



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II
CENTRO INTERDIPARTIMENTALE DI RICERCA AMBIENTALE
C.I.R.AM.

DOTTORATO DI RICERCA IN
ANALISI DEI SISTEMI AMBIENTALI

XXIV CICLO

STUDIO DELLE RISORSE IDRICHE SOTTERRANEE IN UN BACINO
CARBONATICO STRUTTURALMENTE COMPLESSO

Dottorando
Gennaro Maria Monti

Coordinatore: Prof. Filippo Barattolo

Relatori: Prof. Alfonso Corniello
Prof.ssa Daniela Ducci

Correlatore: Ing. Paola Gattinoni (Politecnico di Milano)

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	1
1.1 PREMESSA	1
1.2 ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTA	2
2. AREA DI STUDIO	4
2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO	4
2.2 INQUADRAMENTO IDROGRAFICO	5
3. LINEAMENTI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI	8
3.1 SINTESI DELLE CONOSCENZE GEOLOGICHE DEI MONTI PICENTINI	8
3.2 STRATIGRAFIA DELL'AREA DI STUDIO	14
3.3 IL BACINO LACUSTRE DI ACERNO	19
CARSISMO	22
4. CONOSCENZE IDROGEOLOGICHE DELLA CONCA DI ACERNO	23
5. DATI PREESISTENTI E DI NUOVA ACQUISIZIONE	25
5.1 DATI SPAZIALI	25
5.1.1 Carta Tecnica Regionale (C.T.R.)	25
5.1.2 Carta geologica	25
5.1.3 Carta del suolo	25
5.1.4 Carta di uso del suolo	26
5.1.5 Carta del substrato roccioso	26
5.2 DATI PUNTUALI	27
5.2.1 Dati stratigrafici e idrogeologici	27
5.2.2 Sorgenti	29
5.2.3 Dati climatici	31
5.2.4 Misure di portate in alveo	32
5.2.5 Dati chimici e isotopici	34
5.2.6 Valori di conducibilità idraulica	36
6. METODOLOGIA	38
6.1 ANALISI CHIMICHE DELLE ACQUE SORGIVE	38
6.2 ANALISI ISOTOPICHE DELLE ACQUE SORGIVE	39
6.3 BILANCIO IDROGEOLOGICO	39
7. ANALISI DEI DATI	43
7.1 CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREA DI STUDIO	43

7.2 SEZIONI IDROGEOLOGICHE	45
7.3 IDROGEOCHIMICA	49
7.4 OSSERVAZIONI SULL'ORIGINE DELLE SORGENTI	52
7.5 OSSERVAZIONI SUGLI INCREMENTI DI PORTATA IN ALVEO	56
7.6 BILANCIO IDROGEOLOGICO	57
7.6.1 Delimitazione dell'area interessata dal bilancio	57
7.6.2 Valutazione dei parametri del bilancio.....	57
7.6.3 Sintesi del bilancio	67
8. MODELLO DELLE ACQUE SOTTERRANEE	69
8.1 L'EQUAZIONE GENERALE DEL MOTO DELLE ACQUE SOTTERRANEE	70
8.2 METODI NUMERICI PER LA RISOLUZIONE DELLE EQUAZIONI DEL MOTO	76
8.3 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO	77
9. MODELLO CONCETTUALE	82
10. COSTRUZIONE DEL MODELLO	85
10.1 DISCRETIZZAZIONE DEL DOMINIO	85
10.2 CONDIZIONI AL CONTORNO	86
10.3 RICARICA	86
10.4 PARAMETRI IDRAULICI	87
10.5 PUNTI DI CALIBRAZIONE	88
10.6 PARAMETRI NUMERICI DEL RISOLUTORE	89
10.7 IPOTESI SEMPLIFICATRICI	90
10.8 CALIBRAZIONE	90
10.9 RISULTATI	91
11. CONCLUSIONI	94
BIBLIOGRAFIA	99

1 INTRODUZIONE

1.1 PREMESSA

L'area oggetto di questa tesi di dottorato è rappresentata dalla Conca di Acerno, una depressione di natura dolomitica intrappenninica ricadente nella porzione sud-occidentale dei Monti Picentini (SA). La conca, che si sviluppa ad una quota altimetrica compresa tra i 700 e i 750 m s.l.m., si presenta allungata in direzione NNW-SSE. Essa è bordata dalle estremità propaggini dei rilievi carbonatici del Monte Raia-Monte Telegrafo (1170 m) a ovest, dal Massiccio dell'Accellica (1660 m) a nord-ovest, dal Monte Raia della Licina (1472 m) (struttura del Monte Cervialto) a est, dal Monte Polveracchio (1790 m) a sud-est e dai monti del Comune di Montecorvino a Rovella a sud.

Nel passato la Conca di Acerno era sede di un bacino lacustre poi colmato da depositi fluvio-lacustri successivamente re-incisi da corsi d'acqua. Ciò ha determinato l'attuale morfologia dell'area caratterizzata da profonde incisioni vallive e da superfici terrazzate su una delle quali sorge l'abitato di Acerno.

Il sistema idrografico che caratterizza il territorio è rappresentato da due significative incisioni quali il Vallone Tusciano in direzione nord-est/sud-ovest e il Vallone Isca della Serra che attraversa il paleobacino lacustre in direzione assiale da nord a sud.

Lungo l'alveo del Fiume Tusciano e del Torrente Isca della Serra in particolare dove i corsi d'acqua sono limitrofi all'abitato di Acerno, si manifestano due importanti fronti sorgivi uno denominato "Olevano" e l'altro "Ausino-Avella" (portata globale 600 l/s) i quali costituiscono la fonte di approvvigionamento idropotabile dell'acquedotto dell'Ausino.

Nel corso degli ultimi anni il rilievo carbonatico del M.te Accellica è stato oggetto di studio idrogeologico (Piscopo V. et alii, 1993, 2001) e in particolare le sorgenti della Conca di Acerno sono state oggetto di indagini geognostiche per il potenziamento dell'acquedotto dell'Ausino. (Budetta P. & de Riso R., 1982). Opera questa realizzata successivamente alla fine degli anni novanta e consistente nella captazione di una nuova sorgente denominata Nuovo Olevano.

Integrando i dati a disposizione ed effettuando nuove indagini, l'obiettivo della presente tesi di dottorato è quello di approfondire gli aspetti legati all'origine e all'emergenza dei due fronti sorgivi nonché all'implementazione di un modello matematico del flusso idrico sotterraneo del bacino idrogeologico della Conca di Acerno.

Un modello numerico di flusso permette di riprodurre le dinamiche di un sistema idrogeologico complesso e le sue evoluzioni nel tempo e nello spazio e, una volta calibrato, può costituire uno strumento efficace da utilizzare a supporto delle decisioni in questioni riguardanti lo sfruttamento delle acque sotterranee.

L'adattabilità dei modelli di simulazione numerica, nati per acquiferi alluvionali, alle strutture carbonatiche dell'Appennino centrale è stata ampiamente sperimentata (Angelini & Dragoni, 1997; Gattinoni & Francani, 2009; Preziosi, 2007)

1.2 ATTIVITÀ DI RICERCA SVOLTA

Per il raggiungimento dei suddetti obiettivi il lavoro si è articolato in due parti.

La prima parte è stata elaborata presso il Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale dell'Università degli studi di Napoli Federico II e ha riguardato la ricostruzione del modello idrogeologico della Conca di Acerno. Ciò ha comportato, in primo luogo, la ricostruzione geologica dell'area utilizzando i contributi presenti in bibliografia e la raccolta e l'esame di una sessantina di stratigrafie di sondaggi e pozzi.

La ricostruzione dello schema geologico e tettonico è servito da base per l'analisi idrogeologica dell'area. Dopo un'ampia disamina delle pubblicazioni scientifiche che tracciano il contesto idrogeologico, viene dato spazio alle elaborazioni originali eseguite.

In particolare è stato eseguito un censimento delle sorgenti d'acqua, sono state elaborati dei profili idrogeologici sia a scala di bacino che di dettaglio in corrispondenza di alcune sorgenti, si è provveduto a prelevare campioni d'acqua sorgiva e di pozzo per un'indagine chimica e isotopica ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$), all'individuazione dei tratti dei fiumi che drenano la falda acquifera e all'identificazione delle stazioni termo/pluviometriche ricadenti nell'area e nei dintorni per il calcolo del bilancio idrogeologico.

Integrando i dati di cui sopra, si è pervenuti ad una visione globale dell'idrodinamica della bacino dell'Acerno.

La seconda parte del lavoro, svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale del Politecnico di Milano, ha riguardato l'elaborazione del modello di simulazione numerica di flusso dell'acquifero del bacino di Acerno con l'obiettivo di confermare le ipotesi di circolazione idrica precedentemente elaborate.

Il codice di calcolo utilizzato è MODFLOW sviluppato dall'USGS per lo studio dei fenomeni di filtrazione nelle 3 dimensioni con il metodo delle differenze finite. La calibra-

zione del modello elaborato in regime stazionario è stata eseguita utilizzando la misura dei flussi delle sorgenti nonché i livelli piezometrici misurati in alcuni sondaggi.

2 AREA DI STUDIO

2.1 INQUADRAMENTO GEOGRAFICO

Il territorio oggetto di studio (Fig. 2.1), dista una trentina di Km da Salerno e ricade nella porzione sud-occidentale del Parco Regionale dei Monti Picentini.

L'area si presenta montuosa e poco antropizzata con una folta vegetazione, costituita principalmente da castagneti e da faggeti, che arriva a ricoprire anche le cime più elevate.

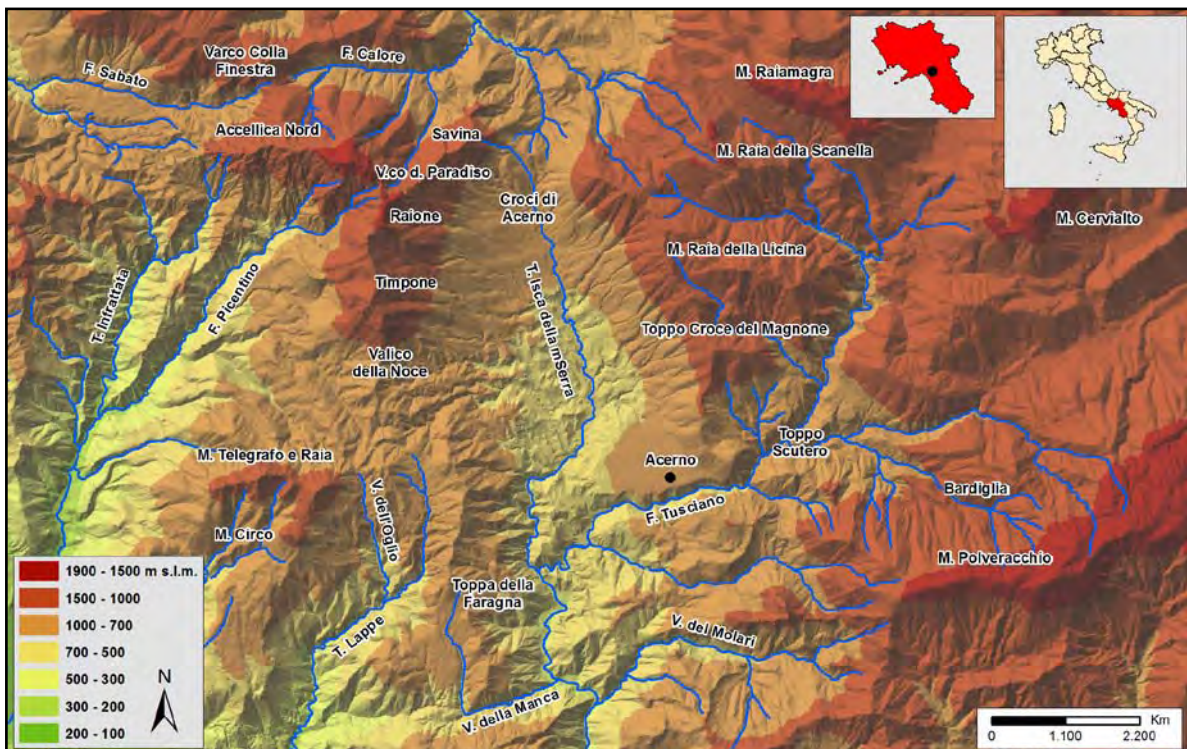


Figura 2.1 – Carta di inquadramento dell'area di studio.

La quota media dell'area è attorno ai 1060 m s.l.m. ed è caratterizzata, nella zona centrale, da una depressione tettonico carsica denominata Conca di Acerno degradante dolcemente dal Valico Croci di Acerno fino ai 700 m s.l.m. del centro abitato di Acerno.

Ai margini della Conca spiccano diversi rilievi. A nord-ovest si innalza il massiccio dell'Accellica costituito da due dorsali fra di loro ortogonali. La dorsale principale denominata Accellica Nord (1660 m s.l.m.) si estende da E a W. La dorsale meridionale, chiamata Raione o Accellica Sud, è orientata N-S ed è collegata a quella settentrionale mediante il Varco del Paradiso (1490 m s.l.m.). Al centro del suddetto varco caratterizzato da una forma ad imbuto con pareti verticali alte un centinaio di metri si eleva la Guglia del Ninno

(1535 m s.l.m.). La dorsale meridionale si presenta con la cima del Raione che raggiunge la quota di 1606 m s.l.m. e degrada progressivamente verso sud fino alla panoramica Gobba del Timpone a quota 1444 m s.l.m. per unirsi al Valico della Noce (926 m s.l.m.). Tale dorsale costituisce lo spartiacque tra il comune di Acerno e i Piani di Giffoni ove sorgono le strutture montuose del Telegrafo (1128 m s.l.m.) e del Raia (1107 s.l.m.), del M.te Circhio (1073 m s.l.m.) e, più a sud, del rilievo Toppa della Faragna (858 m s.l.m.).

Il versante nord dell'Accellica presenta una pendenza media minore di quello esposto a sud; le sue zone più ripide e incassate sono rappresentate da alcune incisioni fra cui le principali sono il Vallone della Neve e il Vallone dei Briganti ubicate a E del Varco Colla Finestra, il Vallone della Neve e il Vallone della Savina in cui si rinvengono a diverse quote piccole sorgenti captate per uso potabile.

Un'altra dorsale del gruppo montuoso un po' meno imponente è la Savina (1303 m s.l.m.) che si innalza a poche centinaia di metri a E dal Valico Croci di Acerno. La dorsale si innalza da NE verso SW fino a congiungersi con la cima del Raione.

Il versante settentrionale dell'Accellica Nord è delimitato dalle alte valli del fiume Sabato verso occidente e del fiume Calore che defluisce in direzione opposta, separati dallo spartiacque di Varco Colla Finestra (1060 m s.l.m.). Tali valli separano il massiccio dell'Accellica da quello del Terminillo.

Il bordo orientale della Conca di Acerno è limitato dal versante occidentale della struttura del Massiccio del Cervialto (1809 m s.l.m.) caratterizzato dalle cime del M.te Raia della Scianella (1527 s.l.m.), del M.te Raia della Licina (1472 m s.l.m.) e del M.te Raiamagra (1667 m s.l.m.) dove sono ubicati gli impianti della stazione sciistica di Lago Laceno.

Il confine sud della Conca di Acerno è segnato dall'alta valle del fiume Tusciano che la separa dalla struttura montuosa del Polveracchio (1790 m s.l.m.) dal quale ha origine il suddetto fiume.

2.2 INQUADRAMENTO IDROGRAFICO

L'area di studio ricade nella parte alta del bacino idrografico del fiume Tusciano e solo in minima parte in quello dei fiumi Sabato, Calore e Picentino (Fig. 2.1).

Il bacino Tusciano si sviluppa prevalentemente nel territorio montuoso, caratterizzato da versanti ad elevata pendenza e profonde incisioni e addolcito appena dall'altopiano di Acerno. Le zone pianeggianti si estendono presso i centri abitati di Olevano e di Monte-

corvino Rovella e declinano verso la piana di Battipaglia, assai estesa, ma solo in piccola parte inclusa nel bacino.

Partendo dalla vetta del M.te Accellica (1660 m s.l.m.) lo spartiacque del bacino prosegue secondo la linea ideale che congiunge i monti Raiamagra (1667 m s.l.m.) e Cervialto (1809 m s.l.m.), per poi piegare direttamente a sud, dove si ricongiunge con il Monte Polveracchio (1790 m s.l.m.) e de clinare infine verso la larga pianura alluvionale di Battipaglia.

Procedendo verso est dell'Accellica, la linea di spartiacque, passa sui monti Raia della Scianella (1527 m s.l.m.), Savina (1303 m s.l.m.), e Circhio (1073 m s.l.m.) per declinare verso le colline di Montecorvino Rovella e successivamente verso la pianura litoranea.

Nel bacino si osserva l'indeterminatezza delle origini dell'asta fluviale principale del Tusciano, la quale soltanto dopo un certo percorso, ossia dopo l'incontro dei rami montani provenienti dalla struttura montuosa del Raiamagra e del Polveracchio, si delinea nettamente quale collettore generale; tale incontro avviene nelle vicinanze di Toppo Scutero poco a monte della piana di Acerno. Nei pressi dell'abitato di Acerno il fiume Tusciano scorre in una profonda incisione in direzione E-W ed è, in questo tratto, alimentato in minima parte, dalle acque provenienti dalle sorgenti dell'Olevano captate queste per usi potabili. Successivamente il fiume devia per un breve tratto in direzione sud-ovest fino alla confluenza in destra idrografica con il torrente Isca della Serra. Questo affluente, asciutto durante l'estate al di sopra della quota di 580 metri circa s.l.m., accoglie al di sotto di tale quota le sorgenti dell'Ausino che affiorano sul fondo in una gola ripida e boscosa. Il torrente Isca ha origine in prossimità del valico Croci di Acerno e percorre l'intera conca di Acerno in direzione N-S. Le sue incisioni tributarie dissecano con andamento rettilineo il versante orientale della dorsale meridionale dell'Accellica e quello occidentale della struttura montuosa del Cervialto, e risultano attestate su linee di minor resistenza. Tali affluenti hanno carattere esclusivamente torrentizio, sia per la brevità dei loro percorsi, sia per la mancanza di importanti sorgenti perenni.

Il percorso del fiume Tusciano prosegue poi in direzione prevalentemente N-S e riceve in questo tratto le acque provenienti dal vallone dei Molari in destra idrografica e dalla Valle della Manca in sinistra idrografica. Successivamente a 3.5 Km circa dall'abitato di Acerno (ad una quota di 400 m s.l.m. circa) la portata del fiume si riduce per la presenza di un impianto idroelettrico (Centrale di Olevano sul Tusciano) uno dei primi costruiti in Italia dall'Enel tra la fine dell'800 e i primi del '900. Infatti in contrada Acqua Buona, una

parte dell'acqua è convogliata verso le strutture della Centrale e successivamente restituite al corso del fiume ad una quota inferiore.

L'ultimo tratto attraversa aree intensamente urbanizzate ed industrializzate, subendo tutti gli effetti dell'alterazione ambientale.

A nord dell'area di studio dal massiccio del Monte Accellica nascono tre grossi fiumi: il Sabato, il Calore Irpino, il Picentino.

Il fiume Sabato, che scorre in direzione ovest e trae origine da alcune emergenze idriche localizzate nel Varco Colle Finestra (1.010 m s.l.m.), recapita le acque raccolte lungo il percorso nel fiume Calore Irpino appena a valle dell'abitato di Benevento. Quest'ultimo fiume, afluente in sinistra del fiume Volturno, nasce anch'esso ai piedi del Varco Colle Finestra a pochissima distanza (ma sul versante opposto) dalle sorgenti del Sabato. In questa porzione di territorio i due citati corsi d'acqua presentano le caratteristiche morfologiche di torrenti montani con pendenze all'incirca pari al 3.5 %. L'andamento rettilineo denota che i alvei risultano essere impostati sulle linee tettoniche lungo le quali, rappresentando esse dei punti di debolezza, i corsi d'acqua hanno originato profondi solchi vallivi.

Il versante esposto a nord del M.te Accellica si presenta accidentato per via di numerose incisioni ad andamento rettilineo sedi di piccole sorgenti le quali contribuiscono ad alimentare il sottostante corso d'acqua del Calore Irpino.

Alla quota di 1500 m s.l.m. sul versante meridionale dell'Accellica ha origine l'Alta Valle del Fiume Picentino il quale fiume trae origine dalle sorgenti Capo di Fiume alimentate dallo scioglimento della neve accumulata e ammassata tra le pareti rocciose del Varco del Paradiso. Il suo affluente torrente Infrattata ubicato in destra orografica, gli apporta un ulteriore discreto contributo perenne.

A sud del Varco della Noce ha origine infine la Valle dell'Oglio che, dopo un breve percorso, confluisce nel torrente Lappe il quale scorre in un tratto stretto tra il versante nord-ovest del rilievo Toppa della Faragna e il versante sud-est del M.te Circhio. Le acque del Lappe dopo un breve percorso confluiscono nel fiume Picentino.

3 LINEAMENTI GEOLOGICI E GEOMORFOLOGICI

In questo capitolo sono riportate sinteticamente le caratteristiche geologiche e tettoniche dei Monti Picentini e successivamente vi sono descritti in dettaglio gli affioramenti litologici presenti nell'area di studio nonché le forme carsiche rinvenute sui versanti del M.te Accellica.

3.1 SINTESI DELLE CONOSCENZE GEOLOGICHE DEI MONTI PICENTINI

Il massiccio dei Monti Picentini costituisce una delle più estese unità morfostrutturali dell'Appennino Campano-Lucano. Quest'ultimo costituisce un cuneo di accrezione orogena formato da differenti unità tettonico-stratigrafiche organizzate in sistemi a thrust la cui strutturazione è stata datata a partire dal tardo Oligocene - Miocene fino al Pleistocene (Patacca & Scandone, 2001). La struttura si è successivamente evoluta attraverso l'influenza di ulteriori deformazioni di tipo estensionale e trascorrente da parte di sistemi orientati NNW-SSE e NE-SW, responsabili dell'attuale conformazione morfo-strutturale dell'Appennino meridionale (D'Argenio et alii, 1975; Ippolito et alii, 1975).

Durante le fasi plioceniche della strutturazione del cuneo di accrezione appenninica, anche il segmento più profondo della Piattaforma apula viene coinvolto nelle deformazioni a thrust profonde, producendo un sistema a duplex (Patacca & Scandone, 2007).

L'Appennino Campano-Lucano è caratterizzato, quindi, da una struttura a falde di ricoprimento costituite da varie Unità stratigrafico-strutturali accavallate le une sulle altre. Esse sono originate dalla deformazione dei domini paleogeografici che, nel Mesozoico, costituivano il margine del Continente Africano articolato in piattaforme carbonatiche e bacini estesi e profondi a sedimentazione pelagica. Alcune differenze esistono ancora oggi nell'interpretazione della catena appenninica. La ricostruzione più recente è quella di Patacca & Scandone (2007) che individua, a partire da ovest, i seguenti domini deposizionali dell'Appennino meridionale (Fig. 3.1):

- Unità Sicilide,
- Piattaforma Appenninica (in letteratura individuata come Piattaforma Campano-Lucano o Piattaforma interna) con le Unità tettoniche di Capri-Bulgheria, di Alburno-Cervati, dei Monti della Maddalena, di Monte Croce e dei Monti Lepini,
- Piattaforma Simbruini-Matese,
- Piattaforma Marsica-Meta,

- Piattaforma Gran Sasso-Genzana,
- Piattaforma Apula di cui fa parte l'Unità tettonica Molte Alpi.

In origine tra la Piattaforma Appenninica e quella Simbruini-Matese veniva individuato il Bacino Lagonegrese contiguo al Bacino Molisano (Ciarapica & Passeri, 1998; Patacca & Scandone, 2007; Mostardini & Merlini, 1986.). Caratterizzato da una successione superiore ed una inferiore depositate in un periodo di tempo che va dal Trias superiore al Miocene inferiore, il Bacino Lagonegro-Molisano (durante le fasi tettonogenetiche mioceniche)

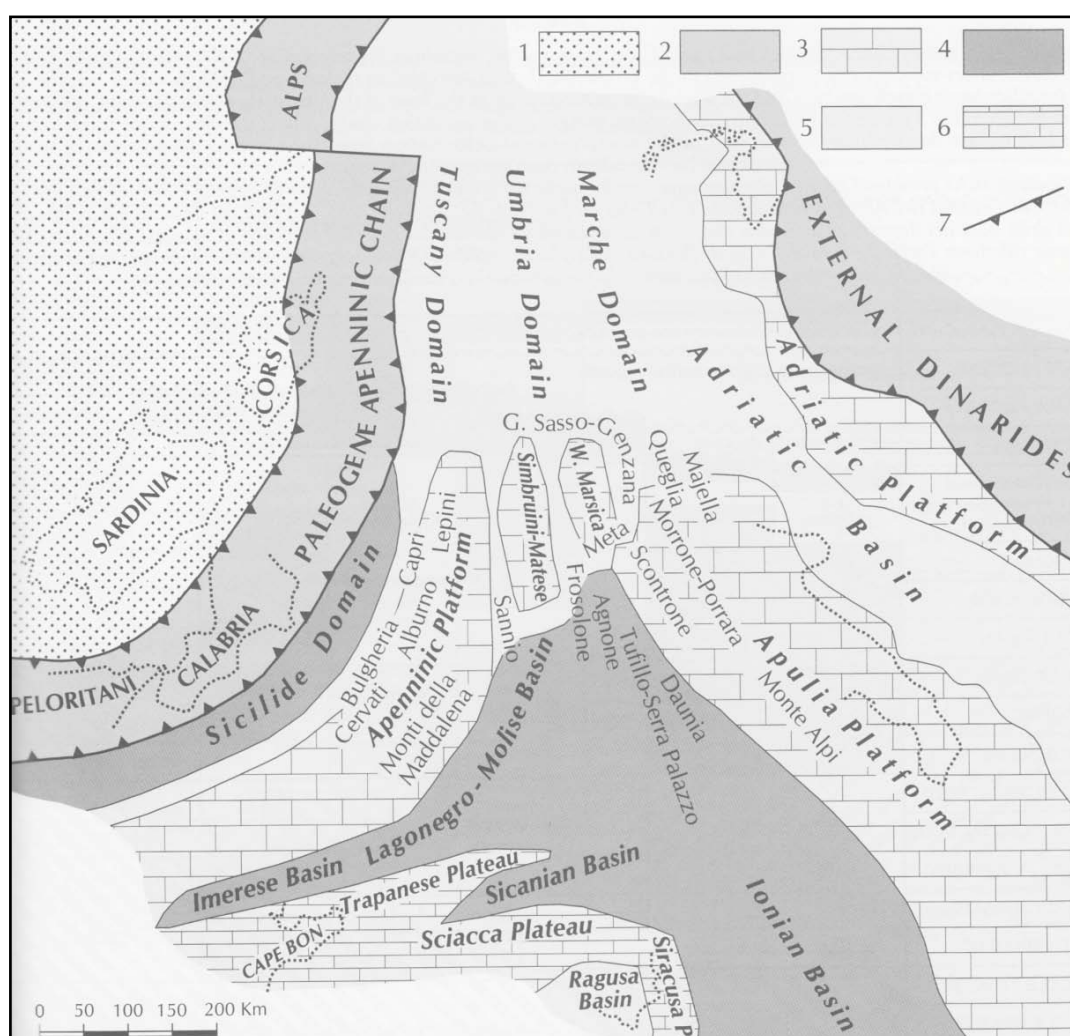


Figura 3.1 - Ricostruzione paleogeografica dell'area centro-mediterranea nell'Oligocene superiore (circa 30 milioni di anni fa) mostrante la distribuzione dei domini di piattaforma e di bacino prima della loro incorporazione in catena. 1) Avampaese europeo. 2) Catena paleogenetica. 3-6) Avampaese africano: 3) carbonati di piattaforma di mare basso; 4) bacini profondi a crosta oceanica o continentale assottigliata; 5) aree bacinali con alti strutturali isolati; 6) plateaux pelagici. 7) Fronte di catena. (Da Patacca & Scandone, 2007).

subisce un notevole restringimento e i suoi settori occidentale e centrale vengono coperti dalla Piattaforma Appenninica in accavallamento verso oriente. Le scaglie e le falde tettoniche formatesi vengono traslate verso est coprendo abbondantemente le unità della Piatta-

forma Apula. Depositi sedimentari continentali e marini e depositi di origine vulcanica del Quaternario ricoprono a loro volta le falde appenniniche.

Geologicamente i Monti dei Picentini appartengono all'Unità tettonica carbonatica Alburno-Cervati (D'Argenio et alii, 1972, 1975; Ippolito et alii, 1975; Patacca & Scandone, 2007) ma potrebbero in parte anche appartenere all'Unità della Maddalena (e.g. le dolomie superiori delle Croci d'Acerno in De Castro, 1990). Il massiccio dei Monti Picentini corrisponde ad un alto strutturale a pianta grosso modo quadrangolare con il lato maggiore orientato NW-SE lungo circa 35 Km ed il minore orientato NE-SW con una lunghezza di 25 Km. Risulta delimitato da tutti i lati da grandi faglie sub verticali che ne hanno determinato il sollevamento rispetto alle aree circostanti (Fig. 3.2). Il lato nord-occidentale è caratterizzato dalle faglie Chiusano-S. Stefano e Serino-Banzano, orientate NE-SW e dalla valle del Fiume Irno. Il lato settentrionale è contraddistinto dalle faglie Castelvetero sul Calore-Cassano Irpino, orientata NW-SE, e Bagnoli Irpino-Stazione di Nusco con orientamento NE-SW. Il lato sudorientale è più regolare ed è limitato dalla faglia Materdomini-Puglietta, orientata NNE-SSW, che separa la struttura dei Picentini dal graben della valle del Sele. Il lato meridionale è delimitato dalle faglie che registrano un rigetto verticale superiore rispetto alle altre descritte. Il massiccio dei Picentini è diviso in due aree strutturali dal lineamento tettonico orientato NW-SE, lungo circa 25 Km. Capaldi et alii. (1988) evidenziano che nel settore settentrionale (M.te Terminio e M.te Cercialto) affiora la parte alto-giurassica e cretacea della successione carbonatica mesozoica (Trias e Giurassico) rappresentata dai calcari. I Picentini meridionali invece sono caratterizzati dalla parte bassa della successione che ha natura prevalentemente dolomitica.

Dal punto di vista strutturale i Picentini sono costituiti da varie unità stratigrafico-strutturali sovrapposte le quali dal basso verso l'alto, sono:

- Unità Lagonegrese,
- Unità della Piattoforma Appenninica e Unità Sicilidi.

Su queste ultime si rinvengono in contatto stratigrafico discordante terreni tardo-orogeni che in letteratura vengono individuati come argillosi-sabbiosi-conglomeratici di età compresa tra il Tortoniano e il Pliocene (ISPRA, in fase di stampa).

Le unità della Piattoforma Appenninica sono costituite da una potente serie di dolomie, calcari dolomitici e calcari di età compresa tra il Trias superiore ed il Cretacico superiore che raggiungono i 4500 m di potenza (ISPRA, in fase di stampa e D'Argenio et alii, 1972).

Come già ricordato, queste serie carbonatiche sono sovrascorse sui terreni più orientali della catena, rappresentati dalla formazione del Bacino Lagonegrese-Molisano la cui porzione inferiore (calcareo-silico-marnosa) è separata tettonicamente da quella superiore argillosa-calcarenitico-arenacea (ISPRA, in fase di stampa). L'età della successione è triassico-miocenica. Questo fenomeno di accavallamento è ben esposto nella parte sudorientale dell'area, nella cosiddetta finestra tettonica di Campagna dove, per effetto dell'erosione operata dai corsi d'acqua che hanno inciso verticalmente tutta la successione carbonatica, si rinvengono in affioramento proprio tali sedimenti (Unità lagonegresi auct.). L'area della finestra tettonica di Campagna è caratterizzata dalla presenza di un ulteriore sovraccorrimento che accavalla l'insieme "Unità di Piattaforma-Unità di Bacino Lagonegrese" sull'Unità di Monte Croce tettonicamente sottostante, a sua volta posta a tetto di una potente successione di scaglie tettoniche formate da Unità Lagonegresi (ISPRA, in fase di stampa). L'insieme "Unità di Piattaforma-Unità di Bacino Lagonegrese" sull'insieme "Unità Monte Croce- Unità di Bacino Lagonegrese" è stato interpretato come una struttura tardiva prodotta da un ri-accavallamento di preesistenti thrust sheets. In questa interpretazione l'unità di Monte Croce avrebbe rappresentato in origine parte della Piattaforma Appenninica, ed in particolare una sua area di transizione al bacino. Turco (1976) e Patacca & Scandone (2007) hanno interpretato la suddetta unità come una successione deposta in un ambiente di transizione tra una piattaforma e un bacino.

Questo assetto strutturale è confermato dai risultati di una perforazione esplorativa "Acerno 1" realizzata dall'AGIP nel 1996 in località Isca, circa 3 Km a SSW dell'abitato di Acerno in prossimità del bordo settentrionale della Finestra di Campagna. Infatti secondo Patacca & Scandone (2007) e Patacca (2007) dall'alto verso il basso la successione è rappresentata da:

- 295 metri di dolomie del Triassico (che rappresentano parte dell'Unità tettonica Alburno-Cervati),
- 177 metri di calcari con selce del Trias che costituiscono una scaglia dell'Unità Lagonegrese,
- 469 metri di arenarie del Miocene,
- 295 metri di dolomie del Trias superiore che rappresentano l'Unità di Monte Croce, 2294 metri di varie formazioni mesozoiche che costituiscono tre scaglie sovrapposte dell'Unità Lagonegrese,
- 77 metri di argille e gessi messiniani,

- 260 metri di carbonati del Cretaceo inferiore associati all'Unità tettoniche della Piattaforma Apula (Fig. 3.3).

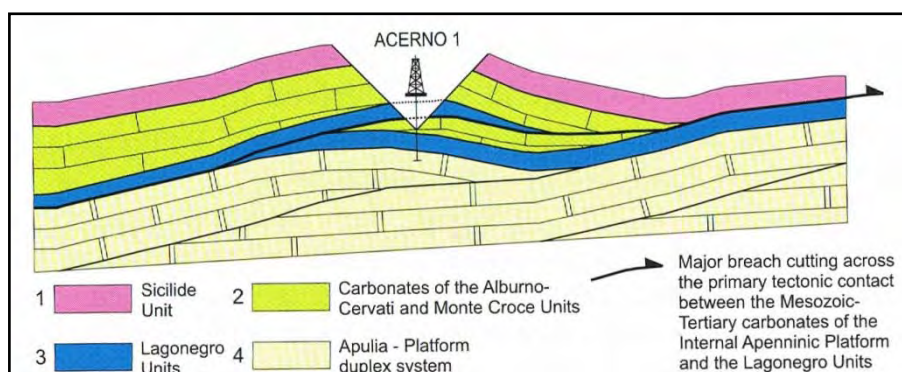


Figura 3.3 - Schema interpretativo della finestra tettonica di Campagna suggerito dai dati stratigrafici del pozzo Acerno 1. (Da Patacca, 2007).

L'età della emersione definitiva dei Monti Picentini, rimane ancora incerta a causa dell'assenza su tali successioni carbonatiche di sedimenti più recenti del Tortoniano-Messiniano (Miocene sup.). Pertanto si ipotizza che il periodo del sollevamento coincida con il Messiniano superiore.

Capaldi et alii (1988) collocano nell'intervallo tra il tardo Miocene ed il Pliocene superiore il modellamento subaereo di tali massicci carbonatici che comportò un paesaggio ad elevato grado di maturità morfologica caratterizzato da dolci gradienti (paleosuperficie). Pertanto gli embrionali rilievi dei M. Picentini erano modestamente elevati (poche o pochissime centinaia di metri s.l.m.) e l'area attraversava un periodo di relativa stabilità tettonica (Vitale, 2005).

A partire dal modellamento della paleosuperficie la struttura montuosa dei Picentini ha registrato tre distinte crisi neotettoniche surrette a lternate a fasi di modellamento di morfologie erosionali e/o deposizionali (Capaldi et alii, 1988; Vitale, 2005).

La prima fase neotettonica attribuita al Pleistocene inferiore ha comportato la dislocazione della paleosuperficie ad opera di una fitta rete di faglie con orientazioni ampiamente variabili (NW-SE, NE-SW ed E-W) e con pendenze medie comprese tra i 25° e i 30°. Frammenti della paleosuperficie si rinvengono spostati a quote che differiscono all'incirca di 500 metri. Il più ampio relitto è quello che si trova sulla sommità del M.te Polveracchio e si estende tra i 1600 e 1400 metri di quota. La fase neotettonica trova evidenza anche nella presenza di falde detritiche provenienti dalla degradazione fisica dei versanti carbonatici neoformati. Esse sono testimoniate dai "conglomerati Iumaiano" (Fig. 3.4) sul versante settentrionale del Monte Polveracchio (tra 800 e 1200 m s.l.m.) che costituiscono gli affiora-

menti più rappresentativi di questa prima generazione di depositi (Capaldi & Cinque, 1988; Munno et alii, 2001 e Porreca & Mattei, 2010). Un altro affioramento minore di questa stessa generazione è localizzato alla base del M.te Accellica (lembo di “La Mola” a quota 950 m) (Vitale, 2005).

Nel tardo Pleistocene inferiore, un nuovo evento tettonico ha comportato movimenti verticali in tutta l’area. In questo evento si individuano versanti di faglia con rigetti fino a 500 m e lembi della paleosuperficie a quote ancora più elevate. I versanti di faglia riferibili a queste dislocazioni presentano una maggiore pendenza (30 – 35°).

L’importante fase tettonica ha comportato la formazione di piccole depressioni come quella di Tizzano (Fig. 3.4) alla quota di 850 m s.l.m. e di ampiezza di 1 Km² circa colmata da una sequenza fluvio-lacustre sovrastante ai conglomerati Iumaiano. Tale sequenza raggiunge uno spessore di circa un centinaio di metri (Porreca & Mattei, 2011; Vitale 2005). Tra gli effetti dei dislocamenti avvenuti durante questo periodo si evidenzia lo sbarramento tettonico della depressione di Acerno (Fig 3.4).con la conseguente nascita de ll’omonimo lago.

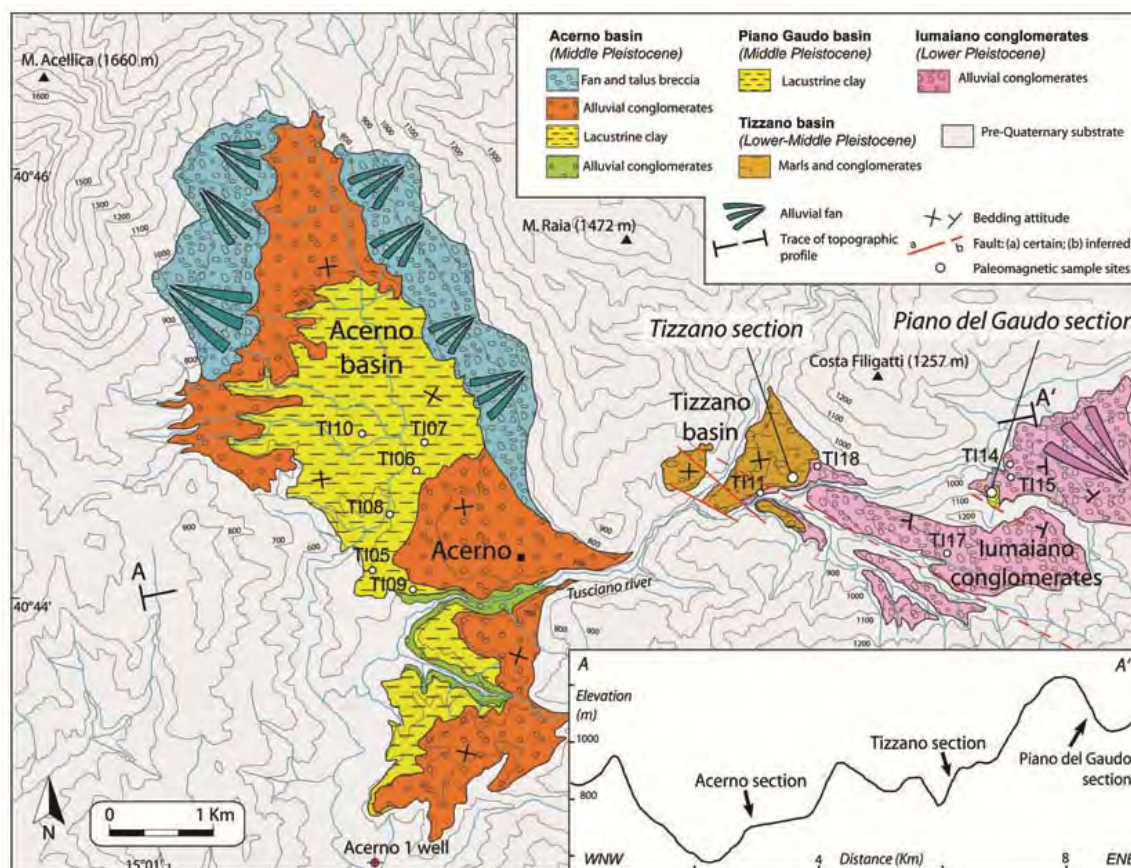


Figura 3.4 - Carta degli affioramenti dei depositi fluvio-lacustri nell’area di studio. (Da Porreca & Mattei, 2010).

Agli eventi descritti è seguita durante il Pleistocene medio un'ultima fase neotettonica che si è manifestata con rigetti che si aggirano intorno ai 200-300 metri nell'area interna del massiccio il quale viene ad assumere così contorni simili a quelli attuali. In particolare, nel settore meridionale il massiccio dei Picentini raggiunge quota media intorno ai 1000 metri s.l.m. e presenta alcune cime che raggiungono anche i 1800 m s.l.m..

L'ultima fase tettonica trova la sua evidenza nella sedimentazione dei depositi fluvio-lacustri nel lago di Acerno (Capaldi et alii, 1988; Munno et alii, 2003; Vitale, 2005). Oggi colmato e prosciugato, esso si presenta a contorno poligonale e allungato in direzione circa N-S. Alcune faglie dirette che bordano il piccolo graben presentano una estensione regionale mentre in passato presentavano una cinematica diversa (Capaldi et alii, 1988). La scarpata di faglia NE-SW che si innalza verso il Monte Accellica è interpretata come il prolungamento della faglia trascorrente Bagnoli-Irpino Torrente Calaggio riattivata in regime distensivo (Capaldi et alii, 1988). A sud il bacino lacustre è chiuso dal lineamento tettonico Acerno-Calabritto con orientazione ENE-WSW; ad est la conca è delimitata da una fascia di detrito di versante, originata dall'erosione della dorsale del Raia della Licina, che sutura una faglia normale NW-SE (Leuci, 1999).

3.2 STRATIGRAFIA DELL'AREA DI STUDIO

Il bacino idrogeologico della Conca di Acerno è caratterizzato da terreni che appartengono all'Unità tettonica carbonatica unitamente a depositi continentali del Pliocene e del Quaternario. Mentre i primi affiorano soprattutto in corrispondenza della struttura dell'Accellica, i depositi più recenti si rinvengono più a sud nella piana di Acerno.

Per quanto concerne le sequenze deposizionali, la nomenclatura adottata fa riferimento alla cartografia geologica del Progetto CARG (foglio 468 e 467). Procedendo dalla formazione più antica a quella più recente, si riscontrano:

Unità tettonica carbonatica

- Dolomia massiva di base
- Calcari e marne ad *Avicula* e *Myophoria*
- Dolomia superiore
- Calcari a *Palaeodasycladus*
- Calcari oolitici e oncolitici
- Calcari con *Cladocropis* e *Clypeina*.

Depositi continentali del pliocene

- Sintema di Iumaiano

Depositi continentali del quaternario

- Sintema di Aquile
- Super Sintema Eboli
- Depositi fluvio-lacustri di Acerno
- Detrito di falda
- Prodotto colluviale ed eluviale
- Deposito alluvionale.

Di seguito vengono descritte singolarmente e nel dettaglio le sequenze così come si riscontrano in affioramento procedendo dal basso verso l'alto. Nella Fig. 3.5 è riportata la colonna stratigrafica sintetica della successione dell'Unità tettonica carbonatica.

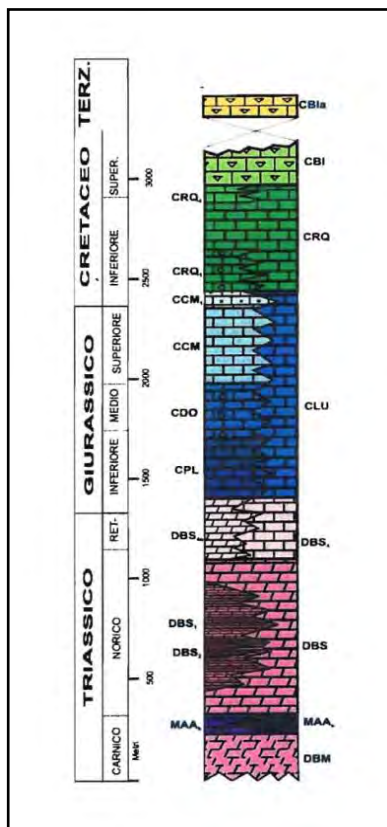


Figura 3.5 - Colonna stratigrafica sintetica della successione dell'Unità tettonica carbonatica. (Da ISPRA, in fase di stampa).

UNITÀ TETTONICA CARBONATICA*DBM - Dolomia massiva di base (Carnico)*

La serie carbonatica inizia con la formazione di dolomia massiva generalmente non stratificata di colore chiaro affiorante in prossimità del torrente Lappe. Appare estremamente fratturata verso il basso, tanto da essere ai luoghi farinosa e classificabile come cataclasiite ed ultracataclasiite. Tale aspetto cataclastico è da attribuire all'intensa attività tettonica traslativa che, nel Miocene, ha interessato questa formazione. Lo spessore non è valutabile.

*MAA - Calcari e marne ad *Avicula* e *Myophoria* (Carnico superiore)*

Alla dolomia seguono calcari marnosi di colore

nero con tessitura fine e sottilmente stratificati (1-5 mm). Spesso si alternano orizzonti (con spessore di qualche metro) di marne tabulari nere e di argille nere finemente straterellate (1-3 mm). Verso l'alto la sequenza è costituita da calcari grigio scuro e dolomie con rara componente marnosa. I calcari si presentano stratificati (5-20 cm) o

massivi con tessitura da fine a grossolana. La successione affiora prevalentemente a S W del Varco della Noce e raggiunge uno spessore di circa 100 metri.

DBS - Dolomia superiore (Norico)

La formazione della dolomia superiore (di colore bianco-grigio) si presenta ben stratificata (5-30 cm) e fratturata. Affiora estesamente tra il bacino paleo-lacustre di Acerno ed il Vallone de ll'Oglio fino alle pendici orientali ed occidentali del Monte Accellica. Nei pressi di Croci di Acerno, le dolomie passano gradualmente verso l'alto a calcari e dolomie stratificati e caratterizzati dalla presenza di valve (frammenti di diversi centimetri) di megalodontidi (membro dei calcari e dolomie a Megalodon). Lo spessore della dolomia superiore è stato valutato di circa 1000 metri.

CPL - Calcari a Palaeodasycladus (Giurassico inf.)

Si tratta di calcari a Palaeodasycladus con tessitura wackstone e packstone, generalmente ben stratificati, e di colore grigio. Il contatto con le dolomie alla base risulta molto graduale (ISPRA, in fase di stampa; Scandone & Sgrosso, 1963). Si rinvencono frequenti interstrati e "tasche" di materiale marnoso di colore verdastro e/o rosa.

L'ambiente di formazione è quello di piattaforma calcarea prevalentemente lagunare, peritidale nella parte bassa. Lo spessore è di circa 350 metri. Gli affioramenti sono presenti lungo la parte bassa del versante orientale del bacino di Acerno in prossimità del Valico delle Croci di Acerno.

(CDO) - Calcari oolitici e oncolitici (Giurassico inf. – Giurassico medio)

In continuità stratigrafica si rinviene una formazione calcarea con frequenti calcari oolitici e calcari dolomitici chiari. Nella parte alta prevalgono calcari micritici e calcareniti. Il limite inferiore di questa formazione coincide con il T oarciano (Giurassico inf.) mentre quello superiore, molto sfumato e graduale, al Giurassico medio. L'ambiente di formazione è di laguna di piattaforma carbonatica, con aree prossime a barre oolitiche e a margini biocostruiti. Lo spessore è stato valutato di circa 250 metri.

Gli affioramenti sono presenti lungo il versante orientale della piana di Acerno in prossimità del centro abitato di Acerno e lungo le pendici occidentali del M. Raia della Scanella e del M. Raia della Licina. L'affioramento maggiore è presente sul versante est della struttura montuosa dell'Accellica.

(CCM) - Calcari con Cladocoropsis e Clypeina (Giurassico sup. – Cretaceo inf.)

Ai calcari oolitici e oncolitici seguono in modo graduale calcari a Cladocoropsis e Clypeina, ben stratificati (0.2 – 0.5 metri) con struttura mudstone, wackestone e packstone, talvolta intervallati da livelli di natura marnosa sottilmente stratificati. Rispetto all'unità precedente probabilmente si tratta di facies originatesi in seguito ad un approfondimento dell'ambiente di sedimentazione di piattaforma, con parziale crisi di formazione carbonatica. Nella parte alta è presente un membro di calcari a Clypeina (anch'essi a struttura mudstone, wackestone e packstone) più o meno stratificati che indica una ripresa della normale produzione carbonatica. Lo spessore totale è di circa 450 metri. I migliori affioramenti sono a SW della Savina e sul versante occidentale dell'Accellica.

(CRQ) - Calcari con requienie e gasteropodi (Cretaceo inf. – Cretaceo sup.)

Alla formazione precedente fanno seguito calcari ben stratificati micritici con numerosi gasteropodi. Nella parte sommitale della formazione è presente un membro (di spessore circa 50 metri) costituito da calcari ad alveolinidi e dolomie laminate.

Lo spessore complessivo della formazione è di circa 450 metri. La formazione si rinviene ad est dell'abitato di Acerno in prossimità di Toppo Scutero e Toppo Croce del Magnone.

DEPOSITI CONTINENTALI DEL PLIOCENE

SVD - Sintema di Iumaiano (Pliocene superiore)

Si tratta di conglomerati e breccie granulo sostenuti, generalmente ben cementati o ben stratificati, con clasti calcarei e subordinamente dolomitici. Le caratteristiche litosedimentologiche indicano facies variabili da falde detritiche (anche con episodi caotici da frane da crollo) a conoidi a fasce proluviali laminate da ricorrenti colate detritiche parzialmente rielaborate da acque dilavanti o incanalate. Affiorano nella zona Bardiglia ad una quota oltre i 1000 metri e presentano uno spessore di alcune decine di metri. Capaldi et alii (1988), Munno et alii (2001) e Porreca & Mattei (2010) interpretano tale formazione come un deposito fluviale e di conoide alluvionale.

DEPOSITI CONTINENTALI DEL QUATERNARIO

SCQ - Sintema di Aquile (Pleistocene inf)

Ai sedimenti e rocce precedenti, seguono verso l'alto, i depositi quaternari. Procedendo da quelli più antichi si distinguono innanzitutto i "conglomerati di Aquile" caratteriz-

zati da clasti di natura carbonatica, eterometrici e comunemente matrice-sostenuti. La matrice è di natura sabbiosa o siltosa ed è poco cementata. I depositi riferibili ad ambiente di conoide alluvionale, presentano uno spessore non inferiore a 20 metri. L'affioramento dei conglomerati è nell'area di Tizzano, a NE della cima Toppo Scutero.

CE - SuperSintema Eboli (Pleistocene inf)

La formazione è caratterizzata da conglomerati con elementi ghiaiosi eterometrici (ghiaie fini e blocchi) di natura carbonatica (dolomitica, calcareo-dolomitica, calcarea) riferibili alla struttura mesozoica dei Monti Picentini. Nella porzione sommitale si rinvengono saltuariamente una frazione fine di origine piroclastica con uno spessore di 10 cm, la cui datazione è compresa tra 1.5 e 0.9 Ma (Capaldi et alii, 1988). L'intera successione è caratterizzata da repentini cambiamenti latero verticali di facies clastiche da più grossolane a più sottili. La facies ghiaiosa indica una deposizione in un ambiente di piana alluvionale prossimale. Lo spessore è stato valutato all'incirca di 100 metri e l'affioramento è a est di Toppa della Faragna.

ACO - Sintema di Acerno (Pleistocene medio)

I depositi fluvio-lacustri accumulatisi nella conca intramontana di Acerno e in sinistra idrografica del fiume Tusciano, presentano uno spessore che in prossimità del centro abitato di Acerno raggiunge di 120 metri. Sono state distinte due facies, la prima di ambiente lacustre (di natura siltosa e argillosa), la seconda di ambiente conoide-delta lacustre (di natura conglomeratica). Per la descrizione dettagliata di tali depositi si rimanda al paragrafo 3.3.

a₃ - Detrito di falda (Pleistocene sup. – Olocene)

Notevole è la diffusione di terreni detritici rappresentati da breccie di pendio che si rinvencono ai margini della conca di Acerno e che costituiscono una fascia più o meno continua alla base dei versanti. Qui tali depositi si presentano con blocchi di dimensione variabile dal decimetro al metro cubo in scarsa matrice sabbiosa-pelitica; nella parte distale dai rilievi i blocchi si riducono a dimensioni centimetriche in matrice pelitico-sabbiosa.

Il detrito di falda raggiunge uno spessore di 10 metri.

b₇ - Prodotti colluviali ed eluviali (Olocene – attuale)

Sono prodotti di disfacimento del substrato (depositi eluviali) che possono subire un limitato trasporto sia gravitativo sia idrico lungo superfici anche lievemente inclinate dan-

no origine a depositi colluviali. Queste ultimi sono composti da limi, limi sabbiosi e argille con ciottoli di natura calcarea-marnosa e subordinata frazione piroclastica. Lo spessore raggiunge massimo 10 metri. Il materiale eluviale è rappresentato da coltri alteritiche e paleosuoli ed è costituito da sabbie e limi argillosi e da argille con frazione di piroclastici. Lo spessore è circa 2 metri.

b_{nl} - Depositi alluvionali attuali (Olocene – attuale)

Sono localizzati lungo gli alvei dei corsi d'acqua principali. In tali depositi si rinven-
gono ghiaie sabbiose di natura calcarea con lenti di sabbie e limi. Lo spessore si aggira in-
torno ai 10 metri circa.

3.3 IL BACINO LACUSTRE DI ACERNO

La depressione occupata dall'antico lago di Acerno (Fig 3.4) presenta i caratteri mor-
fostrutturali di un piccolo graben dal perimetro sub-triangolare e prevalentemente allungato
in direzione NNW-SSE. La depressione è riempita da depositi continentali (cfr. § 3.2) e la
sequenza stratigrafica è descritta in dettaglio da Capaldi et alii. (1988), Munno et alii.
(2001) e Porreca & Mattei (2010).

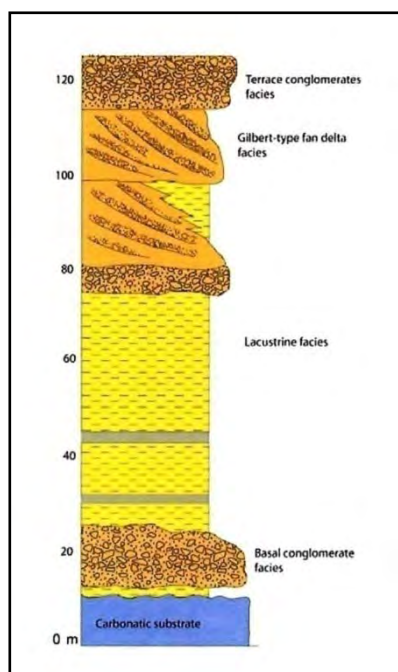


Figura 3.6 - Sequenza stratigrafica tipo della successione lacustre del bacino di Acerno. (Da Porreca & Mattei, 2010).

Detta sequenza (Fig. 3.6) inizia con conglomerati carbonatici, con spessore di 10-30 metri a luoghi poggianti direttamente sulle dolomie. Segue un deposito lacustre di circa 80 m caratterizzato da marne stratificate e limi laminati con intercalazioni di livelli vulcanici. In tali sedimenti nell'area SE del bacino si rinven-
gono inferiormente livelli di lignite. Al limite superiore si rinviene una facies delta lacustre caratterizzata da ghiaie cui si intercalano strati e lenti pelitiche. Il top della formazione delta lacustre è caratterizzata da una superficie terrazzata alla quota di circa 750 m s.l.m. ove sorge il centro abitato di Acerno. Lo studio dei sedimenti di questo antico lago da parte di vari autori ha consentito di ricostruire con accuratezza la storia del bacino.

I dati paleomagnetici (Porrea & Mattei, 2010 e 2011) confermano che la deposizione della sequenza sedimentaria è avvenuta nel Pleistocene medio (epoca Brunhes) così come suggeriscono l'analisi radiometrica (Capaldi et alii, 1988), l'esame dei pollini (Russo Ermolli, 2000; Munno et alii, 2001) e l'analisi paleomagnetica (Porrea & Mattei, 2010, 2011).

In particolare le datazioni radiometriche effettuate da Capaldi et alii, (1988) con il metodo $^{40}\text{K}/^{40}\text{Ar}$ applicato sulla frazione vetrosa o sui feldspati presenti nei livelli piroclastici, hanno stabilito un'età compresa tra 0.75 Ma per la base della successione pelitica e un'età intorno a 0.3 Ma per il tetto della sequenza. Questo suggerisce che l'intera successione sedimentaria ha richiesto un periodo di circa 500 Ka per depositarsi.

Nei sedimenti depositati sul fondo del lago di Acerno sono rimasti conservati i pollini delle piante che un tempo crescevano lungo le sponde e sui versanti montuosi circostanti. Lo studio di questi pollini (palinologia) condotto da Russo Ermolli (2000) e Munno et alii, (2001) ha consentito di poter fare interessanti ricostruzioni paleo climatiche e di individuare l'ambiente vegetale anticamente presente nell'area durante tale periodo. Le analisi, eseguite su campioni di sedimenti lacustri, provenienti dalle carote di un sondaggio profondo 98 m, hanno consentito agli autori di individuare la successione di tre periodi climatici. A partire dalla base del carotaggio, nei primi 17 metri non sono stati ritrovati elementi da collegare ad una particolare condizione climatica (zona 1). Lo studio dei successivi 45 metri di sedimenti ha permesso di individuare due periodi: uno interglaciale (zona 2) e un altro di transizione interglaciale-glaciale (zona 3); infine l'analisi degli ultimi 36 metri della carota ha evidenziato l'avvento di un periodo glaciale (zona 4). In conclusione secondo gli autori la successione lacustre di Acerno risalirebbe alla fine del Pleistocene medio, sarebbe quindi più recente di quanto previsto da Capaldi et alii, (1988) e con un processo di sedimentazione di durata più breve (100 Ka).

I risultati paleomagnetici (Porrea & Mattei, 2010, 2011) sono invece in accordo con quelli ottenuti dalle datazioni radiometriche, in quanto tutti i siti ubicati nel bacino di Acerno presentano polarità normale. Inoltre, gli autori non rinvennero evidenze di rotazioni, a testimonianza che questo settore dei Monti Picentini è rimasto stabile dal Pleistocene medio. Il bacino, infatti, non presenta nessun indizio di deformazione alla scala dell'affioramento, ma solo evidenti incisioni causate probabilmente dal sollevamento generale che ha coinvolto l'intero Appennino meridionale.

L'ultima fase della sedimentazione nel paleolago, come precedentemente detto, è attribuita ad un deposito deltizio. Dopo tale episodio divennero importati i processi regionali legati al sollevamento dell'intera struttura dei M.ti Picentini. Durante queste fasi di intensa attività tettonica il fiume Tusciano, che costituiva un piccolo emissario del lago, incomincia una fase di re-incisione della coltre pelitica lacustre fino a raggiungere il sottostante substrato dolomitico. Capaldi et alii (1988) e Cinque (1986) attribuiscono a questa fase di incisione lo svuotamento del lago.

All'interno dei depositi fluvio-lacustri in prossimità dell'abitato di Montercorvino Rovella furono rinvenuti nel 1981 le ossa fossilizzate attribuite in un primo momento ad un *Elephas antiquus* e poi ad un *Mammuth primigenius* (Leuci, 1999).

I resti rinvenuti alla quota di 535 metri s.l.m erano inclusi in un masso di roccia clastica (puddinga) staccatosi da una conoide fluviale che sfociava nel bacino. Leuci colloca l'esemplare nel periodo glaciale (zona 4 individuata da Russo Ermolli, 2000) che era caratterizzato da specie erbacee e di steppa, che rappresentavano l'ecosistema per questi animali.

Sempre all'interno dei depositi fluvio-lacustri, come precedentemente indicato, si rinvennero talora lenti di lignite xiloidi. I due principali strati di carbone sono stati rinvenuti a sud-ovest dell'abitato di Acerno, ad una distanza di circa 1 Km dallo stesso, presso la località Casa Imbriani e a quota 584 metri (Fig. 3.7).

Qui nel 1941 iniziò la coltivazione del giacimento costituito da due orizzonti di carbone; uno superiore, che presenta uno spessore pari a 110 cm e uno inferiore, separato dal precedente da uno strato di 30 cm di arenaria grigia, con una potenza di circa 30 cm (Petrosino et alii, 2008). L'estrazione durò fino al 1947. Nel 1951 la miniera fu riaperta e fu affidata alla Compagnia Industriale Minerale Agricola che la sfruttò fino al 1952. Il cantiere, oggi abbandonato, consta di quattro gallerie principali che incrociano perpendicolarmente una serie di cunicoli. L'estensione della miniera di lignite supera i 5 ettari ed al suo interno sono presenti oltre 2600 m di gallerie. Numerosi tratti delle

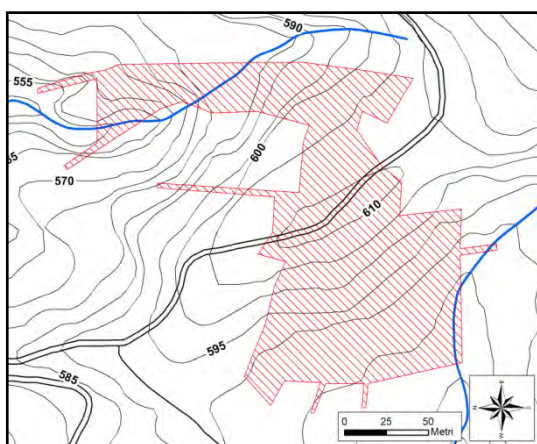


Figura 3.7 - Planimetria della miniera di lignite.

data alla Compagnia Industriale Minerale Agricola che la sfruttò fino al 1952. Il cantiere, oggi abbandonato, consta di quattro gallerie principali che incrociano perpendicolarmente una serie di cunicoli. L'estensione della miniera di lignite supera i 5 ettari ed al suo interno sono presenti oltre 2600 m di gallerie. Numerosi tratti delle

gallerie risultano allagate e il livello dell'acqua raggiunge in alcuni punti anche 1.5 m dal calpestio. Le gallerie presentano in media una larghezza di circa 2 metri ed una altezza che oscilla tra 1.6 m e 2.3 m.

3.4 CARSISMO

Nel massiccio dei Picentini sono molto frequenti e diffusi i fenomeni carsici. Schiومانò e Genco (2007) descrivono due cicli carsici succedutesi nel tempo: il primo, a carattere prevalentemente epigeo, è legato al modellamento della Paleosuperficie; il secondo, di tipo ipogeo, legato a movimenti neotettonici responsabili del dislocamento della suddetta Paleosuperficie.

Vista la natura prevalentemente dolomitica degli affioramenti nell'area di studio, la presenza di forme carsiche in questa porzione del territorio è quasi assente. Le poche forme esistenti si presentano sotto forma di piccole cavità ipogee, alcune a sviluppo verticale e altre sub-orizzontale, localizzate prevalentemente nella formazione calcarea sui versanti del M.te Accellicca. (Russo et alii, 2005).

La Grotta dello Scalandrone rappresenta la più significativa tra le cavità presenti nella zona. È ubicata alla quota di 750 m s.l.m. in corrispondenza di un costone roccioso sub verticale ed in sinistra orografica dell'alta valle del Fiume Picentino, ai piedi del versante occidentale del M. Accellicca. La grotta si adentra nella struttura della Plettenessa d'Accellicca, seguendo la fascia cataclastica che marca il contatto tettonico fra i calcari del Dogger-Malm e le dolomie del Trias superiore, ove l'acqua che da essa fuoriesce ha trovato una via preferenziale di deflusso (Sciومانò & Genco, 2007).

Ad essa si accede attraverso una stretta fessura che immette direttamente in una grossa sala caratterizzata dalla presenza di massi da crollo concrezionati (anche di considerevoli dimensioni) tra i quali scorre un corso d'acqua sotterraneo. Sulla parte più interna della grande sala è presente un lago, alimentato da una copiosa cascata che, in periodo di piena, è alta circa 5 m. La sua risalita conduce ad una galleria, ingombra di massi, che si sviluppa su livelli sovrapposti sovente comunicanti mediante salti e pozzetti. Segue poi una tortuosa galleria, lunga circa 80 m, che termina in un grosso salone sul cui fondo, da un'altezza di circa 15 m, si riversa una cascata proveniente da un condotto inesplorato.

L'interno alla grotta risulta alquanto pericoloso a causa dello stato estremamente tettonizzato della roccia, resa friabile e farinosa. Lo sviluppo complessivo della cavità è di 450 m, per un dislivello di 57 metri.

4 CONOSCENZE IDROGEOLOGICHE DELLA CONCA DI ACERNO

L'area in esame ricade nell'Unità idrogeologica Monte Accellica-Monti Licinici-Monti Mai (Celico, 1978; 1983) all'interno della quale la circolazione idrica sotterranea è molto frazionata, in senso orizzontale e verticale, a causa del complicato assetto strutturale e del differente grado di permeabilità dei litotipi presenti (calcari, calcari dolomitici e dolomie). Celico riconosce più sub-strutture delimitate da spartiacque totalmente e/o parzialmente tamponanti e aventi recapiti e direzioni di flusso diversificati. La Conca di Acerno ricade nella sub-struttura denominata "M.te Accellica" per la quale Piscopo et alii (1993) hanno valutato una potenzialità idrica sotterranea pari a $33 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ (SOGEDSID, 2005).

La sub-struttura M.te Accellica è costituita in prevalenza da dolomie e subordinatamente da calcari. Viene individuata una circolazione di base presente nel serbatoio dolomitico con recapito preferenziale nel gruppo sorgivo di Acerno (costituito dalle sorgenti di Ausino, Ausinetto e A vella) affiorante ad ovest dell'abitato di Acerno e nella sorgente Olevano, a sud dell'abitato di Acerno. Questa falda di base recapita ancora, in maniera diffusa, nel Torrente Isca della Serra (Piscopo et alii, 1993) e, come hanno accertato ulteriori studi (Budetta & de Riso, 1982; de Riso & Landi, 1998), anche nel Fiume Tuscia-no.

Altre sorgenti minori (fig. 4.1), riconducibili alla presenza di falde superficiali, sono presenti a quote relativamente più alte della falda di base, nell'intorno del contatto tra le dolomie ed i calcari dolomitici. (Piscopo et alii, 2001). Gli autori individuano per queste emergenze un bacino di alimentazione nella formazione calcarea-dolomitica la cui potenzialità idrica è stata valutata attraverso un bilancio idrogeologico che ha anche evidenziato una netta differenza ($7.25 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$) tra infiltrazione ed uscite di acque sotterranee. Pertanto gli autori ritengono che il serbatoio calcareo-dolomitico, oltre ad alimentare le relative sorgenti presenti delle perdite idriche verso la falda basale del complesso dolomitico.

Lungo il margine settentrionale la sub-struttura è separata dall'unità idrogeologica del Terminio dalle faglie dell'alto corso dei fiumi Sabato e Calore; queste, data la presenza di fasce cataclastiche, limitano i travasi sotterranei tra l'acquifero dolomitico e quello calcareo del M.te Terminio. In particolare è stato valutato un dislivello piezometrico di circa 100 m tra il le due falde (Piscopo et alii, 1993).

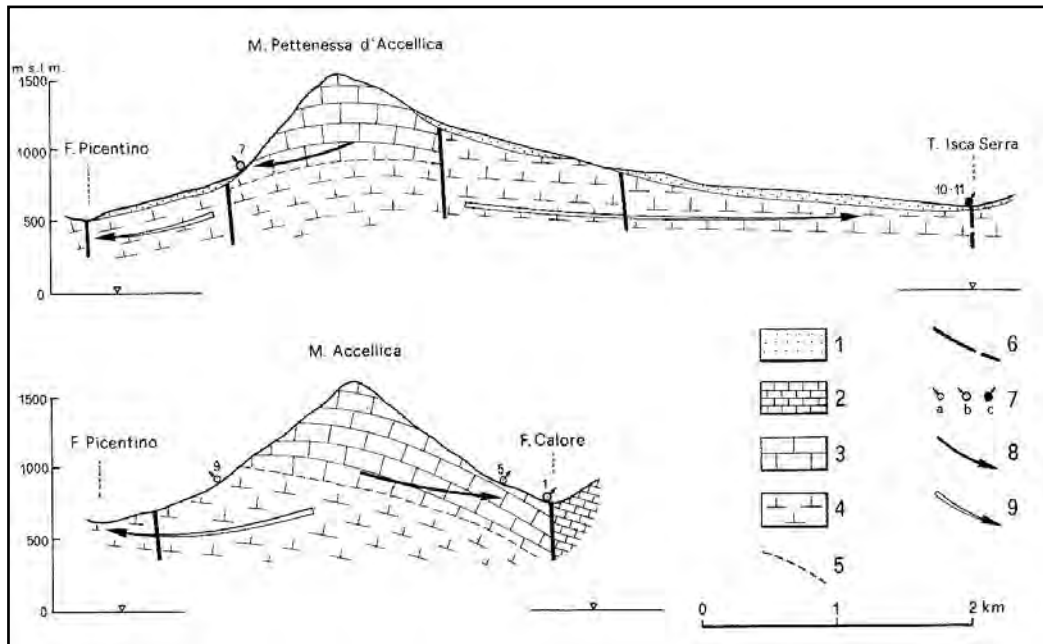


Figura 4.1. - Sezioni idrogeologiche schematizzate. 1) Depositi ghiaioso-sabbioso-limosi. 2) Complesso calcareo. 3) Complesso calcareo-dolomitico. 4) Complesso dolomitico. 5) Probabile limite del complesso. 6) Faglia (presunta se tratteggiata). 7) Sorgente con portata compresa: a) tra 2 e 10 l/s; b) tra 10 e 50 l/s, c) tra 200 e 400 l/s. 8) Direzione di flusso della falda nell'acquifero calcareo-dolomitico. 9) Direzione di flusso della falda nell'acquifero dolomitico di base. (Da Piscopo et alii, 2001).

Il limite orientale coincide con la faglia che borda la depressione strutturale di Acerno e che la separa dall'unità idrogeologica del Cervialto la quale drena l'acqua verso la sorgente di Caposele ($3.95 \text{ m}^3/\text{s}$) ubicata ad una quota di circa 420 m s.l.m. (Piscopo et alii, 1993). La sua prevedibile quota piezometrica, ipotizzando un gradiente del 2%, in corrispondenza della faglia dovrebbe avere una quota all'incirca di 465 m s.l.m. inferiore alla quota di circa 570 m s.l.m del gruppo sorgentizio di Acerno e quindi non correlabile con essa. Gli autori, pertanto, attribuiscono alla suddetta faglia un carattere tamponante

Il limite meridionale viene pertanto a coincidere con la faglia Acerno-Montecorvino Rovella che rende difficile l'interscambio idrico sotterraneo con l'unità idrogeologica del M.te Polveracchio (Celico & Civita, 1976; Celico, 1978; Budetta & de Riso, 1982; Celico, 1983; Piscopo et alii, 1993). Infine viene individuato in corrispondenza del vallone dell'Oglio il limite occidentale della sub-struttura dell'Accellica (Piscopo et alii, 1993).

Durante il lavoro di tesi i dati piezometrici e stratigrafici acquisiti e rielaborati hanno consentito di approfondire gli aspetti relativi soprattutto ai limiti idrogeologici orientale e meridionale.

5 DATI PREESISTENTI E DI NUOVA ACQUISIZIONE

Tutti i dati disponibili (stratigrafici, geofisici, idrogeologici, ecc.) sono stati omogeneizzati e riorganizzati ai fini dell'analisi geologica e idrogeologica del sottosuolo. Il lavoro è stato integrato con un rilievo in campagna che ha comportato l'acquisizione di nuovi dati utili per ampliare la conoscenza dell'area di studio.

5.1 DATI SPAZIALI

Di seguito sono elencati i dati cartografici utilizzati sia in formato vettoriale che in formato raster.

5.1.1 Carta Tecnica Regionale (C.T.R.)

Lo strato informativo e laborato dalla Regione Campania in scala 1:5.000 è in formato raster ed è aggiornato agli anni 2004 – 2005. È stata costruita la base dati vettoriale costituita dalle seguenti componenti informative: altimetria (curve di livello e punti quotati) e idrografia. Dalla acquisizione dell'altimetria è stato possibile elaborare con l'ausilio del GIS, il Digital Terrain Model (DTM) costituito da una maglia con celle di 5 metri di lato.

5.1.2 Carta geologica

Sono stati utilizzati i Fogli Eboli e Salerno della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (Progetto CARG) prodotta rispettivamente dalla Regione Campania e dall'Università degli Studi di Napoli Federico II. Il dato acquisito in formato raster è stato successivamente vettorializzato attraverso l'utilizzo di un Sistema Informativo Geografico (G.I.S.).

5.1.3 Carta del suolo

L'informazione relativa alla tipologia del suolo è stata estratta dalla Carta dei sistemi di terre della regione Campania (scala 1:250.000) realizzata nel biennio 2000-2001 dalla RISORSA s.r.l. (Risorsa - Regione Campania, 2001). La carta rappresenta un inventario d'insieme delle risorse ambientali ed agro-forestali del territorio regionale della Campania. Essa pertanto illustra le strutture ambientali più o meno permanenti, legate all'azione integrata, nel tempo, del clima, dei substrati, della morfologia, delle

comunità biotiche e delle modificazioni antropiche permanenti. Lo strato informativo in formato raster è stato successivamente digitalizzato con il GIS.

5.1.4 Carta di uso del suolo

La carta dell'uso del suolo è una carta tematica di base che rappresenta lo stato attuale di utilizzo del territorio e si inquadra nell'ambito del Progetto CORINE Land Cover dell'Unione Europea. La CUS utilizzata (scala 1:25.000), costituisce un prodotto di approfondimento dell'originario rilievo eseguito dall'UE (Corine Land Cover con dettaglio al IV livello), ed è stata realizzata dal Parco Regionale dei Monti Picentini nell'ambito della redazione del programma "Progetto Database Territoriale". La mappa in formato raster è stata vettorizzata attraverso il G.I.S..

5.1.5 Carta del substrato roccioso

E' stata acquisita una carta a curve di livello del tetto (Fig.5.1) del substrato dolomitico nonché una serie di sezioni elettriche elaborate in seguito ad una prospezione geofisica eseguita negli anni '80 dalla Cassa del Mezzogiorno per indagare il settore meridionale dell'area di studio. Il materiale è in formato cartaceo e in scala 1:5.000.

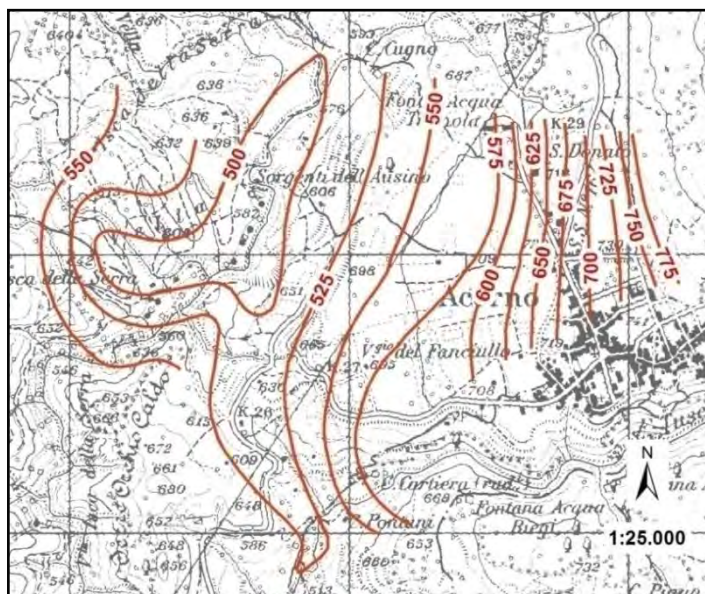


Figura 5.1 – Andamento del substrato dolomitico; i valori di quotasono espressi in m s.l.m..

La prospezione geoelettrica mirava in particolare ad investigare l'area tra le sorgenti Ausino-Ausinetto-Avella e Olevano ivi compresa anche una porzione della piana di Acerno. L'indagine fu realizzata con 41 Sondaggi Elettrici (S.E.) eseguiti secondo il

metodo Schlumberger, con stendimenti AB compresi tra 1000 e 2000 metri. Tale indagine ha evidenziato tre formazioni elettricamente differenziate:

- un ricoprimento con resistività superiore a $1000 \Omega \times m$, con uno spessore di una cinquantina di metri, e con una giacitura suborizzontale in corrispondenza della parte periferica della piana ove sorge l'abitato di Acerno. Tale ricoprimento manca in un settore a ridosso e a est del gruppo sorgentizio Ausino-Ausinetto-Avella. In accordo con i dati geologici in superficie tale orizzonte è associato ai conglomerati della copertura fluvio-lacustre.

- Sotto il ricoprimento è stato individuato un complesso completamente conduttore con resistività intorno a $50 - 70 \Omega \times m$ che in accordo con i dati in superficie è stato identificato con i limi lacustri. Verso la zona ovest all'interno di tale complesso si sono rinvenute localmente intercalazioni di livelli più resistenti ($200 - 600 \Omega \times m$) che potrebbero essere associati a detriti grossolani. Nel settore centrale del bacino lo strato conduttore raggiunge una profondità dell'ordine dei $100 - 120$ metri.

- Un substrato resistente con resistività superiori a $700 \Omega \times m$ identificherebbe la successione carbonatica presente al di sotto dei depositi fluvio-lacustri. Tale successione si rinviene ad una profondità media di circa 150 metri in corrispondenza del tratto del Tusciano prossimo alle sorgenti Olevano, verso nord-ovest tende ad approfondirsi per poi risalire in corrispondenza delle Sorgenti Avella-Ausino-Ausinetto raggiungendo un valore medio pari a 50 metri.

5.2 DATI PUNTUALI

I dati puntuali comprendono i sondaggi, i pozzi, le sorgenti, nonché i dati relativi alle voci del bilancio idrogeologico (precipitazioni, temperature, portate delle sorgenti e dei fiumi). La raccolta di questi dati è stata complessa in quanto le informazioni sono gestite da diversi enti sia privati che pubblici. Successivamente tutti gli elementi raccolti sono stati archiviati in un database geografico.

5.2.1 Dati stratigrafici e idrogeologici

I dati sono stati acquisiti presso gli uffici della Provincia di Salerno e provengono da vari studi effettuati da enti pubblici e privati nonché da studi scientifici. Tali dati si riferiscono a sessanta perforazioni eseguite nel sottosuolo a partire dagli anni '80 con diverse finalità (Tab. 5.1 e Fig 5.2):

- *Sondaggi geognostici.* In genere raggiungono profondità comprese tra 40 e 190 m e riportando i dati stratigrafici con notevole attendibilità. I dati idrogeologici sono riferiti ai livelli idrici. Sono particolarmente concentrati nella piana di Aceno e in prossimità delle sorgenti Olevano e Ausino-Ausinetto-Avella.
- *Pozzi.* Si tratta di due pozzi, uno realizzato all'interno di una grotta (nei pressi della Masseria Giannattasio) per usi potabili e un altro, ubicato in vicinanza della sorgente Olevano, finalizzato alla esecuzione di una prova di emungimento. La profondità di tali pozzi è, rispettivamente, di 157 e 50 metri.
- *Sondaggi e esplorativi.* Forniscono dati stratigrafici per ridotte profondità (da qualche metro a 10 m) e sono stati realizzati ai fini geotecnici.
- *Perforazione petrolifera.* Il dato è stato acquisito dal progetto ViDEPI (Visibilità dei Dati afferenti all'attività di Esplorazione Petrolifera in Italia). Tale progetto ha l'obiettivo di rendere facilmente accessibili i documenti tecnici relativi all'esplorazione petrolifera in Italia. Si tratta di documentazione riguardante titoli minerari cessati, e pertanto pubblica, depositata a partire dal 1957 presso l'UNMIG (Ufficio Nazionale Minerario per gli Idrocarburi e Geotermia) del Ministero dello Sviluppo Economico.

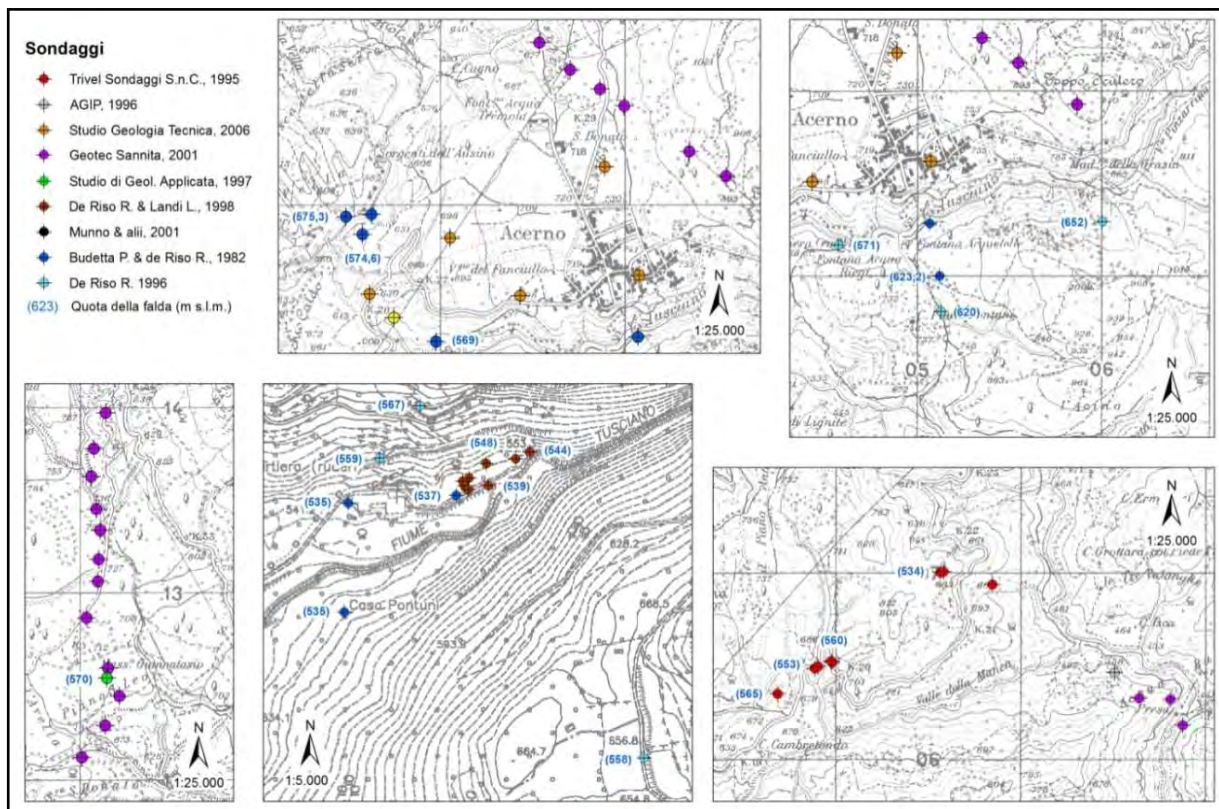


Figura 5.2 – Ubicazioni dei sondaggi censiti.

La perforazione in oggetto fu realizzata da l'AGIP nel '96 a sud de ll'abitato di Acerno in prossimità della sponda sinistra del fiume Tusciano all'altezza dell'affluente Vallone della Manca. Il pozzo raggiunse una profondità di 4.625 metri.

Per ogni sondaggio acquisito sono state immagazzinate le seguenti informazioni: coordinate geografiche, quota altimetrica, profondità, stratigrafia e livello piezometrico laddove è stato rilevato.

Sondaggio	Numero dei sondaggi censiti	Profondità (m)	Fonte
Geognostico	9	da 85 a 186	Budetta & de Riso, 1982
Geognostico	5	30	Studio Geologia Tecnica, 2006
Geognostico	8	da 120 a 194	Trivel Sondaggi S.n.C., 1995
Geognostico	6	da 60 a 220	De Riso, 1996
Geognostico	6	da 35,10 a 50	De Riso & Landi, 1998
Geognostico	1	98	Munno & alii, 2001
Pozzo 1	1	157	Studio di Geol. Applicata, 1997
Pozzo 2	1	16,50	de Riso & Landi, 1998
Esplorativo	22	da 1,60 a 10	Geotec Sannita, 2001
Petrolifero	1	4.625	AGIP, 1996

Tabella 5.1 – Elenco dei sondaggi censiti.

5.2.2 Sorgenti

La ricerca delle sorgenti esistenti nell'area di studio ha utilizzato le seguenti fonti:

- carte topografiche edite dall'I.G.M. (tavole in scala 25.000),
- carta CTR in scala 1:5.000,
- carta idrogeologica redatta dal Parco Regionale dei Monti Picentini,
- Consorzio Ausino S.p.A. - Servizi Idrici Integrati,
- vari lavori bibliografici (Budetta & de Riso, 1982; Piscopo et alii, 1993, 2001).

Per ogni sorgente è stata verificata l'esatta ubicazione in campagna mediante sopralluoghi e contemporaneamente si è provveduto ad un rilevamento degli affioramenti rocciosi nei dintorni delle scaturigini per inquadrare la tipologia delle stesse sorgenti. Fondamentale è stata l'acquisizione di informazioni in loco per conoscere l'ubicazione di alcune sorgenti finora non censite (Tab. 5.2).

Per quanto riguarda la quantizzazione delle portate delle sorgenti captate ci si è rivolti all'Ausino S.p.A. - Servizi Idrici Integrati per emergenze Olevano, Nuova Olevano, a ntico c unicolo O levano e Ausino-Ausinetto-Avella, a ll'Alto C alore S ervizi S.p.A. (per le sorgenti ubicate sul versante settentrionale del M.te Accellica) e al Ser-

vizio Difesa Suolo e Tutela delle Acque della Provincia di Salerno. L'ubicazione delle sorgenti è riportata nella carta idrogeologica (Tav. 1 f.t.).

n.	Denominazione	Quota m s.l.m.	Q med. l/s	Data misura	Utilizzo	Fonte/Note
1	Cunicolo Olevano*	554	50	1998	captata	de Riso & Landi, 1998
2	Olevano	552	221	2004/2007	captata	
3	Nuova Olevano	545	250	2009	captata	Ausino S.p.A.
4	Ausino	568	190	2004/2007	captata	Esistono cospicue perdite nell'alveo
5	Ausinetto	567	116	2004/2007	captata	del Tusciano e dell'Isca della Serra
6	Avella	563	160	2004/2007	captata	
7	Galleria T. Faragna*	495	40	1995	captata	Trivel Sondaggi S.n.C., 1995
8	Masseria Giannattasio	929	1	2010	non captata	
9	Rio Acqua Tremota	607	1,5	2010	parz.captata	Misure dirette
10	Sorgente via Cartiera*	520	3	2011	non captata	
11	Scalandrone	800	38,4	1997	non captata	Ferranti, 1993
12	Font. Acqua Tremota	607	1,5	2010	captata	
13	Sorgente Isca 1	480	0,5	2003	parz.captata	Provincia di Salerno
14	Sorgente Isca 2	482	0,6	2003	parz.captata	
15	Sorgente Isca 3	483	0,6	2003	parz.captata	
16	Raio d. Ferriera I	744	40	2008	captata	
17	Raio d. Ferriera II	790	10	2008	captata	
18	Raio d. Ferriera III	830	8	2008	captata	
19	Raio d. Ferriera IV-V	880	10	2008	captata	
20	Mad. delle Neve I – II	895	4,0	2008	captata	
21	Alveo Calore	840	1	2008	non captata	
23	Lamione	945	< 1	2008	non captata	
24	Laurenziello	760	< 1	2008	non captata	Parco dei Monti Picentini, 2008
25	Vene Rosse	855	< 1	2008	non captata	
26	Infrattata o Mafione	860	< 1	2008	non captata	
27	Varco del Pistone	765	< 1	2008	non captata	
28	Font. di Colle Taversa	1020	< 1	2008	non captata	
29	Fontana dell'Acellica	1145	< 1	2008	non captata	
30	Acqua Amara	1130	< 1	2008	non captata	
31	Pietra con l'Acqua	980	< 1	2008	non captata	
32	Acqua Fredda	1140	< 1	2008	non captata	
33	Croci di Acerno	820	< 1	2010	captata	

Tabella 5.2 – Elenco delle sorgenti censite. Le sorgenti con l'asterisco sono emergenze artificiali.

Per le restanti sorgenti i dati di portata sono stati desunti dalla bibliografia (ove possibile) o ricavate da misure dirette effettuate a gennaio e a luglio del 2010.

5.2.3 Dati climatici

I dati meteo-climatici di precipitazione e temperatura sono stati utilizzati per il calcolo della ricarica della falda del bacino idrogeologico di Acerno.

Sul territorio esistono due reti di monitoraggio pluviometrico gestite da Enti diversi quali l'Alto Calore Sevizi S.p.A. e il Centro Funzionale per la previsione meteorologica e il monitoraggio meteo-idro-pluviometrico e delle frane - Settore di Protezione Civile della Regione Campania. Inoltre sono stati recuperati i valori pluviometrici di una ulteriore stazione ubicata in prossimità della sorgente Avello e gestita dall'Ausino S.p.A. - Servizi Idrici Integrati.



Figura 5.3 – Ubicazione delle stazioni termo-pluviometriche utilizzate per la valutazione della ricarica della falda nel bacino idrogeologico dell'Acerno.

La scelta delle stazioni di interesse (Fig. 5.3), si è basata tenendo conto della orografia dei luoghi, della completezza della serie di dati e della vicinanza all'area di stu-

dio all'interno della quale esiste un'unica stazione pluviometrica quella di Acerno. I dati utilizzati hanno riguardato nello specifico i valori giornalieri della precipitazione e temperatura. Per quanto riguarda la completezza dei dati si è evidenziato che fino all'anno 2000 essi sono sporadici e incompleti mentre misure continue sono state registrate nell'intervallo di tempo dall'anno 2000 al 2009. È stato quindi scelto tale intervallo per l'elaborazione del bilancio idrogeologico. Nella tabella 5.3 è stata riportata la sintesi delle stazioni.

Denominazione	Dato	Quota m s.l.m.	Comune	Ente gestore
Salerno (Genio Civile)	p	28	Salerno (SA)	
Persano Sele	T	35	Eboli (SA)	
S. Mauro	P/T	37	Nocera Inferiore (SA)	
Battipaglia	P/T	50	Battipaglia (SA)	Centro Funzionale per la previsione meteorologica e il monitoraggio
Montecorvino Rovella	P	154	Montecorvino Rovella (SA)	teo-idro-pluviometrico e delle frane -
Contursi	T	164	Contursi (SA)	Settore di Protezione Civile della Re-
Mercato S. Severino	P/T	177	Mercato S. Severino (SA)	gione Campania
Montella	P/T	501	Montella (AV)	
Senerchia	T	582	Senerchia (AV)	
Pontecagnano	P	36	Pontecagnano Faiano (SA)	
Bagnoli Irpino	T	745	Bagnoli Irpino (AV)	
Mercogliano	T	450	Mercogliano (AV)	Alto Calore Servizi S.p.A.
Montella (Cerasa)	P	720	Montella (AV)	
Acerno (Ausino)	P	564	Acerno (SA)	Ausino S.p.A. - Servizi Idrici Integrati

Tabella 5.3– Elenco delle stazioni termo-pluviometriche.

5.2.4 Misure di portate in alveo

Le misure di portata fluviale raccolte (Tab. 5.4) hanno riguardato alcune sezioni lungo i corsi fluviali principali presenti nell'area di studio: il fiume Tusciano e il torrente dell'Isca della Serra. Le misure, realizzate in diversi periodi dal 1980 al 1999, hanno interessato in particolar modo i tratti delle aste fluviali prossimi alle principali emergenze idriche al fine di accertare la presenza di apporti sotterranei alle portate dei corsi d'acqua.

Una prima campagna è stata condotta da Budetta e de Riso per conto della CA-SMEZ che hanno realizzato nei mesi di novembre 1980 – maggio 1981 una serie di

misure in undici stazioni di cui sei lungo il fiume Tusciano e cinque lungo il torrente Isca della Serra (Fig. 5.4/1 e 5.4/3).

Una successiva campagna (de Rido & Landi) di misure (mediante mulinello idraulico; periodo di misura tra settembre 1997 e novembre 1997), per conto del Consorzio Acquedotti Ausino (Fig. 5.4/5), è stata realizzata in cinque stazioni ubicate lungo l'alveo del fiume Tusciano a monte e a valle del gruppo sorgivo Olevano.

Una terza campagna di misure di portate nel Tusciano è stata eseguita nell'intervallo temporale aprile 1999 – luglio 1999 dall'Autorità di Bacino Destra Sele e ha interessato il tratto del fiume Tusciano prossimo all'abitato di Acerno (Fig. 5.4/2).

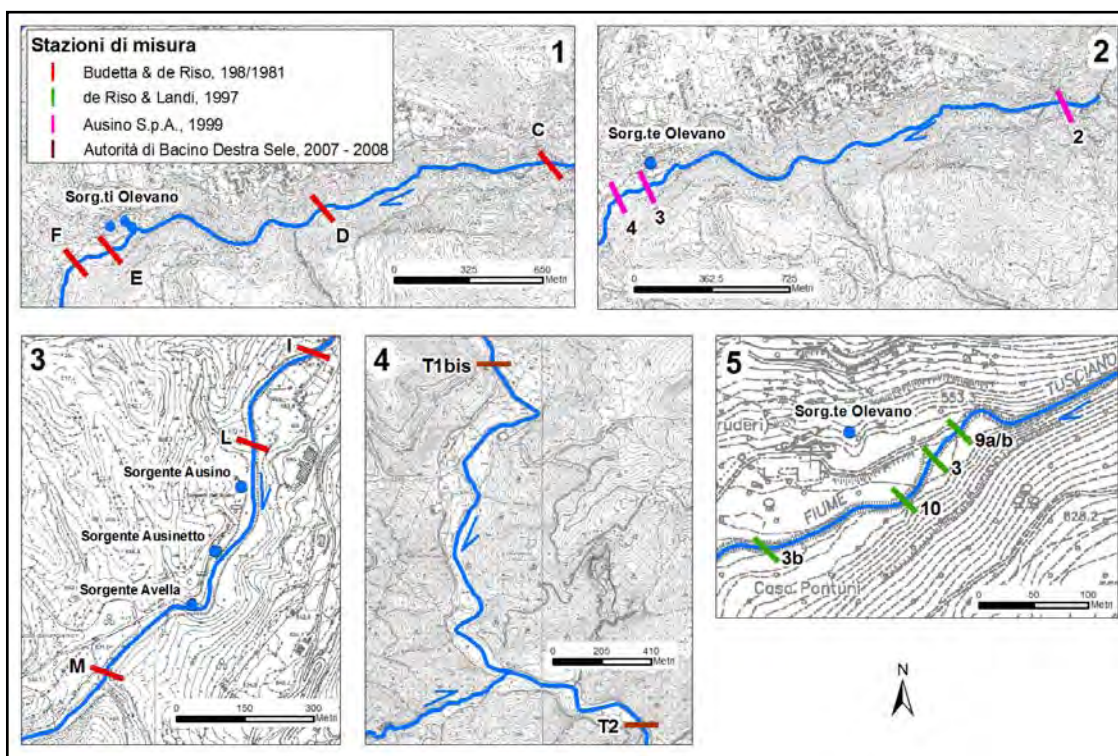


Figura 5.4 – Ubicazione delle stazioni di misura delle portate del fiume Tusciano. Il corso d'acqua nel riquadro 3 è invece il torrente Isca della Serra.

Il tratto dell'alveo Tusciano a valle dell'affluente del Vallone Isca della Serra, è stato oggetto di misure di portate da parte dell'Autorità di Bacino Destra Sele nell'ambito della conoscenza e salvaguardia della risorsa idrica superficiale. Le misure eseguite tra gli anni 2007 e 2008 hanno interessato due sole stazioni (Fig. 5.4/4) di cui la seconda a valle dell'affluenza del Vallone della Manca in sinistra orografica.

5.2.5 Dati chimici e isotopici

La raccolta dei suddetti dati è stata affiancata da prelievi di campioni d'acqua da sorgenti e da un pozzo effettuati da gennaio a marzo del 2010 (Tab. 5.5) e nel mese di maggio 2011. La temperatura, il pH e la conducibilità sono stati misurati in loco, mentre l'analisi dei parametri principali (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , NO_3^-) e la durezza è stata condotta presso il laboratorio del Dipartimento di Chimica "Paolo Corradini" dell'Università degli Studi Federico II di Napoli.

Sigla	Q media (l/s)	Misure	Data misura	Corso d'acqua	Fonte
T1 bis	1499,6	3	Luglio 2007 Aprile 2008	F. Tusciano	Autorità di Bacino Destra Sele
T2	1709	4			
2	239,2	4	Aprile 1999	F. Tusciano	Autorità di Bacino Destra Sele
3	944,7	4	Ottobre 1999		
4	1547,5	4			
9 a/b	198,5	/			
3	557,2	/	Settembre 1997	F. Tusciano	De Riso & Landi
10	601,5	/	Novembre 1997		
3 b	663,1	/			
I	136	/	Settembre 1980	T. Isca della Ser-	Budetta & de Riso
L	201	/	Maggio 1980	ra	
M	626	/			
C	399	/			
D	1383	/	Settembre 1980	F. Tusciano	Budetta & de Riso
E	1790	/	Maggio 1980		
F	2147	/			

Tabella 5.4 – Sintesi degli incrementi di portata nella rete idrografica.

A tali analisi fisico-chimiche sono state aggiunte anche quelle della sorgente carsica Scalandrone (Piscopo et alii, 2001) nonché quelle relative al gruppo sorgivo Olivano e dell'acqua prelevata nella cava di lignite e nella galleria di Toppa Faragna analizzate dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Napoli Federico II negli anni '95.

Su alcuni dei punti d'acqua precedentemente indicati è stato prelevato anche un campione per l'analisi degli isotopi del deuterio (^2H) e dell'ossigeno 18 (^{18}O) eseguita

Sorgente/Pozzo	Data	T ° C	pH -log[H ⁺]	CE 20°C µS/cm	R. F. 180° mg/l	Durezza °Fr	F ⁻ mg/l	NO ₃ ⁻ mg/l	Cl ⁻ mg/l	HCO ₃ ⁻ mg/l	SO ₄ ⁻² mg/l	Na ⁺ mg/l	K ⁺ mg/l	Ca ⁺⁺ mg/l	Mg ⁺⁺ mg/l
Ausinetto ¹	2010	9,4	7,40	320	214	17,6	0,15	1,30	6,4	220	3,4	3,4	1,4	50,6	12,1
Ausino ¹	2010	9,9	7,50	352	236	20,5	0,17	2,70	7,3	250	5,1	4,2	1,8	52,5	17,9
Avella ¹	2010	9,4	7,77	290	194	17,8	0,08	1,50	6,1	231	3,5	4,2	1,1	50,8	12,5
Nuova Olevano ¹	2010	9,9	7,66	312	209	17,5	0,10	1,80	6,5	222	3,2	3,9	1,4	51,9	11,0
Olevano ¹	2010	9,5	7,53	315	211	17,6	0,22	1,70	6,8	224	3,1	4,2	1,6	54,7	9,7
Olevano ²	1996	-	7,50	316	-	-	0,10	2,10	9,9	230	3,2	3,9	1,2	51,5	19,8
Cunicolo Olevano* ¹	2011	9,7	7,20	316	221	-	0,05	2,10	5,6	221	2,4	3,7	1,6	53,9	10,4
Cunicolo Olevano* ²	1996	-	7,07	255	211	18,8	0,20	1,00	7,0	218	2,4	4,1	1,6	57,9	8,9
Font. Tremota ¹	2010	9,8	7,52	455	305	26,1	0,13	11,40	9,4	309	9,2	5,2	1,9	77,7	16,3
Gall. T. Falagna* ¹	2010	10,7	7,62	455	305	26,4	0,34	3,30	10,0	325	7,1	5,9	3,2	56,0	30,1
Gall. T. Falagna* ²	1996	-	7,40	400	-	-	2,00	x	9,2	277	15,0	5,5	1,2	54,7	26,0
Miniera di Lignite ²	1996	-	7,40	316	-	-	0,10	1,10	7,0	234,3	0,1	3,7	1,2	60,5	11,8
Scalandrone ³	2001	10,2	-	-	155	-	-	-	5,5	229	3,4	4,6	3,9	68,7	3,9
Pozzo Giannattasio ¹	2010	8,2	7,80	398	267	14,6	0,05	0,20	5,5	180	3,2	3,3	1,7	47,6	6,5

Tabella 5.5 – Analisi fisico-chimiche delle acque del bacino idrogeologico dell'Acerno. L'asterisco indica la sorgente artificiale. ¹ Analisi eseguita presso il laboratorio del Dipartimento di Chimica "Paolo Corradini" dell'Università degli Studi di Napoli nell'ambito del presente studio; ² Analisi eseguita dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Napoli Federico II; ³ Piscopo et alii, 2001.

presso l'Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria del CNR di Montelibretti (RM) (Tab. 5.6).

5.2.6 Valori di conducibilità idraulica

La raccolta dei dati di permeabilità delle formazioni è stata alquanto complessa (Tab 5.7). I pochi dati a disposizione provengono da de Riso & Landi (1998) che hanno realizzato una prova di falda nel pozzo in prossimità della sorgente Olevano (cfr. § 5.2.1), al fine di testare la potenzialità dell'acquifero dolomitico nonché le sue caratteristiche idrauliche. I valori ottenuti evidenziano la natura confinata della falda idrica.

Sorgente/Pozzo	$\delta^{18}\text{O}$ (vs. SMOW)	$\delta^2\text{H}$ (vs. SMOW)
Ausino	-7,3	-48,2
Avella	-7,5	-47,1
Olevano	-7,6	-48,2
Nuova Olevano	-7,4	-48,8
Cunicolo Olevano*	-7,7	-50,0
Pozzo Giannattasio	-7,5	-49,7

Tabella 5.6 – Analisi isotopiche delle acque del bacino idrogeologico dell'Acerno (cfr. anche Tab. 5.5).

Sondaggio/Pozzo	Tratto prova m dal p.c.	Tipo di terreno	Tipo di prova	K m/sec	T m ² /sec
S1	6,00 – 7,30	Argilla e limi con ghiaia	Carico variabile	1,363E-06	-
S2	5,00 – 6,50	Argilla e limi con ghiaia	Carico variabile	4,588E-06	-
S2	10,40 – 11,90	Argilla e limi con ghiaia	Carico variabile	1,038E-06	-
S3	6,80 – 8,50	Argilla e limi con ghiaia	Carico variabile	5,972E-06	-
S3	24,62 – 26,	Depositi lacustri	Carico variabile	9,678E-07	-
S6	11,00 – 11,50	Argilla e limi con ghiaia	Carico costante	8,000E-3	-
S6	16,50 – 17,50	Brecce carbonatiche	Carico costante	4,000E-03	-
Pozzo	41,00 – 50,00	Dolomia	Prova di falda		2,20E-04

Tabella 5.7 – Valori della conducibilità idraulica e della trasmissività desunti da prove in situ (da de Riso & Landi, 1998).

Gli autori hanno eseguito inoltre alcune prove di tipo Lefranc a carico costante in cinque sondaggi (ubicati nei dintorni delle sorgenti Olevano) (cfr. § 5.2.1) sia su depositi lacustri e sia sulle alluvionali del Tusciano ponendo in risalto la scarsa permeabilità di tali terreni.

La presenza della folta vegetazione nel bacino idrogeologico dell'Acerno non ha consentito di individuare sufficienti e significativi affioramenti di roccia per rilevarne le caratteristiche strutturali e determinare così la permeabilità attraverso metodologie di tipo deterministiche (Louis, 1974; Kiraly & alii, 1971).

6 METODOLOGIA

6.1 ANALISI CHIMICHE DELLE ACQUE SORGIVE

La misura della temperatura, del pH e della conducibilità elettrica dei campioni d'acqua prelevati dalle sorgenti e dal pozzo 1 (cfr. § 5.25) è stata effettuata con una sonda parametrica. La concentrazione degli anioni e cationi Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^- , Cl^- , F^- , NO_3^- è stata determinata presso il laboratorio del Dipartimento di Chimica “Paolo Corradini” dell'Università degli Studi di Napoli mediante cromatografia ionica.

La concentrazione dei bicarbonati (HCO_3^-) invece, è stata definita con titolazione acido-base utilizzando come titolante una soluzione di acido cloridrico.

L'interpretazione dei dati chimici ha consentito di classificare e distinguere i vari tipi di acque presi in esame, in base ai diagrammi di comparazione e in base ai rapporti caratteristici.

Il diagramma di comparazione utilizzato è stato quello di Schoeller-Berkaloff (1935) che visualizza in modo rapido e semplice i dati idrochimici più significativi, e che permette anche di classificare le acque sulla base della loro composizione in ioni principali. Le concentrazioni degli ioni (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) espresse in meq/l vengono riportate su più ordinate in scala logaritmica. I punti rappresentativi così ottenuti lungo le singole scale verticali vengono congiunti con segmenti di retta ottenendo una linea che identifica la composizione chimica dell'acqua. Il primo vantaggio di questa metodologia è legato al fatto che vengono conservati i valori assoluti delle concentrazioni dei singoli ioni: ciò consente di distinguere le acque a debole mineralizzazione da quelle più mineralizzate. Inoltre, la pendenza di ogni segmento che unisce i punti rappresentativi di due ioni differenti raffigura il rapporto caratteristico tra gli ioni stessi: pertanto, rapporti uguali comportano l'esistenza di segmenti paralleli, mentre segmenti a pendenza diversa o invertita indicano che le acque hanno caratteristiche idrochimiche diverse.

Il chimismo delle acque di falda rispecchia la composizione della roccia serbatoio e può essere studiato, tra l'altro, mediante i “rapporti caratteristici” legati, come in ogni reazione chimica, ad un equilibrio condizionato dalla temperatura e dal tempo di interazione acqua roccia, allo scambio di basi e a fenomeni di riduzione.

6.2 ANALISI ISOTOPICHE DELLE ACQUE SORGIVE

Gli isotopi stabili dell'ossigeno (^{18}O e ^{16}O) e dell'idrogeno (^1H e ^2H) vengono utilizzati come traccianti nei cicli dell'acqua. La composizione isotopica è normalmente riportata come valore δ ed espressa in parti per mille (‰), riferita ad uno standard di composizione nota:

$$\delta(\text{‰}) = \left(\frac{R_x}{R_s} - 1 \right) * 1000 \quad [6.1]$$

dove R è il rapporto fra l'isotopo più pesante e quello più leggero (es. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) ed R_x e R_s sono rispettivamente i rapporti del campione e dello standard. Nel caso dell'ossigeno e dell'idrogeno questo standard è lo *V-SMOW* (Vienna – Standard Mean Ocean Water) la cui composizione isotopica approssima quella media delle acque oceaniche (Tab. 6.1).

Elemento	Isotopi stabili	Abbondanza naturale media (%)	Valori dei rapporti standar	Standard di riferimento internazionale
Idrogeno	^1H	99.985	$^1\text{H}/^2\text{H} = 0.000316$	V-SMOW
	^2H	0.015		
Ossigeno	^{16}O	99.7587	$^{16}\text{O}/^{18}\text{O} = 0.0039948$	V-SMOW
	^{18}O	0.2039		

Tabella 6.1 - Elementi chimici, loro isotopi, abbondanze e standard di riferimento.

Gli isotopi sono soggetti in natura a frazionamento isotopico: ciò significa che le proporzioni delle abbondanze relative dei vari isotopi di uno stesso elemento non sono fisse, ma cambiano in seguito a processi fisici: ad esempio, nella condensazione del vapore acqueo gli isotopi più leggeri (^{16}O e ^1H) si concentrano nella fase di vapore, quelli più pesanti (^{18}O e ^2H) nella fase liquida. I frazionamenti che avvengono durante i processi di condensazione e di evaporazione delle acque piovane sono influenzati dalla temperatura. Una delle principali conseguenze di quanto appena descritto è l'effetto altitudine: le piogge originate ai piedi di un rilievo sono isotopicamente più pesanti delle piogge che cadono a quote maggiori (gradiente isotopico verticale).

Grazie al gradiente isotopico si è cercato di stimare la quota relativa di ricarica delle sorgenti principali del bacino di Acerno (quota di condensazione delle piogge che la alimentano).

6.3 BILANCIO IDROGEOLOGICO

Per il bilancio idrogeologico si procede al calcolo analitico dei singoli parametri della seguente espressione:

$$P = ETr + D \quad [6.1]$$

in cui:

P = apporti idrici legati alle precipitazioni atmosferiche in mm/a;

ETr = aliquota d'acqua di evapotraspirazione reale in mm/a;

D = quantitativi d'acqua di deflusso globale (in mm/a), uguale alla somma dei volumi dell'acqua di ruscellamento superficiale (R) che confluisce più o meno velocemente verso i corsi d'acqua e quella di infiltrazione efficace (I).

L'espressione 6.1 è applicabile a bacini idrogeologici ben isolati, cioè a quelle porzioni di territorio in cui le precipitazioni rappresentano l'unica entrata. In altri casi, oltre agli apporti idrici diretti (P), bisogna considerare anche quelli indiretti (A) rappresentati da apporti sotterranei provenienti dai domini idrogeologici adiacenti e dai corsi d'acqua.

In tal caso l'espressione del bilancio idrogeologico viene scritta nella forma più generica:

$$P + A = ETr + D \quad [6.2]$$

Perché il bilancio si possa ritenere eseguito correttamente l'infiltrazione efficace (I) deve corrispondere alle uscite (U) dell'area cui il bilancio è riferito tollerando uno scarto (ε) massimo del 10% che viene calcolato con la seguente espressione:

$$\varepsilon = 100 - \frac{(I - U)}{(I + U)/2} \quad [6.3]$$

Le uscite (U) possono essere rappresentate non solo dalle portate delle sorgenti ma anche dalle perdite sotterranee verso i domini idrogeologici adiacenti e/o verso i corsi d'acqua.

Quando lo scarto (ε) risulta maggiore del 10%, ciò può essere dovuto ad errori di valutazione dei vari parametri del bilancio o all'errata delimitazione del dominio idrogeologico considerato. Non sono comunque da escludere altre ipotesi come, per esempio, travasi di acqua sotterranea proveniente da strutture idrogeologiche confinanti e non considerati nel bilancio.

Il suddetto calcolo è tanto più preciso quanto più frequenti sono le misure dei dati di base e quanto più lungo è il periodo di riferimento (Celico, 1986). Quest'ultimo dovrebbe essere rappresentato dall'anno idrologico, oppure, in assenza di dati che ne consentano la delimitazione si può far riferimento all'anno solare.

Una delle maggiori difficoltà di calcolo del bilancio idrogeologico è la corretta valutazione dei singoli parametri dell'espressione 6.2 per i quali vanno raccolti dati numerosi e precisi.

Le precipitazioni atmosferiche (P) sono rappresentate sia da quelle in forma liquida (pioggia) che da quelle in forma solida (grandine e neve). Nell'area di studio le stazioni individuate sul territorio sono carenti di misure riguardanti il manto nevoso, pertanto si è dovuto fare a meno di tali dati nel calcolo del bilancio.

L'evapotraspirazione ET , rappresenta la quantità d'acqua che in un determinato periodo di tempo passa dal terreno all'aria in forma di vapore per effetto congiunto della traspirazione delle piante e dell'evaporazione dal suolo. L'evapotraspirazione, quindi, valuta il consumo idrico delle colture, intese come il complesso della vegetazione e del terreno su cui essa insiste. In sintesi l'evapotraspirazione dipende dai seguenti fattori (Megale, 2009):

- fattori legati alla coltura: tipo di pianta, fase di sviluppo, densità della coltura e tecnica colturale;
- fattori climatici: radiazione solare, temperatura, vento e umidità relativa dell'aria;
- fattori legati al suolo: contenuto idrico e natura del suolo.

A parità degli altri fattori, l'evapotraspirazione dipende essenzialmente dalla densità della superficie fogliare.

Nella definizione della grandezza di interesse si opera, in genere, una distinzione tra evapotraspirazione reale (ET_r), potenziale (ET_p) e potenziale di riferimento (ET_{p0}).

Per evapotraspirazione reale si intende l' ET_r della coltura in condizioni di rifornimento idrico naturale (assenza di irrigazione), considerando il solo apporto delle piogge per un suolo con un contenuto medio d'acqua disponibile. Pertanto dipende da tutte e tre i fattori precedentemente descritti. È questo, ai fini del bilancio, il parametro da valutare.

Evapotraspirazione potenziale (ET_p) rappresenta il quantitativo massimo di acqua che evaporerebbe nel caso in cui per la vegetazione fossero disponibili volumi d'acqua illimitati, cioè nel caso in cui l'umidità del terreno si mantenesse costante su valori coincidenti con quelli della capacità idrica (RSU) utilizzabile che rappresenta la massima altezza d'acqua capillare, espressa in mm, che può essere utilizzata dalla vegetazione. Questo parametro varia in funzione della tessitura del suolo nonché della profondità dell'apparato radicale. L' ET_p dipende solo dal potere evaporante dell'atmosfera e dal tipo di vegetazione.

Se si rendono costanti i fattori legati alla coltura considerando una piantagione standard, e quelli legati al terreno, mantenendo l'umidità prossima alla capacità idrica,

l'evapotraspirazione diventa un parametro influenzato esclusivamente dai fattori climatici. In questo caso si parla di Evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET_{p0}). La coltura standard è stata individuata in un prato di graminacea con le seguenti caratteristiche: in grande estensione su un terreno pianeggiante, in condizioni ottimali di umidità del suolo, in copertura totale ed omogenea senza diradamenti, in perfetto stato nutrizionale e sanitario e falciato ad un'altezza tra 8 e 15 cm.

Una volta stimato il parametro ET_{p0} attraverso dei coefficienti correttivi detti colturali (K_c) si ricava il valore di ET_p e successivamente con il coefficiente di deficit (K_d) si ottiene quella reale ET_r .

Il valore del K_c dipende dal tipo di coltura che si considera e dallo stadio dello sviluppo in cui questa si trova. Tipicamente in condizioni di buono stato fisiologico delle piante, il K_c cresce a partire dall'inizio della stagione vegetativa, raggiunge un valore massimo, per poi calare in corrispondenza della maturazione. Per la corretta applicazione è quindi necessario conoscere lo stadio fenologico di ogni singola coltura.

I coefficienti colturali sono quindi parametri sperimentali che si ottengono dal rapporto ET_p/ET_{p0} . Per il lavoro sono stati presi in considerazione i valori tabulati dalla FAO (Allen et alii, 1998).

Il coefficiente di deficit (K_d) è legato all'umidità del terreno (U) e si calcola partendo dalla capacità di campo (CC), dal punto di appassimento (PA), della capacità idrica massima (CIM) ed dall'umidità critica della specie (UC). In pratica:

se $U > CC$: K_d decresce linearmente da 1 a 0 (da CC a CIM)

se $U < CC$, ma $> UC$: $K_d = 1$

se $U < UC$: K_d decresce linearmente da 1 a 0 (da UC a PA).

Bisogna tener presente che questi parametri risultano di difficile reperimento.

7 ANALISI DEI DATI

7.1 CARTA IDROGEOLOGICA DELL'AREA DI STUDIO

Ai fini di una corretta ricostruzione dello schema idrogeologico dell'area di studio, sulla base delle caratteristiche litologiche e sedimentologiche delle formazioni descritte nel paragrafo 3.2 sono stati identificati i complessi idrogeologici riportati nella Carta Idrogeologica (Tav. 1 f.t.). I complessi raggruppano formazioni tra loro litologicamente omogenee ed aventi uno stesso *tipo* di permeabilità prevalente ed un *grado* di permeabilità relativa contenuto in un campo di variazione abbastanza ristretto (Civita, 1973).

Le caratteristiche dei complessi (ove affioranti o rinvenuti in sondaggio) vengono di seguito riassunte a partire da quello stratigraficamente più basso.

Complesso delle dolomie inferiori

Costituisce il termine più antico affiorante nell'area di studio ed è rappresentato dalla dolomia massiva di base. Si presenta massiccia o mal stratificata ma sempre intensamente fratturata: in generale pertanto può essere ritenuta mediamente permeabile. Il grado di permeabilità non è tuttavia omogeneo e tende a diminuire verso il basso dell'affioramento.

Complesso marnoso-calcareo

Il complesso delle dolomie inferiori passa ad uno prevalentemente calcareo-marnoso rappresentato dai calcari e marne ad *Avicula* e *Myophoria* sottilmente stratificati e con frequenti intercalazioni di marne di un metro circa di spessore. Il complesso presenta una limitata permeabilità complessiva proprio per la diffusa presenza dei termini marnosi.

Complesso delle dolomie superiori

Comprende la formazione della dolomia superiore la cui permeabilità relativa non è alta in ragione della diffusa e munita fratturazione tettonica. In particolare le dolomie rinvenute nell'immediato sottosuolo del gruppo sorgivo Olevano e nei pressi di Toppa della Faragna sono estremamente cataclasizzate a causa della vicinanza dell'importante fronte di sovrascorrimento della *finestra tettonica* di Campagna (cfr. § 3.1). La scarsa solubilità delle dolomie, inoltre, rende il contributo del carsismo alla permeabilità complessiva poco significativo.

Complesso calcareo-dolomitico

Vi sono state raggruppate le formazioni dei calcari a *Palaedasyclus* e dei calcari oolitici costituiti da alternanze di calcare, dolomie e calcari dolomitici. La successione si presenta fratturata e stratificata con locali, modeste forme carsiche epigee. Il complesso presenta, nell'insieme, una media permeabilità.

Complesso calcareo

È costituito dai calcari delle formazioni dei Calcari con *Cladocoropsis* e *Clypeina* e dei Calcari con *Requienia* e *Gastropodi*. Tutta la pila calcarea può essere considerata dal punto di vista idrogeologico sufficientemente omogenea per il comportamento, sostanzialmente simile, nei confronti del tipo e grado di permeabilità. La presenza di un livello marinoso sottilmente stratificato, a volte presente nella parte bassa della formazione dei Calcari con *Cladocoropsis* e *Clypeina*, ha di fatto un'influenza solo locale sulla permeabilità dell'insieme e può consentire la formazione di piccole sorgenti nell'ambito dell'acquifero calcareo. L'alto grado di permeabilità del complesso calcareo deriva dalla fratturazione, dalla presenza dei piani di stratificazione e da un diffuso (sia pur contenuto) fenomeno carsico.

Complesso conglomeratico

Vi sono raggruppate tutte le formazioni conglomeratiche di origine continentale dal Pliocene al Pleistocene (Sistema di Aquile, Supersistema Eboli e Sistema di Iumaiano). Nonostante la granulometria grossolana e la scarsa cementazione, questi conglomerati presentano una permeabilità relativa bassa per la presenza di una matrice diffusa e prevalentemente fine.

Complesso fluvio-lacustre di Acerno

Al complesso fluvio-lacustre sono stati associati i sedimenti depositati nel bacino intramontano di Acerno. La successione è caratterizzata da sabbie siltose e marne bianche con lenti di lignite e argilla nerastra e sottili intercalazioni di livelli piroclastici praticamente impermeabili. Alla sommità e alla base dei depositi lacustri sono presenti orizzonti di conglomerati in matrice sabbiosa caratterizzati da una permeabilità per porosità da media ad alta; il resto del complesso è invece assai poco permeabile.

Complesso detritico di falda

È formato dai detriti carbonatici derivati dall'erosione dei rilievi ai margini della piana di Acerno. Si tratta di un deposito a granulometria assortita e con una frazione pelitica assai abbondante; il grado di permeabilità è da ritenere medio-alto.

Complesso colluviale ed eluviale

Presenta un basso grado di permeabilità in quanto prevale una frazione limo argillosa con subordinate inclusioni di ciottoli lapidei.

Complesso alluvionale e travertini

Il complesso alluvionale riunisce i depositi fluviali presenti lungo gli attuali corsi d'acqua. Si tratta di materiale poligenico mal classato (ghiaia, sabbia e limo) e caratterizzato da una permeabilità relativa (per porosità) mediamente bassa per la diffusa presenza di materiale fine. In corrispondenza della sorgente Nuova Olivano i sondaggi eseguiti in prossimità dell'alveo del Tusciano hanno rinvenuto del travertino vacuolare (con diverso grado di diagenesi); gli affioramenti di tale litologia sono invece assai ridotti.

7.2 SEZIONI IDROGEOLOGICHE

Per una migliore comprensione dell'assetto idrogeologico dell'area di studio, si è cercato di ricostruire, attraverso più sezioni, il rapporto spaziale tra i complessi idrogeologici precedentemente individuati (cfr. § 7.1). A tal fine sono state reinterpretate alla luce dei complessi le stratigrafie dei sondaggi (cfr. § 5.2.1) ed utilizzate le informazioni provenienti dall'indagine geofisica (cfr § 5.1.5). Laddove mancavano le informazioni stratigrafiche si è tenuto conto delle informazioni tratte dalla carta geologica 1:50.000 del foglio E boli (ISPRA in fase di stampa) e di dati bibliografici. Ove noto, nelle sezioni è stato riportato anche l'andamento del livello piezometrico il quale è rappresentativo della quota di livellamento della falda. In linea generale i profili (Fig. 7.1, 7.2a, 7.3 e 7.4) evidenziano le seguenti situazioni:

- nel settore meridionale prossimo al gruppo sorgentizio Olivano la sezione F-F' evidenzia che la faglia, sulla quale si è impostato il corso d'acqua del Tusciano, costituisce effettivamente uno spartiacque sotterraneo creando uno sbarramento verso sud alla circolazione idrica nel bacino idrogeologico dell'Acerno. Infatti:

- si rivince un livello piezometrico a quota maggiore in sinistra orografica rispetto a quello presente in destra;
- le sezioni H-H' e G-G' mostrano che, passando in sinistra orografica termini carbonatici risultano efficacemente tamponati da depositi limosi assai poco permeabili.

Inoltre è da sottolineare che i sondaggi eseguiti in prossimità della sorgente Olevano hanno evidenziato che la dolomia presenta un alto grado di fratturazione evidentemente a causa della suddetta faglia su cui è impostato il fiume Tusciano;

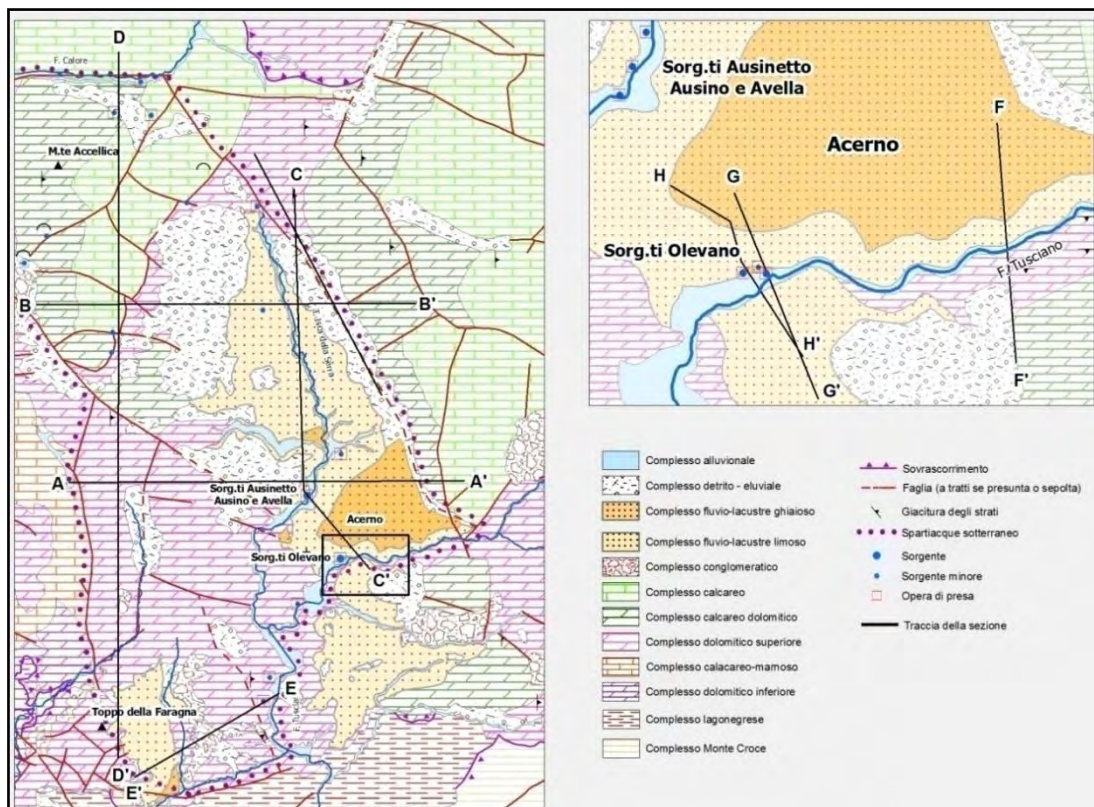


Figura 7.1 – Tracce delle sezioni riportate nelle figure 7.2a, 7.2b, 7.3 e 7.4.

- dalle sezioni A-A' e C-C' si evince che la falda accolta nel complesso delle dolomie superiori è diviene confinata in corrispondenza della coltre impermeabile fluvio-lacustre; qui infatti il livello della falda è nettamente più alto rispetto alla base dello spessore impermeabile. La quota di sfioro delle sorgenti Ausino-Avella (mediamente 568 m s.l.m.) (Tab. 5.2) si raccorda con il livello piezometrico misurato nel pozzo d'acqua (Tab. 5.1 e Fig 5.2) ubicato nella parte alta della piana di Acerno (570 m s.l.m.);

- nei settori settentrionali e occidentali la falda idrica ha sede p.p. nel complesso calcareo dolomitico (sezione D-D');

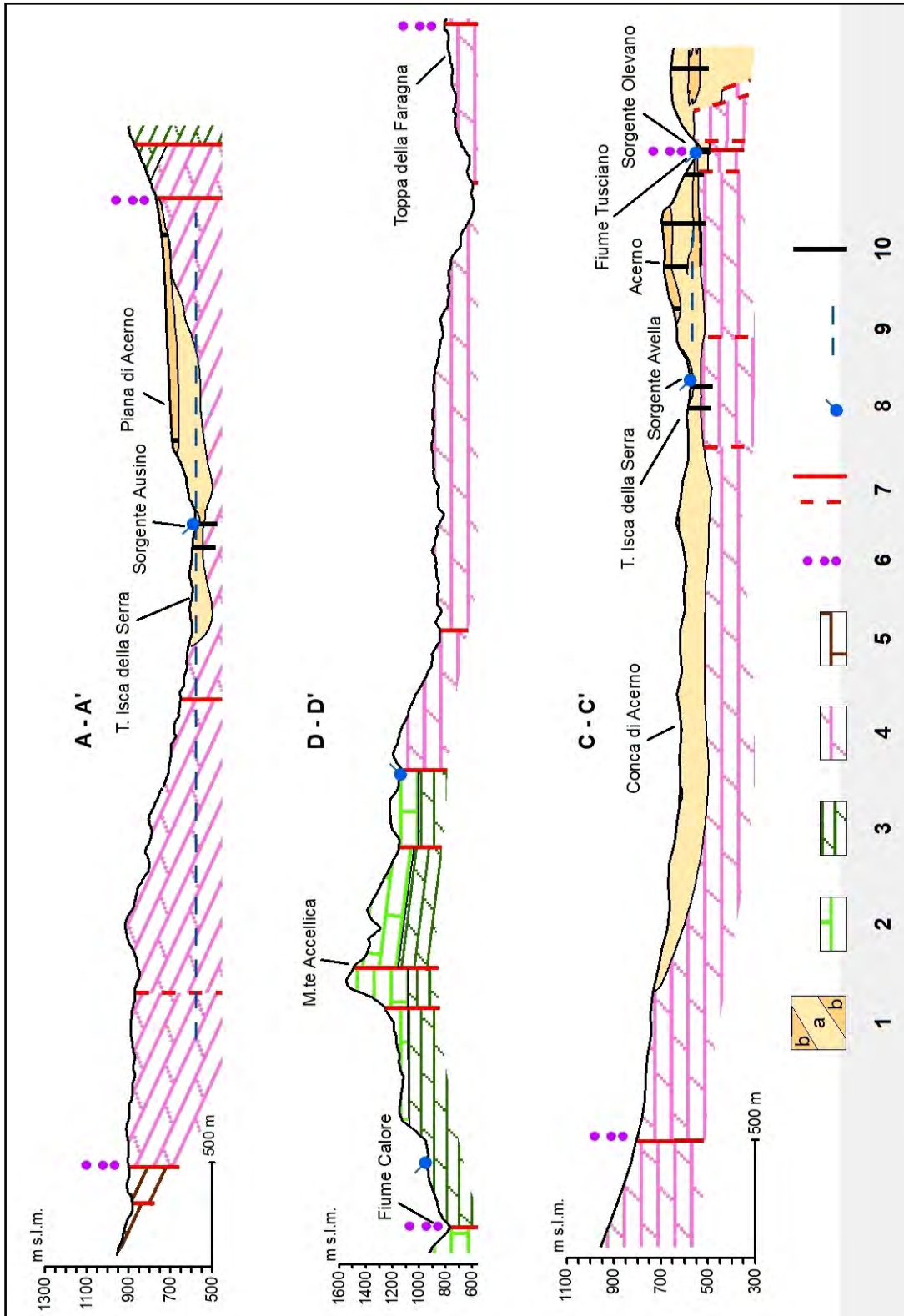


Figura. 7.2a – Sezioni i drogeologiche. 1) complesso fluvio-lacustre; 2) complesso calcareo; 3) complesso calcareo dolomitico; 4) complesso dolomie superiori; 5) complesso marnoso calcareo; 6) spartiacque sotterraneo; 7) faglie (tratteggiate se presunte); 8) sorgenti; 9) livello piezometrico; 10) sondaggi.

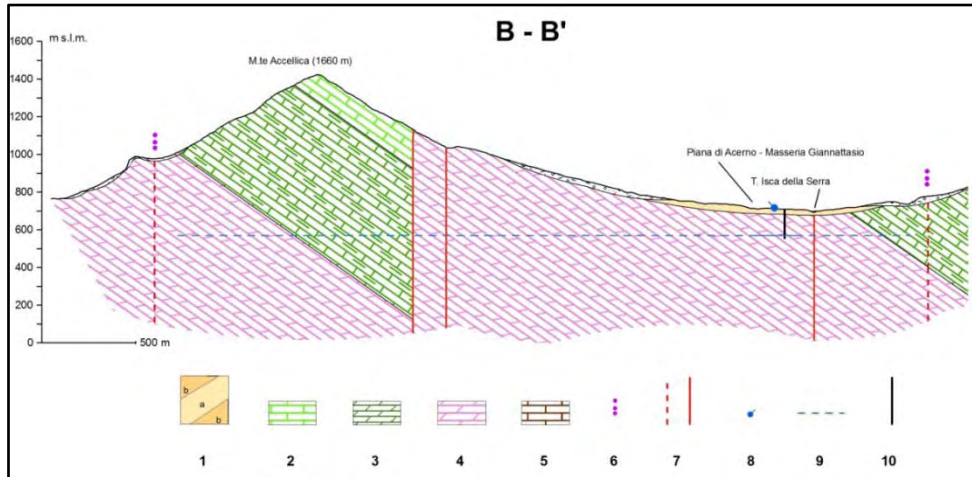


Figura 7.2b – Sezione idrogeologica in corrispondenza del M.te Accellica. Per la legenda consultare la figura 7.2b.

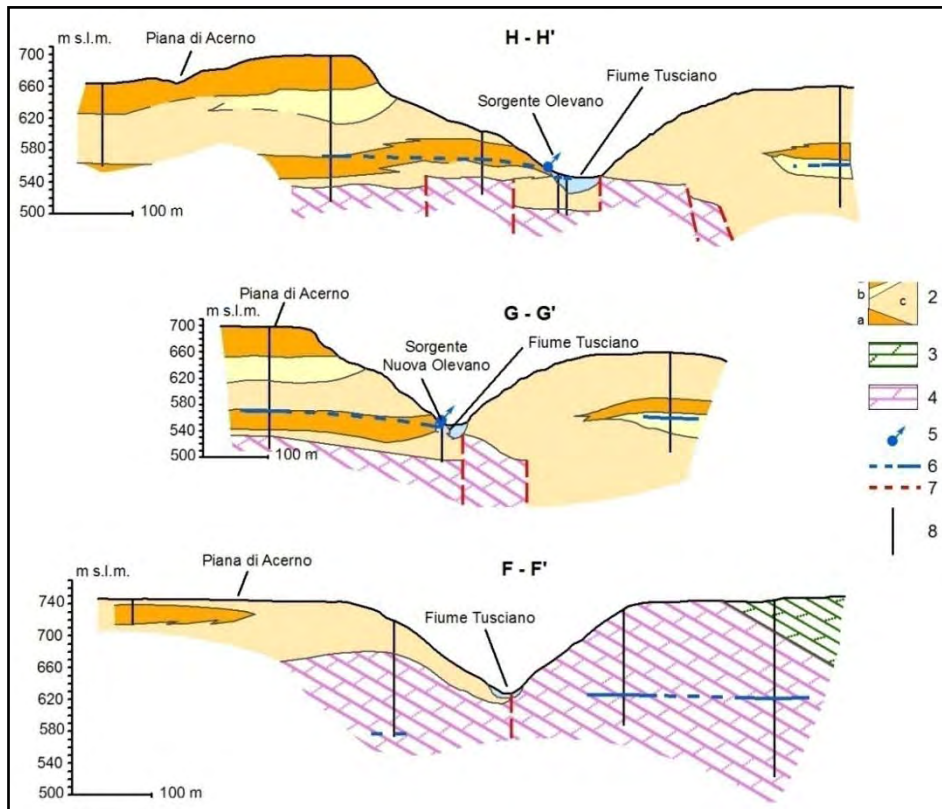


Figura 7.3 – Sezione idrogeologiche di dettaglio. 1a) alluvioni; 1b) travertino; 2) complesso fluvio-lacustre: a) conglomerati, b) sabbie, c) limi; 3) complesso calcareo dolomitico; 4) complesso dolomie superiori; 5) sorgenti; 6) livello piezometrico; 7) faglie presunte; 8) sondaggi.

- la profondità del substrato dolomitico in corrispondenza dei due principali gruppi sorgivi (sezione C -C') si riduce all'incirca a 40 -50 metri nell'area dell'Ausino-Ausinetto-Avella e di 15-20 metri nella zona dell'Olevano;

- nel settore SW del bacino in corrispondenza del rilievo Toppa della Faragna (sezione E-E'), la falda si rinviene nel complesso dolomitico ad una quota media intorno ai 566 m s.l.m. che verso NE (sinistra del fiume Tusciano) sembrerebbe essere tamponata da una faglia. Infatti, in seguito allo scavo di una galleria per la costruzione di un acquedotto, probabilmente durante l'attraversamento di tale faglia si è verificata la fuoriuscita di acqua ad una quota di 500 m s.l.m. Tra l'altro, l'estrema fratturazione della roccia e la presenza della falda determinarono l'afflusso in galleria di un'ingente quantità di sabbia limosa dolomitica satura che, di fatto, portò all'abbandono dello scavo. Da allora l'acqua rinvenuta nel tratto di galleria realizzato ha dato origine ad una "nuova" sorgente con quota di afflusso pari a 495 m s.l.m. e portata di 50 l/s. un livello piezometrico a quota.

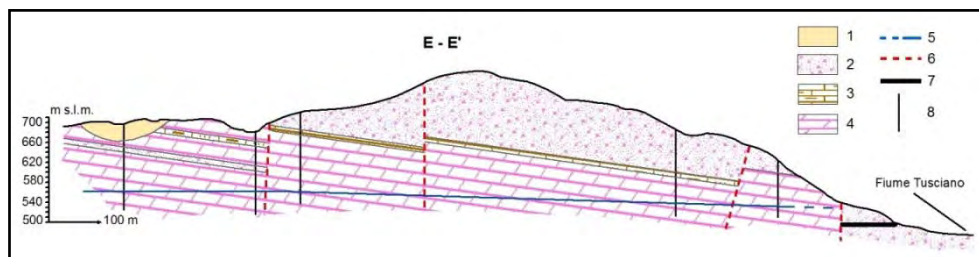


Figura 7.4 – Sezione idrogeologica dell'area di Toppa della Faragna. 1) complesso fluvio-lacustre; 2) complesso dolomie superiori arenizzata; 3) complesso argilloso e marnoso; 3) complesso dolomie superiori; 5) livello piezometrico (tratteggiato presunto); 6) faglie presunte; 7) galleria della Faragna; 8) sondaggi.

7.3 IDROGEOCHIMICA

Nella Tabella 5.5 sono riportati i risultati delle analisi chimiche dei campioni d'acqua prelevati alle sorgenti e in pozzo.

Per una prima interpretazione dei dati è stato utilizzato il diagramma semilogaritmico di Schoeller - Berkaloff (Fig. 7.5) nel quale si osserva che le acque dei due gruppi sorgivi principali (Tav. 1 f.t.) nonché quello del campione d'acqua prelevato dal pozzo nei pressi della Masseria Giannattasio (Fig. 5.2) ubicato nella piana e distante 2.70 Km dal gruppo sorgivo Ausino-Ausinetto-Avella, mostrano dei profili chimici del tutto comparabili a conferma che provengono dallo stesso acquifero.

Le acque drenate dallo scavo della galleria nel rilievo dolomitico di Toppa della Faragna (Tav. 1 f.t. e Fig. 7.6) rivelano un chimismo leggermente diverso rispetto alle acque dei principali gruppi sorgivi. Il profilo chimico evidenzia un contenuto leggermente maggiore di magnesio.

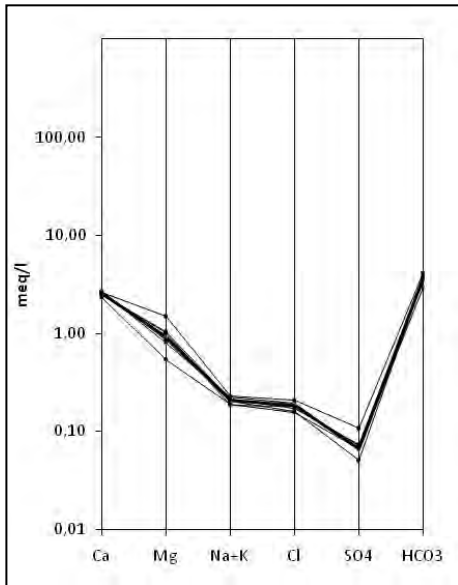


Figura 7.5 – Diagramma di Schoeller-Berkaloff de l gruppo sorgivo O levano e A usino-Avella e del pozzo Giannattasio.

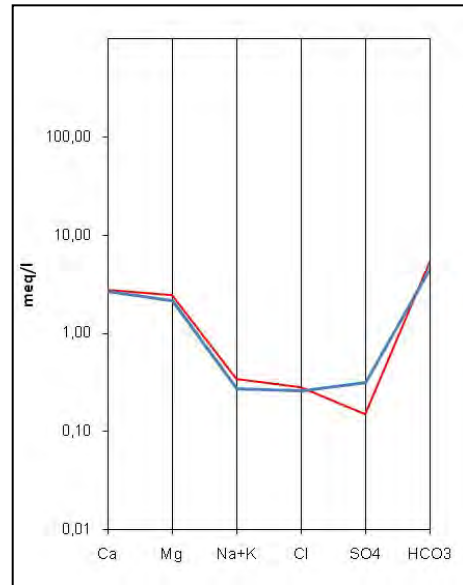


Figura 7.6 – Diagramma di Schoeller-Berkaloff della ga lleria Faragna. In rosso analisi del 1996 e in blu analisi del 2010.

Nel corso del tempo la composizione chimica delle acque delle sorgenti è rimasta invariata come viene evidenziato dal grafico di Schoeller-Berkaloff (Fig. 7.6, 7.7 e 7.8) dove i profili chimici relativi ai diversi anni si presentano sostanzialmente simili.

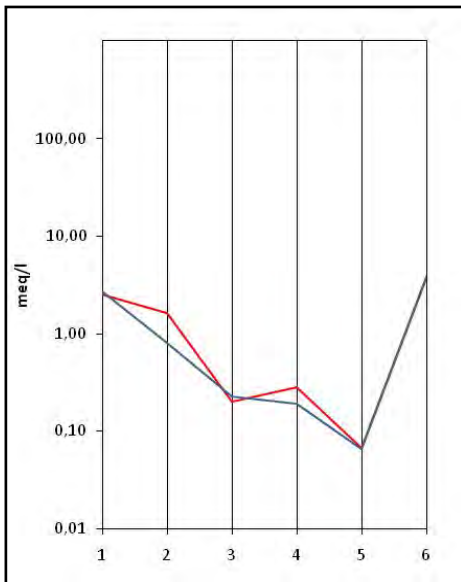


Figura 7.7 – Diagramma di Schoeller-Berkaloff della s orgente Olevano. In rosso analisi del 1996 e in blu analisi del 2010.

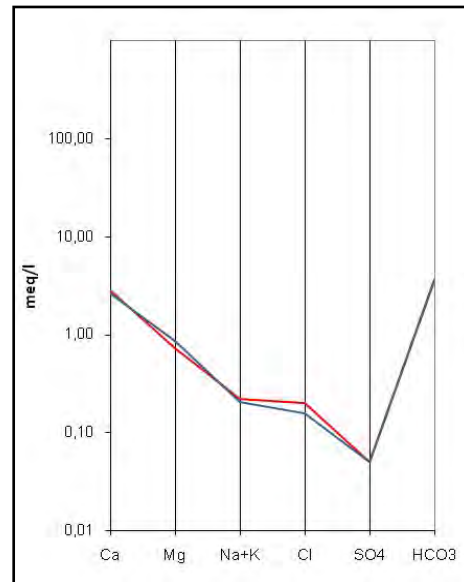


Figura 7.8 – Diagramma di Schoeller-Berkaloff del cunicolo Olevano. In rosso analisi del 1996 e in blu analisi del 2010.

Le acque sorgive rinvenute nella miniera di lignite evidenziano un ambiente riducente testimoniato dai bassi valori di solfati e nitrati.

Il rapporto rMg/rCa pari a 0,78 e a 0,89 rispettivamente per le acque analizzate nel 1996 e nel 2010 si discosta dal valore medio di 0.4 calcolato sulle sorgenti principali della zona. Tale valore potrebbe essere giustificato da fenomeni di lisciviazione di livelli limosi e/o conglomerati presenti nell'area di studio (Corniello, 1994).

Infine il chimismo delle acque della sorgente carsica Scalandrone è coerente con il tipo di acquifero calcareo in quanto si evidenzia un valore basso del rapporto rMg/rCa pari a 0.093.

I dati isotopici (2H e ^{18}O) ottenuti per i punti d'acqua ritenuti più significativi sono indicati in Tabella 5.6. La Figura 7.9 localizza le composizioni isotopiche dei campioni di acqua dolce nel classico diagramma $\delta^2H / \delta^{18}O$, dove sono riportate per riferimento le equazioni di due rette delle precipitazioni meteoriche, valide l'una per il sud di Italia (Longinelli & Selmo, 2003), l'altra per la zona di Palinuro (Leone & Mussi, 2004) distante 80 km in linea d'aria dalla Conca di Acerno.

In prima approssimazione le acque dell'area del bacino dell'Acerno sembrano disporsi secondo un trend parallelo alle rette riferite alle composizione isotopica globale delle acque meteoriche. Inoltre essendo i rapporti isotopici dei vari punti d'acqua molto simili, si conferma che le emergenze idriche sono collegate allo stesso serbatoio.

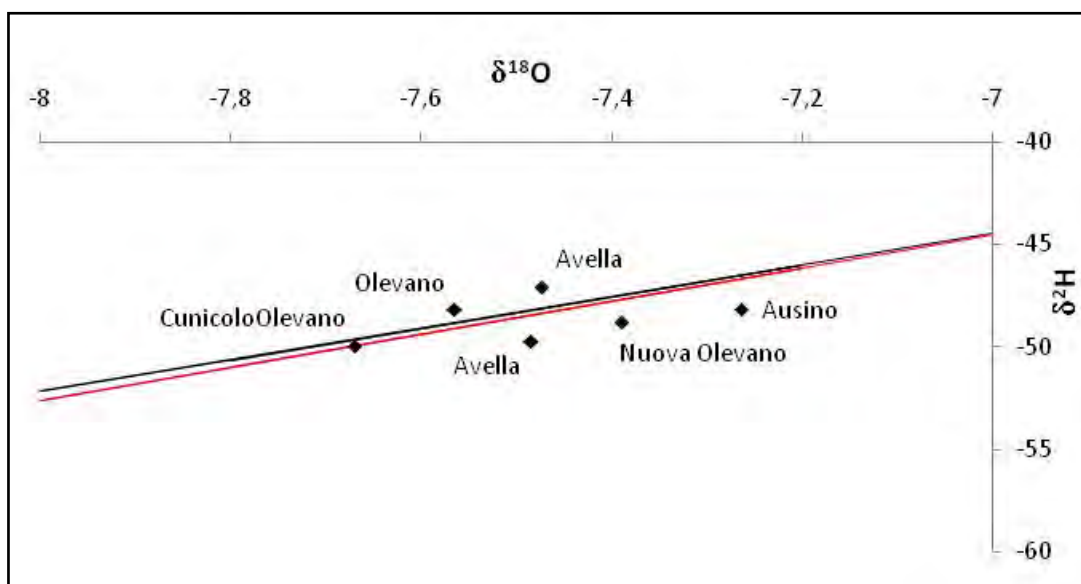


Figura 7.9 – Relazione tra $\delta^{18}O$ e δ^2H . Le linee rossa e blu sono le rette delle precipitazioni meteoriche valide rispettivamente per il sud di Italia (Longinelli & Selmo, 2003) e per la zona di Palinuro (Leone & Mussi, 2004).

Le composizioni isotopiche delle acque sorgive riflettono l'andamento altimetrico del bacino di alimentazione (Cfr. § 6.2). Per la Campania non esiste ancora una retta sperimen-

tale delle acque meteoriche e non si dispone di correlazioni a livello locale. Per individuare l'area di ricarica si è fatto riferimento, in primo luogo, a considerazioni svolte da diversi Autori in contesti idrogeologici simili. Celico et alii (1979), individuano il bacino di alimentazione a circa 800/900 m s.l.m. di alcune sorgenti alimentate dal complesso carbonatico della porzione settentrionale dei M. ti Picentini. Ortolani et alii (1981) per alcune sorgenti alimentate dalla struttura carbonatica meridionale del M. te Polveracchio) individuano valori di $\delta^{18}\text{O}$ compresi tra 7.16 e 7.20 attribuendoli ad una quota media tra di 890 m s.l.m..

Per lo studio isotopico delle piogge, un ruolo strategico è svolto dall' Agenzia Internazionale per l' Energia Atomica (IAEA/UNESCO), la quale ha attivato con la WMO (World Meteorological Organization) il programma GNIP (Global Network of Isotopes in Precipitation). Lo scopo dello GNIP è di raccogliere sistematicamente dati isotopici di precipitazione su base mensile e su una scala globale al fine di osservarne la distribuzione nello spazio e nel tempo e per poterli relazionare con gli altri parametri ambientali (temperatura, altitudine, ecc.). Le singole Nazioni hanno avviato i rispettivi programmi. In Italia, solo nel 2000 si è coordinato un Gruppo Informale di Geochimica Applicata (GIGA) che sta organizzando un' unica rete di monitoraggio delle precipitazioni.

Consultando il database dell' AIEA/WMO, nell' area ove ricade la struttura del M. te Accellica, i valori ottenuti dall' analisi isotopica possono essere associati ad una quota altimetrica che oscilla tra i 1000 metri e 1150 metri s.l.m.

7.4 OSSERVAZIONI SULL' ORIGINE DELLE SORGENTI

Come indicato nel paragrafo 5.2.2, nell' area di studio sono state identificate 32 sorgenti. L' origine di queste scaturigini si può ricondurre, quasi sempre a due sole tipologie:

- intersezione della superficie topografica con quella piezometrica in corrispondenza dei corsi d' acqua (sorgenti per affioramento della piezometrica di una falda freatica o in pressione);
- locali variazioni verticali di permeabilità lungo versanti (sorgenti per limite di permeabilità).

La prima tipologia si ritrova (con variazioni) in tutte le maggiori sorgenti che di fatto costituiscono l' origine dell' approvvigionamento idrico fornito dall' acquedotto dell' Ausino; e cioè, il gruppo sorgivo Olevano (Olevano, Nuova Olevano e cunicolo Olevano), la sorgente Avella e il gruppo sorgivo Ausino (Ausino e Ausinetto). Tutte queste sorgenti, si ri-

corda, sono connesse ad un'unica falda come indica l'insieme dei dati raccolti piezometrici, chimici ed isotopici (cfr. § 7.2 - 7.4) accolta nel substrato dolomitico della Conca di Acerno.

Il gruppo sorgivo Olevano si origina nel settore a S dell'abitato di Acerno, in corrispondenza della sponda destra del fiume Tusciano, alla base di un alto costone dove affiora un grosso banco di conglomerati in matrice sabbiosa più o meno cementati, appartenenti alla sequenza dei depositi fluvio-lacustri.

La sorgente principale di questo gruppo è in destra idrografica, in corrispondenza dell'alveo del F. Tusciano (dove misure in alveo hanno registrato significativi incrementi di portata; cfr. § 5.2.4). Qui erano presenti diverse sorgenti distribuite intorno alla quota di 545 m s.l.m. Di recente tali scaturigini sono state captate dal Consorzio idrico dell'Ausino per una portata dell'ordine dei 250 l/s e ad esse è stata assegnata la denominazione di "Nuova Olevano" in quanto non censite nella letteratura specifica. Le indagini eseguite ai fini della captazione hanno consentito di proporre per tali emergenze lo schema sintetizzato nella Sez. E-E' di Fig. 7.3. Le venute d'acqua si verificano in corrispondenza di un deposito di travertino esteso e profondo (e non affiorante), interposto tra i conglomerati basali della sequenza fluvio-lacustre (Fig. 3.5) e le alluvioni recenti del F. Tusciano. I conglomerati ricevono alimentazione dal basso, dal sottostante acquifero dolomitico col quale sono in contatto diretto ovvero, a luoghi, separati da spessori di materiali fluvio-lacustri, fini e di scarsa permeabilità. Per la captazione di queste scaturigini si è realizzato nell'anno 2007 un "drenaggio addossato" collegato in profondità ad un setto impermeabile di pali affiancati per contenere le perdite idriche verso il materasso delle alluvioni. La scelta di un'opera di presa "esterna" è stata dettata dall'esigenza di non creare interazioni con la non distante sorgente Olevano già captata negli anni 50 del secolo scorso.

La sorgente dell'Olevano è ubicata ad una quota di 552 m s.l.m. e presenta uno schema non dissimile da quello già descritto (Fig. 7.3, Sez. D-D'); in questo caso non è stato tuttavia rinvenuto il banco di travertino. L'opera di presa, costituita da una galleria drenante scavata nella formazione dei conglomerati, si sviluppa per un totale di centosessanta metri in debole pendenza con un andamento pressoché rettilineo in direzione Nord fatta eccezione per le brevi ramificazioni finali. La galleria si presenta rivestita da una muratura in cemento, sino all'estremità terminale dove invece affiora la formazione rocciosa. Da qui scaturiscono le acque che vengono poi raccolte in canalette e convogliate in vasche con una portata media di 221 l/s (Tab.5.2)

L'ultima sorgente del gruppo Olevano è situata ad una quota di 555 m s.l.m. circa e ad un centinaio di metri (verso ovest) dalla sorgente Olevano; denominata "antico cunicolo Olevano" è captata mediante una piccola galleria parzialmente rivestita lunga circa quattro metri scavata in parte nel materiale lacustre ed in parte in quello conglomeratico. Verosimilmente rappresenta un'uscita secondaria, meno importante (la sua portata è infatti pari a 50 l/s; Tab.5.2) della sorgente Olevano.

Come si è visto, le diverse sorgenti di questo gruppo presentano, tra loro, quote di affioramento piuttosto dissimili. La ragione di ciò va verosimilmente ricercata nel concorso di più fattori differenti quali, ad esempio:

- l'alimentazione dal basso (cioè dal substrato dolomitico) verso i depositi conglomeratici che può essere più o meno ostacolata dall'interposizione di materiale poco permeabile;
- la posizione altimetrica del bancone conglomeratico (legata a motivi stratigrafici e/o tettonici) che può variare da luogo a luogo lungo il fronte sorgentizio

Il gruppo sorgivo Ausino e la sorgente Avella (Fig. 7.2) emergono in prossimità del Torrente Isca della Serra lungo la sponda sinistra ed a NW del centro abitato di Acerno. Le tre scaturigini, che distano l'una dall'altra circa 130 metri, sono ubicate ad una quota intorno ai 550 metri circa e traggono anche esse alimentazione dal substrato dolomitico, come evidenzia il chimismo delle loro acque (cfr. § 7.3). Come risulta dalle Sezioni A-A' e C-C' di Fig. 7.2, la falda del substrato è tenuta in condizioni di confinamento (o di semi-confinamento) dai depositi fini fluvio-lacustri. Tutte le sorgenti sono significativamente localizzate in corrispondenza del Torrente Isca della Serra e ciò lascia intendere che la venuta a giorno delle acque in pressione del substrato si verifica laddove l'azione erosiva (associata ad eterogeneità nell'ammasso fluvio-lacustre) del torrente, assottigliando lo spessore dei depositi fluvio-lacustri, ha consentito la risalita della falda profonda.

Le emergenze possono quindi essere classificate come sorgenti per affioramento della piezometrica di una falda in pressione. Entrambi sono state captate negli anni '20 con dei bottini di presa e drenano una portata media di circa 306 l/s per la Sorgente Ausino e Ausinetto e 160 l/s per la sorgente Avella (Tab.5.2).

Tutte le sorgenti fin qui descritte sono sempre collegate al substrato dolomitico, tuttavia le sorgenti Avella Ausino ed Ausinetto emergono a quote (tra loro prossime) significativamente più alte rispetto alle quote di affioramento del gruppo Olevano (poste più a valle secondo la direzione di flusso). Ciò determina, tra i due gruppi, la presenza di un gradiente

piuttosto acclive che non si registra in altri settori della falda del substrato dolomitico. Una possibile spiegazione di ciò può essere ricercata sia nelle peculiari modalità di affioramento (prima descritte) delle sorgenti Olevano s.l. ma anche considerando che, a misura che ci si approssima al corso del Tusciano, la permeabilità del substrato dolomitico potrebbe subire una progressiva riduzione in quanto ci si avvicina al settore di grosso disturbo tettonico legato alla grande faglia (orientata E-W, cfr § 3.1) lungo la quale è impostato il corso del fiume (cfr. Sezioni di Fig. 7.2 e 7.3)

La seconda tipologia di emergenza caratterizza le sorgenti ubicate lungo i versanti della struttura montuosa dell' Accellica. Le sorgenti più importanti in termine di portata (4 - 40 l/s) sono localizzate ad una quota tra 745 e 895 m s.l.m. sul versante settentrionale del rilievo e risultano essere captate per uso potabile.

Sorgenti con portata non superiore ad un l/s ad eccezione della emergenza dello Scaldrone (35 l/s) (cfr. § 3.4) affiorano nel complesso dolomitico (versante SW della cima dell' Accellica) ad una quota compresa tra i 760 e 1145 m s.l.m.

Uno dei motivi principali dell'origine delle scaturigini settentrionali che affiorano nel complesso calcareo-dolomitico è, secondo Piscopo et alii (2001), la maggior permeabilità relativa delle rocce, più fratturate e carsificate, rispetto a quelle dolomitiche basali.

E' possibile, in alternativa, ipotizzare l'esistenza di un orizzonte epicarsico che rappresenti la porzione più superficiale dell'affioramento con un valore di norma più elevato di conducibilità idraulica rispetto alla zona sottostante. Tale diminuzione di permeabilità all'aumentare della profondità dal piano campagna è giustificata sia dalla minore densità delle fratture che da un minor grado di carsificazione. Klimchouk, (2004) attribuisce a questa parte più superficiale degli acquiferi uno spessore variabile tra i 10 e 15 metri.

Al medesimo schema è da ricondurre l'origine anche delle sorgenti rinvenibili nella porzione di territorio a sud-ovest dell'Accellica nel complesso dolomitico. In questo caso sarebbe più appropriato considerare solo il fenomeno di fratturazione e non quello di carsismo per la minore sensibilità delle dolomie a tale fenomeno.

Infine sono da considerare alcune piccole sorgenti presenti nei depositi fluvio-lacustri con portate dell'ordine del 1.5 l/s. Le emergenze si generano laddove l'orizzonte ghiaioso superficiale dotato di una media permeabilità è tamponato al di sotto dai depositi limosi poco permeabili.

7.5 OSSERVAZIONI SUGLI INCREMENTI DI PORTATA IN ALVEO

Le portate (cifr. § 5.2.4) misurate nelle aste fluviali del bacino di Acerno hanno evidenziato degli incrementi particolarmente significativi in corrispondenza dei gruppi sorgivi.

Nell'alveo del torrente dell'Isca Budetta & de Riso (1982) hanno registrato, nel tratto che comprende il gruppo delle sorgenti Ausino, Ausinetto e Avello di lunghezza pari a 1 Km (tra le stazioni I e M della Fig. 5.4/3), un incremento della portata del corso d'acqua pari a 500 l/s nel periodo invernale. Tale aliquota d'acqua riconducibile ad un apporto della falda nell'alveo ha luogo probabilmente in destra orografica in quanto la successione lacustre presente sulla sponda opposta funge da tamponamento.

Una situazione analoga si rinviene nel tratto a ridosso del gruppo sorgivo dell'Olevano nel fiume Tusciano. Le campagne di misure relative al periodo 1980/81 (Budetta & de Riso; Fig. 5.4/1) e all'anno 1999 (Autorità di Bacino Destra Sele – Fig. 5.4/2) evidenziano che il tratto del fiume prospiciente all'abitato di Acerno presenta importanti incrementi di portata dell'ordine del 1300 l/s. Valore questo considerato inverosimile dai rilievi in campagna effettuati da de Riso & Landi nel 1997 che individuano degli incrementi di portata molto più modesti (circa 100 l/s).

E' da evidenziare, inoltre, che durante la suddetta campagna si è accertato che i contributi di acqua sotterranea all'alveo del Tusciano avevano origine (contrariamente a quanto ritenuto fino ad allora) quasi esclusivamente in sinistra idrografica del fiume.

E' da rilevare, inoltre, che tale aliquota risulta variabile nel tempo in quanto è regimata dall'acquedotto dell'Ausino in funzione del bisogno idrico dell'utenza.

Il tratto del Tusciano a valle delle Sorgenti Olevano (Fig. 5.4/4) ha evidenziato nella stazione di misura T2 un aumento della portata del corso d'acqua di 200 l/s. Tale aliquota d'acqua presumibilmente è attribuibile in parte all'apporto (circa 70 l/s) del Vallone della Manca che confluisce nell'alveo del Tusciano a monte della stazione, e in parte dalla falda acquifera presente nelle dolomie in sinistra idrografica. In destra idrografica infatti la faglia di toppa della Faragna (Cfr. § 7.2) presente nella formazione dolomitica tamponerebbe il deflusso sotterraneo.

7.6 BILANCIO IDROGEOLOGICO

7.6.1 Delimitazione dell'area interessata dal bilancio

La finalità di redigere il bilancio idrogeologico nel territorio in esame è stata quella di definire con maggior accuratezza e/o di verificare i limiti del bacino idrogeologico della Conca di Acerno e di valutarne l'entità della ricarica annua.

Il primo passo per il calcolo del bilancio ha riguardato la delimitazione dell'area interessata adottando i limiti individuati in bibliografia (cfr. § 4.1) ad eccezione di quello relativo all'area meridionale del bacino.

I limiti occidentale, settentrionale e orientale sono stati posti in corrispondenza di motivi tettonici a venti funzione tamponante pertanto si è escluso l'ipotesi di travasi in entrata e in uscita nel dominio (Celico, 1983; Piscopo, 1993). In sintesi il limite occidentale è in coincidenza di un sistema di faglie passanti per Toppa della Faragna, lungo il vallone dell'Oglio, Varco della Noce per poi proseguire lungo il margine ovest della struttura montuosa dell'Accellicca.

A nord il limite del bacino idrogeologico dell'Acerno è lungo l'alto corso dei fiumi Sabato e Calore mentre quello ad oriente corrisponde alla faglia che separa la struttura carbonatica del M.te Cervialto dalla depressione strutturale di Acerno.

A sud il limite è stato fatto coincidere con il corso d'acqua del Tusciano fino alla confluenza con il torrente Valle della Manca (cfr. paragrafo delle Sezioni).

L'area delimitata presenta una estensione pari a 37,82 Km².

7.6.2 Valutazione dei parametri del bilancio

Precipitazioni

Per il calcolo degli afflussi meteorici (P) è stata calcolata per prima cosa la media annuale (2000 - 2009) delle precipitazioni per ognuna delle stazioni (cfr. § 5.2.3) e riportata nella Tabella 7.1. La precipitazione media-annua nella conca di Acerno è una delle più elevate a livello regionale. Infatti come si evince dalla tabella i valori di pioggia oscillano tra un minimo di 950 mm/a ad un massimo 1980 mm/a.

E' stata verificata l'esistenza di una relazione tra le precipitazioni e la quota attraverso lo strumento statistico della correlazione. In Figura 7.10 si riporta il grafico ottenuto combinando la precipitazione media annua di ogni stazione con la relativa quota. La correla-

zione risulta essere di tipo lineare a direzione positiva e con un valore di R^2 (coefficiente di determinazione lineare) significativamente elevato (0.94).

Stazione	Quota m s.l.m.	P media annua (2000 – 2009) mm
Acerno (Ausino)	564	1983,22
Montecorvino Rovella	154	1156,71
Montella	501	1490,72
Montella (Cerasa)	720	2122,47
Battipaglia	50	1010,99
Mercato S. Severino	177	1259,95
Pontecagnano - CRA	29	953,33
S. Mauro	37	999,72
Salerno (Genio Civile)	28	1058,78

Tabella 7.1 – Valori medi annui (2000 – 2009) delle precipitazioni

Attraverso l'utilizzo di un Sistema Informativo Geografico si è provveduto ad applicare al Modello Digitale del Terreno (DEM) (cfr. § 5.1.1) la suddetta legge ottenendo la carta della distribuzione spaziale della pioggia media annua.

Operando sempre in un GIS si è provveduto a moltiplicare il valore di precipitazione per l'area ad esso associata e sommando poi questi prodotti, si è ottenuto il volume medio annuo di pioggia per l'intera area del bacino considerato.

Evapotraspirazione

Per stimare l'evapotraspirazione sono presenti in bibliografia diverse formule che prendono in considerazione vari parametri di cui alcuni difficili da reperire.

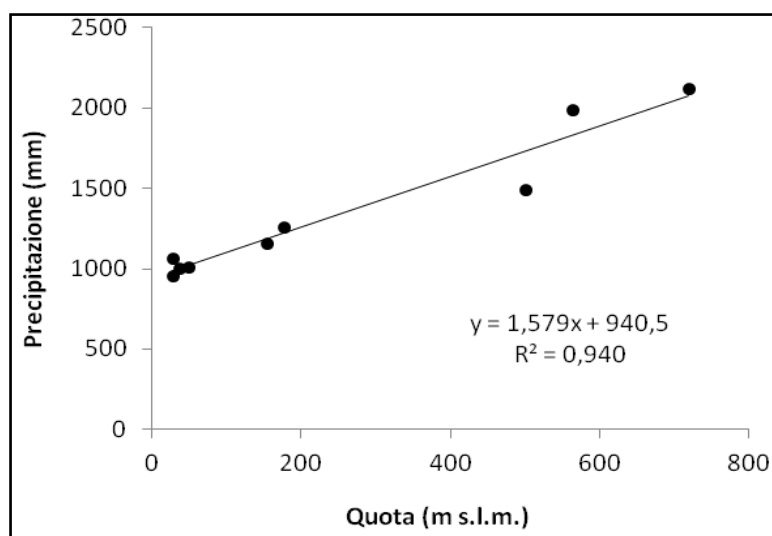


Figura 7.10 – Retta di regressione Precipitazione-Quota e legge di variazione.

Per il presente studio si è fatto quindi riferimento a tre di queste formule per la cui applicazione erano reperibili i dati:

- la formula di Turc, che consente di ottenere direttamente l'evapotraspirazione reale (ET_r) media annua,
- la formula di Thornthwaite che fornisce il valore dell'evapotraspirazione potenziale media mensile (ET_p) che diventa reale media annua con il metodo Thornthwaite e Mather,
- la formula di Hargreaves che permette di calcolare il valore di evapotraspirazione potenziale di riferimento (ET_{p0}) il quale attraverso i coefficienti climatici (K_c) (cfr. § 6.5.1) si trasforma nel valore di evapotraspirazione potenziale (ET_p).

Applicando successivamente il metodo Thornthwaite e Mather si è potuto risalire all'ET_r.

Per prima cosa si è provveduto ad elaborare la carta della distribuzione spaziale della temperatura annua media nonché quella della pioggia e della temperatura media mensile utilizzando lo stesso procedimento visto in precedenza per la precipitazione media annua.

Nella Tabella 7.2 sono riportati i valori medi annui (2000 – 2009) relativi ad ogni stazione meteo presa in esame per lo studio.

Così come si è proceduto per la relazione tra precipitazioni e quote e anche per quella tra temperature e quote si è utilizzata la correlazione ottenendo una retta di regressione (Fig 7.11) con R² pari a 0.81. Attraverso il GIS, si è elaborata, grazie al DEM, la carta della distribuzione spaziale della temperatura media annua.

Stazione	Quota m s.l.m.	T media annua (2000 – 2009) °C
Bagnoli Irpino	745	12,98
Contursi	164	14,83
Montecorvino Rovella	154	16,14
Montella	501	12,88
Senerchia	582	13,95
Mercogliano	450	14,51
Battipaglia	50	17,57
Mercato S. Severino	177	15,57
Persano Sele	35	16,14
S. Mauro	37	17,35

Tabella 7.2 – Valori medi annui (2000 – 2009) delle temperature

Analogamente si è proceduto con i valori mensili della temperatura e della pioggia. In Tabella 7.3 è riportata la legge di variazione P/T-Quota relativa ad ogni mese.

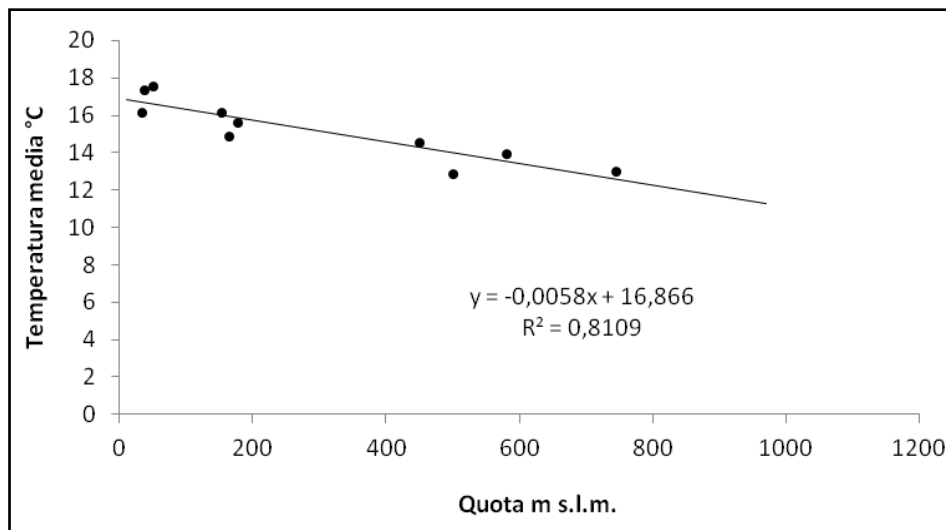


Figura 7.11 – Retta di regressione Temperatura-Quota e legge di variazione.

Legge Ti-h (Quota)	R ²	Legge Pi-h (Quota)	R ²
Ti (gennaio) = -0,0006 h + 9,4	0,715	Pi (gennaio) = 0,205 h + 127,6	0,810
Ti (febbraio) = -0,0005 h + 8,8	0,782	Pi (febbraio) = 0,195 h + 72,9	0,946
Ti (marzo) = -0,0005 h + 11,9	0,829	Pi (marzo) = 0,214 h + 107,8	0,812
Ti (aprile) = -0,0006 h + 15,1	0,919	Pi (aprile) = 0,123 h + 71,8	0,919
Ti (maggio) = 0,005 h + 19,3	0,746	Pi (maggio) = 0,065 h + 51,1	0,736
Ti (giugno) = -0,0004 h + 22,6	0,571	Pi (giugno) = 0,044 h + 36,9	0,853
Ti (luglio) = -0,0002 h + 24,4	0,849	Pi (luglio) = 0,037 h + 18,7	0,872
Ti (agosto) = -0,0005 h + 26,6	0,734	Pi (agosto) = 0,035 h + 21,3	0,639
Ti (settembre) = -0,0007 h + 21,8	0,796	Pi (settembre) = 0,041 h + 95,5	0,580
Ti (ottobre) = -0,0004 h + 17,8	0,689	Pi (ottobre) = 0,114 h + 97,8	0,793
Ti (novembre) = -0,0005 h + 13,3	0,601	Pi (novembre) = 0,200 h + 144,6	0,801
Ti (dicembre) = -0,0006 h + 10,3	0,773	Pi (dicembre) = 0,186 h + 140,3	0,944

Tabella 7.3 – Legge di variazione delle temperature e precipitazioni medie mensili con la quota.

La formula di Turc (1954) è una delle relazioni empiriche più semplici e più utilizzate che consente di valutare evapotraspirazione reale (ETr) a partire dai dati di precipitazione e temperatura:

$$E_{tr} = \frac{P}{\sqrt{0,9 + (P^2 / L^2)}} \quad [7.1]$$

in cui:

P = precipitazione media annua [mm/a];

L = potere evaporante dell'atmosfera che si calcola con formula:

$$L = 300 + 25T + 0,05T^3 \quad (7.2)$$

con T = temperatura media annua (in °C).

Nel caso in cui, si disponga anche dei valori mensili della temperatura è possibile affinare i calcoli tenendo conto dell'influenza che l'umidità dell'aria esercita sul potere evaporante dell'atmosfera. Pertanto alla T dell'espressione (7.1), va sostituito il parametro T_p (temperatura fittizia media annua corretta in funzione delle precipitazioni) dato da:

$$T_p = \frac{\sum P_i * T_i}{P} \quad [7.3]$$

in cui:

P_i = precipitazioni media mensili [mm];

T_i = temperature media mensili [°C];

P = precipitazione media annua [mm].

Attraverso l'uso del GIS si sono elaborate varie carte ognuna delle quali rappresenta la distribuzione spaziale dei parametri che compaiono nelle espressioni [7.1], [7.2] e [7.3]. Partendo dalle mappe dei parametri di base (P , P_i e T_i), attraverso operazioni matematiche eseguite tra le mappe stesse, si ottengono parametri intermedi ed, infine, la mappa della distribuzione spaziale dell'evapotraspirazione reale. I valori E_{Tr} che compaiono nella carta sono stati moltiplicati per la corrispettiva area. Sommando i prodotti ottenuti, si è calcolato il volume di acqua di evapotraspirazione reale medio annuo per l'area del bacino di Acerno valutato con il metodo di Turc (Tab. 7.5.)

La tecnica di lavoro appena descritta con l'ausilio del GIS verrà applicata anche successivamente laddove si dovrà valutare attraverso le altre formule l'aliquota di acqua evapotraspirata.

La seconda formula è quella di Thornthwaite che calcola l'evapotraspirazione potenziale. La sua applicazione è preliminare alla stima dell'evapotraspirazione reale attraverso il metodo di Thornthwaite-Mather.

L'espressione di questa formula è la seguente:

$$ET_p = K \left[16 \left(1 + x_{10} * \frac{T_i}{T} \right)^a \right] \quad [7.4]$$

in cui:

ET_p = evapotraspirazione potenziale media del mese i-mo [mm];

K = coefficiente di correzione di latitudine riferito al mese i-mo, pari al rapporto tra le ore diurne e la metà delle ore giornaliere;

T_i = temperatura media del mese i-mo [°C];

I = indice di calore dato dalla somma degli indici termici mensili (i) dei 12 mesi dell'anno:

$$I = \sum_{i=1}^{12} i_i \quad \text{in cui} \quad i_i = \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1,514} \quad [7.5]$$

$$a = 0,49239 + 1792 * 10^{-5} I - 771 * 10^{-7} I^2 + 675 * 10^{-9} I^3.$$

Disponendo delle mappe T_i ed inserendo i valori K riportati in apposite Tabelle (Celico, 1986), si sono potute ottenere le mappe mensili relative all'ETp.

Come accennato precedentemente, dal valore dell'evapotraspirazione potenziale medio mensile è possibile passare all'evapotraspirazione reale. È proprio il ruolo regolatore del suolo che fornisce la base della metodologia di Thornthwaite e Mather per il calcolo della ETr.

Infatti le acque di precipitazione vengono assorbite dal suolo fino a che quest'ultimo risulta saturo di acqua di ritenzione. Raggiunto il volume della riserva utile massima (RI), corrispondente alla capacità di campo, si ha un'eccedenza che si allontana dalla zona di esplorazione delle radici delle piante defluendo sia in superficie che per via sotterranea.

In queste condizioni per la vegetazione sono a disposizione illimitati quantitativi d'acqua: infatti l'umidità del terreno (RI) rimane costantemente su valori coincidenti con quelli della capacità di campo. Ne consegue che il consumo per evaporazione si mantiene al valore massimo e l'evapotraspirazione reale (ETr) coincide con quella potenziale (ETp). Il massimo consumo di acqua per evaporazione si esplica nella stagione umida. Di contro, nei mesi estivi, (quando le precipitazioni non sono sufficienti a ricostituire la capacità di campo) le riserve idriche invase (RI) non riescono a soddisfare totalmente il fabbisogno idrico richiesto dalla vegetazione. Si determina un deficit idrico e l'evapotraspirazione reale risulta minore di quella potenziale ed è uguale alla precipitazione efficace più una parte della riserva idrica dello strato superficiale del terreno. Successivamente il terreno si essicca progressivamente fino a quando la pioggia non torna a superare l'evapotraspirazione potenziale. Il modello di Thornthwaite-Mather si basa su una curva di essiccamento dello strato superficiale del terreno di tipo esponenziale:

$$RU = RI e^{-\frac{\Delta P}{RI}} \quad [7.6]$$

in cui:

RU = riserva idrica utile dello strato superficiale del terreno;

RI , = riserva utile massima, corrispondente alla capacità di campo;

ΔP = differenza tra i valori mensili della precipitazione P e dell' ET_p per $P < ET_p$

Quindi per poter conoscere nel tempo il volume d'acqua e vapotraspirata, è indispensabile ricostruire la riserva utile del suolo (RU) utilizzabile dalla vegetazione e quindi conoscere i parametri mensili di ET_p , P_i e RI .

Il parametro relativo alla capacità di campo (RI) è stato valutato incrociando la mappa della vegetazione con quella della tessitura del suolo. Dalla carta dell'uso del suolo (cfr. § 5.1.4) è stata estratta l'informazione relativa alla vegetazione la quale è stata riclassificata in base alle classi proposte da Thornthwaite-Mather (Tab. 7.5) anche se tali classi risultano molte semplificate rispetto alla realtà.

Per quanto riguarda la tessitura dei suoli si è fatto riferimento ad una cartografia in una scala purtroppo non di dettaglio (cfr. § 5.1.3). Estratta la zona di studio, si è riclassificata secondo quanto proposto dal modello di Thornthwaite-Mather (Tab. 7.5).

Il passo successivo ha riguardato l'elaborazione delle mappe delle precipitazioni utili (ΔP) che sono definite da:

$$\Delta P = P_i - ET_{pi} \quad [7.7]$$

In cui:

P_i = precipitazioni media mensili del mese i -mese [mm];

ET_{pi} = evapotraspirazione potenziale media mensile [mm].

Quando la differenza ha valore positivo essa rappresenta il quantitativo idrico teorico che potrebbe contribuire al deflusso o a formare la riserva idrica utile (RU). Se ΔP è negativo rappresenta una perdita.

Si procede con il calcolo della perdita cumulata ($\Sigma \Delta P_i$) che descrive la "secchezza" del suolo e si determina nel seguente modo:

nei mesi in cui $\Delta P_i > 0$; $\Sigma \Delta P_i = 0$;

nei mesi in cui $\Delta P_i > 0$; $\Sigma \Delta P_i = \Sigma \Delta P_{i-1} + \Delta P_i$.

Nel caso specifico si riscontra un $\Delta P_i > 0$ in alcuni settori dell'area di studio in corrispondenza dei mesi di maggio, giugno, luglio e agosto.

Tramite la [6.9] si calcola la riserva utile (RU) nel suolo e successivamente si calcola la variazione mensile di acqua nel terreno ΔRU come differenza tra valori precedenti e la perdita cumulata $\Sigma \Delta RU$.

Per i mesi in cui l'ETp supera la precipitazione, l'ETr è data dalla somma della precipitazione e della perdita di riserva idrica del suolo in valore assoluto, $P + |\Delta RU|$; nel caso in cui l'ETp è inferiore la precipitazione l'ETr = ETp.

Dalla somma dei valori delle 12 carte dell'evapotraspirazione reale media mensile si è ottenuta la carta evapotraspirazione annua dalla quale si è potuto risalire al volume di acqua di evapotraspirazione media annua 7.5.

Tra le formule per il calcolo dell'ETp₀, accreditate dalla FAO, appare facilmente applicabile quella proposta da Hargreaves et al. (1985) che richiede la sola misura diretta della temperatura massima e minima, facilmente ed economicamente ottenibile con comuni stazioni termopluviometriche. Questa espressione tende a sottostimare l'evapotraspirazione in condizioni di vento intenso e a sovrastimarla in condizioni di alta umidità relativa (Allen et alii 1998):

$$ETp_0 = 0,0023 Ra (T + 17,8) \sqrt{(Tmax - Tmin)} \quad [7.8]$$

in cui:

$$Ra = \frac{24 \times 60}{\pi} R d_r \cdot (\omega_s \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s) \quad (7.9)$$

$$d_r = 1 + 0,0033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \quad [7.10]$$

$$\delta = 0,409 \sin\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad [7.11]$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan\varphi \tan\delta) \quad [7.12]$$

in cui:

Ra = radiazione solare extraterrestre [mm d⁻¹];

T = temperatura media dell'aria ricavata dalla media tra la Tmax e la Tmin [°C];

Tmax, Tmin = Temperatura massima e minima a 2 m di altezza [°C].

d_r = distanza relativa Terra-Sole [m];

δ = declinazione solare [rad];

φ = latitudine [rad];

ω_s = angolo orario al tramonto [rad];

J = numero del giorno nell'anno.

Per quanto riguarda i valori di Ra, poiché l'area di studio ricade in una latitudine 40°N, si è potuto usufruire di quelli calcolati per questa latitudine dal prof. Fagnano M. del Dipartimento di Ingegneria Agraria e Agronomia del Territorio di Napoli.

La valutazione dell'ET_{p0} per ciascuna stazione meteo si è ottenuta applicando la formula di Hargreaves ai relativi dati giornalieri dall'anno 2000 all'anno 2009 e calcolandone per ciascuna di esse la media annua.

Ammettendo che l'evapotraspirazione potenziale diminuisca con l'altitudine secondo una funzione lineare (Pulina, 1986 e Vittorini, 1971) è stato possibile ricavare la retta di regressione tra questi due parametri e quindi definire l'equazione di regressione annuale (Fig. 7.12).

Applicando al Modello Digitale del Terreno (cfr. § 5.1.1) la legge di variazione acquisita, si è ottenuta la carta della distribuzione spaziale dell'evapotraspirazione potenziale di riferimento annua. Incrociando tale mappa con quella dei coefficienti colturali (K_c) ottenuta partendo dalla carta dell'uso del suolo, si è elaborata la distribuzione dell'evapotraspirazione potenziale nell'area del bacino.

Proseguendo il calcolo con il metodo Thornthwaite e Mather, è stata elaborata la mappa della distribuzione spaziale dell'ET_r.

Infiltrazione efficace

L'infiltrazione efficace è pari alla differenza tra la piovosità P e l'evapotraspirazione E (deflusso globale), al netto del ruscellamento R:

$$I = P - E - R \quad [7.13]$$

Purtroppo la valutazione diretta di quest'ultimo parametro è impossibile, per la mancanza di strumenti che riescano a misurare i volumi d'acqua che scorrono in superficie. Bisogna pertanto ricorrere a delle metodologie sperimentali quali quella di valutare i coefficienti di infiltrazione potenziali (c.i.p.). Tale modello (Celico, 1998) nasce da osservazioni effettuate su porzioni di territorio italiano determinando in maniera empirica il peso dell'infiltrazione efficace (I) nei confronti delle precipitazioni efficaci (P-E), attraverso la relazione:

$$I = c.i.p. \times (P - E) \quad [7.14]$$

I valori dell'evapotraspirazione media annua sono riportati nella Tab. 7.5.

Il metodo non tiene conto di altri fattori, quali l'acclività, la presenza di coperture boschive, l'esposizione etc., che possono comunque influire sull'entità della ricarica.

Nell'area di studio il valore del c.i.p. è stato assegnato tenendo conto delle caratteristiche di permeabilità dei complessi idrogeologici (cfr. § 6.1) valutate attraverso l'esperienza maturata sul campo ed utilizzando dati di letteratura (Celico, 1983).

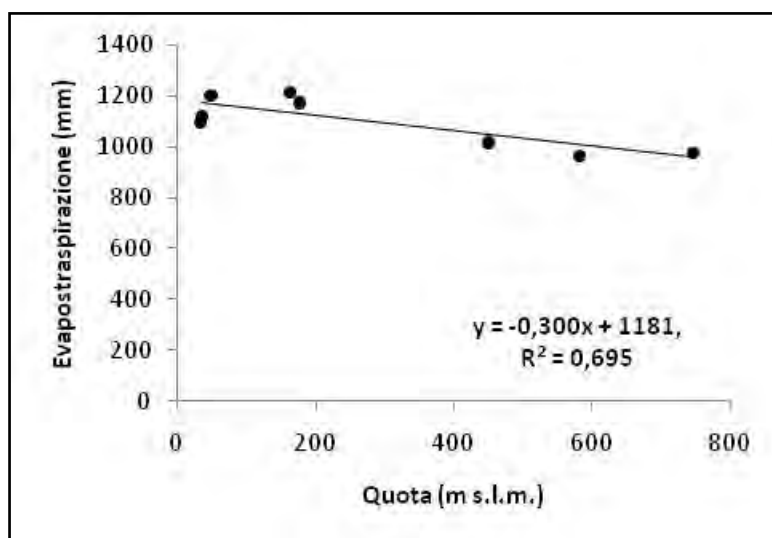


Figura 7.12 – Retta di regressione Evapotraspirazione-Quota e legge di variazione.

E' sottinteso che tali valori andrebbero verificati attraverso opportune sperimentazioni che tengano conto dell'effettiva situazione locale; ad ogni modo si ritiene che i rapporti relativi tra i vari complessi siano sufficientemente realistici.

Complessi idrogeologici	CIP	CIP_Percent
Complesso alluvionale	0,40	40
Complesso calcareo marnoso	0,35	35
Complesso calcareo	0,90	90
Complesso conglomeratico	0,60	60
Complesso detrito - eluviale	0,70	70
Complesso dolomia inferiore	0,70	70
Complesso dolomia superiore	0,75	75
Complesso fluvio-lacustre	0,10	10

Tabella 7.4 – Valori dei coefficienti di infiltrazione potenziali (c.i.p.) assegnati ai complessi dell'area di studio.

Nel caso specifico è stato calcolato prima il deflusso idrico globale sottraendo la mappa relativa alla precipitazione media annuale alle tre mappe della evapotraspirazione reale media annua.

Cumulando i valori del deflusso globale (D) di ciascuna maglia, si è giunti alla quantizzazione del volume di deflusso idrico globale del bacino idrogeologico dell'Acerno riportati nella Tab. 7.5.

Successivamente, una volta elaborata la mappa dei c.i.p. a partire da quella dei complessi idrogeologici, i due tematismi (D e i c.i.p.) sono stati moltiplicati fra loro, secondo

procedimenti di cartografia numerica ottenendo così una distribuzione che si ritiene dettagliata e realistica dell'infiltrazione efficace.

Cumulando i valori di altezza di infiltrazione relativi alle varie maglie della mappa elaborata si è calcolato il volume d'acqua d'infiltrazione efficace i cui risultati sono riportati nella Tab. 7.5.

7.6.3 Sintesi del bilancio

La stima delle attuali uscite d'acqua dal bacino è stata effettuata considerando le portate delle sorgenti e i travasi della falda idrica nei corsi d'acqua. Quindi le uscite sono rappresentate da:

$$U = Q_s + Q_c \quad [7.15]$$

in cui:

Q_s = uscite di acque sorgive;

Q_c = uscite verso i corsi d'acqua.

Per quanto concerne le uscite sorgive sono state considerate, oltre ai due gruppi sorgivi principali (Olevano e Ausino-Avella-Ausinetto), anche le piccole emergenze ubicate in alta quota.

Voci del bilancio	Turc mm/anno	Thornthwaite + Metodo Thornthwaite e Mather mm/anno	Hargreaves + Metodo Thornthwaite e Mather mm/anno
Precipitazione	2612	2612	2612
Evopotrasspirazione Potenziale	-	678	602
Evopotrasspirazione Reale	518	482	421
Deflusso globale	2099	1934	2039
Ruscellamento superficiale	719	657	922
Infiltrazione efficace	1667	1549	1680

Tabella 7.5 – Bilancio idrogeologico (2000 – 2009).

Dal momento che il periodo di riferimento per il bilancio idrogeologico corrisponde al 2000 - 2009 è consigliabile che i volumi relativi alle uscite siano riferiti allo stesso periodo di tempo. La maggior difficoltà nella valutazione di questo parametro risiede soprattutto nella scarsità e nella disomogeneità delle misure di portata a disposizione così come si evince dalla Tab. 5.2.

Per quanto riguarda la quantizzazione delle portate di tutte le scaturigini (Q_s) e degli incrementi in alveo (Q_c) sono stati quantizzati come segue:

$$Q_s = 34,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno};$$

$$Q_c = 14,1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}.$$

Il volume così determinato è stato poi confrontato con l'infiltrazione efficace nel corpo idrico sotterraneo considerato, al fine di verificare l'espressione:

$$U = I \quad [7.16]$$

in cui:

U = Uscite dal bacino

I = Entrate nel bacino

L'eguaglianza espressa [6.19] risulta verificata con uno scarto, accettabile, del 7.9 % con la formula Turc, del 6.8 % con la formula Thornthwaite con il metodo Thornthwaite e Mather e del 5.9 % con la formula di Hargreaves con il metodo Thornthwaite e Mather.

Questo è senza dubbio un risultato positivo perché, nonostante l'approssimazione di cui risente sia la stima dell'evapotraspirazione reale che quella dell'infiltrazione con il metodo dei c.i.p., si è giunti ad ottenere dei valori tra loro confrontabili a conferma dell'attendibilità dei risultati e delle ipotesi fatte relativamente ai limiti della struttura idrogeologica.

Entrate (I) m ³ /anno x 10 ⁶	Uscite (U) m ³ /anno x 10 ⁶	I - U m ³ /anno x 10 ⁶	I - U %	Formula dell'evoposttrasiprazione
44,8	48,5	3,7	7,9	Turc
45,3	48,5	3,2	6,8	Thornthwaite +Metodo Thornthwaite e Mather
45,7	48,5	2,8	5,9	Hargreaves + Metodo Thorn- thwaite e Mather

Tabella 7.6 – Sintesi del bilancio per il periodo 2009 – 2010; l'area di studio è pari a 37,82 Km².

8 MODELLAZIONE DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Un modello è uno strumento finalizzato alla rappresentazione della realtà in versione semplificata. I modelli numerici per le acque sotterranee, se opportunamente costruiti, possono essere strumenti utilissimi alla gestione della risorsa idrica sotterranea ad esempio per l'ottimizzazione dell'approvvigionamento di acque per uso domestico o per usi industriali od irrigui. Con l'utilizzo dei modelli è possibile collaudare "virtualmente" vari scenari di gestione e prevedere gli effetti delle azioni che s'intendono intraprendere. Naturalmente la validità delle previsioni dipenderà da quanto il modello approssima le condizioni reali. L'impiego dei modelli dei sistemi idrici sotterranei consente inoltre di stimare le proprietà di un acquifero e la comprensione di un sistema idrico sotterraneo.

La costruzione di un modello prevede i seguenti passi:

- definizione degli obiettivi
- raccolta dei dati (geologici e idrogeologici dell'area di studio)
- costruzione del modello concettuale come rappresentazione ideale del sistema reale;
- implementazione del modello numerico (scelta della griglia, assegnazione dei parametri idrodinamici, assegnazioni delle condizioni al contorno e iniziali);
- calibrazione e analisi di sensibilità;
- validazione del modello;
- simulazione e presentazione dei risultati.

Per assicurare una modellazione accurata, il sito analizzato deve essere correttamente caratterizzato dal punto di vista della geologia, dell'idrogeologia e delle condizioni al contorno. Risulta pertanto importante eseguire una adeguata campagna di rilevamento su terreno. Un numero troppo esiguo di dati misurati su terreno o misure errate possono causare false interpretazioni ed una elaborazione del modello non corretta.

Una volta definita la caratterizzazione geologica e idrogeologica della zona in esame, si procede alla stesura del *modello concettuale* che consiste nell'identificare le unità idrostratigrafiche, i loro parametri idrogeologici e le condizioni di contorno. Poiché la realtà è complessa, l'implementazione del modello comporta l'introduzione di semplificazioni che non devono risultare eccessive al fine di non stravolgere la realtà inficiando quindi, l'attendibilità del modello stesso.

La fase di costruzione del modello concettuale è seguita dalla fase di elaborazione del *modello matematico*. Un modello matematico consiste nel set di equazioni differenziali che

descrivono il movimento delle acque sotterranee. Normalmente le assunzioni necessarie per risolvere un modello matematico in via analitica sono troppo restrittive (ad esempio le soluzioni analitiche generalmente approssimano in maniera attendibile solo un mezzo omogeneo ed isotropo) così che per risolvere casi reali è preferibile utilizzare le tecniche numeriche.

La fase di *calibrazione* consiste nella modificazione dei dati di input del modello allo scopo di rendere i suoi flussi e livelli quanto più simili possibile a quelli della situazione reale. La regolazione dei parametri può essere fatta manualmente o automaticamente usando tecniche statistiche di regressione. L'analisi di *sensibilità*, che fa parte della calibrazione del modello, è la valutazione dei parametri in input e permette di valutare quanto questi influenzino le uscite del modello (livelli di falda e portate). I parametri più sensibili sono quelli che si dovranno meglio definire per indurre il modello a seguire i valori osservati. La procedura consiste nella elaborazione di numerose simulazioni in cui si lavora su di un unico parametro, in modo da ottenere per esso il valore che permette di avvicinarsi maggiormente alle condizioni reali; successivamente si procede con un altro parametro. La visualizzazione dei risultati in tabelle permette di valutare i valori più attendibili.

La *validazione* viene effettuata su un data set di input, diverso da quello utilizzato per la calibrazione, per il quale sia comunque noto il comportamento del sistema reale, messo a confronto con il risultato del modello.

Ultimata la verifica si procede alla fase della *previsione*. Impostando ipotetici futuri valori in entrata del sistema, si esegue la simulazione del modello con relativi calcoli dei valori in uscita previsti. Valori determinati dalla calibrazione del modello vengono utilizzati come punti fissi della previsione su cui si basa la relativa simulazione. Ne consegue che, indubbiamente, la fase di calibrazione risulta fondamentale per la qualità dei risultati ottenuti nella previsione.

E' bene tenere presente che un modello concettualmente errato conduce inevitabilmente a previsioni errate, non importa quanto buona sia la corrispondenza dei dati osservati e calcolati.

8.1 L'EQUAZIONE GENERALE DEL MOTO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Lo studio del moto delle acque sotterranee in mezzo poroso saturo si fonda sulla nota legge di Darcy, che riassume i risultati di un esperimento realizzato dall'autore.

La legge descrive il processo considerando il mezzo poroso ad una scala che non coincide con quella microscopica dei pori ma è quella macroscopica coincidente con il "Volume Rappresentativo Elementare" (VRE). Questo si definisce come il volume minimo da prendere in considerazione per studiare le caratteristiche idrogeologiche di una roccia, tale da poter considerare il mezzo sufficientemente omogeneo e isotropo (Bear, 1972). Questo volume è sufficientemente grande da attenuare le fluttuazioni a piccola scala e sufficientemente piccolo da rappresentare le variazioni delle proprietà del mezzo tramite funzioni continue. L'esatta dimensione del VRE non è nota, ma si assume che questa sia maggiore della scala dei pori e minore della scala del mezzo poroso.

La legge di Darcy stabilisce che la velocità del moto di filtrazione è:

$$v = -k \frac{dh}{ds} = -ki \quad [8.1]$$

in cui:

v = velocità "darciana" [L/T];

k = conducibilità idraulica o coefficiente di permeabilità [L/T];

dh = carico idraulico [L];

ds = coordinata spaziale (assunta positiva verso l'alto) della direzione moto di filtrazione [L];

i = gradiente idraulico (adimensionale).

Assunto l'asse z verticale, positivo verso l'alto, avente origine su un piano di riferimento orizzontale, il carico idraulico totale è definito:

$$h = z + \frac{p}{\rho g} \quad [8.2]$$

in cui:

z = quota altimetrica [L];

p = pressione;

ρ = densità del fluido;

g = accelerazione di gravità [L²/T²].

La conducibilità idraulica tiene conto del tipo di fluido che defluisce nel mezzo poroso e in particolare del peso specifico γ [M/L³] e del coefficiente di viscosità dinamica μ [M/LT] del fluido. Pertanto il coefficiente di permeabilità può essere espresso con la seguente relazione:

$$k = K \frac{\gamma}{\mu} \quad [8.3]$$

in cui K è un coefficiente detto permeabilità intrinseca che rappresenta una proprietà unicamente della matrice solida e dipende dal diametro dei granuli e dall'indice dei pori.

Nel seguito si userà il simbolo K per indicare la conducibilità idraulica k ritenendo che per gli acquiferi il rapporto γ/μ sia costante.

La legge di Darcy fa riferimento alla velocità di filtrazione pari, in modulo, al rapporto tra la portata defluente Q e l'area complessiva A relativa alla sezione attraverso cui avviene il moto:

$$v = \frac{Q}{A} \quad [8.4]$$

Si tratta ovviamente di una velocità media poiché A è una sezione fittizia in quanto è rappresentativa sia dei meati che della matrice solida. L'effettiva velocità è, infatti, espressa dalla velocità media, definita come:

$$v_e = \frac{v}{n_e} \quad [8.5]$$

in cui n_e è la porosità efficace; con questa relazione si tiene conto della sezione effettivamente disponibile al passaggio del fluido.

L'equazione è valida per un flusso mono-dimensionale con moto laminare di un fluido incomprimibile in mezzo omogeneo

Nel caso di campo di moto tri-dimensionale, l'equazione di Darcy può essere generalizzata nella forma:

$$v = K\nabla h \quad [8.5]$$

Ovvero nelle tre direzioni:

$$v_x = \frac{\partial h}{\partial x} \quad v_y = \frac{\partial h}{\partial y} \quad v_z = \frac{\partial h}{\partial z} \quad [8.6]$$

La sola equazione di Darcy non è sufficiente a descrivere il moto delle acque sotterranee, a meno che non sia nota la distribuzione delle altezze piezometriche all'interno del sistema in questione. Tuttavia questa situazione è piuttosto rara poiché, solitamente, l'obiettivo della modellazione delle acque sotterranee è proprio quello di definire la distribuzione delle altezze piezometriche sotto diverse condizioni di stress. La distribuzione delle altezze piezometriche deve, invece, essere necessariamente nota almeno in un istante di tempo nei casi di modellazione di sistemi idrici sotterranei in regime transitorio, in cui serve come condizione iniziale.

L'equazione generale del moto delle acque sotterranee viene formulata applicando la legge di conservazione della massa a un volume di controllo situato all'interno del campo di moto.

Ipotizzando, allora, che il fluido sia incomprimibile (ρ costante) e combinando la legge di conservazione della massa:

$$-\frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} - \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = S_s \frac{dh}{dt} \quad [8.7]$$

dove:

v = velocità "darciana" [L/T];

ρ = densità del fluido [L/T];

con la relazione di Darcy [8.6] si ottiene l'equazione alle derivate parziali che descrive il campo di moto di una falda acquifera in regime transitorio:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\delta h}{\delta z} \right) = W + S_s \frac{\delta h}{\delta t} \quad [8.8]$$

Mentre in regime stazionario il moto è governato dalla

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\delta h}{\delta x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\delta h}{\delta y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\delta h}{\delta z} \right) = W \quad [8.9]$$

in cui:

K = conducibilità idraulica [LT^{-1}];

h = altezza piezometrica [L];

S = immagazzinamento specifico [L^{-1}];

W = volume d'acqua estratta (o immessa) per unità di volume nel mezzo poroso [T^{-1}];

t = variabile tempo.

Il principio di conservazione della massa implica, pertanto, che la portata netta, differenza fra quella entrante e quella uscente dal volume di controllo, venga bilanciata dalla variazione della capacità di immagazzinamento nel tempo.

L'immagazzinamento specifico che compare nella relazione precedente è posto pari allo *specific storage*, nel caso di acquiferi confinati, e pari allo *specific yield*, nel caso di quelli non confinati. Il primo, che dipende solo dalla compressibilità del mezzo poroso e del fluido, è definito come la quantità d'acqua rilasciata o immagazzinata da un volume unitario di acquifero confinato, a seguito di un abbassamento o un innalzamento unitario dell'altezza piezometrica. Il secondo è, invece, definito come il rapporto tra il volume di acqua che percola da una matrice porosa satura, per effetto della gravità, e il volume totale

della matrice, per unità di abbassamento dell'altezza piezometrica. Lo *specific yield* è di norma tre o quattro ordini di grandezza più grande del coefficiente di immagazzinamento.

Il termine W indica il flusso volumetrico di acqua per unità di volume dell'acquifero e rappresenta gli apporti o le perdite di acqua. Classico e semplice di tali variazioni possono essere le variazioni locali dovute alla presenza di pozzi di iniezione o di emungimento, e quelle areali legate alla ricarica a seguito di precipitazioni.

Per ottenere la soluzione dell'equazione generale del moto [8.8] e [8.9] è necessario definire delle informazioni aggiuntive che vengono ottenute studiando nel dettaglio il dominio del sistema, individuando delle condizioni al contorno e delle condizioni iniziali (benché queste ultime siano effettivamente necessarie solo nel caso di analisi in regime transitorio) e fissando dei valori realistici per la distribuzione spaziale dei parametri idrogeologici.

Tali condizioni vengono fissate sulla scorta di un'approfondita analisi della topografia, della geologia e dell'idrografia della zona in questione. Le condizioni al contorno possono essere classificate, da un punto di vista matematico, in tre diverse tipologie:

- carico costante (di tipo Dirichlet/prescribed head boundary), è la condizione con cui si fissa il valore che la piezometrica assume in una determinata cella o lungo un determinato confine del dominio del modello;
- flusso imposto (di tipo Neuman/prescribed flux boundary), è la condizione con cui si fissa un valore di portata in ingresso o in uscita dal dominio del modello; un caso particolare di tale tipo di condizione è la condizione di assenza di flusso;
- flusso dipendente dal carico (di tipo Cauchy/head-dependent flow boundary), è una condizione mista fra le due precedenti.

La più comune fra le condizioni al contorno è quella in cui l'altezza risulta assegnata. Questo genere di condizione, che è anche definita "di primo tipo" o "alla Dirichlet", si applica quando il valore della variabile dipendente è noto ai confini del modello:

$$h(x_b, y_b, z_b, t) = h_b(t) \quad [8.10]$$

Nella suddetta relazione x_b, y_b, z_b rappresentano le coordinate del punto in cui è applicata la condizione sul confine del dominio e h_b è una funzione nota del tempo.

Condizioni di questo tipo si possono utilizzare ogni qual volta le acque sotterranee interagiscono con un corpo idrico superficiale il cui valore di potenziale h_b è noto; questo è il caso di fiumi, laghi, canali, acque marine. In tutte queste circostanze si assume che il livello del pelo libero sia pari a quello del corpo idrico. Tuttavia, si deve fare attenzione al fatto

che, nella realtà, risulta molto complicato rappresentare accuratamente le effettive condizioni al contorno di primo tipo, poiché capita molto di rado che l'ipotesi di una libera connessione idraulica sia realmente rispettata. Molto più frequentemente, infatti, i corpi idrici superficiali non attraversano l'intero spessore dell'acquifero ma sono in contatto solamente con una piccola parte dello stesso, riducendo così il libero scambio fra acque superficiali e sotterranee.

La condizione al contorno di flusso assegnato viene anche detta condizione al contorno "di secondo tipo" o "alla Neumann". Questo genere di condizione, che si verifica quando si ipotizza nota la portata scambiata attraverso i bordi, può essere espressa tramite la seguente relazione:

$$q_n(x_b, y_b, z_b, t) = q_b(t) \quad [8.11]$$

in cui con q_n si indica la componente del flusso perpendicolare ai confini del modello e con $q_b(t)$ una funzione nota del tempo. Tipici esempi di una tale condizione al contorno sono rappresentati da pozzi ricarica delle acque sotterranee, infiltrazioni sotterranee da acquiferi confinanti e tutte le altre situazioni in cui la portata può essere considerata nota. Un caso particolare di condizione di flusso assegnato è rappresentato dai confini in cui si verifica la totale assenza di flusso; tali confini, piuttosto frequenti nella definizione delle condizioni al contorno dei modelli, si hanno quando l'acquifero si trova a contatto con una formazione impermeabile o con uno spartiacque sotterraneo. Questi, infatti, comportandosi come una barriera idraulica impediscono il passaggio delle acque sotterranee.

Le condizioni al contorno in cui il flusso è dipendente dall'altezza sono dette condizioni al contorno "di terzo tipo", "miste", o "alla Cauchy". Questo tipo di condizione, che rappresenta un insieme dei due casi già descritti, si ha quando il flusso delle acque sotterranee e l'altezza piezometrica dei corpi idrici superficiali sono legati l'uno all'altra. Tale circostanza generalmente si verifica quando gli acquiferi sono in contatto con corpi idrici superficiali ad altezza piezometrica costante, ma gli scambi fra i due sistemi risultano limitati a causa della presenza di materiale semipermeabile fra i due. Un tipico esempio di questo genere di situazione si ha in tutti quei casi in cui il letto di un fiume si comporta come un mezzo semipermeabile che divide il fiume stesso dall'acquifero.

Una condizione al contorno di terzo tipo può essere espressa, da un punto di vista matematico, tramite la seguente relazione:

$$K \frac{\delta h}{\delta x} = c(h - H) \quad [8.12]$$

In cui:

$K \frac{\delta h}{\delta x}$ = velocità “darciana” [L/T];

h = altezza piezometrica dell’acquifero [L];

H = altezza della superficie dell’acqua del corpo idrico superficiale [L];

c = conduttanza idraulica [T^{-1}] rappresentata dal rapporto fra la conducibilità idraulica del letto del corpo idrico superficiale e lo spessore dello strato semipermeabile che separa il fiume dall’acquifero.

Dalla relazione sopra riportata si evince che, se la resistenza dello strato semipermeabile tende a zero (c molto grande), per avere un flusso finito dovrà tendere a zero la differenza fra h e H il che corrisponderà a imporre una condizione al contorno di tipo carico costante. Viceversa, per valori di c tendenti all’infinito, per avere un flusso finito, la differenza fra h e H dovrà essere molto grande, identificando, così, due sistemi completamente separati fra i quali non è presente alcuna interazione.

L’assegnazione delle condizioni iniziali, fondamentali per la modellazione di problemi in regime transitorio, consiste nella definizione della distribuzione spaziale delle altezze piezometriche all’interno del dominio del modello. Una volta nota la distribuzione della variabile dipendente per $t=0$ è possibile determinare la sua successiva evoluzione nel tempo. Solitamente, si utilizzano come condizioni iniziali, delle altezze piezometriche misurate, ma in zone in cui non sono disponibili dati misurati ci si può basare anche su delle stime.

Anche nella soluzione di problemi in regime stazionario è necessario disporre di una distribuzione iniziale delle altezze piezometriche, ma qui la condizione iniziale serve soltanto per avviare il processo numerico e non è, come nel caso del regime transitorio, un requisito fisico.

8.2 METODI NUMERICI PER LA RISOLUZIONE DELLE EQUAZIONI DEL MOTO

Nel precedente paragrafo è stata descritta l’equazione differenziale alle derivate parziali che governano il moto delle acque sotterranee. La soluzione analitica delle equazioni [8.8] e [8.9] è rappresentata da una funzione $h(x,y,z)$, che descrive il potenziale idraulico in ogni punto di coordinate x, y, z del campo di flusso. Come già detto precedentemente (cif. § 8.1) per determinare in modo univoco le soluzioni delle suddette equazioni all’interno di un dominio chiuso (rappresentato fisicamente dall’acquifero in studio), in cui esse sono de-

finite, è necessario fornire le condizioni al contorno e anche la condizione iniziale che rappresenta la distribuzione di h all'istante iniziale.

La risoluzione delle equazioni viene eseguita per via numerica in cui uno dei concetti base su cui si fonda il calcolo è quello della discretizzazione che consiste nel rappresentare il modo reale in volumi discreti di dimensioni contenute. Le principali soluzioni numeriche attualmente impiegate sono: il metodo alle differenze finite (F.D.M.) e il metodo degli elementi finiti (F.E.M.).

Il metodo alle differenze finite discretizza il dominio geometrico del sistema in studio mediante la creazione di una griglia con celle rettangolare o quadrata (per domini bidimensionali) e parallelepipedica o cubica (per domini tri-dimensionali) con maglia di dimensioni variabile o costante. Il nodo è ubicato nel centro della cella.

La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia composta da elementi che possono avere geometrie varie; in genere di forma triangolare per domini bidimensionali, tetraedriche per domini tridimensionali.

Tuttavia i secondi hanno sui primi il vantaggio di poter utilizzare passi di discretizzazione variabili. In questo modo l'efficienza di calcolo aumenta notevolmente, poiché è possibile infittire la griglia solo nei punti di maggior interesse, lasciando invece maglie più larghe nel resto del dominio.

8.3 DESCRIZIONE DEL CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO

Nel presente studio è stato utilizzato il codice di calcolo MODFLOW 2005 che simula il flusso idrodinamico in 3D nelle porzioni sature degli acquiferi porosi o porosi equivalenti. Tale modello fu messo a punto da McDonald & Harbaugh (1988) per conto dell'USGS negli anni '80 ed è stato poi reso negli anni successivi più maneggevole ed utilizzabile anche per chi non è informatico grazie alla progettazione di interfacce grafiche. Per la modellazione in questione è stata utilizzata l'interfaccia Groundwater Vistas 5.

Il codice MODFLOW risolve l'equazione alle derivate parziali [8.8] e [8.9] con uno schema delle differenze finite applicato ad un reticolo di discretizzazione.

Il dominio (sistema acquifero) viene discretizzato nelle tre direzioni spaziali; ne risulta, pertanto, una suddivisione in righe e colonne sul piano x e y ed in strati (*layers*) in direzione z formando, quindi, delle celle dove ognuna rappresenta un "volume di controllo e-

lementare omogeneo” (CV). Viene utilizzato un sistema di indicizzazione $i, j, e k$ dove i è l'indice delle righe, j è quello delle colonne e k è l'indice dei layers.

Al centro di ogni cella è posto un nodo, dove viene calcolata l'altezza piezometrica (h). Nel caso di regime transitorio si ottiene la soluzione (h) al termine di più intervalli temporali successivi detti *stress period*. Ogni periodo è a sua volta suddiviso automaticamente dal codice in intervalli temporali più piccoli detti *time step* per ognuno dei quali è calcolata una soluzione parziale.

Ciascuna cella viene definita da una equazione del tipo:

$$\begin{aligned}
 & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\
 & P_{i,j,k} * h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = SS_{i,j,z} (DELR_j * DELC_i * THICK_{i,j,k}) \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t^m - t^{m-1}} \quad [8.13]
 \end{aligned}$$

in cui:

$h_{i,j,k}^m$ = somma dei coefficienti dell'altezza piezometrica relativi a termini di sorgente, [L];

$CV, RC; e CC$ = conduttanze idrauliche fra il nodo i,j,k e un nodo adiacente, (L^2/T);

$P_{i,j,k}$ = somma dei coefficienti dell'altezza piezometrica relativi a termini di sorgente, ad esempio, per tenere conto degli scambi con il reticolo idrografico di superficie, (L^2/T);

$Q_{i,j,k}$ = somma dei termini di sorgente costanti, cioè indipendenti dall'altezza piezometrica, con $Q_{i,j,k} < 0$ quando l'acqua viene estratta dal sistema acquifero e $Q_{i,j,k} > 0$ quando l'acqua viene immessa, (L^3/T);

$SS_{i,j,z}$ = coefficiente di immagazzinamento, (L^{-1});

$DELR_j$ = ampiezza delle celle B della colonna j, uguale per tutte le righe, (L);

$DELC_i$ = ampiezza delle celle della riga i, B uguale per tutte le colonne, (L);

$THICK_{i,j,k}$ = spessore vertical B e della cella i,j,k , (L);

t^m = tempo di simulazione al passo m-esimo, [T].

La conduttanza C viene intesa come il prodotto della K per l'area della sezione del flusso divisa per la distanza fra due nodi.

Per indicare le conduttanze idrauliche tra celle, distinguendole dalla conducibilità idraulica di ciascuna cella, viene usata la notazione “1/2” nell’indice: ad esempio, $CRB_{i,j+1/2,k}$ rappresenta la conduttanza fra i nodi i, j, k e $i, j+1, k$.

Quando viene simulato un flusso stazionario, le grandezze non variano nel tempo e quindi il termine di destra della equazione è nullo.

I termini dell’equazione precedente possono essere modificati quando la cella è solo parzialmente satura o addirittura secca, per effetto della variazione temporale e spaziale della quota della tavola d’acqua in risposta a diverse sollecitazioni dei termini di sorgente. MODFLOW 2005 permette di indicare quali celle siano da considerarsi “convertibili”, ovvero per quali celle si può verificare che l’altezza piezometrica diventi inferiore alla quota del tetto della cella stessa. Quando ciò accade la cella è solo parzialmente satura e MODFLOW 2005 modifica i parametri della equazione tenendo conto del solo spessore saturo della cella. Quando la cella risulta addirittura asciutta, questa viene trasformata in una cella a flusso nullo.

Scrivendo una equazione algebrica [8.13] per ogni cella del reticolo di discretizzazione si ottiene un sistema di equazioni algebriche non-lineare; la non-linearità è introdotta dal fatto di considerare celle “convertibili”. Assegnando opportune condizioni al contorno, raggruppando i valori delle altezze piezometriche in un vettore x , raggruppando i coefficienti dei termini di sorgente e delle condizioni al contorno indipendenti dall’altezza piezometrica in un vettore b , il sistema da risolvere assume la forma: $A(x)x=b$, dove A è una matrice quadrata, sparsa e simmetrica.

La soluzione h del precedente sistema di equazioni viene cercata con un algoritmo iterativo per ogni time step. Il calcolo termina (convergenza) quando si ottiene una soluzione approssimata con una certa precisione ovvero dopo un certo numero di iterazioni. Vengono utilizzati in generale due criteri per stabilire se l’algoritmo è giunto a convergenza. Il primo criterio richiede che il valore assoluto della differenza tra il potenziale ad una iterazione e alla iterazione precedente sia inferiore per tutti i nodi a un valore prefissato, ϵ_ϕ . Il secondo criterio prevede che il valore assoluto dell’errore di bilancio sia inferiore per tutti i nodi a un valore prefissato, ϵ_b .

Nel codice MODFLOW 2005 è presente la possibilità di poter scegliere diversi risolutori (algoritmi numerici) per la soluzione dei sistemi lineari. I metodi implementati sono i seguenti:

- SSOR (Slice Successive Over- Relaxation): richiede un'elevata quantità di memoria ed è anche molto lento;
- SIP (Strongly Implicit Procedure): è un metodo adatto a sistemi con un elevato numero di equazioni lineari. Ha il vantaggio di essere molto stabile, anche se converge alla soluzione più lentamente degli altri metodi;
- PCG (Pre-conditioned Conjugate Gradient) è un metodo molto veloce nella ricerca della soluzione delle equazioni, ma può fallire in sistemi complessi;
- GMG (Geometric Multi-Grid Solver): è più adatto a risolvere problemi con forti variazioni di conducibilità idraulica e, anche se richiede più memoria, risulta più veloce di PCG.

Il risolutore calcola la soluzione dell'equazione di flusso a partire da un set di valori fornita dall'utente (condizione iniziale) e per approssimazioni successive calcola nuovi valori fino a raggiungere una soluzione sufficientemente stabile. Affinché il risolutore possa operare è necessario stabilire i criteri di convergenza sia per il flusso che per il carico idraulico. La convergenza si raggiunge quando la differenza di flusso e di carico è inferiore ai criteri impostati.

Gli scambi tra corpo idrico superficiale e falda vengono rappresentati in MODFLOW mediante il pacchetto *River*. Questo modulo permette di simulare il flusso idrico tra un acquifero ed un serbatoio, solitamente costituito da un fiume o da un lago. Si tratta di una condizione matematica di tipo Cuchy (cifr. § 8.1). Per ciascuna cella river viene calcolato il termine di conduttanza:

$$C_{RIV} = \frac{KLW}{M} \quad [8.14]$$

in cui:

W = larghezza dell'alveo del fiume;

L = lunghezza del tratto di fiume nella cella;

K = permeabilità dei sedimenti di fondo;

M = spessore dei sedimenti di fondo del fiume.

Né deriva che il flusso sarà:

$$Q_{RIV} = \frac{KLW}{M} (H_{RIV} - h_{i,j,k}) \quad [8.15]$$

dove:

H_{RIV} = carico idraulico del fiume;

$h_{i,j,h}$ = carico idraulico dell'acquifero nella cella i,j,k.

E' da notare che il flusso rappresenta un valore positivo nel caso avvenga verso l'acquifero. Un ultimo parametro che viene inserito nel modello per poter applicare questo tipo di condizione al contorno è la quota della base dei sedimenti di fondo del fiume (R_{BOT}). Si consideri il caso in cui il fiume alimenta la falda, il flusso è dato da:

$$Q_{RIV} = C_{RIV} (H_{RIV} - h_{i,j,k}) \quad [8.16]$$

Nel caso in cui risulti $R_{BOT} \geq h_{i,j,k}$, l'equazione utilizzata dal pacchetto RIV sarà:

$$Q_{RIV} = C_{RIV} (H_{RIV} - R_{BOT}) \quad [8.17]$$

Per ulteriori abbassamenti del livello piezometrico al di sotto dei sedimenti di fondo, il flusso dal fiume alla falda resterà sempre costante ed indipendente da $h_{i,j,k}$.

La condizione di Cuchy (cfr. § 8.1) viene anche utilizzata per rappresentare elementi fisici esclusivamente drenanti come le trincee che sono in grado di determinare una fuoriuscita di acqua dal sistema idrico sotterraneo, ma non il contrario:

Il codice MODFLOW prevede per elementi di questo genere il pacchetto *Drain* del tutto simile a quello River, dove la portata è data:

$$Q_{DRN} = C_{DRN} (H_{DRN} - h_{i,j,k}) \quad [8.17]$$

dove:

H_{DRN} = carico idraulico del dreno;

$h_{i,j,h}$ = carico idraulico dell'acquifero nella cella i,j,k;

C_{DRN} = conduttanza del dreno.

Nel caso in cui il carico idraulico della falda scende al di sotto del fondo del dreno $R_{DRN} > h_{i,j,k}$ le condizioni si annullano e il flusso in uscita diventa pari a zero.

ZoneBudget è il pacchetto di MODFLOW che consente di valutare il bilancio idrico in un insieme di celle appartenenti al dominio del modello e definite dall'utente. Tale pacchetto può essere utilizzato sia in regime stazionario che transitorio.

Il *Pest* (non-linear Parameter ESTimation program) è il programma che permette di effettuare la calibrazione del modello. La calibrazione si riferisce sia alle proprietà idrauliche del sistema (conducibilità idraulica e immagazzinamento) e sia alle condizioni al contorno.

Il controllo dei risultati della calibrazione può essere fatto in termini quantitativi. Ciò si basa sulla valutazione di una serie di grandezze significative: il calcolo e la distribuzione dei residui, ottenuti dal confronto fra le altezze calcolate e quelle misurate e il calcolo delle

correlazioni spaziali e temporali dei residui stessi. Le statistiche di cui solitamente si tiene conto nella valutazione dei residui sono le seguenti: residuo, media, media assoluta, scarto quadratico medio, media normalizzata e deviazione standard.

Il metodo più semplice per valutare la bontà della calibrazione è quello grafico, Pest, infatti, oltre al valore numerico delle suddette statistiche, fornisce lo *scatter plot* e la distribuzione dei residui: una buona calibrazione sarà tanto migliore quanto maggiore sarà l'allineamento dei valori calcolati con la retta a 45° e quanto più la distribuzione dei residui approssimerà una distribuzione gaussiana.

9 MODELLO CONCETTUALE

Per elaborare il modello matematico di flusso è necessario definire il modello concettuale del Bacino idrogeologico dell'Acerno. Come già precedentemente detto, il modello concettuale è una rappresentazione schematica semplificata dell'acquifero reale che si vuole studiare. Esso è finalizzato all'individuazione delle caratteristiche salienti del sistema in esame (sia dal punto di vista della struttura idrogeologica che da quello delle caratteristiche del flusso idrico sotterraneo e delle condizioni di contorno) che saranno successivamente riprodotte nel modello numerico.

L'acquifero da modellare è di tipo monostrato di natura dolomitica e subordinatamente calcareo e calcaeo-dolomitico e, in relazione alle locali caratteristiche stratigrafiche dei materiali fluvio-lacustri sovrastanti, assume carattere sia confinato che freatico. I suddetti materiali di ricoprimento (acquiclude), costituiti prevalentemente da limi, raggiungono spessori massimi dell'ordine dei 150 metri in corrispondenza del centro di Acerno, spessori che si riducono in vicinanza della struttura dell'Accellica e del Cervialto.

La geometria principale del sistema in esame è stata individuata nel piano campagna e nella superficie corrispondente al letto dell'acquifero. La carenza di dati ha consentito solamente di fare un'ipotesi circa lo spessore dell'acquifero stesso. Sulla scorta dei dati della perforazione petrolifera profonda 4.625 metri (cfr. § 3.1 e 5.2.1), il letto dell'acquifero è stato assimilato ad una superficie ideale inclinata verso sud partendo da una quota di 250 m s.l.m. fino alla quota di 200 m s.l.m. in corrispondenza dell'abitato di Acerno.

La morfologia del piano di campagna è stata ricostruita attraverso l'elaborazione di un DTM (con celle di 5 metri di lato) a partire dalla C.T.R. in scala 1:5.000 (cfr. § 5.1.1).

Una volta individuate le geometrie principali è stata poi individuata la superficie superiore della porzione dell'acquifero confinato dalla coltre fluvio-lacustre. La ricostruzione di tale superficie è stata alquanto complessa per la mancanza di dettagliate informazioni. Si è tenuto conto quindi delle stratigrafie di alcuni sondaggi e della prospezione geofisica eseguita nell'area del gruppo sorgivo dell'Ausino-Avella e Olevano (cfr. § 5.15 e 5.2.1). In prossimità della piana di Acerno la superficie si trova ad una profondità di oltre 150 m dal p.c., profondità che diminuisce in direzione dei versanti e verso la porzione settentrionale della Conca dove raggiunge un valore dell'ordine di una trentina di metri dal p.c..

Circa la morfologia della superficie piezometrica della falda, le poche informazioni, rilevate in alcuni piezometri presenti nelle vicinanze delle sorgenti e in un pozzo a nord

della piana di Acerno, evidenziano che la quota della falda è attestata intorno ad un quota di 570/575 m s.l.m. Nei pressi dell'area di Toppa della Faragna la falda si rinviene a una quota leggermente più bassa (565 m s.l.m.).

I punti e le modalità di ingresso e uscita dell'acqua dal sistema idrogeologico rappresentano l'ultimo aspetto per poter definire il modello concettuale. Il bilancio idrogeologico (cfr. § 7.5) e i dati acquisiti lungo alcuni corsi d'acqua hanno evidenziato che la struttura in esame non presenta scambi idrici sotterranei con gli acquiferi adiacenti. I limiti idrogeologici coincidenti, quindi, con i principali contatti tettonici riconosciuti nella zona. In tale contesto, l'infiltrazione dovuta alle precipitazioni rappresenta l'unica ricarica per il sistema idrogeologico in esame.

Le "uscite" dal bacino sono rappresentate dai due importanti gruppi sorgivi ubicati a sud (Olevano) e a nord-ovest (Ausino-Ausinetto-Avella) dell'abitato di Acerno (cfr. § 7.4) e da perdite negli alvei del fiume Tusciano e del Vallone Isca della Serra (cfr. § 7.5).

I parametri

10 COSTRUZIONE DEL MODELLO

10.1 DISCRETIZZAZIONE DEL DOMINIO

Nell'elaborazione del modello numerico si è fatto riferimento al modello concettuale precedentemente descritto. Il dominio del modello è stato definito partendo da un rettangolo di circa 108 Km per 127 Km di lato con al centro l'area di studio. Il rettangolo è stato diviso in celle quadrate con il lato di a 20 metri. Al fine di ottenere risultati più dettagliati ed attendibili nell'area delle sorgenti e dei corsi d'acqua è stato opportuno infittire la griglia di calcolo con celle di dimensioni 10 x 10 metri. Il modello successivamente è stato organizzato in quattro strati (*layers*) (Fig. 10.1 e 10.2):

- il primo *layer*, con spessore 30 – 150 metri, rappresenta, in prossimità della piana di Acerno, la formazione lacustre che costituisce lo strato impermeabile sovrastante la zona satura mentre altrove rappresenta l'*epikarst* e cioè la porzione superficiale dell'ammasso roccioso dolomitico-calcareo (cfr. § 7.4).

- I successivi *layers* 2, 3 e 4 rappresentano varie porzioni dell'acquifero dolomitico e sono utili per simulare una conducibilità idraulica crescente con la profondità. Tale assunzione si basa sulla considerazione che con l'aumentare del carico litostatico in profondità, le discontinuità tendono a chiudersi o avere una apertura idraulica ridotta (Francani & Gattinoni, 2009). Il *layer* 2 e 3 presentano uno spessore medio di 300 metri mentre il *layer* 4 è pari a 150 metri. Rispetto alla totalità delle celle individuate all'inizio (345.440), il numero delle celle attive risulta essere pari a 127.702. L'orientazione della griglia è stata scelta in modo che le colonne e le righe della maglia siano rispettivamente parallele ed ortogonali al flusso principale dell'acqua sotterranea.

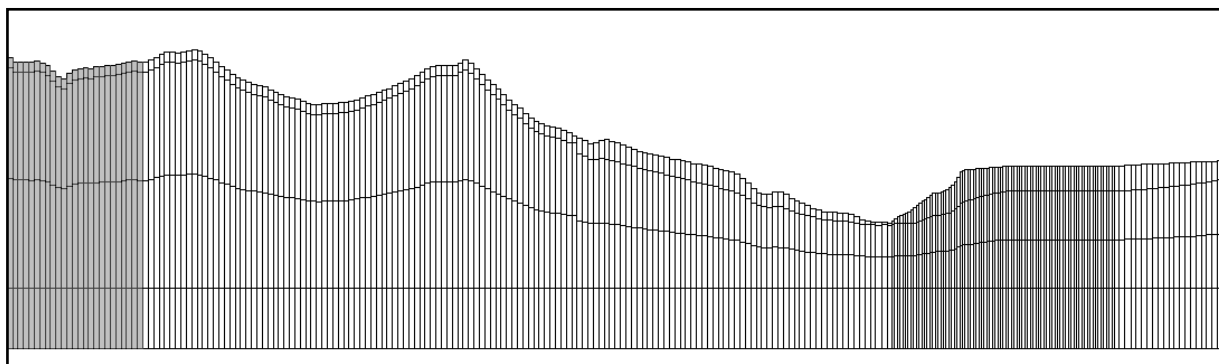


Fig. 10.1 – Sezione lungo una riga del modello in corrispondenza del M.te Accellica e della piana di Acerno.

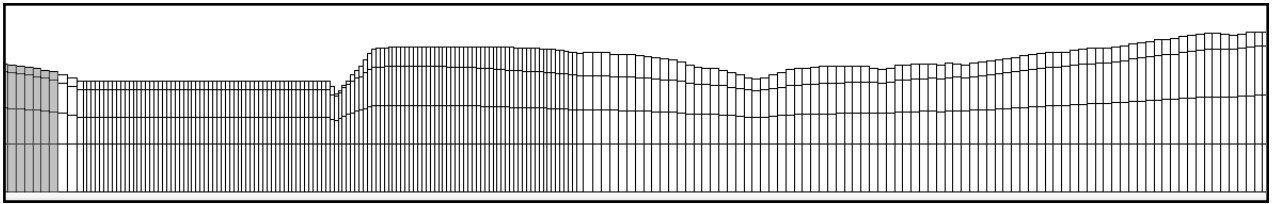


Fig. 10.2 – Sezione lungo una colonna del modello in corrispondenza del gruppo sorgivo Olevano e della piana di Acerno.

10.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

La definizione delle condizioni al contorno, ovvero l'identificazione nell'area in esame dei limiti fisico-territoriali che abbiano uno specifico ruolo idrogeologico, è una fase importante nello sviluppo del modello (cfr. § 8). Tali condizioni vengono descritte di seguito così come sono state applicate per ogni *layer*:

Layer 1 – Oltre alla condizione *No flow* lungo il bordo della struttura idrogeologica è stata assegnata una condizione *River* lungo il corso d'acqua del fiume Tusciano e del torrente dell'Isca della Serra. I valori relativi al fondo dell'alveo ed al livello idrometrico sono stati reperiti dalle numerose misure riportate eseguite in corrispondenza degli alvei dei principali corsi d'acqua. Non essendo disponibili dati sulla conducibilità idraulica e sullo spessore del letto fluviale dei corsi d'acqua considerati, sono stati assunti, rispettivamente, valori di 1×10^{-4} m/s e di 1 metro.

Layer 2 – Oltre alla condizione di tipo *No flow*, per la simulazione delle sorgenti Olevano e Ausino-Avella è stata utilizzata la condizione *Drain*. La conduttanza è stata stimata prendendo in considerazione la geometria della sorgente per uno spessore unitario e la conducibilità idraulica del corrispondente *layer*.

Layers 3, 4 e 5 – I *layers* non presentano condizioni al contorno se non quello di tipo *No flow* lungo il contorno della struttura..

10.3 RICARICA

La ricarica al sistema acquifero è stata assegnata alle celle del primo *layer* (Fig. 10.3). I valori, dipendenti dalla quota, si riferiscono all'infiltrazione efficace calcolata nel bilancio idrogeologico (cfr. § 7.5.2). Si è provveduto a depurare del 5% i valori di infiltrazione corrispondenti all'area nord-est del M.te Accellicca in quanto parte del volume di acqua che si infiltra alimenta la falda superficiale (cfr § 4) e non è contemplata nella modellazione. I valori medi, espressi in mm/anno, coprono un intervallo di dieci anni e cioè dall'anno 2000 all'anno 2009 (cfr. § 5.2.3).

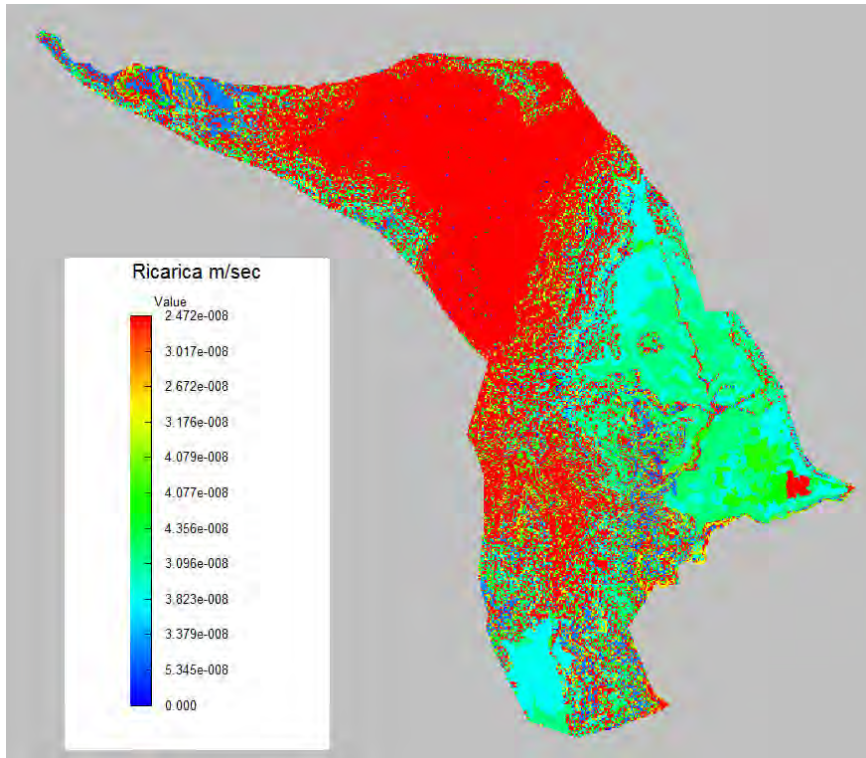


Fig. 10.3 – Rappresentazione della ricarica.

10.4 PARAMETRI IDRAULICI

L'uso del codice di calcolo MODFLOW richiede, per la risoluzione dell'equazione del flusso (cfr. § 8.1), la conoscenza della trasmissività per ogni cella del dominio. Il valore di tale parametro è calcolato direttamente dal software una volta noti il coefficiente di permeabilità di ogni cella e lo spessore del *layer*.

Data la scarsa disponibilità dei valori di conducibilità (cfr. § 5.26) si è provveduto inizialmente ad assegnare alle diverse litologie affioranti valori medi di permeabilità desunti dalla letteratura scientifica (Civita, 2005; Piscopo et alii, 2001; Celico, 1988). Per gli strati sottostanti (*layers* 2, 3 e 4) si è attribuito un valore alla conducibilità idraulica iniziale calcolato con la relazione di Wei & Hudson (Clerici & Sfratato, 2008) che descrive la variazione della permeabilità con la profondità:

$$\frac{K}{K'} = \left(1 - \frac{Z}{A + BZ}\right) \quad 10.1$$

dove:

K = permeabilità (x,y,z)

K' = permeabilità in superficie (x,y,z)

Z = profondità

A, B = costanti definite da Snow rispettivamente pari a 58 e 1.02. Al termine Z è stato assegnato il valore della profondità media relativa alla base di ciascun *layers*.

Successivamente la fase di calibrazione (cfr. § 10.7) ha portato alla modifica di tali valori. Essi sono riportati nella tabella riassuntiva 10.1. Nelle figure che seguono vengono illustrati i quattro *layers* con la distribuzione delle conducibilità idrauliche.

Nel primo *layer* (Fig. 10.4 a) si riproduce la geologia di superficie: dolomie affioranti su una vasta porzione dell'area, calcari e calcari dolomitici del M.te Accellica, copertura fluvio-lacustre della Conca di Acerno caratterizzata da una permeabilità bassissima.

Nei successivi layers 2, 3, 4 (Fig 10.4 b) sono rappresentate solo le formazioni calcaree e calcareo-dolomitiche insieme alle dolomie.

Nel modello è stata considerata anche una fascia più cataclasata, ubicata a est del M.te Accellica, che rappresenta una linea tettonica (NE-SW) che avrebbe determinato la sovrapposizione delle formazioni calcaree su quelle dolomitiche. A tale fascia pertanto è stata attribuita una bassa conducibilità idraulica.

E' da evidenziare che i valori delle conducibilità idrauliche sono risultati maggiori rispetto a quelli di partenza e che nessuna formazione presenta anisotropia.

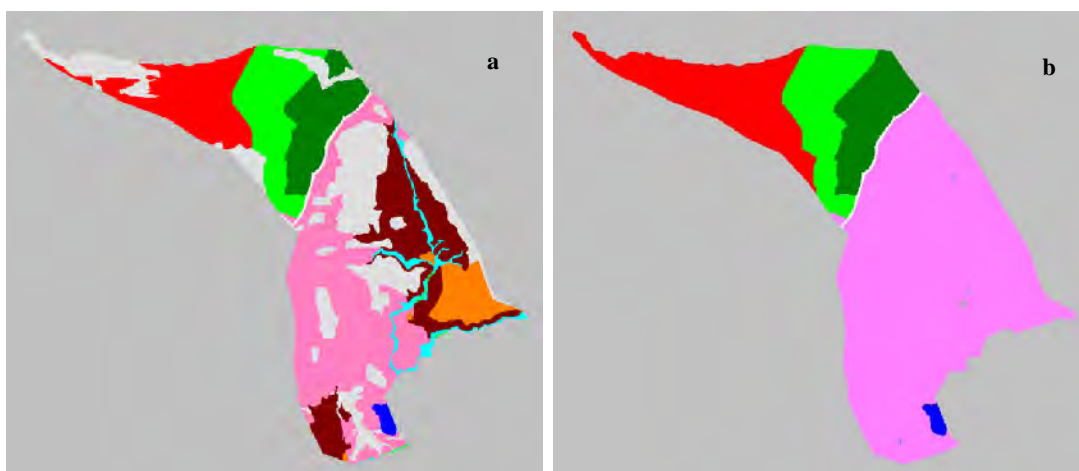


FIG. 10.4 – Distribuzione delle conducibilità idrauliche: a) layer 1; b) layer 2, 3, 4.

10.5 PUNTI DI CALIBRAZIONE

Le osservazioni inserite nel modello su cui viene effettuata la calibrazione corrispondono sette punti relativi ai valori dei livelli idrici dei sondaggi e di un pozzo (cfr. § 5.2.1).

Per quanto riguarda i flussi sono stati presi in considerazione i valori delle portate misurate nelle cinque sorgenti inserite nel modello come dreni (cfr. § 10.2).

















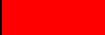





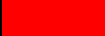



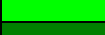

Layer	Colore	Litologia	$K_x/K_y/K_z$ m/s
1		Dolomia	3.57×10^{-3}
		Dolomia farinosa	2.43×10^{-4}
		Dolomia farinosa	2.81×10^{-4}
		Calcere-dolomitico	7.32×10^{-2}
		Calcere	3.71×10^{-2}
		Deposito fluvio-lacustro – frazione argillosa limosa	1×10^{-11}
		Deposito fluvio-lacustro – frazione ghiaiosa	3.31×10^{-3}
		Alluvioni	1.21×10^{-5}
		Conglomerati	4.05×10^{-3}
		Fascia cataclasata	2.61×10^{-7}
2		Dolomia	5.20×10^{-3}
		Dolomia farinosa	2.52×10^{-4}
		Dolomia farinosa	2.83×10^{-4}
		Calcere-dolomitico	8.90×10^{-2}
		Calcere	4.93×10^{-2}
		Fascia cataclasata	2.61×10^{-7}
3		Dolomia	7.12×10^{-3}
		Dolomia farinosa	2.91×10^{-4}
		Dolomia farinosa	3.06×10^{-4}
		Calcere-dolomitico	1.20×10^{-3}
		Calcere	6.90×10^{-2}
		Fascia cataclasata	2.61×10^{-7}
4		Dolomia	1.32×10^{-4}
		Dolomia farinosa	3.42×10^{-4}
		Dolomia farinosa	3.80×10^{-4}
		Calcere-dolomitico	2.38×10^{-3}
		Calcere	0.52×10^{-3}
		Fascia cataclasata	2.61×10^{-7}

Tabella 10.1 – Valoti della conducibilità assegnate ai vari layer del modello.

Tutte le osservazioni ricadono nel secondo *layer* e la loro distribuzione è concentrata nel settore meridionale del bacino ad eccezione di un pozzo ubicato nella parte alta della piana di Acerno.

10.6 PARAMETRI NUMERICI DEL RISOLUTORE

Il risolutore utilizzato è il PCG2 secondo i seguenti parametri:

Maximun Outer Iterations = 100

Maximun Inner Iterations = 50

Head Change Criterion = 0.01

Residual Criterion for Convergence = 1

Relaxation Parameter = 1

Matrix Preconditioning Method = Clolesky.

10.7 IPOTESI SEMPLIFICATRICI

Le principali assunzioni e semplificazioni fatte nella modellazione si possono riassumere come segue:

- l'acqua circola in un mezzo fratturato che viene assimilato ad un acquifero continuo e equivalente. Questa assunzione non è sempre estensibile ai mezzi fratturati e carsificati. Nel caso esaminato l'estrema irregolarità delle portate delle sorgenti e lo studio geomorfologico indicano che il carsismo non è tanto evoluto da influenzare in maniera determinante le condizioni di flusso delle acque sotterranee;
- la ricarica assegnata al modello è stata attribuita alla falda con effetto immediato, cioè non è stato considerato il moto delle acque sotterranee nella zona insatura che in alcune zone dell'area in esame raggiunge uno spessore di centinaia di metri;
- nell'elaborazione del modello si è utilizzato un procedimento inverso: cioè si è cercato di individuare una possibile distribuzione del parametro K per successivi aggiustamenti, in base al confronto dei carichi idraulici e delle portate calcolate con quelle simulate;
- gli acquiferi del modello sono orizzontali, laddove quelli reali sono inclinati.

10.8 CALIBRAZIONE

La calibrazione a cui è stato sottoposto il modello ha permesso di rilevare il set di valori e parametri che meglio gli consentono di aderire ai dati reali.

Sono state elaborate diverse simulazioni variando ogni volta un singolo parametro da mezzo ad un ordine di grandezza rispetto al dato di partenza e, tramite il codice *PEST* presente nel software Groundwater Vistas, sono stati individuati i parametri più incerti, cioè quei punti per i quali la minima variazione del valore a loro associato induceva valori residui più elevati. Particolare attenzione si è posta, quindi, alla conduttanza del letto dei cor-

si d'acqua e al parametro della conducibilità idraulica dell'acquifero che incidono maggiormente sulla soluzione del modello. In particolare il modello è piuttosto sensibile alle conducibilità idrauliche assegnate alla formazione dolomitica e calcarea, probabilmente a causa dell'eterogeneità di tali depositi.

Per quanto concerne il resto dei parametri esaminati, il modello sembra essere debolmente sensibile alla loro variazione.

Alla correzione dei parametri che hanno mostrato particolare sensibilità alle variazioni di valore, è seguita la calibrazione del modello in stato stazionario, la quale è stata raggiunta confrontando i valori dei carichi idraulici e dei flussi calcolati con quelli osservati in campagna. In particolare si è ottenuto il raggiungimento quando i punti rappresentativi sono ricaduti all'interno dell'intervallo di confidenza pari al 95% identificato nella Fig 10.5 dalla retta posta a 45°; l'errore medio assoluto è pari a 0.68 m.

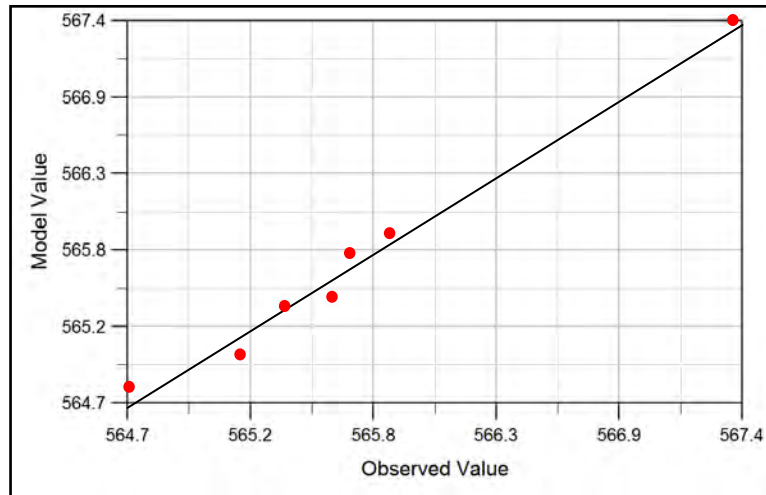


Fig. 10.5 - Grafico di comparazione tra i carichi piezometrici simulati e quelli osservati in condizioni stazionarie

10.9 RISULTATI

Il risultato ottenuto (fig. 10.6) è la “fotografia” che potrebbe rappresentare la realtà attuale del sistema relativo al periodo di piena. Medio

In Figura 10.6 è riportato il campo piezometrico elaborato dal modello. Il range di variazione della piezometria è compreso tra 570 e 550 m s.l.m. Viene riprodotta la variazione del gradiente idraulico da Nord verso Sud. Considerando l'andamento delle isopiezometriche si osserva che si infittiscono in corrispondenza della fascia a bassa trasmissività relativa alla faglia inversa ubicata a oriente del M.te Accellicca. Il gradiente idraulico medio, pari a 2 per mille è compatibile con quelli noti per acquiferi con caratteristiche simili (Cecilio, 1988).

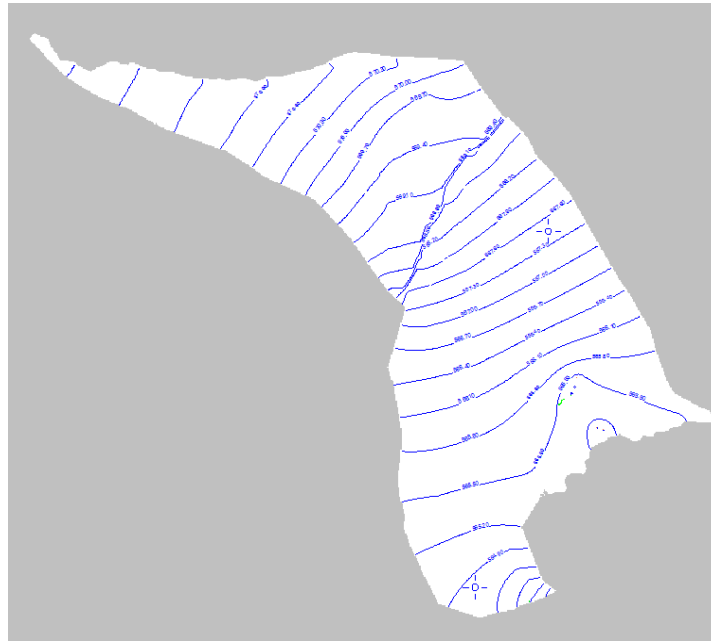


Fig. 10.6 - Piezometria.

Il torrente Isca della Serra, nella prima parte del suo corso, non presenta scambi idrici con la falda come invece ci si aspetterebbe. Infatti la piezometria elaborata dal modello si trova a quote più basse del letto del fiume. Solo in prossimità dei gruppi sorgentizi la piezometria interagisce con i corsi d'acqua e il modello fornisce valori di portata attendibili erogati sia dal torrente Isca della Serra che dal fiume Tusciano. Lo stesso fenomeno si evidenzia anche nella parte terminale del torrente del Vallone della Manca.

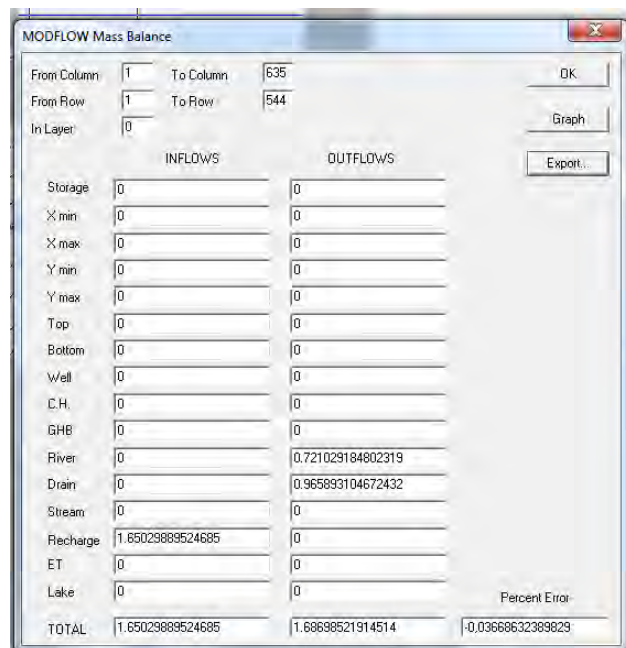


Fig. 10.7 - Bilancio di massa del modello.

Il principale risultato di un modello di flusso è il bilancio di massa riportato in figura 10.7. L'errore del bilancio è pari a 0.03 ed è quindi accettabile in quanto inferiore alla percentuale ritenuta comunemente ammissibile (cfr. 7.5.4).

Dalla lettura del bilancio si evince che la ricarica zenitale costituisce l'unica fonte di acqua in ingresso al sistema e che i fiumi, il cui comportamento va però ulteriormente verificato, hanno una funzione prevalentemente drenante rispetto alla falda.

11 CONCLUSIONI

I risultati significativi dello studio idrogeologico nell'area della Conca di Acerno possono essere così brevemente sintetizzati.

Dalla ricostruzione del quadro geologico e dalle sezioni idrogeologiche si evince che le fasi tettoniche nell'area oggetto d'interesse hanno avuto un ruolo importante per l'idrogeologia. Tali fasi hanno provocato la sovrapposizione di complessi litologici dolomitici (sede di una copiosa falda) su complessi prevalentemente marnoso-argilloso-silicei considerati terreni praticamente impermeabili nonché una intensa fase di tettonizzazione riscontrata nelle dolomie prossime all'area del sovrascorrimento.

L'analisi chimica dei principali cationi e anioni effettuata sui campioni d'acqua provenienti dalle principali sorgenti e da un pozzo ubicato all'interno della piana di Acerno, ha confermato l'esistenza di un acquifero di tipo monostrato di natura dolomitica che, in relazione alle locali caratteristiche stratigrafiche dei materiali fluvio-lacustri sovrastanti, assume carattere sia confinato che freatico. I suddetti materiali di ricoprimento (acquiclude), costituiti prevalentemente da limi, raggiungono spessori massimi dell'ordine dei 150 metri in corrispondenza del centro di Acerno, spessori che si riducono in vicinanza della struttura montuosa del Cervialto e dell'Accellica.

L'area di ricarica dell'acquifero è stata individuata attraverso l'esame dei valori degli isotopi ^2H e ^{18}O provenienti da analisi eseguite sui punti d'acqua ritenuti più significativi e che hanno evidenziato una quota di infiltrazione media pari a 800/1000 m s.l.m. da individuare in corrispondenza dell'Accellica.

La mancanza di dati ha consentito solamente di fare un'ipotesi circa lo spessore dell'acquifero stesso. Sulla scorta dei dati della perforazione petrolifera profonda 4.625 metri, il letto dell'acquifero è stato assimilato ad una superficie ideale ubicata ad una quota di 200 m s.l.m.

Le poche informazioni, rilevate in alcuni piezometri presenti nelle vicinanze delle sorgenti e in un pozzo a nord della piana di Acerno, evidenziano che la quota della falda è attestata intorno ad una quota di 570/552 m s.l.m.

Per valutare le potenzialità idrica sotterranea dell'acquifero della Conca di Acerno nonché effettuare la verifica dello schema di circolazione idrica sotterranea e quindi dei limiti idrogeologici si è provveduto all'elaborazione del bilancio idrogeologico.

Il bilancio è stato pertanto calcolato su un'area iniziale di 34 Km² individuata in base a considerazioni litologiche e strutturali e ai dati presenti in bibliografia.

I dati utilizzati per il bilancio hanno riguardato le misure della precipitazione e della temperatura corrispondenti all'intervallo di tempo che intercorre dall'anno 2000 al 2009 perché sono risultate continue rispetto a quelle degli anni precedenti. Sono state prese in considerazione nove stazioni pluviometriche e nove stazioni termometriche. Tutte le fasi del bilancio sono state elaborate con l'ausilio del Geographic Information System (G.I.S.) ArcGIS che ha consentito di affinare i calcoli.

Assumendo lineare la relazione tra pioggia/temperatura e quota, si è pervenuti in primo luogo alla elaborazione delle rispettive leggi di variazione valide per l'area di studio, a loro volta funzionali al calcolo del volume di acqua di precipitazione media annua (P) e al volume di evapotraspirazione (ETr) media annua da inserire nell'equazione del bilancio.

Il volume di ETr è stato calcolato applicando tre formule: Turc, Thornthwaite con il Metodo Thornthwaite – Mather e Hargreaves et al. con il Metodo Thornthwaite ottenendo conclusioni tra loro simili, a conferma della validità dei risultati.

Noti i termini P ed ETr si è valutata la precipitazione efficace (P - ETr) e con questo dato si è provveduto al calcolo applicando i c.i.p. (coefficienti di infiltrazione potenziali) del volume di infiltrazione efficace (valore medio 45,26 m³/anno x 10⁶) fine ultimo del bilancio.

L'utilizzo dei c.i.p. è stato necessario data la mancanza di dati utile per quantizzare il deflusso superficiale nell'area di studio.

Per verificare l'attendibilità dei risultati, il volume dell'infiltrazione efficace è stato confrontato con quello delle uscite dalla struttura idrogeologica rappresentate dalle sorgenti e dalle venute in alveo. Si è così evidenziato uno scarto del 7.9 % , del 6.8 % e del 5.9 % utilizzando nella formula del bilancio rispettivamente la formula di evapotraspirazione di Turc, di Thornthwaite e di Hargreaves. Tali scarti rientrano nei limiti dell'approssimazione.

I risultati del bilancio idrogeologico hanno pertanto consentito di definire meglio i limiti del bacino idrogeologico ed è stata verificata la corrispondenza di questi limiti con i principali fenomeni tettonici dell'area. Essi inoltre hanno evidenziato che la struttura non presenta scambi idrici sotterranei con gli acquiferi adiacenti. Le uniche uscite sono rappresentate dai due importanti gruppi sorgivi ubicati a sud (Olevano portata media di 521 l/s) e a nord-ovest (Ausino-Ausinetto-Avella con portata media di 466 l/s) dell'abitato di Acerno

e da perdite nell'alveo del fiume Tusciano e nei torrenti dell'Isca della Serra e del Vallone della Manca.

Bisogna però evidenziare che essendo questo un acquifero con una geometria articolata la conoscenza di ulteriori dati di campagna consentirebbe di allestire un modello concettuale ancora più dettagliato e verosimile. Una situazione ancora poco chiara e che potrebbe essere lo spunto per un eventuale approfondimento in futuro, riguarda le sorgenti A vella Ausino ed Ausinetto che emergono a quote (tra loro prossime) significativamente più alte rispetto alle quote di affioramento del gruppo Olevano poste più a valle secondo la direzione di flusso. Ciò determina, tra i due gruppi, la presenza di un gradiente piuttosto acclive che non si registra in altri settori della falda del substrato dolomitico.

Particolare attenzione è stata posta alla successiva elaborazione del modello di flusso con MODFLOW. L'interfaccia grafica utilizzata per la preparazione dei dati in ingresso e per la visualizzazione e analisi dei risultati è Groundwater Vistas 5.

MODFLOW è un codice di calcolo che risolve in tre dimensioni l'equazione che governa il moto delle acque sotterranee; ha una struttura modulare e utilizza, con un procedimento iterativo, il metodo delle differenze finite.

La discretizzazione del dominio ha tenuto conto della struttura geologica del bacino e della riduzione di permeabilità nell'acquifero con la profondità; ipotesi, questa, assunta in base alla considerazione che il carico litostatico tende a ridurre la porosità di una roccia. Il dominio pertanto è stato suddiviso in quattro *layers*. Il primo rappresenta la formazione impermeabile lacustre sovrastante la zona saturata dell'acquifero dolomitico e la porzione superficiale (epikarst) dell'ammasso roccioso dolomitico. I successivi *layers* riproducono varie porzioni dell'acquifero dolomitico a conducibilità idraulica decrescente dall'alto verso il basso. La ricostruzione del *bottom* del primo *layers* in corrispondenza dei depositi fluvio-lacustri non è stata semplice per la carenza dei dati relativi allo spessore dei depositi in tutta la piana di Acerno.

L'applicazione del modello ha comportato la necessità di fare delle assunzioni. Una prima semplificazione è stata quella di assimilare l'acquifero dolomitico fratturato ad un mezzo continuo equivalente. Ciò è stato possibile sia per l'estrema regolarità delle portate delle sorgenti che denota scarsa evoluzione dei fenomeni carsici e sia perché l'estrema fratturazione rende la roccia in alcune zone farinosa tale da poter essere classificata come cataclaste. Una seconda semplificazione è consistita nel simulare la parte dell'acquifero inclinato in prossimità della struttura montuosa dell'Accellica con *layers* orizzontali.

Per quanto riguarda i dati relativi all'entità della ricarica dell'acquifero si è scelto di utilizzare il valore dell'infiltrazione efficace calcolato nel bilancio idrogeologico. Tale valore potrebbe non corrispondere a quello dell'infiltrazione reale in quanto la presenza della zona insatura, che raggiunge anche spessori dell'ordine del centinaio di metri, potrebbe avere un ruolo importante nel moto dell'acqua che percola verso la zona satura.

Nella fase di elaborazione si è impiegato un procedimento inverso che comporta di individuare una possibile distribuzione della conducibilità idraulica (K) con successivi aggiustamenti dei suoi valori, in base al confronto dei carichi idraulici e delle portate calcolate con quelle simulate.

La modellazione numerica è stata eseguita in regime stazionario.

L'individuazione delle condizioni al contorno si è rilevata semplice in quanto il bacino dell'Acerno si comporta come una struttura idraulicamente isolata. Pertanto lungo i margini è stata assegnata la condizione *No flow*.

Le sei sorgenti principali ubicate in prossimità della piana di Acerno, sono state inserite nel modello come *Drain*; mentre i corsi d'acqua del Tusciano e dell'Isca delle Serre, sono state modellate con il pacchetto *River*.

La calibrazione dei risultati ottenuti è stata effettuata confrontando le portate delle suddette sei sorgenti simulate dal modello con quelle misurate durante la campagna di rilevamento effettuata nel 2009. La calibrazione ha riguardato anche il confronto dei valori piezometrici calcolati con quelli misurati in corrispondenza di tre pozzi d'acqua.

Il risultato del modello numerico di flusso ha confermato le ipotesi di circolazione idrica fatte in precedenza. Il campo piezometrico calcolato evidenzia un range di variazione compresa tra 570 e 550 m s.l.m. con un gradiente idraulico medio, pari a 2 per mille compatibile con quelli noti per acquiferi con caratteristiche simili.

In prossimità dei gruppi sorgentizi la piezometria interagisce con i corsi d'acqua e il modello fornisce valori di portata attendibili erogati sia dal torrente Isca della Serra che dal fiume Tusciano.

L'analisi dei risultati ottenuti dalla modellazione consente di affermare che la simulazione matematica di un acquifero fratturato è possibile in quanto il modello ottenuto ha confermato le ipotesi di circolazione idrica del modello idrogeologico. Anche se è sicuramente migliorabile per quel che riguarda le approssimazioni precedentemente descritte, il modello, a questo stadio di calibrazione, può essere utilizzato come un valido strumento di gestione della risorsa idrica sotterranea: esso consente di elaborare con facilità diversi sce-

nari e quindi ad esempio comprendere la reazione del sistema ad una variazioni della ricarica legata a cambiamenti climatici o ai consistenti prelievi di acqua sotterranea.

Da aggiungere, infine, che la qualità dei risultati della modellazione può ulteriormente migliorare con una conoscenza più approfondita dell'assetto geologico/strutturale dell'acquifero e con una maggiore quantità di dati idrologici sperimentali a disposizione (portate delle emergenze, dei corsi d'acqua ecc.). Ciò consentirebbe anche la possibilità di elaborare un modello in regime di transizione.

BIBLIOGRAFIA

- MCDONALD, M.G. AND A.W. HARBAUGH, (1988). *A modular three-dimensional finite difference groundwater flow model*. Techniques of water resources investigations, book 6, chapter a1, U.S. Geological Survey, Denver, Colorado.
- BEAR J. (1972). *Dynamics of fluids in Porous media*. Elsevier, New York.
- ALLEN R.G., PEREIRA L.S., RAES D. & SMITH M. (1998). *Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and Drainage Papers, **56**, 1-290, Roma.
- ANDERSON M. P. & WOESSNER W. W. (1992). *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport*. Academic Press, INC. San Diego, California.
- ANGELINI P. & DRAGONI W. (1997) *The problem of modelling Limestone Springs: the case of Bagnara (North Apennines, Italy)*. Groundwater, **35**, 4,
- ARDIGÒ G. (1958). *Osservazioni geologiche sull'alta valle del Tusciano e sulla media valle del Sele. Considerazioni generali sull'evoluzione geologica dei Monti Picentini (Appennino Meridionale)*. Boll. Soc. Geol. It., **77**, Roma.
- ARDIGÒ G. (1964). *Nuove vedute su alcuni problemi sedimentologici, morfologici e strutturali dell'Appennino Meridionale, con particolare riguardo al gruppo dei Monti Picentini (Campania)*. Boll. Soc. Geol. It., **83**, 1-35, 1 ff., 1 tav., Roma.
- AUTORITÀ BACINO REGIONALE IN DESTRA SELE (2008). *La tutela delle acque nel Parco Regionale dei Monti Picentini. Studio finalizzato alla caratterizzazione del bilancio idrico, alla determinazione del D.M.V. (deflusso minimo vitale) e del corpo idrico di riferimento dei bacini idrografici dei Fiumi Tusciano, Picentino e Fuorni*. Editrice Gaia, Angri (SA).
- AUTORITÀ DI BACINO DEL SARNO – REGIONE CAMPANIA (2008). *Indirizzi e azioni per la tutela della risorsa idrica e del paesaggio per il Parco Regionale e dei Monti Picentini*. Quaderni AdB – Lettere dal Tirreno n.7 – Anno V, Napoli.
- AUTORITÀ DI BACINO INTERREGIONALE DEL FIUME SELE (2006). *Modello di gestione della risorsa idrica nel Parco regionale dei Monti Picentini*. Napoli.

- BONARDI G., CIARCIA S., DI NOCERA S., MATANO F., SGROSSO I. & TORRE M. (2009). *Carta delle principali unità cinematiche dell'Appennino meridionale. Nota illustrativa*. Boll. Soc. Geol. It., **128**, 47-60, 2 ff., 1 pl. f.t., Roma.
- BONARDI G., D'ARGENIO B. & PERRONE V. (1988). Carta Geologica dell'Appennino Meridionale (scala 1:250.000). Mem. Soc. Geol. It., **41**, 1341, 1 tav., Roma.
- BUDETTA P. & DE RISO R. (1982). *Studio idrogeologico delle sorgenti della Conca di Acerno (Monti Picentini)*. Mem. e Note Ist. Geol. Appl., **16**, 7-27, Napoli.
- BUDETTA P., CELICO P., CORNIELLO A., DE RISO R., DUCCI D. & NICOTERA P. (1994). *Carta idrogeologica della Campania 1:200.000*. In: Atti IV Geoengineering International Congress: Soil and Groundwater Protection, Geda, 565-586, Torino.
- BUDETTA P., CELICO P., CORNIELLO A., DE RISO R., DUCCI D. & NICOTERA P. (1988). *Carta idrogeologica del F. 186 (S. Angelo dei Lombardi). Memoria Illustrativa*. Mem. Soc. Geol. It., **41**, 1029-1038, 2 ff., 1 tav., Roma.
- CAPALDI G., CINQUE A. & ROMANO P. (1988). *Ricostruzione di sequenze morfoevolutive nei Picentini meridionali (Campania, Appennino Meridionale)*. Suppl. Geogr. Fis. Dinam. Quat., **1**, 207-222, 14 ff., 3 tavv., 1 tab., Torino.
- CASSA PER IL MEZZOGIORNO. PROGETTO SPECIALE 29. *Tabella dati caratteristici delle sorgenti*. Lavoro inedito.
- CASSA PER IL MEZZOGIORNO. RIPARTIZIONE PROGETTI SPECIALI - DIVISIONE IV (1980). *Prospezione elettrica nella zona delle sorgenti Ausino (Acerno)*. Lavoro inedito.
- CELICO P. (1983). *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionale, Abruzzo, Molise e Campania)*. Quaderni CASMEZ, **4/2**, 1-225, Roma.
- CELICO P. & CIVITA M. (1976). *Sulla tettonica del massiccio del Cervialto (Campania) e le implicazioni idrogeologiche ad essa connesse*. Boll. Soc. Natur., **85**, 555-580, Napoli.
- CELICO P. (1988). *Prospezioni idrogeologiche*. Liguori Editore, Napoli.
- CELICO P., DE GENNARO M., FERRERI M., GHIARA M. R., STANZIONE D. & ZENONE F. (1979). *La composizione chimica ed isotopica delle acque sotterranee dell'alta valle del F. Sele in relazione all'idrodinamica delle falde*. Mem. e Note Ist. Geol. Appl., **15**, 1-40, Napoli.

- CELICO P., GUADAGNO F. M., LUISE G., TESCIONE M. & VALLARIO A. (1987). *Idrogeologia del Monte Polveracchio-Monte Raione (Monti Picentini - Campania)*. Mem. Soc. Geol. It., **37**, 341- 362, 10 ff., 8 tabb., 1 tav., Roma.
- CIARAPICA G. & PASSERI L. (1998). *Evoluzione paleogeografica degli Appennini*. Atti Tic. Sic. Terra **40**, 233-290, 13 figg., Pavia.
- CINQUE A. (1986). *Guida alle escursioni geomorfologiche (Penisola Sorrentina, Capri, Piana del Sele e Monti Picentini)*. Riunione annuale Gruppo Nazionale Geografia Fisica e Geomorfologia 9-12 giugno 1986 – Amalfi. Dip. Scienze della Terra, **33**, 1-119, Napoli.
- CIVITA M. (1973). *Proposte operative per la legenda delle carte idrogeologiche*. Boll. Soc. Natur., **82**, 3-11, 2 tavv., Napoli.
- CIVITA M. (2005). *Idrogeologia applicata e ambientale*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.
- CLERICI A & SFRATATO F. (2008). *Stima della conducibilità idraulica in ammassi rocciosi estimates of hydraulic conductivity in rock formations*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Special Issue **1**, 67-76, Valmontone (RM).
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE (1983). *Carta neotettonica dell'Italia Meridionale*. Pubblicazione del Progetto Finalizzato Geodinamica, **515**, Bari.
- CORNIELLO A. (1996). *Lineamenti idrogeochimici dei principali massicci carbonatici della Campania*. Mem. Soc. Geol. It., **51** (1), 333-342, sff, 3 tabb., Roma.
- CORNIELLO A., DUCCI D. & AQUINO A. (2010). *Hydrogeological map of the Monti Picentini Regional Park (southern Italy) at 1: 50.000 scale*. Boll. Geof. Teor. Appl., **51**, 325-343, Trieste.
- D'ARGENIO B., PESCATORE T. & SCANDONE P. (1975). *Structural pattern of the Campania-Lucania Apennines*. Quad. Ric. Sci., **90**, 313-327.
- DE CASTRO P. (1990). *Studies on the Triassic carbonates of the Salerno province (southern Italy): the Croci d'Acerno sequence*. Boll. Soc. Geol. It., **109**, 187-217, 2 ff., 2 tabb., 17 plate, Roma.

- DE RISO R. & LANDI L. (1998). *Progetto di captazione della sorgente Nuovo Olevano. Relazione geologica integrativa*. Lavoro inedito per conto del Consorzio Acquedotti Ausino, Cava dei Tirreni.
- DE RISO R. (1996). *Programma di indagini per la captazione della sorgente Nuova Olevano. Relazione geologica*. Lavoro inedito per conto della ex Casmez.
- DONATELLI M. & BELLOCCHI G. (2000). *New methods to estimate global solar radiation*. Proc. 3rd Int. Crop Science Conference, 17-22 August, Hamburg, Germany, 186.
- DRAGONI W. (1998). *Some considerations on climatic changes water resources and need in the Italian region south of the 43°N*. In: Water Environment and Society in Time of Climatic Change”. Issar A., Brown N. edidtor. Kluwer 241,271.
- DUCCI D. & TRANFAGLIA G. (2008). *Effects of climate chenge on groundwater resources in Campania (southern I taly)*. In Dragoni W . & S ukhija B. S . C limate C hange a nd groundwater Society, London, Special Publications, **288**, 25-38.
- ENVIRONMENTAL SIMULATIONS, INC (2007). *Guide to Using Groundwater Vistas Version 5*. Reinholds.
- FAGNANO M., ACUTIS M. & POSTIGLIONE L. (2001). *Valutazione di un metodo semplificato per il calcolo dell’ETP in Campania*. In: Eds L. Postiglione, A. Santini, M. Fagnano, “Modelli di agricoltura sostenibile per la pianura meridionale: gestione delle risorse idriche nelle pianure irrigue”, 8-16, Gutemberg, Salerno.
- FERRANTI L. & OLDOW, J.S. (1999). *History and tectonic implications of low-angle detachment faults and orogen-parallel extension, Picentini Mountains, Southern Apennines fold and thrust belt Italy*. Tectonics, **18**, 498-526, Washington.
- FERRANTI L. & PAPPONE G. (1992). *Nuovi dati sui rapporti tettonici tra i terreni lagonegesi e quelli della piattaforma carbonatica Campano-Lucana nei dintorni di Campagna (Salerno – Appennino Meridionale)*. Rend. Acc. Sc. Fis. e Mat., **59**, 103-119, Napoli.
- FERRANTI L. & PAPPONE G. (1995). *Thrust tectonics in the Picentini mountains, Southern Apennines, Italy*. Tectonophysics, **252**, 331-348, Amsterdam.

- FERRANTI L. (1993). *La grotta dello Scalandrone nel quadro dell'assetto strutturale e dell'evoluzione morfologica del massiccio dell'Accellica (Monti Picentini, Appennino meridionale)*. Le Grotte d'Italia, Istituto Italiano di Speleologia, **4**, 41-58, Bologna.
- FRANCANI V. & GATTINOMI P. (2009). *Effetti del cambiamento climatico sul rischio di esaurimento della sorgente Nossana (Bergamo)*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, **12**, 5-17, Valmontone (RM).
- GATTINOMI P. & FRANCANI V. (2009). *Depletion risk assessment of the Nossana Spring (Bergamo, Italy) based on the stochastic modeling of recharge*. Hydrogeology Journal **12**, 5-17, Valmontone (RM).
- GEOTEC SANNITA (2001). *Progetto esecutivo dei lavori di realizzazione dell'impianto elettrificazione rurale a vantaggio degli agglomerati e delle case sparse ubicate all'interno dei territori comunali di Acerno e di Montecorvino Rovella (SA). Sondaggi penetrometrici, prospezioni sismiche, carta geologica e schede geotecniche*. Lavoro inedito per conto per ENEL S.p.A. Salerno.
- HARGREAVES G. H. & SAMANI Z.A. (1982). *Estimating potential evapotranspiration*. Tech. Note, J. Irrig. Drain. Eng. ASCE, **108** (3), 223-230.
- HARGREAVES G.H., SAMANI Z.A. (1982). *Estimating potential evapotranspiration*. Tech. note, J. Irr. and Drain. Engrg., ASCE **109** (2), 277-278.
- IETTO A. (1965). *Su alcune particolari strutture connesse alla tettonica di sovrascorrimento dei Monti Picentini*. Boll. Soc. Natur., **74**, 65-85, Napoli.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA) (2001). *Global Network of Isotopes in Precipitation (GHNIP)*. Database di osservazioni meteorologiche ed isotopiche, Vienna.
- AGIP (1996). *Profilo del pozzo "Acerno 1"*. <http://unmig.sviluppoeconomico.gov.it>.
- IPPOLITO F., D'ARGENIO B., PESCATORE T. & SCANDONE P. (1975). *Structural stratigraphic units and tectonic framework of Southern Apennines*. In Squyres C. Ed., Geology of Italy, Earth Sci. Soc. Libyan Arab Republ. 317-328.
- ISPRA – ISTITUTO SUPERIORE PER LA PROTEZIONE E LA RICERCA AMBIENTALE (2009). *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 467 – Salerno*. A.T.I. – S.EL.CA. srl – L.A.C. srl – System srl, Firenze.

- ISPRA – ISTITUTO SUPERIORE PER LA PROTEZIONE E LA RICERCA AMBIENTALE. *Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 468 – Eboli*. In fase di stampa.
- KIRALY L., MATHEY B. & TRIPET J. P. (1971). *Fissuration et orientation des cavités souterraines: région de la Grotte de Milandre*. Bull. Soc. Nuechatoise Sc. Nat., **94**, 99-144.
- LEONE G. & MUSSI M. (2004). *Environmental isotopes in spring and well waters and undersea sulphurous outflows at Capo Palinuro, Salerno*. Geologia Tecnica ed Ambientale, **3**, 25-55, Roma.
- LEUCI G. (1999). *Il mammoth di Acerno*. Bollettino dei Musei Provinciali del Salernitano, **15**, 3-12, Salerno.
- LONGINELLI A. & SELMO E. (2003). *Isotopic composition of the precipitation in Italy: a first overall map*. Journal of Hydrology, **270**, 75-88, Amsterdam.
- LOUIS C. (1974). *Introduction à l'hydrologie des roches*. Bur Rech Geol. Min, **4/3**, 283-356.
- MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI – SERVIZIO IDROGRAFICO (1942) – *Le sorgenti italiane. Elenco e descrizione. Campania*. Pubblicazione, **7**, 1-745 pp., Roma.
- MOSTARDINI F. & MERLINI S. (1986). *Appennino centro meridionale. Sezioni geologiche e proposta di modello strutturale*. Mem. Soc. Geol. It., **35**, 177-202, 10ff., 2 tavv., 2 tabb., Roma.
- MUNNO R., PETROSINO P., ROMANO P., RUSSO ERMOLLI E. & JUVIGNÈ E. (2001). *A late middle pleistocene climatic cycle in southern Italy inferred from pollen analysis and tephrostratigraphy of the Acerno lacustrine succession*. Géographie physique et Quaternaire, **55** (1), 87-99, Montreal.
- ORTOLANI F. (1975). *Assetto strutturale dei Monti Picenti, della Valle del Sele e del gruppo di Monte Marzano-Monte Ognà (Appennino Meridionale). Implicazioni idrogeologiche*. Boll. Soc. Geol. It., **94**, 209-230, 3 ff., 1 tav., Roma.
- Ortolani F., De Gennaro M., Ferreri M., Ghiara M.R., Stanzione D. & Zenone F. (1981). *Prospettive geotermiche dell'Irpinia centrale (Appennino meridionale): Studio geologico-strutturale e geochimica*. Boll. Soc. Geol. It., **100**, 139-159, Roma.
- PARCO REGIONALE DEI MONTI PICENTINI (2008). *Carta idrogeologica del parco in scala 1:50.000*. S.EL.C.A., Firenze.

- PARCO REGIONALE DEI MONTI PICENTINI (2008). *Carta Uso del Suolo del parco in scala 1:25.000*. S.EL.C.A., Firenze.
- PARCO REGIONALE DEI MONTI PICENTINI (2008). *Memorie illustrative della carta idrogeologica del parco in scala 1:50.000*. S.EL.C.A., Firenze.
- PARCO REGIONALE DEI MONTI PICENTINI (2008). *Memorie illustrative della carta dell'Uso del Suolo in scala 1:25.000*. S.EL.C.A., Firenze.
- PARCO REGIONALE DEI MONTI PICENTINI (2009). *Carta de i Se ntieri. Sc ala 1: 25.000*. S.EL.C.A., Firenze.
- PATACCA E. & SCANDONE P. (2001). *Late thrust propagation and sedimentary response in the t hrust-belt-foredeep s system of the Sout hern Apennines (Pliocene-Pleistocene)*. I n: Vai G.B. & Martini I.P., Eds., *Anatomy of an Orogen: The Apennines and the Adjacent Mediterranean Basins*. Kluwer Academic Publishers, 401-440.
- PATACCA E. & SCANDONE P. (2007). *Geology of the Southern Apennines*. Boll. Soc. Geol. It., Spec. Issue **7**, 75-119, 14 ff., 1 pl., Roma.
- PATACCA E. (2007). *Stratigraphic constraints on the CROP-04 seismic line interpretation: San Fele 1, Monte Foi 1 and San Gregorio Magno 1 wells (Southern Apennines, Italy)*. Boll. Soc. Geol. It., Spec. Issue **7**, 185-239, 6 ff., Roma.
- PETROSINO M, BENNET F., D'ANGELO R., FIORILLO G., NAPOLI D., SAGGESE G., SANTO MAURO S. & SESSA V. (2008). *La riscoperta miniera di lignite di Acerno (M.ti Picentini, Salerno)*. In: *Atti VI Convegno Nazionale di Speleologia in cavità artificiali*. Opera Ipogea **1/2**, 267-272, Napoli.
- PISCOPO V., AQUINO S., GENCO S. & SCIUMANÒ E. (2001). *Sulla presenza di falde sospese nel rilievo carbonatico del Monte Accellica (Campania)*. Mem. Soc. Geol. It., **56**, 235-241, 6 ff., 6 tabb., Roma.
- PISCOPO V., CAVALLARO G., PACE G., VITIELLO P. & AQUINO S. (1993). *Schema idrogeologico de i Monti Accellica e Licicnici (Campania)*. Geol. Appl. e Idrogeologia, **28**, 611-617, Bari.
- PORRECA M. & MATTEI M. (2010). *Tectonic and e nvironmental evolution of Quaternary intramontane bas ins i n Sout hern Apennines (Italy): i nsights from palaeomagnetic and rock magnetic investigations*. Geophysical Journal International, **182**, 682-698.

- PORRECA M. & MATTEI M. (2011). *AMS fabric and tectonic evolution of Quaternary in tramontane extensional basins in the Picentini Mountains (southern Apennines, Italy)*. International Journal of Scienze della Terra (Geol. Rundsch), **101**, 863-877.
- PORRECA M., MATTEI M. & DI VINCENZO G. (2009). *Post-deformational growth of late diagenetic greigite*. Geophysical Research Letters, **36**, 1-6.
- PREZIOSI E. (2007). *Simulazioni numeriche di acquiferi carbonatici in aree corrugate: applicazioni al sistema idrogeologico della Valnerina (Italia Centrale)*. Quad. **125** del IRSA-CNR, 227, Roma.
- PULINA M. A. (1986). *L'evapostraspirazione potenziale in Sardegna in funzione dello studio del regime idrico dei suoli*. Studi sassaresi. Sezione 3, Annali della Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Sassari, **32**, 95-109, Sassari.
- RISORSA - REGIONE CAMPANIA (2001). *Isistemi di terre della regione Campania*. S.EL.CA., Firenze
- RUSSO ERMOLLI E. (2000). *Pollen analysis of the Averno palaeo-lacustrine succession (Middle Pleistocene, southern Italy)*. Geological Society, Special Publications, **181**, 151-159, London.
- RUSSO N., DEL PRETE S., GIULIVO I. & SANTO A. (a cura di) (2005). *Grotte e speleologia della Campania. Atlante delle cavità naturali*. Elio Sellino Editore, Avellino.
- SCANDONE P. & SGROSSO I. (1963). *Il mesozoico nel gruppo montuoso dell'Accellica (M. Picentini – Salerno)*. Mem. Soc. Geol. It., **4**, 1-8, Roma.
- SCESI L. & GATTINONI P. (2007). *La circolazione idrica negli ammassi rocciosi*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.
- SCESI L. & GATTINONI P. (2007). *Roughness control on hydraulic conductivity in fractured rocks*. Hydrogeology Journal, **15** (2), 201-211, Heidelberg.
- SCESI L. & SAIBENE L. (1986). *Valutazione della permeabilità di un ammasso roccioso tramite rilevamento geologico-strutturale*. Mem. Soc. Geol. It., **32**, 253-277, Roma.
- SCIUMANÒ E. & GENCO S. (2007). *La sorgente della Grotta dello Scalandrone in relazione alla presenza di falde sospese nel rilievo carbonatico di monte Accellica (M. Picentini, Salerno)*. In: Atti del I Convegno Regionale di Speleologia "Campania Speleologica", 279-287, Oliveto Citra, Salerno.

- SERVIZIO GEOLOGICO D'ITALIA (1970). *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Foglio 198 "Eboli"*. Roma.
- SOGEDSIUD (2005). *Regione Campania - Attuazione de ll'art. 44 de l D. Lgs 152/99 e s.i.m.: Piano di Tutela delle Acque*. Napoli
- STUDIO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA (1997). *Indagini sismiche a r iflessione per una ricerca d'acqua in localita "Masseria Giannatasio"*. Lavoro inedito.
- STUDIO GEOLOGIA TECNICA (2006). *Studio ge ologico-tecnico pe r i l P iano Urbanistico Comunale*. Lavoro inedito per c onto per dell'Amministrazione Comunale di Acerno (SA).
- THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R., (1957). *Instructions and t ables for computing potential e vapotranspiration and t he water balance* .Climatology, **10**, (3), 185-311, L a-boratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey.
- THORNTHWAITE C.W. & MATHER J.R (1955). *The water balance*. Climatology, **8**, (1), 5-86, Laboratory of Climatology, Drexel Institute of Technology, Centerton, New Jersey.
- THORNTHWAITE C.W. (1948). *An appr oach t oward a r ational c lassification of c limate*. Geologic. Rev., **38**, (1), 55-94.
- TURC L. (1954). *Le bilan d'eau des sols. Relations entre les précipitations, l'évaporation et l'écoulement*. Ann. Agron., **5**, 491-596, Paris.
- TURCO E. (1976). *La finestra tettonica di Campagna (M. Picentini, Salerno)*. Boll. Soc. Natur., **85**, 639-651, Napoli.
- UFFICIO IDROGRAFICO E MAREOGRAFICO DI NAPOLI - *Annali idrologici*. Istituto Poligrafico dello Stato, Roma.
- VITALE C. (2005). *L'evoluzione morfotettonica plio-quadernaria del sistema Golfo di Salerno-Piana del Sele-Monti Picentini (Appennino Meridionale)*. Tesi di dottorato, Università degli Studi Federico II di Napoli.
- VITTORINI S. (1971). *Ricerche sul clima della Toscana in base all'evapotraspirazione potenziale e bilancio idrico*. Riv. Geogr. It. **74**, Pisa.























Ringraziamenti

Si ringraziano l'Ing Giuseppe Vitagliano dell'Ausino S.p.a. - Servizi Idrici Integrati che ha messo a disposizione i dati acquisiti dall'Ente e ai tecnici per l'aiuto offerto per i sopralluoghi e misure effettuate presso le sorgenti.

Si ringraziano il dr. Sabino Aquino dell'Alto Calore Servizi e il dr. Gerardo Lombardi dell'Autorità di Bacino Regionale della Campania Sud per la gentile concessione dei dati acquisiti dall'Ente.

Tavola 1

Carta Idrogeologica

-  Complesso alluvionale - Permeabilità bassa
-  Complesso detrito - eluviale - Permeabilità bassa
-  Complesso fluvio-lacustre ghiaioso - Permeabilità alta
-  Complesso fluvio-lacustre limoso - Impermeabile
-  Complesso conglomeratico - Permeabilità bassa
-  Complesso calcareo - Permeabilità alta
-  Complesso calcareo dolomitico - Permeabilità media
-  Complesso dolomitico superiore - Permeabilità media
-  Complesso calcareo-marnoso - Impermeabile
-  Complesso dolomitico inferiore - Permeabilità bassa
-  Complesso lagonegrese - Impermeabile
-  Complesso Monte Croce - Permeabilità media
-  Sovrascorrimento
-  Faglia (a tratti se presunta o sepolta)
-  Giacitura degli strati
-  Spartiacque sotterraneo
-  Sorgente e numero relativo (cfr. Tab. 5.2)
-  Sorgente minore e numero relativo (cfr. Tab. 5.2)
-  Opera di presa
-  Direzione deflusso sotterraneo
-  Grotta carsica
-  Miniera di lignite

