

SCUOLA DOTTORALE IN GEOLOGIA DELL'AMBIENTE E DELLE RISORSE

XXIV CICLO

"MODELLAZIONE NUMERICA DEGLI ACQUIFERI FINALIZZATA ALLA VALUTAZIONE DEGLI SCAMBI IDRICI SOTTERRANEI TRA I MONTI LEPINI E LA PIANURA PONTINA"

Pamela Teoli A.A. 2011/2012

Tutor: prof. Roberto Mazza

Co-Tutor: prof. Aldo Fiori

Coordinatore: prof. Domenico Cosentino

Revisori:

prof Claudio Alimonti – Università "Sapienza" di Roma - Dip. Ingegneria Chimica Materiali Ambiente.

prof. Piero Barazzuoli – Università degli Studi di Siena – Dip. Scienze della Terra.





"MODELLAZIONE NUMERICA DEGLI ACQUIFERI FINALIZZATA ALLA VALUTAZIONE DEGLI SCAMBI IDRICI SOTTERRANEI TRA I MONTI LEPINI E LA PIANURA PONTINA"



Tutor: prof. Roberto Mazza* Co-Tutor: prof. Aldo Fiori**

Dottoranda: Pamela Teoli

* Laboratorio di Idrogeologia Numerica e Quantitativa. Dipartimento Scienze Geologiche -Università degli studi di Roma Tre

** Dipartimento Scienze dell'Ingegneria Civile - Università degli studi di Roma Tre

INDICE

1.	Ι	NTRO	DUZIONE	1
	1.1	OBIE	TTIVI DELLO STUDIO	1
	1.2	Met	DDOLOGIA DI LAVORO	2
2.	Ι	NQUA	DRAMENTO AMBIENTALE DELL'AREA DI STUDIO	
	2.1	Inqu	ADRAMENTO IDROLOGICO E CLIMATICO	
	2.2	Inqu	ADRAMENTO GEOLOGICO	
	2	.2.1	Aspetti geologici dei Monti Lepini	10
	2	.2.2	Aspetti tettonici dei Monti Lepini	13
	2	.2.3	Aspetti carsici dei Monti Lepini	
	2	.2.4	Assetto geologico della Pianura Pontina	23
	2.3	Inqu	ADRAMENTO IDROGEOLOGICO	
	2	.3.1	Campagne di misura sperimentali	
	2	.3.2	Assetto piezometrico dei Monti Lepini	
	2	.3.3	Parametri idrodinamici dell'area di studio	
	2	.3.4	Analisi e caratterizzazione delle sorgenti basali dei M. Lepini	37
	2	.3.5	Assetto piezometrico e chimico-fisico della falda multistrato della piana	
3.	S	CHEN	1A DI CIRCOLAZIONE DEGLI ACQUIFERI E BILANCIO IDROGEOLOGICO	
	3.1	Сом	PLESSI IDROGEOLOGICI E SCHEMA DI CIRCOLAZIONE	
	3	.1.1	Inquadramento generale	51
	3	.1.2	Il complesso dei calcari	51
	3	.1.3	Il complesso dei depositi vulcanici e travertinosi	54
	3	.1.4	Il complesso dei depositi argillo-sabbiosi	54
	3	.1.5	Schema di circolazione	54
	3.2	Defi	NIZIONE DEI LIMITI DELLE AREE DI ALIMENTAZIONE DEI GRUPPI SORGIVI BASALI	
	3.3	BILA	NCIO IDROGEOLOGICO DELL'AREA DI STUDIO	
	3	.3.1	Metodi e dati di base	
	3	.3.2	Parametri naturali del bilancio idrogeologico	59
	3	.3.3	Uso della risorsa idrica	
	3	.3.4	Sintesi del Bilancio	66
4.	N	10DE	LLO NUMERICO DI SIMULAZIONE	
	4.1	Moe	ELLO MATEMATICO	
	4.2	SCH	EMA DI RISOLUZIONE	69
	4.3	Pro	OCOLLO OPERATIVO	71
	4.4	MOD	ELLO CONCETTUALE DEI MONTI LEPINI E DELLA PIANURA PONTINA	
	4	.4.1	Criteri generali	74
	4	.4.2	Ipotesi di mezzo poroso equivalente e modello concettuale di studio	74

4.	5 SCEL	TA DEL CODICE DI CALCOLO	75
4.	6 Cost	RUZIONE DEL MODELLO	75
	4.6.1	Dominio del modello	75
	4.6.2	Parametri idrodinamici di modello	76
	4.6.3	Condizioni al contorno	78
	4.6.4	Ricarica	80
	4.6.5	Prelievi	81
4.	7 Cali	BRAZIONE	82
	4.7.1	Selezione dei target di calibrazione	83
	4.7.2	Natura e origine dell'incertezza	84
	4.7.3	Risultati di primo tentativo	86
	4.7.4	Risultati finali	88
5.	DISCU	SSIONI SUL MODELLO E CONCLUSIONI	96
5.	1 Cons	SIDERAZIONI GENERALI	96
5.	2 Anai	LISI DEI RISULTATI	96
6.	BIBLIC	OGRAFIA	98

1. Introduzione

1.1 Obiettivi dello studio

La presente tesi di dottorato è stata sviluppata nell'ambito del "Progetto Monti Lepini", svolto attraverso una collaborazione tra la Provincia di Latina e l'Università di Roma Tre (Laboratorio di Idrogeologia Numerica e Quantitativa del Dipartimento di Scienze Geologiche), il cui obiettivo è stato lo studio idrogeologico della risorsa idrica della dorsale carbonatica dei Monti Lepini e della adiacente Pianura Pontina, finalizzato all'elaborazione di un modello idrogeologico concettuale (Figura 1-1). Lo studio di dottorato è proseguito con l'implementazione di un modello numerico, basato sulla schematizzazione del modello idrogeologico concettuale suddetto. Lo scopo del modello numerico è quello di simulare il deflusso delle acque sotterranee e l'andamento della superficie piezometrica della Pianura Pontina, in particolare simulare il flusso dei principali gruppi sorgivi della dorsale carbonatica e definire le relative aree di ricarica.



Figura 1-1: Area di studio

1.2 Metodologia di Lavoro

L'area indagata è stata oggetto di innumerevoli studi (Conforto B., 1962; Mouton J., 1977; Sappa G. et al. 2007 (Pettitta, 1994, Boni et al. 1980, Celico et al. 1980, Celico P. 1983), che hanno riguardato l'idrogeologia quantitativa della dorsale lepina e della piana e cha hanno indagato anche gli scambi di circolazione con le idrostrutture limitrofe (quella vulcanica dei Colli Albani e quella alluvionale della Valle Latina). Tale interessamento è legato anche al fatto che questa area di studio costituisce uno degli acquiferi carsici più importanti del Lazio e funge da fonte di approvvigionamento idrico per alcuni comuni della Provincia di Latina di Roma e di Frosinone.

Gli studi più recenti (Petitta M., 1994; Celico F., 2002) hanno sviluppato dei modelli numerici alle differenze finite, ma che hanno riguardato solo la dorsale carbonatica.

In questa tesi, per la caratterizzazione idrogeologica e quindi per la definizione del modello concettuale di circolazione delle acque sotterranee, si è tenuto conto dei risultati dello studio del "Progetto M. Lepini" riguardanti la geologia strutturale, l'idrogeologia, la geochimica ed il calcolo di bilancio idrogeologico. Il modello numerico quindi si fonda su uno studio idrogeologico interdisciplinare in cui si è cercato di analizzare in dettaglio la compartimentazione idrogeologica della dorsale e l'assetto piezometrico della Pianura Pontina, per verificare attraverso il modello numerico il comportamento delle acque sotterranee che arrivano sulla pianura.

Particolare attenzione in questo studio è stata data all'assetto tettonico della dorsale, che determina effetti di compartimentazione (Sappa & Rossi, 2007) sui percorsi d'infiltrazione delle acque e sull'estensione delle aree di ricarica delle emergenze. Questa compartimentazione e quindi i bacini idrogeologici che ne sono derivati sono stati utilizzati all'interno del software Groundwater Vistas®5.41 (licenza ESI fornita al Laboratorio di idrogeologia di Roma Tre) che si basa sul codice di calcolo MODFLOW 2005, e su di essi sono stati fatte simulazioni verificando la corrispondenza dei volumi calcolati con i volumi delle portate delle sorgenti basali in uscita dal massiccio carbonatico dei Monti Lepini, per cercare di validare così le aree di ricarica delle sorgenti. Inoltre attraverso il modello numerico è stato possibile ricostruire la superficie piezometrica della Pianura Pontina, fortemente condizionata, nella zona sud, dal un complesso reticolo artificiale e dagli impianti di sollevamento (idrovore) che garantiscono la messa in sicurezza di un territorio altrimenti soggetto ad impaludamento..

2. Inquadramento ambientale dell'area di studio

2.1 Inquadramento idrologico e climatico

La dorsale dei Monti Lepini, fa parte della catena montuosa dei M. Volsci. Essa occupa una superficie in affioramento, di circa 576 km² e confina a NE con la Valle del Fiume Sacco, a NW con le pendici vulcaniche dei Colli Albani, a SE Con il fiume Amaseno e a SW con la Pianura Pontina. Si sviluppa in direzione NW-SE per una lunghezza di circa 20 Km e per una larghezza compresa fra i 25 e i 30 Km con quote variabili tra i 1000 e i 1536 m del Monte Semprevisa ed è costituita da una potente successione di rocce carbonatiche di età prevalentemente mesozoica (Accordi B., 1964; Accordi & Carbone, 1988; Alberti , et al., 1975; Cipollari & Cosentino, 1993; Giordano, Naso, & Trigari, 1997; Cosentino et al., 2002) dettagliatamente descritta nel paragrafo 2.2. Le condizioni climatiche dell'area sono state definite durante il "Progetto Monti Lepini" (Alimonti, Federici, & Gazzetti, 2011), ed è stata eseguita la spazializzazione delle piogge per il periodo di riferimento 2005-2009, a partire da una serie di dati pluviometrici forniti dla SIMN della Regione Lazio (Figura 2-1).



Figura 2-1: Stazioni di misure pluviometriche del SIMN

Nella Figura 2-1 sono riportate le stazioni pluviometriche del SIMN, ma solo per alcune di esse è stato possibile ricavare dati significativi, in quanto non tutte hanno avuto un tempo di funzionamento continuo e non tutte erano installate durante il periodo del lavoro. Questo problema si è verificato in modo particolare dopo la "riforma" del SIMN, a seguito della quale la competenza delle misure meteo-climatiche e della gestione (misura, raccolta datie ed elaborazione) delle suddette stazioni è stata trasferita all'ente regionale di competenza (DPCM 24/07/2002 "Trasferimento alle Regioni degli Uffici periferici del Dipartimento dei Servizi Tecnici Nazionali - Servizio Idrografico e Mareografico"). Pertanto alcune stazioni che appartenevano al distretto del SIMN di Napoli, sono state, con ritardo, prese in gestione dalla Regione Lazio, che quindi ha avuto delle stazioni non più funzionanti o delle stazioni con dei *gap* di misura temporale. La dorsale inoltre è stata sprovvista fino al 2009 di stazioni pluviometriche "in quota", infatti le uniche stazioni presenti erano quelle poste a quota inferiore di 700 m s.l.m. Per risalire quindi ai dati di pioggia

mancanti sono stati usati dei valori di precipiatazione misurati in stazioni gestite dal Dipartimento di Geologia dell'Università"Sapienza" di Roma. Correlando questi dati in quota pregressi, con quelli misurati dalle "nuove" stazioni che hanno misurato nel 2009-2010 è stato possibile ricavare delle mappe di spazializzazione delle piogge, su base mensile, attraverso un approccio geostatistico. La metodologia applicata per la spazializzazione delle precipitazioni utilizza il kriging in FAI-k (Wackernagel, 1995; Raspa & Bruno, 1994; Chilès & Delfiner, 1999) che ha validità in condizioni non stazionarie (che sono quelle più generali) e si presta bene ad essere resa automatica (Alimonti, Federici, & Gazzetti, 2011). Si riportano di seguito le spazializzazioni ottenute per gli anni di studio. Le precipitazioni cumulate per gli anni di osservazione presentano un range compreso tra i 800 mm e i 1315 mm di pioggia, con i valori massimi sempre nel quadrante SE del massiccio carbonatico, in corrispondenza del M.Semprevisa (1536 m s.l.m.), M.Sentinella (1100 m s.l.m.) e M. Caccume (1095 m s.l.m.). Gli anni 2006 e 2007 risultano essere i meno piovosi rispetto ai restanti anni, caratterizzati per il 2006 da una pioggia media di 917 mm/anno e per il 2007 da una pioggia media di circa 647 mm/anno .



Figura 2-2: precipitazioni totali(mm/anno)per l'anno 2005 e 2006



Figura 2-3: precipitazioni totali(mm/anno)per gli anni 2007 e 2008



Figura 2-4: precipitazioni totali(mm/anno)per gli anni 2009 e 2010

Un elemento caratterizzante la Pianura Pontina è la presenza di un fitto reticolo di canali artificiali, risultato della bonifica delle paludi pontine ultimata negli anni Trenta (Prampolini, 1939) che condiziona il drenaggio delle acque superficiali e il drenaggio delle acque sotterranee. Questo reticolo oltre a raccogliere le acque superficiali derivanti dal ruscellamento esso è sostanzialmente alimentato dalle acque sorgive che si riversano sulla pianura e proseguono il loro corso fino al mare (Ministero dei Lavori Pubblici, 1934).

Il Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino (CBAP) opera sul territorio gestendo i manufatti idraulici di cui è dotato il reticolo artificiale.

Manufatto idraulico	numero
idrovora	3
impianto di sollevamento irriguo	7
paratoie	56
sbarramento	16
briglia	11
traversa	2
tura in terra	10

Tabella 2-1: Manufatti idraulici del reticolo artificiale della Pianura Pontina

La gestione delle acque è finalizzata a soddisfare il fabbisogno irriguo della piana che corrisponde ad un volume di circa 46 Mm³/anno; la risorsa necessaria viene reperita mediante l'utilizzo di impianti di sollevamento e derivazioni gestite dal CBAP e attraverso l'utilizzo di una serie di pozzi per acqua, prevalentemente concentrarti nel settore settentrionale della Pianura Pontina, dove non è presente la rete irrigua del Consorzio (Alimonti, Federici, & Gazzetti, 2011).

Alcuni bacini idrografici della piana (circa 128 km²) (Figura 2-6), avendo una quota media rispetto al livello del mare che si attesta intorno ai -2 m sono drenati dalle idrovore. Le idrovore in questione sono: Gricilli, Striscia e Mazzocchio.

Il sollevamento delle acque, ad opera di questi ultimi manufatti idraulici, incide artificialmente sulla circolazione delle stesse sia superficiali e sia sotterranee. Il grafico a seguire (Figura 2-5) mostra i volumi medi sollevati dalle idrovore Striscia e Gricilli che il volume sollevato è rimasto pressoché costante nel quinquennio 2005-2009 nonostante l'apporto meteorico sia diminuito, ciò a dimostrazione del fatto che i canali di bonifica nei tratti a monte delle idrovore intercettano e drenano le acque sotterranee.

Per l'idrovora Mazzocchio si dispone di un solo dato annuale (1995) che per ipotesi, visto il comportamento delle altre idrovore si ritiene simile a quello degli anni 2005-2009. Questo volume corrisponde a 100,5 Mm³/anno.

Questi elementi artificiali saranno pertanto presi in considerazione nel bilancio idrogeologico dell'area di studio e di conseguenze è stata necessario eseguire una stima del quantitativo di acque che escono dal sistema attraverso le idrovore.



Figura 2-5: Volumi medi annui sollevati dalle idrovore Gricilli e Striscia

La stima dei volumi di acque sotterranee sollevate dalle idrovore prende spunto da uno studio recente (Alimonti, Perotto, Gazzetti, & Marinucci, 2007) attraverso il quale sono stati valutati i termini del bilancio idrogeologico relativi al bacino di scolo meccanico dell'Idrovora Mazzocchio e di conseguenze è stato valutato il contribuito delle acque sotterranee sollevate dall'idrovora. In sintesi partendo dall'equazione

$$\mathbf{Q}_{\mathrm{s}} = \mathbf{P} - \mathbf{E}\mathbf{v}\mathbf{r} - \mathbf{P}_{\mathrm{r}} + \mathbf{T}_{\mathrm{s}} + \mathbf{Q}_{\mathrm{e}}$$
 Eq. 2-1

Dove:

 Q_s = portate sollevate dall'impianto idrovoro

P = Precipitazioni

Evr = perdite per evaporazione ed evapotraspirazione

 P_r = volumi prelevati dal bacino

T_s = apporti di deflusso superficiale di acque sotterranee

Qe = apporti di acque superficiali da altri bacini

Nello studio quindi il volume T_s è stato calcolato dalla differenza della Q_s (nota) con le altri voci dell'Eq. 2-1. Il volume così dedotto corrisponde a 11,4 Mm³ nell'arco dell'anno 1995, ossia l'11.3% del volume totale sollevato dall'idrovora.

Il quantitativo di acque sotterranee, sollevato dalle Idrovore Gricilli e Striscia, ritenuto valido il rapporto Q_s/T_s del bacino dell'Idrovora Mazzocchio anche per i rispettivi due bacini di scolo meccanico delle altre due idrovore, è di seguito riportato nella Tabella 2-1:

Idrovora	Valore Qs Mm ³ (1995)	T_s calcolato Mm^3 (Alimonti,
		Federici, & Gazzetti, 2011)
Mazzocchio	100.5	11.4
Idrovora	Valore medio Qs Mm ³ (2005-	T_s stimato Mm^3
	2009)	
Gricilli	8.02	0.90626
Striscia	14.44	1.63172

Tabella 2-2: Sintesi dei volumi di T_s per le idrovore dell'area di studio



Figura 2-6: Elementi di idrologia dell'area di studio

Pertanto il volume delle acque sotterranee complessivo che si ipotizza esca tramite i sollevamenti delle idrovore, è pari a 0,44 m³/s. Questo valore di T_s è stato di seguito (4.7) utilizzato per il processo di calibrazione del modello.

2.2 Inquadramento geologico

2.2.1 Aspetti geologici dei Monti Lepini

La storia geologica della dorsale carbonatica può essere riassunta nei seguenti punti. Nel Mesozoico la piattaforma carbonatica è interessata da una serie di variazioni di profondità con locali emersioni testimoniate dalla presenza di dolomie bituminose sottilmente stratificate con resti di flora continentale e rari pesci (Cocozza & Praturlon, 1966). Nel Cretacico superiore inizia una intensa attività tettonica che conduce alla formazione di ambienti di scogliera e periscogliera tra Cori ed Artena e sedimenti di ambienti lagunari a bassa energia nei settori interni della dorsale (Carbone & Sirna, 1981). Dopo la lacuna paleogenica segue il contatto paraconcordante tra i depositi alto cretacici e le formazioni mioceniche, costituite da calcareniti organogene, calcari marnosi e depositi torbiditici argillosi-arenacei, che segnano il passaggio dei diversi settori del dominio di avampaese a quello di bacino di avanfossa e quindi di catena con fenomeni di sovrascorrimento, che portano la dorsale lepina ad accavallarsi verso NE sul flysch tortoniano della Valle Latina. La successiva evoluzione dell'area, che inizia nel Messiniano superiore-Pliocene inferiore, è determinata dall'instaurarsi di un regime distensivo che determina lo smembramento in sistemi di horst e graben di interi settori di catena. L'evoluzione recente della regione è caratterizzata da una intensa attività vulcanica, da esplosiva freatomagmatica a chimismo alcalino-potassico, che si imposta nelle aree depresse interessate da tettonica distensiva (Figura 2-7).



Figura 2-7: Schema geologico semplificato dell'area in esame; A)alluvioni antiche e recenti, depositi di versante; B) suoli e terre umifere, C) sedimenti lacustri e palustri, D) sabbie gialle eoliche, E) terre rosse e piroclastiti alterate, F) travertino, G) piroclastiti e lave, H) substrato carbonatico, I) traccia sezioni geologiche.

In particolare per la serie carbonatica di piattaforma, è stata elaborata una carta in scala 1:50.000 attraverso l'utilizzo di dati inediti e di dati bibliografici già presenti in letteratura; questa rilettura geologico-strutturale ha avuto lo scopo di porre in evidenza le formazioni geologiche che, per le loro caratteristiche litologiche, possono influenzare la circolazione idrica sotterranea della catena Lepina. Sono state evidenziate le formazioni dolomitiche, calcereo-dolomitiche e marnose del Cretacico (CCG1, DLA), le formazioni calcaree detritiche, cristalline, granulo-sostenute di margine e retromargine del Cretacico medio-superiore (RDOa, RDO, BICa, CS) e le formazioni calceree fango-sostenute ben stratificate del Cretacico (CCM, CCG, PUO, RDT, CP) (Figura 2-8).



Figura 2-8:Carta geologico-strutturale in scala 1:50.000 della dorsale carbonatica finalizzata all'assetto idrogeologico

La reinterpretazione di tali dati ha permesso di ricostruire la stratigrafia della serie carbonatica dei Monti Lepini in modo sufficientemente dettagliato per l'intera area di studio; lo spessore delle singole formazioni individuate è stato considerato costante e le sigle identificative utilizzate sono quelle dei termini carbonatici del progetto CARG (Figura 2-9).



Figura 2-9: Colonna stratigrafica tipo della dorsale carbonatica dei Monti Lepini: CCM: Calcari con Cladocoropsis e Clypeina, CCG1: Membro Dolomitico, CCG: Calcari ciclotemici a gasteropodi, CMS: Calcari e Marne a Salpingoporella Dinarica e Charophyta, PUO: Calcari di Serra del Pruno, DLA: Calcari ad Alveoline e Dolomie laminate, RDOa: Calcari detritici e calcari fango-sostenuti a nerinee, ostreidi e radiolitidi, RDO: Calcari a rudiste e orbitoline, BICa: Calcari bioclastici a radiolitidi e echinidi, RDT: Calcari a radiolitidi, CS: Calcare saccaroide, CP: Calcari dolomitici e calcari biancastri, SPT: Wackestone con spicole di spugna; calcareniti a Miogypsina globulina; calcareniti a Myogipsinoides sp. e calcari con orbulina, globigerina, globorotalia, CBL: Calcareniti, Calcari a losanga Auct. e Calcari a briozoi e litotamni Auct., MAO: Marne a Orbulina Auct., FL: Flysch di Frosinone Auct., S: Argille caotiche Auct. Complesso di Falvaterra Auct. della Valle Latina, C: Conglomerati poli- e monogenici.

La serie mio-pliocenica è caratterizzata essenzialmente dai depositi arenaceo-pelitici e argillosomarnosi (Fl: Flysch di Frosinone Auct., MAO), da termini calcarenitici (SPT, CBL), argillosi e conglomeratici (S e C) (Cosentino et al., 2002) (Figura 2-9). Il quaternario è dominato dai prodotti continentali, sia di natura vulcanica, rappresentati da piroclastici provenienti dal distretto vulcanico albano e dal distretto vulcanico ernico, sia di natura alluvionale di riempimento delle piane.

2.2.2 Aspetti tettonici dei Monti Lepini

La struttura dei Lepini è costituita da due unità tettoniche sovrapposte tra loro lungo l'allineamento Segni-Montelanico-Carpineto-Roccagorga (Figura 2-10). L'unità occidentale (UOC) è una monoclinale con immersione NE e con pendenze variabili e non superiori a 40° Essa è costituita da termini datati dal Giurassico inferiore al Miocene appartenenti alla successione carbonatica di

piattaforma Laziale Abruzzese. L'unità orientale (UOR) è costituita da una anticlinale con una ampia zona di cerniera, con strati circa orizzontali, che evolve a strati verticali, e localmente rovesciati, nel fronte di accavallamento dei termini carbonatici sui sedimenti terrigeni della Valle Latina. Tale unità è tettonicamente sovrapposta a quella occidentale attraverso il retroscorrimento Montelanico-Carpineto e rappresenta, alla scala regionale, una struttura a *pop-up*. Le due unità si collocano al tetto dell'unità dei sedimenti terrigeni terziari della Valle Latina dalla quale sono separate da una serie di piani di sovrascorrimento (Tallini, 1994).



Figura 2-10: Sezione tipo dei Monti Lepini orientata SW-NE; UOC: unità occidentale, UOR: unità orientale, UVL: unità della Valle Latina, Q: depositi quaternari, a) faglia, b) sovrascorrimento, A) depositi quaternari, B) substrato carbonatico.

Le sezioni geologiche Figura 2-11 evidenziano i motivi tettonici e litostratigrafici della dorsale lepina ed in particolare:

L'unità occidentale è caratterizzata da un fitto reticolo di faglie normali di direzione appenninica ed antiappenninica che hanno disarticolato il preesistente edificio a pieghe e sovrascorrimenti e generato l'attuale assetto strutturale composto da blocchi che hanno subito movimenti verticali differenziati e rigetti localmente superiori ai 1000 metri. I sistemi di faglie normali comprendono segmenti a direzione NW-SE, NE-SW, subordinatamente N-S ed E-W, individuando famiglie di piani caratterizzate da inclinazioni ed orientazioni variabili. In particolare le faglie a più basso angolo risultano dislocate da quelle ad alto angolo sviluppatesi successivamente.

- L'unità orientale è caratterizzata sia da faglie ad andamento appenninico e antiappenninico sia da sistemi di sovrascorrimento. I sovrascorrimenti presentano direzioni appenniniche e ad essi si associano ampie anticlinali disarticolate in una serie di monoclinali che danno origine a strutture minori, a vergenza normale e localmente retrovergenti. I piani di sovrascorrimento presentano mediamente angoli di inclinazione relativamente bassi, nell'ordine di 10°-30°, con geometrie di tipo *flat-ramp* e zone di deformazione con spessori nell'ordine dei 100 metri. Il principale elemento compressivo di tale unità è costituito dal sovrascorrimento dei Lepini che è localizzato al contatto tra le formazioni carbonatiche e le formazioni terrigene della Valle Latina. Questo contatto è generalmente "coperto" dai depositi quaternari recenti, ma nel complesso presenta una continuità quasi ininterrotta lungo tutto il fronte orientale della catena. Alcuni elementi trasversali a direzione N-S e NNE-SSW determinano l'interruzione dei principali piani di sovrascorrimento rigettando orizzontalmente le strutture compressive sia in senso destro sia sinistro.
- Le due unità risultano divise da una linea tettonica a direzione appenninica ed immergente a NE, nota con il nome di linea Carpineto-Montelanico, interpretata come piano di retroscorrimento. La struttura retrovergente ha una continuità di circa 20 km (da Segni a Roccagorga) e i rigetti segnalati sono di circa 700 m. Al piano principale di retroscorrimento si accompagnano, verso Est, piani inversi secondari ed un elemento molto comune nelle aree al tetto del retroscorrimento sono le faglie dirette ad andamento appenninico con pendenze intorno ai 60°.



Figura 2-11: Sezioni geologiche della dorsale carbonatica dei Monti Lepini; 1: depositi quaternari, 2: S, 3: FL, 4: CBL, 5: CP, 6: CS, 7: RDT, 8: DLA, 9: PUO, 10: CMS, 11: CCG, 12: CCG1, 13: CCM, in rosso: elementi tettonici.

2.2.2.1 Assetto litostratigrafico

Come è stato detto in precedenza, nella carta di Figura 2-8sono state messe in evidenza due formazioni dolomitiche quella del Cenomaniano medio-superiore spessa 300 m e denominata DLA (Calcari ad alveoline e dolomie laminate) e quella del Berriasiano p.p. spessa 100 m e denominata Membro dolomitico. Negli schemi di Figura 2-12 e di Figura 2-13 sono riportate rispettivamente le isobate del tetto di DLA e di CCG1, formazioni che si ritiene abbiano un comportamento da acquitardi se non da acquicludi e che quindi s ritiene possano giocare un ruolo fondamentale nei confronti dalla circolazione idrica sotterranea.

La Figura 2-12 consente di formulare le seguenti osservazioni:

- nel settore NW, compreso tra i territori di Artena e Cori, i termini dolomitici cenomaniani sono completamente assenti poiché sostituiti in eteropia da formazioni estremamente permeabili, quali la RDO e la RDOa. In questa zona aumenterebbe lo spessore dell'acquifero e il coefficiente di infiltrazione efficace.
- La dorsale lepina è caratterizzata da una serie di horst e graben che la disarticolano. I principali horst sono rappresentati dall'allineamento Norma Bassiano Roccagorga che si sviluppa in direzione NW-SE, l'allineamento Costa Lucini Monte Lupone in direzione NE-SW e dall'area di Monte Salerio ad W di Patrica. I principali settori ribassati della

catena sono rappresentati dall'allineamento Carpineto – Montelanico – Segni caratterizzato da una depressione delle isobate piuttosto pronunciata, con direzione NW-SE e con quote decrescenti verso N, la fascia pedemontana compresa tra Sermoneta, Sezze e Priverno e il settore N di Norma dove è presente un graben allungato in direzione antiappenninica e confinato tra gli alto-strutturali di Monte Lupone e di Norma con rigetti nell'ordine del migliaio di metri (Figura 2-12)

 Lungo la fascia pedemontana da Sermoneta a Priverno la formazione cenomaniana a bassa permeabilità è compresa tra 0 e 200 m s.l.m..



Figura 2-12: Carta delle isobate delle dolomie del Cenomaniano (DLA); A-Gruppo sorgivo Ninfa, B-Gruppo sorgivo Cavata e gruppo sorgivo Cavatella, C-gruppo sorgivo Sardellane, D-Gruppo sorgivo Laghi del Vescovo

Figura 2-13 consente di formulare le seguenti osservazioni:

- sono confermate le caratteristiche ad horst e graben della struttura carbonatica.
- Il settore N è costituito da una serie di blocchi che hanno subito movimenti verticali dando origine a rigetti di circa 300-500 m e quote assolute di CCG1 evidenziate dalle isobate comprese tra -200 m slm e 200 m slm.

Il graben del settore N di Norma presenta quote del tetto della formazione CCG1 comprese tra 0 e 200 m slm decrescenti verso Norma e la sorgente di Ninfa.



Figura 2-13: Carta delle isobate delle dolomie del Berriasiano (CCG1). A-Gruppo sorgivo Ninfa, B-Gruppo sorgivo Cavata e gruppo sorgivo Cavatella, C-gruppo sorgivo Sardellane, D-Gruppo sorgivo Laghi del Vescovo

Al fine di evidenziare i principali elementi tettonici che dislocano la struttura dei Monti Lepini e che possono influenzare la circolazione idrica sotterranea è stata realizzata una Carta dei principali elementi tettonici Figura 2-14 in cui sono presenti tutti gli elementi che soddisfano i seguenti criteri:

- entità del rigetto delle faglie maggiore di 200 m corrispondente allo spessore medio delle formazioni meno permeabili;
- lunghezza minima delle faglie maggiore di 1000 m.

Inoltre sono presenti le faglie trascorrenti principali.

Dall'analisi della Figura 2-14 si individuano quattro sistemi di faglie prevalenti: il sistema ad andamento appenninico, antiappenninico, N-S ed E-W.

Al sistema appenninico appartengono faglie normali prevalentemente a direzione N120°-N150°, con inclinazione media compresa tra i 60° ed i 80° che ribassano verso SW e NE l'intero edificio strutturale. Localmente la connessione tra faglie contigue si realizza attraverso strutture con direzione media di N60° che agiscono come faglie di trasferimento. A questa famiglia appartengono anche i principali elementi compressivi presenti nel settore orientale della catena.

Si riportano come esempio i diagrammi di separazione stratigrafica delle faglie distensive principali Figura 2-15.



Figura 2-14: Carta dei principali elementi tettonici; A-Ninfa, B-Sermoneta, C-Sardellane, D-Laghi del Vescovo

I diagrammi di separazione stratigrafica rappresentano il rigetto delle due principali faglie distensive ad andamento appenninico del settore N dei Monti lepini: la faglia di Rocca Massima (a) e la faglia di Cori (b). i diagrammi sono stati costruiti confrontando le formazioni affioranti al tetto della faglia con le formazioni affioranti al letto. La faglia (a) presenta un rigetto fortemente variabile lungo il suo decorso, infatti procedendo da SE verso NW si nota che il rigetto tende a rimanere costante per poi annullarsi nel settore centrale, fenomeno legato all'intersezione con una faglia ad alto angolo che ne varia l'immersione. A N la faglia sviluppa rigetti notevoli con la tendenza ad annullarsi sotto i depositi vulcanici albani. La faglia (b) mostra un rigetto costantemente superiore a 500 metri per tutto il tratto in affioramento.



Figura 2-15: Diagrammi di separazione stratigrafica per le faglie normali ad andamento appenninico, a) faglia a N di Rocca Massima, b) faglia a N di Cori

Il sistema ad andamento antiappenninico è costituito sia da faglie normali che trascorrenti. Le faglie normali presentano una direzione variabile tra N40° e N60° e angoli di inclinazione molto alti, talora subverticali, con immersione verso SE e NW. Si osservano anche cinematiche trascorrenti di tipo sinistro per la faglia orientata N50° e con inclinazione di 60°-90°di di Costa Lucini – Monte Lupone e destre nel settore compreso tra Artena e Segni.

Le faglie appartenenti al sistema N-S ed E-W caratterizzano principalmente il settore N dei Monti Lepini, presentano angoli di inclinazione molto alti generalmente superiori agli 80° e mostrano rigetti limitati, mediamente al di sotto dei 100 metri. Come per altri settori della dorsale lepinaausona, al sistema N-S è attribuita (Tallini, 1994). Gran parte della tettonica recente, mentre il sistema appenninico è responsabile del ribassamento plio-quaternario SW immergente delle dorsali carbonatiche relazionato alla formazione del margine tirrenico.

I sistemi di faglie normali descritti sono organizzati in horst e graben. Gli alti strutturali più evidenti sono quello della dorsale Costa Lucini - Monte della Noce – Monte Erdigheta, formato da faglie normali con direzione N120°-N130° ed inclinazione media di 70° e da faglie normali e transtensive sinistre con direzione N50° e quello della monoclinale del Monte Semprevisa.

La Figura 2-16 riassume l'assetto tettonico della dorsale e mostra le direzioni delle faglie in funzione della loro frequenza tramite diagrammi a rosa a partire da una griglia a maglia quadrata di lato 5 Km.



Figura 2-16: Carta delle direzioni prevalenti delle faglie. A-Gruppo sorgivo Ninfa, B-Gruppo sorgivo Cavata e gruppo sorgivo Cavatella, C-gruppo sorgivo Sardellane, D-Gruppo sorgivo Laghi del Vescovo

La distribuzione spaziale delle faglie (Figura 2-16) consente di formulare le seguenti osservazioni:

- il settore NW è dominato da sistemi di faglie a direzione appenninica e antiappenninica che prevalgono sui sistemi N-S (questo ultimo è visibile all'estremo N della carta, presso Artena); spostandosi verso E invece prevale la componente NW-SE e localmente, nei pressi dell'area di recapito di Ninfa, prevale la componente NE-SW legata essenzialmente alla tettonica trascorrente dell'allineamento Costa Lucini Monte Lupone.
- Il settore centrale e SW è caratterizzato prevalentemente dalla componente appenninica rappresentata dalle importanti faglie normali che bordano il massiccio del Monte Semprevisa.
- Il settore SW è contraddistinto dalla componente appenninica e subordinatamente da quella NE-SW a formare un fitto reticolo di faglie verticali e tra loro perpendicolari; tale situazione si riscontra prevalentemente presso Priverno.
- Il settore SE è caratterizzato da faglie orientate sia NW-SE che NE-SW in quantità circa equivalenti; da non considerare il diagramma a rosa della maglia del Monte Caccume in quanto caratterizzato da sovrascorrimenti suborizzontali.

2.2.3 Aspetti carsici dei Monti Lepini

La dorsale carbonatica dei M. Lepini è una dorsale fortemente carsificata che presenta un carsismo sia nella parte emersa che nella parte ribassata (Boni C. et al.,1980).

A evidenziare la presenza di carsismo nella parte ribassata sono una serie di sondaggi realizzati sia sulla dorsale e sia sulla pianura, la maggior parte eseguiti durante i lavori svolti dalla Cassa per il Mezzogiorno negli anni Sessanta e Settanta (Conforto, Di Riccio, & Sappa, 1962; Cassa per il Mezzogiorno, 1979). Durante questo studio sono stati reperiti ulteriori sondaggi eseguiti dalla regione (Boni,1996) di cui si riporta l'ubicazione, dalla cui stratigrafia si individuano cavità ad una profondità a circa -100 m s.l.m.



Figura 2-17: Nuove stratigrafie reperite nell'area "Sardellane"

Sono state censite le grotte carsiche presenti sulla dorsale, in particolare quelle con profondità di almeno 50 m e con sviluppo planimetrico di almeno100 m (Regione Lazio- Assessore all'ambiente, 2003). Come si può osservare in Figura 2-18 c'è una addensamento di cavità principali in corrispondenza della zona centrale del massiccio, questo rappresenta un'ulteriore distinzione, congiuntamente a quando detto sullo stato tettonico della dorsale (§ 2.2.2) dello stato di fratturazione e di carsismo che sarà poi considerato in fase di definizione del schema di circolazione dell'area di studio.



Figura 2-18: Mappa delle cavità carsiche principali dei M. Lepini

2.2.4 Assetto geologico della Pianura Pontina

La Pianura Pontina si sviluppa in direzione NW-SE per una lunghezza di circa 50 Km ed una larghezza di circa 20 Km con quote variabili tra i pochi metri s.l.m. fino a 35-50 m nei pressi della città di Latina.

La piana è il risultato della tettonica distensiva che ha interessato questo settore a partire dal Pliocene producendo un reticolo di faglie dirette ad alto angolo che ha dislocato e ribassato la struttura dei Monti Lepini (Mouton, 1977, Boni et al., 1980).

La piana è colmata da depositi quaternari di ambiente marino, lacustre e continentale litologicamente costituiti da alternanze lenticolari di argille, argille sabbiose, sabbia e ghiaia e verso l'alto da livelli travertinosi e torbosi (Barbieri et al., 1999).

Le sezioni geologiche di Figura 2-19 di Figura 2-20 e di Figura 2-21 ricostruiscono i complessi rapporti geometrici tra le varie litologie di riempimento della Pianura Pontina. In particolare tali depositi sono stati raggruppati in *complessi* in funzione della granulometria e della loro origine:

- Complesso dei suoli e delle terre umifere
- Complesso dei travertini

- Complesso dei detriti di versante.
- Complesso dei depositi piroclastici dell'area albana: costituito da una sequenza di depositi vulcanici, fluviali, lacustri e travertini.
- Complesso indifferenziato olocenico e pleistocenico di origine fluvio-lacustre: costituito da varie litologie raggruppabili in sub-complesso delle Sabbie quarzose rossastre, con orizzonti torbosi e argillo-limosi, a luoghi intercalate con banchi travertinosi; sub-complesso delle argille-limose, limi-argillosi, con livelli torbosi, a luoghi intercalate con banchi travertinosi; sub-complesso delle argille-limose e depositi francamente lacustri con livelli torbosi (Brunamonte & Serangeli, 1996; Serva & Brunamonte, 2007).
- Complesso dei depositi marini del Pliocene sup. Pleistocene medio: costituito dai subcomplessi delle Sabbie, con livelli argilloso-limosi, sabbioso-limosi talora cementati, subcomplesso delle argille, sub-complesso delle Sabbie e argille, sub-complesso delle Sabbie e ghiaie di ambiente costiero-salmastro, sub-complesso dei Calcari detritici "Macco", subcomplesso delle Ghiaie.
- Complesso dei depositi carbonatici mesozoici



Figura 2-19: Sezione geologica della Pianura Pontina passante per il gruppo sorgivo Laghi del Vescovo; 1: complesso dei detriti di versante, 2: complesso indifferenziato, 3: sub-complesso delle Sabbie, con livelli argilloso-limosi, sabbioso-limosi talora cementati, 4: sub-complesso delle argille, 5: sub-complesso delle Sabbie e argille, 6: sub-complesso delle Sabbie e ghiaie di ambiente costiero-salmastro, 7: sub-complesso dei Calcari detritici "Macco", 8: sub-complesso delle Ghiaie, 9: substrato carbonatico (da dati gravimetrici). a: falda libera, b: falda in pressione, c: sorgente, d: direzione prevalente flusso idrico sotterraneo, e: direzione fluidi gassosi di risalita. In rosso elementi tettonici presunti.



Figura 2-20: sezione geologica della Pianura Pontina passante per la sorgente di Ninfa; 1: complesso delle piroclastiti, 2: sub-complesso delle sabbie, con livelli argilloso-limosi, sabbioso-limosi talora cementati (complesso indifferenziato), 3: banchi di travertino, 4: substrato carbonatico (da dati geoelettrici). a: falda libera, b:valore delle resistività, c: elementi tettonici presunti.

L'andamento del substrato è stato ricostruito attraverso i numerosi sondaggi geognostici profondi e le indagini geofisiche (Mouton, 1977, Di Filippo e Toro, 1980) evidenziando una struttura a graben allungata in direzione prevalentemente appenninica. Le indagini gravimetriche evidenziano una zona di anomalia negativa, corrispondente ad una zona depressa del substrato carbonatico, lungo l'allineamento Cisterna di Latina – San Donato ed una zona di anomalia positiva lungo l'allineamento Fogliano – Circeo, corrispondente ad una zona di alto strutturale del substrato. Le indagini geoelettriche e microgravimetriche (CMP, 1968; Di Filippo & Toro, 1980; Capelli et al., 2002), condotte nel settore pedemontano della piana, evidenziano un substrato articolato con zone di basso strutturale seguite da zone di alto (Figura 2-14) di cui la più significativa è in corrispondenza della migliara 41 nei pressi della località Tor tre ponti. Tale situazione è ben evidenziata dalla sezione geologica di Figura 2-21



Figura 2-21: sezione geologica della Pianura Pontina parallela alla via Appia. 1: Complesso dei suoli e delle terre nere umifere; 2: Complesso dei depositi piroclastici dell'area albana; 3: Complesso dei travertini; 4: sub-complesso delle argille-limose, limi-argillosi, con livelli torbosi, a luoghi intercalate con banchi travertinosi; 5: sub-complesso delle argille-limose e depositi francamente lacustri con livelli torbosi; 6: sub-complesso delle Sabbie e ghiaie di ambiente costiero-salmastro; 7: sub-complesso delle argille; 8: Complesso dei depositi carbonatici mesozoici



Figura 2-22: Isobate del tetto dei calcari in Pianura Pontina

Per valutare l'entità areale e l'entità dello spessore delle formazioni piroclastiche nella parte settentrionale NW dell'area di studio, sono state analizzate diverse stratigrafie reperite durante questo studio (dati ISPRA – dB L.464/84, dB del laboratorio di idrogeologia di Roma Tre; dB della Provincia di Latina). Il risultato è quello in Figura 2-23. Tale carta, costruita partendo da una carta già realizzata in precedenti studi (Rosa, 1995), evidenzia che lo spessore delle vulcaniti che ricadono nell'area di studio varia da uno spessore di circa 200 m rilevato nei pressi di Artena-Giulianello fino ad uno spessore di 10 m nella zona di Latina-Latina Scalo. Questo prodotto ha permesso di definire, come verrà spiegato più avanti, le aree a diversa conducibilità idraulica nel modello numerico.



Figura 2-23: Isopache delle vulcaniti presenti nel distretto vulcanico dei Colli Albani

2.3 Inquadramento idrogeologico

2.3.1 Campagne di misura sperimentali

La caratterizzazione idrogeologica dell'area di studio si basa sull'assetto piezometrico, su parametri idrodinamici degli acquiferi, sull'analisi geostatica dei dati chimico-fisici delle acque sotterranee e sull'assetto stratigrafico. L'assetto piezometrico dell'area è stato studiato mediante quattro campagne di rilevamento idrogeologico che hanno riguardato pozzi perforati nei depositi quaternari della Pianura Pontina e pozzi perforati nei calcari, ma in numero tale da non poter ricostruire la superficie piezometrica dell'intera falda dei calcari, ma solo parte SO della dorsale carbonatica ossia tra Sezze e Priverno. In questa zona sono stati utilizzati dei dati piezometrici ricavati da alcune stazioni di misura gestite dal SIMN della Regione Lazio, che ha installato questi nuovi strumenti in concomitanza del "Progetto M. Lepini". Pertanto per la falda che caratterizza l'intera dorsale si è fatto riferimento a ricostruzioni realizzate da altri autori, basate su dati sperimentali rilevati negli anni Settanta che verranno di seguito riportati.

Le campagne di rilevamento hanno riguardato misure piezometriche e misure delle caratteristiche chimico-fisiche, e sono state eseguite nei seguenti periodi:

- 1°campagna: febbraio giugno 2008
- 2° campagna: settembre novembre 2008
- 3° campagna: febbraio aprile 2009
- 4° campagna: giugno luglio 2009

Il motivo della ripetizione stagionale dei rilievi, più che alla definizione del regime dei valori osservati, è connesso al tentativo di ridurre l'errore dovuto alle casualità che questo tipo di rilevamento comporta utilizzando pozzi privati. In effetti il monitoraggio dovrebbe riguardare fori rappresentativi di specifici domini acquiferi e misurati sempre nelle stesse condizioni. Non sussistendo tali circostanze ci si è trovati costretti a utilizzare perforazioni private, legate all'idroesigenza del territorio, in situazioni idrodinamiche casuali.

La prima campagna di rilevamento idrogeologico si riferisce ad una area che riguarda l'intera fascia bordiera dell'Unità Idrogeologica dei Monti Lepini e parte della dorsale carbonatica tra Sezze e Priverno. Lo scopo di questa campagna, con la suddetta estensione, è stato quello di fornire un quadro riassuntivo dell'intera situazione al contorno della struttura come è stato fatto anche in passato (Celico et al, 1980).

La seconda e la terza campagna di rilevamento piezometrico hanno riguardato la Pianura Pontina e il settore orientale dei Colli Albani.

Nella quarta, il rilevamento è stato esteso anche alla fascia posta tra il F. Sisto e la costa.

Le misure piezometriche sono state condotte sempre, laddove possibile, sugli stessi pozzi. Quando non è stato possibile l'accesso ai fori misurati precedentemente, si è cercato di individuare nel loro intorno altri punti di rilevamento caratterizzati da medesime caratteristiche costruttive.

Negli istogrammi della Figura 2-24 e della Figura 2-25 si può osservare che il numero e le profondità mediane dei pozzi misurati nelle quattro campagne sono confrontabili, a testimonianza dell'idoneità dei punti di monitoraggio utilizzati nelle diverse fasi di rilevamento idrogeologico.



Figura 2-24: confronto del numero dei pozzi rilevati nel corso delle quattro campagne



Figura 2-25: valore mediano delle profondità dei pozzi rilevati nelle quattro campagne

Anche dal punto di vista dell'uso per cui questi fori sono stati eseguiti, si nota l'analogia delle diverse classi di utilizzo dei fori misurati nelle diverse campagne (Figura 2-26).



Figura 2-26: tipologia di utilizzo dei pozzi rilevati nelle quattro campagne

2.3.2 Assetto piezometrico dei Monti Lepini

Come già detto precedentemente per l'assetto piezometrico dell'intera dorsale dei Monti Lepini si fa riferimento a studi pregressi (Mouton, J., 1977) la cui rappresentazione è riportata nell'immagine di Figura 1-27. In essa, oltre a distinguersi due direzioni di drenaggio verso il generico settore dove

sono disposti i gruppi sorgivi (descritti nel dettaglio nel paragrafo 2.3.4), si evidenzia anche il confinamento della falda nel settore pedemontano (zona campita in grigio) in quanto le linee isopiezometriche segnano un livello di carico superiore al tetto dei calcari ribassati nella zona in esame (*Figura 2-28*). Nella *Figura 2-28* è riportato il confronto della piezometria della falda nei calcari, relativamente al settore Sezze e Priverno, elaborata durante questo studio, con la vecchia piezometria. Emerge per il settore carbonatico prossimo alla fascia pedemontana un abbassamento della superficie piezometrica e una variazione del gradiente piezometrico in particolare nei pressi di Sezze, a seguito di un aumento dei prelievi da pozzo. Questa ipotesi deriva da considerazioni fatte sull'analisi dei volumi emunti per scopi acquedottistici nell'area in esame (prelievi dal campo pozzi Sardellane), infatti in questa zona dagli anni Settanta ad oggi il prelievo è aumentato in particolare il prelievo di 900 l/s.



Figura 2-27: Carta piezometrica della falda dei calcari da Mouton, J. 1977



Figura 2-28: Confronto tra le linee isopiezometriche dei calcari riferite agli anni Settanta e quelle nei calcari relative alle ultime campagne 2008-2009 per la zona di Sezze-Priverno

2.3.3 Parametri idrodinamici dell'area di studio

Su quest'area sono state condotte diverse prove di portata per stimare i parametri idrodinamici degli acquiferi. L'attenzione verso questi parametri è legata al grande interesse, da parte degli enti di gestione della risorsa idrica, nell'individuare delle aree che potessero e possano fornire una più alta produttività in cui sia conveniente fare pozzi per prelevare acqua. Durante questo lavoro triennale si è ritenuto utile condurre un'analisi per definire i valori di riferimento dei parametri idrodinamici che saranno utilizzati per la schematizzazione del comportamento idrogeologico che verrà analizzato nei capitoli relativi all'implementazione del modello numerico (§4).

Relativamente ai calcari i parametri idrodinamici analizzati sono quelli ricavati dai seguenti documenti tecnici:

- Prove di portata eseguite negli anni Settanta dalla Cassa per il Mezzogiorno su perforazioni che hanno interessato i carbonati (Mouton, J., 1977);
Prove di portata eseguite nel 2003 per conto della Regione Lazio a completamento dei progetti 29/280 - 29/282 che hanno riguardato lo schema idrico dei M. Lepini in relazione a nuove captazioni da realizzare sulla dorsale carbonatica (Boni, 1996)



Figura 2-29: Ubicazione dei pozzi con parametri idrodinamici

I punti riportati in Figura 2-29 rappresentano i pozzi nei calcari, nei quali sono state condotte prove di portata e nella Tabella 2-4 sono riportati i dati idrodinamici ricavati (trasmissività T m^2/s , conducibilità idraulica K m/s, coefficiente di immagazzinamento S).

Raggruppando i pozzi in funzione della loro ubicazione abbiamo i seguenti intervalli di variabilità della trasmissività:

GRUPPO	T media (m ² /s)	T min (m^2/s)	T max (m^2/s)
Gruppo 1	0.033315	0.00009	0.15
Gruppo 2	0.269334	0.02994	0.73232
Gruppo 3	0.079077	0.00065	0.46

Tabella 2-3: intervallo di variabilità della trasmissività dei calcari

Da questa tabella si può dedurre che il valore maggiore di trasmissività si ha nella fascia bordiera della dorsale, in corrispondenza della zona dove è presente uno dei principali gruppi sorgivi dell'area di studi (gruppo sorgivo "Sardellane") (§ 2.3.4).

Per caratterizzare i parametri idrodinamici dell'acquifero della Pianura Pontina si è fatto riferimento ai dati bibliografici delle prove eseguite negli anni Settanta dalla Cassa per il Mezzogiorno (Mouton, J., 1977) in cui nella parte vulcanica dei Colli Albani si definisce una trasmissività generalmente bassa (meno $1*10^{-3}$ m²/s), nell'area più travertinosa la trasmissitvità è più elevata di $5*10^{-3}$ m²/s, per poi aumentare ancora lungo alcuni dreni dei Colli Albani (più di $1*10^2$ m²/s.

Mediamente, nella parte settentrionale della Pianura Pontina, dove sono presenti formazioni vulcaniche e travertinose, è attribuita una permeabilità media dell'ordine di $5*10^{-5}$ m/s $1*10^{-4}$ m/s.

Nella parte meriodale della pianura in cui sono presenti formazioni argillo-sabbiose le trasmissività sono più basse rispetto alla parte settentrionale, e generalmente inferiori a $1*10^{-3}$ m²/s. La permeabilità è dell'ordine di $0.5*10^{-5}$ m/s.

La scarsa distribuzione spaziale di queste informazioni non ci permette di ricavare un valore esaustivo sulla permeabilità dei calcari e sulla permeabilità delle coltri di copertura della Pianura Pontina, però questi valoro hanno costituito valori guida per la scelta dei valori di permeabilità iniziali e la scelta delle zone a differente permeabilità da attribuire al modello numerico che è stato implementato (§ 4.6.2).

codice	Nome	Quota_m_sl	Prof_tot_m	Longitudine	Latitudine	Т	К	S
254-CMP	Mazzocchio 1	3	251	345495	4585840	0.034000	0.000400	0.000360
669-CMP	Mazzocchio 3	9	247	329757	4595984	0.008100	0.000093	0.000470
201-CMP	Mazzocchio 4	41	500	345751	4594598	0.000650	0.000004	0.000000
670-CMP	Mazzocchio 5	8	350	347822	4586090	0.000090	0.000000	0.000000
671-CMP	Mazzocchio 6	5	402	333910	4594811	0.001000	0.000000	0.000000
672-CMP	Mazzocchio 7	61	250	346757	4596651	0.460000	0.002000	0.000000
568-CMP	Mazzocchio 8	73	278	324236	4608637	0.150000	0.003000	0.000000
PT401100P2	P1	14	83	340417	4594139	0.088450	0.007850	0.177710
PT401060P3	P10	78	145	346453	4597226	0.115210	0.290040	0.379010
PT401060P4	P11	77	145	346462	4597199	0.055830	0.195910	0.191770
PT401090P2	P12	16	201	338446	4594803	0.14558	0.219170	0.041410
PT401090P1	P13	16	190	338407	4594836	0.129100	0.118230	0.138960
PT401090P3	P14	20	186	338515	4594776	0.259710	0.102280	0.510400
PT401090P4	P15	10	201	338599	4594728	0.327100	0.041710	0.013188
PT401090P5	P15	16	186	338661	4594715	0.029940	0.033800	0.287435
PT401090P6	P16	16	200	338738	4594716	0.10851	0.207590	0.036040
PT401090P7	P17	16	164	338798	4594703	0.575500	0.022400	0.076905
PT401090P8	P18	16	202	338855	4594695	0.081310	0.170250	0.034720
PT401090P9	P19	16	201	338924	4594693	0.056650	0.065790	0.008245
PT401100P3	P2	15	90	340456	4594106	0.732320	0.024470	0.349570

Tabella 2-4:Parametri idrodinamici dei calcari censiti nell'area attraverso prove di portata

PT401100P4	P3	11	82	340501	4594077	0.360750	0.004450	0.088620
PT401100P5	P4	14	104	340624	4593974	0.606420	0.011770	0.089090
PT401060P1	P5	216	348	344024	4597383	0.004380	0.006470	0.009280
PT401060P2	P6	217	342	344122	4597372	0.005510	0.395200	0.008640
PT401100P9	P7	100	200	341938	4594807	0.034890	0.005540	0.012890
PT401100P8	P8	100	210	341942	4594867	0.018580	0.000010	0.012210
PT401100P7	P9	108	224	341947	4594930	0.016640	0.004560	0.008770
660-CMP	Pontinia 1	3	355	337471	4589078	0.006700	0.000019	0.000000

2.3.4 Analisi e caratterizzazione delle sorgenti basali dei M. Lepini

Il massiccio carbonatico dei M. Lepini presenta sulla fascia pedemontana occidentale, una serie di sorgenti "basali" differenti sia in termini di portata e sia in termini di chimismo.

Queste sono poste ad una quota variabile dai 30 m s.l.m. della sorgente di Ninfa e i 3,5 m s.l.m. delle emergenze di subalveo del Fiume Uffente, inoltre, esse sono disposte in corrispondenza delle principali linee tettoniche bordiere, e quindi a ridosso del contatto del versante carbonatico con i depositi di colmamento del graben Pontino di ambiente lacustre e continentale della Pianura Pontina.

Questo assetto geologico da luogo a sorgenti per tamponamento laterale, ad opera di terreni a bassa permeabilità idraulica che tamponano i terreni a più alta permeabilità idraulica costituenti la dorsale carbonatica.

Queste emergenze, sia per la loro vicinanza e sia per le loro caratteristiche chimico fisiche e chimiche sono comunemente suddivise in gruppi sorgentizi i cui valori medi di portata sono riportati nella tabella successiva (Tabella 2-5). Tali valori si riferiscono al periodo di misura 2007-2008 (Bono, 2011).

Gruppo Sorgivo	Portata media) m ³ /s	Quota m s.l.m.
Ninfa	1.10	30
Gruppo Cavata	3.60	10
Gruppo Cavatella	1	10
Gruppo Sardellane	2.50	3
Gruppo Laghi del Vescovo	1.4	1

Tabella 2-5: Valori medi delle portate delle sorgenti "basali" dei Monti Lepini



Figura 2-30: Ubicazioni dei gruppi sorgivi basali dei Monti Lepini

La caratterizzazione chimica delle sorgenti è stata affrontata da diversi autori (Celico, 2002) individuando sostanzialmente il seguente raggruppamento:

- gruppo A gruppo di "Ninfa": acque bicarbonato-calciche povere in solfati, cloruri ed alcali
- gruppo B gruppo di "Cavatella" e di "Sardellane": sono acque bicarbonato-calciche estremamente ricche in cloruri alcali solfati e con un tenore di magnesio superiore a quello delle acque del gruppo A;
- gruppo C gruppo dei "Laghi del Vescovo": sono acque clorurato-alcaline, anch' esse come le precedenti, estremamente ricche in cloruri, alcali e solfati e con un tenore di magnesio superiore a quello del gruppo B;
- gruppo D gruppo "Cavata": sono acque bicarbonato-calciche, con tenori di cloruri ed alcali confrontabili con le acque del gruppo A, ma con contenuti di solfati e magnesio tipiche delle acque del gruppo B.

Questa suddivisione ci permette di capire meglio quelli che sono i circuiti delle acque sotterranee e le interazioni che queste hanno con le rocce che esse attraversano. In uno studio del Dipartimento di Scienze della Terra dell'università "Sapienza" di Roma (Bono, 2011) si conferma l'appartenza del gruppo di Ninfa ad acque di facies schiettamente bicarbonato-calciche alimentate quindi esclusivamente dal dominio carsico dei Monti Lepini; i gruppi di Sardellane, Laghi del Vescovo, Cavata e Cavatella risultano alimentati da acque del circuito carsico lepino e del circuito profondo (prevalentemente costituito da fluidi gassosi) proveniente da strati profondi appartenenti allo zoccolo cristallino (dolomie-Trias).

Per quanto riguarda la caratterizzazione idrodinamica delle sorgenti basali, di seguito è riportata una tabella che descrive le analisi condotte sui regimi idrodinamici dei gruppi sorgentizi. Queste analisi si riferiscono ad anni non consecutivi, in quanto, solo recentemente, in concomitanza del "Progetto M. Lepini" sono stati installati dei pluviografi e delle stazioni per la misura in continuo dei dati di livello (Figura 2-1), nei piezometri sulla dorsale e nei canali di raccolta dei principali gruppi sorgivi, pertanto per gli anni antecedenti il 2008, i dati utilizzati si riferiscono a studi idrogeologici pregressi (Mouton, 1977, Celico, 2002). Da questi dati sono stati ricavati i coefficienti di svuotamento e i volumi delle riserve regolatrici delle sorgenti, calcolati in base al modello di Maillet (1905). I grafici di Figura 2-31 e di Figura 2-32 sono i box plot multipli della distribuzione dei coefficienti di svuotamento e dei volumi iniziali di svuotamento. L'unica osservazione che ne deriva riguarda ancora il comportamento differenziato della gruppo sorgivo di Ninfa . Questo infatti presenta un range di variabilità dei coefficienti di svuotamento più ristretto rispetto a quello degli altri gruppi sorgivi e anche un range di volume di immagazzinamento tra i più bassi.

				Immagazzinamneto
				dinamico all'inizio
Sorgente (o Gruppo Sorgentizio)	Periodo di	anno	Coefficiente di	del periodo di
	svuotamento	anno	esaurimento (α)	esaurimento
				$W_0(10^6 \text{ x m}^3)$
Ninfa	apr-nov 1971	1971	0.003028674	84
	lua-dic 1972	1972	0.001702275	116
	mag-set 1979	1979	0.003145304	110
	mar-set 1980	1980	0.002530806	158
	apr-ago 1995	1995	0.016387	5
	apr-ago 1996	1996	0.004637	16
	mar-dic 2007	2007	0.004217391	35
	lug-nov 2008	2008	0.004088059	30
Cavata	giu-set 1971	1971	0.003028674	84
	ott 1972-mar 1973	1972	0.002639049	234
	giu-set 1979	1979	0.005713253	135
	mar-set 1980	1980	0.00279867	314
	apr-ago 1995	1995	0.003721	79
	apr-ago 1996	1996	0.002907	111
	mar-nov 2007	2007	0.000880425	411
	mag-lug 2008	2008	0.019003618	18
Cavatella	mar-ago 1970	1971	0.005926283	23
	mag-ago 1971	1972	0.012316288	12
	mag-set 1979	1979	0.00566944	31
	gen-set 1980	1980	0.001523069	90
	apr-ago 1995	1995	0.004425	22
	apr-ago 1996	1996	0.004665	31
	mar-giu 2007	2007	0.007148723	13
	lug-ott 2008	2008	0.003085339	32
Sardellane (uffente a Ponte Ferraioli)	feb-lug 1971	1971	0.004665278	112
	mar-dic 1972	1972	0.001604635	268
	apr-ago 1979	1979	0.004334054	108
	mar-set 1980	1980	0.001991955	238
	apr-ago 1995	1995	0.001472	186
	apr-ago 1996	1996	0.0011512	231
	mar-lug 2007	2007	0.004349412	66
	mag-ago 2008	2008	0.003384259	76
Gruppo Laghi del Vescovo	mag-ott 1979	1979	0.011897462	19
	mar-set 1980	1980	0.005426003	33
	mar-giu 2007	2007	0.008513502	17
	dic 2007 apr 2008	2008	0.013999852	29

Tabella 2-6: Principali indicatori del regime idrodinamico delle sorgenti basali dei M. Lepini



Figura 2-31:Distribuzione dei coefficienti di svuotamento dei gruppi sorgivi degli anni '71-'72, '79-'80, '95-'96, 2007-2008



Figura 2-32: Distribuzione dei Volumi iniziali di svuotamento (Mm³)dei gruppi sorgivi degli anni '71- '72, '79- '80, '95-'96, 2007-2008

Ulteriori analisi sono state fatte confrontando l'idrogramma di portata del gruppo sorgivo di Ninfa con l'andamento del livello statico del piezometro "Valle" (piezometro recentemente attrezzato con

stazione di misura in continuo da parte della Regione Lazio).posto a circa 1 km di distanza dalla sorgente, ma finestrato in corrispondenza dei carbonati e quindi rappresentativo dell'acquifero della dorsale lepina.



Figura 2-33: Ubicazione del piezometro Valle

Rappresentando gli andamenti della portata e del livello statico si può osservare un andamento generalmente simile tra i due fattori, tale similitudine è anche rappresentata dalla curva di regressione lineare della correlazione tra i due andamenti con coefficiente di correlazione di circa 0.8.



Figura 2-34: a) idrogramma del gruppo sorgivo di Ninfa e del livello statico del piezometro valle b) correlazione tra portata e livello statico

Stessa analisi è sta condotta anche per gli altri gruppi sorgivi della fascia pedemontana. Per questi gruppi sorgivi, non ci sono dati piezometrici contemporanei alle misure di portate effettuate pertanto sono stati utilizzati dati piezometrici e dati di portata riferiti al periodo 1979-1980, gli stessi utilizzati anche per ricavare i coefficienti di svuotamento presentati nella Tabella 2-7. Si riporta a titolo di esempio il grafico di correlazione tra il gruppo Sardellane e i livelli piezometrici del piezometrici del piezometro Mazzocchio 4, posto sulla dorsale carbonatica.



Figura 2-35: a) idrogramma del gruppo sorgivo Sardellane e del livello statico del piezometro Mazzocchio 4b) correlazione tra portata e livello statico

Le correlazioni tra le sorgenti e i livelli statici dei piezometri che misurano il livello statico dell'acquifero carbonatico hanno un coefficiente di correlazione superiore a 0.7.



Figura 2-36: Ubicazione del piezometro Mazzocchio 4

L'analisi fino ad ora esposta è stata ripresa nel paragrafo §4.4 in cui è stata utilizzata per la definizione del modello concettuale.

2.3.5 Assetto piezometrico e chimico-fisico della falda multistrato della piana

Come detto nel paragrafo 2.3.1, le misure sperimentali condotte hanno riguardato essenzialmente il settore della Pianura Pontina e in particolare i pozzi perforati nei depositi quaternari in essa contenuti, la cui complessità stratigrafica giustifica l'ipotesi della presenza di un acquifero multistrato all'interno di questi depositi.

I dati raccolti sono stati spazializzati con il metodo dei segmenti proporzionali, con aggiustamenti in funzione del paesaggio topografico e geologico, e con il metodo dell'IDW (Inverse Distance Weighted). Sono state quindi prodotte le mappe relative alla definizione della superficie del tetto della zona satura (Figura 2-38) e alla distribuzione dei parametri chimico fisici (temperatura, conducibilità elettrica e pH) (Figura 2-39, Figura 2-40, Figura 2-41) delle acque del sottosuolo. In relazione alle mappe piezometriche si sottolinea che l'equidistanza delle curve isopiezometriche usata nella rappresentazione varia in relazione all'orografia del territorio: equidistanza 10 o 5 m per il settore a nord di Ninfa; equidistanza 2 m per il settore planiziale.

Da una prima analisi delle isopiezometriche costruite per le diverse campagne è possibile suddividere il territorio della Piana in studio in tre settori caratterizzati da medesime condizioni di deflusso e gradiente.

Il settore settentrionale che va da Giulianello a Sermoneta mostra un drenaggio generale da NO verso SE. Studiando le direzioni di deflusso, si nota spiccatamente nella seconda, terza e quarta campagna, delle direzioni di flusso entranti uscenti dalla dorsale e parallele alla dorsale. La componente ortogonale sembrerebbe entrante fino a Cori e uscente da Cori in poi, con un evidente deflusso uscente da Ninfa fino a Sermoneta. Questi deflussi testimoniano un ingresso di acque dal dominio carbonatico verso la piana e un ingresso di acque dal dominio vulcanico dei Colli Albani (posto a nord ovest dell'area di studio) ancora verso la piana. Il dominio vulcanico dei Colli Albani nel settore settentrionale, dell'area di studio, presenta degli spessori che vanno dai 200 m a 50 m . Il carico piezometrico presente in questa zona sarebbe in grado non solo di alimentare la porzione della piana settentrionale, ma anche di alimentare parte della dorsale carbonatica che confina con la formazione vulcanica. Tale ingressione è anche essere confermata da analisi isotopiche e geochimiche condotte durante il "progetto Monti Lepini" (Bono, 2011), che individua delle zone (zona tra Artena e Cori), all'interno del settore settentrionale della dorsale lepina, in cui sono presenti acque non schiettamente carbonatiche, ma acque che derivano da miscelazione di quest'ultime con acque vulcaniche.

L'intervallo dei valori del livello di saturazione per tutte e quattro le campagne è variabile da 80 m s.l.m. a 30 m s.l.m., che determina un gradiente omogeneo per tutto il settore. Tale gradiente si riduce da Ninfa verso sud.

Il settore centrale che va da Sermoneta a Sezze mostra una direzione prevalente di flusso idrico sotterraneo analogo al settore precedente con una maggiore predominanza della direttrice proveniente dai carbonati. Le quote del livello di saturazione sono variabili da 30 m s.l.m. a 10 m s.l.m., con un gradiente omogeneo su tutto il settore.

Il settore meridionale che va da Sezze ai Laghi del Vescovo mostra un andamento della superficie piezometrica nettamente differente dagli altri settori; esso è infatti governato da fenomeni di artesianesimo e dai condizionamenti imposti dagli alvei di bonifica, i quali raggiungono quote al di sotto del livello marino, determinando quindi la necessità di un drenaggio a scolo meccanico (§2.1). Relativamente ai fenomeni di artesianesimo, i punti d'acqua con questa caratteristica ricadono in un'area che si estende dal Gruppo Cavata fino al bacino di Mazzocchio (sinistra idraulica del F. Sisto). Tale area coincide con quella indicata nello studio sulle acque della Pianura Pontina da Mouton J. nel 1977 (Figura 2-37); questa circostanza è un'ulteriore testimonianza che la falda acquifera contenuta nei calcari sotto la pianura è ancora in pressione come già descritto nel paragrafo 2.3.2.

Nella Figura 2-38 sono riportate le superfici piezometriche relative alle quattro campagne di misura.



Figura 2-37: estensione dell'area con falda risaliente



Figura 2-38: Andamento delle linee isopieze relative ai dati delle campagne del periodo 2008-2009. 1: campagna febbraio – giugno 2008; 2: campagna settembre – novembre 2008; 3:campagna: febbraio – aprile 2009;4: campagna: giugno – luglio 2009 A: gruppo sorgivo di Ninfa, B: gruppo sorgivo di Cavata e Cavatella, C: gruppo sorgivo di Sardellane, D: gruppo sorgivo dei Laghi del Vescovo

La distribuzione dei valori chimico-fisici, riportata nelle carte di Figura 2-39 e di Figura 2-40 e di Figura 2-41, presenta una zonazione che, nel caso della conducibilità elettrica si articola in tre settori; nel caso invece della temperatura e del pH essa è meno marcata e limitata a due sole aree.

In relazione alla conducibilità elettrica (Figura 2-39) il settore settentrionale, appartenente al dominio vulcanico, presenta valori relativamente bassi che mediamente sono compresi tra 200 μ S/cm. e 600 μ S/cm. Nel settore più meridionale dell'area di studio le acque sono invece caratterizzate da valori compresi tra i 1000 μ S/cm e 3000 μ S/cm. Nel settore centrale, i valori di questo parametro, sono compresi tra 600 μ S/cm e 1000 μ S/cm.

L'analisi delle cause che determinano una maggiore salinità delle acque porta a individuare due possibili motivazioni: la prima è la risalita di fluidi endogeni, la seconda i lunghi tempi di permanenza negli acquiferi e circolazione delle acque di falda in depositi evaporitici (Boni et al. 1980).

Relativamente alla temperatura (Figura 2-40) nell'area di studio si individuano due settori: quello settentrionale, altimetricamente più elevato e lontano dalla costa, che presenta valori compresi tra i 19-20 °C, a testimonianza della presenza di acque sotterranee influenzate dal dominio vulcanico che giustificherebbero tali temperature; quello meridionale, relativo alla rimanente parte dell'area di studio, che risulta mediamente più freddo e in cui si rilevano però anche alcuni plume originati da pozzi con valori di temperatura fino a 24°C.

Per quanto riguarda il pH le elaborazioni delle mappe (Figura 2-41) indicano una variabilità stagionale e una zonazione confermata solo sulla parte settentrionale.



Figura 2-39: distribuzioni dei valori di conducibilità elettrica relative ai dati delle campagne del periodo 2008-2009. 1: campagna febbraio – giugno 2008; 2: campagna settembre – novembre 2008; 3:campagna: febbraio – aprile 2009;4: campagna: giugno – luglio 2009



Figura 2-40: distribuzioni dei valori di temperatura relative ai dati delle campagne del periodo 2008-2009. 1: campagna febbraio – giugno 2008; 2: campagna settembre – novembre 2008; 3:campagna: febbraio – aprile 2009;4: campagna: giugno – luglio 2009



Figura 2-41: distribuzioni dei valori di pH relative ai dati delle campagne del periodo 2008-2009. 1: campagna febbraio – giugno 2008; 2: campagna settembre – novembre 2008; 3:campagna: febbraio – aprile 2009;4: campagna: giugno – luglio 2009

3. Schema di circolazione degli acquiferi e bilancio idrogeologico

3.1 Complessi idrogeologici e schema di circolazione

3.1.1 Inquadramento generale

L'inquadramento ambientale descritto nel capitolo precedente ci permette di definire diversi complessi idrogeologici, rappresentati nella figura seguente, che sono il "complesso dei calcari", il "complesso dei depositi vulcanici e travertinosi" ed il "complesso dei depositi argillo-sabbiosi della Pontina".



Figura 3-1:Mappa dei complessi

3.1.2 Il complesso dei calcari

Il complesso dei calcari è caratterizzato dai calcari del Mesozoico fratturati e carsificati sia della parte emersa (dorsale dei m. Lepini) e sia della parte ribassata (sommersa sotto i depositi plioquaternari della Pianura Pontina). Questo complesso ospita l'acquifero carbonatico freatico all'interno della dorsale emersa e l'acquifero in pressione, nella zona sepolta confinato dai depositi marini del Pliocene sup. - Pleistocene medio. Questo complesso presenta dei limiti idrogeologici esterni ed interni come differenziati nella Figura 3-1b con le lettere A÷F.

Il limite A interessa il settore compreso tra Artena e Gavignano-Sud, esso è un limite a "flusso aperto", di incerta interpretazione, dove può esserci uno scambio idrico di acque sotterranee sia in uscita e sia in entrata dalla dorsale carbonatica. Il ruolo idraulico ancora "non precisabile" del limite, deriva da considerazioni di tipo geologico-stratigrafiche. I dati stratigrafici CARG della piana di Colleferro non escluderebbero di per sé condizioni di continuità idraulica tra il settore nord-orientale della Idrostruttura Lepina e l'acquifero multistrato dei depositi alluvionali che colmano la Valle del Sacco (Figura 3-2). Infatti in questo settore è stata individuata una paleovalle con drenaggio sotterraneo verso nord-ovest, colmata da depositi continentali (vulcaniti, travertini, sabbie, argille, ghiaie) localmente sede di acquiferi produttivi sollecitati da numerose captazioni. Anche se al momento mancano evidenze basate su dati piezometrici in continuo, non si può escludere che il pompaggio intensivo dei pozzi presenti nella Piana di Colleferro possa interferire con la falda regionale dei Lepini sottraendo al sistema carsico aliquote di risorse. Si ritiene comunque più verosimile che qualora ciò accadesse, gli effetti del pompaggio sulla piezometria dell'acquifero carsico regionale producano variazioni di potenziale del tutto trascurabili o comunque poco significative.



Figura 3-2: schema d'assetto strutturale e idrogeologico nell'area di Colleferro

Il limite B interessa il settore orientale dei M. Lepini, da Prossedi fino a Sud di Gavignano, esso è definito come limite a "flusso nullo", dove si esclude uno scambio idrico di acque sotterranee sia in ingresso che in uscita dalla dorsale. Tale limite deriva da considerazioni geologico-stratigrafiche e tettoniche che vedono un sovrascorrimento in direzione NE dei carbonati sui flysch della Valle Latina, con conseguente isolamento idraulico sia in ingresso che in uscita dall'Idrostruttura Lepina.

Il limite C interessa il settore della Valle del F. Amaseno, da Prossedi a Priverno-Fossanova, esso è definito come limite di "potenziale" (con contributo nullo da parte della Idrostruttura Lepina). Tale limite deriva da considerazioni di tipo idrogeologico. Il corso d'acqua, che divide l'Idrostruttura Lepina (in destra idraulica) da quella Ausona (in sinistra idraulica), incrementa la sua portata nel settore considerato. Tale aumento di flusso deriva da sorgenti presenti esclusivamente in sinistra idraulica mentre dal settore lepino il contributo è nullo. Di conseguenza, relativamente ai M. Lepini tale limite è di fatto un limite a "flusso nullo" (Celico, P., 1983; Celico, F., 2002).

Il limite D interessa quasi tutta la fascia pedementona dalla sorgente di Ninfa fino Priverno-Fossanova, esso è definito limite a "flusso aperto" con direzione di flusso idrico sotterraneo in uscita dalla dorsale: Tale limite deriva da considerazioni geologico-strutturali legate alla tettonica distensiva che ribassa le sequenze carbonatiche in affioramento fino a circa -100 m s.l.m. nell'area di Sermoneta e fino a circa -300 m s.l.m. nel settore più meridionale. Questo assetto tettonico determina la presenza dei numerosi gruppi sorgivi che drenano la falda lepina per trabocco sulla Pianura Pontina.

Il limite E interessa il settore lepino compreso tra Giulianello e Ninfa, esso è un limite a "flusso aperto": Questa caratterizzazione deriva da considerazioni di carattere idrogeologico, infatti come già detto nel paragrafo 2.3.5 l'assetto dei potenziali idraulici del settore albano sud-orientale sarebbe infatti coerente con il drenaggio delle acque sotterranee dall'idrostruttura vulcanica verso quella lepina.

Il limite F interessa il lato nord ovest dell'area di studio, esso può essere definito limite a "flusso aperto", dove come per il limite E, può esserci, uno scambio di flussi in ingresso dall'unità vulcanica dei Colli Albani verso la dorsale. Infatti, alcune stratigrafie poste proprio sul limite esterno della dorsale evidenziano spessori di vulcaniti dell'ordine dei 300 m. La direzione di deflusso è dettata dai carichi piezometrici che si hanno nella parte vulcanica e nella parte carbonatica, l'assetto piezometrico attuale (campagna piezometrica n°1 di Figura 2-38) mostra una saturazione nel dominio vulcanico superiore a 120 m s.l.m., mentre non si hanno informazioni di saturazione della dorsale prossime al bordo. Pertanto tale limite rimane attualmente ancora non validato.

Il limite G interessa il lato ovest dell'area di studio, esso può essere definito limite a "flusso aperto" Tale limite deriva da considerazioni legate all'assetto strutturale dei calcari sepolti e degradanti verso il mare, all'interno dei quali il flusso idrico sotterraneo è in uscita dai calcari e diretto verso il mare.

3.1.3 Il complesso dei depositi vulcanici e travertinosi

Il complesso idrogeologico dei depositi vulcanici e travertinosi è caratterizzato da intercalazione di depositi vulcanici, fluviali, lacustri e travertinosi, con spessore medio di diverse decine di metri. Tale complesso è sostenuto da depositi prevalentemente argillosi di facies marina. L'andamento della piezometria, ricostruita nel corso dello studio, indica una circolazione sostenuta dall'Unità Albana. Laddove il tetto dei carbonati, al di sotto della piana, è più alto di -50/-100 m s.l.m., vi può essere una ricarica, oltre a quella laterale, proveniente anche dal basso, legata quindi all'acquifero dei calcari sommersi alimentati dalla falda regionale della dorsale. In questa zona la conducibilità elettrica delle acque sotterranee normalmente non supera i 600 μ S/cm.

3.1.4 Il complesso dei depositi argillo-sabbiosi

Esso è caratterizzato dal complesso delle argille con torbe, che ha una potenza di circa 50/60 metri e si estende dal margine dei carbonati sino all'alveo del Fiume Sisto. Questo complesso a bassa permeabilità è sostenuto dal complesso delle sabbie, che è caratterizzato da una grande variabilità laterale ed una buona permeabilità. Al di sotto delle sabbie può essere presente un acquicludo costituito da depositi del Siciliano. La ricarica può avvenire per alimentazione da parte dei carbonati sia dal basso che lateralmente.

In questa zona la conducibilità elettrica delle acque sotterranee mediamente è compreso tra i 1500 μ S/cm. e i 2500 μ S/cm.

3.1.5 Schema di circolazione

Definiti i complessi e gli assetti piezometrici degli acquiferi contenuti nei depositi quaternari e dell'acquifero dei calcari si riportano due immagini che sintetizzano lo schema di circolazione (Figura 2-3 e Figura 3-4).



Figura 3-3:Mappa dello schema di circolazione degli acquiferi dell'area di studio



Figura 3-4:Sezione schematica di circolazione delle acque nell'area di studio (Rielaborato da schema di Boni, et al.1980)

55

3.2 Definizione dei limiti delle aree di alimentazione dei Gruppi Sorgivi Basali

L'inquadramento ambientale e lo schema di circolazione, hanno permesso di definire un'ipotesi di aree di ricarica dei principali gruppi sorgivi della dorsale carbonatica. In particolare l'analisi dell'assetto tettonico e l'analisi degli idrogrammi delle sorgenti, hanno validato l'ipotesi di una compartimentazione della dorsale che può determinare il deflusso delle acque che si infiltrano nella dorsale carbonatica ed emergono in pianura. Di seguito è riportata la figura che delinea le aree imputate come aree di ricarica dei diversi gruppi sorgivi.

L'estensione di queste aree è stata successivamente verificata mediante il modello numerico descritto nei capitoli seguenti.



Figura 3-5: Ipotesi di aree di ricarica delle sorgenti basali dei M. Lepini

3.3 Bilancio idrogeologico dell'area di studio

3.3.1 Metodi e dati di base

Il bilancio idrogeologico è utilizzato per ricavare il valore dell'infiltrazione efficace, ovvero la quota parte del volume medio delle precipitazioni, sull'area di studio, che riesce ad infiltrarsi nel terreno andando a ricaricare gli acquiferi.

Il bilancio idrogeologico dell'area di studio si basa sullo schema concettuale descritto nel paragrafo 3.1.5 ed è calcolato mediante un modello a parametri distribuiti. Tale modello è stato ricavato dalla metodologia messa a punto per il Piano dell'Uso Compatibile della risorsa idrica della Regione Lazio (Capelli, Mazza, & Gazzetti, 2005) e successivamente rielaborata per l'area del "Progetto Monti Lepini" (Alimonti, Federici, & Gazzetti, 2011), ai risultati del quale si rimanda per una trattazione più dettagliata.

Il bacino idrogeologico dei Monti Lepini può essere suddiviso in due grandi serbatoi. La componente primaria è il massiccio dei Lepini che costituisce il sistema di ricarica dell'acquifero. La seconda componente è la Pianura Pontina. Questa è formata dalle formazioni calcaree soggiacenti a depositi vulcanici o alluvionali che ne costituiscono la copertura. Ai fini del bilancio si può prendere in considerazione lo schema concettuale riportato in Figura 3-6, dove sono rappresentati i due serbatoi in comunicazione tra loro.



Figura 3-6: schema concettuale di comunicazione tra i serbatoi

Il bilancio è espresso dalle seguenti equazioni:

$$I_e = S + Q_e + (Q_{ep} + T_s) + A$$

Eq. 3-1

 $I_e = P - ETR - R$

dove:

 I_e è l'infiltrazione efficace

S sono le emergenze sorgive

- Q_e sono i prelievi sul massiccio calcareo
- Q_{ep} sono i prelievi nella piana
- T_S è il travaso sotterraneo

A è l'accumulo nel serbatoio

P sono le precipitazioni

ETR è l'evapotraspirazione reale

R è il ruscellamento

Nell'ipotesi che lo studio venga condotto in stazionario l'accumulo dei serbatoi non viene preso in considerazione, pertanto la formula di bilancio finale esclude la componente A.

La metodologia prende in considerazione i seguenti dati:

- 1 le misure termo-pluviometriche derivanti dalle seguenti fonti:
 - a Servizio Idrografico e Mareografico Regionale;
 - b Arsial;
 - c Dati inediti delle stazioni di rilevamento in quota (Prof. Bono);
- 2 la carta dell'uso del suolo 1:10.000 elaborata nell'ambito del "Progetto Monti Lepini";
- 3 la carta della capacità idrica del suolo (Available Water Capacity, AWC);
- 4 il modello digitale delle quote del terreno (DEM);
- 5 la carta litologica;
- 6 la carta delle aree endoreiche;
- 7 dati della rete di monitoraggio idrometrico della Provincia di Latina;
- 8 dati della rete di monitoraggio idrometrico e piezometrico della Regione Lazio.

I dati di base sono opportunamente distribuiti, per l'area di studio, su una maglia di calcolo con celle quadrate di lato 100 m.

3.3.2 Parametri naturali del bilancio idrogeologico

3.3.2.1 Precipitazioni ed evapotraspirazione

La distribuzione spaziale delle precipitazioni, ottenuta a partire dai dati puntuali delle stazioni di misura disponibili, elaborati per il periodo 2005 – 2010, è stata calcolata mediante la metodologia denominata *Kriging in FAI-k* (Wakernagel 1995, Bruno e Raspa 1994, Chilès e Delfiner 1999) ed è rappresentata per mezzo di una mappa, relativa alla maglia di calcolo adottata (Figura 3-7).



Figura 3-7: Distribuzione della Pioggia media (mm/anno) del periodo 2005-2010

Il valore medio del periodo sull'area di studio risulta pari a *1103 mm/anno*, con un minimo pari a *800 mm/anno* ed un massimo di *1310 mm/anno*. Il volume totale di acqua, relativo alla pioggia media annua sull'area di studio per il periodo considerato, è stato ricavato con un calcolo geostatistico ed è pari a:

Pioggia totale media = $986623270 \text{ m}^3/\text{anno}$

L'evapotraspirazione potenziale è stata calcolata a partire dai dati di temperatura, anch'essi relativi alle stazioni meteoclimatiche disponibili, in base alla formula di Hargreaves-Samani (1985), che stima la radiazione solare globale a partire dalla radiazione solare extraterrestre (vale a dire quella che giunge su un'ipotetica superficie posta al di fuori dell'atmosfera) e dall'escursione termica del mese considerato (differenza tra la temperatura massima media e quella minima media del mese):

ETP = 0,0023 (T_{media} + 17,8) (T_{max} - T_{min})^{0,5} (R_a / λ)

dove:

T_d: escursione termica mensile [°C];

R_a: radiazione solare extraterrestre raccolta in un giorno [MJ m⁻² d⁻¹];

T: temperatura media mensile [°C];

 λ : calore latente di evaporazione dell'acqua [MJ/kg].

L'evapotraspirazione così calcolata, sempre relativa alla maglia di calcolo adottata, viene moltiplicata per il coefficiente colturale K_c , che esprime la proporzionalità tra l'evapotraspirazione della coltura di riferimento rispetto a quella della coltura presente nella singola cella di calcolo. Si ottiene quindi:

 $ETC = K_c ETP$

Per calcolare l'evapotraspirazione reale occorre prima effettuare alcune considerazioni sul contenuto d'acqua nel suolo St pari a:

 $St = St_1 + P - ETC$

dove St_1 è pari al contenuto d'acqua nel suolo calcolato nel mese precedente o all'AWC se è il primo mese del calcolo.

Se St risulta positivo o nullo l'evapotraspirazione reale coincide con il valore di quella colturale:

EVR = ETC

Se invece *St* risulta negativo viene posto a zero e si considera l'evapotraspirazione reale pari alla somma della precipitazione del mese in corso e del volume di acqua presente nel suolo: EVR = P + St.

Il valore medio dell' EVR calcolata per il periodo 2005-2010 è pari a 426 mm/anno, con un massimo di 795 mm/anno. Anche per l'evapotraspirazione è possibile calcolare il volume totale di acqua, da sottrarre alla pioggia lorda. Per il periodo considerato, sull'area di studio, si ha: Evr = $380436839 \text{ m}^3/\text{anno}$.

3.3.2.2 Ruscellamento

Il calcolo del ruscellamento utilizza due differenti approcci in funzione dell'ubicazione delle celle di calcolo, per tenere conto del diverso comportamento delle aree della dorsale e di quelle della piana nei confronti dell'infiltrazione. I due approcci prevedono di utilizzare i seguenti metodi:

- a) metodo di Kennessey (1930) da utilizzare sui bacini che ricadono sulla dorsale: il ruscellamento R è una frazione della pioggia efficace P_E (cioè la pioggia lorda meno l'evapotraspirazione, $P_E = P - EVR$) in base ad un coefficiente di deflusso C_k che tiene conto dei parametri di acclività, di permeabilità dei terreni affioranti e della copertura vegetale; risulta quindi $R = C_k P_E$;
- b) metodo del *Curve Number*, elaborato dal *Soil Conservation Service* americano (Soil Conservation Service, 1972) da utilizzare sui bacini che ricadono sulla piana: il ruscellamento è dato dalla formula $R = P_E^2 / (P_E + S)$, dove *S* è la ritenzione potenziale massima calcolata come segue $S = (\frac{100}{CN} 10)$

dove CN=25400/(AWC+254). IL CN è corretto per acclività e calcolato come segue: CNa=CN*(322,79+15,63*SLOPE)/(SLOPE+323,52)

dove SLOPE è la pendenza in percentuale.

Laddove le celle ricadano in aree urbanizzate vale l'ipotesi di infiltrazione nulla pertanto il ruscellamento è pari alla pioggia.

Il valore medio del R calcolato per il periodo 2005-2010 è pari a *181 mm/anno*, con un massimo di *1310 mm/anno*. Anche per il ruscellamento è possibile calcolare il volume totale di acqua, da sottrarre alla pioggia lorda. Per il periodo considerato, sull'area di studio, si ha: $R = 161480979 \text{ m}^3/\text{anno}.$

3.3.2.3 Infiltrazione efficace

L'infiltrazione efficace è calcolata secondo la seguente formula:

IE = PE - R.

Il valore medio della mappa calcolata per il periodo 2005-2010 risulta pari a *503 mm/anno*, con un massimo di *1268 mm/anno*. Il volume di acqua medio che si infiltra per poter ricaricare la risorsa idrica sotterranea per il periodo considerato è pari a:

 $Ie = 448955865 \text{ m}^3/\text{anno.}$



Figura 3-8:Mappa dell'Infiltrazione efficace media (mm/anno) per il periodo 2005-2010

3.3.3 Uso della risorsa idrica

Per dimostrare la prima equazione (Eq. 3-1) del bilancio bisogna stimare i termini di prelievo dai due acquiferi, quello dei calcari e quello dei depositi quaternari.

Durante questo studio sono state condotte analisi dei dati contenuti negli archivi delle concessioni idriche della Regione Lazio e della Provincia di Latina, ma nel complesso questi database si configurano come archivi incompleti sia in termini volumetrici che in termini di descrizione dell'uso della risorsa e dei tempi di utilizzo di tale risorsa durante l'anno. In presenza di queste difficoltà per quantificare in termini volumetrici i prelievi, si ritiene comunque sufficiente, ai fini del bilancio globale dell'intera area di studio, assimilare detti volumi ai fabbisogni idrici per uso civile (acquedotti), uso industriale, uso agricolo e uso zootecnico calcolati attraverso la metodologia applicata durante il "Progetto Monti Lepini" (Alimonti, Federici, & Gazzetti, 2011) cercando, laddove possibile di validare questi calcoli con i dati dei prelievi provenienti dagli archivi pubblici. Una singolarità però riguarda l'uso civile, perché per questo uso è stato possibile, grazie ai dati di

prelievo forniti dall'ente gestore dell'ATO 4¹, individuare con precisione i volumi di acqua prelevati da pozzi e da sorgenti ricadenti nell'area di studio per il territorio di competenza della Provincia di Latina. Tali prelievi costituiscono la quasi totalità dei prelievi per uso civile (acquedottistico) sul massiccio carbonatico dei Lepini. Di seguito è riportata una sintesi dei risultati del calcolo dei fabbisogni e dei confronti e aggiustamenti effettuati con i dati di archivio disponibili In generale è da sottolineare che nel calcolo del fabbisogno non verranno conteggiati i volumi di prelievi riconoscibili come i prelievi per uso domestico o i prelievi per usi affini a quelli industriali come per esempio antincendio o igienico sanitario, ma poiché il metodo di implementazione del modello consiste in approfondimenti successivi, in questa fase , si utilizzeranno solo i dati dei fabbisogno, in quanto esso rappresenta un dato calcolato e facilmente aggiornabile, mentre i dati riportati negli archivi possono contenere "errori" dovuti alla difficoltà di controllarne l'attendibilità. Inoltre i dati degli archivi subiscono continui aggiornamenti, mentre per la messa a punto del modello si preferisce impiegare dati "più oggettivi".

3.3.3.1 Uso civile

Per ciò che riguarda l'uso civile, i fabbisogni stimati si sono basati sui dati di censimento ISTAT aggregati a scala di comune a partire dalle sezioni di censimento. Stabilita la popolazione dei singoli comuni per calcolarne il fabbisogno idrico è stato utilizzato lo studio effettuato in occasione dell'aggiornamento del PRGA della Regione Lazio del 2004. In questo studio è stato seguito un criterio ampiamente consolidato nella letteratura di settore, secondo il quale, le dotazioni idriche possono essere definite confrontando parametri come la popolazione residente, la quota altimetrica media, la distanza dal mare dei comuni che compongono ogni singolo comprensorio. Tale approccio ha condotto all'individuazione di valori delle dotazioni idriche giornaliere per abitante. Le dotazioni idriche adottate sono indicate per comprensori e sono uniche per ciascun comprensorio con riferimento al 2015. Dunque ad ogni comune è stato associato il comprensorio a cui appartiene secondo le tabelle fornite nel suddetto PRGA ed è quindi stata associata la dotazione media secondo i dati presenti nel PRGA. Il fabbisogno è stato quindi stimato pari a circa 36 Mm3/anno. Come accennato sopra, per questo uso durante questo dottorato, sono stati analizzati anche i dati dei prelievi effettuati dal gestore dell'ATO 4 per servire la rete acquedottistica di alcuni comuni della provincia di Latina. In sintesi si riporta una tabella dei volumi medi (periodo 2005-2007) dei prelievi, da pozzo e sorgente, accertati:

¹ Ambito Territoriale Ottimale 4, corrispondente alla Provincia di Latina, il cui gestore è ACQUA LATINA S.p.A.

Nome pozzo/sorgente	Q media prelevata (Mm³/anno)
Pozzo Madonnella	0.14
Pozzo Cori ex stazione	1.65
Pozzo Ninfa	5.72
Pozzo Vigne	0.70
Pozzo Carabiniere	2.16
Pozzo Monte Acuto	0.02
Pozzo Santo Arcangelo	0.15
Pozzo Prunacci	0.18
Sorgente Sermoneta Monticchio	0.48
Pozzo Sardellane	28.16
Totale	39.38

tabella 3-1: Sintesi dei prelievi medi dal gestore dell'ATO 4 nell'area di studio

Il dato riportato evidenzia una sottostima dei prelievi totali per uso acquedottistico calcolati con il metodo del fabbisogno. Per ricavare il nuovo dato di prelievi totale sull'area di studio si decide di prendere i valori della tabella 3-1 e di unirli ai valori dei fabbisogni dei comuni che sono asserviti dagli altri ATO (ATO 2 e ATO 5, rispettivamente della provincia di Roma e della provincia di Frosinone).

In totale si ha un volume totale paria 42,67 Mm³/anno distribuiti come riportati in tabella 3-2.

abena 5-2. sintesi aer jabbisogni prenevi per aso ervite aen area a	5111110
ATO 2 e ATO 5 (valore derivato dal calcolo del fabbisogno)	3.29 Mm ³ /anno
NTO 4 (valore fornito dal gestore)	39.38 Mm ³ /anno

tabella 3-2: sintesi dei fabbisogni/prelievi per uso civile dell'area di studio

totale prelievi per uso civile

42.67 Mm³/anno

3.3.3.2 Uso industriale

Per ciò che riguarda l'uso industriale il fabbisogno connesso con le attività produttive è stato ottenuto mediante l'associazione di valori di fabbisogno idrico annuo per addetto alle diverse categorie di attività produttive rilevate dall'ISTAT nelle sezioni di censimento (censimento dell'Industria, anno2001). Il fabbisogno idrico da abbinare a ciascun addetto deriva prevalentemente dagli studi per l'aggiornamento del PRGA del Lazio settentrionale (Regione Lazio 1997), dai dati di uno studio IRSA (1973) e dalle considerazioni riportate in Capelli et. al., 2005. Questa analisi fornisce una stima del volume emunto per gli usi industriali e produttivi di circa *21 Mm3/anno*.

3.3.3.3 Uso agricolo

Lo studio del fabbisogno è stato condotto a partire dall'assunto che il fabbisogno irriguo corrisponde alla deficit idrico. Esso corrisponde alla quantità d'acqua necessaria al completo sviluppo fenologico delle specie vegetali presenti, nel caso il volume d'acqua non venga fornito la vegetazione comincerà a seccare. Si trascura il fabbisogno idrico del massiccio carbonatico, perché esso corrisponde prevalentemente alla vegetazione spontanea. Tale approssimazione è validata anche dall'assenza di attività agricole sul massiccio. Sul settore della Pianura Pontina in esame, il deficit permette di ricostruire i volumi emunti o utilizzati per soddisfare il fabbisogno irriguo. Il deficit mensile è dato da:

$$DEF = Stl - ETC + P$$

Dove: DEF = deficit irriguo ETC = Evapotraspirazione colturale del mese in corso P = precipitazione del mese in corso St1= immagazzinamento idrico nei suoli del mese precedente Il valore medio del deficit così calcolato è stimato in 46 Mm³/anno.

Per questo uso sono state individuate le porzioni di territorio il cui fabbisogno è soddisfatto tramite il prelievo di acque da pozzi e le porzioni di territorio dove il fabbisogno irriguo è soddisfatto attraverso la gestione dei canali artificiali del consorzio di bonifica (Consorzio di Bonifica dell'Agro Pontino). Sulla piana il C.B.A.P. (§2.1) svolge l'attività di gestore delle acque da destinare al comparto agricolo. L'analisi dei dati forniti dal consorzio e dall'archivio delle concessioni della Provincia di Latina, ha permesso di definire che le esigenze idriche del comparto agricolo settentrionale, ossia il fabbisogno idrico nella porzione settentrionale, corrisponde al prelievo da pozzi per un volume pari a 23 $Mm^3/anno$, mentre nel settore meridionale il fabbisogno rimanente, sempre circa 23 $Mm^3/anno$ corrisponde ai volumi di acqua distribuiti attraverso le derivazioni dal reticolo artificiale e dagli impianti di sollevamento del consorzio. Si ricorda che il volume di acqua distribuito attraverso i canali artificiali e gestiti dal consorzio deriva principalmente dalle acque sorgive che si riversano sulla pianura e una quota parte dalle acque sotterranee della falda multistrato della piana stessa drenate dal reticolo (§2.1), pertanto ai fini del bilancio globale dell'area di studio queste acque non devono essere conteggiate, altrimenti questi

Eq. 3-3

volumi verrebbero conteggiati due volte visto che nel bilancio è computato l'elemento legato alle sorgenti.

3.3.3.4 Uso zootecnico

L'idroesigenza delle attività legate all'allevamento è stata valutata raccogliendo dai Dipartimenti di Prevenzione– Area Veterinaria i dati di censimento dei capi di bestiame presenti a scala di comune. Ad ogni capo è stato attribuito un volume d'acqua (tabella 3-3), derivante da diversi studi di letteratura, ottenendo così su scala comunale, un fabbisogno per uso zootecnico pari a 3,4, $Mm^3/anno$.

tabella 3-3: Volumi d'acqua (l/capo/giorno) richiesti dal singolo capo per specie

Bovini	Bufalini	Ovi-caprini	Equini	Suini	Avicoli
25,2	25,2	7,2	10,8	18	3,6

3.3.4 Sintesi del Bilancio

Risolvendo il bilancio espresso dall'Eq. 3-1 il bilancio si chiude in positivo, con un volume pari a 1,79 m³/s che corrisponde al termine di travaso sotterraneo che gli acquiferi indagati scambiano con l'esterno dell'area di studio.

Termini dell'equazione Eq. 3-1	m^3/s	m^3/s
Infiltrazione efficace (I _e)	14,24	
Totale Sorgenti (S)		9.6
Totale Prelievi (Q _e +Q _{ep})		2.85
Travasi di acque sotterranee con		1 79
acquiferi adiacenti		,

tabella 3-4: termini di bilancio dell'Eq. 3-1

In questo calcolo non sono stati conteggiati i volumi di acqua sotterranee che vengono drenati dal reticolo artificiale e convogliate fuori dalla nostra area di studio dalle idrovore Mazzocchio, Striscia e Gricilli , che in base alla stima esposta nel paragrafo 2.1 ammonta a circa 0.44 m³/s. e che quindi ridurrebbe il termine travaso a <u>1.35 m³/s</u>. Il termine che influenza maggiormente il bilancio è quello delle sorgenti che rappresentano circa il 70 % della ricarica, a fronte del 20 % dei prelievi e la restante parte, circa il 10% sono gli scambi di travaso con l'esterno.

Questo bilancio mette in evidenza che questo sistema sia da ritenersi sostanzialmente in equilibrio visto il grado di incertezza legato ai prelievi. Ai fini comunque degli obiettivi di questo lavoro legati alla ricostruire del moto di filtrazione delle acque di circolazione si ritiene che questa incertezza sui prelievi non influisca sui risultati attesi.

4. Modello numerico di simulazione

4.1 Modello matematico

L'equazione di flusso idrico sotterraneo, espressa attraverso la relazione di Darcy (1856) che lega, in proporzione lineare diretta, la portata del fluido nel mezzo poroso al gradiente di pressione e alla conducibilità idraulica, è espressa dalla seguente equazione:

$$q = -K \frac{\partial h}{\partial x}$$
 Eq. 4-1

dove il segno meno definisce i flussi positivi nella direzione del gradiente negativo e dove:

q = portata specifica o velocità apparente macroscopica del fluido (vettore) [L³/(T² L²)];

K = conducibilità idraulica del mezzo, misura della capacità del mezzo di trasmettere il fluido [L/T];

h = carico idraulico, costituito dai termini del potenziale di pressione e di posizione [L];

x = coordinata curvilinea della traiettoria o linea di corrente [L].

Il modello matematico che descrive il fenomeno naturale del moto di filtrazione si completa con l'equazione del bilancio di massa, anche detta di continuità, che lega la variazione di massa in un volume di riferimento rappresentativo dell'acquifero ai flussi uscenti ed entranti nel volume stesso, come mostra la seguente figura.



Figura 4-1: Volume rappresentativo

$$\frac{\partial(\rho q_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho q_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho q_z)}{\partial y} = 0$$

Dove:

$$\rho$$
 = densità del fluido [M/L³)];
 q = portata specifica[L³/(T² L²)];

68

Eq. 4-2
W= flusso per unità di volume dato dalle sorgenti o dai prelievi di acqua, W <0 per i flussi in uscita dal sistema idrogeologico e W<0 per i flussi in entrata nel sistema [T⁻¹].

Combinando l'equazione del flusso e quella di bilancio, si ottiene un'equazione differenziale alle derivate parziali (Eq. 4-3) come di seguita espressa:

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x\frac{\partial h}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(K_y\frac{\partial h}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(K_z\frac{\partial h}{\partial z}) + W = S_s\frac{\partial h}{\partial t}$$
Eq. 4-3

Dove:

Kx, Ky e Kz sono i valori di conducibilità idraulica lungo gli assi x, y e z che si assume siano paralleli alle principali direzioni di conducibilità idraulica del sistema [L/T] S_s = immagazzinamento specifico [T⁻¹] t = tempo [T] W= flusso per unità di volume dato dalle sorgenti o dai prelievi di acqua, [T⁻¹].

In condizioni stazionarie, come nel caso di studio del presente lavoro, i parametri non variano nel tempo ed il termine $S_s \frac{\partial h}{\partial t}$ si annulla. Le equazioni matematiche che rappresentano il fenomeno fisico del moto di filtrazione forniscono quindi i valori delle variabili indagate in funzione dei valori dei parametri del sistema e delle condizioni iniziali e al contorno, come mostra lo schema della figura seguente.



Figura 4-2: Schema di elementi che intervengono nella modellazione

4.2 Schema di risoluzione

L'equazione differenziale (Eq. 4-3) può essere risolta con metodi analitici o numerici. Quello seguito in questo studio è l'approccio numerico alle differenze finite. Questo avviene a seguito dell'approssimazione delle derivate parziali con le differenze sia nello spazio sia nel tempo (Δx , Δt).

La derivata prima, ricavata dalla formulazione in serie di Taylor della variabile h, attraverso l'approssimazione delle differenze finite diventa, per la variabile tempo:

$\frac{\partial h}{\partial t} = h' \P_i \gg \frac{h_{i+1} - h_i}{\Delta t}$	Eq. 4-4: (differenza "in avanti")
$\frac{\partial h}{\partial t} = h' \P_i \gg \frac{h_{i-1} - h_i}{\Delta t}$	Eq. 4-5: (differenza "all'indietro")
$\frac{\partial h}{\partial t} = h' \P \Rightarrow \frac{h_{i+1} - h_{i-1}}{2\Delta t}$	Eq. 4-6: (differenza "centrata")

Le tre approssimazioni alle differenze finite (in avanti, all'indietro e centrata) costituiscono rispettivamente uno schema di risoluzione esplicito, uno implicito e uno definito box (Crank-Nicholson).

Lo schema numerico, derivante da una delle tre approssimazioni sopra definite, si completa esprimendo in forma discreta anche le condizioni iniziali e al contorno. La risoluzione di tale schema avviene con un metodo iterativo, la cui stabilità risulta condizionata dalla scelta del valore dei parametri idrodinamici e dei parametri della discretizzazione (K, Δx , Δt). La stabilità è condizione necessaria e sufficiente affinché uno schema numerico converga, nel caso esso sia consistente² e che discretizzi un problema ai valori iniziali e al contorno ben posto (lemma di Lax-Milgram).

La risoluzione del sistema numerico fornisce i valori di carico idraulico distribuito per ciascun punto del dominio di calcolo discretizzato. Le condizioni iniziali e al contorno devono essere definite lungo i bordi del dominio di studio e in tutti quei punti dove sono presenti influenze esterne sul sistema, quali fiumi, pozzi, tratti d'alveo perdenti, etc.

I criteri per definire le condizioni al contorno e quelle iniziali sono legati alla topografia e all'assetto idrogeologico dell'area di studio. Questi aspetti possono portare all'individuazione di limiti come strati impermeabili, superfici piezometriche controllate dalle acque superficiali, aree di ricarica o recapito, flussi entranti lungo i confini degli acquiferi, etc. Una volta individuati i limiti, la definizione delle condizioni al contorno nel processo di modellazione è rappresentata da una particolare formulazione matematica che specifica appropriate condizioni idrauliche a ciascuno di essi, come sintetizzato nella tabella della Figura 4-3. Tali condizioni sono di tre tipi:

² Uno schema numerico è consistente se rappresenta il sistema di partenza a meno di un errore che può essere reso piccolo quanto si vuole

- il tipo 1 o di *Dirichlet* : è detta anche a carico costante dove il carico idraulico viene imposto come noto;
- il tipo 2 o di *Neumann*: è detta a flusso imposto dove condizioni di flusso entranti o uscenti dal modello sono specificate. La condizione al contorno a flusso nullo è una condizione di tipo 2 dove il flusso in uscita e in ingresso è zero;
- il tipo 3 o di *Cauchy*: è detta a flusso dipendente, dove il flusso entrante o uscente dipende da un carico imposto. Questo tipo di condizione al contorno è di tipo misto tra il tipo 1 e il tipo 2.

Boundary type and name	Formal Name	Mathematical designation
Type 1 Specified head	Dirichlet	h(x,y,z,t) = constant
Type 2 Specified flow	Neumann	$\frac{dh(x,y,z,t)}{dn} = \text{constant}$
Type 3 Head-dependent flow	Cauchy	$\frac{dh}{dn}$ + ch = constant (where c is also a constant)

Figura 4-3: Classificazione matematica dei tipi di condizioni al contorno (Reilly, 2001)

4.3 Protocollo operativo

Anderson and Woessner (1992) suggeriscono un protocollo di modellazione che stabilisce i passaggi logici fondamentali da seguire per la buona riuscita del modello stesso. Questo protocollo è stato migliorato da Refsgaard (2007) ed è riportato in Figura 4-4.



Figura 4-4: Protocollo di modellazione (Refsgaard, 2007)

Le prime fasi inserite nel diagramma a blocchi riguardano la definizione degli obiettivi che si vogliono raggiungere. Questa fase indirizzerà le scelte delle fasi successive, perché determinerà il grado di approssimazione che si vuole raggiungere. La fase di definizione del *modello concettuale*, sebbene sembri la più scontata, è quella più importante, in quanto un errore nella definizione del modello inficia il risultato stesso della modellazione. Il modello concettuale è la rappresentazione schematica e semplificata dell'acquifero che s'intende modellare. Per sviluppare il modello concettuale bisogna aver definito e conoscere i dati geologici e idrogeologici del sistema (Figura 4-5).



Figura 4-5: Trasformazione dei dati geologici in unità idrostratigrafiche inserite nei modelli (Anderson & Woessner, 1992).

La scelta del codice di calcolo è giustamente posta dopo la definizione del modello concettuale, in quanto il codice si basa su leggi fisiche che possono essere applicate al modello concettuale che è stato definito. Scelto o realizzato il codice di calcolo la fase successiva prevede la "costruzione" del modello in cui si definisce la discretizzazione spaziale e temporale del domino di studio, si inseriscono le condizioni al contorno e i valori dei parametri idrodinamici.

La fase di "*performance criteria*", rappresenta la fase in cui si definiscono i *livelli di approssimazione* e i quindi il "campo di variabilità accettabile per l'errore", cioè di quanto si ritiene accettabile lo scostamento tra i risultati delle simulazioni e le misure reali delle variabili del modello.

La fase di calibrazione è quella in cui si correggono i valori dei parametri del modello, per ridurre al minimo gli errori tra i valori delle variabili misurati sperimentalmente (definiti *target*, ovvero valori obiettivo) e quelli calcolati dal modello. In questa fase è importante effettuare anche un'analisi di sensibilità dei parametri in modo tale da valutare quali siano quelli che gravano maggiormente sull'incertezza dei risultati.

La fase di validazione ha lo scopo di validare il modello e la sua calibrazione, ossia si verificano i risultati delle simulazioni del modello calibrato secondo il criterio di minimizzare gli errori tra i valori simulati e quelli calcolati, ma implementando il modello con dati di input e di *target* diversi da quelli precedentemente usati per la calibrazione. In questo modo si valuta l'accuratezza della predizione del modello.

L'ultima fase, dopo la presentazione dei risultati del modello, è quella di *"postaudit"*, che si applica a distanza di tempo con dei nuovi set di dati, per validare nuovamente il modello.

In questo studio il protocollo è stato seguito fino alla fase di calibrazione, poiché non si hanno a disposizione dati per sviluppare anche la fase di validazione.

4.4 Modello concettuale dei Monti Lepini e della Pianura Pontina

4.4.1 Criteri generali

Lo schema di circolazione idrica sotterranea, illustrato nel capitolo 3, rappresenta il modello concettuale *preliminare* che può essere ulteriormente rivisto e semplificato. Lo sviluppo del modello concettuale deve seguire un processo che cerchi di schematizzare e mettere insieme elementi del processo fisico e caratteristiche idrogeologiche evidenti confutate con dati sperimentali. Deve essere rispettato il principio della parsimonia ("*the principle of parsimony*"), secondo cui il modello iniziale è un modello semplice che eventualmente si arricchisce nel corso dello studio (Hill, 1998).

4.4.2 Ipotesi di mezzo poroso equivalente e modello concettuale di studio

In questo lavoro le analisi idrogeologiche condotte hanno evidenziato la presenza di due acquiferi, quello carsico e fratturato dei calcari e quello terrigeno delle coperture quaternarie della pianura. In particolare per l'acquifero dei calcari le analisi di caratterizzazione idrodinamica delle sorgenti basali appartenenti a questo acquifero, hanno messo in evidenza una relazione lineare della portata con il livello piezometrico della falda stessa (2.3.4) questa linearità dimostra di fatto la legge di Darcy (Mangin, 1970). Questo significa che anche negli acquiferi carsici, come può essere il caso dei Monti Lepini, l'idrodinamica sotterranea non si imposta preferenzialmente in una rada maglia di canali carsici e/o fessure beanti, bensì in una fitta rete di micro e mesofessure in cui si collochino eventualmente anche canali carsici e fessure beanti. In tal caso anche la presenza di un carsismo epigeo ed ipogeo non inficia la validità di Darcy, almeno per l'analisi del deflusso idrico sotterraneo alla scala di bacino, pertanto anche gli acquiferi fessurati e carsificati possono essere considerati come dei "porosi equivalenti", ossia di acquiferi continui in cui le acque sotterranee defluiscono, almeno alla scala di bacino, in regime laminare (Bear, 1993).

Il modello concettuale definito è quello dello schema di circolazione del paragrafo 3.1.5, in cui la dorsale carbonatica ricarica sia lateralmente sia dal basso la Pianura Pontina, la quale scarica le sue

acque verso il mare. Il dominio del modello ha come limite superiore la superficie topografica e come limite inferiore un piano arbitrario posto alla profondità di -500 m slm, la quale è assunta come profondità limite di interesse dei deflussi che dalla dorsale proseguono verso la pianura e inoltre si ipotizza che i possibili scambi con acquiferi più profondi siano solo di tipo gassoso pertanto non contribuiscono al bilancio di massa delle acque del dominio indagato.

I dettagli sulle unità idrostratigrafiche del dominio, sulle condizioni iniziali e al contorno saranno dettagliatamente descritte nei paragrafi successivi.

4.5 Scelta del codice di calcolo

L'ipotesi di base, di considerare l'acquifero dei calcari come un acquifero che ha comportamento alla circolazione di mezzo continuo e poroso, permette di poter scegliere come software di calcolo GwVistas5.41[®] che implementa modelli matematici/numerici con il codice di calcolo MODFLOW 2000 e MODFLOW 2005 che risolve il sistema di equazioni applicabili ai mezzi porosi (Eq. 4-2). Questo codice di calcolo, che è la versione successiva al codice MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988) simula i deflussi sotterranei in condizioni stazionarie e transitorie. Il risolutore scelto per il modello deli Monti Lepini e della Pianura Pontina e il *Preconditioned Conjugate-Gradinet Package*. Questo risolutore (solver) utilizza il calcolo iterativo secondo il metodo a Gradiente Condizionato Preconiugato per risolvere simultaneamente le equazioni prodotte dal modello. Può essere applicato in condizioni di flusso sia lineare e sia non-lineare. Permette di selezionare un numero massimo di *Outer Iterations* entro il quale se il calcolo non è andato a convergenza ferma la simulazione. Il numero di iterazioni da definire varia a seconda della risoluzione che si vuole raggiungere e del grado di linearità dell'equazione da risolvere.

4.6 Costruzione del modello

4.6.1 Dominio del modello

Il dominio del modello è quello corrispondente ai limiti dell'area di studio (circa 895 km²) del "Progetto Monti Lepini" che è quello visto nei capitoli di inquadramento ambientale. Esso è stato suddiviso in due *layer*, dotati di *top* e *bottom*, che rispettivamente rappresentano il tetto e il letto dell'unità idrostratigrafica schematizzata attraverso i *layer*. Il *top* del *layer 1* corrisponde alla topografia (DEM della Regione Lazio con celle di 20 m) e il top del *layer 1* corrisponde al tetto dei calcari sotto i depositi quaternari. Il *bottom* del *layer 1* corrisponde al tetto del *layer 2* il *bottom* del *layer 2* corrisponde ad un piano posto a profondità -500 m (Figura 4-6). Il numero di celle attive totali sono 79466 di 150 m per lato per un numero di righe e di colonne rispettivamente di 322 e 283.



Figura 4-6:Immagini delle superfici di top e di bottom del layer 1 e del layer 2

Il top del layer 2 è in parte una superficie fittizia, perché è reale solo nella parte corrispondente alla Pianura Pontina, mentre, in corrispondenza della dorsale questa superficie ha delle quote fittizie tali da non creare intersezioni con il top del layer 1 (la topografia) e da non avere spessori nulli del layer 1.



Figura 4-7: Sezione del modello numerico in corrispondenza della riga 148

4.6.2 Parametri idrodinamici di modello

Il modello implementato è un modello simulato in condizioni stazionarie, pertanto gli unici parametri idrodinamici utilizzati sono le permeabilità idrauliche, i cui valori sono considerati omogenei nelle aree a diverso comportamento idraulico.

Le aree a diversa permeabilità idraulica sono cinque (Figura 4-8: a e b), di cui quattro nel layer 1 e 1 nel layer 2.Figura 4-8 Queste aree corrispondono prevalentemente ai diversi complessi, dettagliatamente indicati nel paragrafo §3.1. In particolare le due zone di pianura (1 e 2) corrispondono ai due complessi definiti in: complesso dei depositi vulcanici e travertinosi e complesso dei depositi argillo-sabbiosi della Pontina .Le aree 3 e 4 corrispondono al complesso dei calcari distinti per layer, e infine l'area 5 corrisponde a quelle aree che nella carta geologica (§2.2) sono state indicate come depositi di versante.



Figura 4-8: zone a diversa conducibilità idraulica del layer 1 (a) e del layer 2 (b)

I valori iniziali prima della calibrazione sono riportati in tabella tabella 4-1, essi sono valori provenienti da prove condotte su fori nell'area di studio (2.3.3) e da dati bibliografici (Celico, 2002; Taviani, 2011).

Descrizione della zona	Range di conducibilità idraulica (m/s)	Valore iniziale kx (kx=ky) (m/s)	Valore iniziale kz (m/s)
Zona 1 : area dove del complesso delle formazioni vulcanico-travertinose	1*10 ⁻³ ÷1*10 ⁻⁷	5 *10 ⁻⁶	5 *10 ⁻⁷
Zona 2 : area dove del complesso delle formazioni argillo-sabbiose	1*10 ⁻⁴ ÷1*10 ⁻⁸	5 *10 ⁻⁷	5 *10 ⁻⁸
Zona 3: area dove sono presenti i calcari affioranti del layer 1	1*10 ⁻¹ ÷1*10 ⁻⁵	$6*10^{-4}$	$6*10^{-4}$
Zona 4: area dove sono presenti calcari sommersi del layer 2	$1*10^{-1} \div 1*10^{-5}$	$1.5*10^{-4}$	$6*10^{-4}$
Zona 5: area dove sono presenti depositi di versante nel layer 1	1*10 ⁻¹ ÷1*10 ⁻⁵	6*10 ⁻³	6*10 ⁻³

tabella 4-1:Valori inziali di conducibilità idraulica

4.6.3 Condizioni al contorno

Di seguito sono esposte le condizioni al contorno inserite nel modello.

4.6.3.1 Carico costante (Dirichlet)

Per il layer 1 le condizioni di carico costante sono state imposte alle celle in corrispondenza del limite ovest del modello. Questo carico è stato impostato in base ai valori estrapolati dalla superficie piezometrica, elaborata nella campagna di rilevamento di febbraio-giugno 2008 (Figura 4-9).



Figura 4-9: Condizione di carico costante "Costante Head - CH" per il layer 1

4.6.3.2 Flusso imposto (Neumann)

Per i layer 1 e 2 sono stati imposti delle condizioni di flusso nullo sui restanti bordi del modello che non hanno carico imposto. Rispetto allo schema di circolazione del complesso dei calcari esposto nel paragrafo 3.1.1, il limite *A* (Figura 3-1), che rispettivamente sono i limiti a flusso aperto di incerta interpretazione dello scambio della dorsale con la parte settentrionale della paleovalle del F. Sacco è stato per semplificazioni escluso da possibili scambi del dominio indagato verso l'esterno ed quindi nel modello trasformato come limite a flusso nullo. Questa semplificazione è legata alla mancanza di dati piezometrici o di flusso da usare nella fase di calibrazione del modello.

4.6.3.3 Flusso dipendente (Chauchy)

Le condizioni al contorno di tipo Chauchy assegnate al modello sono relative sia al Flusso dipendente dal carico (General Head Boundary-GHB) inserite nel layer 1 e nel layer 2 (Figura 4-10), sia ai dreni inseriti nel layer 1 (Figura 4-11). La condizione di dreno può essere assegnata alle celle del modello che corrispondono alle aree dove si hanno condizioni di drenaggio della falda (corsi d'acqua, sorgenti, ecc.).

La condizione di GHB nel layer 1 è stata imposta al margine settentrionale del modello, al confine con l'unità vulcanica dei Colli Albani, prendendo come riferimento di carico l'alto piezometrico pari a 150 m s.l.m. a distanza di 5 km dal limite dell'area di studio. Il valore di conducibilità idraulica di primo tentativo è stato posto pari a $1*10^{-6}$ m/s, paragonabile al valore di conducibilità idraulica posto per la zona 1 (tabella 4-1) corrispondente al complesso dei depositi vulcanico-travertinosi. La condizione di GHB nel layer 2 è riferita al margine sud occidentale del modello prendendo come riferimento il carico imposto di 0 m s.l.m. dovuto alla presenza del Mar Tirreno, distante circa 15 km dall'area di studio. Il valore di conducibilità idraulica di primo tentativo è stato posto pari a 1*10⁻⁴ m/s, confrontabile con quello imposto per la zona 4 dei calcari del layer 2.



Figura 4-10: Condizione di GHB per il layer 1 e per il layer 2

I dreni del layer 1 sono di seguito elencati:

- Quello indicato come Drain reach 1 è l'area sorgiva del gruppo Ninfa
- Quello indicato come Drain reach 2 è l'area sorgiva del gruppo Cavata e Cavatella
- Quello indicato come Drain reach 3 è l'area sorgiva del gruppo Sardellane
- Quello indicato come Drain reach 4 è l'area sorgiva del gruppo Laghi del Vescovo
- Quello indicato come Drain reach 0 corrisponde al reticolo artificiale a scolo meccanico del bacino dell'idrovora Mazzocchio, Striscia e Gricilli.

Il dreno reach 0 è stato introdotto per considerare la presenza di un drenaggio artificiale della falda in una zona la cui quota topografica è sotto il livello del mare (§2.1).



Figura 4-11: Dreni inseriti nel modello

4.6.4 Ricarica

La ricarica inserita nel modello è l'infiltrazione efficace distribuita derivante dal calcolo definito nel paragrafo 3.3.2; ossia è stato inserito il grid derivante dall'infiltrazione efficace media degli anni 2005-2010 Figura 3-8 per un volume annuo pari a 448955865 ($m^3/anno$), corrispondente a circa 15 m^3/s .

4.6.5 Prelievi

Nel paragrafo 3.3.3 sono stati presentati i volumi dei prelievi. Questi volumi devono essere inseriti all'interno del modello come pozzi di prelievo ossia come *well*. Il dato distribuito sul bacino comunale o sulla sezione censuaria è stato trasformato in dato puntuale, ottenendo una serie di *pozzi fittizi* che corrispondono ai baricentri di questi poligoni che rientrano nell'area di studio (limiti comunali per l'uso civile³ e l'uso zootecnico; limiti delle sezioni censuarie per l'uso industriale). Il dato distribuito del fabbisogno irriguo è stato inserito attraverso una serie di *punti fittizi* che corrispondono a celle quadrate di lato 1000 m, ottenute riclassificando il fabbisogno irriguo spazializzato su celle quadrate di lato 100 m. Questi punti sono inseriti in maniera omogenea su tutta la piana, dove il fabbisogno è maggiore di zero, tranne che nel settore meridionale della pianura dove il C.B.A.P. gestisce le acque del reticolo artificiale. In particolare i punti fittizi non ricadranno nella zona dei bacini idrografici che sono a scolo meccanico, perché per questa porzione di territorio sono stati inseriti i dreni che corrispondono al drenaggio delle acque sotterranee ad opera dei canali artificiali.

Di seguito si riporta un'immagine dell'ubicazione dei pozzi inseriti nel modello.

³ Per l'uso civile, alcune dei pozzi inseriti sono fittizi, altri sono pozzi reali corrispondenti ai principali pozzi dell'A.T.O. 4 (§3.3.3.1)



Figura 4-12: Mappa dei pozzi fittizi che rappresentano i prelievi

A ciascun pozzo fittizio è stata associata una profondità fittizia ricavata da un *grid delle profondità dei* pozzi reali presenti nell'area di studio. Questo grid è stato calcolato a partire dai dati di profondità ricavati dal database degli archivi delle concessioni della Provincia di Latina. All'interno del modello numerico la lunghezza del tratto finestrato (bottom screen – top screen)

abbinato a ciascun pozzo, corrisponde alla profondità totale del pozzo, questo coerentemente a quanto normalmente avviene in questo territorio dove il gran numero dei pozzi ha tecniche costruttive invasive che mettono in comunicazione gli acquiferi dell'area in cui sono ubicati (Alimonti, 2007)

4.7 Calibrazione

Per calibrazione si intende quel processo, attraverso il quale vengono riassegnati nuovi valori al set di parametri del modello per ottenere il miglior adattamento (*fitting*) tra valori osservati e valori calcolati (riprodotti dal modello). Per valori osservati, si intendono quei valori misurati direttamente in situ, chiamati anche *target*. Questi possono riguardare i valori di carico piezometrico e i valori di flusso delle acque sotterranee. Il processo di calibrazione può essere condotto con approccio *trial & error* attraverso il quale, mediante iterazioni successive, i valori dei parametri vengono modificati fino a ridurre la differenza tra i valori osservati e quelli calcolati. Un altro approccio, seguito in questo lavoro, consiste nella modellazione inversa, ossia il processo di calcolo che, a partire dai risultati osservati, valuta la soluzione migliore in modo tale da minimizzare gli scarti quadratici medi dei valori calcolati. In questo caso la stima dei parametri avviene tramite una funzione obiettivo, ponderata ai minimi quadrati, che viene minimizzata rispetto ai valori dei parametri usando un metodo di Gauss_Newton modificato.

La funzione obiettivo, che è una regressione non lineare degli scarti quadrati medi dei valori calcolati rispetto ai target, è ponderata in base a pesi stabiliti in base all'ubicazione e all'importanza relativa dei target stessi.

In questo lavoro il codice di calcolo usato per la calibrazione è il PEST (Parameter ESTimation), che è uno strumento inserito in GwVistas5.41[®].

4.7.1 Selezione dei target di calibrazione

Per il processo di calibrazione sono stati usati sia target di carico e sia target di flusso.

I target di carico, imposti per l'acquifero multistrato della piana e per l'acquifero carbonatico (area della dorsale), corrispondono ai valori di carico piezometrico, misurati in foro durante le ultime campagne idrogeologiche eseguite durante il periodo 2008-2009 (§ 2.3), e ai valori di carico medio dei piezometri regionali installati durante il "progetto M. Lepini". In particolare sono stati scelti quei pozzi che sono stati rimisurati in almeno tre delle quattro campagne piezometriche, per poter prendere in considerazione un dato maggiormente certo. Per l'acquifero carbonatico in pressione i valori di target presi si riferiscono al piezometro "Valle" e ad alcuni pozzi misurati dalla Cassa per il Mezzogiorno negli anni Settanta. L'utilizzo di questi ultimi dati si è reso necessario perché non si hanno dati più aggiornati.

I target di flusso, invece, si riferiscono alle misure di portata in alveo dei principali gruppi sorgivi basali della dorsale lepina. Tali misure sono state effettuate durante il "Progetto Monti Lepini" ed utilizzate anche per l'analisi di regressione delle curve caratteristiche delle sorgenti (§2.3.4).Un altro target di flusso utilizzato per la calibrazione riguarda le tre idrovore della pianura, che come già precedentemente detto sono tutte tre concentrate nella parte meridionale del modello. Per queste idrovore si individua un unico punto di recapito che coincide con l'ubicazione dell'Idrovora Mazzochhio (la più grande delle tre) alla quale si attribuisce una portata complessiva trattata pari a 0.44 m³/s. Di seguito è riportata un'immagine che illustra l'ubicazione dei target per layer di riferimento.



Figura 4-13: mappa dei target utilizzati per la calibrazione

4.7.2 Natura e origine dell'incertezza

Un elemento da definire prima della calibrazione è il grado di attendibilità che il modello calibrato deve avere. Questo passaggio rappresenta in altre parole la definizione del grado di incertezza del modello.

Per definire l'incertezza del modello è comunque necessario fissare il valore di incertezza o errore dei target usati per la calibrazione che si ritiene ammissibile. Sarà poi il valore di incertezza dei target ad essere usato per stimare il grado di attendibilità dei risultati delle simulazioni.

Il valore della deviazione standard degli scarti dei risultati del modello, dovrà essere confrontabile con il valore di incertezza dei target.

Per fissare l'errore dei target di carico, in accordo con quanto definito da Sonnenborg et al. (2003) bisogna considerare diversi elementi, che insieme concorrono a determinarne il valore numerico. In particolare nel caso in esame tali elementi sono:

- Errori di misura associati all'accuratezza dello strumento utilizzato, alla precisione della definizione della quota del "boccapozzo" e del piano campagna e ancora errori dovuti

all'effetto di "disturbo" della misura dovuto alla presenza di pompaggi nella zona limitrofa al pozzo misurato. Questi elementi, si assume, diano un errore compreso tra $0.05\div6$ m e quindi come valore medio si assume $E_1=3.025$ m⁴

- Errori dovuti alla necessità di utilizzare valori medi delle misure, riferite a periodi stagionali diversi, per la modellazione in stato stazionario. Nel caso in esame avendo a disposizione quattro campagne di misura si è notato che, durante il ciclo stagionale, la variabilità del livello è di 6 m. L'errore dovuto a questo fattore è considerato normalmente come *E*₂ = Δ*h*/2 dove Δh è la variabilità stagionale del livello piezometrico. Pertanto E₂=3 m.
- Errori di interpolazione legati alla variazione della superficie topografica che viene mediata all'interno della cella, comportando una discrepanza tra il valore realmente osservato e quello associato alla cella. Normalmente questo errore viene stimato a partire dal gradiente idraulico moltiplicato per la metà della dimensione della cella della discretizzazione del modello. Nel caso in esame il gradiente idraulico (*J*) sulla piana ha valore medio di 0.0018 e sulla dorsale di 0,0032 pertanto considerando un gradiente medio di 0.0025 si ha un

errore
$$E_3 = \frac{\Delta x}{2} \cdot J$$
 che corrisponde a $E_3 = 0.1875$ m

L'errore quindi da fissare come valore di incertezza ammissibile dei dati di target di carico è dato dalla seguente formula:

$$\sqrt{\sum s^2}$$
 Eq. 4-7

Dove

 $s^2 = E_1^2 + E_2^2 + E_3^2$

In questo caso $\sqrt{\sum s^2} = 4.42 \text{ m}$

Per quanto riguarda invece i target di flusso, poiché sono anch'essi affetti dagli errori di misura come quelli del carico idraulico, si adotta una stima dell'incertezza basata sulla variabilità dei dati misurati. Si può fissare come incertezza del target di flusso il 20 % della variabilità media delle misure di portata misurate nel periodo di osservazione 2008-2009. Analizzando i dati di flusso dei gruppi sorgivi indagati, si riscontra una variabilità media dei dati pari a 1,99 m³/s. Pertanto $E_{flusso} = 0,40 \text{ m}^3/\text{s}.$

L'obiettivo della calibrazione sarà quello di minimizzare la deviazione standard degli scarti tra i valori osservati e i valori simulati, sia per i carichi piezometrici sia per i dati di flusso, fino al raggiungimento di un numero confrontabile rispettivamente con 4,42 m e con 0.40 m³/s. In questo

⁴ Il valore massimo di questo range si riferisce agli errori che si possono riscontrare nelle misure dei livelli statici dei pozzi della dorsale carbonatica

modo si evita l'amplificazione dell'errore il cui valore assoluto è fissato nei limiti ritenuti ammissibile come detto in precedenza.

4.7.3 Risultati di primo tentativo

Il modello, costruito come detto nei paragrafi precedenti, mostra per il primo layer una buona corrispondenza dell'andamento della superficie piezometrica nel settore settentrionale della Pianura Pontina, con un deflusso principale da NO verso SE e un drenaggio delle acque della dorsale verso i principali gruppi sorgivi della piana. La zona meridionale della Pianura Pontina presenta delle zone allagate (zone in celeste) con carichi piezometrici di circa 10 m sopra il livello del mare. L'analisi degli scarti mostra delle zone fortemente in disaccordo tra i valori di carico e di flusso riprodotti ed i valori di target, soprattutto nella zona settentrionale della piana, in prossimità della città di Cori e per il flusso in uscita dalla sorgente di Ninfa. Valori elevati di scarti si hanno nelle zone di allagamento che corrispondono alla zona a sud della città di Latina (Figura 4-14)



Figura 4-14: mappe della superficie piezometrica e dei residuali sei target del layer 1

Per quanto riguarda il layer 2, la superficie piezometrica riprodotta evidenzia il deflusso delle acque verso i principali gruppi sorgivi e una area con carico piezometrico (area in celeste) superiore al piano campagna di circa 5 m s.l.m.. Quest'ultimo risultato è in linea con lo schema dell'acquifero dei calcari in pressione (Figura 4-15).



Figura 4-15: mappe della superficie piezometrica e dei residuali sei target del layer 2

Di seguito sono riportati gli indicatori statistici della simulazione (Figura 4-16). Come si vede la deviazione standard dei residuali, *Residual Standard Dev.*, (differenza tra il valore calcolato e quello osservato) è maggiore dell'errore massimo ammissibile sia per i carichi piezometri (Figura 4-16 a) e sia per i flussi (Figura 4-16 b).

Target Statistics		×	Target Stati	stics		
Target Residual	Name		Target	Residual	Name	
0.40 1.66 -0.50 -0.19 0.50 0.31 0.50 2.23 0.70 -0.36 -0.80 -1.79 1.00 0.28 1.00 0.81 1.00 0.81	MG401140P8 c82 23975 MG401130P2 c76 ST401130P5 c79 C75 c75	~	-0.44 -1.10 -1.40 -2.50 -4.80	2.73 0.02 1.07 -1.55 -1.49	idrovore Ninfa Laghi_del_Vescovo Sardellane Cavatella	
Residual Mean Residual Standard Dev. Absolute Residual Mean	= 0.19 = 7.36 = 5.09	Close	Residual M Residual SI Absolute R	ean andard Dev. esidual Mean	= 0.16 = 1.62 = 1.37	Close
Residual Sum of Squares RMS Error	=6.02e+003 =7.37		Residual S RMS Error	um of Squares	=1.32e+001 =1.62	
Minimum Residual Maximum Residual Range of Observations	= -29.36 = 24.85 = 61.90		Minimum R Maximum R Range of O	esidual Iesidual Ibservations	= -1.55 = 2.73 = 4.36	
Scaled Std. Dev. Scaled Abs. Mean Scaled RMS	= 0.119 = 0.082 = 0.119		Scaled Std. Scaled Abs Scaled RM	. Dev. Mean S	= 0.371 = 0.315 = 0.373	

Figura 4-16:Indici statistici del modello

4.7.4 Risultati finali

I risultati finali derivano da una procedura iterativa rappresentata nella seguente figura (Figura 4-17). Tale procedura si basa essenzialmente sul confronto tra la deviazione standard dei residuali (differenza tra il valore calcolato e quello osservato) e l'errore massimo ammissibile.



Figura 4-17: Procedura di calibrazione

La procedura di calibrazione è stata svolta mediante l'uso di PEST, impostato con i valori dei pesi⁵ da attribuire alla funzione obiettivo, descritta nel capitolo 4.5, riportati nella tabella 4-2: Valori dei pesi dei target adottatitabella 4-2. Poiché questo 1° modello non ha rispettato l'errore massimo ammissibile sia per i carichi piezometrici e sia per i flussi (Figura 4-18) si intraprende una nuova calibrazione, indicata in figura con il percorso 1, in seguito alla modifica "strutturale" del modello. Tale modifica consiste nell'introduzione di quattro nuove aree a differente permeabilità idraulica sia verticale e sia orizzontale (Figura 4-19), che sono le aree di ricarica delle sorgenti ricavate dall'analisi idrogeologica descritta nel capitolo 3.2. Il modello così implementato è stato

⁵ I target sono stati suddivisi in gruppi distinti per layer di appartenenza e per affidabilità della misura

nuovamente calibrato con PEST e di seguito si riportano le mappe della superficie piezometrica calcolata per il layer1 e il layer 2 la mappa dei residuali dei target e gli indicatori statistici di questa nuova calibrazione).

	Tipo di target e layer di appartenenza	Peso dei target
1	Misura di Carico sulla piana (media di tre valori) (Ly1)	7.65
2	Misura di carico sulla piana (media di quattro valori)(Ly1)	4.80
3	Misura di carico sulla piana (Ly2)	11.94
4	Misura di carico sulla dorsale (Ly2)	5.50
5	Misura dei piezometri regionali (Ly2)	16.60
6	Misura dei principali gruppi sorgivi	396.00
7	Misura dei flussi sotteranei sollevate dalle idrovore	400.00

tabella 4-2: Valori dei pesi dei target adottati



Figura 4-18: Indici statistici del 1º modello calibrato

	Zone Database Information	x
2	Zone Database Hydraulic Conductivity Property Zone Values Stress Period Number: 1 (Recharge/ET Only) Number of Zones 9 Update	
	Kx Ky Kz	+
	6 0.00015 0.00015 0.00150584902 0	
6	7 0.0001 0.0001 0.00099989099 0	
	8 0.0002 0.0002 0.00201070411 0	
	9 0.00015 0.00015 0.00149823374 0	
	10	
	11	
	12	<u>+</u>
	OK Annulla Applica	?

Figura 4-19: Nuove aree e nuove conducibilità idrauliche

Target Statistics		×		Target Statis	tics		×
Target Residual	Name			Target	Residual	Name	
0.40 1.70 -0.50 -0.04 0.50 0.88 0.50 2.25 0.70 0.09 -0.80 -2.13 1.00 0.37 1.00 0.33 1.00 1.46	MG401140P8 c82 23975 MG401130P2 c76 ST401130P5 c79 C75 C75	•		-0.44 -1.10 -1.40 -2.50 -4.80	3.37 0.36 0.18 -0.85 -1.43	idrovore Ninfa Laghi_del_Vescovo Sardellane Cavatella	
Residual Mean Residual Standard Dev. Absolute Residual Mean	= 1.03 = 6.72 = 4.07	Close		Residual Me Residual Sta Absolute Re	an andard Dev. sidual Mean	= 0.33 = 1.66 = 1.24	Close
Residual Sum of Squares RMS Error	=4.95e+003 =6.80			Residual Sur RMS Error	m of Squares	=1.43e+001 =1.69	
Minimum Residual Maximum Residual Range of Observations	= -16.55 = 50.00 = 61.90			Minimum Re: Maximum Re Range of Ob	sidual esidual oservations	= -1.43 = 3.37 = 4.36	
Scaled Res. Std. Dev. Scaled Abs. Mean Scaled RMS	= 0.109 = 0.066 = 0.110			Scaled Res. Scaled Abs. Scaled RMS	Std. Dev. Mean	= 0.380 = 0.284 = 0.388	
Number of Observations	= 107		a)	Number of O)bservations	= 5	

Figura 4-20: Indicatori statistici del 2° modello calibrato

Gli indicatori statistici, e in particolare le deviazione standard degli scarti (Residual standard deviation), mostrano che c'è stato un peggioramento dei risultati in termini di scostamento dall'errore ammissibile rispetto al 1° modello calibrato, pertanto si è deciso di determinare le aree di ricarica utilizzando il pacchetto MODPATH (Pollock, 1994) per l'analisi dei risultati (*post processing*). Tale pacchetto è in grado di individuare i percorsi di immaginarie particelle che si muovono con il flusso idrico; in particolare, utilizzando la procedura di determinazione chiamata ENDPOINT ANALYSIS⁶, è possibile visualizzare le aree di ricarica dei gruppi sorgivi. I dati inseriti per questa analisi sono:

⁶ Tale procedura determina le celle al cui interno si muovono le particelle che hanno come recapito una zona prefissata

- le particelle fittizie distribuite sul layer 1 immesse solo sulla dorsale (zona 3 della figura Figura 4-8 a) una per ogni cella;
- il tempo di transito, impostato come valore massimo ammissibile per lo stato stazionario.

I risultati di questa analisi sono esposti nella Figura 4-21, da cui emerge che parte delle acque che si infiltrano nella dorsale vanno direttamente sulla pianura senza interessare le emergenze sorgive della dorsale. Queste acque sono quelle che emergono direttamente nei canali di bonifica artificiali.



Figura 4-21: Aree di ricarica dei gruppi sorgivi e dei canali artificiali della pianura a) area di ricarica di Ninfa, b) area di ricarica di Cavata e Cavatella, c) area di ricarica dei canali di bonifica della Pianura, d) area di ricarica di Sardellane, e) area di ricarica dei Laghi del Vescovo, f) implementazione delle nuove aree in GWV.

Le deviazione standard del 3° modello calibrato, ottenuto in seguito all'introduzione delle nuove aree definite attraverso MODPATH, sono riportate di seguito e mostrano che i valori degli indicatori statistici migliorino nuovamente, fino a raggiungere dei livelli di poco dissimili da quelli ritenuti ammissibili. I residuali dei target di flusso analizzati per ciascun gruppo sorgivo, indicano che l'uscita attraverso il dreno 0, che corrisponde a quello delle idrovore, è notevolmente superiore al target. Questo potrebbe indicare che il valore di acque sotterranee stimato attraverso la procedura descritta nel capitolo2.1 sottostima le portate che sono drenate dal reticolo di piana.

Target Statistics		×		Target Statis	tics		×
Target Residual	Name			Target	Residual	Name	
$\begin{array}{ccccc} 0.40 & 1.66 \\ -0.50 & -0.19 \\ 0.50 & 0.36 \\ 0.50 & 2.24 \\ 0.70 & -0.28 \\ -0.80 & -2.02 \\ 1.00 & 0.28 \\ 1.00 & 0.82 \\ 1.00 & 0.82 \\ \end{array}$	MG401140P8 c82 23975 MG401130P2 c76 S1401130P5 c79 C75 C75	•		-0.44 -1.10 -1.40 -2.50 -4.80	2.83 0.40 0.70 -0.43 -1.01	idrovore Ninfa Laghi_del_Vescovo Sardellane Cavatella	
Residual Mean Residual Standard Dev. Absolute Residual Mean	= 0.18 = 4.58 = 3.41	Close		Residual Me Residual Sta Absolute Re:	an ndard Dev. sidual Mean	= 0.50 = 1.31 = 1.07	Close
Residual Sum of Squares RMS Error	=2.25e+003 =4.59			Residual Sur RMS Error	m of Squares	=9.86e+000 =1.40	
Minimum Residual Maximum Residual Range of Observations	= -14.72 = 9.19 = 61.90			Minimum Re: Maximum Re Range of Ob	sidual esidual oservations	= -1.01 = 2.83 = 4.36	
Scaled Res. Std. Dev. Scaled Abs. Mean Scaled RMS	= 0.074 = 0.055 = 0.074			Scaled Res. Scaled Abs. Scaled RMS	Std. Dev. Mean	= 0.301 = 0.246 = 0.322	
Number of Observations	= 107		a)	Number of O	bservations	= 5	

Figura 4-22: Indicatori statistici del 3° modello calibrato

A seguire sono riportati anche i valori dei parametri calibrati e le mappe delle piezometrie e della distribuzione dei residuali dei target di carico. Tale distribuzione mostra che lo scostamento dei risultati del modello dai target è pressoché omogenea sull'intera area.

I valori di carico piezometrico calcolati rispecchiano quelli reali, misurati nelle diverse campagne idrogeologiche descritte nel paragrafo 2.3.1.

Variabile	Conducibilità idraulica m/s
Kx1	2.77E-05
Kx2	7.42E-07
Kx3	1.13E-03
Kx4	1.27E-04
Kx5	4.03E-04
Kz1	9.27E-06
Kz2	4.68E-08
Kz3	5.96E-05
Kz4	7.88E-04
Kz5	1.31E-03
Kx8	5.80E-03
Kx9	1.36E-03
Kx10	4.51E-03
Kz8	5.01E-03
Kz9	1.82E-03
Kz10	1.83E-04
Dr0	2.50E+00
Dr1	7.41E+01
Dr2	7.25E+00
Dr3	7.51E+01
Dr4	4.47E+01
GHc22	3.81E-05
GHc23	1.62E+00

tabella 4-3: Valori dei parametri calibrati del 3°modello



Figura 4-23: Piezometria e residuali dei target del layer 1



Figura 4-24: Piezometria dei residuali dei target del layer 2

Il grafico di Figura 4-25 riporta il bilancio di massa del modello calibrato, dal quale si può dedurre che la portata in uscita dal sistema attraverso i dreni è circa l'80 % della ricarica, diverso dal valore del 70% calcolato con il bilancio idrogeologico esposto nel paragrafo 3.3. Questa differenza, è da imputare al valore incerto delle uscite delle acque sotterranee attraverso i canali di bonifica. Per quanto riguarda i flussi entranti nel sistema attraverso il GHB, posto al limite settentrionale del modello, essi sono pari a circa 0.4 m³/s. Questo flusso corrisponde alla portata di acqua sotterranea proveniente dai Colli Albani.

Il contributo di flusso uscente dal sistema attraverso il GHB posto nel layer 2, pertanto quello che si riferisce ai calcari sommersi e che procede verso il mare è pari a $4,2 \text{ m}^3/\text{s}$.



Mass Balance Summary

Figura 4-25: Bilancio di massa del 3°modello calibrato

5. Discussioni sul modello e Conclusioni

5.1 Considerazioni generali

Il modello messo a punto per questo lavoro è il primo per l'area dei Monti Lepini a comprendere anche il settore pedemontano della Pianura Pontina e cerca di riprodurre, oltre alla piezometria delle falde freatiche e artesiane della pianura e della dorsale carbonatica, i flussi dei principali gruppi sorgivi della dorsale.

Lo studio condotto in questa sede ha cercato di rispettare il criterio della parsimonia per la costruzione del modello numerico, onde evitare che esso risultasse troppo parametrizzato perdendo quindi la capacità di schematizzare la realtà mediante un numero limitato di parametri di cui poter controllare i valori e la variabilità. Tuttavia, la realtà esaminata è effettivamente molto complessa ed articolata, come normalmente accade per i complessi carbonatici a contatto con pianure alluvionali. Di conseguenza, la procedura di calibrazione ed ottimizzazione dei risultati ha richiesto di introdurre nuovi parametri, che rappresentassero la compartimentazione della dorsale carbonatica.

5.2 Analisi dei risultati

L'analisi dei risultati ha lo scopo di valutare la bontà della schematizzazione adottata, in funzione degli obiettivi prefissati per lo studio. Tale valutazione prende in considerazione, da un lato, i valori di taratura dei parametri ottenuti in seguito alla calibrazione, dall'altro lo scostamento dei valori calcolati rispetto a quelli osservati, sia per i carichi sia per i flussi. Poiché l'obiettivo principale prefissato era quello della valutazione degli scambi idrici tra dorsale e pianura, l'attenzione è stata posta maggiormente sui flussi, senza comunque tralasciare l'analisi dei valori delle conducibilità idrauliche adottati.

La calibrazione del modello ha in effetti determinato i valori delle conducibilità idrauliche, che sono risultati differenti da quelli sperimentali. Le aree del dominio dei calcari sono risultate mediamente con una permeabilità equivalente superiore a quella impiegata per le simulazioni di primo tentativo.

Per quanto riguarda invece le aree vulcanico-travertinose e le aree argilloso-sabbiose, esse non hanno dei valori di conducibilità equivalente troppo dissimili da quelli sperimentali impostati inizialmente.

L'aggiunta di nuove aree a conducibilità idraulica differente, inserite per rappresentare le aree di ricarica delle sorgenti, ha migliorato l'attendibilità del modello riducendo la deviazione standard dei residuali sia dei carichi sia dei flussi. Questo risultato avvalora quanto già evidenziato dalle indagini geochimiche e dalle analisi di caratterizzazione idrodinamica delle sorgenti, che hanno evidenziato

la differenza sia qualitativa sia quantitativa delle sorgenti dovuta anche da una marcata compartimentazione della dorsale che induce aree di ricarica differenti per ciascuna sorgente.

La presenza della rete artificiale dei canali soggetti a scolo meccanico è stata determinante per la corretta riproduzione dell'assetto piezometrico dell'area di studio, come d'altra parte avviene nella realtà in cui tale reticolo garantisce il mantenimento della falda al di sotto del piano campagna.

L'analisi dei risultati sui flussi può essere sintetizzata ponendo a confronto i residuali dei target nei diversi modelli, come riportato nella tabella seguente. Complessivamente il 3° modello calibrato mostra un comportamento migliore rispetto agli altri, come si può vedere dai valori del Residual Standard Deviation. La variabilità dei residuali tra una calibrazione e l'altra è giustificata dalla necessità di voler ottenere contemporaneamente residuali minimi sia per i flussi sia per i carichi piezometrici della piana nel layer 1 e nel layer 2.

Gruppi sorgivi e	Modello di	1° modello	2° modello	3° modello
idrovore	primo tentativo	calibrato	calibrato	calibrato
Ninfa	0.02	0.38	0.36	0.40
Cavata e Cavatella	-1.49	-1.32	-1.43	-1.01
Sardellane	-1.55	-1.27	-0.85	-0.43
Laghi del Vescovo	1.07	0.46	0.18	0.70
Idrovore	2.73	2.73	3.37	2.83
			1	1
Residual Standard Deviation	1.62	1.48	1.66	1.31

tabella 5-1: Residuali dei target di flusso nei diversi modelli

Il modello realizzato è quindi da considerarsi di *screening* (Feinstein et al., 2006), ossia un modello che riproduce un sistema di acquiferi a scala regionale, pertanto non è adatto per simulare deflussi sotterranei a scala locale. Esso può essere utilizzato per capire e migliorare le conoscenze dello schema di circolazione, nonché per provare ipotesi di modello concettuale e per individuare le aree dove è necessario approfondire le analisi con nuove informazioni idrogeologiche.

6. Bibliografia

- Accordi, B. (1964). Lineamenti strutturali del Lazio e dell'Abbruzzo meridionali. *Mem. Soc. Geol. It.*, p. 595-633.
- Accordi, G., & Carbone, F. (1988). Carta delle litofacies del Lazio-Abruzzo ed aree limitrofe C.N.R., Prog. Fin. Geod. *Quaderni Ric. Scientifica*, 114 (5).
- Alberti , A., Bergomi, C., Catenacci, V., Centamore, E., Cestari, G., Chiocchini, M., et al. (1975).
 Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 e note illustrative del Foglio 389 Anagni.
 Roma: Serv. Geol. d'It., 42 pp.
- Alimonti, C., Federici, E., & Gazzetti, C. (2011). Bilancio idrico distribuito e usi antropici della risorsa idrica lepina. In P. d. Latina, *Progetto Monti Lepini studi idrogeologici per al tutela e la gestione della risorsa idrica* (p. 143). Roma: Gangemi Editore.
- Alimonti, C., Perotto, C., Gazzetti, C., & Marinucci, E. (2007). *Captazioni e risorsa idrica nel bacino di Mazzocchio*. Roma: Gangemi editore.
- Anderson, M., & Woessner, W. (1992). Applied Groundwater Modellling. San Diego: Academic Press.
- Barbieri, M., Carrara, C., Castorina, F., Dai Pra, G., Esu, D., Gliozzi, E., et al. (1999).Multidisciplinary study of Middle-Upper Pleistocene deposits in a core from the Piana Pontina (Central Italy). *Giornale di Geologia*, 61, 47-73.
- Bear, J. (1993). Modeling flow and contaminant trasport in fracture rocks. *Flow and Contaminant Transport in Fractured Rock. Accademic Press, Inc.*, 1-37.
- Boni, C. (1996). 2° rapporto sulla cosulenza tecnico scientifica relativa all'attività del comitato di coordinamneto dei progetti 29/280 29/281, 29/282 del sistema idrico Pontino. Roma: Amministrazione Provinciale di Latina.
- Boni, C., Bono, P., & Capelli, G. (1986). Schema Idrogeologico dell'Italia Centrale. Mem. Soc. geolo. It., 35.
- Boni, C., Bono, P., Calderoni, G., Lombardi, S., & Turi, B. (1980). Indagine Idrogeologica e geochimica sui rapporti tra ciclo carsico e circuito idrotermale nella Piana Pontina (Lazio Meridionale). *Geologia applicata e idrogeologia*, 15, 203-247. (Serva & Brunamomnte, 2007)
- Bono, P. (2011). Valutazione delle risorse idriche naturalmente rinnovabili, caratterizzazione chimica ed isotopica delle acque sorgentizie e sotterranee, condizioni ai limiti. In Provincia

di Latina, *Progetto Monti Lepini: Studi idrogeologici per la tutela e la gestione della risorsa idrica* (p. 143). Roma: Gangemi Editore.

- Capelli, G., Mazza, R., & Gazzetti, C. (2005). *Strumenti e strategie per la tutela e l'uso complatibile della risorsa idrica nel Lazio-Quaderno di tecniche di protezione ambinetale e protezione delle acque sotterranee n°* 78. Bologna: Pitagora editrice Bologna.
- Carbone, F., Russo, A., & Sirna, G. (1978). Comunità a Coralli e rudiste del Cretacico superiore di Rocca di Cave (Monti Prenestini, Lazio). In Ann. Univ. Ferrara, n.s. sez 9, v. 6, suppl. (p. 199-217). Università di Ferrara.
- Cassa per il Mezzogiorno. (1979). *Censimento dei dati idrogeologici dell'area di intervento del P.S.* 29. Roma: Cassa per il Mezzogiorno.
- Celico, F. (2002). Approccio integrato per la defiinizione delle modalità di flusso in idrostrutture carbonatiche di estensione regionale: i Monti Lepini (Lazio). *Quaderni di Geologia Applicata, 9 1*, p. 19-48.
- Celico, P. (1983). Idrogeologia dei Massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche eLazio meridionali, Abruzzo, MOlise e Campania. In C. p. Mezzogiorno, *Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno- Progetti* speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno 4/2 (p. 225). Roma: Cassa per il Mezzogiorno.
- Chilès , J., & Delfiner, P. (1999). *Geostatics. Modeling Spacial Uncertainty. Series in Probability* and STatistics. WILEY.
- Cocozza, T., & Praturlon, A. (1966). Note geologiche sul Colle Cantocchio (Lepini SW, Lazio). *Geolo. Romana*, 5, p. 323-334.
- Conforto, B., Di Riccio, G., & Sappa, M. (1962). Indagini sulle acque sotterranee dell'Agro Romano e Pontino - Parte seconda: Agro Pontino. Cassa Per il Mezzogiorno.
- Cosentino, D., Cipollari, P., Di Donato, V., Sgrosso, I., & Sgrosso, M. (2002). The Volsci Range in the Kinematic evolution of the northen and southern Apennine orogenic system. *Boll.Soc. Geol. It.Vol. Spec.* n°1, p. 209-218.
- Feinstein, D., Buchwald, C., Dunning, C., & Hunt, R. (2006). Development and application of a screening model for simulating regional ground-Water flow in the St. Croix River Basini, Minnesota and Wisconsis. U.s. geological Survey Scientific INvestigation report 2005-5283 , pp 50.
- Hill, M. C. (1998). METHODS AND GUIDELINES FOR EFFECTIVE MODEL CALIBRATION. WATER-RESOURCES INVESTIGATIONS REPORT 98-4005, p. 90.

Maillet, E. (1905). Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Librairie Sci., A. Hermann, Paris.

- Mangin, A. (1970). Contribution a l'étude des aquiferes Karstiques a partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement. *Annales de Spéléologie. V. 25, no. 3*, p. 581-610.
- McDonald, M., & Harbaugh, A. (1988). A modular Three-Dimensional Finite-Difference grounwater flow model. 06-A1.
- Ministero dei Lavori Pubblici (1934). *Le sorgentiitaliane: elenco e descrizione*. Istituto Poligrafico dello stato, 3, Roma.
- Mouton, J. (1977). Contributo allo studio delle acque sotterranee dell'Agro Romano e Pontino. L'acqua per la Piana Pontina: situazione e prospettiva, (p. 408). Latina.
- Pollock, D. W (1994). User's Guide for MODPATH/MODPATH-PLOT, Version 3: A particle tracking post-processing package for MODFLOW, the U. S. Geological Survey finitedifference ground-water flow model. U. S. GEOLOGICAL SURVEY Open-File Report 94-464. Virginia
- Prampolini, N (1939). La bonifica Idraulica delle Paludi Pontine. Ed. Verdesi, Roma
- Raspa, G., & Bruno, R. (1994). La pratica della Geostatistica non lineare. Il trattamento dei dati spaziali. 170 pp. Ed. Guerini.
- Refsgaard, J., Van der Sluijs, J., Hojberg, H., & Vanrolleghem, P. (2007). Uncertainty in the environmental modelling e a framework and guidance. *Environmental Modelling & Software*,22, 1543-1556.
- Regione Lazio Assessorato all'Ambiente. (2003). Le Grotte del Lazio. Roma.
- Reilly, B. T. (2001). System and Boundary Conceptualization in Ground-water flow simulation. book 3-chapter B8. In U. G. Survey, *Application of hydraulics*. Reston, Virginia.
- Rosa, C. (1995). Evoluzione geologica quaternaria delle aree vulcaniche laziali: confronto tra il settore dei Monti Sabatini e quello dei Colli Albani. Tesi di dottorato di ricerca in Scienze della Terra VII Ciclo. Roma: Università degli studi di Roma "La Sapeinza".
- Soil Conservation Service, H. (1972). National Engineering Handbook, sec. 4. In U. D. Soil Conservation SZervice. Washington, D.C.
- Sonnenborg, T., Christensen, B., Nygaard, P., Henriksen, H., & Refsgaard, J. (2003). Transient modeling of regionale groundwater flow using parametre estimates from steady-state automatic calibration. *Hydrology*, 273, 188-204.
- Tallini, M. (1994). Deformazioni compressive e distensive nelle unità di tetto dei fronti della Valle Latina e della Val Roveto: analisi geometrica, cinematica ed interpretazione strutturale. Tesi di dottorato di Ricerca in Scienze della Terra. Perugia: Università degli studi di Perugia.

Taviani, S. (2011). Application of the Modflow groundwater numerical model to hydrogeological volcanic units_XXIII cicle. Roma.

Wackernagel, H. (1995). Multivariate Geostatics, 256 pp. Springer.