale nel progetto, ovvero disporre di uno strumento che per sua natura sia idoneo e potenzialmente integrabile con il mondo della modellistica numerica idrologica. Ad oggi gran parte dei *software* ed interfacce per modelli numerici sia proprietari che *open source*, prevedono la fase di preparazione dei dati geografici in un ambiente GIS esterno a quello di modellazione. Tali dati sono successivamente importati nel modello tramite specifiche interfacce grafiche. In ambienti proprietari sono stati sviluppati alcuni strumenti e *software* in grado di interfacciarsi con i più diffusi codici di modellistica idrologica (Crestaz *et al.*, 2012). SID&GRID pone come primo obiettivo quello di integrare GIS e modellistica numerica in un sistema aperto e basato su strumenti GIS *open source*.

Inoltre, la disponibilità di strumenti, la cui diffusione è oggi essenzialmente limitata dal costo delle licenze, e l'integrazione e la possibilità di sviluppare sessioni di modellistica in ambiente GIS ampliirebbe l'attuale uso e diffusione della modellistica numerica. Ciò potrebbe indurre ad una reale integrazione di tale metodologia nei processi di pianificazione del territorio anche nella fase di implementazione e redazione del Sistema Informativo Territoriale.

Per tali ragioni SID&GRID è definibile come uno sistema basato sull'integrazione di più componenti tecnologiche ed informatiche al fine di supportare l'utente dalla fase di implementazione fino all'esecuzione e verifica dei risultati del modello idrologico. Per soddisfare tale requisito, sono stati individuati tre elementi principali dell'architettura:

- un *data base management system* con estensione geografica;
- un *software* GIS
- un codice numerico idrologico per la simulazione del ciclo delle acque superficiali e sotterranee.

Il software GIS utilizzato come base di partenza è gvSIG¹ sviluppato in linguaggio Java associato alla libreria di geocalgoritmi di Sextante GIS². Per la componente DBMS si è scelta la soluzione PostgreSQL con estensione spaziale PostGis³1.5. Di contro per la parte modellistica si è scelto di utilizzare il modello idrogeologico MODFLOW-LGR (Mehl and Hill 2005) accoppiandolo con VSF-3D per la parte insatura (Thoms et al., 2006) unitamente a codici idrologici sviluppati ad hoc. SID&GRID può essere considerato come un'estensione avanzata di gvSIG per il trattamento di informazioni geometriche e alfanumeriche a supporto dell'implementazione di un modello idrologico (v. figura 1). L'approccio modulare ha consentito di non alterare la struttura di gvSIG, ma di adattarsi alla stessa tramite specifiche librerie progettate e sviluppate ad hoc per il raggiungimento dell'obiettivo fissato dal progetto.

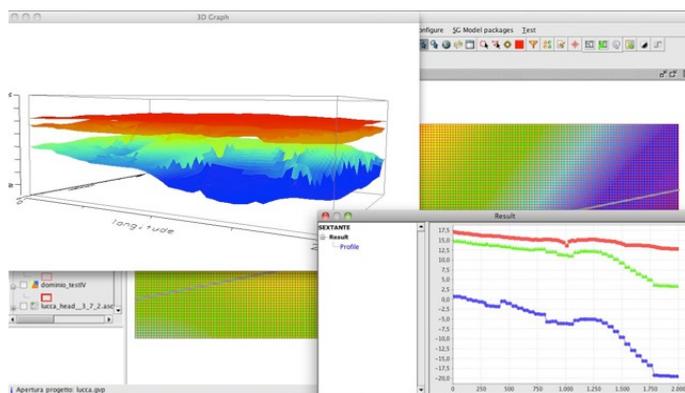


Figura 1. Interfaccia di visualizzazione 3D del modello.

L'estensione *software* di SID&GRID in gvSIG consente, dunque, l'elaborazione, verifica, implementazione ed esecuzione di modelli idrologici con un principio di modularità sia a livello di sviluppo che a livello procedurale.

Il primo livello di sviluppo si dimostra, ad esempio, nella possibilità di integrare nuovo codice (Java) per l'implementazione di ulteriori processi da simulare e che non siano attualmente presenti nella presente versione del *software*. Il livello procedurale si esprime nella possibilità di implementare modelli idrologici via via più complessi senza necessariamente creare nuovi progetti o sessioni di lavoro. La struttura dell'estensione SID&GRID per gvSIG è caratterizzata da tre blocchi principali, ciascuno sviluppato per rispondere a precisi requisiti procedurali ma, contemporaneamente, connessi tra di loro durante la fase di modellazione:

- la gestione diretta del data base per ciascun modello implementato nel sistema;
- la creazione e costruzione degli strati informativi e dei relativi parametri idrologici necessari per eseguire il modello;
- strumenti di traduzione delle informazioni geografiche in parametri e dati di input per il solutore numerico del modello idrologico.

La gestione dati nel DBMS

gvSIG integra appositi *driver* per la connessione e gestione delle informazioni geometriche ed alfanumeriche con i principali data base *open source*. SID&GRID ha sfruttato tale capacità di base integrandola con specifici strumenti, progettati e sviluppati per rispondere alle particolari

¹ gvSIG è un software GIS open source nato nel 2004. Maggiori informazioni nel sito: <http://www.gvsig.org/web/>

² Sextante GIS è una libreria di analisi di dati spaziali e un framework di geocalgoritmi open source. www.sextantegis.com

³ PostGIS è l'estensione spaziale per il data base management system Postgresql. <http://postgis.refractory.net/>

caratteristiche dello schema fisico dei dati e dei parametri per il modello idrologico. Ciò si è reso necessario in seguito alla progettazione logica e fisica del data base di supporto per il modello numerico e, contemporaneamente, ha reso possibile la gestione diretta, tramite apposite interfacce, dei parametri temporali, idrodinamici, etc. La costruzione di un modello idrologico in SID&GRID prevede la preventiva creazione di un data base di appoggio, la cui struttura fisica è definita di *default* a livello di *script* SQL. Ciò consente e facilita l'utente nella creazione del data base senza dovere intervenire manualmente, evitando disallineamenti tra la composizione del modello e il data base di supporto per l'archiviazione dei parametri ad esso collegati.

In particolare, la creazione del data base prevede una struttura di base definita da due tabelle iniziali:

- una tabella per l'archiviazione degli intervalli temporali di simulazione (*stress period*);
- una tabella per l'archiviazione delle caratteristiche idrodinamiche di ciascun *layer* del modello;

Tale schema costituisce la base elementare per la definizione di un modello idrologico in SID&GRID e può essere ulteriormente implementato nella fase di *pre-processing* attraverso strumenti per la definizione delle caratteristiche geometriche del modello stesso. Ad esempio la costruzione del primo *layer* comporterà l'implementazione di una tabella (v. figura 2) contenente tutte le caratteristiche geometriche e fisiche del *layer* stesso.

gid	ID	ROW	COL	BORDER	ACTIVE	TOP	BOTTOM	STRT	KX	KY	KZ	SS	SY
[PK] serial	integer	integer	integer	integer	integer	double	double	double	double	double	double	double	double
154	154	153	1	154	1	1	44.68114852;43.096	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1
155	155	154	1	155	1	1	40.30718231;38.498	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1
156	156	155	1	156	1	1	37.24752807;33.921	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1
157	157	156	1	157	1	1	34.89258575;34.354	1	432	432	432	1	1
158	158	157	1	158	1	1	41.43529891;38.088	1	432	432	432	1	1
159	159	158	1	159	1	1	39.48141098;39.211	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1
160	160	159	1	160	1	1	40.60807037;39.168	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1
161	161	160	1	161	1	1	41.27454376;39.26	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1
162	162	161	1	162	1	1	43.36304475;40.195	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1
163	163	162	1	163	1	1	46.63924026;42.688	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1
164	164	163	1	164	1	1	47.50118637;45.798	1	0.0864	0.0864	0.0864	1	1

Figura 2. Esempio di schema dati per il layer superficiale.

Il *data base*, così come l'intera architettura di SID&GRID, è stato progettato in una visione modulare della sessione di lavoro, prevedendo la creazione di una nuova tabella soltanto a conclusione della fase di implementazione di uno specifico processo che l'utente intende simulare nel proprio modello. Gli strumenti integrati in SID&GRID, oltre ad interfacciarsi in maniera specifica con il data base del modello, consentono anche di eseguire inserimenti nella struttura dati a partire dai dati contenuti in fogli elettronici esterni come, ad esempio, per il calcolo delle condizioni al contorno relative agli *stress period* della simulazione.

L'ambiente di modellazione in SID&GRID

L'integrazione tra GIS e modellistica numerica proposta in SID&GRID ha consentito di non alterare l'architettura *software* di gvSIG e di mantenere il linguaggio di programmazione FORTRAN per il codice idrologico. Ciò ha reso necessaria la progettazione e scrittura di appositi "interpreti" scritti come algoritmi nel *framework* di Sextante ed in grado di tradurre ciascun *Data Model Object* nel rispettivo o rispettivi *files* di input del modello numerico.

Tale approccio ha consentito di strutturare l'ambiente GIS come un pannello di controllo del modello idrologico. Questa strategia ha richiesto non soltanto la scrittura di algoritmi traduttori in ambiente GIS, ma anche l'integrazione di un ulteriore *file* di parametrizzazione del modello che ne costituisce la meta informazione geografica. Attraverso questo *file*, SID&GRID è in grado di convertire le coordinate *i j* usate dal solutore numerico in coordinate *x* e *y* geografiche secondo il proprio *Spatial Reference System*. Il *file* è facilmente individuabile nella *directory* di lavoro grazie all'estensione ".geo" ed è modificabile, come tutti gli altri *files* di input del modello, attraverso un qualunque editor di testo. In particolare il file ".geo" contiene le seguenti informazioni:

- Numero di righe e di colonne del modello idrologico;
- Dimensione della cella;
- Coordinate geografiche x e y del centroide della cella posta in alto a destra (NW);
- Valore di *no data*.

Ciascun algoritmo di traduzione dispone di una propria interfaccia grafica e restituisce un *file* di input relativo al processo idrologico che l'utente intende simulare. Al fine di guidare l'utente nella scrittura dei *files* di input, i traduttori sono stati aggregati in "necessari" e "prioritari" in funzione del ruolo che essi ricoprono nel processo di simulazione. A titolo esemplificativo si cita il *file* ".dis", contenente le informazioni geometriche e temporali della simulazione, come necessario ed il *file* ".wel", contenente la parametrizzazione spaziale e temporale dei pozzi, come input prioritario dal punto di vista modellistico.

Svolgere interamente una sessione di modellistica all'interno di un ambiente GIS pone problemi anche di carattere semantico. Ciò si verifica in modo esplicito con l'uso del termine *layer* e con i significati che esso assume in modellistica ed in ambiente GIS. Tale problema di solito non è stato affrontato poiché non si pone con le attuali soluzioni informatiche a disposizione del modellista che articola il proprio lavoro in una sessione GIS, in cui prepara i dati di input, ed in una sessione di modellistica con specifiche interfacce grafiche dei modelli idrologici. Questa procedura non pone problemi semantici poiché gli ambienti di lavoro sono ben distinti nell'uso e nel tempo.

Avviare ed eseguire una sessione di modellistica in ambiente GIS, senza cambiare ambiente di lavoro come previsto da SID&GRID, richiede una revisione di linguaggio e, per essere più incisivi, la definizione di un proprio glossario. In SID&GRID si distinguono tre principali tipologie di strati informativi, tutti caratterizzati dal possedere un elemento in comune, la geografia:

- *Layer GIS*, ovvero tutti gli strati informativi di base provenienti da data base esterni a SID&GRID (es. grafo fluviale, urbanizzato, etc.);
- *Model layer*, ovvero gli strati informativi riferiti ai layer discretizzati del modello numerico idrologico (es. top model layer);
- *Model data object*, ovvero gli strati informativi riferiti ai dati necessari per la simulazione dei processi idrologici e provenienti dal data base di SID&GRID.

Definita la struttura semantica che accompagna il modulo di SID&GRID nella sua interfaccia e nella documentazione tecnica, è possibile descriverne la struttura fisica a livello di interfaccia GIS. gvSIG, similmente alla nota versione 3.x di ArcView di ESRI®, definisce la sua struttura in tre livelli: viste geografiche, tabelle alfanumeriche e *layout* di stampa. SID&GRID ha ampliato tale struttura di base con un ulteriore elemento che prende il nome di "Modello". Il modello è, dunque, un vero e proprio "oggetto" dell'ambiente GIS e ne caratterizza la sessione di lavoro alla pari delle viste geografiche (*View*) e come tale è caratterizzato da una serie di proprietà:

- *directory* di lavoro in cui saranno archiviati tutti i dati di input per il solutore del modello numerico;
- elenco dei *Model layer* che definiscono la geometria del modello;
- definizione delle unità spaziali e temporali del modello;
- definizione della durata della simulazione (numero di *stress period*).

Alla creazione di un nuovo “oggetto modello” segue la creazione di una nuova mappa per le operazioni di processamento e visualizzazione dei dati.

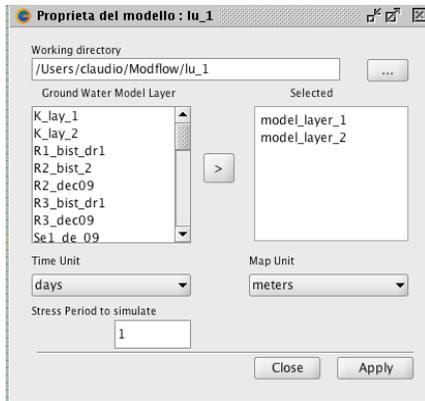


Figura 3. Interfaccia per la gestione delle proprietà del modello.

Al modello, oltre alle proprietà (v. figura 3), è associata un’ulteriore interfaccia operativa per la gestione dei processi idrologici da simulare in relazione ai dati di input presenti nella *directory* di lavoro. Ciò vuol dire che l’utente avrà a disposizione ciascun “processo” di cui abbia preventivamente elaborato il relativo *file* di input.

Come si nota in figura 4, l’interfaccia del modello consente all’utente di impostare anche il lettore per il *report* testuale, l’eseguibile del solutore del modello numerico e la finestra del terminale in cui verificare lo stato di processamento dei dati. Il sistema è stato studiato per essere eseguito direttamente dall’ambiente GIS senza l’ausilio di altre applicazioni esterne ed è totalmente *platform independent* in quanto effettua il *check* sul sistema operativo prima di eseguire il solutore del modello numerico.

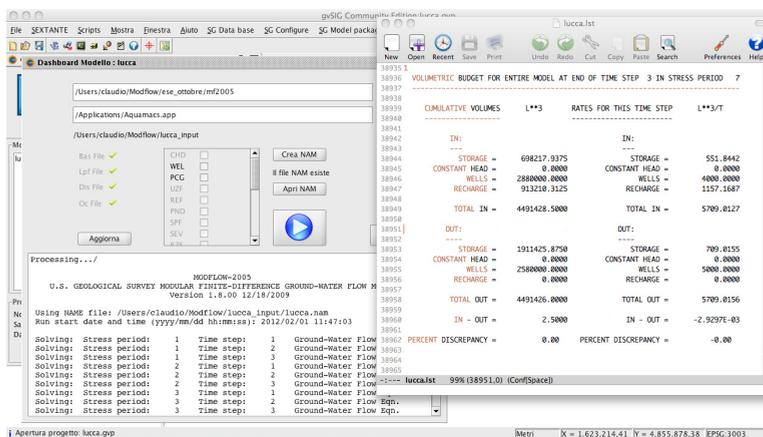


Figura 4. Interfaccia di controllo del modello, dei processi simulati e degli output testuali.

Il processamento dei dati geografici

Per chiarire la procedura di implementazione di un processo idrologico e la sua simulazione è utile descrivere un caso pratico in cui l’utente, dalla costruzione della geometria del modello e

implementazione dei parametri idrodinamici passa alla definizione di un campo pozzi i cui prelievi da falda intende simulare nel suo modello.

Il primo passo consiste nell'importare nella vista di lavoro geografica il *dataset* dei pozzi in uno dei seguenti formati supportati da SID&GRID: *shape file* ESRI, *dxg*, *gml*, *kml* oltre ai principali database geografici tra cui PostGIS e Oracle Spatial. Il *dataset* dei pozzi sarà disponibile per la fase di normalizzazione in relazione alle caratteristiche spaziali e temporali del modello idrologico.

SID&GRID mette a disposizione dell'utente una serie di strumenti disposti in una specifica *toolbar* così articolata:

- *SG DataBase*, contenente gli strumenti per la gestione dei *data base* relativi a ciascun modello creato dall'utente;
- *SG Configure*, contenente gli strumenti utili alla creazione e processamento dei dati geografici per la configurazione fisica del modello idrologico;
- *SG Model Packages*, contenente gli strumenti per la conversione dei dati geografici in dati di input del modello, articolati secondo la specifica denominazione dei processi da simulare;
- *SG Calculator*, contenente *scripts* utili al calcolo dei principali parametri fisici e idrologici.

In particolare, gli strumenti presenti nella sezione *SG Configure* e *SG Model Package* sono stati sviluppati all'interno del *framework* di geoalgoritmi di Sextante e ne costituiscono le interfacce grafiche attivabili direttamente dall'ambiente di gvSIG. L'integrazione dei principali algoritmi di processamento nel *framework* di Sextante GIS consente sia di disporre per un eventuale *workflow* nel *model builder*⁴ sia di disporre delle esecuzioni in *batch* e di utilizzarli anche in altri ambienti GIS compatibili con Sextante.

L'architettura di SID&GRID prevede uno specifico flusso di lavoro necessario per la normalizzazione dei dati. Per il caso appena citato dei pozzi, l'utente dovrà importare il *dataset* dei pozzi nel proprio *data base* del modello e contestualmente aggiungervi, tramite algoritmi, alcune caratteristiche richieste dal modello quali la discretizzazione spaziale e temporale. Ad es., per la discretizzazione spaziale saranno aggiunte alle note x e y geografiche anche le coordinate i e j identificative delle celle del modello.

Un altro esempio è costituito dalla possibilità di rappresentare nel modello idrologico corsi d'acqua superficiali. (v. figura 5) In tale caso, il problema principale, se consideriamo ad es. l'implementazione di un fiume, risiede nella differente struttura geometrica dell'oggetto fiume nella sua componente geografica e modellistica. Nel primo caso il fiume è rappresentato da una geometria lineare che segue il percorso del corso d'acqua, nel secondo caso bisogna riferirsi alla discretizzazione geometrica delle celle del modello idrologico.

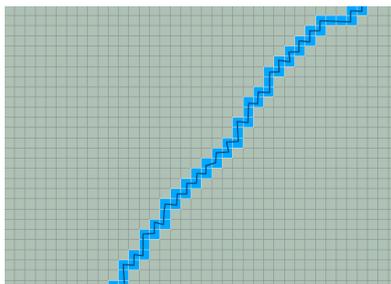


Figura 5. Esempio di modellazione di un'asta fluviale.

Ulteriore elemento di rilievo è dato dalla necessità di disporre di numerosi parametri, cella per cella con la variabilità temporale riferita agli *stress period* da simulare, mentre il dato iniziale è solitamente costituito dai valori a monte e a valle del tratto fluviale. Ciò ha richiesto lo sviluppo di

⁴ Ambiente grafico di Sextante GIS per la costruzione di flussi di processamento dei dati spaziali

un interpolatore lineare in grado di calcolare la stima sia nello spazio che nel tempo. Per tale motivo in SID&GRID sono disponibili una serie di strumenti a supporto del *workflow* richiesto per l'implementazione dei fiumi e tale procedura è stata adottata in tutti i casi analoghi come ad esempio per il calcolo dei parametri dei dreni.

L'algoritmo richiede all'utente due principali tipologie di input:

- il dato geometrico del corso fluviale;
- il dato tabellare con i parametri in ingresso ed uscita da simulare per ciascun *stress period* definito nel modello.

La metodologia di processamento dei dati geografici è stata codificata in SID&GRID e strutturata con una serie di algoritmi in grado di convertire dei semplici strati informativi geografici in *Model Data Object*. Questi ultimi definiscono ciascun *data base* del modello idrologico e costituiscono i successivi dati di input per la scrittura dei *files* testuali di input per il solutore numerico del modello.

L'estrazione dei risultati della sessione di modellistica

Ad ogni nuovo modello creato in SID&GRID segue una propria *directory* di lavoro, un proprio *set* di dati di input per il solutore numerico ed un proprio *data base* geografico. Come già descritto, SID&GRID possiede un'interfaccia specifica per il controllo e l'esecuzione del modello idrologico, in cui l'utente dichiara quali processi intende simulare in relazione ai dati in suo possesso.

L'esecuzione di una simulazione produce tre serie di *array* di valori per ciascuna cella del modello e per ciascun *stress period* e *time step*. Tali dati di uscita del modello sono immediatamente visualizzabili in SID&GRID attraverso uno strumento di "traduzione inversa" in grado di georeferenziare ciascun *array* grazie alla meta informazione contenuta nel *file* di input ".geo" di cui si è già discusso (v. figura 6).

Il primo *dataset* è costituito dal file di output ".fhd" cui è associato il carico idraulico simulato in ogni cella del dominio analizzato permettendo la ricostruzione del campo di moto delle acque sotterranee. La possibilità di restituire tale dato in ambiente GIS, tramite gli strumenti di SID&GRID, consente di sviluppare e studiarne le caratteristiche con algoritmi di interpolazione deterministici e stocastici creando rappresentazioni nel continuo o tramite estrazione delle isolinee.

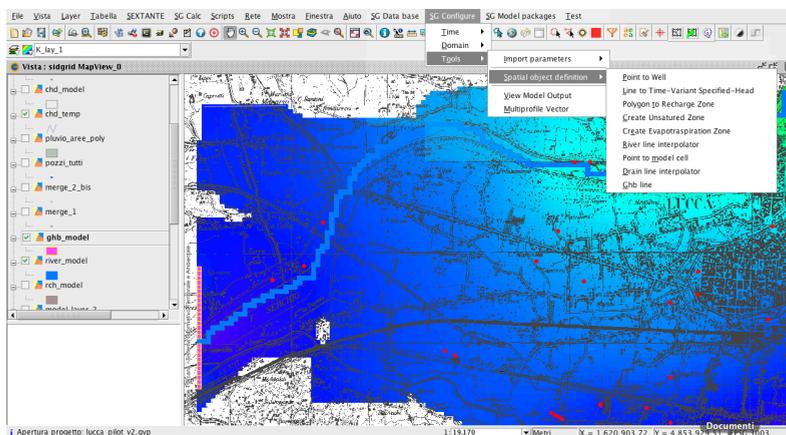


Figura 6. Esempio di visualizzazione dei dati di output geografici.

Il secondo dato in uscita è costituito dall'abbassamento (file ".fdn") calcolato rispetto ad una distribuzione iniziale o specificata dall'utente del carico idraulico. Questa uscita permette, ad esempio di effettuare valutazioni sugli abbassamenti indotti dai pompaggi in corrispondenza di campi pozzi.

Il terzo e più importante risultato è dato dalla possibilità di analizzare i bilanci nei diversi intervalli temporali per diverse porzioni di dominio di studio, si da poter analizzare, ad esempio, i prelievi antropici su determinate porzioni del dominio, passando da un'analisi di tipo *lumped* ad un'analisi di tipo locale.

Tale opportunità costituisce una tra le principali potenzialità di SID&GRID poiché consente all'utente di sviluppare un unico flusso di lavoro dalla preparazione dei dati di input fino alla restituzione geografica dei risultati. Ciò, oltre a fornire un indubbio vantaggio procedurale, permette all'operatore di usufruire direttamente di tutti gli strumenti di analisi spaziale resi disponibili dall'ambiente GIS di gvSIG e Sextante GIS.

Riferimenti bibliografici

- Newell C.J., Hopkins L.P., Bedient P.B. (1990), "A hydrogeologic database for groundwater modelling", *Groundwater* 28, 5: 703-714
- Gogu R.C., Carabin G., Hallet V., Peters V., Dassargues A. (2001), "GIS-based hydrogeological database and groundwater modelling", *Hydrogeology Journal* 9, 6:555-569
- 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/>
- Mehl S.W. and Hill M.C. (2005). "MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular groundwater model -- documentation of shared node local grid refinement (LGR) and the Boundary Flow and Head (BFH) Package", U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A12, 68 p.
- De Dreuzy J.R., Bodin J., Le Grand H., Davy P., Boulanger D., Battaia A., Bour O., Gouze P., Porel G (2006), *General Database for groundwater site information*, *Ground Water* 44, 5: 743-748
- Thoms R.B., Johnson R.L. and Healy R.W. (2006). "User's guide to the Variably Saturated Flow (VSF) Process for MODFLOW", U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A18, 58 p.
- Shermann G. E. (2008), *Desktop GIS. Mapping the planet with open source tools*, The Pragmatic Bookshelf
- SID&GRID (2012), Simulazione e sistemi IDroinformatici per la Gestione delle Risorse Idriche. <http://sidgrid.isti.cnr.it/> [Ultimo accesso 4/09/2012]
- Crestaz E., Pellegrini M., Schätzl P. (2012). "Tight ight-coupling of groundwater flow and transport modelling engines with spatial database and gis technology. A new approach integrating feflow and Arcgis", *Acque Sotterranee –Italian Journal of Groundwater n.2/129 Vol.1*, Settembre 2012 (in stampa)