

IDROGEOLOGIA ED IDROGEOCHIMICA DELLA PIANA COMPRESA TRA IL M.TE MASSICO ED IL F. VOLTURNO (CAMPANIA)

HYDROGEOLOGY AND HYDROGEOCHEMISTRY OF THE PLAIN BETWEEN MT. MASSICO AND THE RIVER VOLTURNO (CAMPANIA REGION, ITALY)

ALFONSO CORNIELLO^(*), DANIELA DUCCI^(*), MARCO TRIFUOGGI^(**)
MARCELLO ROTELLA^(***) & GIOVANNI RUGGIERI^(***)

^(*) Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale (DIGA)
Sezione di Geologia Applicata - P.le Tecchio, 80 - 80125 Napoli (Italy); e-mail: alfonso.corniello@unina.it

^(**) Università di Napoli Federico II - Dipartimento di Chimica "Paolo Corradini" - Via Cintia, - 80126 - Napoli (Italy)

^(***) Collaboratori esterni / Outside experts

RIASSUNTO

Lo studio ha interessato il settore della Piana Campana esteso tra il Fiume Volturno ed il M.te Massico. E' stato definito in dettaglio l'assetto idrogeologico con la raccolta e l'analisi di oltre 400 stratigrafie e più di 100 rilievi piezometrici. L'acquifero principale della piana è stato identificato nei materiali piroclastico/sedimentari alla base dell'Ignimbrite Campana, poco permeabile, presente con spessori variabili. La piezometria ed i dati idrochimici hanno consentito di individuare le aree, al bordo della piana, dove tale acquifero riceve significativi apporti idrici sotterranei. I dati chimici hanno inoltre evidenziato i settori di falda con contaminazione marina (es. cloruri) o da nitrati e, lungo il Volturno, una vasta area caratterizzata da ambiente riducente. La Carta della Vulnerabilità all'inquinamento, infine, ha sottolineato l'importante ruolo della soggiacenza e del non saturo, nei settori ove la falda è libera.

TERMINI CHIAVE: idrogeologia, chimismo della falda, vulnerabilità all'inquinamento, SINTACS; Piana Campana, Fiume Volturno, Italia Meridionale

INTRODUZIONE

Già da tempo la Piana Campana è oggetto di ricerca e diversi lavori scientifici (cfr. bibliografia) ne hanno delineato le caratteristiche geologiche ed idrogeologiche s.l. L'attenzione, tuttavia, è stata per lo più rivolta al settore a sud del F. Volturno in quanto assai più ricco di insediamenti urbani di quello settentrionale e quindi più fortemente sollecitato dalle molteplici attività connesse. Da tali studi è tra l'altro risultata una compromissione assai ampia dello stato quali/quantitativo della risorsa idrica sotterranea: si consideri, ad esempio, che qui l'estensione della falda con concentrazioni di $\text{NO}_3 > 50 \text{ mg/L}$ supera i 600 km² (CORNIELLO *et alii*, 2006).

Questo studio intende dunque offrire un contributo alla conoscenza del settore a nord del Volturno, forte della notevole mole di materiale raccolto ed elaborato (più di 400 stratigrafie, rilievi piezometrici in 120 verticali, decine di analisi chimiche di acque di falda etc.). La ricerca è stata condotta nell'ambito del PRIN 2005 - *Modelli parametrici per la valutazione dell'impatto dei nitrati sulle risorse idriche sotterranee: applicazioni e validazione* (Co-ord. Nazionale: prof. M. CIVITA) ed ha costituito la naturale premessa a successive elaborazioni che hanno portato alla redazione

ABSTRACT

Our study covered the sector of the Campanian Plain between the River Volturno and Mt. Massico. The hydrogeological system was defined in detail by analysing data from over 400 borehole stratigraphies and more than 100 piezometric surveys. The plain's main aquifer was identified in the pyroclastic/sedimentary material underlying rather impermeable Campanian Ignimbrite, occurring with variable thicknesses. Piezometric and hydrochemical data allowed us to identify the areas, at the edge of the plain, where there are significant quantities of groundwater. Chemical data also showed the groundwater sectors contaminated by salt water intrusion (chloride) or nitrates and, along the Volturno river, a vast area characterized by reducing environments. Finally, the Aquifer Contamination Vulnerability Map stressed the importance of the depth to water and the vadose zone in the unconfined sectors.

KEYWORDS: hydrogeology, hydrogeochemistry, groundwater vulnerability, SINTACS, Campanian Plain, Volturno river, Southern Italy

INTRODUCTION

The Campanian Plain (Southern Italy) has long been the subject of research and several scientific studies (see references) have outlined its geological and hydrogeological characteristics s.l. However, the focus has chiefly been on the sector south of the River Volturno insofar as it is far more urbanised than the northern sector, hence far more subject to varieties of human impact. What has emerged from such studies is a fairly widespread decline in both the quality and quantity of groundwater resources. For example, the extent of the aquifer with concentrations of $\text{NO}_3 > 50 \text{ mg/L}$ exceeds 600 km² (CORNIELLO *et alii*, 2006).

The present study thus seeks to advance our knowledge of the sector north of the Volturno. It draws extensively on a considerable database which has been gathered and processed (more than 450 borehole stratigraphies, 120 piezometric surveys, extensive chemical analysis of groundwater etc.).

The research has been carried out in the context of PRIN 2005 - *Parametric models for assessing the impact of nitrates upon groundwater resources* (National coordinator: Prof. M. CIVITA) and this study formed the natural premiss to later analyses which led to drawing up

di una Carta del rischio potenziale di inquinamento da nitrati di origine agricola. Altri elementi conoscitivi per l'area di interesse sono derivati da una Convenzione tra il DIGA e l'Azienda Speciale Agrisviluppo (C.C.I.A.A. di Caserta).

L'EVOLUZIONE GEOMORFOLOGICA

La Piana Campana, di cui l'area di interesse è parte, si estende dal M.te Massico ai Monti Lattari e si articola in due settori, uno attraversato dal Fiume Volturno e l'altro, più meridionale, percorso dal Fiume Sarno. La Piana corrisponde ad una depressione strutturale che si è individuata nel corso del Pleistocene inferiore; il settore attraversato dal Fiume Volturno (Fig. 1), grazie ad una generale tendenza alla subsidenza, ha fatto parte di ambienti marini che, sino a circa 130.000 anni fa (ROMANO *et alii*, 1994; CINQUE & ROMANO, 2001), si sono spinti fino ai monti di Caserta. Successivamente si realizzarono condizioni favorevoli alla sua crescita come area emersa; infatti i ritmi della subsidenza tettonica si ridussero sin quasi ad azzerarsi e l'area venne investita dai prodotti piroclastici da flusso e da caduta di provenienza flegrea e p.p. vesuviana.

Il Fiume Volturno penetra nella Piana Campana attraverso la stretta di Triflisco (a nord-est di Capua, Fig. 3) e, prima che le attività antropiche intervenissero significativamente sul suo corso, le sue acque trascinarono grandi quantità di materiale solido in genere di dimensione assai ridotte essendosi già depositati quelli più grossolani (sabbie e sabbie grosse) nelle piane ad est di Triflisco (BIGGIERO *et alii*, 1994).

a Contamination Risk Map of Nitrates used in Agriculture. In this regard, it should be pointed out that other information of interest was obtained under a convention between the DIGA and the Special Agricultural Agency (Caserta Chamber of Commerce and Industry).

GEOMORPHOLOGICAL EVOLUTION

The Campanian Plain, in which the study area is situated, stretches from Mt. Massico in the north to the Lattari mountains in the south and may be considered in two sectors, one crossed by the River Volturno and the other, further south, crossed by the River Sarno. The plain corresponds to a structural depression which formed during the Lower Pleistocene; thanks to a general subsidence tendency the Volturno plain (Fig. 1) was part of marine environments which, until about 130,000 years ago (ROMANO *et alii*, 1964; CINQUE & ROMANO, 2001), stretched as far as the mountains of Caserta. Conditions later became favourable for its emergence. Indeed, the rate of tectonic subsidence decreased to almost zero and the area was affected by pyroclastic flow and fall-out from the Campi Flegrei and Vesuvius.

The River Volturno enters the Campanian Plain through the narrows of Triflisco (northeast of Capua) and, before human activity significantly intervened on its course, its waters carried great quantities of fine sediment discharge, with coarse grains being already deposited (sand and coarse sand) in the plains east of Triflisco (BIGGIERO *et alii*, 1994). On reaching the Campanian Plain,

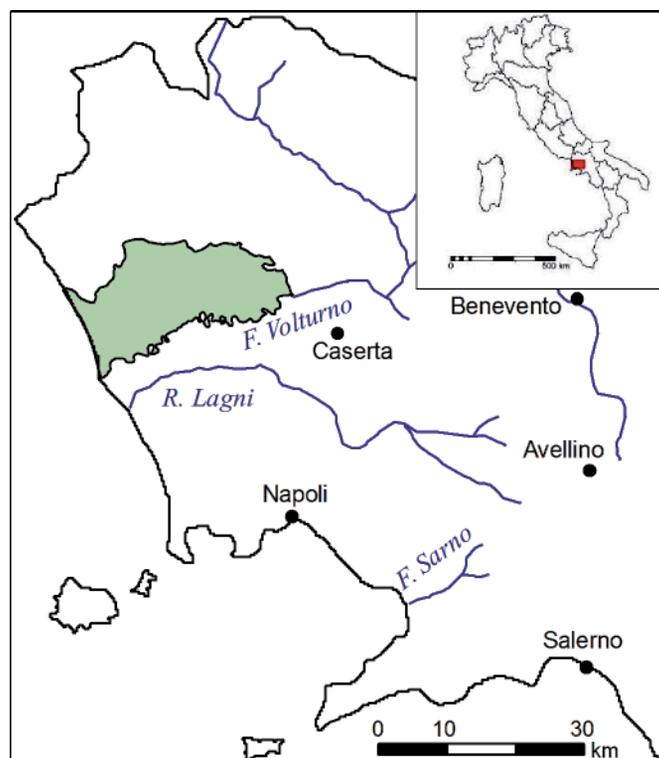
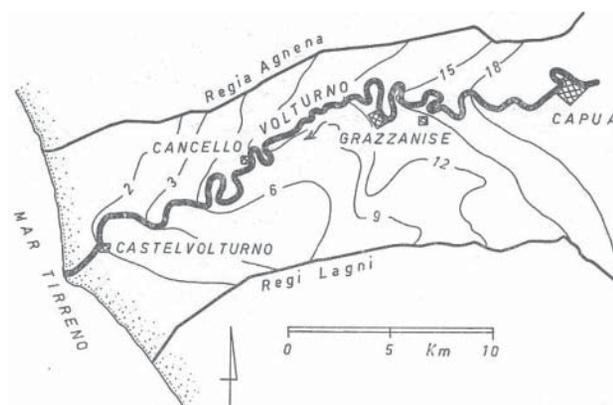


Fig. 1 - Ubicazione dell'area studiata / Location of the study area

Fig. 2 - Curve isoipse a ridosso del Fiume Volturno (da VIPARELLI, 1963)
 - Isohyse curves flanking the Volturno River (from VIPARELLI, 1963)



Giunto nella Piana Campana, il Volturno presentava tendenza a divagare e le esondazioni dall'alveo delle portate di piena provocavano il sopralzo dei terreni limitrofi tanto che, attualmente e da Capua fino al mare, il fiume ha l'alveo incassato nel tratto più alto di un largo ed esteso conoide da lui stesso realizzato nel corso dei millenni (Fig. 2).

I sedimenti trascinati e scaricati a mare hanno determinato, nel passato, imponenti fenomeni di protrazione della foce: negli ultimi 150 anni quest'ultima ha però subito una progressiva regressione (BIGGIERO *et alii*, 1994) per le dighe realizzate lungo il fiume ed il prelievo di inerti dal letto fluviale (dagli anni '50 fino al 1974). Durante la fase di protrazione si verificavano formazioni di barre dunari e, talvolta, l'occlusione degli sbocchi a mare dei corsi d'acqua nelle aree in sinistra (Regi Lagni) e in destra (Regia Agnena) rispetto al dosso del Volturno (Fig. 2).

Tutto ciò ha causato vasti impaludamenti nelle aree predette: una situazione già presente in età romana (VI e V secolo a.C.) come si può desumere, indirettamente, anche dal tracciato della Via Appia (CAIAZZA *et alii*, 1997). Il dominio della palude e della malaria in vaste aree della Piana è durato fino ad una cinquantina di anni fa (ROSSI, 1994). Gli interventi più decisivi furono avviati dai Borboni con attività che elevarono in modo sostanziale il livello di abitabilità e produttività della Piana. Con la costituzione del Regno d'Italia l'attività di bonifica fu presa in gestione dal Ministero dei Lavori Pubblici, ma con scarsa efficacia soprattutto nei primi anni. Nuovo impulso alla bonifica lo diede il D.R. del 1923 finalizzato non solo alla soluzione dei problemi idraulici ma anche alla promozione dello sviluppo socio-economico dell'area. Ulteriori passi in avanti nella valorizzazione dei terreni si ebbero infine con il programma di trasformazione irrigua fortemente sostenuto dal Consorzio Generale del Bacino Inferiore del Volturno costituitosi nel 1952.

Sempre sotto il profilo morfologico una notazione particolare è da riservare alle forme crateriche presenti al piede del M. Massico (Fig. 3). Si tratta di depressioni circolari, delimitate da pareti più o meno ripide e con rilievo esterno mancante o poco accentuato (Fossa Barbata, Fossa dell'Annunziata, la duplice Fossa del Ballerino e la depressione che accoglie il lago di Carinola). Si ritengono (SCHERILLO *et alii*, 1965) dei maaren prodotti da esplosioni dovute all'incontro tra acque sotterranee e gas ad alta temperatura veicolati verso la superficie soprattutto attraverso una discontinuità tettonica SW-NE, lungo la quale in effetti tutte queste

the Volturno showed a tendency to meander and channel overflows in spate led to the rise of adjacent land such that, from Capua to its mouth, the river has its channel embedded in the upper section by an extensive alluvial conoid which the river itself has created in the course of the millennia (Fig. 2).

River-borne sediments discharged in the sea in the past caused the river mouth to prograde. However, in the last 150 years, the latter has progressively retreated (BIGGIERO *et alii*, 1994) due to the dams built along the river and the extraction of gravel from the river bed (from the 1950s to 1974). During the progradation phase sandbanks were formed and at times outlets to the sea of water courses to the south (Regi Lagni) and north (Regia Agnena) were blocked (Fig. 2).

All this caused extensive ponding in the above areas: this situation was already present in the Roman era (from the 3rd century BC) as may be deduced from the course of the Appian Road (CAIAZZA *et alii*, 1997). The dominance of marshland and malaria in vast tracts of the plain lasted until about 50 years ago (ROSSI, 1994). The most decisive interventions were started by the Bourbons, implementing measures that substantially raised the level of liveability and productivity in the plain. With the Unification of Italy in 1860, land reclamation was managed by the Ministry of Public Works, albeit with scarce effectiveness especially in the early years. A new boost for reclamation was given by the Royal Decree of 1923, aiming not only to solve hydraulic problems but also to promote socio-economic development in the area. Further steps to exploit the land were finally achieved with the irrigation development programme strongly supported by the General Consortium of the Lower Volturno Basin founded in 1952.

As regards the plain's morphology, mention should be made of the crater-shaped depressions at the foot of Mt. Massico, delimited by fairly steep slopes and with almost no outer rim (Fossa Barbata, Fossa dell'Annunziata, Fossa del Ballerino and the depression of Lake Carinola). They are thought to be Maaren (SCHERILLO *et alii*, 1965) produced by explosions due to groundwater meeting high-temperature gases conveyed to the soil surface especially through a SW-NE tectonic discontinuity, along which all such depressions are aligned. The hypothesis that they might be sinkholes (FACCENNA

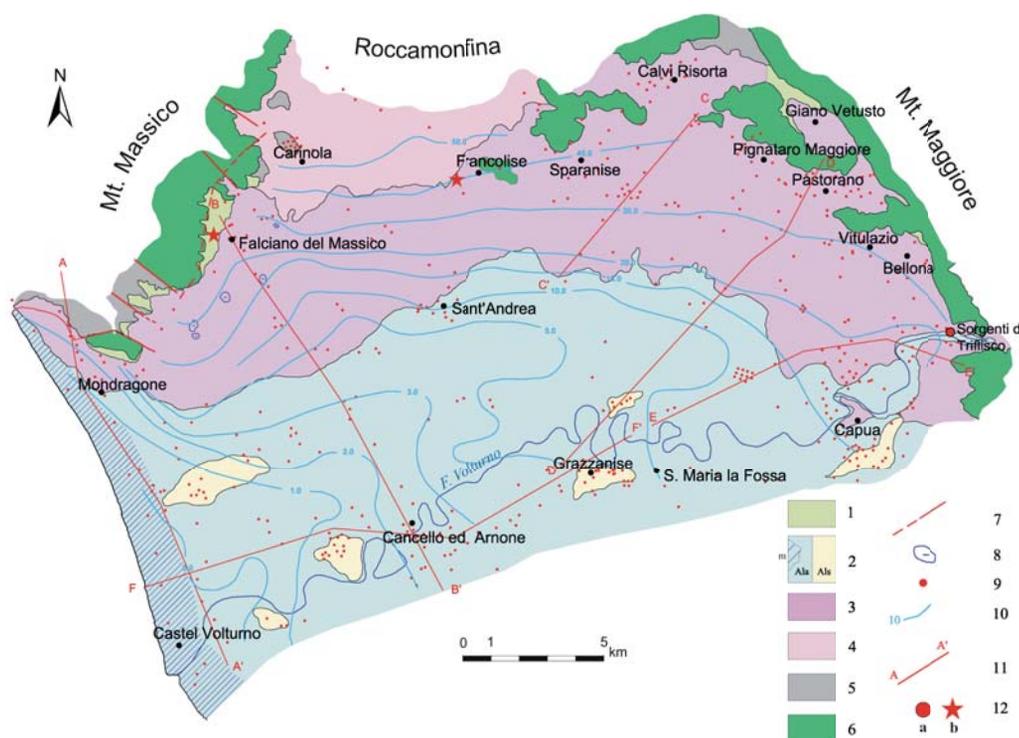


Fig. 3 - Schema idrogeologico ed assetto piezometrico. 1) Detriti carbonatici. Permeabilità da media a medio-alta; 2) Depositi alluvionali, lacustri, palustri e marini limosi e argillosi (Ala; m, se di origine marina) o sabbiosi (Als). Permeabilità da bassa a media; 3) Ignimbrite Campana sovente coperta da piroclastiti sciolte. Permeabilità bassa; 4) Tufi antichi. Permeabilità ridotta; 5) Depositi marnoso-arenaceo-argillosi. Permeabilità assai ridotta; 6) Calcarei e calcari dolomitici. Permeabilità alta; 7) Faglie principali (tratteggiate se presunte o sepolte); 8) Depressioni morfologiche di origine vulcanica; 9) Dati stratigrafici; 10) Isopiezometriche della falda principale (in m s.l.m.; giugno - luglio 2006); 11) Traccia di sezione (cfr. Tavola I); 12) Sorgenti (a) e pozzi (b) in aree idrominerali

- Hydrogeological map. 1) Calcareous debris deposits. Permeability degree from medium to medium-high; 2) Alluvial, lacustrine and marine clay - silt deposits (Ala; m: of marine origin) or sand deposits (Als). Permeability degree from low to medium; 3) Campanian Ignimbrite, often covered by pyroclastic deposits. Low permeability degree; 4) Old tuffs. Low permeability degree; 5) Arenaceous-clayey-marly deposits. Very low permeability degree; 6) Limestones and dolomite limestones. High permeability degree; 7) Main faults (hatched: inferred or buried faults); 8) Crater-shaped forms; 9) Boreholes; 10) Piezometric contour of the main aquifer (m a.s.l.; June-July 2006); 11) Trace of hydrogeological section (see Plate I); 12) Springs (a) and wells (b) in hydromineral zones

forme crateriche risultano allineate. Meno verosimile è invece l'ipotesi che si tratti di sinkholes (FACCENNA *et alii*, 1993; DEL PRETE *et alii*, 2004) dal momento che tutte le perforazioni della zona, anche se approfondite fino a 80 metri, non hanno mai incontrato un substrato carbonatico.

ASSETTO IDROGEOLOGICO DELLA PIANA

I numerosi dati stratigrafici acquisiti (più di 400) hanno concorso alla realizzazione della Carta Idrogeologica di Fig. 3 e delle Sezioni idrogeologiche riportate nella Tav. 1.

Da questi elaborati si ricava la presenza, pressoché continua in tutta l'area, dell'Ignimbrite Campana (IC): una cinerite grigiastra associata a scorie nere ed a brandelli di lava, con grado di diagenesi variabile e permeabilità in genere assai bassa. L'IC affiora soprattutto al margine della piana con spessori assai significativi (40-50 m; cfr. Sezioni di Tav. I; Fig. 4) che vanno però riducendosi, fin quasi ad annullarsi, verso il Volturno che su di essi ha esercitato un'energica azione erosiva (cfr. Sezioni di Tav. I, in particolare Sez. A-A' e Sez. E-E'). Un fenomeno che si presenta, anche se con minore efficacia, in corrispondenza degli altri corsi d'acqua (Fig. 4).

Al di sopra dell'IC poggiano piroclastiti sciolte di deposizione diretta, o prodotte da alterazione di sottostanti complessi tufacei od ancora legate a risedimentazioni. La granulometria è assai variabile e

et alii, 1993; DEL PRETE *et alii*, 2004) is less likely given that none of the boreholes in the area, albeit tens of metres in depth, have ever encountered a carbonate substrate.

HYDROGEOLOGY OF THE PLAIN

The extensive stratigraphic data acquired (more than 450 items) helped create the Hydrogeological Map (Fig. 3) and the hydrogeological sections reported in Plate I. What emerges is the almost continuous presence throughout the area of Campanian Grey Tuff (IC): a greyish ashy rock associated with black scoriae and molten lava, with a variable degree of diagenesis and generally low permeability. IC crops out especially on the margin of the plain with fairly significant thicknesses (40-50 m; see Sections in Plate I; Fig. 4) which become thinner, so as to almost disappear, towards the River Volturno, which has severely eroded the tuff layer in time (see Sections in Plate I, especially A-A' and E-E'). This occurrence is recognizable, but weaker, toward the minor rivers (Fig. 4).

Above the IC are layers of loose pyroclastites deposited directly, or produced by weathering of the tuff complexes below or, further, linked to re-sedimentation. The grain size is somewhat variable and thicknesses range from a few metres to tens of metres. Although

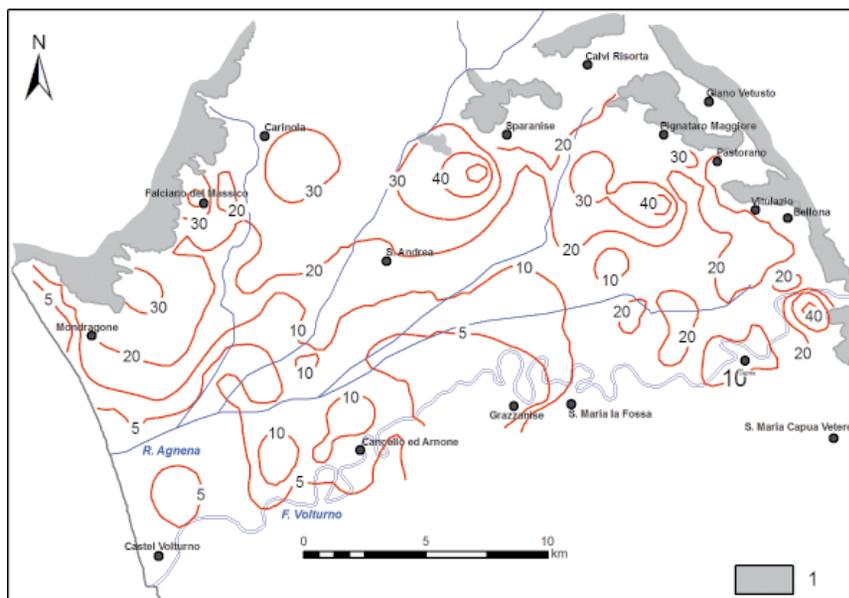


Fig. 4 - Curve isopache (in metri) dell'Ignimbrite Campana; 1) Rilievi carbonatici
 - Isopach map of the Campanian Ignimbrite (in meters); 1) Carbonate mountains

gli spessori variano da pochi metri ad alcune decine.

Questi materiali, che coprono quasi interamente la piana al piede dei rilievi, non sono rappresentati sulla Carta, ma le caratteristiche giaciture e gli spessori si possono cogliere nelle Sezioni di Tav. I. Alla base dei versanti carbonatici le piroclastiti s.l. passano (o si associano) a detriti di versante calcarei e calcareo-dolomitici mentre, in corrispondenza della rete idrografica, vengono sostituite da depositi alluvionali legati agli espandimenti fluviali del Volturno, a fasi palustri antiche e recenti, nonché ad episodi marini. In questi sedimenti sono frequenti, a diverse altezze stratigrafiche, livelli di materiale torboso potenti e di notevole continuità areale (cfr. Sezioni in Tav. I).

Al di sotto dell'Ignimbrite Campana si ritrovano (Tav. I): depositi alluvionali antichi associati a formazioni piroclastiche (lapidee e non, originatesi durante cicli diversi di attività vulcanica flegrea e del Roccamonfina), a depositi transizionali e marini e ad estesi livelli torbosi. Tutti questi materiali, che non affiorano e che sono stati riconosciuti solo in perforazioni, hanno variazioni granulometriche assai frequenti e complessi rapporti spaziali come si osserva nelle Sezioni di Tav. I. Questo accumulo piroclastico-alluvionale-marino presenta, a seconda delle dimensioni degli elementi e dell'assortimento granulometrico, una permeabilità che varia da bassa a medio-alta e di fatto costituisce l'acquifero principale della piana.

Verso nord-ovest e ad est, la piana è limitata dai rilievi carbonatici del M.te Massico e della dorsale del M.te Maggiore e, a N, dal vulcano di Roccamonfina. Nei rilievi carbonatici l'infiltrazione efficace è elevata per l'alta permeabilità di queste successioni litologiche e l'assenza di significativi impermeabili intercalari. Si formano così cospicue falde di base che alimentano grosse sorgenti e/o importanti travasi sotterranei in direzione dei terreni contermini più ricettivi (CELICO *et alii*, 1977; CELICO, 1983; CORNIELLO *et alii*, 1990; BUDETTA *et alii*, 1994; CORNIELLO, 1994), sempre che alla base dei versanti non siano giustapposti ter-

this material which almost entirely covers the plain at the foot of the reliefs is not represented on the map, the soil characteristics and thicknesses are captured in the sections of Plate I. At the base of the limestone slopes the pyroclastites s.l. give way (or are associated) to detritus from the limestone slopes and dolomitic limestone while, in line with the river network, they are replaced by alluvial deposits linked to the Volturno's enlargement, with ancient and recent marsh phases as well as marine episodes. In these sediments major levels of peaty material are found at different stratigraphic heights extending over a considerable area (see Sections in Plate I).

Below the Campanian Grey Tuff are (Plate I): ancient alluvial deposits associated with pyroclastic formations (originating during various cycles of volcanic activity in the Campi Flegrei and Roccamonfina), transitional and marine deposits and extensive peat levels. All these materials, which do not crop out and which have been recognised only in boreholes, frequently vary in grain size and have complex spatial relationships, as observed in sections of Plate I. This pyroclastic/alluvial/marine build-up has, according to the size of elements and the grain-size assortment, a permeability which varies from low to medium-high, and actually makes up the plain's main aquifer.

To the north-west and east, the plain is bounded by the limestone massif of Mt. Massico and the ridge of Mt. Maggiore and, to the N, by the Roccamonfina volcano. In the limestone massifs effective infiltration is high due to the high permeability of these lithological successions and the absence of significant impermeable layers in between. Thus large aquifers form which feed large springs and/or major underground flows in the direction of more receptive neighbouring land (CELICO *et alii*, 1977, CELICO, 1983; BUDETTA *et alii*, 1994; CORNIELLO, 1994, CORNIELLO *et alii*, 1999), provided that at the base of the slopes there is no impermeable land adjacent, as oc-

reni poco permeabili come avviene per ampi settori del Massico (es.: complesso marnoso-arenaceo-argilloso, Fig. 3; Tav. I, Sez. B-B') e, più limitatamente, in corrispondenza dell'altra dorsale carbonatica (Fig. 3).

Nella piana sono stati censiti più di 120 pozzi attestati nell'acquifero al di sotto dell'IC: il corpo idrico ivi accolto risulta digitato nei livelli di maggiore granulometria ma vi è concordanza nei livelli di falda anche in pozzi con canne pescanti a profondità diverse (Fig. 3). Questa falda presenta condizioni arealmente diversificate. Nei settori al piede dei rilievi, la linea piezometrica si colloca in corrispondenza di forti spessori tufacei poco permeabili e la falda ha carattere nettamente confinato. Verso il Volturno, dove il complesso tufaceo manca del tutto o si fa più discontinuo, meno potente e diagenizzato, si determina una qualche continuità idraulica tra i materiali piroclastico/alluvionale/marini dell'acquifero ed i sovrastanti terreni alluvionali più recenti e la falda risulta semiconfinata o libera (Fig. 5).

La piezometria, con curve pressoché parallele ai versanti della dorsale di M.te Maggiore, del Roccamonfina e p.p. del M.te Massico (Fig. 3), rivela l'esistenza di travasi sotterranei dalle falde basali di tali rilievi verso l'acquifero della piana (Tav. I) come indicano i pochi dati piezometrici disponibili per i rilievi carbonatici, il chimismo delle acque sotterranee nella piana ed i dati di letteratura (CELICO, 1983). Gli apporti idrici con origine nel M.te Maggiore sono verosimilmente assai significativi data la notevole potenzialità delle falde di base di questi rilievi (CELICO *et alii*, 1977); relativamente meno cospicui i travasi dal Roccamonfina per la più ridotta permeabilità degli acquiferi locali.

Al M.te Massico i travasi sono probabilmente attivi solo nel settore sud-occidentale (Fig. 3). Altrove la falda di base è infatti efficacemente tamponata dai terreni arenaceo-marnoso-argillosi poco permeabili interposti tra il rilievo ed i materiali piroclastico/sedimentari della piana (Fig. 3 e Sez. B-B' di Tav. I) e/o presenta quote piezometriche inferiori rispetto a quelle della piana. Nel Comune di Falciano del Massico (1996), ad esempio, la falda del Massico si attesta intorno ai 20 m s.l.m.

occurs in broad sectors of Mt. Massico (e.g.: arenaceous-clayey-marly deposits, Fig. 3; Table I, Section B-B') and, to a lesser extent, at the other limestone ridge (Fig. 3).

In the plain more than 120 boreholes were censused, tapping the aquifer below the IC: the groundwater body intercepted is interbedded in the levels of higher grain size, but the flow can be considered a single one, as suggested by the water table levels, in complete agreement even in wells with screen at various depths (Fig. 3). This water table is diversified over space: in the sectors at the foot of the massifs, the piezometric level is situated where tuffaceous rocks are thick and fairly impermeable and the groundwater is clearly confined. Towards the Volturno, where there is no tuff complex whatsoever or it is more discontinuous, less powerful and diagenized, there occurs a certain hydraulic continuity between the pyroclastic/alluvial/marine materials of the aquifer and the more recent overlying alluvial soils, and the water table is semi-confined or unconfined (Fig. 5).

Piezometric analysis, showing curves almost parallel to the slopes of the Mt. Maggiore ridge, Roccamonfina and Mt. Massico p.p.(Fig. 3), reveals the existence of underground flows from the basal groundwater of these massifs to the plain aquifer, as indicated by the available piezometric levels of the carbonate aquifer, by the groundwater chemistry of the plain and by literature data (CELICO, 1983). The water flows originating in Mt. Maggiore are likely to be significant given the considerable potential of the aquifers at the base of these mountains (CELICO *et alii*, 1977). What is less considerable are the flows from Roccamonfina due to the lower permeability of local aquifers. At Mt. Massico the underground flows are probably only active in the south-western sector (Fig. 3). Elsewhere, the water table at the base is effectively buffered by clayey-marly-arenaceous soils of low permeability between the massif and the pyroclastic/sedimentary materials on the plain (Fig. 3 and Sector B-B' in Plate I) and/or has lower piezometric levels than those on the plain. In the Comune of

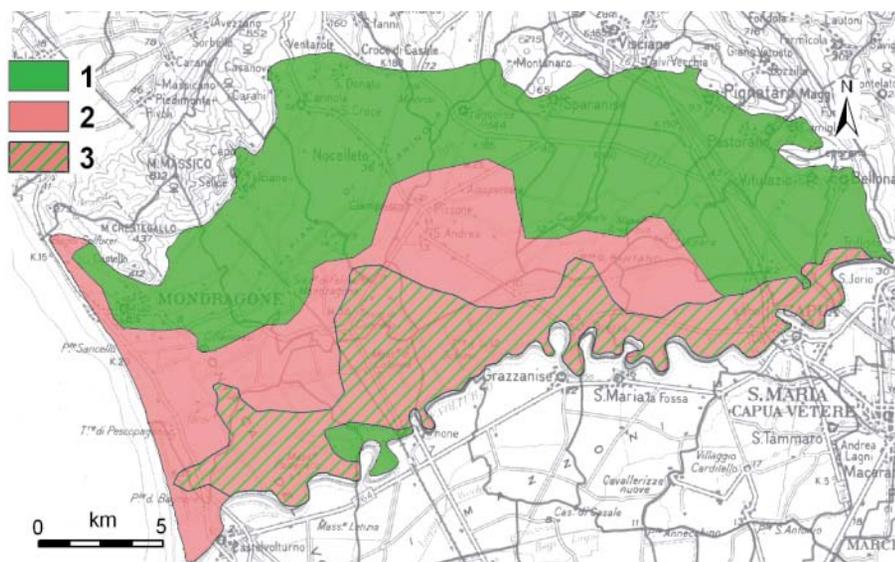


Fig. 5 - Condizioni di confinamento della falda principale. 1) Falda confinata; 2) Falda libera; 3) Falda semiconfinata
- Confinement conditions of the main aquifer. 1) Confined; 2) Unconfined; 3) Semi-confined

mentre quella della piana ha quote tra i 30 ed i 50 m s.l.m.

In ogni caso i rapporti tra le due falde sono resi palesi anche dal rapporto ionico alcalino-terrosi/alcalini i cui valori diminuiscono gradualmente (allontanandosi dai rilievi) in presenza di travaso sotterraneo ed in maniera repentina in caso contrario (Tav. II).

Il recapito definitivo della falda, il cui disegno piezometrico non evidenzia significative variazioni rispetto a rilievi precedenti (CELICO, 1983), è rappresentato dal mare; la falda sembrerebbe inoltre affiorare anche in corrispondenza del lago di Carinola (infatti le portate dell'emissario superano quelle affluenti - COMUNE DI FALCIANO DEL MASSICO, 1996) ed in diffuse venute d'acqua nella depressione della Regia Agnena. In effetti alcuni sondaggi eseguiti nella zona del lago di Carinola evidenziano la presenza nel sottosuolo di forti spessori tufacei. Ciò nei fatti dovrebbe impedire alla falda contenuta nell'acquifero soggiacente di alimentare lo specchio d'acqua; tuttavia è verosimile che tale alimentazione sia in realtà possibile per il locale disturbo del tufo (tettonico e/o legato ad alterazione) in conseguenza dei fenomeni che hanno portato alla individuazione delle forme crateriche.

Poco significativi sono infine i rapporti della falda col Fiume Volturno il cui alveo è impostato in terreni poco o punto permeabili; solo verso il mare il disegno piezometrico parrebbe indicare un'alimentazione dal fiume alla falda.

Falde superficiali, poco importanti e di interesse solo puntuale, sono segnalate nella parte più allentata delle potenti coltri tufacee (es.: zona di Capua) e nei terreni del complesso alluvionale superiore (parte centrale della piana). In diverse aree sono infine presenti sorgenti o pozzi ad elevata mineralizzazione; i più significativi sono i pozzi di Francolise (CORNIELLO, 1988), di Falciano del Massico e le sorgenti di Triflisco (CELICO *et alii*, 1977; CORNIELLO, 1988) (Fig. 3 e capitolo succ.).

CHIMICA DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Le analisi chimiche delle acque prelevate nei pozzi indicati nella Tav. II sono riportate nella Tab. 1; nella stessa Tav. II sono presentate anche le principali elaborazioni effettuate.

La Carta della conducibilità (riquadro A, Tav. II) mostra la prevalenza di valori compresi tra 500 e 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; valori più ridotti si hanno in settori di falda dove non si registrano apporti significativi dai rilievi carbonatici (zona di Calvi Risorta dove i rilievi sono idrogeologicamente separati dalla piana dall'interposizione di terreni scarsamente permeabili - Fig. 3) e/o dove il travaso è legato alle acque del Roccamonfina (zona di Carinola *s.l.*). In tale contesto risaltano tuttavia discontinue aree a più alta conducibilità. Quelle in corrispondenza dei rilievi carbonatici sono dovute a sorgenti minerali e/o a pozzi che hanno intercettato falde ad alta mineralizzazione (Tab. 2; Fig. 3).

I meccanismi che determinano l'origine di tutte queste manifestazioni sono noti da tempo (MAISONNEUVE & RISLER, 1979; SCHOELLER & SCHOELLER, 1979; CORNIELLO & DE RISO, 1986; CORNIELLO, 1988; 1994) e cioè: a) prossimità ad importanti discontinuità tettoniche (nel caso in esame, quelle che hanno generato il graben della Piana Campana) e b) risalita di gas (essenzialmente CO_2) lungo tali discontinuità

Falciano del Massico (1996), for example, the Massico water table lies at about 20 m a.s.l. while that of the plain has depths between 30 and 50 m a.s.l.

However, the relationship between the two aquifers is also clear from the alkaline-earth to alkali metals ratio which decreases gradually (with distance from the mountains) in the presence of an underground flow, and rapidly otherwise (Plate II).

The ultimate destination of the aquifer, whose piezometric level shows no significant variations against previous surveys (CELICO, 1983), is the sea. The aquifer would also appear to emerge at Lake Carinola (indeed, the flows of the outlet exceed those of the inlet - COMUNE DI FALCIANO DEL MASSICO, 1996) and at diffuse springs at the Regia Agnena depression. Really, boreholes drilled in the Carinola Lake area highlight the presence in the subsoil of considerable tuffaceous thicknesses. This should actually prevent the groundwater in the aquifer below from feeding the lake. However, this may well occur due to the local disturbance of the tuff (tectonic and/or weathering) resulting from phenomena that have led to the identification of crater-shaped forms.

Finally, the aquifer has little direct contact with the River Volturno: the river channel is set in fairly impermeable soils; only towards the river mouth does the piezometric level appear to indicate feeding from the river to the aquifer.

Shallow aquifers, of little significance and of only point-source interest, have been noted in the loosest section of the thick tuffaceous cover (e.g.: the Capua area) and on soils of the upper alluvial complex (central part of the plain). Moreover, in many areas there are high mineralized springs or wells; more significant are the Francolise (CORNIELLO, 1988) and Falciano del Massico wells, and the Triflisco springs (CELICO *et alii*, 1977; CORNIELLO, 1988) (Fig. 3 and next chapter).

GROUNDWATER CHEMISTRY

Chemical analysis of the water sampled from wells indicated in Plate II is reported in Table 1; in the same Plate II we also present the relevant groundwater chemistry maps.

The Hydraulic Conductivity Map (inset A, Plate II) shows the predominance of values between 500 and 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$; lower values were obtained in aquifer sectors where there is no significant input from the limestone mountains (Calvi Risorta area, where the mountains are hydrogeologically separated by the plain for the interposition of impervious sediments - Fig. 3) and/or where the underground flow is coming from the Roccamonfina groundwater (Carinola area). In this context, however, high conductivity areas are discontinuous. Those close to the limestone reliefs are due to mineral sources and/or wells which intercept highly mineralised groundwater (Tab. 2).

The mechanisms that lead to such phenomena have long been known (MAISONNEUVE & RISLER, 1979; SCHOELLER & SCHOELLER, 1979; CORNIELLO & DE RISO, 1986; CORNIELLO, 1988; 1994), namely: a) proximity to major tectonic discontinuities (in the case in question, those that generated the graben of the Campanian Plain) and b) the rise of gases (essentially CO_2) along these discontinuities with an

IDROGEOLOGIA ED IDROGEOCHIMICA DELLA PIANA COMPRESA TRA IL M.TE MASSICO ED IL F. VOLTURNO (CAMPANIA)

Bore-hole	T°	pH	Cond.	TDS	dH	CO ₂	HCO ₃	NO ₃	Cl	SO ₄	Na	K	Ca	Mg	Fe	Mn
			µS/cm	mg/L												
2	20.0	7.55	875	617	35.0	43	574	7.73	42.7	7.21	68.4	48.6	111.9	17.2	0.05	-
8	16.0	7.15	1388	982	43.4	125	913	5.11	103.9	2.38	154.8	80.8	124.9	29.8	2.84	1.98
9	15.5	7.26	1080	675	43.2	96	850	1.23	34.8	1.18	120.9	70.1	138.8	20.8	2.55	1.89
10	17.0	7.14	1104	728	41.3	34	797	4.49	35.6	1.38	95.5	61.3	125.4	24.3	1.35	3.10
12	15.0	7.11	1246	977	45.0	91	784	1.98	91.8	5.37	112.3	49.8	139.6	24.8	3.85	2.03
13	15.0	7.61	632	608	23.7	36	414	1.17	29.2	5.07	48.9	29.2	78.1	10.38	20	2.90
18	16.8	6.96	813	560	41.0	89	545	5.50	27.9	28.1	28.0	18.5	131.3	19.9	--	-
19	16.7	6.91	597	398	25.1	49	296	53.3	27.1	26.5	29.0	20.1	89.0	6.98	--	-
20	16.0	6.81	398	362	12.9	34	127	60.4	26.6	26.3	25.8	12.9	44.2	4.47	--	-
23	16.4	6.52	432	363	14.3	39	90	61.3	31.5	47.7	32.4	15.4	46.0	6.96	--	-
26	16.8	7.08	478	375	16.4	21	121	72.0	29.0	40.2	35.1	15.0	53.2	7.68	0.14	0.38
31	18.0	7.79	1798	1269	8.4	39	1044	7.79	179.7	1.15	461.5	69.3	12.3	13.1	0.70	0.57
34	15.5	7.09	1924	1310	57.4	112	750	9.87	329.2	4.31	205.9	49.4	180.5	30.1	1.19	3.30
35	18.0	7.50	3120	2086	24.6	69	1017	9.73	664.1	2.10	673.1	102.8	47.7	30.9	2.33	1.34
36	17.0	7.68	1203	833	24.8	85	794	12.4	71.7	1.00	214.0	60.6	61.2	23.3	1.41	0.85
42	21.6	6.88	1035	721	49.0	112	597	10.11	77.6	49.9	46.5	47.3	160.7	21.7	0.08	-
47	28.0	6.30	1870	1449	87.0	343	913	4.39	191.2	208.5	115.1	59.9	260.4	53.5	0.23	0.03
49	20.0	7.07	547	414	22.1	27	251	34.9	41.9	28.7	34.6	17.5	75.4	7.99	--	-
50	17.3	7.09	585	424	23.2	32	222	65.1	39.8	47.5	58.8	11.5	83.7	5.50	--	-
52	17.3	7.30	670	500	29.1	44	385	0.02	39.0	30.4	39.4	33.3	99.8	10.12	3.85	0.19
56	17.1	6.98	792	546	32.0	86	421	3.91	68.9	23.1	46.4	43.1	112.7	9.49	1.97	0.99
59	16.0	7.48	531	401	21.5	44	343	0.02	19.0	14.8	35.3	33.9	79.0	4.45	1.49	0.33
61	16.2	6.99	593	451	23.7	44	283	58.9	23.5	32.4	34.5	27.3	78.0	10.21	--	0.61
66	16.8	6.54	1137	817	59.5	237	784	24.1	38.7	46.8	37.1	21.5	185.0	32.5	0.10	0.01
67	16.9	6.64	849	631	40.8	126	488	45.2	30.7	56.8	30.8	23.9	134.9	17.4	--	-
70	17.0	7.26	884	613	36.8	75	588	7.73	49.7	5.13	60.9	41.5	117.7	18.1	3.58	1.34
74	19.0	7.21	1224	839	41.7	66	568	11.74	171.4	1.79	111.7	60.1	130.1	22.5	10	1.07
79	18.8	7.31	1044	796	36.7	36	335	128.6	85.7	78.8	89.4	54.0	119.1	17.0	--	0.04
81	18.0	7.01	617	480	27.9	39	240	38.7	37.5	50.8	31.7	13.7	99.3	7.53	--	-
84	20.0	7.66	1431	1056	40.7	16	287	129.5	228.8	120.2	169.0	57.5	145.0	11.1	--	0.19
86	22.4	7.05	1160	837	58.3	84	619	49.1	77.1	77.8	57.7	44.8	170.2	38.5	--	-
87	20.2	6.85	1057	755	45.1	116	570	4.81	67.7	52.9	49.7	12.8	147.4	20.2	0.30	0.01
88	22.8	6.85	1245	868	53.3	136	699	1.64	84.7	69.8	55.0	44.8	154.9	35.7	--	-
89	24.0	6.76	1256	848	60.3	150	768	1.44	84.4	65.7	60.7	47.7	169.8	43.7	0.90	0.04
94	20.2	7.28	520	436	22.6	31	222	21.8	19.0	81.3	25.9	20.7	80.7	5.93	0.06	-
95	17.6	6.99	836	654	38.3	74	419	19.6	49.0	80.8	36.8	31.1	132.1	13.1	--	1.15
98	17.9	6.54	418	349	13.6	56	140	44.2	25.0	45.9	26.9	19.6	45.4	5.60	--	-
100	17.5	7.25	530	438	17.8	28	193	29.7	22.0	57.9	23.8	21.2	61.1	6.26	--	0.01
103	17.2	6.85	374	355	13.0	26	109	50.7	24.4	35.5	26.7	12.2	44.1	4.84	--	-
104	18.2	7.00	628	552	21.0	32	176	60.4	66.4	49.9	46.7	27.2	72.9	6.80	--	-
105	14.0	7.60	734	556	27.0	57	530	3.94	18.2	0.27	62.2	32.5	82.6	15.6	2.41	0.60
109	16.9	6.81	605	520	25.8	51	206	85.9	28.6	59.0	26.5	15.5	90.6	7.83	--	0.01
110	17.6	7.30	693	517	30.9	52	418	14.4	29.6	32.8	40.2	26.4	105.1	11.46	--	-
112	16.9	6.74	307	212	6.5	50	133	16.3	19.1	8.18	25.2	23.9	19.5	3.97	--	-
113	16.9	7.54	496	343	20.1	39	327	7.84	16.3	9.13	33.4	23.4	65.6	9.01	--	0.03
115	16.4	6.61	1143	754	65.7	229	853	5.47	34.7	12.2	24.9	30.7	206.0	34.8	0.12	-
116	16.9	6.84	805	562	42.0	107	536	25.3	24.4	21.4	24.9	24.1	135.9	19.7	--	-
117	17.8	7.08	587	472	26.8	39	242	60.6	31.1	33.1	25.6	14.2	93.6	8.36	--	-

Tab. 1 - Dati chimico-fisici salienti delle acque campionate (giugno/luglio 2006); l'ubicazione è nella Tav. II; (--) < 0.02 mg/L, (-) < 0.01 mg/L - Summary of physico-chemical data of water sampled (June/July 2006) in the plain (location in Plate II); (--) < 0.02 mg/L, (-) < 0.01 mg/L

Parameter	MT. MASSICO			MT. MAGGIORE	
	La Calda source	Della Salute source	Falciano del Massico borehole	Francolese borehole	Triflisco source
CO ₂ (mg/L)	320	---	730	650	225
T (°C)	51	29	26	21	15
dH (°F)	149	165	---	89	78
TDS (mg/L)	3500	3978	1380	1060	834
rNa	30.04	37.74	4.36	1.70	1.33
rK	1.82	2.33	0.45	0.46	0.25
rCa	22.14	28.55	13.72	12.24	10.49
rMg	7.71	4.55	6.17	5.62	4.82
rHCO ₃	23.13	25.90	16.24	17.00	15.06
rCl	28.09	27.61	5.05	1.71	1.8
rSO ₄	10.35	14.54	3.48	1.00	0.19

Tab. 2 - Principali caratteristiche chimico-fisiche di sorgenti o pozzi nelle diverse zone idrominerali (per l'ubicazione cfr. Fig. 3; le sorgenti La Calda e Della Salute sono alla base sud-occidentale del Massico ma fuori della zona studiata - CORNIELLO, 1988) - Main chemical and physical characteristics of springs or boreholes in the various hydromineral zones (as for their location see Fig. 3; the La Calda and Della Salute sources are at the south-western base of Mt. Massico but outside the study area - CORNIELLO, 1988)

con incremento della reattività delle acque sotterranee verso le rocce carbonatiche; di qui gli alti valori del TDS e della durezza.

Lungo la costa, ed in corrispondenza dell'alveo del F. Volturmo, è invece una discontinua contaminazione marina a determinare i più elevati valori di conducibilità (cfr. paragrafo successivo).

In base ai dati analitici è stato possibile individuare nella falda della piana diversi areali con caratteristiche chimiche omogenee (riquadro C in Tav. II in cui sono riportati anche i grafici tipici - di D'AMORE *et alii*, 1983 - delle varie zone). Le zone a, estese in discontinui settori al piede dei rilievi carbonatici, accolgono le acque di recente travaso che presentano ancora netta l'impronta dovuta a questi acquiferi. Nelle zone b i grafici appaiono condizionati dalla lisciviazione di terreni piroclastici. Nella restante parte della piana (zona c) i grafici evidenziano contributi, in diversa proporzione, di questi due componenti. Verso il fiume, infine, si individua una nuova zona (c') sostanzialmente non dissimile per litologia e posta a valle della prima (considerando il deflusso della falda): malgrado ciò i grafici precedenti vi appaiono modificati in quanto le acque locali presentano quantità ridotte di solfati ed incrementi nello ione bicarbonato (cfr. oltre).

increase in groundwater reactivity towards the limestone rocks, hence the high values of TDS and hardness.

Along the coast and in line with the bed of the River Volturmo, salt water contamination led to higher conductivity values (see next chapter).

On the basis of the analytical data several areas with homogeneous chemical properties were able to be identified in the plain groundwater (inset C in Plate II which also reports the typical graphs by D'AMORE *et alii*, 1983 of the various zones). Zones a, stretching in discontinuous sectors at the foot of the limestone reliefs, collect the water from recent underground flows, which still bear the clear imprint of these aquifers. In zones b the graphs appear to be conditioned by the leaching of pyroclastic soils. In the remaining part of the plain (zone c) the graphs show contributions, in different proportions, of these two components. Finally, close to the river is a new zone (c') substantially similar in lithology and sited downstream of the former (in terms of groundwater flow): nevertheless, the previous graphs appear changed insofar as the local water has small quantities of sulphates and increases in the bicarbonate ion (see below).

Il rapporto alcalino terrosi/alcalini (riquadro B nella Tav. II) presenta valori piuttosto elevati a ridosso dei massicci carbonatici per la prevalenza degli ioni Ca e Mg legati all'interazione della falda con tali acquiferi; quantità che vanno comunque riducendosi a misura che ci si allontana dai rilievi (quindi seguendo il deflusso della falda) in quanto le acque di falda si arricchiscono degli alcalini presenti nei terreni della piana. La diminuzione dei valori è poi rapida in tutti quei settori dove le acque sotterranee (bicarbonato calciche) dei rilievi hanno difficoltà a travasare nella piana.

La contaminazione da nitrati, con valori > 50 mg/L, si osserva in vasti settori nord/nord-orientali della piana (riquadro D, Tav. II; cfr. anche BASILE *et alii*, 1991; REGIONE CAMPANIA, 2005); verso il F. Volturno i nitrati in falda hanno invece concentrazioni assai basse, dell'ordine di qualche mg/L. Stessa distribuzione di valori presenta lo ione SO₄ (riquadro E) che passa da 30-40 mg/L a valori intorno all'unità nelle aree prossime al fiume; in corrispondenza della stessa zona aumentano invece la CO₂ (ed HCO₃, Tab. 1) il Fe ed il Mn (riquadri F e G). Le variazioni indicate sono coerenti con la presenza, all'intorno del fiume, di un esteso settore di falda caratterizzato da un ambiente riducente alla cui instaurazione contribuiscono il carattere confinato (o semiconfinato) della falda e la ricchezza di sostanza organica nel sottosuolo legata soprattutto agli estesi e potenti livelli di torba (Tav. I). In siffatte condizioni l'ossidazione della materia organica avviene non più a spese dell'ossigeno atmosferico (ormai consumato) ma di quello legato ai nitrati (processo di denitrificazione) ed ai solfati (MATTHESS, 1982; CORNIELLO *et alii*, 1990; KEHEW, 2001; DEBERNARDI *et alii*, 2005). La produzione della CO₂, che accompagna il fenomeno, riduce il pH e facilita la messa in soluzione del Fe e del Mn.

Ingressione marina

Per valutare più compiutamente l'ampiezza areale della contaminazione marina il campionamento è stato esteso ai pozzi indicati in Fig. 6 nella quale sono riportate anche le isocone dei cloruri. Queste evidenziano valori particolarmente elevati a ridosso del Volturno e fino all'altezza di Cancellò Arnone; nel resto della piana i cloruri hanno infatti concentrazioni dell'ordine di 50-100 mg/L (Tab. 1; CORNIELLO & DUCCL, 2007).

La particolare localizzazione, lungo l'asta fluviale della contaminazione marina, è verosimilmente dovuta a) alla diffusione nell'alveo della più densa acqua marina e b) ai rapporti di alimentazione che localmente legano il fiume alla falda e che pertanto possono consentire alle acque saline di distribuirsi nel corpo idrico sotterraneo più prossimo al fiume. La risalita salina lungo l'alveo - secondo uno schema già descritto, tra gli altri, per l'Arno da GIANI & PANICHI (2003), per il Tevere da CAPELLI *et alii* (2007) e per il LAMONE da ANTONELLINI *et alii* (2008) - può verificarsi in quanto il fondo dell'alveo del Volturno (alla foce) si trova 3.50-3.70 m al di sotto del livello marino (i dati relativi al fondo dell'alveo derivano da studi dell'Autorità di Bacino dei Fiumi Liri-Garigliano e Volturno); solo nella zona di Cancellò Arnone il fondo dell'alveo supera il livello del mare e di fatto ciò segna il limite massimo della risalita. Significativamente, proprio in corrispondenza di questo abitato, tendono a ridursi le concentrazioni di cloruri in falda (Fig. 6).

The alkaline-earth to alkali metals ratio (inset B in Plate II) has fairly high values close to the carbonatic massifs due to the predominance of Ca and Mg ions linked to the interaction of the groundwater with other aquifers. However, such quantities diminish with distance from the mountains (thus following the aquifer flow) insofar the groundwater is enriched by alkali cations found in the soils of the plain. The decrease in values is then rapid in all those sectors where the calcium bicarbonate groundwater of the reliefs encounters difficulty flowing into the plain.

Contamination by nitrates, with values > 50 mg/L, is observed in the plain's vast north/north-eastern sectors (inset D, Plate II; see also BASILE *et alii*, 1991; REGIONE CAMPANIA, 2005); towards the River Volturno the groundwater nitrates have fairly low concentrations, amounting to a few mg/L. The same distribution of values occurs for the SO₄ ion (inset E) which decreases from 30-40 mg/L to about one mg/L in the areas close to the river; in the same area, however, CO₂ (and HCO₃, Table 1) Fe and Mn (insets F and G) increase.

The variations are consistent with the presence, around the river, of an extensive aquifer section characterised by a reducing environment. This environment is established both by the confined (or semi-confined) nature of the aquifer and the wealth of organic matter in the subsoil chiefly related to the extensive, rich levels of peat (Plate I). In such conditions, oxidation of organic matter no longer occurs at the expense of atmospheric oxygen (already consumed) but of nitrates (process denitrification) and sulphates (MATTHESS, 1982; CORNIELLO *et alii*, 1990; KEHEW, 2001; DEBERNARDI *et alii*, 2005). CO₂ production which accompanies the phenomenon reduces the pH and aids the solution of Fe and Mn.

Salt-water intrusion

To determine more precisely the area of salt-water contamination, sampling was extended to the wells indicated in Fig. 6 in which we also report the isocones of chlorides. The latter show particularly high values close to the Volturno and as far as Cancellò Arnone; in the rest of the plain chlorides reach concentrations of about 50-100 mg/L (Table 1; CORNIELLO & DUCCL, 2007).

The particular location of salt-water contamination along the river axis is likely to be due to a) spread into the channel of denser sea water and b) supply factors linking the river to the groundwater and which may thus allow salt water to be distributed into the underground water body close to the river. The rise of saline water along the channel - according to a pattern described elsewhere, amongst others, for the River Arno by GIANI & PANICHI (2003), for the Tiber by CAPELLI *et alii* (2007) and the LAMONE by ANTONELLINI *et alii* (2008) - may occur insofar as the Volturno channel bed (at its mouth) lies at 3.50-3.70 m below sea level (the data for the channel bed come from studies by the Liri-Garigliano and Volturno River Basin Authority); only in the area of Cancellò Arnone is the channel bed above sea level, which indeed marks the limit of the rise. Significantly, precisely in correspondence with this town, groundwater chloride concentrations tend to decrease (Fig. 6).

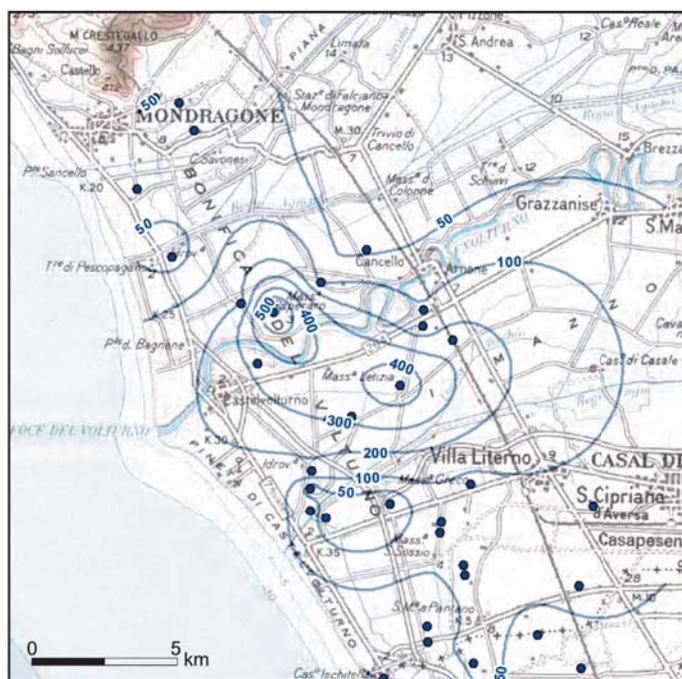


Fig. 6 - Distribuzione in falda dei cloruri (mg/L) con indicazione dei pozzi di campionamento
 - Distribution in the groundwater of chlorides (mg/L) indicating the sampled wells

LA VULNERABILITÀ ALL'INQUINAMENTO DELLE FALDE

La Carta della Vulnerabilità all'inquinamento della falda principale (Fig. 7) dell'area di studio è stata realizzata utilizzando il metodo parametrico SINTACS - Release 5 (CIVITA & DE MAIO, 2000). Per ognuno dei 7 parametri previsti dal metodo è stato allestito il relativo strato informativo (layer).

I dati raccolti, relativi sia ai sondaggi stratigrafici che ai pozzi per acqua, sono stati organizzati in database strutturati in maniera tale da consentire l'interfacciamento con un sistema informativo geografico.

Le condizioni di confinamento o meno della falda sono determinate dalla presenza della facies più litoide dell'Ignimbrite Campana la cui base (bottom) è stata ricostruita utilizzando le stratigrafie dei sondaggi e le sezioni. La falda principale è risultata prevalentemente confinata (51%) in tutto il settore a nord e in un piccolo settore vicino il corso del F. Volturno (in prossimità di Cancellò Arnone), mentre è libera (26%) o semiconfinata (23%) nel settore meridionale (Fig. 5). Il semiconfinamento è operato dalla presenza di ingenti spessori (di sovente superiori ai 20 m) di depositi alluvionali a granulometria sottile.

Le procedure utilizzate per pervenire alla redazione degli strati informativi previsti dal metodo SINTACS sono sintetizzate in Tab. 3.

Nell'area di studio sono state poi adottate due delle 5 stringhe di pesi previste dal SINTACS e cioè: per le aree urbanizzate di Mondragone, Castelvoturno e Capua è stata utilizzata la stringa di pesi Impatto rilevante (aree urbanizzate e/o caratterizzate da attività industriale o agricola), altrove la stringa per Impatto normale (assenza di sorgenti diffuse di contaminazione).

THE AQUIFER CONTAMINATION VULNERABILITY MAP

The parametric method SINTACS in the latest release 5 (CIVITA & DE MAIO, 2000) was used to draw up the Aquifer Contamination Vulnerability Map of the main aquifer of the study area (Fig. 7). The SINTACS method determines vertical vulnerability using seven parameters, which requires the construction of seven SINTACS maps (layers). The data collected during the last few years by the authors (borehole stratigraphies, piezometric levels) were organized in a geographic database purposely designed to satisfy the analytical needs of the GIS for vulnerability assessment.

To determine the aquifer conditions, the Campanian Ignimbrite was considered as the confining layer, and its bottom, identified on the basis of borehole stratigraphies and the hydrogeological cross-sections, was compared with the piezometric surface. The main aquifer is chiefly confined (51%) in the northern sector and in a small sector near the Volturno River (close to Cancellò Arnone), while it is unconfined (26%) or semi-confined (23%) in the southern sector (Fig. 5). Semi-confined conditions are caused by the presence of thick alluvial deposits (often more than 20 m) with fine grain size.

The procedures to define each parameter of the SINTACS method, the range variation and the assigned rating are shown in Tab. 3. In the study area we adopted two classes of the five weight multiplier classes used by SINTACS: in the sectors comprising the urban areas of Mondragone, Castelvoturno and Capua the High Impact weight class (urbanised and/or industrial zones or highly agro-chemical supported farmland) was used; elsewhere the weight class for Normal Impact (absence of non-point sources of contamination) was adopted.

Parametro SINTACS	Procedimento utilizzato/Commenti	Valore Pred./ Range	Punteggio Pred. (P)
S <i>Soggiacenza</i>	Dal modello digitale del terreno (DEM), dalla piezometria e dai dati stratigrafici. Falda libera: prof. livello piezometrico (giugno-luglio 2006); falda confinata: prof. base dell'Ignimbrite Campana.	Libera: < 10 m Confinata: ≥ 40m	Libera: 7-10 Confinata: 1-2
I <i>Infiltrazione</i>	Dal bilancio Idrogeologico. P: dati Servizio Idrografico anni 1971/99 (14 stazioni); ETR: Turc con dati di T Servizio Idrogr. anni 1971/99 (5 stazioni) territorializzati con DEM; CIP: assegnati sulla base dei complessi idrogeologici affioranti, ai quali sono state aggiunte le aree urbanizzate dalla Carta dell'Utilizzazione Agricola dei Suoli (SESIRCA, 2004).	I = 25-280 mm/anno	1 - 4
N <i>Non saturo</i>	Medie pesate del punteggio assegnato ai vari litotipi individuati in 478 stratigrafie di sondaggi e dalla piezometria (120 dati relativi al periodo giugno-luglio 2006).	-	2 - 3
T <i>Tipologia del suolo</i>	Media pesata dei valori del fattore T calcolati per ogni orizzonte pedologico entro la profondità utile alla radiazione.	Gley-Vertic Cambisols Luvì-Vitric Andosols	4
A <i>Acquifero</i>	Medie pesate del punteggio assegnato ai vari litotipi individuati in 478 stratigrafie e dalla piezometria (giugno-luglio 2006).	-	5 - 7
C <i>Conducibilità idraulica</i>	Dagli abachi SINTACS in base alla litologia dell'acquifero (478 stratigrafie di sondaggi). In taluni casi tarati con dati sperimentali di Trasmissività valutando lo spessore dell'acquifero dai dati dei sondaggi e dalla piezometria (giugno-luglio 2006).	1*10 ⁻³ - 1*10 ⁻⁷ m/s	5
S <i>Superficie topografica</i>	Dal modello digitale del terreno usando la funzione slope del GIS ILWIS.	< 3.5 %	9 - 10
Iv (indice di vulnerabilità) = Σ[P(1,7) * W(1,n)] dove W(1,n) è il peso di ogni parametro			
GRADO DI VULNERABILITÀ: Estremamente elevato (Iv ≥211); Elevato (210≥Iv ≥187); Alto (186≥Iv ≥141); Medio (140≥Iv ≥106); Basso (105≥Iv ≥81); Molto basso (Iv ≤80)			

SINTACS parameter	Action performed/Comments	Pred. Value/ Range	Pred. Rating (P)
S <i>Depth to water</i>	From the DEM, from the piezometry and from stratigraphical data. Unconfined aquifer: depth of the piezometry (June-July 2006); confined aquifer: depth of the bottom of the Campanian Ignimbrite.	Unconfined: < 10 m Confined: ≥ 40m	Unconfined: 7-10 Confined: 1-2
I <i>Recharge action</i>	From the hydrogeological budget. P: Hydrographical Survey Data (14 stations), years 1971/99. Actual Evapotranspiration: Turc method; Hyd. Survey temperature data (years 1971/99 - 5 stations) spatialized using the DEM; Potential Infiltration Coeff.: on the basis of the outcropping lithology and the urbanized areas (Land Use Map - SESIRCA, 2004).	I = 25-280 mm/year	1 - 4
N <i>Effect of the vadose zone</i>	Weighted mean of the ratings assigned to each lithology recognized in 478 borehole stratigraphies and from 120 piezometric levels (June-July 2006).	-	2 - 3
T <i>Effect of the soil media</i>	Weighted mean of the T factor evaluated for each soil horizon included in the rooting depth.	Gley-Vertic Cambisols Luvì-Vitric Andosols	4
A <i>Characteristic of the aquifer</i>	Weighted mean of the ratings assigned to each lithology recognized in 478 borehole stratigraphies and from 120 piezometric levels (June-July 2006).	-	5 - 7
C <i>Hydraulic conductivity</i>	From the graphs in CIVITA & DE MAIO (2000), on the basis of the aquifer lithology (478 borehole stratigraphies). Partially from experimental transmissivity data, evaluating the thickness of the aquifer from stratigraphical and piezometric data.	1*10 ⁻³ - 1*10 ⁻⁷ m/s	5
S <i>Topographic slope</i>	From the digital elevation model using the slope function of the ILWIS GIS.	< 3.5 %	9 - 10
Iv (vulnerability index) = Σ[P(1,7) * W(1,n)] where W(1,n) is the weight in each class			
VULNERABILITY DEGREE: Extremely high ((Iv ≥211); Very high (210≥Iv ≥187); High (186≥Iv ≥141); Moderate (140≥Iv ≥106); Low (105≥Iv ≥81); Very low (Iv ≤80)			

Tab. 3 - Procedimenti utilizzati per la definizione dei vari parametri SINTACS e della Carta di Vulnerabilità - Action performed to define the SINTACS parameters and the Aquifer Contamination Vulnerability Map

La Carta della Vulnerabilità all'inquinamento (Fig. 7) è stata classificata secondo le 6 classi di Vulnerabilità previste dal metodo SINTACS (CIVITA & DE MAIO, 2000). Le classi di vulnerabilità estreme non sono presenti, quelle predominanti sono la media e la bassa. Un'ampia zona ad alta vulnerabilità (estesa per più di 40 km²) è presente nel settore costiero per la scarsa soggiacenza e per la debole azione di mitigazione operata dal non saturo e dal suolo nei confronti degli inquinanti.

The SINTACS method provides six vulnerability degrees (CIVITA & DE MAIO, 2000) from Very Low to Extremely High. In the Aquifer Contamination Vulnerability Map of the study area (Fig. 7) the extreme vulnerability classes are absent. The main vulnerability degrees are moderate and low. A wide sector (more than 40 km²) with high vulnerability is present in the coastal part due to the low depth to water and the weak mitigation role played against the contaminants by the soil media and the vadose zone.

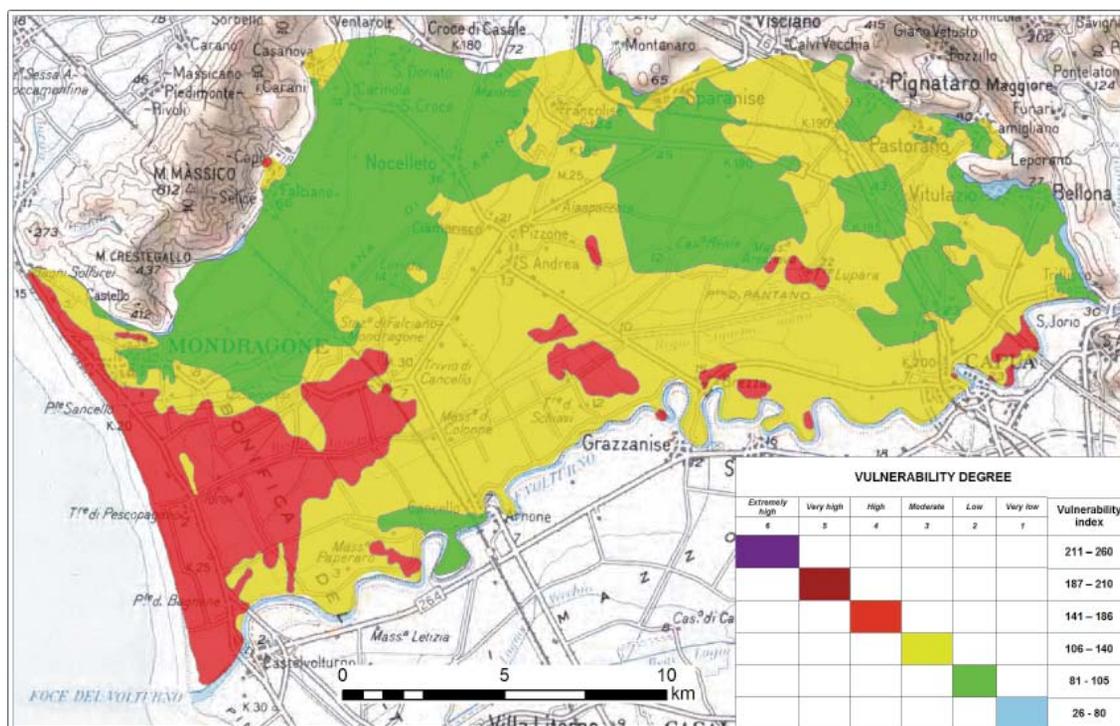


Fig. 7 - Carta della vulnerabilità all'inquinamento della falda principale redatta con il metodo SINTACS (CIVITA & DE MAIO, 2000) - The Aquifer Contamination Vulnerability Map drawn up following the SINTACS method (CIVITA & DE MAIO, 2000)

CONCLUSIONI

I molti dati acquisiti ed elaborati per la piana a nord del basso corso del Fiume Volturno hanno consentito, in primo luogo, di definirne, nel dettaglio, l'assetto stratigrafico, di individuare l'acquifero principale e le sue condizioni ai limiti.

Anche qui, come per la piana a sud del fiume, vasti settori di falda sono risultati contaminati da nitrati. La distribuzione delle aree compromesse è comunque apparsa fortemente condizionata dall'esistenza, nella falda a ridosso del corso d'acqua, di un ambiente riducente. In tutto questo settore le forme ossidate (nitrati, solfati) vi compaiono pertanto con quantità veramente esigue (dell'ordine del mg/L), accompagnate da ricchezza in CO₂ e da tenori significativi di Fe e Mn.

Una situazione da tener in debito conto nella valutazione dello stato qualitativo delle acque sotterranee ai sensi del D. Lgs. 152/2006.

Lungo la costa l'inquinamento marino è in genere contenuto; decisamente contaminata è invece una fascia in corrispondenza della foce del Volturno. Questa zona si estende (in sinistra ed in destra del fiume) fino all'altezza dell'abitato di Cannello Arnone dove, significativamente, la quota del fondo dell'alveo fluviale supera il livello marino. Osservazioni che indicherebbero la risalita del cuneo marino lungo l'alveo ed un'interazione tra questo e la falda limitrofa.

Il prof. Corniello (Responsabile di un'Unità di Ricerca del PRIN 2005) ha impostato lo studio successivamente sviluppato con i proff. Ducci e Trifuoggi. I dott.ri Rotella e Ruggieri hanno curato la redazione, in formato digitale, delle carte tematiche e l'elaborazione dei molti dati acquisiti *in situ* e c/o Enti.

CONCLUSIONS

After extensive data acquisition and analysis for the northern plain of the lower course of the River Volturno, the stratigraphy of the plain was defined in detail, the main aquifer identified and its limit conditions determined. As in the plain south of the river, vast sectors of the aquifer are contaminated by nitrates. Distribution of the contaminated areas appeared greatly conditioned by the presence, in the groundwater close to the river, of a vast reducing environment. Throughout this sector, oxidated forms (nitrates, sulphates) thus appear in very small quantities (mg/L), accompanied by enrichment in CO₂ and significant Fe and Mn levels. Due account should be taken thereof in assessing groundwater quality pursuant to Law Decree 152/2006.

Along the coast, salt water intrusion appeared generally limited. However, a strip close to the mouth of the Volturno was definitely contaminated. This zone stretches (left and right of the river) as far inland as Cannello Arnone where the level of the channel bottom significantly exceeds sea level. This would indicate the rise of the salt-water wedge along the channel and interaction between the wedge and the surrounding groundwater.

Prof. A. Corniello (as Scientist-in-Charge of a Research Unit established under PRIN 2005) set up the research project, afterwards developed with Prof. Ducci and Prof. Trifuoggi. Dr. Rotella and Dr. Ruggieri drew up, in digital format, the thematic maps produced and managed data acquisition *in situ* and c/o local authorities.

OPERE CITATE / REFERENCES

- ANTONELLINI M., MOLLEMA P., GIAMBASTIANI B., BISHOP K., CARUSO L., MISCHIO A., PELLEGRINI L., SABIA M., ULAZZI E. & GABBANELLI G. (2008) - *Salt water intrusion in the coastal aquifer in the southern Po Plain, Italy*. Hydrogeology Journal, **16** (8): 1541-1556.
- BASILE G., ARIENZO M., CELANO G. & PALMIERI G. (1991) - *Qualità delle acque sotterranee nel comprensorio del basso Volturno*. Inquinamento, **4**: 58-65.
- BIGGIERO V., FIORENTINO M. & PIANESE D. (1994) - *Analisi dell'evoluzione d'alveo del tronco vallivo del fiume Volturno*. Atti del Meeting Annuale UU.OO. MURST 40% "Processi Fluviali: osservazioni analisi e controllo", Padova, 10/1992: 48 pp.
- BUDETTA P., CELICO P., CORNIELLO A., DE RISO R., DUCCI D. & NICOTERA P. (1994) - *Carta idrogeologica della Campania 1/200.000 e relativa memoria illustrativa*. Atti IV Geoengineering International Congress: Soil and Groundwater Protection, Geda, **2**: 565-586.
- CAIAZZA D., GUADAGNO G., ORTOLANI F. & PAGLIUCA S. (1997) - *Variazioni climatico-ambientali e riflessi socio-economici nell'Alta Terra di Lavoro tra Antichità ed Età di Mezzo*. Atti Conv. Scienze della Terra e l'Archeometria. Napoli, 20-21/2/1996: 66-74.
- CAPELLI G., MAZZA R. & PAPICCIO C. (2007) - *Intrusione salina nel Delta del F. Tevere. Geologia, idrologia e idrogeologia del settore romano della piana costiera*. Giornale di Geologia Applicata, **5**: 13-28.
- CELICO P. (1983) - *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionali, Abruzzo, Molise e Campania)*. Quaderni CASMEZ. **4/2**: 225 pp..
- CELICO P., CIVITA M. & CORNIELLO A. (1977) - *Idrogeologia del margine nord-orientale della Conca Campana (Massicci dei Tifantini e del M. Maggiore)*. Mem. e Note Ist. Geol. Appl., **13**: 29 pp.
- CINQUE A. & ROMANO P. (2001) - *Evoluzione geomorfologica e caratterizzazione oro-idrografica della Regione*. In L'ambiente geologico della Campania, a cura di A. Vallario, CUEN: 59-90.
- CIVITA M. & DE MAIO M. (2000) - *Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il sistema parametrico SINTACS R5*. Pitagora Ed.: 240 pp.
- COMUNE DI FALCIANO DEL MASSICO (1996) - *Studio idrogeologico finalizzato alla realizzazione di nuove opere di captazione di acqua per uso potabile*. Relazione inedita: 30 pp.
- CORNIELLO A. (1988) - *Considerazione idrogeologiche su talune acque minerali e termominerali della Provincia di Caserta*. Mem. Soc. Geol. It., **41**: 1053-1063..
- CORNIELLO A. (1994) - *Lineamenti idrogeochimici dei principali massicci carbonatici della Campania*. Mem. Soc. Geol. It., **51**: 333-342..
- CORNIELLO A. & DE RISO R. (1986) - *Idrogeologia ed idrochimica delle sorgenti dell'Agro Telesino (Benevento)*. Geologia Applicata ed Idrogeologia, **21**: 53-84.
- CORNIELLO A., DE RISO R. & DUCCI D. (1990) - *Idrogeologia e idrochimica della Piana Campana*. Mem. Soc. Geol. It., **45**: 351-360.
- CORNIELLO A., DUCCI D. & RUGGIERI G. (2007) - *Areal Identification of Groundwater Nitrate Contamination Sources in Periurban Areas*. Journal of soils and sediments, **7** (4): 159-166.
- CORNIELLO A. & DUCCI D. (2007) - *Groundwater Chemistry and Contamination in the Volturno River Plain, (southern Italy)*. In Ribeiro L., Chambel A. & Condeso de Melo M. T. (Eds.) Proceedings of the XXXV IAH Congress "Groundwater and Ecosystems". Paper 178: 10 pp.
- D'AMORE F., SCANDIFFIO G. & PANICHI G. (1983) - *Some observations on the chemical classification of ground waters*. Geothermics, **12** (2/3): 141-148.
- DEL PRETE S., DE RISO R. & SANTO A. (2004) - *Primo contributo sui sinkhole di origine naturale in Campania*. Atti I Conv. "Stato dell'arte sullo studio dei fenomeni di sinkhole e ruolo delle Amministrazioni statali e locali nel governo del territorio", 20-21 maggio 2004, APAT: 361-376.
- DEBERNARDI L., DE LUCA D.A. & LASAGNA M. (2005) - *Il processo di denitrificazione naturale nelle acque sotterranee del Piemonte*. Aquifer Vulnerability and Risk, 2nd International Workshop Aquifer vulnerability assessment and mapping - 4th Congress on the Protection and Management of Groundwater Colorno, 21-23 Settembre 2005: 27 pp.
- FACCENNA C., FLORINDO F., FUNICIELLO R. & LOMBARDI S. (1993) - *Tectonic setting and sinkhole features: case histories from Western Central Italy - Quaternary Proceedings*, **3**: 47-56.
- GIANI P. & PANICHI C. (2003) - *Caratterizzazione chimica-isotopica del F. Arno nel tratto terminale con particolare riferimento all'interazione con gli acquiferi della piana di Pisa*. Pubblicazione n. **2640** del GNDCI: 95 pp.
- KEHEW A. E. (2001) - *Applied Chemical Hydrogeology*. Prentice Hall: 363 pp.
- MAISONNEUVE J. & RISLER J.J. (1979) - *La ceinture péri-alpine "carbo-gazeuse" de l'Europe occidentale*. Bulletin du B.R.G.M., Section III, **2**: 109-120.
- MATTHESS G. (1982) - *The Properties of Groundwater*. John Wiley & Son: 406 pp.
- REGIONE CAMPANIA (2005) - *Programma d'azione per le zone vulnerabili ai nitrati di origine agricola*. Assessorato all'Agricoltura e alle Attività Produttive: 31 pp.
- ROMANO P., SANTO A. & VOLTAGGIO M. (1994) - *L'evoluzione morfologica della pianura del Fiume Volturno (Campania) durante il tardo Quaternario (Pleistocene medio-superiore / Olocene)*. Il Quaternario, **7** (1): 41-56.
- ROSSI F. (1994) - *Alluvioni e dissesti delle reti di drenaggio*. In *Rischi naturali ed impatto antropico nell'area metropolitana di Napoli*. A cura del CIRAM, Acta Napolitana, Guida: 257 -268 .
- SCHERILLO A., FRANCO E., DI GIROLAMO P. & STANZIONE D. (1965) - *Guida alle "forme crateriche" della Campania settentrionale*. Atti Accademia Pontaniana: 49-52.
- SCHOELLER H. & SCHOELLER M. (1979) - *Une étude des eaux thermominérales du Massif central français*. Bulletin du B.R.G.M., section III, **2**: 121-156.

IDROGEOLOGIA ED IDROGEOCHIMICA DELLA PIANA COMPRESA TRA IL M.TE MASSICO ED IL F. VOLTURNO (CAMPANIA)

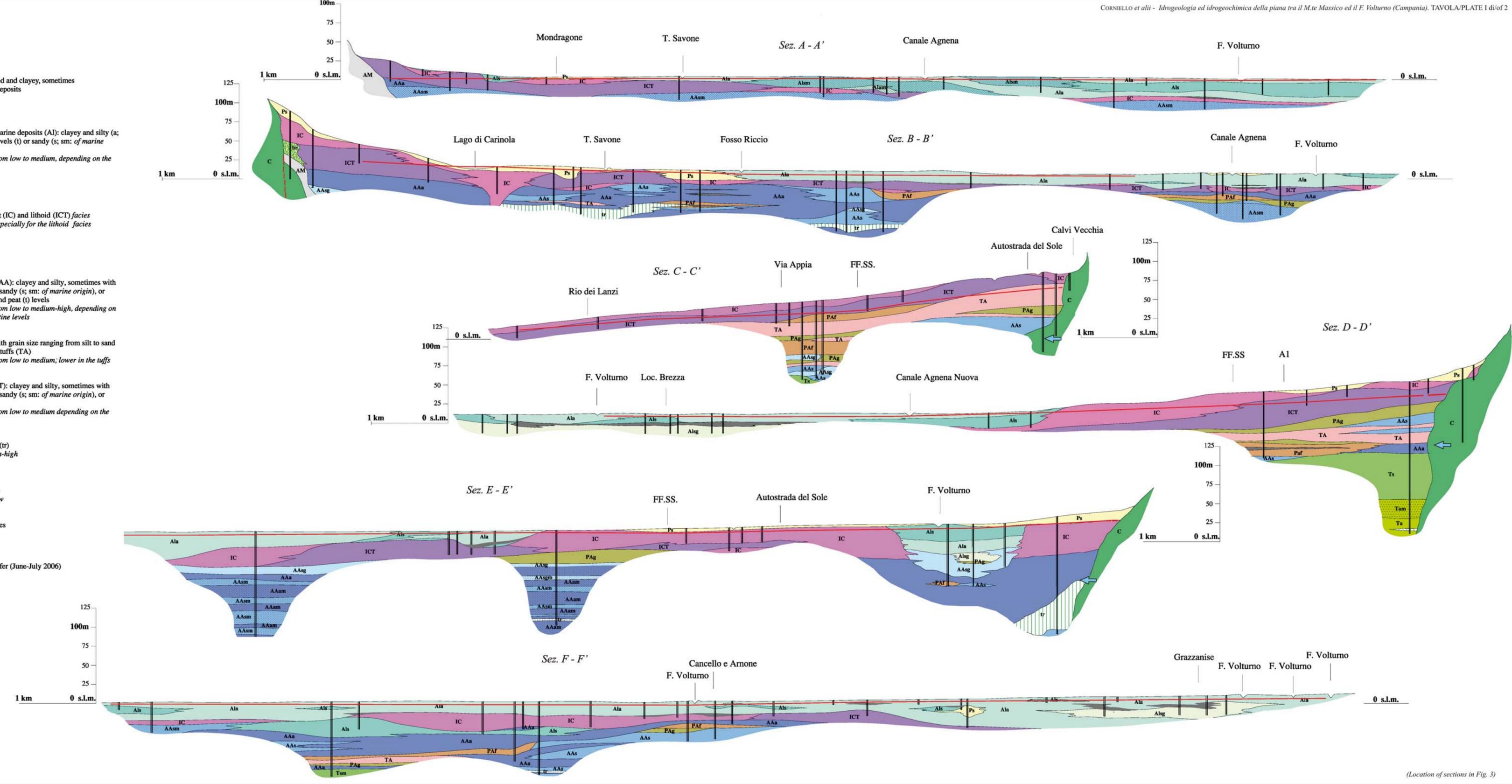
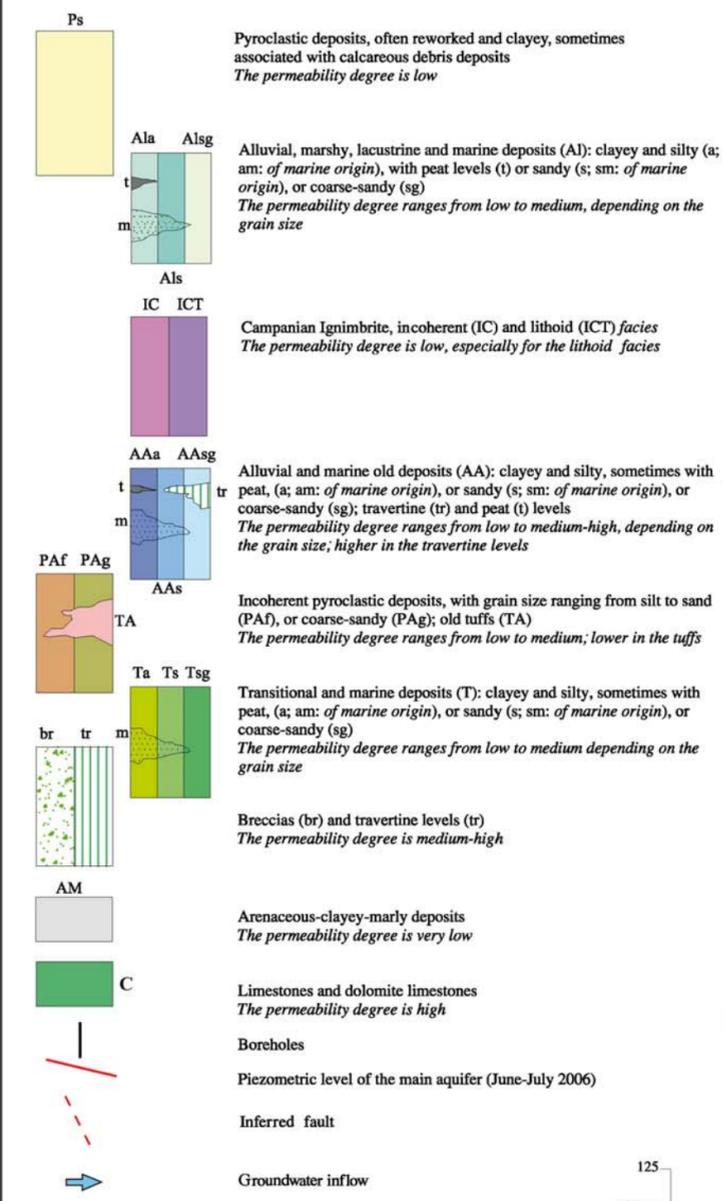
SERVIZIO IDROGRAFICO - *Annali Idrologici: 1971÷1999: parte I*. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma

SESIRCA - *Settore Sperimentazione Informazione Ricerca e Consulenza in Agricoltura della Regione Campania (2004): Carta dell'Utilizzazione Agricola dei Suoli della Campania*. Carta in scala 1/50.000.

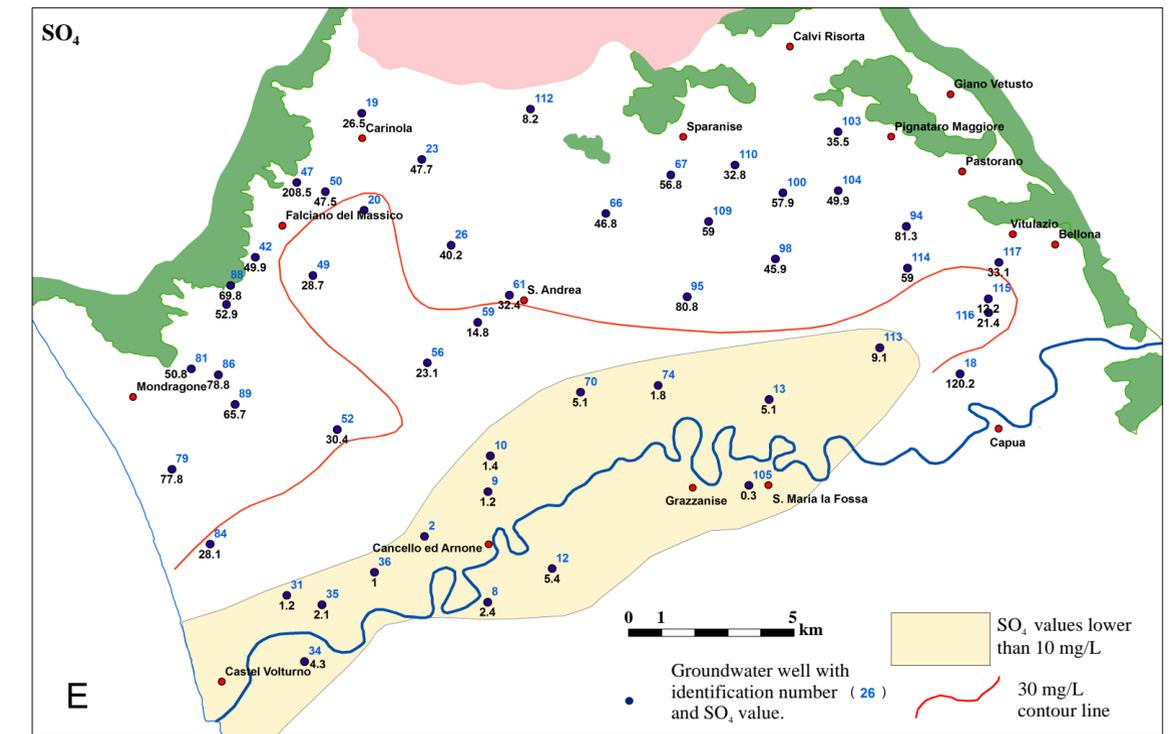
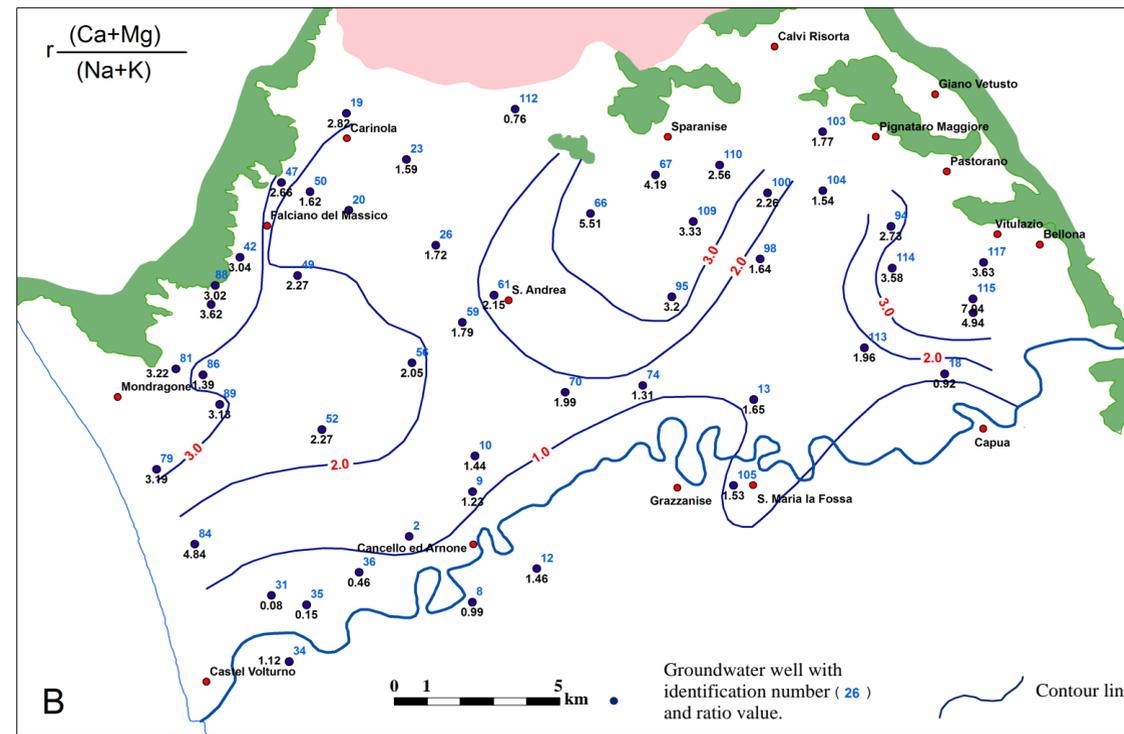
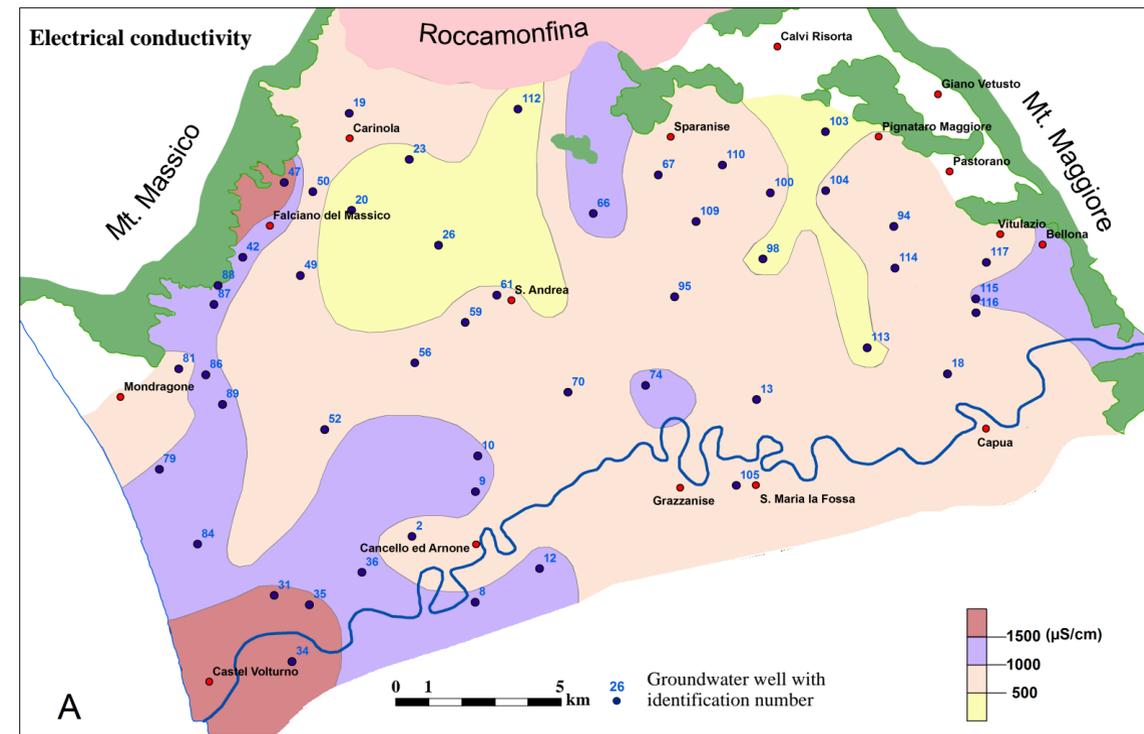
VIPARELLI M. (1963) - *Sistemazione dell'asta terminale del Volturno da Capua al mare*. Università di Napoli, Facoltà di Ingegneria - Istituti Idraulici, 204: 24 pp.

Received March 2009 - Accepted July 2009

LEGEND



(Location of sections in Fig. 3)



Roccamonfina Volcano

Carbonate Mountains

