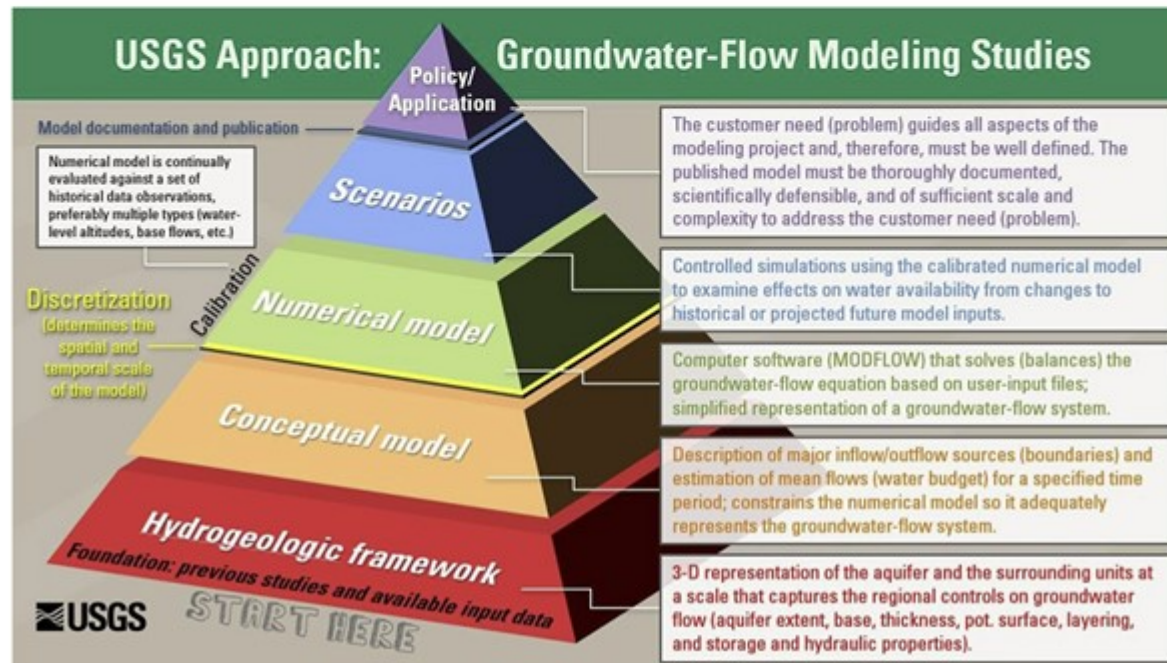
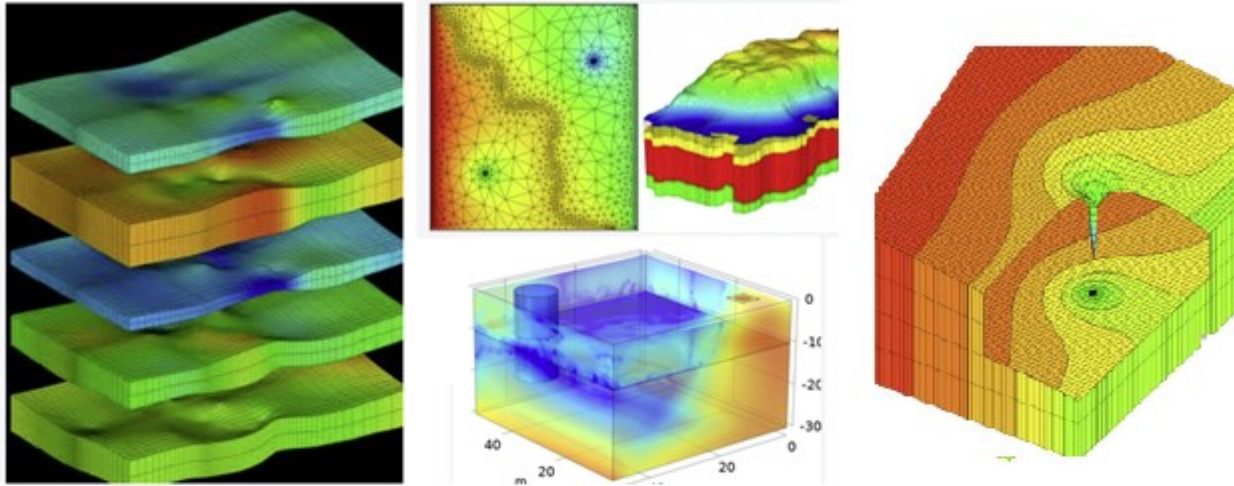


Introduzione alla modellazione numerica degli acquiferi.



Uno scherzo (ma neanche tanto, è più un memo) degli anni 1980

THE 10 HYDROGEOLOGIC COMMANDMENTS

- I. Thou shalt not assume isotropy, homogeneity, or a uniform hydraulic gradient without field evidence.
- II. Thou shalt not assume wells or streams to penetrate fully or flow systems to be two dimensional.
- III. Thou shalt not use regional data to make site-specific judgements.
- IV. Thou shalt not use color graphics to enhance lousy science.
- V. Thou shalt not employ geostatistics to obfuscate poor interpretations or weak conclusions.
- VI. Thou shalt not rely on stochastic methods to disguise insufficient field data.
- VII. Thou shalt not place geochemical interpretations above hydraulic interpretations.
- VIII. Thou shalt never regard geophysics as the truth.
- IX. Thou shalt never use a contouring program to make a water-table map.
- X. Thou shalt never use more than 3 significant digits.

La modellazione numerica degli acquiferi

Un modello, di qualunque tipo esso sia, è una interpretazione di una realtà naturale, basata su dati che per quanto spazialmente ben distribuiti e correttamente raccolti (e spesso queste due condizioni non sono soddisfatte), sono il campionamento puntuale di aree anche vaste. Un modello numerico serve ad inquadrare e a migliorare la comprensione dei processi che vengono investigati e ad estrapolare i dati di campagna, e non va considerato come una rappresentazione precisa e definitiva della realtà. **Ma dà la miglior stima che può essere fornita.**

..the model should not be the product of a modeling study; rather, what is learned from the model development and modeling analysis is the «appropriate» result.

(un modello non dovrebbe essere il prodotto di uno studio di modellazione. Piuttosto, il risultato corretto è ciò che si apprende dalla costruzione del modello e dalla sua analisi).

Voss C.I. (2011) Editor's message: Groundwater modeling fantasies —part 2, down to earth - Hydrogeology Journal, 19: 1455–1458

Una semplice analogia

(che si può prospettare a referenti non tecnici: amministratori, pubblico in assemblee, avvocati, ecc.)

Modello quota - temperatura aria

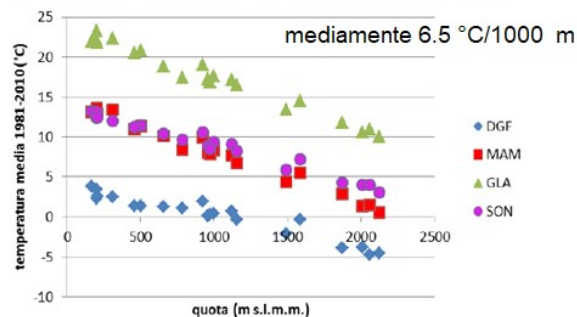


Figura 5. Distribuzione con la quota del terreno delle osservazioni di temperatura giornaliera media stagionale per il trentennio 1981-2010 presso le stazioni dell'Atlante Climatico. DGF indica l'inverno meteorologico (mesi di dicembre, gennaio e febbraio), MAM la primavera (marzo, aprile, maggio), GLA l'estate (giugno, luglio, agosto) e SON l'autunno (settembre, ottobre, novembre).

Input:
quota

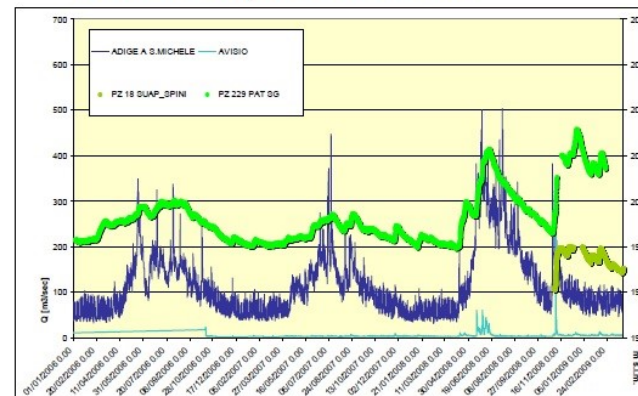
Output:
temperatura

Modello:
adattamento dei dati alla linea di regressione

Scenario :
che aumento di temperatura si ha salendo di 1000 m?

Verifica:
L'aumento di temperatura è esattamente di 6.5 °C?
probabilmente no, ma è la miglior stima che posso avere.

Modello acqua sotterranea



Input:
livello piezometrico iniziale, flusso in entrata e in uscita

Output:
livello piezometrico, portate di corsi d'acqua e pozzi, bilancio

Modello:
definizione delle condizioni al contorno, assegnazione dei parametri, calibrazione

Scenario:
quale sarà l'abbassamento ad un sito determinato causato da un pompaggio di 50 L/s ?

Verifica:
l'abbassamento corrisponde esattamente a quello risultante dalla simulazione?
probabilmente no, ma è la miglior stima che possiamo avere.

Lo scopo di questa presentazione non è di mettervi in grado di modellare gli acquiferi (per imparare servono molti mesi di studio e di esperienza), ma di introdurvi a questo mondo e darvi alcuni elementi utili a comprendere e valutare un modello numerico di acquifero che vi venga presentato.

È affidabile? È adatto allo scopo? E' solo fumo negli occhi?

Intendiamoci

«**modello concettuale**»: è la rappresentazione che il modellatore si fa del sistema idrogeologico in esame. E' una rappresentazione grafica del sistema di flusso delle acque sotterranee, in forma di mappa e di sezioni.

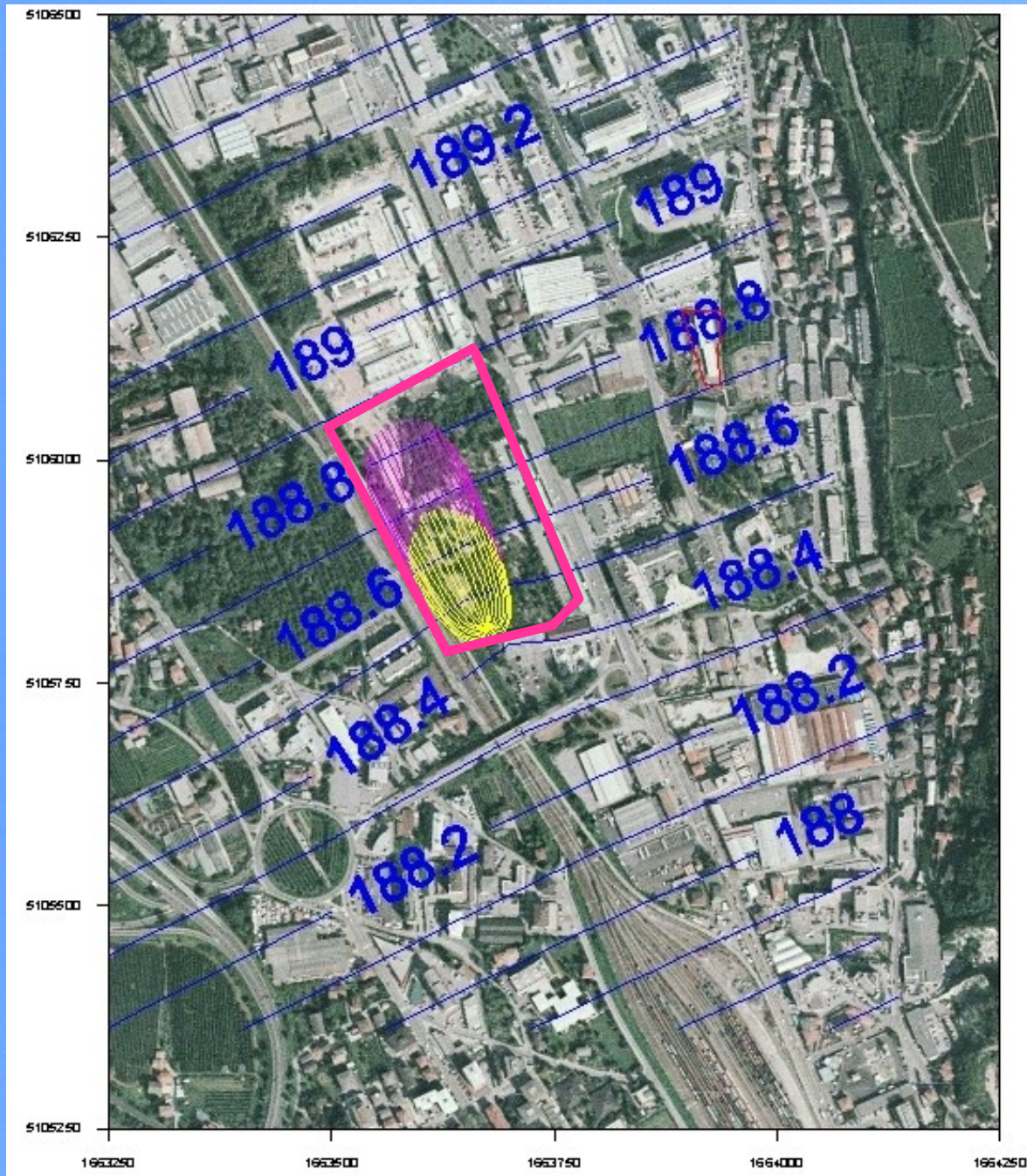
«**codice (di calcolo)**»: è un programma di computer che risolve equazioni di flusso o di trasporto, che sono centinaia. È lo strumento per sviluppare il modello.

«**modello**»: è l'applicazione di un codice per simulare un dato sistema idrogeologico.

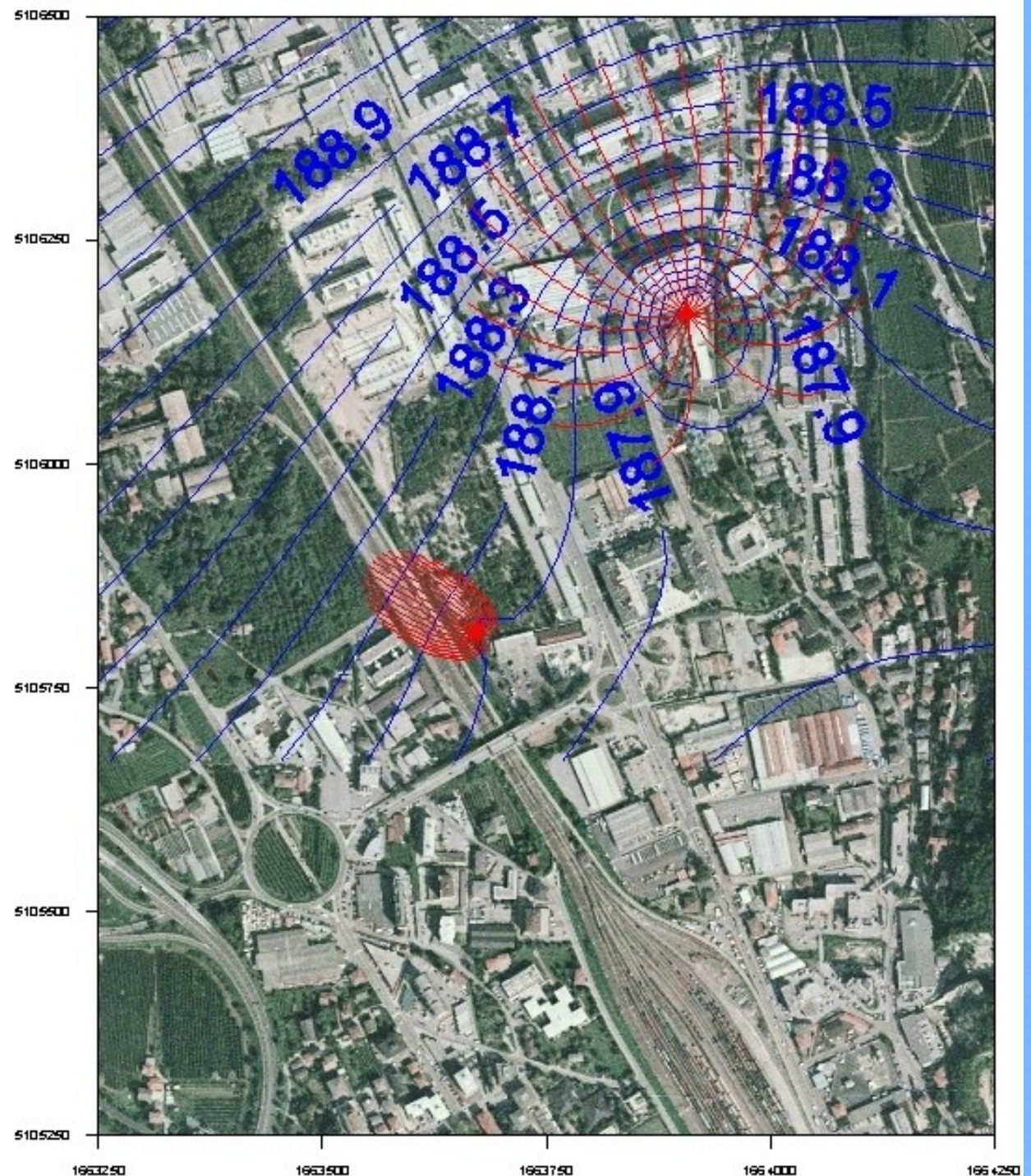
A cosa può servire un modello? Scopo:

- **predittivo**: cosa succede se...? per es., quale sarà l'impatto del pompaggio di un nuovo pozzo? Come si svilupperà un plume di contaminazione?
- **interpretativo**: per es., ottenere il bilancio di un sistema idrogeologico
- **applicativo**: per es., progettazione di un dewatering per edilizia, di una barriera idraulica

Esempio di
modellazione a fine
applicativo: aree di
cattura di una
barriera idraulica
per il confinamento
dell'inquinamento
di Trento Nord.



Esempio di
modellazione con
applicazione di tipo
predittivo: cosa
succede se nei
pressi della barriera
idraulica si avvia un
progetto di
dewatering edile?



Chi lavora al modello?

Al modello concettuale: idrogeologo, raccoglie ed interpreta i dati di campagna

Al modello: il modellatore ovvero una **persona formata, che conosce e sa usare con competenza il codice scelto**. Negli ultimi anni, spesso un ingegnere.

Idrogeologo e modellatore possono essere persone diverse, nel caso ottimale coincidono, comunque collaborano.

Cos'è davvero un modello ?

È una rappresentazione **semplificata** della realtà.

La semplificazione si attua a più livelli:

- **concettuale:** nell'interpretazione del sistema idrogeologico e nella sua trasposizione in un quadro idoneo alla formazione di un modello.
- **metodologico:** negli assunti di base delle equazioni che sono utilizzate dal codice di calcolo scelto.
- **informativo:** nella qualità dei dati inseriti nel codice.

Ovviamente il grado di semplificazione e la qualità dei dati inseriti influiscono sulla **attendibilità** del modello.

G.I.G.O. garbage in, garbage out

Che dati servono per costruire un modello?

Predisporre un modello richiede la conoscenza di numerosi parametri idrogeologici che compaiono nelle equazioni che descrivono il flusso idrico negli acquiferi.

Modello digitale del terreno

Carte piezometriche - rilievi di campagna del livello di falda in stagioni (anni) diverse. Gradiente idraulico, direzione di flusso

Stratigrafie di sottosuolo: nel maggior numero possibile e con distribuzione adatta

Pozzi: portate di prelievo e loro variabilità nel tempo; tratti filtranti, profondità

Fiumi e torrenti: idrometria e sua variabilità nel tempo, litologia degli alvei

Condizioni al limite: andamento dei limiti di permeabilità (flusso nullo: rocce impermeabili; flusso di ricarica : laghi, torrenti; faglie, ecc. Variabilità nel tempo dei flussi.

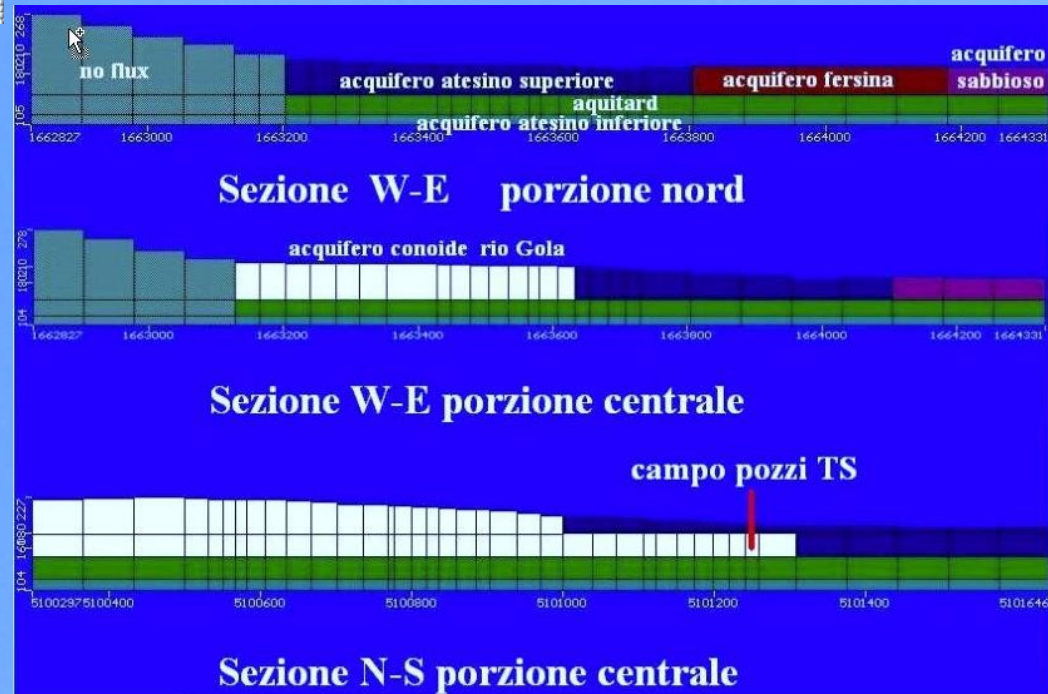
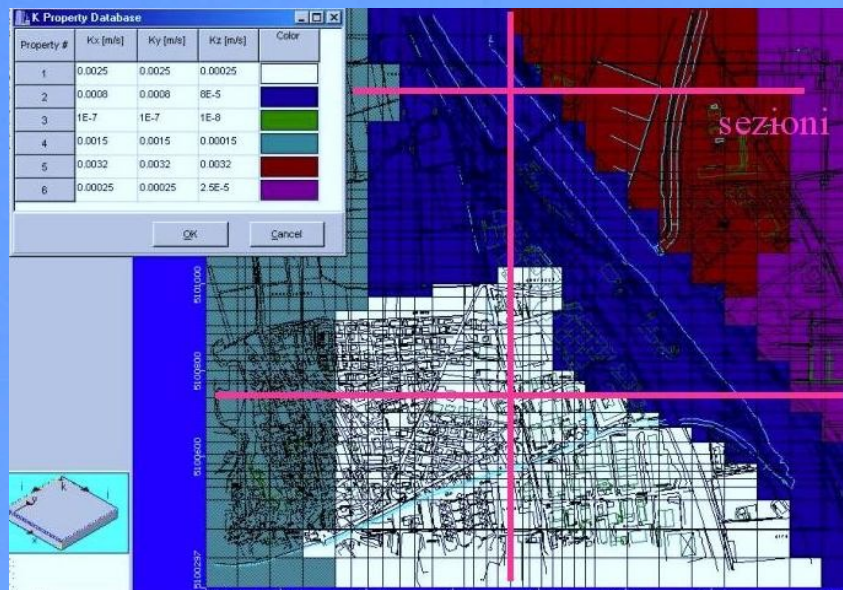
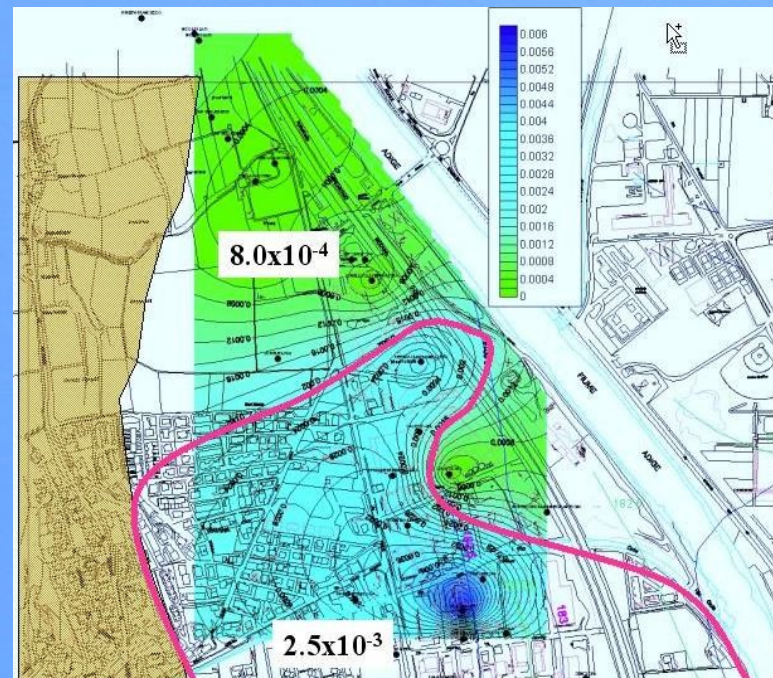
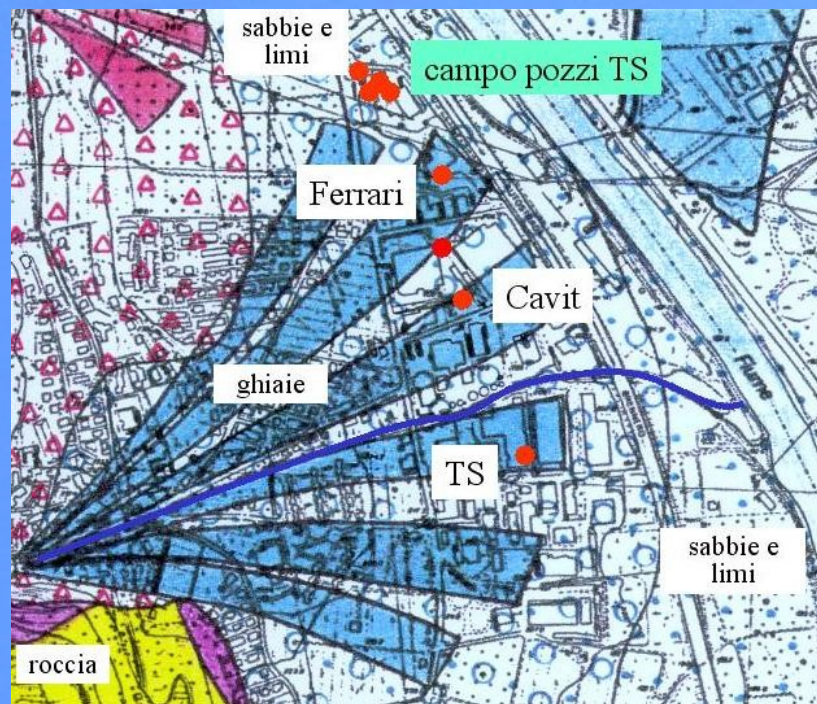
Dati da prove di pompaggio: conduttività idraulica k , trasmissività T , porosità efficace n_e

Lo sforzo impiegato nella costruzione di un modello va commisurato allo scopo.
sforzo $\leq$ > costo della modellazione

Il modello concettuale e la sua trasposizione nel codice

Vanno definite:

- Estensione e spessore degli strati ('layers' nel modello)
- Le proprietà degli strati: conducibilità idraulica o trasmissività; coefficiente di immagazzinamento (negli acquiferi confinati); porosità efficace (negli acquiferi freatici)
- Le condizioni al contorno: direzione di flusso, limiti di ricarica, limiti impermeabili, rapporti con la rete idrografica, le variabili nel tempo se si lavora con modello transitorio,...
- Si specifica in quali layers il moto è sicuramente di tipo confinato (strati sicuramente sempre saturi) e i layers nei quali ci potrebbero essere condizioni di parziale desaturazione.



Codici analitici e Codici numerici

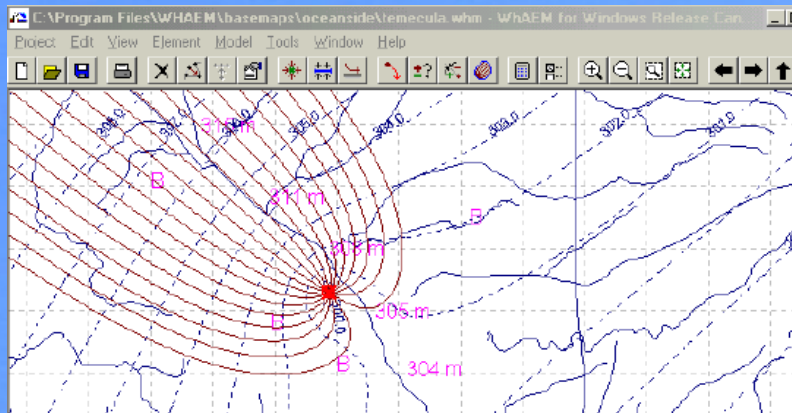
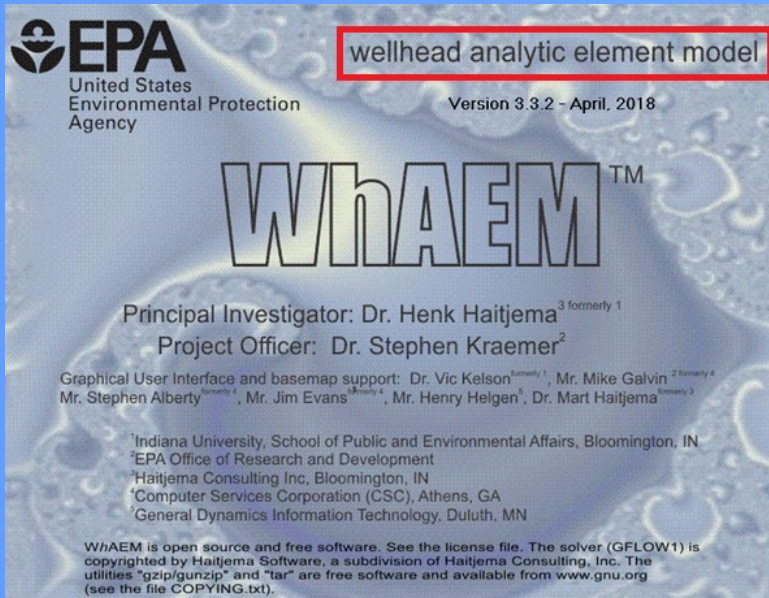
Codici analitici (Analytic Element Modeling): usati per lo studio di realtà molto semplici, mediante assunzioni quali quelle dell'isotropia ed omogeneità del mezzo poroso che troviamo nella legge di Theis. Si tratta di un ambiente di modellazione sviluppato a partire dal 1989 che utilizza il principio di sovrapposizione per calcolare il carico idraulico in un punto dell'acquifero, usando numerose funzioni analitiche a forma chiusa, ognuna rappresentativa di una singola caratteristica idrogeologica del sistema.

L'**AEM** è alla base di diversi codici numerici tra cui i più noti sono: GFLOW, WinFlow, Visual Bluebird, e **WhAEM**.

Modelli agli Elementi Analitici sono stati utilizzati in numerose modellazioni di acquiferi, sia a scala regionale che locale. Per esempio, il primo modello nazionale olandese delle acque sotterranee fu sviluppato con questa metodologia.

Il codice WhAEM fu sviluppato dall'agenzia di protezione ambientale statunitense (US EPA), allo scopo dichiarato di consentire la perimetrazione delle aree di salvaguardia delle captazioni potabili per quei casi in cui una ridotta disponibilità di informazioni sull'acquifero, di tempo; di risorse economiche non consente l'uso di codici per una modellazione tridimensionale. WhAEM è alla sua terza versione, è cresciuto in sofisticazione ed in versatilità, consentendo l'introduzione nel modello di aree con (limitate) anisotropie idrodinamiche.

Codici analitici : WhAem



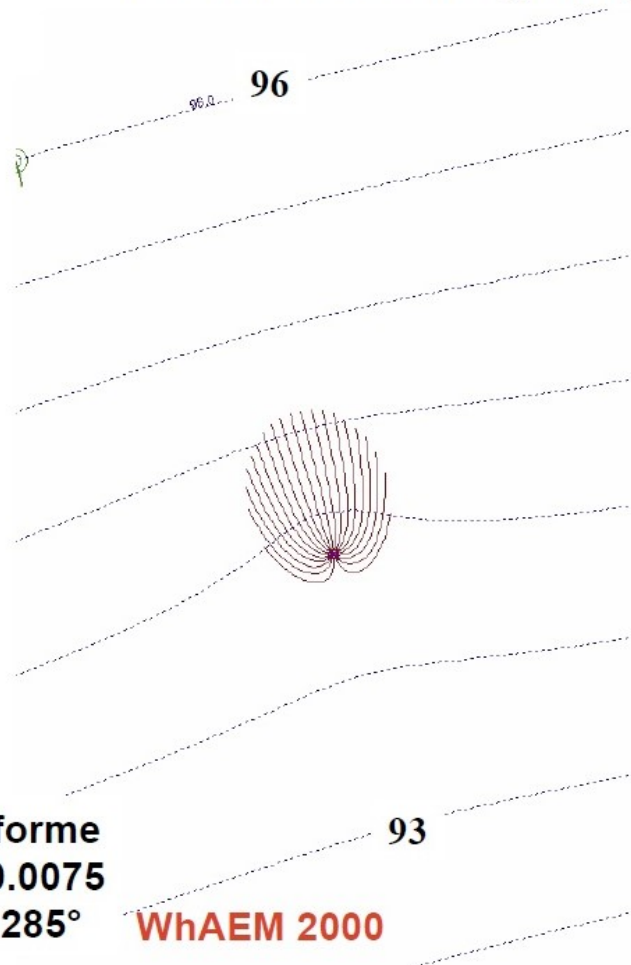
La modellazione applicata è di tipo bidimensionale (monostrato), e assume alcune ipotesi semplificative :

- l'acquifero ha un'estensione areale infinita;
- l'acquifero è omogeneo e isotropo;
- la portata di emungimento è costante nel tempo;
- il flusso è orizzontale;
- il tratto filtrante dei pozzi si sviluppa sull'intero spessore dell'acquifero;
- l'acqua viene istantaneamente liberata dalla matrice, con calo del carico idraulico;
- i calcoli sono effettuati per un regime di stato stazionario.

Il codice WhAEM consente di introdurre nel modello alcune anisotropie, come zone ben definite in cui i valori di alcuni parametri sono diversi da quelli delle altre zone. Al passaggio tra una zona e l'altra la variazione del parametro non è continua, ma discontinua.

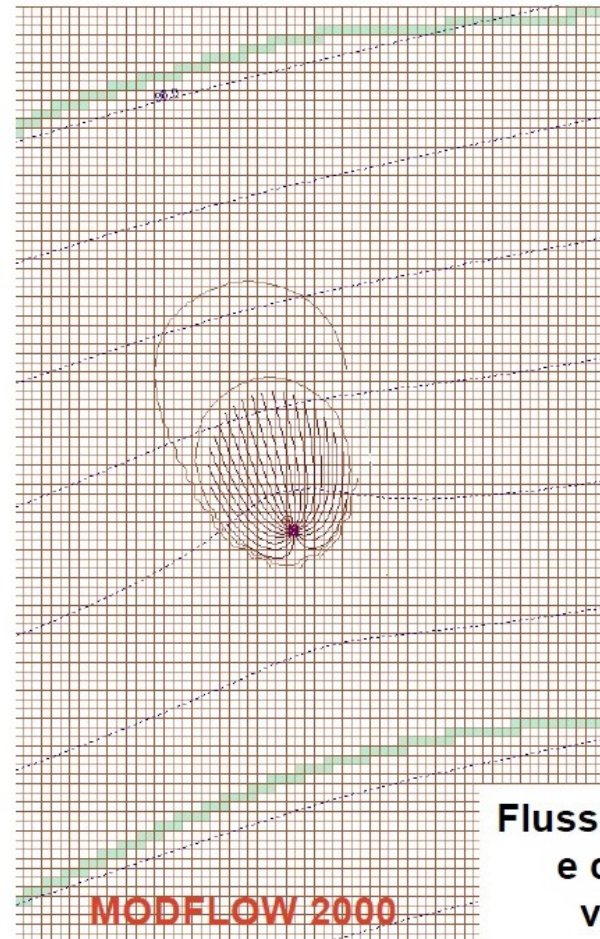
WhAEM is an analytic element model, which solves steady state groundwater flow in a single aquifer. WhAEM supports three-dimensional particle tracking, but employs the Dupuit-Forchheimer approximation, thereby ignoring resistance to vertical flow.

Area di cattura a 60 giorni (WHPA) confrontata con Isocrone a 60 e 120 giorni (MODFLOW e MODPATH)



Flusso uniforme
Gradiente 0.0075
Direzioe 285°

WhAEM 2000

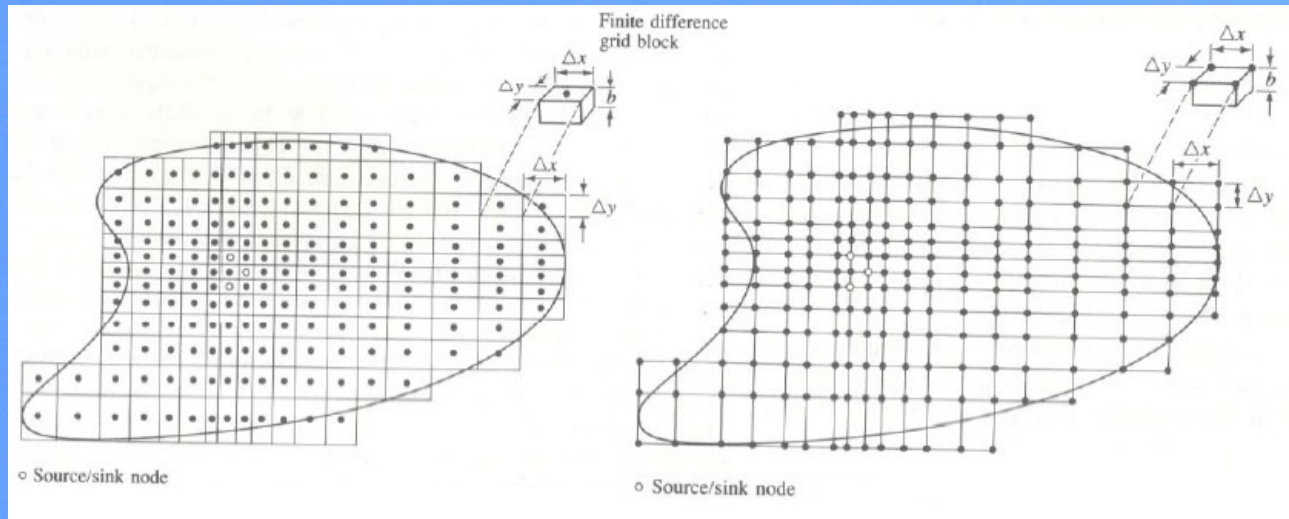


MODFLOW 2000

Flusso, gradiente
e direzione
variabile

Codici numerici: utilizzati a condizioni iniziali o al contorno complesse o dove il sistema non può venir considerato isotropo nelle sue proprietà. In questi modelli le equazioni di base vengono risolte con metodo numerico iterativo.

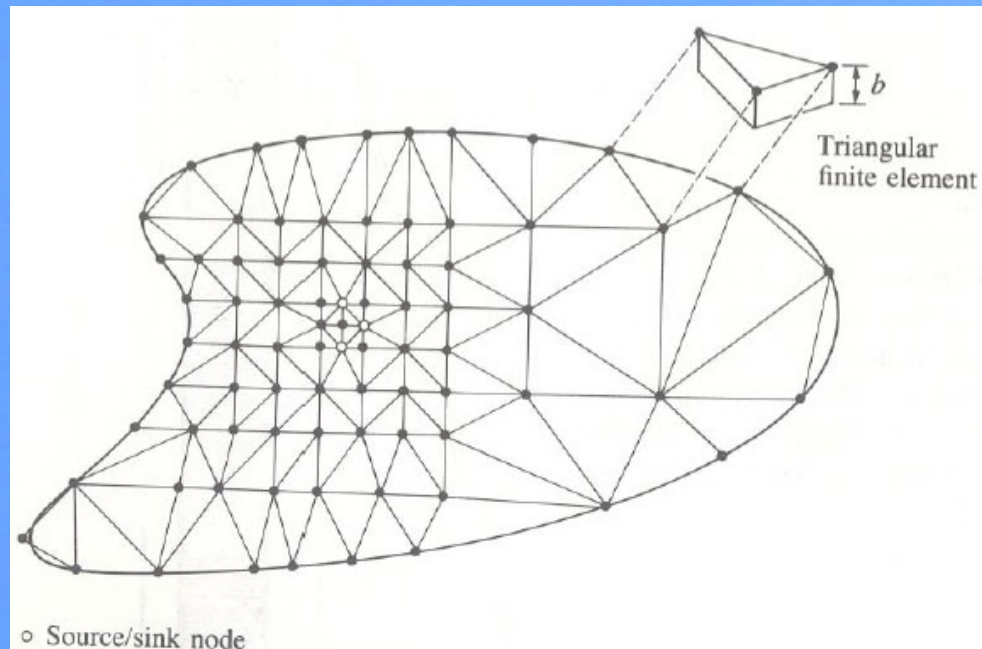
Si distinguono codici basati sul **metodo delle differenze finite** e sul **metodo degli elementi finiti**, a seconda del tipo di discretizzazione (suddivisione in celle) dell'areale del modello.



Nel metodo a differenze finite i nodi possono essere localizzati al centro delle celle “block centered nodes” o all’intersezione dei nodi della griglia “mesh centered nodes”.

Le proprietà sono considerate costanti all’interno delle celle.

Il codice più noto e usato al mondo è **MODFLOW** (MODular FLOW) dell’**USGS**, uscito nel 1983 in FORTRAN e reso disponibile gratuitamente.



Il metodo ad elementi finiti è di più recente sviluppo rispetto a quello delle differenze finite. La discretizzazione utilizza elementi di varia forma, anziché solo rettangolari, e approssima meglio la geometria reale del sistema idrogeologico. Il metodo utilizza soluzioni basate sul metodo di Galerkin, la cui base matematica è decisamente più complessa di quella del metodo a differenze finite. I codici commerciali sono notevolmente più costosi, il più conosciuto è FeFlow.

La versione più recente di MODFLOW ha però implementato la possibilità di discretizzazione con celle di qualsiasi forma.

Overview of MODFLOW 6

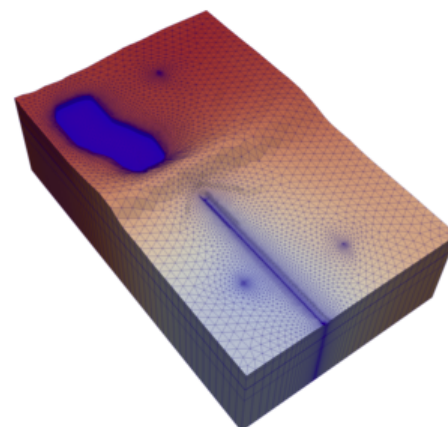
MODFLOW 6 is an object-oriented program and framework developed to provide a platform for supporting multiple models and multiple types of models within the same simulation (Hughes and others, 2017; Langevin and others, 2024). This version of MODFLOW is labeled with a "6" because it is the sixth core version of MODFLOW to be released by the USGS (previous core versions were released in 1984, 1988, 1996, 2000, and 2005). In the MODFLOW 6 design, any number of models can be included in a simulation. These models can be independent of one another with no interaction, they can exchange information with one another, or they can be tightly coupled at the matrix level by adding them to the same numerical solution. Transfer of information between models is isolated to exchange objects, which allow models to be developed and used independently of one another. Within this new framework, a regional-scale groundwater model may be coupled with multiple local-scale groundwater models. Or, a surface-water flow model could be coupled to multiple groundwater flow models.

Supported Model Types

MODFLOW 6 presently contains four types of hydrologic models:

- the Groundwater Flow (GWF) Model
- the Groundwater Transport (GWT) Model
- the Groundwater Energy (GWE) Model
- the Particle Tracking (PRT) Model

The Groundwater Flow (GWF) model for MODFLOW 6 simulates three-dimensional, transient, groundwater flow. The GWF Model for MODFLOW 6 is based on a generalized control-volume finite-difference (CVFD) approach in which a cell can be hydraulically connected to any number of surrounding cells. For complex problems involving water-table conditions, an optional Newton-Raphson formulation, based on the formulations in [MODFLOW-NWT](#) and [MODFLOW-USG](#), can be activated. The GWF Model is divided into "packages," as was done in previous MODFLOW versions. A package is the part of the model that deals with a single aspect of simulation. There are packages for internal calculations of groundwater flow, packages for representing hydrologic stresses (constant heads, wells, recharge, rivers, general head boundaries, drains, and



Sources/Usage: Public Domain. [View Media Details](#)

This figure shows a triangular grid in which the size of the triangular cells is reduced in areas with relatively large hydraulic gradients, such as around the shoreline of a lake, near pumping wells, and along a stream. This type of layered grid can be represented using the Discretization by Vertices (DISV) Package in MODFLOW 6.

La gestione dell'input e dell'output di Modflow inizialmente era molto laboriosa, esoterica per i più.

[illegible]

REACH NO.	LAYER	ROW	COL	STAGE	CONDUCTANCE	BOTTOM EL.
1	1	1	1	100.0	1.382	90.00
2	1	2	1	100.0	1.382	90.00
3	1	3	1	100.0	1.382	90.00
4	1	4	1	100.0	1.382	90.00
5	1	5	1	100.0	1.382	90.00
6	1	6	1	100.0	1.382	90.00
7	1	7	1	100.0	1.382	90.00
8	1	8	1	100.0	1.382	90.00
9	1	9	1	100.0	1.382	90.00
10	1	10	1	100.0	1.382	90.00
11	1	11	1	100.0	1.382	90.00
12	1	12	1	100.0	1.382	90.00
13	1	13	1	100.0	1.382	90.00
14	1	14	1	100.0	1.382	90.00
15	1	15	1	100.0	1.382	90.00
16	1	16	1	100.0	1.382	90.00
17	1	17	1	100.0	1.382	90.00
18	1	18	1	100.0	1.382	90.00

Ciò ha fatto la fortuna dei software commerciali che includono il codice e rendono semplice la gestione di input e output mediante menù a tendina e input su visualizzazioni cartografiche a schermo: Visual Modflow, Groundwater Vistas, ecc..

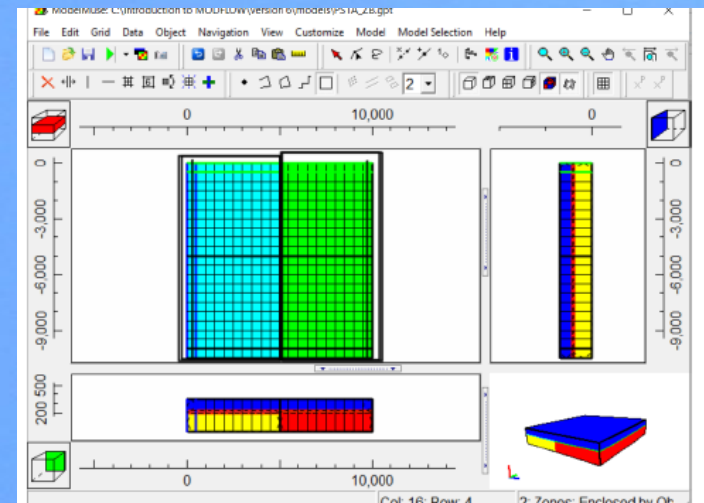
Oggi sono disponibili Pre- e Post – processori gratuiti.

Edito ancora da **USGS** è **Model Muse**, che viene continuamente aggiornato ed è accompagnato da numerosi tutorial video ed esercizi, seguendo gli upgrades di Modflow.

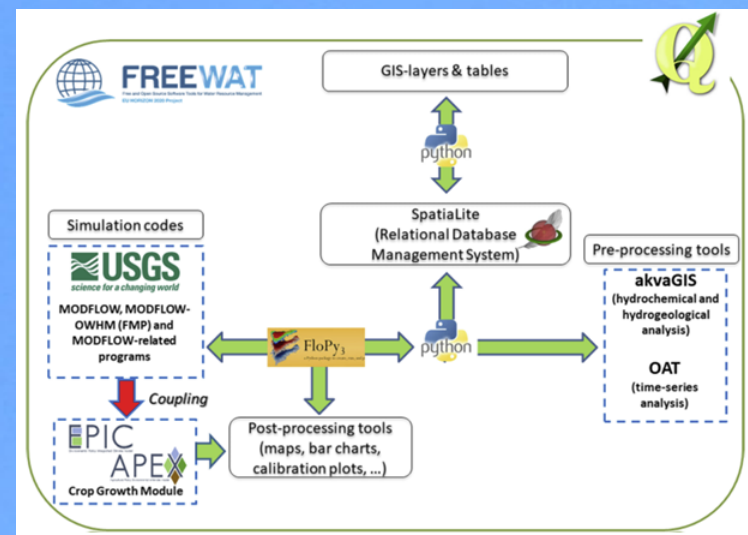
Parte dell'input viene fatto con shapefiles.

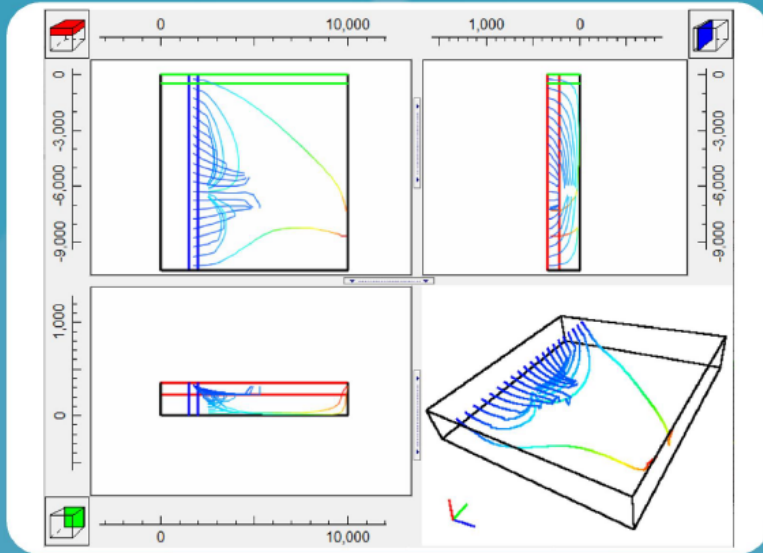
Attualmente lavora con Modflow 5.

È gratuito. È pubblico anche **Flopy**, scritto in Python



In Europa (che l'ha finanziato) troviamo **Freewat**, gratuito, realizzato con grande apporto degli idrogeologi italiani, che ha il vantaggio di interfacciarsi con QGIS e con le relative biblioteche, e quindi in grado di incorporare dati non solo idraulici, ma p. es. anche idrochimici, e con una grafica di output accattivante. Ci sono problemi di aggiornamento delle interfacce quando escono upgrade di QGIS e Modflow, e molto dipende dai finanziamenti europei, non scontati.





Iniziare a fare modellazione con MODFLOW

- Scaricare Model Muse, i tutorials e i video tutorials
- Scaricare il libro
- Installare e configurare MODFLOW
- Esercitarsi con i tutorials
- prima di usare Model Muse con MODFLOW per risolvere problemi reali, esercitarsi bene con i tutorials e con problemi semplici.

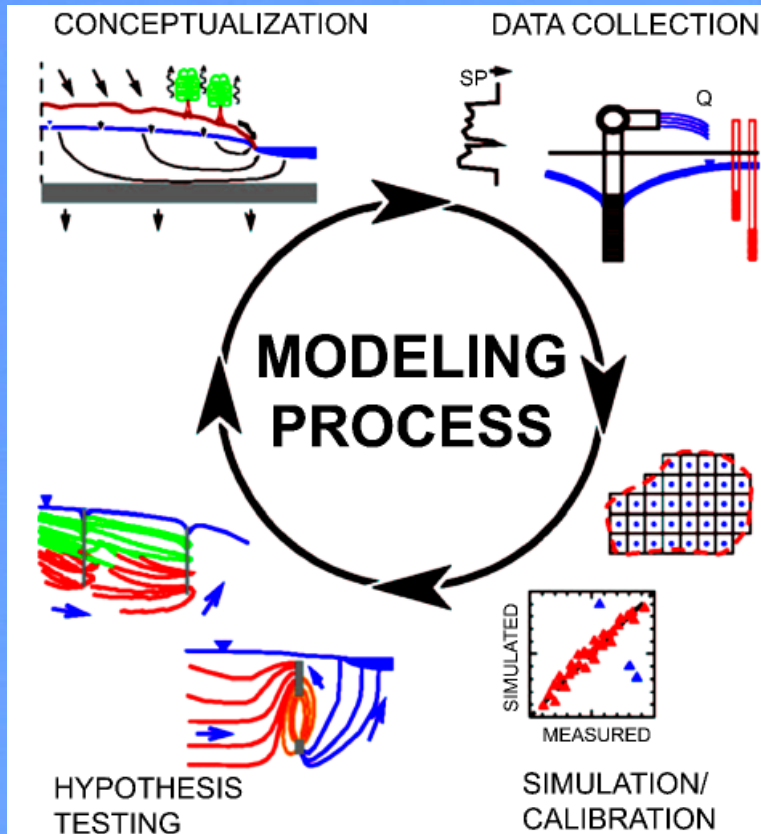
Getting Started with MODFLOW

Richard B. Winston



La simulazione si può fare in regime di:

- **flusso stazionario**: si implementa il modello secondo input specifici idraulici e di stress esterni (pompaggi, dreni, ecc.) e lo si fa “girare” fino a raggiungere una stabilizzazione. Lo stato stazionario è un’“istantanea” delle condizioni di flusso al contorno.
- **flusso transitorio**: si possono variare per periodi definiti le condizioni di flusso al contorno (carico idraulico stagionale, altezze idrometriche, infiltrazione,...). L’elaborazione è in questo caso più laboriosa.



Uno schema sintetico della procedura di preparazione di un modello.

The circular modeling process. First develop a conceptual model and compile existing data about the aquifer. Then collect or compile more data if required for the problem at hand. Decide on a modeling approach and calibration strategy, then test your hypothesis. If the model is adequate for the problem or proves the conceptual model is correct, then no further study is needed. If not and funding is available, revise the conceptual model, collect more data and incorporate the data into a more complex model, recalibrate, and test the new hypothesis

Il movimento tridimensionale dell'acqua sotterranea a densità costante attraverso un mezzo poroso può essere descritto dall'equazione a derivate parziali:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

dove: K_{xx} , K_{yy} e K_{zz} sono i valori della conducibilità idraulica lungo le direzioni x, y, z che sono state assunte parallele agli assi maggiori della conduttività idraulica; h è il carico idraulico; W è il flusso volumetrico per unità di volume e rappresenta gli apporti o le perdite di acqua; S_s è lo "storage" specifico del materiale poroso; t è il tempo.

Eccetto che per casi molto semplici, l'equazione non può essere risolta con soluzioni analitiche. Nella soluzione con il metodo delle differenze finite, il continuo descritto dall'equazione è sostituito da un set finito di punti discreti sia nello spazio che nel tempo, e le derivate parziali sono sostituite da termini calcolati dalle differenze di carico idraulico in questi punti. Dal processo sopra descritto si deducono sistemi di equazioni algebriche lineari di differenze; la loro soluzione fornisce valori di carico idraulico h agli specifici punti del sistema. Questi valori rappresentano una approssimazione alla distribuzione, variabile con il tempo, del carico idraulico rispetto a quella che si otterrebbe dalla soluzione analitica dell'equazione.

Lo sviluppo dell'equazione di flusso con il metodo delle differenze finite deriva dall'equazione di continuità: la somma di tutti i flussi in ingresso ed in uscita dalle celle deve essere uguale alla variazione di storage nella cella. Assumendo costante la densità dell'acqua, l'equazione di continuità che esprime il bilancio del flusso per una cella è:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$$

dove: Q_i = la portata di flusso in una cella; S_s = "Storage" specifico; volume di acqua che essere immagazzinata per unità di variazione di carico; ΔV = Volume di una cella; Δh = Variazione di carico idraulico nell'intervallo di tempo Δt

$$\sum Q_i = SS \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V$$

Sostanzialmente si lavora quindi con un bilancio di massa.

Il termine a destra dell'equazione è equivalente al volume di acqua immagazzinata in un intervallo di tempo Δt per una variazione di carico idraulico Δh ; l'equazione viene quindi definita in termini di ingresso e guadagno in “storage”: uscite e perdite vengono rappresentate definendo le uscite come flussi negativi e le perdite come guadagni negativi.

Flussi esterni all'acquifero, (drenaggi, evapotraspirazione, ricarica, ...) dipendenti dal carico idraulico rappresentano per ogni cella un termine dell'equazione della differenza finita.

Per ogni cella il codice costruisce l'equazione della differenza finita e quindi risolve il sistema.

Nelle simulazioni allo stato transitorio si vuole in genere predire una distribuzione del carico idraulico in tempi successivi, data una distribuzione iniziale di carico, i parametri idraulici e definiti gli stress esterni al sistema.

La distribuzione iniziale del carico idraulico fornisce un valore h per ogni nodo della griglia all'inizio del primo intervallo di tempo (“time step”).

Come primo passo si calcolano i valori di h al tempo t_2 che marca la fine del primo time step, per ogni nodo della griglia. Risolto il sistema di equazioni per il tempo t_2 si passa al tempo t_3 e così via per tutti gli intervalli di tempo fino a coprire il periodo di interesse. Ad ogni time step il sistema di equazioni viene riformulato.

Il sistema di equazioni implementate per ogni time step viene risolto **iterativamente**. Il valore h da definire per la fine di un dato time step viene calcolato iniziando con l'assegnare un valore arbitrario o stima (h_0) a ciascun nodo griglia alla fine del time step stesso.

Si avvia quindi una procedura di calcolo che varia questa stima, producendo un nuovo set di valori di h (h_1) che sono più vicini alla soluzione del sistema di equazioni.

Questi nuovi valori di h sostituiscono i valori iniziali e si ripete il calcolo producendo un terzo set di valori (h_2).

La procedura si ripete producendo ogni volta valori di h che soddisfano con approssimazione crescente il sistema di equazioni. Quando i valori di h approssimano quelli che soddisfano l'equazione le variazioni fra una iterazione e la successiva diventano molto piccole. Il calcolo «converge», e si arrestano le iterazioni (criterio di chiusura).

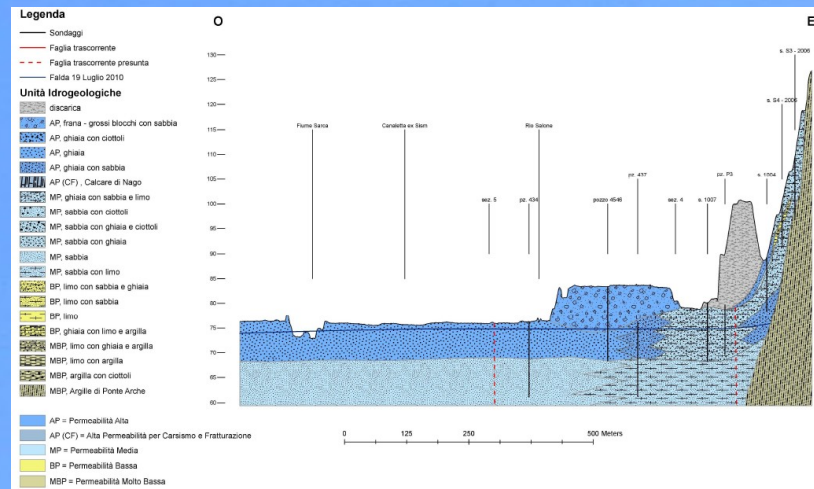
Quindi le soluzioni di un modello ad elementi finiti sono sempre approssimazioni alla soluzione esatta dell'equazione differenziale di flusso. L'accuratezza della soluzione dipende da vari fattori, incluso il criterio di chiusura scelto.

Le fasi critiche della creazione di un modello:

- la qualità del dato inserito
- la discretizzazione (es.: griglia più fitta nelle aree di stress con alti gradienti; griglia più fitta nelle aree di interesse e punti di osservazione)
- la definizione del numero dei layers (strati). Per es.: in un modello ad un solo strato (2D), il flusso è solo parallelo allo strato. Non c'è possibilità di flusso verticale, qualsiasi stress si imponga al modello!; in un modello a due strati, si può computare un gradiente verso il basso e verso l'alto di una sola grandezza, ovvero non si può definire un gradiente maggiore in uno strato rispetto all'altro. (Le modellazioni di trasporto di contaminanti possono richiedere l'uso di decine di sottostrati, per dare indicazioni sulla quota di propagazione.)
- il posizionamento dei limiti di flusso imposto (head boundaries), impermeabili, ecc.
- la calibrazione si tratta di una verifica della qualità del modello, al fine di testarne le capacità di riprodurre i fenomeni reali. Operativamente è il confronto dell'output con i dati di campo, e l'eventuale “aggiustamento” dei parametri per far meglio combaciare l'output del modello con i dati di campagna. Se i risultati della simulazione differiscono troppo da quelli di campo bisogna considerare se :
 - il modello concettuale è sbagliato
 - se ci sono errori nei dati di campagna

[illegible]

- dimensionare appropriatamente l'estensione del modello;
- minimizzare il numero di celle;
- minimizzare le celle esterne inattive;
- orientare secondo la direzione di flusso (in modo che la direzione sia allineata con le righe e con le colonne);
- orientare secondo le direzioni di anisotropia (in modo che righe e colonne siano allineati con gli assi maggiori dell'ellissoide della conduttività idraulica);
- comporre i limiti tra le litologie con i contrasti fra le proprietà (infittire la maglia dove le condizioni cambiano bruscamente);
- griglia più fitta nelle aree di stress con alti gradienti;
- griglia più fitta alle aree di interesse e punti di osservazione;
- omettere parte del sistema se è simmetrico;
- mantenere la dimensione relativa fra griglie adiacenti (1: 1.5)
- mantenere il rapporto di vista fra direzioni ortogonali (100:1);
- considerare una griglia più fitta in caso si prospetti una analisi futura del trasporto in soluzione.



METODI DI CALIBRAZIONE

Può essere fatta manualmente (variando direttamente i valori dei parametri) o in automatico, usando tecniche di regressione statistica non lineari.

Trial and error i valori dei parametri inseriti nel modello vengono modificati, e si eseguono simulazioni iterative sino a far concordare i dati di campagna con quelli simulati. Il metodo può dar luogo a soluzioni non univoche quando diverse combinazioni di parametri producono la stessa configurazione piezometrica.

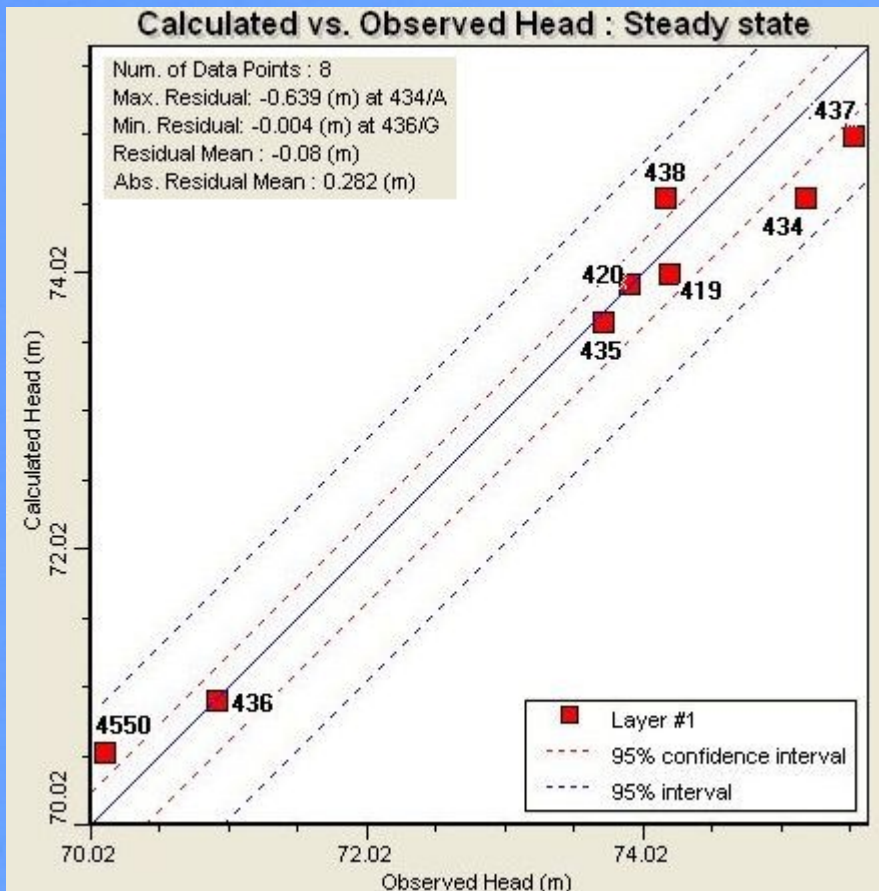
La calibrazione è influenzata dall'esperienza (o dall'inesperienza) del modellista. La soluzione può non essere univoca se diverse combinazioni di parametri portano alla stessa configurazione piezometrica. La possibilità di una soluzione univoca è incrementata dalla disponibilità di un gran numero di bersagli di calibrazione uniformemente distribuiti e con un piccolo grado di errore associato.

Calibrazione automatizzata un programma che utilizza un approccio inverso (inverse modeling) a partire dal risultato ottimizza i parametri in ingresso al fine di minimizzare le differenze tra dato osservato e dato simulato. La **soluzione diretta** tratta i parametri incogniti come variabili dipendenti delle equazioni di flusso ed i carichi idraulici come variabili indipendenti. Soluzione quasi del tutto abbandonata come metodo perché instabile e perché non riconosce gli errori di misura.

La **soluzione indiretta** è simile al trial & error in quanto un software varia i parametri controllando automaticamente il risultato piezometrico, minimizzando le differenze tra simulazione e misurazione, per esempio minimizzando la sommatoria delle differenze quadratiche.

Come valutare la calibrazione di un modello

Il metodo di valutazione più frequentemente proposto è il Grafico di dispersione “valori osservati vs. valori simulati”.



water levels in March, shown in Fig. 7, show satisfactory agreement. Correlation coefficient calculated between observed and simulated heads was 0.58. In general, simulated heads are lower than observed heads, which might be related to specific conditions in the years 2015 and 2016. FREEWAT model was run with average conditions of the 1990-2015 period. 2015 was a year with higher than normal precipitation and groundwater recharge, which can explain the difference between simulated and observed heads for March 2016.

??

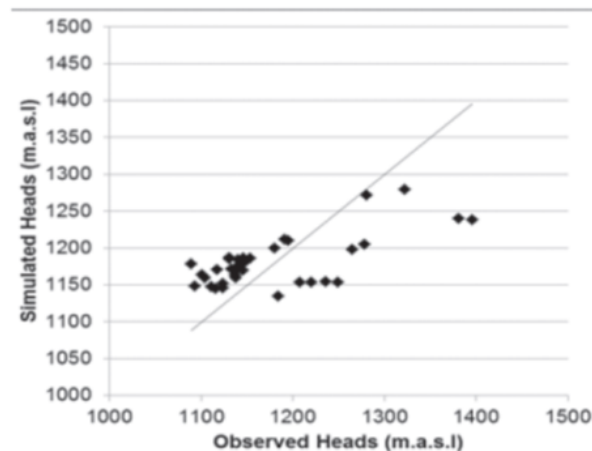


Fig. 7 - Observed and Simulated Heads. Observations are from March 2016.

Come valutare la calibrazione di un modello

Grafico di dispersione “valori osservati vs. residui”. Residui: differenza tra altezze piezometriche osservate e calcolate. Se il valore dei residui non è troppo elevato e i punti si dispongono in maniera casuale intorno all’asse delle ascisse la calibrazione è buona. Una correlazione tra valori osservati e residui, anche se questi ultimi sono bassi, è indizio di una calibrazione non soddisfacente

Mappa dei residui. Mostra la posizione dei punti di misura e il valore dei residui all’interno del dominio di flusso. Tale mappa completa le informazioni fornite dal grafico di dispersione.

Istogramma dei residui. Un istogramma distribuito intorno allo zero con un andamento di tipo gaussiano è indice di una buona calibrazione. La calibrazione è tanto migliore quanto più piccata è la distribuzione dei residui intorno allo zero.

Analisi statistica dei residui.

Alla calibrazione si fa seguire una **analisi di sensitività**: si valuta l’effetto dell’incertezza nella stima di alcuni parametri sui risultati della simulazione.

ATTENZIONE: Il fitting di un modello ai dati di campo può essere ottenuto con parametri di input non univoci, ovvero possono essere date impostazioni diverse al modello.

Il risultato della simulazione, anche se può riprodurre in modo soddisfacente i dati di campagna, deve essere idrogeologicamente realistico e significativo.

E' noto l'esempio del dottorando che nel creare un modello impose aree circolari intorno a ciascun punto di misura in campo, assegnando ad ogni area parametri perfettamente corrispondenti con i dati di campo. Al termine della calibrazione del modello lo studente era soddisfatto perché il modello riproduceva appieno i dati di campo.

Questo approccio non ha sicuramente fornito un modello idrogeologicamente realistico ed affidabile.

La semplicità è un valore aggiunto.

Highly detailed models are fantasies*.

Un modellatore serio fornisce anche un'autovalutazione dell'affidabilità del modello.

* C.I. Voss - Editor's message: Groundwater modeling fantasies - part 1, adrift in the details Hydrogeology Journal (2011) 19

Etica della modellazione

* Groundwater modeling has become a self-supporting industry of fantastical promises that cannot be kept and, in most cases, cannot ever be tested. The industry is selling individual models at costs far beyond their true value. Indeed model results have become so realistic and complex in appearance, it is difficult to tell a simulation result from a detailed remote-sensed image of the earth's surface. The wonderful apparition of a color map, as the model result, containing uncountable details of the groundwater system being represented, is misleading.

Who would dare cross a bridge designed with the same level of uncertainty as inherent in such a groundwater model analysis?

Managers, who are often not modeling experts, have no means to judge such results, except to appreciate their apparent beauty and complexity. Modelers who create such results are trying to impress—but, in truth, are misleading their clients.

The modeler needs to accept that (1) the subsurface cannot be represented in detail, (2) that a model is going to be a deficient representation of hydrogeologic reality, and (3) that the model will be a mathematical representation merely of the modeler's own concept of how the subsurface domain of interest functions.

Valutare un modello? Riutilizzare un modello?

Al termine di uno studio ti viene consegnato il modello. Chi lo riceve può valutarne la qualità? E usarlo in futuro? Per esempio, dopo qualche mese dalla consegna viene proposta la realizzazione di un nuovo campo pozzi. Posso inserirlo nel modello e vedere quali impatti dà all'acquifero?

Per farlo dovresti:

- Avere tutti i files di input e output del modello
- Avere a disposizione lo stesso codice impiegato
- Essere in grado di entrare nel modello e di introdurre correttamente e scientemente le variazioni che intendi verificare e farlo girare.

In pratica essere anche tu un modellatore.

Altrimenti sei costretto a rivolgerti ancora a chi ha costruito il modello.



Extreme Confidence

Ispra ha previsto questi problemi nelle sue linee guida del 2021

Riassumendo Fase 10: Elaborazione della relazione finale e consegna del modello

- ✓ verifica dei contenuti (punti 1-9) della relazione finale
- ✓ consegna della relazione finale, completa di elaborati cartografici
- ✓ consegna dei file necessari alla riproduzione delle simulazioni effettuate
- ✓ consegna di eventuali codici proprietari (se previsto dal contratto/ procedimento)

Ispra - Manuali e Linee Guida (193/2021) - Sviluppo e valutazione di modelli di flusso in acquiferi porosi.

ma ... consegnare tutti i files e il codice proprietario?!?
sono costati tempo denaro e lavoro!



forse è più opportuno un contratto che preveda una assistenza futura.

Richiami conclusivi

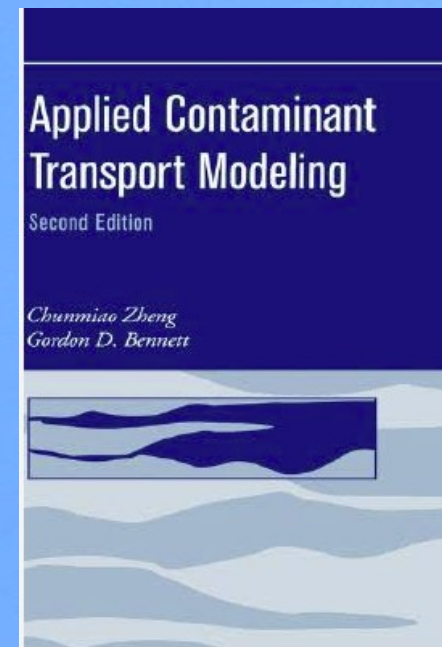
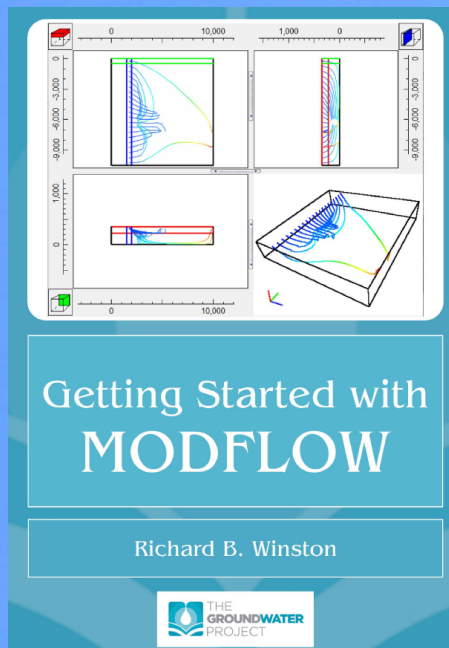
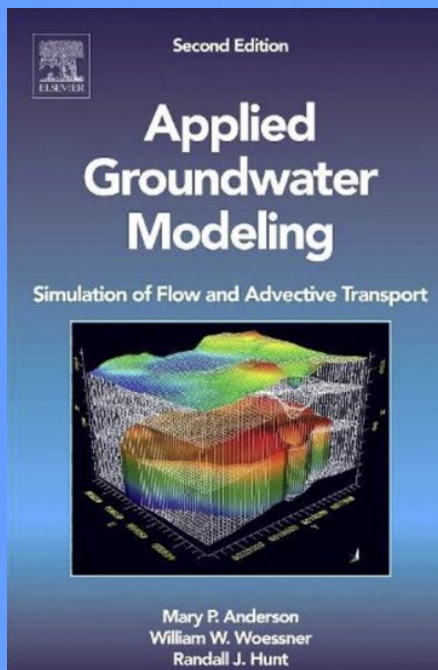
Un modello è una interpretazione di una realtà naturale e non va considerato come una rappresentazione precisa e definitiva della realtà, come spesso la committenza vuole intendere (o si lascia che intenda). Ma è lo strumento che fornisce la miglior stima possibile.

Le semplificazioni e le approssimazioni utilizzate in tutte le fasi di costruzione di un modello sono un elemento da tenere sempre in considerazione e sono le parti in cui intervenire per migliorare l'affidabilità del modello.

Lo sforzo per la costruzione di un modello numerico va commisurato allo scopo: le attività di acquisizione dati e di trasposizione in modello ed i relativi **costi** sono diverse a seconda della finalità. Per esempio:

- valutazione dell'impatto di un pozzo irriguo per agricoltura
- analisi del comportamento nel tempo di pozzo per scambio termico
- valutazione dell'impatto di un pozzo industriale ad elevata portata
- aree di salvaguardia di un campo pozzi per consumo umano

Consigliati per approfondire



Grazie per l'attenzione