

## MODELLO LITOSTRATIGRAFICO 3D PROPEDEUTICO ALLO SVILUPPO DI UN MODELLO DI FLUSSO SOTTERRANEO: CASO DI STUDIO, LA PIANA DEL SARNO (ITALIA)

### 3D LITHOSTRATIGRAPHIC MODEL AS SUPPORT FOR DEVELOPMENT OF A GROUNDWATER FLOW MODEL: THE SARNO PLAIN (ITALY) CASE STUDY

DANIELA DUCCI<sup>(\*)</sup>, SILVIA DE SIMONE<sup>(\*\*)</sup> & MARIANGELA SELLERINO<sup>(\*\*)</sup>

<sup>(\*)</sup>Università degli Studi di Napoli "Federico II" - Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale  
Piazzale Tecchio, 80 - 80125 Napoli, Italy - Email: daniela@unina.it

<sup>(\*\*)</sup>Ingegnere, collaboratore esterno

#### RIASSUNTO

Lo scopo di questo lavoro è individuare una metodologia informatizzata per la costruzione di un modello litostratigrafico tridimensionale di un acquifero propedeutico alla definizione di un modello di flusso in un settore dello stesso ai fini della definizione di alcune componenti del bilancio idrico. La metodologia è stata applicata in due aree della Piana del Sarno (Italia) interessate da forti travasi sotterranei.

La ricostruzione litostratigrafica delle aree di studio è stata effettuata interpolando i dati stratigrafici ottenuti dalla analisi e elaborazione dei sondaggi. Il software utilizzato per la costruzione del modello litostratigrafico è ROCKWORKS 2006, che permette la costruzione di modelli 3D (attraverso rappresentazioni di tipo voxel o superfici 3D) e sue rappresentazioni tridimensionali o bidimensionali.

A partire dal modello litostratigrafico, è stato realizzato un modello numerico di flusso al fine di simulare il flusso tra corpi idrici sotterranei.

A tal scopo, il software utilizzato è GROUNDWATER VISTAS 5, che fornisce un'interfaccia grafica per il codice di calcolo alle differenze finite MODFLOW, necessario per lo studio del moto delle acque sotterranee.

La metodologia illustrata, ha permesso di quantizzare il flusso sotterraneo verso la Piana del Sarno, proveniente dai rilievi carbonatici dei M.ti Lattari e dall'acquifero vulcanico del Somma-Vesuvio.

**TERMINI CHIAVE:** modelli 3D, modelli di flusso sotterraneo, travasi di acque sotterranee, Piana del Sarno, Campania.

#### INTRODUZIONE

Lo scopo di questo lavoro è l'elaborazione, a partire dalle conoscenze sulla geologia e stratigrafia dell'area, di un modello litostratigrafico tridimensionale della piana alluvionale del Sarno (Fig. 1). Il modello 3D è stato quindi utilizzato per la ricostruzione della geometria dell'area di studio e del possibile campo dei parametri idrodinamici, per la definizione di un modello di flusso sotterraneo e l'identificazione di alcune componenti del bilancio idrico (richiesto dal DLgs. 152/2006, titolo I art. 145).

In particolare si è posto l'accento sulla valutazione dei travasi laterali provenienti dai corpi idrici sotterranei adiacenti del Somma-Vesuvio e dei Monti Lattari. Pertanto la metodologia è stata applicata in due settori della Piana posti alla base dei suddetti corpi idrici (Fig. 2).

#### ABSTRACT

The aim of this paper is to identify a computer based methodology in order to draw up a lithostratigraphic 3D model of an aquifer so as to develop a groundwater flow model in a part of it, useful to define some parameters involved in the evaluation of the water balance. The methodology was applied in two sample areas located in the Sarno Plain (Italy) affected by strong groundwater subflow.

The stratigraphical reconstruction of the study areas was obtained by interpolating stratigraphical data from analyzed and codified boreholes. The software used for the lithostratigraphic model creation is ROCKWORKS 2006, which allows the construction of a 3D model (using grid-models or voxel matrix models) and its three-dimensional or bi-dimensional representation.

Starting from the obtained lithostratigraphic model, a numeric model was implemented to simulate the flow in the groundwater bodies.

The software used to reach this aim is GROUNDWATER VISTAS 5, which supplies a graphic interface for MODFLOW, a finite-difference model useful to study the groundwater flow.

The methodology used has allowed to value the entity of the groundwater subflow coming from carbonate structure of the Lattari Mts. and from the volcanic aquifer of Somma-Vesuvius towards the Sarno Plain.

**KEY WORDS:** 3D models, groundwater models, groundwater subflow, Sarno Plain, Campania.

#### INTRODUCTION

The aim of this paper is the construction of a lithostratigraphic 3D model of the alluvial plain of the Sarno river, starting from the stratigraphical and geological knowledge about the area, (Fig. 1). Therefore, the 3D model has been used to reconstruct the geometry of the study area and to determine the hydrodynamic parameters with the aim to define a groundwater flow model and to identify some factors of the water balance (requested by DLgs. 152/2006, title I art. 145).

Peculiarly, the evaluation of the subflow between groundwater bodies of Somma-Vesuvius and the Lattari Mts. and the Sarno Plain was emphasized. The methodology was applied in two sample areas located in the lower part of the aforesaid groundwater bodies, in the Sarno Plain (Fig. 2).

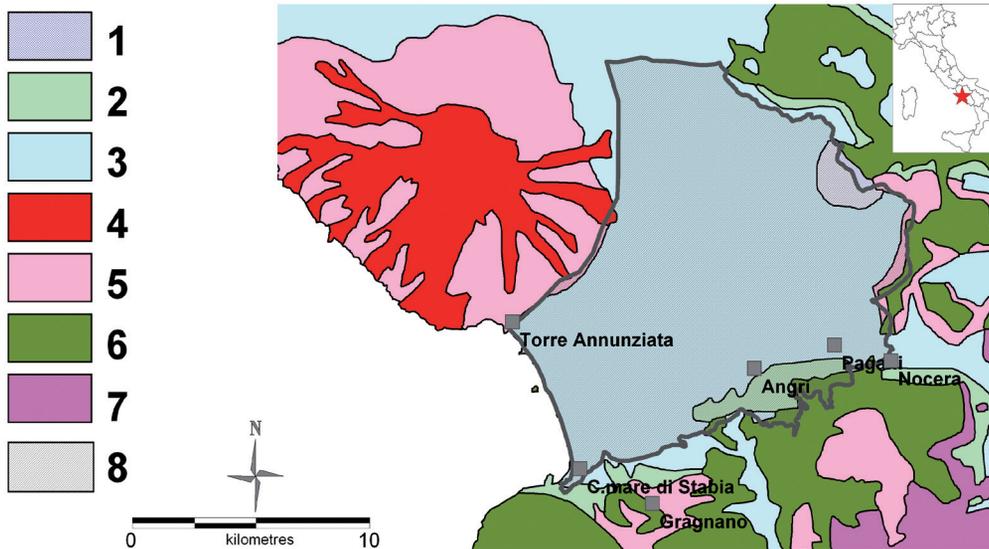


Fig. 1 - Schema litologico della Piana di Sarno, Italia: 1) Travertini; 2) Depositi detritici; 3) Depositi alluvionali e eluviali; 4) Lave; 5) Depositi piroclastici; 6) Calcari; 7) Dolomie; 8) Corpo Idrico Sotterraneo della Piana del Sarno, come delimitato in SOGESID, 2005  
- Lithologic scheme of the Sarno Plain, Italy: 1) Travertine; 2) Debris deposits; 3) Alluvial and eluvial deposits; 4) Lavas; 5) Pyroclastic deposits; 6) Limestone; 7) Dolostone; 8) Groundwater body of the Sarno Plain as recognized in SOGESID, 2005

#### BACKGROUND

Le applicazioni di metodologie specifiche ad alta risoluzione per lo studio del sottosuolo e degli acquiferi hanno conosciuto negli ultimi anni notevoli sviluppi legati alla necessità di definire modelli geo-litologici del territorio, di individuare corpi inquinanti e parametri di subsidenza, di monitorare lo stato e la salute delle falde freatiche, e per supportare varie attività volte alla riqualificazione ambientale (SUGAN *et alii.*, 2003).

Nel passato i dati riguardanti il sottosuolo erano rappresentati esclusivamente su mappe cartacee o attraverso delle sezioni (GALLERINI & DE DONATIS, 2009).

Per un approccio più integrato e per avere una rappresentazione maggiormente realistica del modello del sottosuolo, negli ultimi anni si sono sviluppate delle nuove metodologie basate sull'utilizzo di modelli 3D del sottosuolo. Tali metodologie hanno permesso (ROSENBAUM, 2003; CULSHAW, 2005):

- di migliorare la transizione tra il dato cognitivo e la rappresentazione/manipolazione computazionale dell'informazione geologica;
- di trovare un modo di combinare, modellare e visualizzare le differenze tra una rappresentazione digitale e il fenomeno reale;
- di rispondere all'aumentare della quantità di dati e alla differente origine e qualità delle informazioni;
- di creare una simulazione dei fenomeni legati agli acquiferi, in forma digitale, che sia rappresentativo del reale comportamento.

L'utilizzo dei modelli 3D non solo consente di ottenere un risultato più accurato, ma permette di ricavare nuove informazioni riguardanti l'area indagata, attraverso una ricostruzione stratigrafica completa dell'intera area, con gran dettaglio spaziale.

Gli schemi principali di rappresentazione spaziale sono a matrice voxel (raster 3D) (DEL GRANDE & RONDELLI, 2005) o per sovrapposizione di superfici tridimensionale a maglie regolari o irregolari (*grid*) (LEMON & JONES, 2003), entrambi ricostruiti attraverso algoritmi di interpolazione lineare o di ordine superiore (D'AGNESE *et alii.*, 1997).

#### BACKGROUND

In recent years, the applications for specific high resolution methods for the study of subsurface and the aquifers have experienced significant developments related to the need to define geo-lithological models of the territory, to identify pollutant bodies and parameters of subsidence, to monitor the status and the health of the groundwater, and to support various activities aimed at environmental regeneration (SUGAN *et alii.*, 2003).

In the past, the data concerning the subsurface were represented only on printed maps or through sections (GALLERINI & DE DONATIS, 2009).

For a more integrated approach and to have a more realistic representation of the model of subsurface, new methodologies based on the use of 3D of the subsurface were developed in recent these years. Such methods allowed (ROSENBAUM, 2003; CULSHAW, 2005):

- to improve the transition between the cognitive data and the representation/ computational handling geological information;
- to find a way to combine, model and see differences between a digital representation and the real phenomenon;
- to respond with increasing amount of data and the different origin and quality of information;
- to create a digital simulation of phenomena linked to aquifers, which is representative of the real behaviour.

The use of 3D models not only helps achieve a more accurate result, but allows obtaining new information concerning the area investigated, through a complete stratigraphic reconstruction of the whole region, with great spatial detail.

The main schemes of spatial representation are by voxel matrix (raster 3D) (DEL GRANDE & RONDELLI, 2005) or by overlapping of 3D regular or irregular meshed surfaces (*grid*) (LEMON & JONES, 2003). Both schemes are reconstructed through linear or higher order interpolation algorithms (D'AGNESE *et alii.*, 1997).

Per quanto riguarda la ricostruzione di un modello tridimensionale è possibile utilizzare una metodologia di tipo “*Boundary representation*” o ricorrere all’analisi geostatistica. Nella “*Boundary representation*” il solido è definito attraverso delle superfici che ne individuano le facce esterne (LEMON & JONES, 2003). Nell’analisi geostatistica (GALLERINI & DE DONATIS, 2009) i dati puntuali di sondaggio sono convertiti in un dato volumetrico, attraverso degli algoritmi d’interpolazione (*kriging, distance inverse, nearest neighbor, ecc.*). Il procedimento è basato su operazioni matematiche che, pur non avendo dirette correlazioni con i processi fisici, sono dei buoni strumenti per l’interpretazione di essi.

La rappresentazione voxel è basata unicamente su un’analisi geostatistica dei dati di sondaggio, mentre la rappresentazione attraverso le superfici 3D può servirsi oltre che di questo metodo di creazione, anche della “*Boundary representation*”.

I modelli solidi 3D si realizzano non solo per avere un modello concettuale della stratigrafia dell’area indagata, ma possono essere il modello geologico di base per successive applicazioni riguardanti i modelli di filtrazione del sottosuolo, circolazione delle acque sotterranee (nell’ambito idrogeologico) o per altre applicazioni nei vari ambiti dell’ingegneria, geologia, scienze ambientali.

La loro applicazione più diffusa è quella di fungere da piattaforma per la successiva modellazione del flusso delle acque sotterranee negli acquiferi (WYCISK *et alii.*, 2007). E’ su questo aspetto che si è sviluppato il presente studio, andando a osservare i vantaggi di far precedere la realizzazione del modello tridimensionale, ricostruito con le metodologie precedentemente esposte, all’implementazione del modello di flusso.

I modelli numerici sono il metodo favorito per studiare il movimento delle acque sotterranee e il trasporto di contaminanti (FAGIOLI & AMBROSIO, 1999). Il codice di calcolo più utilizzato per la risoluzione del problema della filtrazione in un mezzo poroso, (in regime transitorio o stazionario), è sicuramente MODFLOW (HARBAUGH, 2005).

#### AREA DI STUDIO

La Piana del Sarno, settore meridionale della Piana Campana, è ubicata tra il versante sud-orientale del complesso vulcanico del Somma - Vesuvio e le zone pedemontane dei Monti di Sarno a Est e dei Monti Lattari a Sud. La Piana del Sarno si presenta come una zona morfologicamente a debole pendenza, tanto che si mantiene ancora a 20 metri di quota nella sua zona più interna, situata alla base dei Monti di Sarno e quindi a circa 17 km dalla costa (FABBROCINO *et alii.*, 2007). Sul lato vesuviano i fianchi del cono vulcanico si raccordano molto dolcemente alla pianura, mentre dal lato orientale e meridionale le pendenze risultano molto più marcate. Il corso del fiume Sarno si sviluppa in posizione centrale all’interno della Piana ed è allungato in direzione NE-SW. La superficie complessiva è di circa 200 km<sup>2</sup> e costituisce un’area ad elevata densità abitativa (circa 1300 ab/km<sup>2</sup>) grazie all’eccezionale fertilità dei suoli che la ricoprono e che da sempre hanno favorito le attività agricole.

I settori in cui è stato approfondito lo studio sono il versante a

As regards to the reconstruction of a three-dimensional model it is possible to use a “*Boundary representation*” methodology or use Geostatistical analysis. In the “*Boundary representation*” methodology, the solid is defined through the surfaces that identify the external faces (LEMON & JONES, 2003). In the Geostatistical analysis (GALLERINI & DE DONATIS, 2009), the boreholes are converted into a volumetric data, through the interpolation algorithms (*kriging, inverse distance, nearest neighbour, etc.*). The procedure is based on mathematical operations that are good tools for the interpretation of physical processes, even if they haven’t direct correlation with them.

The voxel representation is based only on a geostatistical analysis of the boreholes, while the representation through the 3D surface can use, in addition to this method of creation, even “*Boundary representation*”.

The 3D solid models are fulfilled not only to have a conceptual stratigraphic model of the investigated area, but may be the geological basis model for subsequent applications in groundwater flow models, movement of groundwater (in hydrogeological) or for other applications in the various areas of engineering, geology and environmental sciences.

The more widespread application of the models is to serve as a platform for the next modeling of the flow of groundwater in aquifer (WYCISK *et alii.*, 2007). It is with this aspect that this study was developed, thus by observing the advantages to precede the implementation of three-dimensional model, reconstructed with the methods mentioned above, to the implementation of the flow model.

The numerical models are the favoured method to study the movement of groundwater and the transport of contaminants (FAGIOLI & AMBROSIO, 1999). The most used code of calculation to the resolution of the problem of filtration in a porous medium, (in the transitional arrangements or steady-state), is certainly MODFLOW (HARBAUGH, 2005).

#### STUDY AREA

The Sarno plain, the southern sector of Campana Plain, is located between the south-eastern coast of the volcanic complex of Somma-Vesuvius and the piedmont areas of the Sarno Mts. to the East and Lattari Mts. to the south. The Sarno plain is presented as a weak slope morphological zone, so that it still keeps to 20 m of share in its most internal area, located at the base of the Sarno Mts., about 17 km from the coast (FABBROCINO *et alii.*, 2007). On the vesuvian side the flanks of volcanic cone is linking very gently to the plain, while from the eastern and southern slopes they are much more marked. The course of the Sarno River develops in the central position of the plain; it is elongated in the NE-SW direction. The total area is approximately 200 km<sup>2</sup> and it is an area with high population density (approximately 1300 ab/km<sup>2</sup>) thanks to exceptional fertility of the soils which have always favoured the activities.

The study was carried out in depth in these two sectors: the S-E side of the groundwater body of Somma-Vesuvius, which is

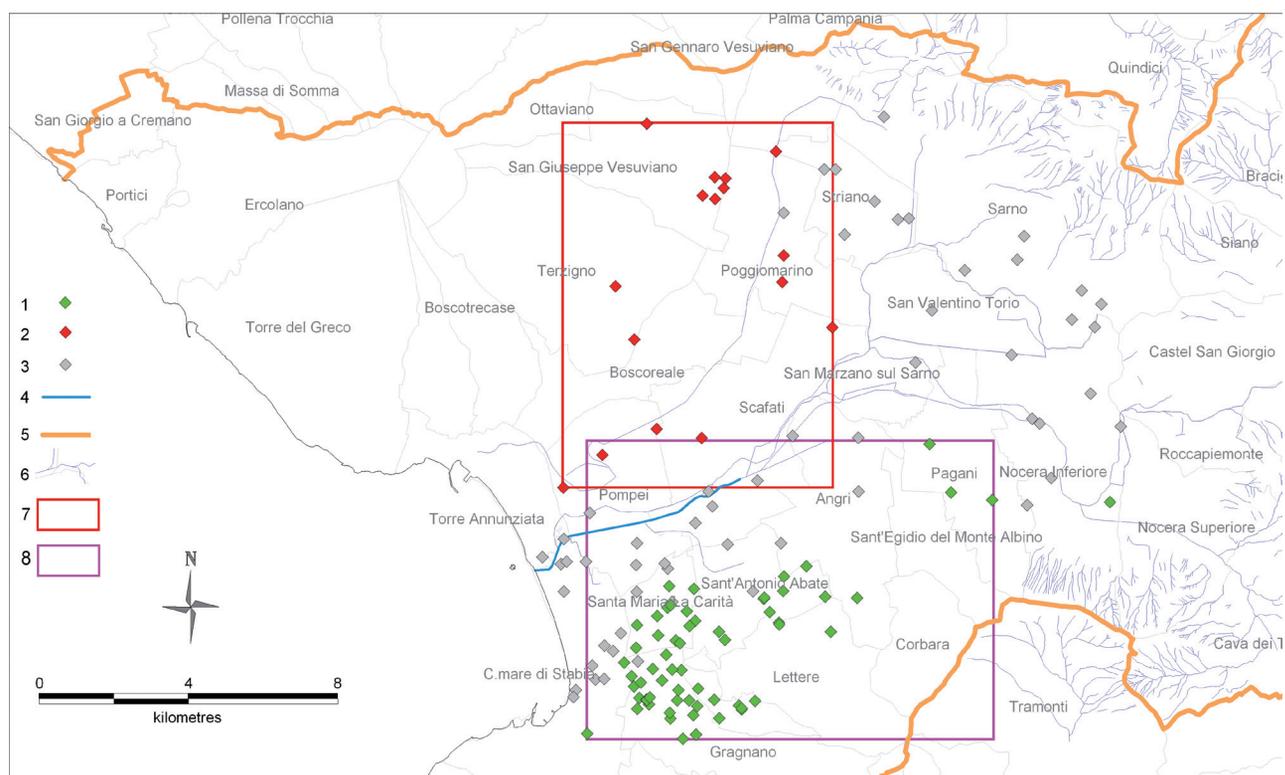


Fig. 2 - Settori di studio con sondaggi: 1) Sondaggi per la modellazione del DML (Dominio pedemontano dei M.ti Lattari); 2) Sondaggi per la modellazione del DV (Dominio Vesuviano); 3) Sondaggi eliminati; 4) Fiume Sarno; 5) Limite del Bacino del Fiume Sarno; 6) Idrografia superficiale; 7) DML; 8) DV  
- Modeled areas and boreholes' location: 1) Boreholes used in DML modelation; 2) Boreholes used in DV modelation; 3) Eliminated boreholes; 4) Sarno River; 5) Limits of Sarno river Watershed; 6) Superficial Hydrography; 7) DML; 8) DV

S-E del corpo idrico sotterraneo del Somma-Vesuvio, che costituisce il collegamento tra il vulcano e la pianura, e il settore pedemontano a N dei rilievi calcarei del corpo idrico sotterraneo dei M.ti Lattari. Tali settori verranno di seguito denominati come “DV” (Dominio Vesuviano) e “DML” (Dominio Pedemontano dei Monti Lattari) (Fig. 2). Si evidenzia in Fig. 2 la scarsità dei sondaggi a disposizione nel settore N-W del DML; di conseguenza nella successiva fase di creazione del modello di flusso, il dominio è stato ridimensionato escludendo tale zona, nella quale ricade il fiume (vedi § succ.).

#### LINEAMENTI IDROGEOLOGICI

La piana del fiume Sarno corrisponde alla porzione più meridionale del graben della Piana Campana ed è da essa separata da uno spartiacque piezometrico (CELICO & ALLOCCA, 2004); è delimitata a NW dal Somma-Vesuvio, a E dal massiccio carbonatico dei Monti di Avella-Partenio-Pizzo d'Alvano e a S/SW dai M.ti Lattari, a SW dal mare (Fig. 1).

La stratigrafia del sottosuolo è caratterizzata da depositi granulometricamente molto eterogenei, di origine prevalentemente alluvionale e piroclastica, questi ultimi sia sciolti che litoidi (“Tufo Grigio Campano”), riferibili all'attività vulcanica del Somma-Vesuvio e dei Campi Flegrei. A questi terreni sono associati depositi di origine ma-

the link between the volcano and the plain, and the north piedmont sector of the limestone reliefs of Lattari Mts. These sectors will be called “DV” (Vesuvius Domain) and “DML” (Piedmont domain of Lattari Mts) (Fig. 2). Fig. 2 highlights the lack of boreholes in the NW sector of the DML; therefore in the groundwater flow model the domain has been reduced (see next §), excluding this sector, where the river flows.

#### HYDROGEOLOGICAL SETTING

The Sarno River Plain is the southern part of the Campanian Plain graben, and it is separated from the rest of the Plain by a piezometric groundwater division (CELICO & ALLOCCA, 2004); it is bounded to the northwest by the Somma-Vesuvius volcano, to the east by the Avella-Partenio-Pizzo d'Alvano Mountains and to the south - southwest by the Lattari Mts. and to the southwest by the Tyrrhenian Sea (Fig. 1).

Stratigraphical data indicate that the subsoil of the Plain is characterized by alluvial and pyroclastic deposits of variable grain size. Pyroclastic deposits derive from the Phlegrean Fields and Vesuvius activity and are in incoherent and welded facies (“Tufo Grigio

rina (prevalentemente sabbiosi), e sequenze a grana fina di ambiente palustre, costituite in prevalenza da limi e torbe. Nell'area costiera sono presenti antiche porzioni di cordoni litorali.

A ridosso dei massicci carbonatici affiorano, lungo il margine nord-orientale al piede del M.te Alvano, placche di travertino, e, lungo il margine sud-orientale, alle pendici dei Monti Lattari, potenti coperture detritiche.

La presenza di un orizzonte tufaceo "semipermeabile" genera una circolazione idrica per falde sovrapposte, di cui una superficiale freatica e una sottoposta al tufo "semiconfinata" (CELICO & PISCOPO, 1995), con flussi di drenanza dal basso verso l'alto. Verso l'area costiera risulta assente l'orizzonte semipermeabile tufaceo e le due falde confluiscono in un'unica falda. La circolazione idrica sotterranea può però essere considerata unica a grande scala, con un deflusso idrico sotterraneo diretto verso SW con recapito ultimo verso il mare.

La falda è alimentata dagli apporti idrici diretti e dai travasi laterali provenienti dalle falde accolte nei rilievi carbonatici (Monti di Avella-Partenio-Pizzo d'Alvano e Monti Lattari) e dalla falda del Somma-Vesuvio (Fig. 1). La falda alimenta il fiume Sarno nel tratto più a monte, mentre nel tratto più schiettamente pianeggiante è il fiume ad alimentare, sia pure in misura molto contenuta, la falda.

## MATERIALI E METODI

Il software ROCKWORKS 2006, utilizzato per la ricostruzione del modello litostratigrafico tridimensionale con analisi geostatistica, è in grado di gestire i dati di sondaggi e di restituire modelli 3D del sottosuolo o rappresentazioni bi-dimensionali della stratigrafia (sezioni, *fences*). Esso dispone di diversi metodi d'interpolazione dei dati di sondaggio per creare modelli 3D del terreno come sovrapposizione di superfici a maglia regolare (*grid-model*) oppure come matrice voxel (*solid-model*).

Per la risoluzione del problema della filtrazione in un mezzo poroso si è utilizzato invece il codice di calcolo MODFLOW (HARBAUGH, 2005), nella sua interfaccia grafica GROUNDWATER VISTAS 5 (RUMBAUGH & RUMBAUGH, 2007). Il metodo di risoluzione delle equazioni descrittive del fenomeno d'infiltrazione in un mezzo poroso, di cui si avvale il codice di calcolo MODFLOW, è di tipo iterativo.

### DATI DI INPUT

La ricostruzione stratigrafica delle aree d'interesse è stata eseguita interpolando i dati delle successioni litologiche fornite da sondaggi geognostici a disposizione (fonte A.d.B. Sarno).

Per entrambe le aree in esame le successioni stratigrafiche, ricavate analizzando i sondaggi geognostici, si presentano molto articolate e varie. Si è quindi resa necessaria una reinterpretazione critica delle stesse alla luce dell'obiettivo del presente lavoro.

La stratigrafia dei sondaggi, infatti, individua dodici differenti unità litologiche:

- orizzonti pedogenizzati attuali o sepolti: suoli - paleosuoli;
- depositi alluvionali di media granulometria: ghiaie e sabbie di conoide o fluviali;
- depositi alluvionali fini: limi e sabbie;

Campano"). The alluvial-pyroclastic sequence incorporates marine deposits (chiefly sands) and palustrine sediments with fine grain size (chiefly silts and peat).

At the foot of the Alvano carbonate mountain to the northeast, there is a travertine shelf outcrop, while at the foot of the Lattari Mts. to the southeast, there are thick debris deposits.

The presence of the semi-pervious tuff layer generates two overlying ground water flows, a shallow unconfined flow and a semi-confined flow under the tuff (CELICO & PISCOPO, 1995), with an upward leakage. Towards the coast the semi-pervious tuff layer disappears and the two ground water flows become one. At a large scale only the ground water flow can be considered one, directed toward SW, flowing towards the sea.

The groundwater body is recharged by rainfall and by groundwater subflow from the Somma-Vesuvius and carbonate (Avella-Partenio-Pizzo d'Alvano Mountains and Lattari Mts.) groundwater bodies (Fig. 1). The relationship between ground water and surface water is different along the Sarno river: river is gaining in the upper part of the basin and is moderately losing to the river mouth.

## MATERIALS AND METHODS

The software ROCKWORKS 2006, used for the reconstruction of the lithostratigraphic 3D model with detailed Geostatistics analysis, is able to manage the boreholes and to return 3D model of the subsurface or two-dimensional representations of stratigraphy (sections, *fences*). It has several interpolation methods of the boreholes to create 3D model of the soil as an overlap of regular meshed surface (*grid-model*) or as voxel matrix (*solid-model*).

The calculation code MODFLOW (HARBAUGH, 2005) was used for the resolution of the problem of filtration in a porous medium, interfaced in GROUNDWATER VISTAS 5 (RUMBAUGH & RUMBAUGH, 2007). The calculation code MODFLOW uses an iterative method for the resolution of the equations descriptive of the phenomena in a porous medium.

### DATA INPUT

The reconstruction of stratigraphic areas of interest was carried out by the stratigraphic data provided by boreholes available (source A.d.B. Sarno). For both areas in examination, stratigraphic successions, obtained by analysing the boreholes, are very articulated and miscellaneous. Therefore a critical reinterpretation of the stratigraphic succession was necessary thus being in the light of the aim of this paper.

Boreholes' stratigraphy identifies 12 different units:

- topsoil or buried pedogenized horizons: soil - ancient soil;
- alluvial deposits of medium grain size: alluvial fan or fluvial gravel and sand;
- fine alluvial deposits: silt and sand;
- pyroclastic deposits: cinerite and volcanic sand;

- piroclastiti sciolte fini: cineriti e sabbie vulcaniche;
- piroclastiti sciolte di media granulometria: pomici e sabbie;
- tufo grigio litoide (ignimbrite campana);
- depositi sabbioso-ghiaiosi marini di spiaggia e duna;
- depositi di versante cementati: conglomerati e breccie carbonatiche cementati;
- depositi lagunari e palustri: torba e argilla;
- substrato roccioso: calcari e dolomie;
- lave;
- depositi di versante: detrito calcareo.

Si sono quindi operate delle semplificazioni privilegiando, nell'ottica di interpretare le caratteristiche idrogeologiche dei depositi, la differenziazione granulometrica piuttosto che la loro origine e natura. Inoltre spesso i sedimenti formati in un ambiente sono stati successivamente rimaneggiati in un altro ambiente (es. piroclastiti rimaneggiate in ambiente alluvionale).

Sono quindi stati accorpati limi e sabbie con le cineriti e sabbie vulcaniche a formare una macrocategoria di piroclastiti e alluvioni a grana fine. Analogamente ghiaie e sabbie di conoide o fluviali sono state unite con le pomici e sabbie vulcaniche a creare una macrocategoria costituita da piroclastiti e alluvioni a grana grossa. Sempre seguendo lo stesso criterio anche le sabbie e ghiaie marine, che si presentano sempre con spessori esigui, sono state inglobate all'interno delle suddette macrocategorie.

Sulla base di queste rielaborazioni si sono ridefinite le successioni delle colonne stratigrafiche ed è stato possibile individuare le successioni stratigrafiche "tipo" per i due domini considerati (Fig. 3).

A questa fase di elaborazione è seguita una fase di selezione dei sondaggi sulla base della loro attendibilità.

Nel DV i 15 sondaggi a disposizione sono sparsi in un'area di circa 70 km<sup>2</sup> e si attestano a una profondità variabile tra i 16 e i 90 metri dal piano campagna (dato più frequente 30 m). Il loro numero appare esiguo in relazione alla dimensione dell'area e la loro distribuzione si presenta

- pyroclastic deposits of medium grain size: pumice and sand;
- welded grey tuff (ignimbrite campana);
- sand-and-gravel beach and dune deposits;
- cemented debris deposits: calcareous conglomerate and cemented breccia;
- lacustrine-palustrine deposits: peat and clay;
- bedrock: limestone and dolomite;
- lavas;
- calcareous debris deposits.

Thus simplifications are made giving priority to the differentiation by particle size rather than by their origin and nature, in order to put emphasis on the hydrogeological characteristics of deposits.

Often even the sediments were formed in an environment and were subsequently reworked in another environment (e.g. pyroclastic modernised in alluvial environment).

Therefore silt and sand were combined with the cineriti and volcanic sands to form a macro-class and flooding to fine texture. Similarly gravel and sand derived from alluvial cone or the river were united with the pumice and volcanic sands to create a mains formed by floods like and coarse. Following the same criterion also sand and gravel of marine origin, which always have small thicknesses, were incorporated within the above macro-class.

On the basis of these elaborations the succession of stratigraphic columns were redefined and it was possible to identify the typical stratigraphic succession for the two domains considered (Fig. 3). To this stage of processing a selection phase of boreholes on the basis of their reliability is followed.

In the DV the 15 available boreholes are scattered in an area of approximately 70 km<sup>2</sup> and attest to a depth variable between 16 and 90 m below the ground level (most frequent data 30 m). Their number is small in relation to the size of the area concerned, which is about 70 km<sup>2</sup>. Furthermore their distribution was not suitable to the interpolation, being very concentrated in the area of San

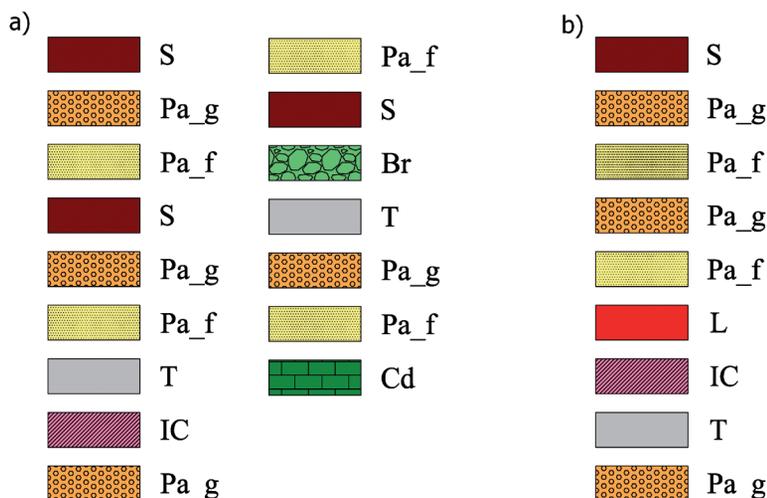


Fig. 3 - Stratigrafia tipo, a) DML; b) DV: S = Suolo e paleosuolo; Pa\_g = Depositi piroclastici, marini e alluvionali a media granulometria; Pa\_f = Depositi piroclastici, marini e alluvionali a granulometria fine; T = Torba e argilla; IC = Ignimbrite campana; Br = Conglomerati e breccie carbonatiche cementate, detrito calcareo; Cd = Calcari e dolomie; L = Lave  
- Typical stratigraphy, (a) DML, (b) DV: S = Soil and ancient soil; Pa\_g = Pyroclastic, marine and alluvial deposits of medium grain size; Pa\_f = Fine pyroclastic, marine and alluvial deposits; T = Peat and clay; IC = (Welded grey tuff (Ignimbrite campana); Br = Calcareous conglomerate and cemented breccia, calcareous debris deposits; Cd = Limestone and dolostone; L = Lavas

poco idonea all'interpolazione, essendo molto addensati nella zona di San Giuseppe Vesuviano e diradati nella restante area. Malgrado ciò la semplicità della stratigrafia "tipo", che è costituita solo da 6 differenti litotipi, rende agevole la modellazione. I depositi piroclastico-alluvionali si presentano con discreta variabilità spaziale, sovente in "eteropia" con gli altri sedimenti. Il banco delle lave e quello dell'ignimbrite campana, che costituiscono "livelli guida" per l'area, si rinvengono solo in alcune colonne stratigrafiche, ma ciò si deve ascrivere alla scarsa profondità d'indagine dei sondaggi. Livelli di torba si ritrovano solo in un sondaggio nel territorio di Pompei, con uno spessore di 11 m.

Nel DML i sondaggi a disposizione sono 53, con una profondità di indagine variabile da 12 a 190 metri, ma che spesso si aggira attorno ai 20-30 metri. Tali sondaggi sono stati realizzati a quote che variano da un minimo di 8 m s.l.m. a un massimo di 232 m s.l.m., con una maggiore concentrazione nella zona pianeggiante (al di sotto dei 100 m s.l.m.).

La loro localizzazione areale risulta abbastanza favorevole alla creazione di un modello sia per quanto attiene l'omogeneità di distribuzione sia per quanto riguarda il numero di sondaggi disponibili su un territorio di circa 86 km<sup>2</sup>.

La stratigrafia "tipo" (Fig. 3), tuttavia, si presenta molto articolata e ricca di intercalazioni nonostante le già operate semplificazioni. Questa stratigrafia presenta al di sotto e al di sopra dell'ignimbrite campana, che rappresenta il "livello guida" per l'area, due complessi deposizionali, uno più recente e uno più antico, entrambi costituiti da litotipi vulcanico-alluvionali-marini. I sondaggi presentano una forte variabilità areale per quanto riguarda i depositi piroclastico-alluvionali. L'ignimbrite campana si rinviene nella quasi totalità dei sondaggi, presentandosi a limitate profondità dal p.c. (dai 3 ai 40 metri).

Lenti di torba, dello spessore di qualche metro (mediamente 5 m.), compaiono in alcuni sondaggi in località S. Antonio Abate e in un sondaggio in località Pagani. Nei sondaggi più profondi e in quelli più prossimi ai rilievi si ritrovano detriti e breccie calcarei con spessori che variano da 1 a 40 metri. Il *bedrock* calcareo è intercettato solo da alcuni sondaggi realizzati sui rilievi dei Lattari o molto prossimi ad essi. Nei sondaggi realizzati nella zona pianeggiante non si riscontra il substrato calcareo a causa del forte rigetto della faglia bordiera meridionale del graben della Piana del Sarno.

I dati di input necessari per la modellazione del flusso sotterraneo, come le proprietà idrauliche, la ricarica, il prelievo da pozzi, le condizioni al contorno, sono stati attinti da differenti fonti (specificate di volta in volta nel capitolo della modellazione idrodinamica).

#### MODELLAZIONE LITOSTRATIGRAFICA DELL'ACQUIFERO

La procedura utilizzata per realizzare i modelli del sottosuolo è la stessa per entrambi i domini ed è una procedura più o meno standard (GALLERINI & DE DONATIS, 2009) per la realizzazione dei modelli geo-litologici.

I dati sono stati organizzati in un database, importati all'interno del software ROCKWORKS 2006 ed elaborati mediante algoritmi d'interpolazione, ricostruendo in tal modo un *grid-model* per ciascun dominio.

Giuseppe Observatory and dispersed in the rest of the area. Despite this, the simplicity of the typical stratigraphy, which is composed only 6 different concerning lithotypes, facilitates the modeling. The pyroclastic alluvia-deposits are presented with discrete variability space, often in heteropic with other sediments. The banks of lavas and that of ignimbrite campana constitute "guide levels" for the area. They are present only in some stratigraphic columns, but that must lie to the low depth investigation of boreholes. There is only one level of peat with a thickness of 11 m, found in a borehole located in Pompeii.

In the DML the available boreholes are 53, with a depth variable from 12 to 190 m, often around 20-30 m. These boreholes were made to a minimum elevation of 8 m a.s.l. and to a maximum quota of 232 m a.s.l., with greater concentration in plain (under 100 m a.s.l.).

The boreholes localization is suitable to modeling because of their homogeneous distribution and the amount of available boreholes on an area of about 86 km<sup>2</sup>.

However the typical stratigraphy (Fig. 3) is very articulate and rich of intercalations, despite the simplifications. This stratigraphy presents below and above ignimbrite campana, which represents the "guide level" for the area, two depositional complexes, a newer one and one more ancient, both consisting of volcanic-alluvial-marine deposits. The boreholes have a high variability as regards to the pyroclastic deposits-alluvial. The ignimbrite campana was found in almost all the boreholes, to a limited depth from b.g.l. (3 m to 40 m).

Lenses of peat with, thickness of few meters (the average 5 m), are displayed in some boreholes at S. Antonio Abate and Pagani. In the deeper boreholes and nearest a thickness from 1 to 40 m were found. The *bedrock* limestone was intercepted by some boreholes carried out on Mts. Lattari or very close to them. The boreholes located in the plain do not intercept the substrate calcareous because of a strong rejection of the crust of Southern bordiera of Sarno Graben.

Input data necessary for the modeling of underground flow, as the hydraulic properties, recharging, the pumping from wells, the boundary conditions, were taken from different sources (specified in the "Groundwater flow modeling" chapter).

#### LITHOSTRATIGRAPHIC MODELING OF THE AQUIFER SYSTEM

The procedure used to build models of the subsurface is the same for both domains and is a more or less standard procedure (GALLERINI & DE DONATIS, 2009) for the implementation of the geological models.

The data were organized in a database, imported within the software ROCKWORKS 2006 and developed by interpolation algorithms, reconstructing a *grid-model* for each domain. Algorithm chosen for

L'algoritmo scelto per la modellazione è quello della distanza inversa, che assegna ad ogni nodo della griglia un valore stimato come media pesata dei punti di controllo circostanti. Una modellazione effettuata con il kriging ha fornito risultati pressoché equivalenti. La risoluzione di entrambi i modelli è 100 m (dX) • 100 m (dY) • 1 m (dZ).

Nella realizzazione dei modelli 3D si è tenuto conto della reale superficie topografica rappresentata dal DTM con risoluzione 5 m, successivamente adattato alla risoluzione orizzontale del modello.

Lo studio preliminare della stratigrafia delle aree di studio ha permesso di esaminare criticamente i risultati ottenuti e di operare una calibrazione del modello mediante successivi accorgimenti in modo tale da avvicinarsi il più possibile al modello reale. Tra le operazioni effettuate:

- eliminazione dei sondaggi non attendibili;
- scelta di un criterio di correlazione tra le unità stratigrafiche;
- aggiunta di sondaggi fittizi in base alla litologia affiorante e studi di settore (BELLUCCI, 1998; APRILE & TOCCACELI, 2002), per una migliore modellazione nelle zone montuose.

Realizzato il *grid-model*, è stato possibile ottenere rappresentazioni tridimensionali (Figg. 4a e 4b) e bidimensionali (sezioni), carte degli spessori (isopache) e della morfologia (isolinee) delle unità stratigrafiche. In questo modo è stato possibile effettuare dei raffronti di verifica con quanto noto dalla letteratura, con esito positivo.

Inoltre è stato possibile ricostruire, con fedeltà, l'andamento del "letto" e del "tetto" dell'ignimbrite campana, per tutta la Piana, e di ottenere in tal modo una carta degli spessori (Fig. 5) per questa unità stratigrafica che riveste un ruolo molto importante, costituendo a luoghi una separazione tra le falde idriche sovrapposte.

Con lo stesso set di dati e con la stessa risoluzione orizzontale del *grid-model* ma con risoluzione verticale dZ=3m, si è inoltre realizzato un *solid-model* per entrambi i domini. Per il DV si è ottenuto un modello voxel costituito da 75(X) • 99 (Y) • 76(Z) nodi; per il DML un modello voxel costituito da 113(X) • 81(Y) • 468(Z) nodi.

modeling is inverse distance, which assigns each node of the grid a value estimated to be the average weighing of the control points around. One modeling carried out with the Kriging method has provided results almost equivalent. The resolution of both models is 100 m (dX) • 100 m (dY) • 1 m (dZ).

The real topographical surface was represented in the 3D model by DTM with resolution 5 m, subsequently adapted in the horizontal resolution of the model.

The preliminary study of stratigraphy of the areas enabled us to critically examine the results obtained and to operate a calibration of the model by subsequent measures so as to get as close as possible to the real model. Between these measures:

- elimination of unreliable boreholes,
- choice of a criterion of correlation between stratigraphic unit,
- addition of fictitious boreholes based on outcropping lithology and specialized studies (BELLUCCI, 1998; APRILE & TOCCACELI, 2002), for better modeling in the mountainous areas.

By the *grid-model*, it was possible to obtain three and two-dimensional representations (Figs. 4a and 4b) (sections), charts of thicknesses (isopach maps) and the morphology (map) of the stratigraphy units. Therefore it is possible to make comparisons with the knowledge from the literature, with a positive result.

It was also possible to reconstruct, with fidelity, the evolution of "top" and "bottom" of ignimbrite campana, for all the plain, and to obtain in this way an isopach map (Fig. 5) for this stratigraphic unit that has a very important role, posing a separation between the overlapped aquifers.

With the same set of data and with the same horizontal resolution of *grid-model* but with vertical resolution dZ=3 m, a *solid-model* for both the domains is also created. For the DV a voxel model made up of 75 (X) • 99 (Y) • 76 (Z) nodes was obtained; for the DML a model Voxel made up of 113 (X) • 81 (Y) • 468 (Z) nodes.

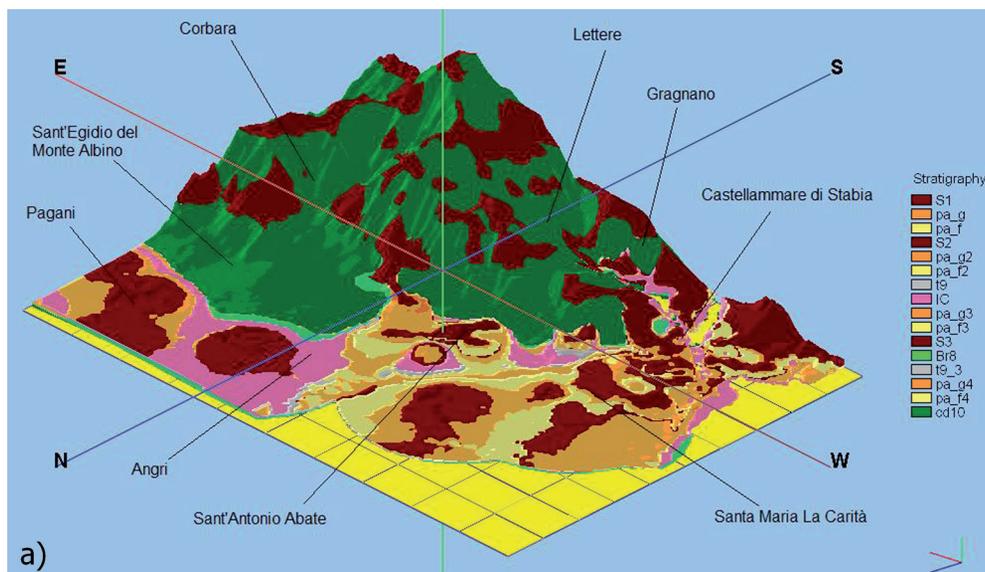


Fig. 4a - Elaborazione 3D del DML  
- 3D representation of the DML model

3D LITHOSTRATIGRAPHIC MODEL AS SUPPORT FOR DEVELOPMENT OF A GROUNDWATER FLOW MODEL:  
THE SARNO PLAIN (ITALY) CASE STUDY

Fig. 4b - Elaborazione 3D del DV  
- 3D representation of the DV  
model

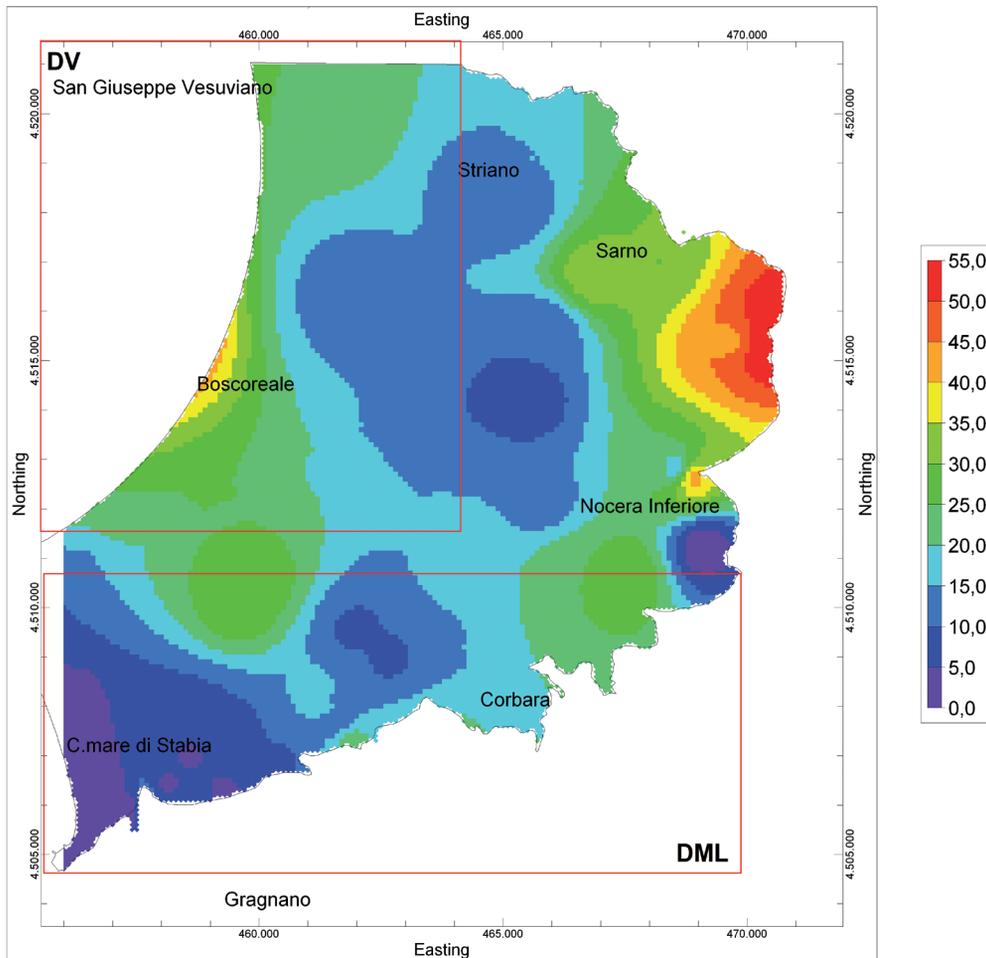
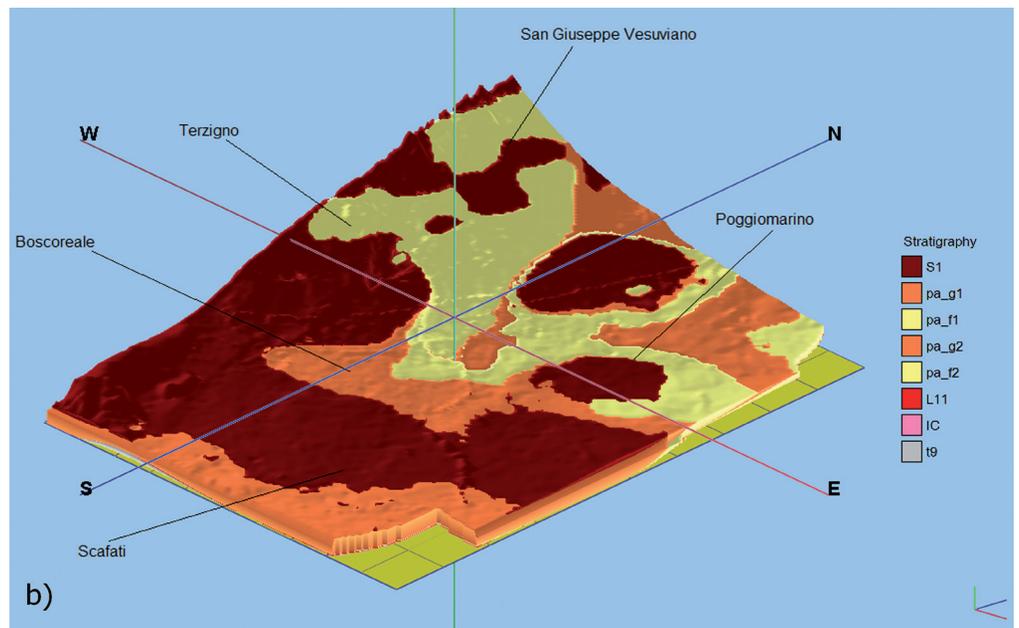


Fig. 5 - Carta delle Isopache dell'ignimbrite campana, in evidenza i due domini considerati  
- "Ignimbrite campana" Isopach map. Highlighted the two considered domains

### MODELLO DI FLUSSO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

I risultati della modellazione litostratigrafica sono stati utilizzati per costruire il modello di flusso delle acque sotterranee.

La creazione di un modello prevede le seguenti fasi (ANDERSON, 2002):

1. Definizione della geometria del modello;
2. Assegnazione delle condizioni al contorno;
3. Assegnazione dei parametri idrodinamici;
4. Assegnazione degli stress esterni;
5. Scelta del motore di soluzione.

Essendo tale studio prevalentemente incentrato sulla fase di costruzione del modello fisico, le prime tre fasi, comprendenti la definizione della geometria del modello e l'assegnazione dei parametri idrodinamici, sono state sviluppate accuratamente e ottimizzate dall'utilizzo dei modelli litostratigrafici 3D precedentemente ricostruiti con ROCKWORKS 2006. Di contro sono state effettuate alcune semplificazioni nelle altre fasi, in particolar modo nell'attribuzione degli stress esterni: ricarica meteorica, evapotraspirazione, drenaggi, emungimenti.

La costruzione del modello fisico è stata realizzata utilizzando il *solid-model* litostratigrafico, che, per entrambe le aree di studio, è stato importato in GROUNDWATER VISTAS 5 per *layers* paralleli alla superficie topografica, definendo la geometria di base e la litozonazione del modello idrogeologico.

La discretizzazione orizzontale risulta essere a maglie quadrate 100m • 100m per entrambi i domini, mentre la discretizzazione verticale è stata operata per *layers* paralleli di 3m ciascuno. Pertanto il DV è discretizzato in 90 righe, 56 colonne e 13 *layers*; il DML è discretizzato in 42 righe, 92 colonne e 12 *layers*.

La creazione del modello geometrico è stata effettuata mediante importazione di *grid* paralleli alla superficie topografica, estratti dal *solid-model* grazie agli strumenti forniti dall'applicativo. Tali *grid*, recanti per ogni cella l'informazione relativa alla quota, sono stati importati a definire *Top* e *Bottom* di ciascun *layer*.

Successivamente si è compiuta l'operazione di litozonazione, che assegna ad ogni cella attiva del dominio l'informazione relativa all'unità stratigrafica. Quest'operazione è stata effettuata estraendo dal *solid-model*, e successivamente importando in MODFLOW, *grid* recanti informazioni sulla litozonazione per quelle superfici parallele al DTM precedentemente importate nel modello a definire la geometria.

Questo procedimento ha permesso di ottenere una caratterizzazione litostratigrafica del modello molto più accurata di quella che si ottiene ricostruendo il modello direttamente nell'ambiente MODFLOW. In seguito a ciascuna unità litostratigrafica sono state attribuite le proprietà idrodinamiche. Lo studio è stato condotto allo stato stazionario, di conseguenza è sufficiente attribuire a ciascuna cella i valori della conducibilità idraulica  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ . Tali valori (Tab. 1) sono stati desunti da numerosi studi effettuati su litotipi analoghi e sui litotipi dell'area (GRIFFITHS, 1967; CASTANY, 1985; CELICO, 1988; DUCCI & ONORATI, 1993; ESAKI & JIANG, 1999; HARVEY, 2005; EVANGELISTA *et alii*, 2006; DEL GAUDIO & VALLARIO, 2007). E' stata posta l'ipotesi semplificativa d'isotropia globale. Inoltre, vista l'esiguità e in taluni casi la non continuità della falda idrica freatica superficiale, si è considerata nella modellazione una falda unica.

### GROUNDWATER FLOW MODELING

The lithostratigraphic model results were used to build the groundwater flow model.

The model creation consists of the following steps (ANDERSON, 2002):

1. Building geometry;
2. Setting of boundary conditions;
3. Setting of hydrodynamic parameters;
4. Setting of external stresses;
5. Choice of solver.

Focusing this study on the physical model construction, the first three steps, including the geometry of the model and the choice of the hydrodynamic parameters, were accurately developed and optimized, by the use of the 3D model previously constructed by ROCKWORKS 2006. On the contrary, the other steps were simplified, especially regarding the external stresses: recharge, evapotranspiration, drainage, pumping.

The construction of the physical model was carried out using the lithostratigraphic *solid-model*, which for both of the study areas, was imported in GROUNDWATER VISTAS 5 by *layers* parallel to topographic surface, defining the basic geometry and the lithozonation of the hydrogeologic model. The horizontal discretization consists of squared cells 100 m • 100 m for both of the domains, the vertical discretization was done by parallel *layers* of 3 m each. So the DV results discretized into 90 rows, 56 columns and 13 *layers*; the DML results discretized into 42 rows, 92 columns and 12 *layers*.

The creation of the geometrical model was carried out by importing *grids* parallel to the topographic surface, extracted from the *solid-model* using the tools of the software. These *grid*, containing for each cell the elevation information, were imported to define the *Top* and the *Bottom* of each *layer*.

Afterwards, the lithozonation process was completed, assigning to each active cell of the domain the information about the stratigraphic unit. It was carried out by extracting from Rockworks 2006 *solid-model* and then by importing in MODFLOW *grids* with information about lithozonation for those surfaces parallel to the DTM, previously imported in the model to define the geometry. This approach allowed obtaining a more accurate lithostratigraphic characterization than the one obtained by building the model directly in MODFLOW. Successively, hydrodynamic properties were assigned to each lithostratigraphic unit. The study was conducted in steady-state condition, so it's enough to assign to each cell the values of hydraulic conductivity  $K_x$ ,  $K_y$  e  $K_z$ . These values (Tab. 1) were gathered from several studies on similar lithotypes and on studies of the area (GRIFFITHS, 1967; CASTANY, 1985; CELICO, 1988; DUCCI & ONORATI, 1993; ESAKI & JIANG, 1999; HARVEY, 2005; EVANGELISTA *et alii*, 2006; DEL GAUDIO & VALLARIO, 2007). The simplifying hypothesis of global isotropy was assumed. Moreover, in the model an unique groundwater body was contemplated, because of the thinness and the discontinuity of the shallow aquifer.

**3D LITHOSTRATIGRAPHIC MODEL AS SUPPORT FOR DEVELOPMENT OF A GROUNDWATER FLOW MODEL: THE SARNO PLAIN (ITALY) CASE STUDY**

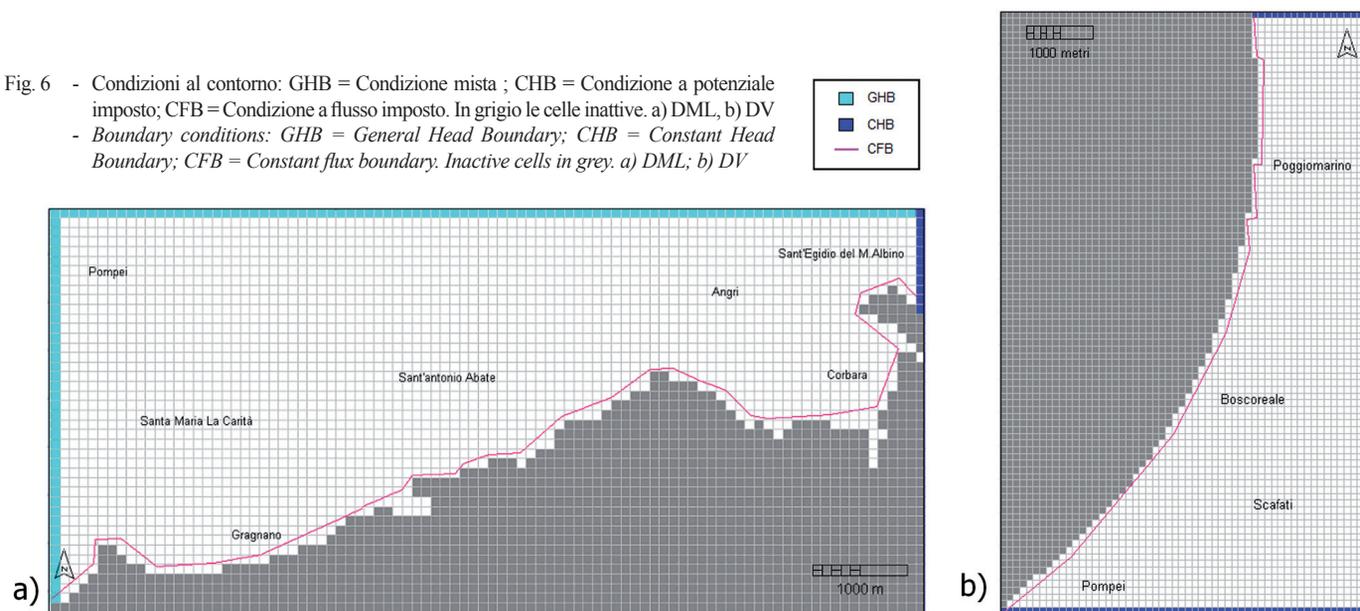
DV	Kx=ky=kz (m/s)	DML	Kx=ky=kz (m/s)
S	2.50E-05	S	2.50E-05
Pa_g	1.00E-03	Pa_g	1.00E-03
Pa_f	1.00E-05	Pa_f	1.00E-05
L	5.00E-05	Br	1.00E-03
IC	1.50E-06	IC	1.50E-06
T	1.00E-08	T	1.00E-08
Pa_g base	1.00E-03	CD	1.00E-03
		CD bedrock	Kx=ky=1.00E-03 Kz=1.00E-04

Tab. 1 - Valori di conducibilità idraulica assegnati ai litotipi dei due domini (desunti da Griffiths, 1967; Castany, 1985; Celico, 1988; Ducci & Onorati, 1993; Esaki & Jiang, 1999; Harvey, 2005; Evangelista *et alii*, 2006; Del Gaudio & Vallario, 2007). S = suoli - paleosuoli; Pa\_g = depositi alluvionali e/o piroclastici di granulometria medio-grossolana; Pa\_f = depositi alluvionali e/o piroclastici fini; Br = brecce - conglomerati; L = lave; IC = tufi grigi (Ignimbrite Campana); T = torbe e argille; CD = calcari e dolomie

- Conductivity values assigned to the lithology of the two domains (derived by Griffiths, 1967; Castany, 1985; Celico, 1988; Ducci & Onorati, 1993; Esaki & Jiang, 1999; Harvey, 2005; Evangelista *et alii*, 2006; Del Gaudio & Vallario, 2007). S = soils - paleosoils; Pa\_g = alluvial and/or pyroclastic deposits of medium to coarse-grained; Pa\_f = alluvial and/or pyroclastic fine grained deposits; Br = breccias - conglomerates; L =;lavas; IC= grey tuffs (Ignimbrite Campana); T = peats and clays; CD = limestones and dolostones

Fig. 6 - Condizioni al contorno: GHB = Condizione mista ; CHB = Condizione a potenziale imposto; CFB = Condizione a flusso imposto. In grigio le celle inattive. a) DML, b) DV

- Boundary conditions: GHB = General Head Boundary; CHB = Constant Head Boundary; CFB = Constant flux boundary. Inactive cells in grey. a) DML; b) DV



I due modelli sono stati confinati inferiormente con un layer cui sono state assegnate condizioni di flusso nullo (no-flow) a simulare un substrato impermeabile la cui localizzazione è stata desunta non dai sondaggi, poco profondi per intercettarlo, ma da quanto noto in letteratura (CASSANO & LA TORRE, 1987; ENEA, 2002).

Le condizioni al contorno sono a *potenziale imposto*, a *flusso imposto* o *miste*; nonché a *flusso nullo* per delimitare l'area attiva del modello e definire il fondo impermeabile, come appena illustrato.

La condizione a potenziale imposto (*constant-head*) è stata attribuita assegnando i valori del carico idraulico ai limiti Nord, Sud ed Est nel DV e soltanto al limite Est nel DML (Fig. 6). Tali valori sono stati desunti dalle carte piezometriche contenute nel Piano Stralcio di Tutela delle Acque (AUTORITÀ DI BACINO DEL SARNO, 2004; SOGESID, 2005).

La condizione mista (*head-dependent flow boundary*) è stata adottata per il bordo Nord e il bordo Ovest del DML, che risultano rispettivamente subparalleli all'asta fluviale del Sarno e alla linea di costa,

The two models were confined at the bottom by a layer, which was assigned no-flow conditions to simulate an impermeable bedrock; the bedrock location was obtained not from the boreholes, that are not so deep to intercept it, but from the available literature (CASANO & LA TORRE, 1987; ENEA, 2002).

Boundary conditions include specified head boundaries, specified flow boundaries or head dependent flow boundaries, that is a mix of the first two; also there is the no-flow condition used to confine the active area of the model and define the impermeable bedrock, as just described.

The specified head boundary condition (*constant head*) was used assigning the values of hydraulic heads to North, South and East boundaries in the DV and only to the East boundary in the DML (Fig. 6). These values were taken from piezometric maps included in the Piano Stralcio di Tutela delle Acque (AUTORITÀ DI BACINO DEL SARNO, 2004; SOGESID, 2005).

che sono però esterni all'area attiva (Fig. 6). Si è optato per questo tipo di condizione al bordo al fine di dare comunque un peso adeguato all'influenza che mare e fiume hanno sull'assetto piezometrico. Per tale scopo sono stati utilizzati i valori desunti dalle carte piezometriche contenute nel Piano Stralcio di Tutela delle Acque (AUTORITÀ DI BACINO DEL SARNO, 2004; SOGESID, 2005).

La condizione di flusso imposto (*specified flow boundary*) è stata utilizzata imponendo flusso nullo nelle zone inattive e sul bordo inferiore di entrambi i modelli per simulare la presenza di uno strato impermeabile. Infine la condizione di flusso imposto è stata utilizzata in entrambi i domini per simulare il flusso idrico entrante nella zona attiva del modello proveniente dai corpi idrici di alimentazione (Fig. 6). Questa grandezza è stata oggetto di calibrazione del modello al fine di trovare il valore più corretto.

Tra gli stress esterni che influiscono sul comportamento del sistema idrogeologico, si annoverano: ricarica meteorica, evapotraspirazione, emungimenti, drenaggi e ricariche artificiali. Nel presente studio il valore di ricarica diretta è pari al valore d'infiltrazione efficace (ricarica meteorica al netto dell'evapotraspirazione, moltiplicata per il Coefficiente d'infiltrazione potenziale, C.I.P.) ed è stato assegnato sulla base delle stime effettuate da DUCCI (2008); il dato relativo ai prelievi dai pozzi di emungimento è stato desunto da Celico (1995) e da SOGESID (2005).

Tra i metodi d'iterazione (*solver*) di cui si avvale il codice di calcolo MODFLOW si è scelto il PCG "Preconditioned Conjugate-Gradient Solver" perché si è dimostrato rapidamente convergente, oltre che essere raccomandato nell'utilizzo del software GROUNDWATER VISTAS 5.

Dopo aver inserito i parametri necessari, relativi anche alle condizioni di confinamento (il primo *layer* è stato definito come *non confinato* e l'ultimo *layer* come *confinato*; mentre per i restanti *layers* si è lasciata valutare al software la condizione definendoli *confinato/non confinato*) e di risaturazione delle celle (si è considerata possibile la risaturazione da tutte le celle circostanti), il modello implementato è stato fatto girare in regime stazionario.

Durante la fase di simulazione è possibile verificare la validità del modello, ossia che esso riproduca adeguatamente il sistema idrogeologico, tramite lo strumento di calibrazione.

### Calibrazione

L'operazione di calibrazione è stata eseguita comparando i valori delle quote piezometriche calcolati con quelli osservati su 23 punti nel DV e su 33 punti nel DML (AUTORITÀ DI BACINO DEL SARNO, 2004; CELICO, 1995) (Fig. 7).

Nel caso in esame l'unico oggetto di calibrazione è stato il valore del travaso dai corpi idrici di alimentazione, il quale è stato variato in un processo iterativo di tipo trial & error (SPITZ & MORENO, 1996; ANDERSON, 2002), finché non si è ottenuto un grafico di calibrazione soddisfacente (Fig. 8).

In tale fase l'ipotesi semplificativa di certezza degli altri parametri è lecita poiché l'uso del software ROCKWORKS 2006 ha agevolato la litozonazione, individuando con grande grado di precisione la posi-

The head dependent flow boundary condition was used for the North and West boundaries of the DML, that are respectively subparallel to the Sarno river and to the coastal line, but that are however outside to the active area. This boundary condition was adopted to stress the river and sea influence on the piezometric pattern (Fig. 6). The useful values were taken from the piezometric maps of the Piano Stralcio di Tutela delle Acque (AUTORITÀ DI BACINO DEL SARNO, 2004; SOGESID, 2005).

The specified flow boundary condition was assigned fixing no-flow in the inactive areas and in the bottom layer of both models to simulate the presence of an impermeable bedrock. Moreover, in both of the domains was used to simulate a subflow in the active area of the model coming from other groundwater bodies (Fig. 6). The subflow rate was object of calibration of the model in order to find the most appropriate value.

Among the external stresses which affect the behavior of the hydrological system, there are: rainfall recharge, evapotranspiration, pumpings, drains and artificial recharge. In this study the value of the direct recharge is the same of the effective infiltration (the difference between rainfall recharge and evapotranspiration, multiplied by the potential infiltration coefficient) and it was assigned on the basis of the estimates made by DUCCI (2008); pumping well data was taken from Celico (1995) and SOGESID (2005). Among the iteration methods (*solver*) used by MODFLOW, the PCG "Preconditioned Conjugate-Gradient Solver" was chosen because it showed fast convergence, in addition to being recommended in the use of the software GROUNDWATER VISTAS 5.

After entering the necessary parameters, relating also to the conditions of confinement (first layer was defined as unconfined and last layer as confined; while for the other layers it is left to software to assess the condition, defining the layers as confined/unconfined) and conditions of cell resaturation (resaturation from all surrounding cells was considered possible), the model was run in steady-state condition.

During the simulation you can check the validity of the model, namely that it adequately reproduces the hydrogeological system, by using the model calibration tool.

### Calibration

The process of calibration was performed by comparing the values of calculated groundwater level with those observed in 23 points in the DV and 33 points in the DML (AUTORITÀ DI BACINO DEL SARNO, 2004; CELICO, 1995) (Fig. 7).

In this case the only object of calibration was the value of the subflow from water bodies, which was modified in an iterative process of trial and error type (SPITZ & MORENO, 1996; ANDERSON, 2002), until we obtained a satisfactory calibration graph (Fig. 8). In this phase, the simplifying assumption of certainty of the other parameters is possible, since the use of software ROCKWORKS 2006 facilitated the lithozonation, identifying with great accuracy the location and extent of each stratigraphic unit, and optimizing the allocation

**3D LITHOSTRATIGRAPHIC MODELAS SUPPORT FOR DEVELOPMENT OF A GROUNDWATER FLOW MODEL:  
THE SARNO PLAIN (ITALY) CASE STUDY**

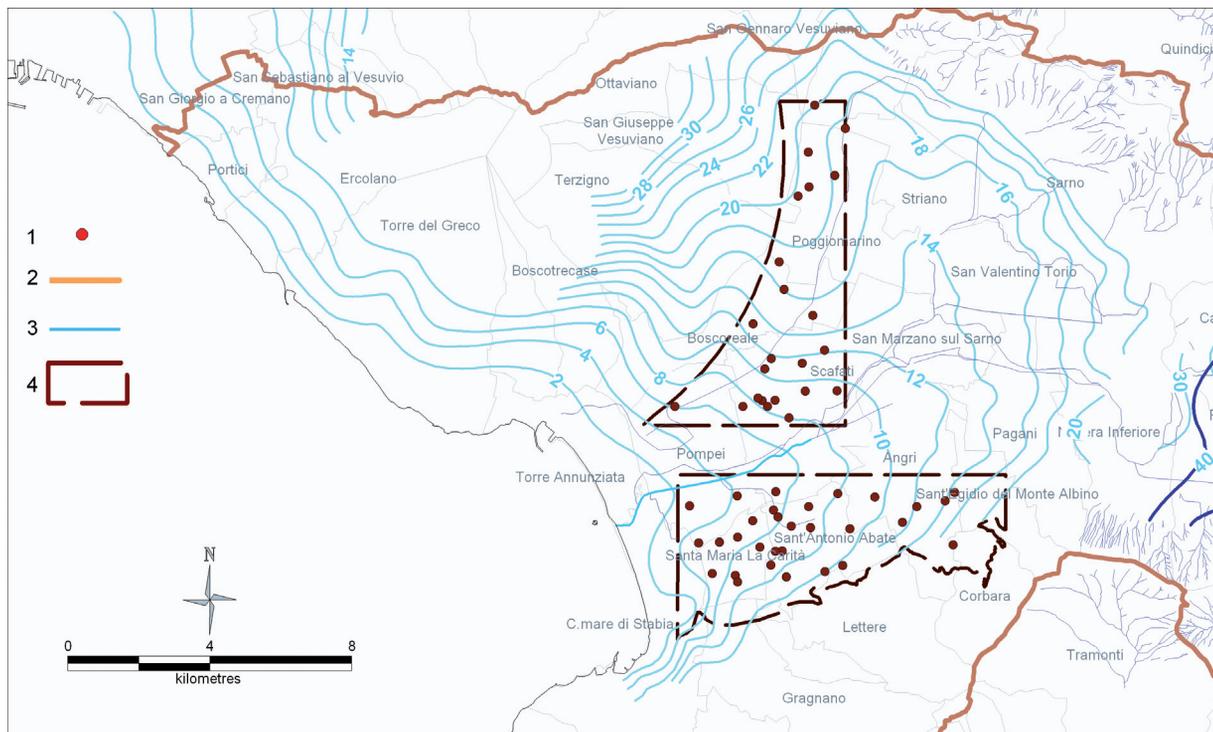


Fig. 7 - Piezometria misurata e target points utilizzati nella simulazione: 1) target points; 2) limite del Bacino del Fiume Sarno; 3) piezometria misurata; 4) settori DV e DML  
- Measured piezometric surface and target points used in simulation: 1) target points; 2) limits of the Sarno river watershed; 3) Measured piezometric surface; 4) sectors DV and DML

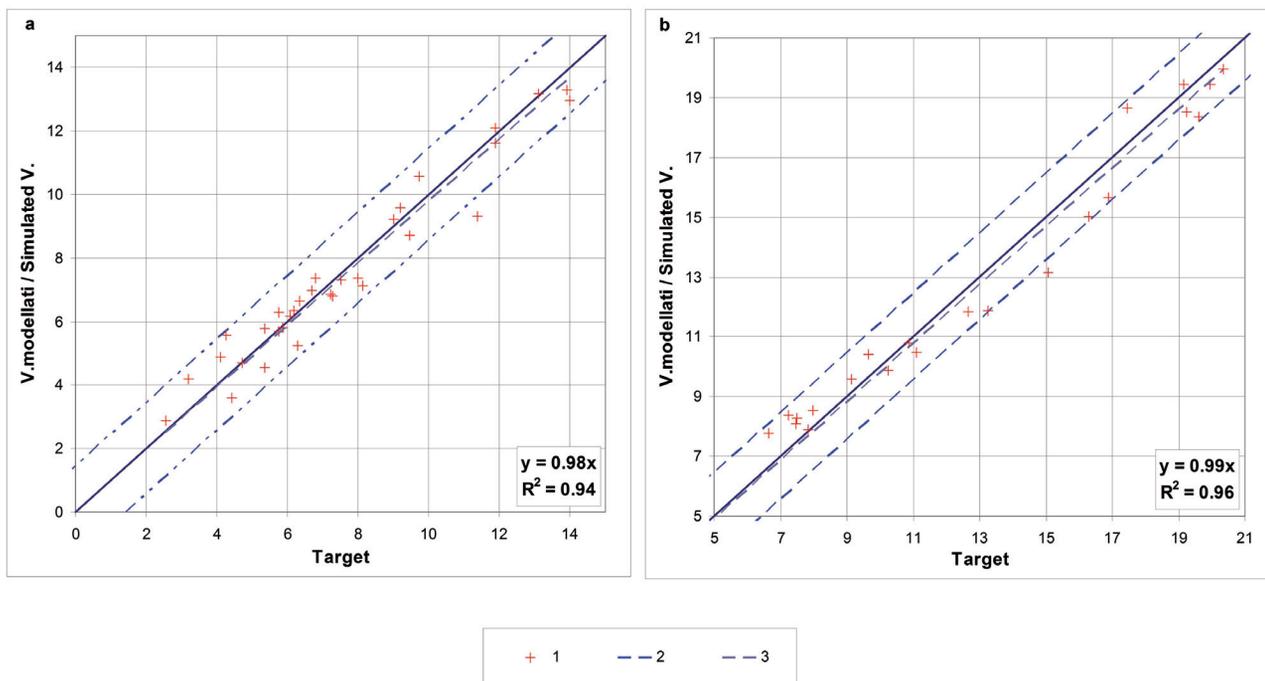


Fig. 8 - Grafico di calibrazione: 1) Valori di quota piezometrica H osservati vs. valori di quota piezometrica H misurati in m s.l.m.; 2) fasce di confidenza ; 3) regressione lineare. a) DML, b) DV  
- Calibration graph: 1) H Piezometric Head simulated values vs. H Piezometric Head observed values in m a.s.l.; 2) confidence bands; 3) linear regression. a) DML, b) DV

zione e l'estensione di ogni singola unità stratigrafica, e ottimizzando l'attribuzione dei parametri idrogeologici, valutati con accuratezza attraverso un attento studio bibliografico.

I valori inizialmente assunti sono stati desunti da Ducci (2008): nel DML il travaso risulta pari a  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  nel settore della conoide detritico-conglomeratica di Gragnano e pari a  $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  nel settore dei depositi detritico-piroclastici tra Gragnano e Angri; nel DV il travaso risulta pari a  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ .

Il processo di calibrazione è stato effettuato manualmente con *step* sempre più ravvicinati, finché non si è ottenuta una soddisfacente comparazione tra le quote piezometriche simulate e quello osservate nei target di controllo.

## RISULTATI

I risultati della modellazione del flusso sono mostrati nelle carte piezometriche e carte della direzione del flusso (Fig. 9).

L'andamento della superficie piezometrica simulata mostra una buona corrispondenza con quello della superficie piezometrica misurata (Fig. 9), per entrambi i domini, se si esclude il settore W del DML dove nei dati misurati si nota un abbassamento localizzato dovuto probabilmente a emungimenti concentrati. Ciò conferma che il modello è sufficientemente rappresentativo dell'idrodinamica dell'area, con un flusso idrico sotterraneo diretto prevalentemente verso il mare. Di seguito si riportano i valori di travaso risultanti dal processo di simulazione:

**DML:** Si individuano due distinte aree di travaso dotate di diversa trasmissività: una in corrispondenza della conoide di Gragnano con portata a metro lineare di  $1,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  ossia un travaso globale di 450 l/s; l'altra nel settore tra Gragnano e Angri con portata a metro lineare di  $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  ossia un travaso globale di 500 l/s. Pertanto il travaso totale dal corpo idrico sotterraneo dei M.ti Lattari verso la Piana del Sarno risulta pari a 950 l/s.

of the hydrogeologic parameters, assessed accurately through a careful study of literature.

Initially assumed values were derived from Ducci (2008). The subflow rate in the DML results  $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  in the sector of the Gragnano conglomerate-debris and  $4,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  in the sector of pyroclastic deposits between Gragnano and Angri; in the DV the resulting subflow value is  $3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ .

The calibration process was performed step by step by hand in order to find the piezometric values most similar of those observed in the check target points.

## RESULTS

Groundwater flow model results are shown in piezometric maps and flow direction maps (Fig. 9).

The evolution of computed piezometric surface (Fig. 9) shows a good correspondence with the measured piezometric surface, for both domains, excluding the W sector of the DML where observed data shows a drawdown probably due to a localized pumping. This confirms that the model is enough representative of the hydrodynamics of the area, with a groundwater flow (Fig. 9) primarily directed towards the sea.

Here are the subflow values resulting from the simulation process:

**DML:** We identified two distinct areas of subflow with different transmissivity: one corresponding to the cone of Gragnano with flow per linear meter of  $1,13 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  that is a total subflow of 450 l/s; the other one is in the sector between Gragnano and Angri with flow per linear meter of  $6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  that is a total subflow of 500 l/s. Therefore the total subflow from the groundwater body Mts. Lattari towards the Sarno Plain is equal to 950 l/s.

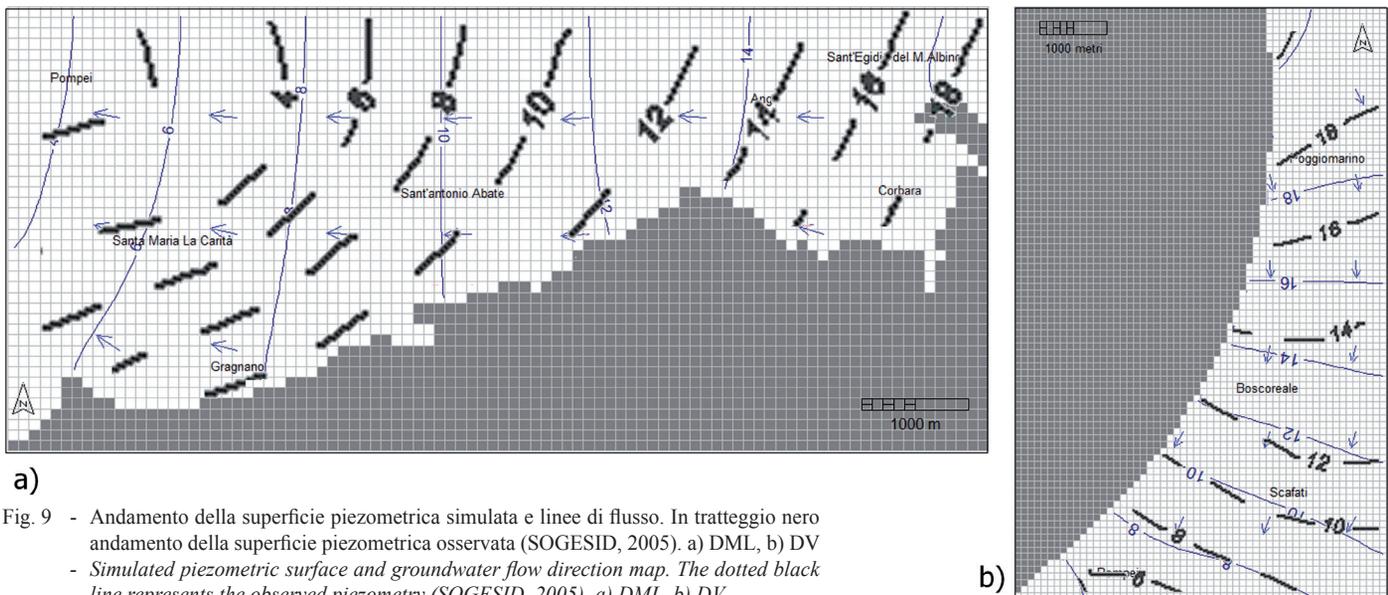
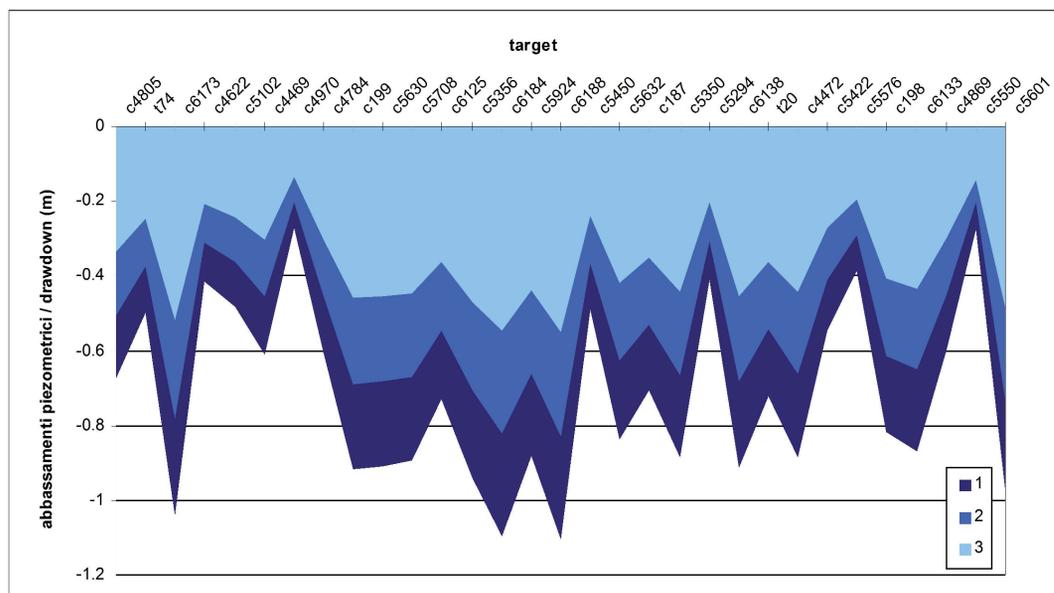


Fig. 9 - Andamento della superficie piezometrica simulata e linee di flusso. In tratteggio nero andamento della superficie piezometrica osservata (SOGESID, 2005). a) DML, b) DV  
- Simulated piezometric surface and groundwater flow direction map. The dotted black line represents the observed piezometry (SOGESID, 2005). a) DML, b) DV

Fig. 10 - Abbassamenti piezometrici derivanti dalla riduzione dei travasi: 1) riduzione del travaso 40%; 2) riduzione del travaso 30%; 3) riduzione del travaso 20%  
- Piezometric drawdown produced by subflow reduction: 1) subflow reduction 40%; 2) subflow reduction 30%; 3) subflow reduction 20%



DY: La portata a metro lineare risulta pari a  $4.95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$  ossia il travaso globale dal Vesuvio verso la Piana del Sarno è 740 l/s.

L'entità dei travasi calcolata dal modello si pone a cavallo tra le stime effettuate da Ducci (2008), usate come valori di partenza, e quanto indicato in altri lavori (PISCOPO, 1995; CELICO *et alii.*, 1991).

### APPLICAZIONE

Si è infine applicata la modellazione di flusso effettuata per valutare la variazione piezometrica che si può verificare a seguito di una modifica delle aliquote di travaso dai corpi idrici adiacenti dovuta a differenti condizioni meteorologiche. Infatti un lavoro precedente (DUCCI & TRANFAGLIA, 2008) ha evidenziato che dal 1980 al 1999 le precipitazioni nei Monti Lattari sono diminuite del 20%, mentre si è avuto un evidente incremento delle temperature, in media di 0.4 - 0.5 °C. Tutto ciò ha portato ad una forte diminuzione dell'infiltrazione media che dalla fine degli anni 1980 al 1999 risulta diminuita del 39%, con conseguente diminuzione del travaso dal corpo idrico in questione verso la Piana.

Lo studio è stato quindi applicato al DML. L'effetto della riduzione del travaso è stato valutato considerando una diminuzione delle portate entranti del 20%, 30%, 40%, cui corrispondono abbassamenti piezometrici medi rispettivamente di 0.36 m, 0.54 m, 0.72 m (Fig. 10). Questi valori, che comprendono solo la riduzione per i travasi e non quella per infiltrazione diretta, sono coerenti con gli abbassamenti piezometrici misurati nel periodo 1992-2003 che hanno superato il metro nel settore prossimo ai massicci carbonatici (FABBROCINO *et alii.*, 2007).

### CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha posto in evidenza il grande vantaggio di far precedere la ricostruzione del modello stratigrafico 3D del sottosuolo alla creazione di un modello di flusso.

DY: The flow per linear meter results equal to  $4.95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s} \cdot \text{m}$ , therefore the total subflow from Vesuvius towards the Sarno plain is equal to 740 l/s.

The subflow rates resulting by the model are in the middle between the estimates evaluated by Ducci (2008), assumed as initial values, and the rates indicated by other authors (PISCOPO, 1995; CELICO *et alii.*, 1991).

### APPLICATION

Finally the groundwater flow model was applied to evaluate the piezometric variation that may occur as a result of a change in the rate of subflow from the adjacent water bodies, due to different meteorological / climatic conditions. Indeed, a previous work (DUCCI & TRANFAGLIA, 2008) showed that from 1980 to 1999 in Mts. Lattari precipitation decreased by 20%, while there was an apparent rise in temperatures, averaging 0.4 - 0.5 °C. This led to a strong decrease in the average infiltration that since 1980 to 1999 has decreased by 39%, resulting a drawdown of the subflow from the body concerned towards the plain.

The study was then applied to the DML. The effect of reducing the subflow was evaluated taking into consideration a decrease of the incoming flow of 20%, 30%, 40%; with correspond an average piezometric drawdown respectively of 0.36 m, 0.54 m, and 0.72 m (Fig. 10). These values, including only the reduction due to the subflow but not to the direct recharge, are in according with the piezometric drawdown measured in the period 1992-2003, reaching one metre in the sector close to the carbonate mountains (FABBROCINO *et alii.*, 2007).

### CONCLUSION

This paper has highlighted the great advantage to precede the reconstruction of 3D stratigraphic model to the creation of a groundwater flow model.

L'uso di un software come ROCKWORKS 2006, per la realizzazione di un modello 3D del sottosuolo di una piana alluvionale, ha il pregio di fornire informazioni continue nello spazio, al di là della disponibilità di sondaggi, consentendo quindi di andare ad indagare, per estrapolazione, zone prive di studi geognostici o scarsamente coperte da essi.

C'è da sottolineare che l'uso del software richiede un continuo intervento del modellatore e una profonda conoscenza dell'ambito di studio, particolarmente negli ambiti alluvionali dove le successioni stratigrafiche sono complesse e i contatti spesso eteropici. Gli strati continui (come le lave o l'ignimbrite campana) sono ben modellati dal software, mentre gli strati discontinui o lenticolari (torbe o depositi piroclastico-alluvionali) sono modellati con minor precisione; per essi si richiede un intervento esperto al fine di conformare il risultato alla realtà.

La realizzazione preliminare del modello tridimensionale ha permesso di individuare con una certa accuratezza la disposizione ed estensione di ogni singola unità stratigrafica, evitando in tal modo l'operazione di regionalizzazione dei dati idrodinamici, che costituisce una fase cruciale della realizzazione di un modello. Questo approccio, unito ad un attento studio delle caratteristiche idrodinamiche, ha portato ad una precisa definizione dell'acquifero.

Il modello di flusso ricostruito per i due domini in esame (DV, Dominio Vesuviano, e DML, Dominio Pedemontano dei Monti Lattari) ha condotto a risultati soddisfacenti, evidenziando in tal modo la validità della procedura utilizzata nella creazione di un modello idrodinamico. Senza dubbio il modello idrodinamico presenta molte semplificazioni (specie per quanto attiene agli stress che intervengono sul sistema), ma l'approccio utilizzato sembra valido e può considerarsi come un punto di partenza per successivi perfezionamenti. Le difficoltà incontrate, sia nella fase di creazione del modello 3D, sia nella fase di elaborazione del modello di flusso, evidenziano la carenza di informazioni sulla stratigrafia profonda dell'acquifero, in particolare per l'ambito Vesuviano, laddove tra l'altro anche le informazioni sulla stratigrafia superficiale sono più lacunose.

Si sottolinea quindi l'importanza, nell'uso congiunto di un modello stratigrafico 3D del sottosuolo e di un modello di flusso, di poter disporre di numerose e ben distribuite indagini geognostiche, che si approfondiscano fino al substrato impermeabile, e dei risultati di rilevamenti piezometrici aggiornati, possibilmente all'interno di un monitoraggio continuo e diffuso sull'area.

Lavoro parzialmente finanziato dal progetto di ricerca PRIN 2007 (*Contaminazione da nitrati delle acque sotterranee: scenari, cause prevalenti influenza dei trends climatici e possibili interventi strutturali*) Coord. Naz e Resp. Locale dell'Unità Operativa Prof. A Corniello.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia L'Autorità di Bacino Regionale del F. Sarno, nella persona del Dott. Federico Baistrocchi, per i dati forniti per l'elaborazione del modello tridimensionale e del modello di flusso.

The use of software such as ROCKWORKS 2006, for the realization of a 3D model of the subsoil of an alluvial plain, has the advantage of providing continuous information in space, beyond the availability of logs, thus allowing investigating, by extrapolation, areas without geognostic studies or poorly covered by them.

It must be underlined that the use of this software requires continuous intervention of the modelist and a deep knowledge of the study area, mostly in alluvial areas where stratigraphic sequences are complex and contacts are often heteropic. The continuous layers (such as lavas or tuffs of ignimbrite campana) are well modeled by the software, while the discontinuous or lenticular layers (peat or alluvial-pyroclastic deposits) are modeled with less accuracy; so expert assistance is required in order to conform result to reality.

The achievement of the preliminary three-dimensional model has allowed identifying with some accuracy the location and extension of each stratigraphic unit, thus avoiding the task of regionalization of hydrodynamic data, which constitutes a crucial phase of the implementation of a model. This approach, combined with a careful study of the hydrodynamic characteristics, has led to a precise definition of the aquifer.

The groundwater flow model drawn up for the two domains (DV, Vesuvius Domain and DML, Piedmont domain of Mts. Lattari) led to satisfactory results, thus highlighting the strength of the procedure used in creating a groundwater model. Undoubtedly the hydrodynamical model presents many simplifications (especially regarding the external stresses on the system), but the used approach seems to be valid and can be considered like a point of departure for future improvements.

The problems faced both in the creation of the 3D model and in the groundwater flow model development show the lack of information about deep stratigraphy of the aquifer, specially for the Vesuvius area, where even the information about the surface stratigraphy are more sketchy. It therefore stresses, in the joint use of 3D stratigraphic model and the groundwater flow model, the importance of having numerous and well distributed geognostic investigations, which are deep up to the impermeable substrate and the results of updated piezometric surveys possibly within a continuous and distribute monitoring over the area.

This study was partially funded by the research project PRIN 2007 (*Nitrate Contamination in Groundwater: main causes of contamination and impact of climatic trends*) National Coordinator and Leader of the Operative Unit: Prof. A Corniello.

## ACKNOWLEDGEMENTS

We are grateful to Dr. Federico Baistrocchi, of the Autorità di Bacino Regionale of the Sarno river, for kindly supplying data for the 3D and the groundwater model.

## **OPERE CITATE / REFERENCES**

- AA. VV. (1999) - *Engineer Manual. Engineering and Design. GROUNDWATER HYDROLOGY*. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC 20314-1000, 122 pp.
- AA.VV. (2006) - *Manuale di RockWorks 2006*. RockWare ®Earth Science & GIS Software, 302 pp.
- AMATO A. (2008) - *Caratterizzazione geologica della Piana del Sarno da dati di sondaggio*. Quaderni AdB Sarno **1/2008**: 45-50.
- ANDERSON M. P. & WOESSNER W.W. (2002) - *Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic press, 381 pp.
- APRILE F. & TOCCACELI R. (2002) - *Nuove conoscenze sulla stratigrafia e distribuzione dei depositi ignimbritici quaternari nel sottosuolo della Piana del Sarno (Salerno - Campania - Italia meridionale)*. Il Quaternario **15 (2)** : 169-174.
- AUTORITÀ DI BACINO DEL SARNO (2004) - *Piano Stralcio di Tutela delle Acque* (art. 17 L. 183/89, L.R. 9/84, D. Lgs. 152/99 e s.i.m.).
- BELLUCCI F. (1998) - *Nuove conoscenze stratigrafiche sui depositi effusivi ed esplosivi nel sottosuolo dell'area del Somma - Vesuvio*. Boll. Soc. Geol. It., **117**: 385-405.
- CASSANO E. & LA TORRE P. (1987) - *Geophysics in Somma-Vesuvius*. Quaderni della Ricerca Scientifica, CNR, **8**: 175-196.
- CASTANY G. (1985) - *Idrogeologia*. D. Flaccovio Editore, 243 pp.
- CELICO F. & PISCOPO V. (1995) - *Idrodinamica sotterranea e vulnerabilità all'inquinamento delle piane del Sarno e del Solofrana (Campania)*. Quaderni di Geol. Appl., **2**: 407-412.
- CELICO P. (1988) - *Prospezioni Idrogeologiche*. Liguori Editore, 736 pp.
- CELICO P. & ALLOCCA V. (2004) - *Il bacino del fiume Sarno: idrodinamica sotterranea*. Quaderni AdB Sarno **1/2004**: 35-41.
- CELICO P., MALAFRONTA A. & PISCOPO V. (1991) - *Bilancio idrologico e idrodinamica della piana del Sarno (SA)*. Atti I Conv. Naz. Giov. Ricerc. Geol. Appl., 22-23 ott., Gargnano (BS), in «Ricerca Scientifica ed Educazione Permanente», suppl. **93**: 297-306.
- CULSHAW M.G. (2005) - *From concept towards reality, developing the attributed 3D geological model of the shallow subsurface*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology **38**: 231-284.
- D'AGNESE F. A., FAUNT C. C., TURNER A. K. & HILL M.C. (1997) - *Hydrogeological evaluation and numerical simulation of the Death Valley regional ground-water flow system, Nevada and California*. US Geological Survey, Water Resources Investigation Report 96-4300, Denver, CO, 124.
- DEL GAUDIO A. & VALLARIO A. (2007): da *Attività estrattive: cave, recuperi, pianificazione. Il Prae della regione Campania*. Liguori Editore Srl, pp. 410.
- DEL GRANDE C. & RONDELLI B. (2004) - *Modelli del sottosuolo: utilità e prospettive tra ricerca e pianificazione per l'archeologia*. Dispense nuove frontiere dell'archeologia, Università degli Studi di Bologna. In CATTANI M., FIORINI A., & VIGGIANI N. (Eds.), *Nuove frontiere dell'archeologia il trattamento del dato tridimensionale* Ravenna 13 maggio 2004.
- DUCCI D. (2008) - *Definizione del bilancio idrico e idrologico dei Corpi Idrici Sotterranei significativi dell'Autorità di Bacino del Sarno*. Attuazione della delibera di Giunta Regionale n. **2290** del 30/12/2006. Relazione Conclusiva.
- DUCCI D. & ONORATI G. (1993) - *Analisi di una lunga serie di dati piezometrici in Piana Campana*. Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale - Protezione delle acque sotterranee, **49**: 339-357, Pitagora, Bologna.
- DUCCI D. & TRANFAGLIA G. (2008) - *The Effect of Climate Change on the Hydrogeological Resources in Campania Region (Italy)*. In DRAGONI, W. (ed) Groundwater and climatic changes. Geological Society, London, Special Publications, **288**: 25-38.
- ENEA (2002) - *Progetto Regi Lagni. Analisi di specifiche situazioni di degrado della qualità delle acque in Campania, in riferimento ai casi che maggiormente incidono negativamente sulle aree costiere*.
- ESAKI T. & JIANG K. (1999) - *Comprehensive study of the weathered condition of welded tuff from a historic stone bridge in Kagoshima, Japan*. Engineering Geology **55**:121-130.
- EVANGELISTA A., NICOTERA M.V., PAPA R. & URCIUOLI G. (2006) - *Caratterizzazione meccanica di terreni piroclastici di un sito della Campania*. Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006 - IARG Pisa, 26-28 giugno 2006.
- FABBROCINO S. , LANARI R. , CELICO P. , TERMOLINI G. & ZENI G. (2007) - *Groundwater Pumping and Land Subsidence in the Sarno River Plain (Campania)*. Mem. Descr. Carta Geol. d'It., **75**: 163-174.
- FAGIOLI M.T. & AMBROSIO M. (1999) - *Modellazione e simulazione numerica come utensili in idrogeologia: esempio di applicazione alla pianura costiera di Cecina*. Intervento al Convegno "Risorsa Idrica e sviluppo sostenibile" dell'Associazione Culturale Geologica di Promozione per la Toscana, 22 gennaio 1999.
- GALLERINI G. & DE DONATIS M. (2009) - *3D Modelling using geognostic data: The case of the low valley of Foglia river (Italy)*. Computer & Geosciences, **35**: 146-164.
- GRIFFITHS J.C. (1967) - *Scientific method in analysis of sediments*. Ed. McGraw-Hill, New York.
- HARBAUGH, A.W. (2005) - *MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model - the Ground-Water Flow Process*. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.
- HARVEY P. K. (2005) - *Petrophysical properties of crystalline rocks Geological Society of London*. Geological Society, 351 pp.
- LEMON ALAN M. & JONES NORMAN L. (2003) - *Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections*. Computers & Geosciences, **29**: 547-555.
- PISCOPO V., FUSCO C. & LAMBERTI A. (1995) - *Idrogeologia dei Monti Lattari (Campania)*. Quaderni di Geologia Applicata, **2/95**: 359-366.

**MODELLO LITOSTRATIGRAFICO 3D PROPEDEUTICO ALLO SVILUPPO DI UN MODELLO DI FLUSSO SOTTERRANEO:  
CASO DI STUDIO, LA PIANA DEL SARNO (ITALIA)**

- ROSENBAUM M. & TURNER, A.K. (2003) - *Characterization of the shallow subsurface: Implications for urban infrastructure and environmental assessment. New Paradigms in Subsurface Prediction*. Springer, Berlin, Heidelberg, Lecture Notes in Earth Sciences, **99**: 3-6.
- ROSSETTO R. & BOCKELMANN-EVANS B. (2007) - *Modellazione numerica del flusso e del trasporto di soluti ai fini dell'investigazione dei processi di trasporto dell'erbicida terbutilazina nel sistema acquifero della pianura di S. Alessio (Lucca)*. *Giornale di Geologia Applicata*, **5**: 29-44.
- RUMBAUGH D.B. & RUMBAUGH G.O (2007) - *Groundwater Vistas, Guide to Using. Version 5*. Environmental Simulation Inc.
- SOGESID (2005) - *Regione Campania - Attuazione dell'art. 44 del D. Lgs. 152/99 e s.i.m.: Piano di Tutela delle Acque*.
- SPITZ K. & MORENO J. (1996) - *A Practical Guide To Groundwater And Solute Transport Modeling*. Wiley-interscience, 441 pp.
- SUGAN M., DAL MORO G., FORTE E. & PIPAN M. (2003) - *SIT come sistema di supporto alle decisioni (DSS) per l'applicazione di metodologie geofisiche non invasive volte allo studio del sottosuolo*. 7a Conferenza Nazionale ASITA , 28-31 ottobre 2003 Verona.
- WYCISK P., HUBERT T., GOSSEL W. & NEUMANN CH. (2007) - *High-resolution 3D spatial modelling of complex geological structures for environmental risk assessment of abundant mining and industrial megasites*. *Computers & Geosciences*, **35**: 165-182.

*Received April 2010 - Accepted July 2010*