POLITECNICO DI MILANO Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e

Territoriale



Corso di laurea in Environmental and Geomatic Engineering

MODELLAZIONE DELL'INTRUSIONE SALINA NEGLI ACQUIFERI COSTIERI

Relatore: Correlatori: Prof. Luca Alberti Prof. Daniela Ducci Dott. Adolfo Mottola

Tesi di laurea di: Raniero Madonna Matr. 854606

Anno accademico 2016/2017

POLITECNICO DI MILANO Scuola di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale



Master of Science in Environmental and Geomatic Engineering

NUMERICAL MODELING OF SALTWATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS

Supervisor:Prof. Luca AlbertiAssistant Supervisors:Prof. Daniela DucciDott. Adolfo Mottola

Master Graduation Thesis by: Raniero Madonna Matr. 854606

Academic year 2016/2017

Ringraziamenti

INDICE

Iı	Indice delle figure					
A	bstrac	ct	10			
1	In	trusione salina negli acquiferi costieri	13			
	1.1	Teoria dell'intrusione salina: la posizione del cuneo di acqua salina	15			
	1.2	Interfaccia stazionaria	20			
	1.3	Interfaccia dinamica	23			
	1.4	Effetti della variazione del livello piezometrico	23			
	1.5	Pozzi di estrazione in acquiferi costieri	24			
2	М	odelli numerici di flusso e trasporto delle acque sotterranee in acquiferi costieri	27			
	2.1	Tipi di modelli e metodi risolutivi	30			
	2.2	Metodi alle differenze finite	31			
	2.3	Metodi agli elementi finiti	31			
	2.4	Descrizione del codice di calcolo utilizzato: FEFLOW	32			
	2.5	L'approccio allo studio dei problemi di intrusione salina in acquiferi costieri in Feflow	34			
C	ase St	tudy I: l'isola di Nauru	38			
3	De	escrizione dell'area di interesse	38			
	3.1	Geografia e breve descrizione dell'isola	38			
	3.2	Clima e precipitazioni	40			
	3.3	Geologia e geomorfologia	41			
	3.4	Idrogeologia	44			
	3.5	Flusso di falda	48			
	3.6	Approvvigionamento idrico	49			
	3.7	La gestione della risorsa idrica nelle isole del Pacifico	50			
4	М	odello numerico 3D dell'isola di Nauru	53			
	4.1	Discretizzazione orizzontale	53			
	4.2	Discretizzazione verticale	55			
	4.3	Condizioni al contorno	57			
	4.4	Parametri idrogeologici	59			

5	Ca	mbiamenti climatici e intrusione salina: risultati delle simulazioni	
:	5.1	Vulnerabilità dell'acquifero di Nauru	
-	5.2	Scenari di cambiamento climatico simulati	63
:	5.3	Risultati delle simulazioni	67
Ca	se St	udy II: il corpo idrico Piana del Volturno-Regi Lagni	
6	Il o	corpo idrico sotterraneo Piana Volturno- Regi Lagni	
(5.1	Caratteristiche geologiche e geomorfologiche	
(5.2	Caratteristiche idrogeologiche del CIS della Piana del Volturno – Regi Lagni	
(5.3	Schema di circolazione idrica sotterranea	
(5.4	Caratterizzazione dello stato delle risorse idriche	
7	Il ı	modello idrogeologico concettuale dell'area di studio	
,	7.1	Scelta del dominio di interesse modellistico	
,	7.2	Analisi ed elaborazione delle sezioni idrogeologiche	
,	7.3	Mappe piezometriche	
,	7.4	Parametri idrogeologici	
8	Il ı	modello numerico 3D	
:	8.1	Discretizzazione orizzontale	
;	8.2	Discretizzazione verticale	
:	8.3	Le condizioni al contorno	
:	8.4	Calibrazione del modello numerico	
;	8.5	Osservazioni conclusive e sviluppi futuri	
9	Co	onclusioni	
10		Bibliografia	
11	Sit	ografia	

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1 Formazione del cuneo salino	. 13
Figura 2 Zona di transizione tra acqua dolce e salata e interfaccia teorica	. 14
Figura 3 Posizione dell'interfaccia teorica tra i carichi di acqua dolce (hd) sopra il livello del mare e del livello	del
mare (h _s) secondo la teoria di Ghyben Herzberg. (Bear 1972)	. 16
Figura 4 Linee equipotenziali curvilinee nella zona in prossimità della costa.	. 17
Figura 5 Rete di flusso in un acquifero costiero in assenza di zona di transizione	. 17
Figura 6 Due piezometri posti a cavallo dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata	. 18
Figura 7 Livelli d'acqua salata (a), d'acqua dolce (b) e potenziale ambientale (c)	. 19
Figura 8 Direzione delle velocità dell'acqua dolce e dell'acqua salata in prossimità dell'interfaccia.	. 20
Figura 9 Schema dell'acquifero nel caso semplificato di validità delle assunzioni di Dupuit	. 22
Figura 10 Evoluzione del fenomeno dell'upconing come conseguenza dell'inserimento di un pozzo di estrazio	one
prossimo alla costa	. 25
Figura 11 Evoluzione della forma dell'interfaccia successiva all'impiego di un pozzo di immissione vicino a costa	alla . 26
Figura 12 Procedura per l'applicazione di un modello	. 29
Figura 13 Gradiente lineare di densità e variazione della pressione con la profondità	. 36
Figura 14 : Profili di densità costante e lineare per una condizione al contorno idrostatica	. 37
Figura 15 L'isola di Nauru è posizionata a 0°32'S e 166° 56' E. A destra una foto aerea dell'isola. In rosso i con	fini
dei suoi distretti	. 38
Figura 16 Dati di piovosità media annuale in mm per gli anni dal 1946 al 2008. Fonte: Nauru governament	. 40
Figura 17 Precipitazione massima, media e minima calcolata dal Governo di Nauru dai dati raccolti tra il 194	6 e
il 2008	.41
Figura 18 La barriera corallina, il Bottomside e il Topside. In figura sono riportati anche i pozzi di estrazion	ie e
monitoraggio analizzati nell'ambito dello studio portato avanti dal DIIAR del Politecnico di Milano (Albert	i et
al.,2017)	.41
Figura 19 Digital terrain model realizzato dal Politecnico di Milano nel 2010. Si distinguono il Topside	e, il
Bottomside e le aree depresse	. 43
Figura 20 Una sezione trasversale della batimetria di Nauru riportata da Jacobson e Hill nel 1993	. 44
Figura 21 Le lenti di acqua dolce identificate da Jacobson e Hill nel 1987	. 46
Figura 22 Mappe piezometriche dei carichi a novembre 2010 e ottobre 2011	. 48
Figura 23 Ripartizione delle fonti di acqua potabile a Nauru	. 49
Figura 24 Lente d'acqua dolce tipica delle piccole isole. In rosso la variazione dell'interfaccia acqua dolce-ac	qua
salata dovuta all'estrazione da pozzi costieri (fenomeno dell'upconing)	. 52
Figura 25 Le aree concentriche individuate per l'implementazione della griglia a densità variabile	. 54
Figura 26 La discretizzazione orizzontale del dominio di interesse ridotto a metà isola	. 55
Figura 27 Quote e spessori delle slices di discretizzazione verticale del modello	. 56
Figura 28 Visualizzazione 3D della griglia orizzontale e verticale	. 57

Figura 29 Isolinee di carico idraulico per il modello calibrato dell'intera isola. In giallo la parte di isola considerata
nel modello ridotto
Figura 30 Posizione delle condizioni al contorno. In giallo i nodi su cui sono assegnate le condizioni di carico e
concentrazione costante
Figura 31 I parametri idrogeologici calibrati
Figura 32 Le zone a differente conducibilità idraulica. Come suggerisce la legenda i valori calibrati sono
rispettivamente 800,15 e 10 m/d61
Figura 33 Proiezione della variazione del clima a Nauru per i quattro scenari di emissione di gas serra. In blu scuro
lo scenario a very low emissions, in azzurro quello a low emissions, in arancione medium emissions e in rosso lo
scenario very high emissions. New Science and Updated Country Reports (2014)
Figura 34 Scenari simulati: combinazioni di precipitazione, evapotraspirazione e livello del mare
Figura 35 La posizione dei cluster sulla pianta dell'isola
Figura 36 L'organizzazione in cluster dei punti di osservazione con le relative quote e l'unità idrogeologica di
riferimento
Figura 37 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 1 al variare del valore di ricarica per livello del
mare fissato a 0,34 m
Figura 38 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 1 al variare del livello del mare per ricarica
fissata al livello base di 620,5 mm/a70
Figura 39 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 6 al variare della ricarica livello del mare 0. Per
i punti più in superficie si osservano concentrazioni basse anche per i valori di ricarica più modesti
Figura 40 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 6 al variare della ricarica livello del mare 0.14m
Figura 41 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 6 al variare della ricarica livello del mare 0.34m
Figura 42 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 7 al variare della ricarica livello del mare 0.34m
Figura 43 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 7 al variare del livello del mare per ricarica
fissata a 255.5 mm/a
Figura 44 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 7 al variare del livello del mare per ricarica
fissata a 1861.5.5 mm/a
Figura 45 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 7 al variare della ricarica livello del mare 0 m.
Figura 46 Concentrazioni nei punti del cluster 1 al variare della ricarica superficiale per livello del mare fissato a
0 m
Figura 47 Concentrazioni nei punti del cluster 2 al variare della ricarica superficiale per livello del mare fissato a
0 m
Figura 48 Concentrazioni nei punti del cluster 3 al variare della ricarica superficiale per livello del mare fissato a
0 m
Figura 49 L'andamento delle concentrazioni nei punti del cluster 4 al variare della ricarica per valore del livello
del mare pari a 0 m s.l.m

rigura 70 Carta dene isopacite per rinterraccia tra le dinta dene pre igniniorite Campana e den igniniorite Campana			
Eampana. Figura 76 Carta delle isopache per l'interfaccia tra le unità delle pre ignimbrite Campana e dell'ignimbrite Campana			
rigura /3 variogramma sierico per interfaccia tra le unita delle pre ignimbrite Campana e dell'ignimbrite			
Figura 74 Carta dene isopache relativo ai contatto stratigianco argine-piroclastiti pre Ignimorite campana 107			
Figura 75 variogramma sierico relativo al contatto stratigrafico argille piroclastiti pre Ignimbrite campana 106			
Figura 72 Varioaramma sfarico relativo al contatto stratigrafico arcillo aircolostiti ara larimbrita companya 106			
Figura / 1 1 contatti tra le quattro unita idrostratigrafiche			
Figura /U Esempio di georerenziazione delle sezioni in ArcGis			
Figure 09 Sezione w 2 -w 2			
Figura do Sezione W2 W2			
Figura 07 Sezione D.D.			
гідша оо Sezione D-D			
Figura 65 Sezione P. P. 101			
Figura 04 Fianta dene sezioni geologiche utilizzate. In rosso i contini dei dominio dei modello			
Figura 64 Pianta delle sezioni geologiche utilizzate. In rosso i confini del dominio del modello			
Figura 63 Limiti del modello			
Figura 62 Schema tettonico della Piana Campana (Ortolani e Aprile 1985)			
erosione costiera AdB Liri-Garigliano-Volturno			
Figura 61 Analisi dell'evoluzione della linea di costa a foce Volturno da immagine satellitare. Fonte: Piano stralojo			
Figura 60 I limiti del corno idrico Piana del Volturno- Regi lagni			
$\frac{1}{15915} \text{ mm/a}$			
Figura 59 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scanorio basa sul pieno rispetto -			
$\frac{10585 \text{ mm/a}}{2}$			
Figura 58 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario basa sul pieno ricarica -			
mm/a			
$\begin{array}{l} \text{Indic} = 0.54 \text{ III S.I.III.} \\ \text{Figure 57 Variationa % media nel cluster dalla concentrationa ricentte alla concercia hace cul niono ricentica = 255.5 \end{array}$			
Figura 50 variazione % media nei ciuster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano livello del mara $= 0.24$ m s l m			
mare = 0.14 m s.1.m			
Figura 55 variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano livello del			
mare = 0 m s.i.m.			
Figura 54 variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano livello del			
Figura 53 variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base			
Figura 52 Variazione media della concentrazione per cm di variazione del livello del mare			
Figura 51 La posizione dei clusters 4 e5 e della lente d'acqua dolce nella zona centrale dell'isola			
a 0.34 m			
Figura 50 L'andamento delle concentrazioni nei punti del cluster 5 al variare della ricarica e livello del mare fissato			

Figura 79 Visualizzazione 3D delle giaciture dei contatti tra le unità idrostratigrafiche individuate . 109
Figura 80 Mappa delle differenze tra i valori misurati e quelli forniti dal DICEA 111
Figura 81 Analisi variografica: confronto tra modello e variogramma sperimentale dati falda superficiale
Figura 82 Interpolazione geostatistica piezometria superficiale: kriging
Figura 83 Analisi variografica: confronto tra modello e variogramma sperimentale dati falda profonda
Figura 84 Interpolazione geostatistica piezometria profonda: kriging
Figura 85 Stima della conducibilità a partire dai risultati dei test di pompaggio114
Figura 86 I centri abitati e la zona delle ecoballe115
Figura 87 Calcolo della ricarica superficiale per le zone urbanizzate
Figura 88 I poligoni individuati all'interno dell'area di studio per effettuare la discretizzazione a densità
variabile117
Figura 89 Discretizzazione orizzontale del modello118
Figura 90 Quote e spessori delle slices di discretizzazione verticale del modello119
Figura 91 Rappresentazione 3D della griglia del modello119
Figura 92 Il confine a Sud Est del modello (in rosso). In blu è riportata la mappa piezometrica mentre le
frecce indicano le direzioni del flusso120
Figura 93 Le condizioni al contorno imposte al modello viste sul layer 1121
Figura 94 I range di variabilità delle conducibilità idrauliche per i tre complessi idrostratigrafici
modellati
Figura 95 La mappa piezometrica ottenuta dalla simulazione in caso stazionario per il layer 1123
Figura 96 Mappa piezometrica acquifero superficiale ricavata dai dati deeel DICEA della Federico II

Abstract

Il lavoro di tesi presentato nasce con l'obiettivo di contribuire allo sviluppo di sistemi di gestione sostenibile della risorsa idrica sotterranea in acquiferi costieri e di sistemi di controllo dei fenomeni di intrusione salina.

Nelle aree costiere e a maggior ragione nelle isole, lo sviluppo di modelli di gestione integrata e sostenibile delle acque sotterranee assume una rilevanza primaria per la salute e il benessere dei cittadini, per la tutela dell'ambiente e per lo sviluppo economico, sociale e territoriale.

Gli acquiferi costieri, infatti, rappresentano sistemi idrici estremamente vulnerabili, minacciati sia dai fenomeni di inquinamento antropico e di sovrasfruttamento della risorsa sia dagli effetti dei cambiamenti climatici.

Nel contesto appena descritto, la gestione dei sistemi idropotabili risulta estremamente critica e deve tener conto, oltre che degli aspetti appena citati, di un incessante aumento dei fattori di pressione antropica, dovuto all'aumento della popolazione, e di una diminuzione costante della disponibilità della risorsa. Nell'arco del ventesimo secolo, infatti, il tasso di crescita della popolazione è raddoppiato e la domanda d'acqua è cresciuta di sei volte rispetto al secolo precedente, determinando un innalzamento significativo della percentuale di popolazione mondiale che vive in condizioni di scarso accesso alle fonti di acqua potabile.

I cambiamenti climatici, i cui effetti sono valutati negli ultimi rapporti dell'IPCC (Intergovernmental Panel for Climate Change, 2007, 2014), incideranno in maniera significativa sulla disponibilità di risorsa idrica sotterranea provocando la diminuzione delle portate sorgive, la diminuzione dei livelli piezometrici e il conseguente richiamo in falda di acque superficiali e marine.

Nell'ambito del lavoro di tesi sono stati valutati due casi studio di modellazione di fenomeni di intrusione salina in acquiferi costieri: il primo relativo alla Repubblica di Nauru, un atollo corallino situato nell'Oceano Pacifico al largo della Papua Nuova Guinea, e il secondo relativo all'area del corpo idrico 'Piana del Volturno-Regi Lagni', a nord di Napoli, nel Sud Italia.

Nel capitolo 1 si affronta la trattazione dei rischi connessi al sovrasfruttamento della risorsa negli acquiferi costieri e dei principi teorici alla base dello studio del fenomeno di intrusione salina.

Il capitolo 2 è un'overview degli aspetti teorici della modellazione numerica del flusso delle acque sotterranee e del trasporto degli inquinanti in falda. In questa sezione viene introdotto l'utilizzo dei modelli numerici per lo studio dell'intrusione salina negli acquiferi costieri con particolare riferimento ai principi applicati in questo campo nel codice di calcolo Feflow 7.0 utilizzato per il lavoro di tesi.

Nel caso studio dell'isola di Nauru - affrontato nei capitoli 3,4 e 5 - si è implementato un modello numerico 3D dell'area che è stato utilizzato per simulare trenta scenari di cambiamento climatico - in modo da valutare la variazione della disponibilità di acqua dolce sotterranea al variare dell'aumento del livello del mare e della ricarica meteorica – e per fornire un supporto alla gestione sostenibile della risorsa per i prossimi anni.

Il capitolo 3 riporta una descrizione dell'isola e delle sue caratteristiche geologiche, idrogeologiche e climatiche con riferimento agli studi precedenti effettuati sull'area. A Nauru, l'alternarsi di periodi piovosi e periodi molto siccitosi determina una forte variabilità della disponibilità della risorsa sotterranea che deve, proprio per questo, essere tenuta sotto osservazione in maniera attenta.

Il capitolo 4 descrive l'impostazione del modello numerico utilizzato nel capitolo 5 per simulare gli scenari di cambiamento climatico valutati a partire dal report di previsione del Governo Australiano per Nauru (Climate variability, Extremes and Change in the Western Tropical Pacific 2014).

Nel capitolo 5 sono descritti i risultati delle simulazioni scelte considerando tutte le possibili combinazioni dei tre valori di livello del mare (0,0.14 e 0.34 m s.l.m.), dei tre livelli di precipitazione (0.0055, 0.0065 e 0.0073 mm/a) e dei tre livelli di evapotraspirazione (60%, 48% e 30% della precipitazione) forniti nello studio citato al precedente capoverso. Sono stati simulati inoltre, sei casi aggiuntivi in modo da poter valutare l'evoluzione del sistema anche in caso di diminuzione della ricarica meteorica.

Il lavoro svolto per il secondo caso di studio - affrontato in collaborazione con il DICEA dell'Università degli Studi di Napoli Federico II e l'ARPA Campania e riportato nei capitoli 6, 7 e 8 - punta a costruire le fondamenta per l'implementazione di un modello numerico utile per la valutazione e la gestione del fenomeno di intrusione salina nell'area del corpo idrico 'Piana del Volturno-Regi Lagni'. Secondo quanto osservato da Ducci e Tranfaglia (Ducci et al. 2008), i tassi di diminuzione della disponibilità di acque sotterranee per l'intera regione Campania sono particolarmente elevati ed è assolutamente necessario accertare la futura disponibilità di acque sotterranee e rivedere il sistema di gestione e tutela della risorsa.

Nella prima fase di lavoro sono state acquisite le conoscenze sulle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche del corpo idrico che vengono descritte nel capitolo 6, con particolare attenzione alla caratterizzazione dello stato delle risorse acquifere della zona. Successivamente è stata realizzata una campagna di misurazione di campo al fine di raccogliere

le informazioni necessarie alla realizzazione del modello concettuale descritto nel capitolo 7. Sulla base di quanto schematizzato nel modello concettuale si è realizzato un modello numerico su una zona di circa 220 km² compresa nel settore nord occidentale del corpo idrico.

Il modello numerico descritto nel capitolo 8 deve essere considerato come primo risultato di un progetto a più ampio raggio. Tale progetto potrà svilupparsi, come descritto nello stesso capitolo, per successivi affinamenti, nelle fasi di concettualizzazione dell'area e in quella di implementazione del modello numerico, per pervenire a una modellizzazione che consenta una corretta gestione delle acque sotterranee nell'area.

1 Intrusione salina negli acquiferi costieri

L'intrusione salina è un fenomeno naturale di penetrazione delle acque salate dal mare verso un acquifero costiero, confinato o non, che ha come conseguenza la progressiva salinizzazione della risorsa sotterranea e il depauperamento della qualità del suolo coinvolto.

L'acqua salata è più densa e per questo fluisce al di sotto di quella dolce, formando un'interfaccia di separazione tra i due liquidi detta *cuneo salino*. L'acqua dolce si muove di conseguenza verso il mare scorrendo sopra l'acqua salata come schematizzato in Figura 1.



Figura 1 Formazione del cuneo salino.

Lo studio dei fenomeni di intrusione salina descrive la complicata interazione tra acqua dolce e salata. Alla complessità della descrizione del moto delle acque sotterranee si aggiunge quella di dover considerare fluidi miscibili e a diversa densità. In un range di temperature normali infatti, il valore di densità dell'acqua dolce è di 1000 kg/m3, mentre la densità dell'acqua salata varia con la temperatura, la salinità e la pressione relativa alla profondità a cui si trova l'acqua. Nello specifico aumenta con l'aumentare della salinità, diminuisce con l'aumentare della temperatura e a parità di questi due parametri, aumenta con la profondità in conseguenza del fatto che l'acqua di mare è un fluido comprimibile. Il valore comune di densità per l'acqua salata è 1025 kg/m3, corrispondente a 35 g/l di sale disciolto, e in generale, per valori di salinità e temperatura comuni la densità varia tra i 1020 e i 1030 kg/m3.

L'interfaccia tra due fluidi miscibili non è netta e ben definita. Il passaggio tra i due fluidi avviene con la formazione di una zona di transizione intermedia, detta appunto zona di transizione, di spessore dipendente dalla diffusione e dalle dispersività del mezzo. In questa zona si ha il mescolamento di acqua dolce ed acqua salata che si diffondo l'una nell'altra, creando una zona a salinità crescente con la profondità, il cui spessore può estendersi fino ad alcune decine di metri.

L'interfaccia teorica si trova all'interno di questa zona di diffusione in cui il moto dei due fluidi dipende non solo dall'andamento piezometrico ma anche dalla differenza di densità (Figura 2).



Figura 2 Zona di transizione tra acqua dolce e salata e interfaccia teorica

In via generale le acque dolci e quelle salate differiscono per composizione chimica, pH, presenza ionica e salinità. Quest'ultima proprietà esprime il contenuto di sali in un corpo idrico ed è probabilmente quella che in maniera più diretta aiuta a valutare l'entità del fenomeno di intrusione salina. La salinità viene generalmente espressa attraverso il contenuto totale di cloruri (Cl-), dato che questo fattore non è influenzato dalla circolazione nel sottosuolo, ma anche attraverso il contenuto totale di bromuri (Br-) e ioduri (I-) o, in maniera più diffusa, attraverso la valutazione della conducibilità elettrica (misurata in μ S/m) che tiene conto del contenuto complessivo dei sali in soluzione. Una valutazione alternativa può essere effettuata valutando il TDS (dall'inglese total dissolved salt), ossia il contenuto di solidi totali disciolti, espresso generalmente in mg/l, g/l o kg/m3.

Le acque possono essere classificate in questo senso in:

- Acque dolci, con TDS < 1500 mg/l
- Acque salmastri 1500 < TDS < 5000 mg/l
- Acque salate TDS > 5000 mg/l

Diverse formule empiriche di conversione sono state utilizzate efficacemente nel corso degli anni, tra le altre:

Cl = 10 - 6 EC2 + 0.3224EC - 177.7 (Langevin, 2001) dove EC è la conducibilità elettrica in μ S/cm e Cl- la clorinità in mg/l

 $[S] = 0.69 \times EC$ (Jacobson e Hill, 1988) dove [S] indica la salinità espressa in mg/l. Come si nota dalla relazione di Jacobson e Hill la salinità è direttamente proporzionale alla conducibilità elettrica.

Quando l'acqua salata rimpiazza l'acqua dolce si verifica un cambiamento delle proprietà chimiche e fisiche per l'area interessata, compresa la conducibilità idraulica che varia secondo la relazione:

$$K = \frac{k\rho g}{\mu}$$

dove K è la conducibilità idraulica che, come si nota nella formula precedente, dipende sia dal fluido che dal mezzo, mentre k la permeabilità intrinseca dipendente dalla porosità del mezzo solido.

L'acqua occupa anche dei pori isolati e quindi, quando l'acqua salata prende il posto di quella dolce, o viceversa, il ricambio non avviene in maniera completa. Per questi motivi la bonifica di un acquifero interessato da intrusione salina diventa molto complessa e non sempre efficace soprattutto nei complessi a granulometria più fine.

1.1 Teoria dell'intrusione salina: la posizione del cuneo di acqua salina.

Lo studio della posizione e della forma assunte dall'interfaccia di separazione tra i due fluidi risulta particolarmente complesso ed oneroso in termini computazionali e numerici. La risoluzione analitica precisa del problema esiste solo in casi particolari. Per questo motivo, per determinare la posizione dell'interfaccia si procede assumendo alcune ipotesi semplificative. Un primo approccio rigorosamente scientifico fu sviluppato da due studiosi europei, Ghyben ed Herzberg che si concentrarono sulle condizioni idrostatiche di equilibrio fra i due fluidi e sulla ricerca della superficie di separazione tra acqua dolce e acqua salata in questa situazione. Lo studio si fonda sulle seguenti ipotesi semplificative:

- flusso di acqua dolce perfettamente orizzontale e quindi linee equipotenziali verticali (Assunzione di Dupuit).
- acqua salata in stato stazionario.
- zona di transizione a spessore nullo.

Sotto queste ipotesi, per ogni punto A (vedi Figura 3) dell'interfaccia teorica è valida la relazione di equilibrio tra le pressioni dell'acqua dolce e di quella salata:

$$(h_s + h_d)\gamma_d = h_s\gamma_s$$

dove:

 h_s = quota del livello del mare sulla verticale del punto A;

 h_d = quota, sopra il livello del mare, dell'acqua dolce sulla verticale del punto A;

 γ_s = peso specifico dell'acqua salata (1025 kg/m3);

 γ_d = peso specifico dell'acqua dolce (1000 kg/m3).



Figura 3 Posizione dell'interfaccia teorica tra i carichi di acqua dolce (hd) sopra il livello del mare e del livello del mare (h_s) secondo la teoria di Ghyben Herzberg. (Bear 1972)

Dalla relazione precedente si ricava:

$$h_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_d + \gamma_s} h_d = \delta h_d$$

Il valore del fattore δ varia tra i 33 e i 50, ma è frequente il valore di 40.

Questo vuol dire che la profondità dal livello medio marino a cui troviamo le acque salate è circa 40 volte l'altezza piezometrica dell'acqua dolce misurata sopra il livello del mare.

La prima ipotesi di partenza scelta da Ghyben ed Herzberg relativa all'orizzontalità delle linee di flusso dell'acqua dolce è molto restrittiva e la relazione fornita perde di validità soprattutto nelle aree prossime alla costa e in ogni zona nelle vicinanze del cuneo salino, dove il moto presenta una componente verticale rilevante. Nella realtà dunque, l'esistenza di un gradiente idraulico provoca una circolazione a velocità crescenti con componenti anche verticali e determina delle linee equipotenziali curvilinee.

Il punto A in Figura 4 rappresenta la generica posizione dell'interfaccia ad una certa distanza dalla costa; mentre l'intersezione della linea equipotenziale $\varphi_d=h_d$ e l'interfaccia stessa è il

punto B. Ciò significa che la relazione di Ghyben-Herzberg fornisce risultati conservativi, in quanto la profondità δ hd del punto B corrispondente al livello di falda h_d, calcolata con la suddetta formula, è minore di quella a cui si trova l'interfaccia reale nel punto A.



Figura 4 Linee equipotenziali curvilinee nella zona in prossimità della costa.

È la relazione di Hubbert (1940) che corregge questo aspetto nella formula di Ghyben-Herzberg, proponendo di utilizzare per il calcolo della profondità dell'interfaccia A' la stessa relazione prendendo però in considerazione come potenziale idraulico la quota in B' come in Figura 5.

Rimuovendo anche la seconda ipotesi semplificativa, considerando cioè un flusso di acqua salata in stato non stazionario ($\phi_s \neq cost$), si rappresenta una situazione ancora più vicina alla realtà. Esiste, infatti, un flusso di acqua salata verso l'entroterra dovuto alla differenza di livello piezometrico dell'acqua di mare nell'acquifero e il livello del mare.



Figura 5 Rete di flusso in un acquifero costiero in assenza di zona di transizione.

Supponendo di avere due piezometri come in Figura 6, posti a cavallo dell'interfaccia, in quello appena sopra l'interfaccia si potrebbe misurare un livello piezometrico dell'acqua dolce maggiore di quello del mare, mentre in quello posto immediatamente sotto l'interfaccia segnalerebbe un livello dell'acqua salata negativo.



Figura 6 Due piezometri posti a cavallo dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata

La profondità dell'interfaccia ζ (x, y, z) sarà data dall'equilibrio tra le due colonne di fluido a diversa densità:

$$\gamma_d \Phi_d = \gamma_s \Phi_s$$

ovvero:

$$\gamma_d \left(h_d - \zeta \right) = \gamma_s \left(\zeta - h_s \right)$$

da cui risulta:
$$\zeta(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{z}) = \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} h_s - \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma_d} h_d = (1 + \partial) h_s - \partial h_d$$

che è la formula di Hubbert, valida nella sola ipotesi di spessore dell'interfaccia nullo. Si noti che la formula di Hubbert restituisce la stessa relazione fornita da Ghyben Herzberg nel caso di stato stazionario per l'acqua salata, con l'unica differenza di considerare linee equipotenziali curve invece che rettilinee. Quando invece $\phi_s \neq \text{cost.}$ il movimento stesso influenza la forma dell'interfaccia.

Gli studi di Lusczynski e De Wiest forniscono gli strumenti per valutare la forma e la posizione dell'interfaccia tra i due fluidi nel caso più generale in cui si rimuove anche l'ipotesi di interfaccia a spessore nullo.

Il potenziale ambientale o locale h_a è il livello d'acqua misurato dal livello del mare, in un piezometro pieno di fluidi a diversa densità.



Figura 7 Livelli d'acqua salata (a), d'acqua dolce (b) e potenziale ambientale (c)

Supponiamo che la zona di transizione sia compresa tra $\zeta_1 \zeta_2$ come rappresentato in Figura 7, con acqua dolce al di sopra di ζ_1 e acqua salata fino alla profondità ζ_3 . Nel punto a profondità ζ_3 vale l'uguaglianza:

$$(\zeta_3 - h_s)\gamma_s = (h_a + \zeta_1)\gamma_d + \int_{\zeta_1}^{\zeta_2} \gamma(z)dz + (\zeta_3 - \zeta_2)\gamma_s$$

Dove h_s è il potenziale dell'acqua salata, h_a è quello ambientale e $\gamma(z)$ è il peso specifico dell'acqua nella zona di transizione a profondità ζ .

Si noti che il potenziale ambientale h_a non coincide con il livello freatico, se non nel caso di flusso esclusivamente orizzontale e che il suo valore non può essere direttamente misurato ma bisogna calcolarlo tenendo presente la variazione della densità con la temperatura.

Lo stesso De Wiest ha introdotto il concetto di carico ambientale reale, h_a^* , corrispondente al livello misurato dal livello del mare, in un piezometro reale fenestrato lungo tutto lo spessore dell'acquifero. Questa grandezza, diversamente dal potenziale ambientale è direttamente misurabile:

$$h_a^* = \zeta + \frac{p}{\gamma_a}$$

Dove γ_a è la densità media del fluido tra h_a^* e la profondità ζ

Segue che se esiste la zona di transizione tra $\zeta 1 e \zeta 2 e h_p \dot{e}$ il potenziale puntuale a profondità ζ , risulta valida la relazione:

$$(\gamma_a - \gamma_d)\zeta_1 = \gamma_d - h_a * \gamma_p - (\gamma_p - \gamma_a)\zeta_1$$

che è la formula di Lusczynski.

Se $\zeta_1 = \zeta_2$, ovvero è assente la zona di transizione allora $\gamma_a = \gamma_s$ e h_p=h_s si riottiene la formula di Hubbert nel caso in cui h_a=h_d, cioè nel caso di flusso orizzontale.

Nel caso in cui si considera l'acqua salata in stato stazionario e il livello del mare $h_s=0$ si ottiene la formula di Ghyben-Herzberg.

Se invece si considera il caso in cui esiste la zona di transizione ma il flusso è perfettamente orizzontale ($h_a=h_d$) la relazione di Lusczynski è comunque preferibile rispetto a quella di Hubbert in quanto tiene conto dello spessore della zona di trasmissione.

1.2 Interfaccia stazionaria

La condizione di stazionarietà dell'interfaccia impone che le velocità dell'acqua dolce (v_d) e dell'acqua salata (v_s) siano parallele all'interfaccia in prossimità della stessa (Figura 8).



Figura 8 Direzione delle velocità dell'acqua dolce e dell'acqua salata in prossimità dell'interfaccia.

Come visto fin qui, in ogni punto dell'interfaccia deve sussistere l'equilibrio tra le pressioni dei due fluidi:

$$(\zeta + h_d)\gamma_d = (\zeta + h_s)\gamma_s$$

da cui segue:

$$h_d = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \zeta + \frac{\gamma_s}{\gamma_d} h_s$$

che derivando rispetto alla linea di interfaccia diventa:

$$\frac{dh_d}{ds} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \frac{d\zeta}{ds} + \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \frac{dh_s}{ds}$$

Sostituendo in questa uguaglianza le relazioni di Darcy:

$$v_s = k_s \frac{dh_s}{ds}$$
$$v_d = k_d \frac{dh_d}{ds}$$

dove h_s e h_d sono rispettivamente i potenziali dell'acqua salata e dell'acqua dolce e k_s e k_d le permeabilità del terreno per acqua salata e dolce risulta:

$$\frac{v_d}{k_d} - \frac{v_s}{k_s} \frac{\gamma_s}{\gamma_d} = \frac{\gamma_s - \gamma_d}{\gamma_d} \frac{d\zeta}{ds}$$

Si noti che nella condizione in cui le acque sono ferme, $v_d = v_s = 0$ risulta che $\frac{d\zeta}{ds} = 0$ e quindi l'interfaccia è orizzontale, mentre nel caso in cui solo $v_s = 0$ si ritrova ancora la relazione di Ghyben-Herzberg.

Per descrivere la forma dell'interfaccia ci rimettiamo nelle ipotesi semplificative di flusso orizzontale, stazionario e perpendicolare alla costa (assunzioni di Dupuit). Supponendo uno spessore dell'acquifero costante indicato con D, una ricarica superficiale uniforme N, e ponendo l'origine del sistema x=0 nel punto di intersezione tra la base dell'acquifero e il piede dell'interfaccia, ci troviamo nella situazione schematizzata in Figura 9.



Figura 9 Schema dell'acquifero nel caso semplificato di validità delle assunzioni di Dupuit

In questo caso, in cui è valida anche la relazione di Ghyben-Herzberg, la portata di acqua dolce che attraversa la sezione x=0 è data da:

$$Q_0 + Nx = -k(1+\delta)h_d \frac{\partial h_d}{\partial x}$$

Integrando tra 0 e il generico punto x con $h_d=\varphi_0$ per x=0, si ottiene:

$$\int_0^x (Q_0 + Nx) \partial x = -\int_{\phi_0}^{h_d} k(1+\delta) h_d \partial h_d$$

e quindi:

$$Q_0 + N\frac{x^2}{2} = -k(1+\delta)\frac{h_d^2}{2} + -k(1+\delta)\frac{\phi_0^2}{2}$$

da cui

$$\left(\phi_{0}^{2}-h_{d}^{2}\right)=rac{2Q_{0}+Nx^{2}}{k(1+\delta)}$$

relazione dalla quale si evince che l'interfaccia sotto le ipotesi assunte, ha la forma di una parabola.

Per x=L, h_d=0 si ottiene

$$Q_0 = \frac{kD^2}{2L} \frac{(1+\delta)}{\delta^2} - \frac{NL}{2}$$

Dove $\phi_0 = \frac{D}{\delta}$.

Dall'ultima relazione si evince che per valori elevati di Q_0 l'estensione del cuneo di intrusione marina, L, diminuisce. Lavorando dunque, sulla portata di acqua dolce si può determinare una riduzione del fenomeno di intrusione.

1.3 Interfaccia dinamica

Nella zona di contatto tra acqua dolce e salata, questi due fluidi si mescolano allo stesso tempo per diffusione e per la dispersione idrodinamica originata dal moto dell'acqua. La zona di transizione è in moto con una velocità che determina un trasporto di acqua dolce e salata dalla falda verso il mare. È proprio questo trasporto che limita l'estensione del cuneo di intrusione salina che altrimenti andrebbe estendendosi infinitamente. In generale lo spessore della zona d'interfaccia è tanto più piccolo quanto maggiore è il flusso e quanto più piccoli sono i movimenti lungo l'interfaccia.

Questo stesso moto determina anche una differenza tra il livello piezometrico dell'acqua salata nel terreno e quello del mare.

Se si ha intrusione salina il moto è dal mare verso l'entroterra e quindi il livello nel terreno è inferiore a quello del livello del mare ($h_s < 0$); in questo caso l'interfaccia è profonda e inclinata e la zona di transizione ha spessore limitato.

Se invece è l'acqua dolce a rimpiazzare quella salata l'interfaccia sarà meno profonda di quello che ci si aspetta e meno inclinata con una zona di transizione più spessa.

1.4 Effetti della variazione del livello piezometrico

Abbiamo visto come la posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata sia determinata dall'equilibrio delle colonne di fluido miscibili a diversa densità. Ogni volta che c'è una variazione del potenziale dell'acqua dolce ci sarà una variazione di quello di acqua salata e viceversa, in modo da mantenere la condizione di equilibrio. Ad una variazione Δh_d del livello piezometrico dell'acqua dolce corrisponde nei primi istanti una variazione della posizione dell'interfaccia descritta da:

$$(\zeta + h_d + \Delta h_d)\gamma_d = (\zeta + h_s + \Delta h_s)\gamma_s$$

Dove Δh_s è la variazione corrispondente del livello di acqua salata.

Considerato che l'equilibrio prima della variazione era descritto dalla relazione $(\zeta + h_d)\gamma_d = (\zeta + h_s)\gamma_s$

risulta:

$$\Delta h_d = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \Delta h_s$$

che in forma differenziale si scrive come:

$$\frac{dh_d}{ds} = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} \frac{\Delta h_s}{ds}$$

considerando le velocità in prossimità dell'interfaccia:

$$v_d = -k_0 \frac{\gamma_d}{\mu_d} \frac{dh_d}{ds} \qquad \qquad v_s = -k_0 \frac{\gamma_s}{\mu_s} \frac{dh_s}{ds}$$

dove μ_d e μ_s sono le viscosità dei fluidi e k_0 la permeabilità intrinseca del mezzo.

Se si assumono viscosità uguali, si ottengono delle variazioni di velocità di acqua salata e dolce uguali. Questo significa che nei primi istanti successivi alla variazione di carico l'interfaccia reagisce come un blocco unico e solo successivamente l'interfaccia si adatterà alle nuove condizioni di equilibrio.

L'effetto delle maree determina una posizione intermedia che può essere modificata solo da variazioni rapide sostanziali del livello del mare, ad esempio in caso di tempeste, o del livello di falda, in caso di estrazione o ricarica.

1.5 Pozzi di estrazione in acquiferi costieri

Una gestione scorretta della risorsa idrica sotterranea può aumentare in maniera sostanziale l'entità del problema dell'intrusione salina negli acquiferi costieri. Le quantità di acqua da estrarre e il posizionamento dei pozzi sono le variabili da tenere in considerazione per prevenire l'innalzamento dell'interfaccia salina al di sotto di uno dei pozzi di estrazione (fenomeno di *upconing, vedi* Figura 10)



Figura 10 Evoluzione del fenomeno dell'upconing come conseguenza dell'inserimento di un pozzo di estrazione prossimo alla costa

Questa variazione della posizione e della forma del cuneo di intrusione salina è direttamente causata dall'abbassamento del carico piezometrico dell'acqua dolce. In questa situazione aumenta considerevolmente il rischio che il pozzo a lungo andare, inizi ad estrarre acqua salata o salmastra.

In generale, se le portate estratte sono maggiori della ricarica, l'acqua salata penetra all'interno dell'acquifero fino a raggiungere il pozzo in maniera tanto più rapida quanto maggiore è la portata estratta dal pozzo. In questo modo si forma un cono simile a quello che si forma intorno al pozzo per l'acqua dolce.

Si noti che affinché il fenomeno non si verifichi non è sufficiente mantenere il livello freatico al di sopra del livello del mare, né tantomeno è sufficiente che l'abbassamento dovuto al tasso di estrazione determini una quota inferiore a quella del livello del mare per avere una contaminazione significativa dell'acquifero. Infatti, da un lato la creazione di una zona di stagnazione sotto il pozzo fa sì che l'acqua di mare possa prima accumularsi e poi risalire verso il pozzo, dall'altro le caratteristiche di conducibilità dell'acquifero potrebbero essere tali da impedire che si abbia la risalita dell'acqua salata nel pozzo anche per livelli freatici inferiori a quello del mare.

Una volta che l'acquifero viene interessato da un avanzamento significativo del cono d'acqua salata, le operazioni di bonifica e di depurazione dello stesso sono particolarmente complicate ed onerose. Per questo motivo le opere di contrasto ai fenomeni di upconing si muovono nello spazio della prevenzione. Tra tutte si riconoscono per frequenza di impiego ed efficacia, le barriere di pozzi di re immissione di acqua dolce tra la barriera di estrazione e la costa (vedi

Figura 11); i dreni orizzontali che evitano l'estrazione puntuale della risorsa, favorendone una maggiormente uniforme e distribuita; i *pozzi scavenger* che consistono in un sistema di pozzi vicini tra loro che estraggono separatamente acqua dolce e salata.



Figura 11 Evoluzione della forma dell'interfaccia successiva all'impiego di un pozzo di immissione vicino alla costa

Le portate estratte di acqua dolce e salata nei pozzi scavenger si calcolano facendo riferimento alla seguente relazione:

$$\frac{Q_f}{Q_s} \le \frac{B_f}{B_s}$$

dove $Q_f e Q_s$ rappresentano le portate estratte di acqua dolce e salata, mentre $B_f e B_s$ gli spessori iniziali dei due fluidi.

2 Modelli numerici di flusso e trasporto delle acque sotterranee in acquiferi costieri

L'idrodinamica degli acquiferi costieri è un fenomeno complesso, specie in condizioni di deflusso variabile o di particolari configurazioni di sbocco in mare della falda. Lo studio e l'approccio alla risoluzione di casi reali sono spesso compiti molto delicati.

In questo capitolo, si affrontano le basi della modellazione numerica con particolare attenzione alle applicazioni nei campi dell'analisi dei fenomeni di intrusione salina

Un modello è uno strumento utile alla descrizione semplificata della realtà in tutte le sue componenti e delle complesse interazioni tra quest'ultime. I modelli, se ben pensati e sviluppati, possono essere utilizzati in maniera efficace con lo scopo di interpretare il fenomeno oggetto di studio, di controllare l'evoluzione delle variabili al variare di determinati parametri o come sistema di supporto ai decisori.

In via generale, la qualità dell'approssimazione della realtà realizzata attraverso il modello determina in maniera diretta l'attendibilità delle previsioni effettuate.

È chiaro che al variare del livello di approfondimento e precisione delle assunzioni usate nella rappresentazione della realtà, aumenterà o diminuirà la complessità del modello ottenuto.

I modelli matematici possono essere risolti per via *analitica* o per via *numerica*. Nella maggior parte dei casi la risoluzione per via analitica necessita di ipotesi piuttosto restrittive e risulta molto complessa e di difficile utilizzo pratico. Per questo motivo - e in maniera ancora maggiore a partire anni '60, quando si sono diffusi i computer ad alta potenza di calcolo - si preferisce risolvere i casi reali utilizzando tecniche numeriche. Infatti nei campi della fisica e dell'ingegneria, è preferibile ottenere una soluzione numerica approssimata al problema reale

piuttosto che aumentare il livello di complessità del sistema, e di conseguenza il tempo di calcolo, per ottenere soluzioni rigorose dal punto di vista analitico.

L'analisi numerica è un ramo della matematica, applicabile in qualsiasi campo della scienza, che ha per oggetto lo sviluppo di metodi di calcolo approssimati, eseguibili mediante un calcolatore.

Costruire un buon modello è la base per riuscire a fare previsioni verosimili e ottenere elementi importanti per la comprensione del fenomeno oggetto di studio. Per questo motivo in fase di realizzazione è importante seguire correttamente le seguenti fasi:

- definizione dello *scopo* del modello e valutazione delle equazioni e del codice di calcolo da utilizzare;
- realizzazione del *modello concettuale* del sistema, identificazione delle unità del sistema e delle loro interazioni;
- individuazione delle equazioni e dell'*algoritmo* migliore per risolvere numericamente il modello;
- *implementazione del modello*: definizione del dominio di calcolo, della griglia per la discretizzazione numerica, scelta dei passi temporali di calcolo, delle condizioni al contorno e delle condizioni iniziali, e individuazione dei valori preliminari dei parametri di interesse del modello;
- *taratura*, è la fase in cui si assegnano i valori definitivi ai parametri del modello procedendo per tentativi e provando a minimizzare la distanza tra valore simulato e valore osservato;
- *analisi di sensitività*, per comprendere il grado di influenza di ogni parametro appena calibrato sul risultato complessivo del problema;
- *verifica* dell'attendibilità del modello;
- predizione della risposta del sistema alle sollecitazioni interessanti per lo studio;
- presentazione del modello e dei risultati ottenuti;
- *post audit* per determinare, una volta avuta la possibilità di osservare i risultati simulati, la correttezza delle previsioni effettuate

In Figura 12 è riportato lo schema di implementazione e di applicazione di un modello come sopra descritta.



Figura 12 Procedura per l'applicazione di un modello

Nel campo delle acque sotterranee i modelli numerici sono particolarmente importanti per il supporto fondamentale che danno agli studiosi nella comprensione dei fenomeni e ai decisori politici per lo sviluppo di sistemi di gestione della risorsa sostenibili ed efficienti.

Fin dal 1800 sono stati realizzati modelli matematici per lo studio flusso delle acque sotterranee e del trasporto dei contaminati in falda.

La simulazione del moto delle acque sotterranee attraverso modelli numerici si basa sull'equazione di flusso, che descrive la fisica del sistema, e sulle equazioni che identificano le condizioni al contorno, ossia le equazioni che danno informazioni sui carichi o sui flussi lungo i confini del dominio del modello.

Le acque di falda contengono diversi costituenti disciolti a concentrazioni molto variabili. Al crescere della concentrazione dei solidi disciolti nelle acque, aumenta in maniera significativa la densità della soluzione. È importante tener conto di questa situazione perché i metodi matematici necessari per la quantificazione dei flussi sotterranei si complicano in maniera sostanziale nei casi in cui, a prescindere dal valore assoluto di densità, le variazioni spaziali di quest'ultima diventano elevate. In diverse situazioni di interesse idrogeologico, le variazioni spaziali influiscono sul moto delle acque ed è quindi necessario rappresentare in maniera oculata il flusso sotterraneo a densità variabile. È quello che accade negli acquiferi costieri, dove esiste una zona di transizione a concentrazione variabile dove acqua dolce di falda e acqua marina si mescolano e la densità varia dai 1000 kg/m3 dell'acqua dolce ai 1025 kg/m3. Questa variazione di densità, apparentemente lieve, influisce considerevolmente sulle caratteristiche del flusso di acqua sotterranea.

2.1 Tipi di modelli e metodi risolutivi

I modelli di flusso delle acque sotterranee possono essere schematizzati e classificati in diversi modi a seconda degli elementi particolari che si vogliono porre in risalto.

Si distinguono modelli in regime stazionario o in transitorio, in due o tre dimensioni spaziali, confinati o non confinati.

Si possono classificare i modelli tenendo conto del punto di vista con il quale si approccia alla descrizione del problema: dal punto di vista del sistema di flusso o da quello dell'acquifero.

I modelli di profilo bidimensionali e tridimensionali affrontano il problema dal punto di vista del sistema di flusso, assumendo linee equipotenziali che attraversano sia gli acquiferi che i letti confinanti. Si identificano quindi, le distribuzioni del carico idraulico, della conducibilità idraulica e delle proprietà di immagazzinamento nelle tre dimensioni in ogni punto del sistema. Al contrario, i modelli bidimensionali areali e quasi-tridimensionali approcciano al problema dal punto di vista dell'acquifero, assumendo il flusso sotterraneo strettamente orizzontale attraverso l'acquifero e verticale attraverso i letti confinanti. La conducibilità idraulica ha componenti nelle tre direzioni mentre la trasmissività dell'acquifero è costante se l'acquifero è confinato, omogeneo e di spessore uniforme o variabile spazialmente se l'acquifero è non confinato.

Come brevemente discusso nel paragrafo precedente, i metodi di risoluzione per i modelli matematici sono quello analitico e quello matematico. Nella maggior parte dei casi le assunzioni di omogeneità del mezzo e/o di flusso mono o bidimensionale, necessarie per ottenere una soluzione per via analitica, risultano troppo semplicistiche ed inappropriate rispetto al livello di approfondimento con il quale si vuole studiare il problema. In questi casi è preferibile adottare una soluzione numerica che appare più versatile ed efficace. I metodi di risoluzione numerica più diffusi includono:

- metodo alle differenze finite;
- differenze integrate finite;
- equazioni integrali;
- elementi analitici;
- elementi finiti.

2.2 Metodi alle differenze finite

Il metodo alle differenze finite, FDM (Finite Differences Method), è un metodo per la risoluzione di equazioni differenziali che si basa sull'approssimazione della derivata di una generica funzione f al suo rapporto incrementale. In questo modo si effettua una discretizzazione dell'equazioni differenziali stesse:

$$\frac{\partial f}{\partial x} \equiv \lim_{\Delta x \to 0} \frac{\Delta f}{\Delta x} \cong \frac{\Delta f}{\Delta x}$$

Come si deduce dalla formula, quanto più regolare è l'andamento della funzione e quanto minore è il Δx , tanto minore sarà l'errore che si commette facendo questa approssimazione.

In generale l'algoritmo risolutivo del metodo alle differenze finite aumenta di efficacia all'aumentare della quantità di punti di intersezione della griglia in cui il valore della funzione è incognito.

Lavorando con il FDM si procede alla scrittura delle equazioni governanti il problema nel caso del continuo, imponendo le leggi descrittive del fenomeno fisico e le leggi di conservazione, per poi discretizzare le equazioni ottenute trasformandole, di fatto, da equazioni differenziali in equazioni algebriche.

I codici di calcolo basati sulle differenze finite sono solitamente più intuitivi e facili da programmare rispetto a quelli che utilizzano altri metodi risolutivi.

Il metodo alle differenze finite è molto diffuso e di ampio utilizzo anche per problemi piuttosto complessi ma risulta di difficile applicazione nei casi in cui si ha a che fare con geometrie irregolari e condizioni al contorno particolari.

2.3 Metodi agli elementi finiti

Il metodo agli elementi finiti, FEM (Finite Element Method) è uno strumento di risoluzione numerica approssimata molto utilizzato nei casi di domini irregolari. Diversamente rispetto al caso del FDM, il dominio di calcolo viene costruito dall'unione di un considerevole numero di sottodomini di forma elementare, risultando così, molto versatile.

La prima operazione di risoluzione del FEM è la discretizzazione del continuo, al quale si attribuisce un numero finito di gradi di libertà, e successivamente si procede all'imposizione delle leggi di conservazione e di comportamento.

In questo modo è il dominio ad essere discretizzato e non si alterano le equazioni differenziali relative a ciascuno degli elementi finiti.

Le variabili di campo in un problema studiato nel continuo, cioè nella porzione dello spazio in cui avviene il fenomeno di interesse, sono funzione di ciascun generico punto del dominio di definizione. Pertanto la pressione, la temperatura, la densità, lo spostamento, la velocità e tutte le altre variabili in ogni punto rappresentano un numero infinito di incognite.

Il metodo agli elementi finiti riduce il numero di incognite ad un valore finito discretizzando il dominio ed esprimendo il campo in termini di funzioni approssimanti. Queste funzioni, anche dette *funzioni di forma*, sono definite all'interno di ogni elemento finito in cui è stato diviso il dominio e vengono individuate mediante i valori che la variabile assume nei nodi al contorno degli elementi.

Nella rappresentazione del problema con questo approccio i valori che la variabile di campo assume sui nodi sono le nuove incognite.

I FEM sono ampiamente utilizzati nei casi di problemi in cui è necessario trattare limiti interni come le faglie o per simulare superfici di infiltrazione o punti di sorgente o di perdita.

Il metodo delle differenze integrate finite è molto simile al FEM, mentre il metodo delle equazioni integrali e il metodo degli elementi analitici sono di sviluppo relativamente più recente e per questo meno diffusi di quelli descritti in questo capitolo.

2.4 Descrizione del codice di calcolo utilizzato: FEFLOW

Il codice di calcolo rappresenta l'insieme comandi e delle equazioni utilizzate nella risoluzione di un modello matematico numerico con l'uso di un PC. Il codice utilizzato nello svolgimento di questa tesi è FEFLOW 7.0.

Feflow è un codice di calcolo 2-3D basato sul metodo agli elementi finiti, che impiega come metodo risolutivo quello di Galerkin, per la simulazione del flusso ed il trasporto di massa e di calore.

Le equazioni differenziali parziali consentono di scrivere il flusso delle acque di falda nei casi in cui esso è influenzato da variazioni di densità nel fluido dovute a differenze di temperatura o alla presenza di contaminanti.

La modellazione matematica alla base del codice di calcolo Feflow si basa sui seguenti principi fisici fondamentali:

• conservazione della massa del fluido e dei mezzi continui solidi;

- conservazione della massa dei costituenti chimici e dei contaminanti;
- conservazione del momento del fluido e del mezzo continuo;
- prima legge della termodinamica o legge di conservazione dell'energia.

Nell'implementazione del modello è necessario assegnare le condizioni iniziali e le condizioni al contorno.

Le condizioni iniziali possono essere fissate in Feflow come carico idraulico o di pressione per le equazioni di flusso, come concentrazione di inquinante per il trasporto di massa e come valori di temperatura per il trasporto di calore. È possibile attribuire i valori delle condizioni al contorno ai nodi, agli elementi, sull'intera area o su una porzione di essa e per tutte le slice.

Le condizioni al contorno invece indicano il valore della variabile dipendente o la sua derivata ai confini del dominio del problema.

La scelta delle condizioni al contorno rappresenta una fase di estrema importanza nell'implementazione del modello in quanto esse influenzano fortemente i risultati ottenuti durante la simulazione. Infatti al fine di rappresentare il dominio in maniera quanto più aderente possibile alla realtà si tende, ove possibile, a fissare le condizioni al contorno in corrispondenza di limiti idrogeologici reali.

Le condizioni matematiche per l'assegnazione delle condizioni al contorno sono:

- condizione di Dirichelet: questa condizione viene utilizzata per fissare l'altezza piezometrica su determinati limiti. È ideale per simulare vasti corpi d'acqua o la distribuzione dei carichi idraulici della falda ai limiti del dominio. Nel caso di trasporto di massa questa condizione viene specificata come concentrazione di inquinante e nel caso di trasporto di calore come valore di temperatura;
- condizione di Neumann: la grandezza specificata in questo caso è il flusso. Viene utilizzata in presenza di corpi d'acqua superficiali o sorgenti, per specificare i deflussi sotterranei della falda ai limiti del modello, per simulare l'estrazione o l'immissione d'acqua da pozzi. Inoltre viene utilizzata per specificare limiti a flusso nullo. Per i casi di trasporto di massa o di calore la condizione di Neumann viene assegnata come flusso di contaminante o di calore rispettivamente;
- condizione di Cauchy: questa condizione è di tipo misto. Il flusso attraverso il limite di
 interesse è specificato in dipendenza di un carico idraulico fissato. Questa condizione è
 la meno forte ma la più versatile, e per questo motivo viene adottata per simulare
 situazioni di limiti idrogeologici come fontanili e fiumi nel caso in cui il rapporto di
 scambio idrico con la falda non sia conosciuto.

Condizione "Well": utile a descrivere la presenza di pozzi interni al dominio. Assegnando una portata positiva si indica un pozzo di pompaggio e viceversa, con una portata negativa si indica un pozzo di immissione. Nei casi di trasporto di massa e di calore questa condizione è specificata come sorgente di inquinante o di potenza termica.

2.5 L'approccio allo studio dei problemi di intrusione salina in acquiferi costieri in Feflow

In questo paragrafo si porrà l'attenzione sull'approccio al problema di interesse della tesi, l'intrusione salina in acquiferi costieri, in Feflow.

Nei paragrafi precedenti abbiamo visto come la variazione spaziale di densità possa rendere più complesso lo studio dei flussi di acqua sotterranea. La densità del fluido infatti influisce sulla la posizione relativa dell'acqua dolce e dell'acqua salata, la quale essendo più densa si trova sempre al di sotto di quella dolce.

Una fase fluida è considerata come un mezzo di densità ρ non uniforme; generalmente il fluido è una miscela di N specie chimiche ognuna caratterizzata da una densità ρ_k , calcolata come la massa della componente k per unità di volume del fluido. Per la miscela nel suo complesso vale la relazione:

$$\rho \!=\! \sum_{k=1}^{N} \rho_{k}$$

La densità dei fluidi è inversamente proporzionale alla temperatura e, a causa della compressibilità del fluido, direttamente proporzionale alla pressione. Più sinteticamente si può esprimere la densità attraverso l'equazione di stato:

$$\rho = \rho(\rho_k, T, p)$$

La variazione della densità nel tempo e nello spazio è espressa in termini analitici nell'equazione di bilancio del momento di un fluido dalla presenza di ρ nel termine di gravità. Come si evince dalle osservazioni appena riportate, la simulazione del flusso dipendente da densità è un'operazione molto dispendiosa in termini computazionali e per questo negli studi su larga scala è necessario, al fine di ridurre i tempi computazionali, optare per una mesh non troppo fitta.

Si consideri che la variabile richiesta per le equazioni di flusso sotterraneo in Feflow è il carico idraulico h. Risulta quindi necessario tener conto della definizione specifica di potenziale:

$$h = \frac{p}{\rho_0 g} + z$$

dove:

g = accelerazione di gravità;

 ρ_0 = densità del fluido di riferimento.

Nei problemi di intrusione salina la densità di riferimento è quella dell'acqua dolce e quindi bisogna sempre fare attenzione a considerare il passaggio dal carico idraulico misurato, riferito all'acqua salata, al carico idraulico relativo all'acqua dolce.

Il carico misurato in un piezometro infatti si riferisce al fluido presente nel piezometro stesso e quindi il potenziale misurato sarà relativo al fluido di salinità nota C:

$$h_s = \frac{p}{\rho_s g} + z$$

con ρ_s funzione della salinità C.

Moltiplicando e dividendo il primo termine dell'equazione precedente per ρ_0 si ottiene:

$$h_s = \frac{p}{\rho_s g} + z = \frac{p}{\rho_0 g} \frac{\rho_0}{\rho_s} + z$$

ma si osserva che $\frac{p}{\rho_0 g}$ è uguale a h-z, per cui vale:

$$h_{s} = (h - z)\frac{\rho_{0}}{\rho_{s}} + z = \frac{\rho_{0}}{\rho_{s}}h + \left(1 - \frac{\rho_{0}}{\rho_{s}}\right)z$$

e scrivendo il carico h_s in funzione di h:

$$h_s = \frac{\rho_0}{\rho_s} h + \left(\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_s}\right) z$$

invertendo quest'ultima relazione si ottiene la relazione che lega la variazione di h con hs.

$$h = \frac{\rho_s}{\rho_0} h_s - \frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0} z$$

il rapporto $\frac{\rho_s - \rho_0}{\rho_0}$ è detto density ratio α , per cui la relazione precedente può essere riscritta nella forma più ordinato:

nella forma più ordinata:

$$h=(1+\alpha)h_s-\alpha z$$

Con queste relazioni è possibile calcolare il carico idraulico h, da utilizzare come riferimento in Feflow, a partire dai carichi misurati h_s.

Nella valutazione del carico idraulico h è necessario considerare che, come si osserva in Figura 13, anche la densità non è sempre costante lungo la verticale. Il caso in figura è relativo alla situazione generica in cui il gradiente di densità è lineare.



Figura 13 Gradiente lineare di densità e variazione della pressione con la profondità

Questa situazione è descritta dalla relazione:

$$\rho = \rho_1 + \frac{\left(\rho_1 - \rho_2\right)}{\Delta z} z$$

Nel caso di fluido idrostatico deve essere valida la relazione:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \implies p = p(z) = -g \int_{z_1}^z \rho(\theta) d\theta$$

E sostituendo la relazione di variazione della densità:
$$p = p_1 - g\left(\rho_1 z + \frac{\rho_1 - \rho_2}{2\Delta z} z^2\right)$$

Il carico idraulico risulta in questo caso:

$$h = h_1 - \left(\frac{\rho_1 - \rho_0}{\rho_0}\right)z - \frac{1}{2\Delta z}\left(\frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_0}\right)z^2$$

che è rappresenta la distribuzione del carico idraulico in funzione della profondità e della variazione della densità con la profondità stessa.

Nei casi riportati in Figura 12 la relazione precedente si semplifica e appare in una forma particolarmente intuitiva ed immediata:



Figura 14 : Profili di densità costante e lineare per una condizione al contorno idrostatica

nel *caso 1* a densità costante $\rho_1 = \rho_2 = \rho_s$ l'espressione del carico diventa:

$$h=h_s-\alpha z$$

mentre nel *caso 2* in cui la densità varia linearmente con la profondità e quindi $\rho_1 = \rho_0$, $\rho_2 = \rho_s$ il carico viene espresso dalla relazione:

$$h = h_0 + \frac{\alpha}{2\Delta z} z^2$$

Alla profondità $-\Delta z$ i due carichi assumeranno i seguenti valori:

 $h = h_s + \alpha \, \Delta z$ $h = h_0 + \frac{\alpha}{2} \, \Delta z$

CASE STUDY I: L'ISOLA DI NAURU

3 Descrizione dell'area di interesse

3.1 Geografia e breve descrizione dell'isola

La Repubblica di Nauru è un'isola nell'Oceano Pacifico, in Oceania, situata a largo della Papa Guinea, a circa 2200 km dalla costa e a 41 km a sud dell'equatore.



Figura 15 L'isola di Nauru è posizionata a 0°32'S e 166° 56' E. A destra una foto aerea dell'isola. In rosso i confini dei suoi distretti

L'isola ha una superficie totale di circa 22 km² e un'altezza massima di 71 m sul livello medio del mare, raggiunta presso il Command Ridge, nella zona centro orientale dell'isola.

La popolazione totale è di circa 10000 abitanti, la maggior parte dei quali concentrati a ridosso del litorale.

Per lungo tempo l'economia dell'isola si è basata su un'intensa attività di estrazione di fosfati che se da un lato negli anni '80 soprattutto, ha garantito un soddisfacente benessere economico agli abitanti, dall'altro ha determinato di fatto la compromissione ambientale dell'80% della superficie totale dell'isola.

Nauru ha una forma ovale ed è circondata da una fascia costiera, il Bottomside, lunga 30 km che varia tra i 120 e i 300 m di larghezza; essa si raccorda con una scarpata in roccia calcarea carsificata, alta fino a 30 m sul livello del mare, che identifica il perimetro del Topside, il pianoro interno dell'isola.

Il Topside è un altopiano in calcare dolomitico con una superficie caratterizzata dalla presenza di pinnacoli carsici. In questa zona si concentravano la maggior parte dei depositi di fosfati tricalcico, oggi quasi del tutto minati.

Le risorse d'acqua superficiale sull'isola sono pressoché assenti e sono rappresentate unicamente dalla laguna di Buada, nella parte sud occidentale, da alcuni stagni di acqua salmastra presenti alla base della scarpata che divide il pianoro costiero e il Topside e da un lago sotterraneo situato nella cava di Moqua, nella parte sud est di Nauru.

Per quanto riguarda le risorse di acqua sotterranea invece, si osserva la presenza di una lente d'acqua dolce resiliente nella parte nord dell'isola, nella zona dei distretti di Ewa e Anetan. Jacobson e Hill (1988) hanno osservato una lente d'acqua dolce di spessore medio pari a 4,7m nella parte centrale dell'isola, ma studi successivi (Falkland, 2008) hanno dimostrato che la presenza della stessa è legata a periodi particolarmente piovosi. Come descritto nei paragrafi successivi sono presenti anche altre lenti di acqua dolce di dimensioni decisamente inferiori e che difficilmente possono rappresentare una risorsa importante nel sistema complessivo di gestione delle acque sull'isola.

Il livello di salinità e l'elevazione sul livello del mare della lente di acqua dolce-salmastra dipendono dalla geologia, dalle precipitazioni e dai quantitativi di risorsa prelevati.

La vegetazione presente a Nauru è limitata a 60 specie autoctone di piante vascolari e qualche centinaio di specie importante. Le attività minerarie che hanno caratterizzato a lungo l'economia dell'isola hanno contribuito in maniera significativa alla riduzione della

biodiversità: si stima infatti che al termine delle attività estrattive, dalla fine degli anni '90, circa il 60% della vegetazione è stata rigenerata.

3.2 Clima e precipitazioni

Il clima di Nauru è caldo e umido con temperature medie massime giornaliere uniformi pari a 29-31°C per tutto l'anno e medie minime giornaliere pari a 24-26°C (Australian Bureau of Meteorology; 2011).

I venti sono in linea di massima moderati e soffiano da ovest a velocità che variano tra 5.1 e 9.3 m/s nel periodo tra dicembre e aprile, e da est a velocità comprese tra 2.6 e 5.1 m/s da maggio a novembre.

Dai dati di piovosità annuale raccolti tra il 1946 e 2008 e rappresentati in Figura 16, periodo in cui si ha disponibilità di informazioni uniforme e continuativa, si osserva una piovosità annuale altamente variabile con una media circa uguale a 2100 mm.

Nonostante la piovosità media annuale non sia scarsissima, Nauru è soggetta anche a periodi di forte siccità, dovuti principalmente agli effetti del fenomeno de "La Niña". A questi periodi si contrappongono quelli influenzati da "El Niño", fenomeno che comporta il raffreddamento delle correnti del Pacifico Occidentale e di conseguenza precipitazioni molto abbondanti. El Niño e La Niña influenzano il clima in maniera periodica in media ogni quattro anni e durano circa 18 mesi ma non sono prevedibili in maniera efficace. In Figura 16 si osserva un esempio dell'effetto de la Niña nel periodo tra il 1998 e il 2001 con piovosità molto scarsa e grave siccità.



Figura 16 Dati di piovosità media annuale in mm per gli anni dal 1946 al 2008. Fonte: Nauru governament

In Figura 17 si osservano i valori di precipitazione massimi, minimi e medi mensili, calcolati dal Governo di Nauru a partire dai dati giornalieri raccolti dal pluviometro ufficiale situato nei pressi della sede della Nauru Phosphate Corporation (NRC) nel distretto di Aiwo. Si osserva che il periodo più secco dell'anno è quello tra aprile e giugno.



Figura 17 Precipitazione massima, media e minima calcolata dal Governo di Nauru dai dati raccolti tra il 1946 e il 2008

3.3 Geologia e geomorfologia

L'isola di Nauru è un atollo corallino, costituito da un pianoro costiero che circonda un altopiano prevalentemente calcareo. La morfologia dell'isola può essere descritta dividendo l'area in tre zone distinte come rappresentato in Figura 18: Topside, Bottomside e la barriera corallina.



Figura 18 La barriera corallina, il Bottomside e il Topside. In figura sono riportati anche i pozzi di estrazione e monitoraggio analizzati nell'ambito dello studio portato avanti dal DIIAR del Politecnico di Milano (Alberti et al.,2017).

Nella parte centrale dell'isola si osservano tracce di terreno sopraelevato oltre i 50 m sul livello medio del mare, le quali indicano probabilmente la linea di una precedente scogliera.

Il Bottomside è la parte più bassa dell'isola con altitudini variabili tra 0 e 10 metri sul livello medio del mare. È un pianoro costiero che si estende fino ai 300 m di larghezza, costituito da una spiaggia rocciosa o sabbiosa sulla costa, dietro la quale si estende una zona di terreno relativamente pianeggiante caratterizzata dalla presenza di aree depresse e piccole lagune di acqua salmastra nei distretti di Ijuw and Anibare. Esempi di affioramenti calcarei sono presenti nel pianoro costiero e nelle parti interstiziali della barriera corallina nella zona della Anibare Bay.

L'intera isola è circondata da una barriera corallina che si estende in media per circa 150 m dalla linea di costa, ma che raggiunge anche i 250 m nella zona nord. Oltre la barriera corallina il fondale degrada fino a raggiungere profondità di 4000 metri.

Una scarpata ripida collega il pianoro costiero del Bottomside con l'altopiano interno conosciuto come Topside. Esso rappresenta la maggior parte dell'area dell'isola estendendosi per 16 km², il 70% circa del totale, ed è costituito da una matrice di pinnacoli calcarei affiorati e depositi di fosfato.

La maggior parte di questa zona è stata interessata dalle attività di estrazione di fosfato per 80 anni circa e fino agli anni '90. Il paesaggio attualmente appare profondamente deturpato dalla realizzazione delle miniere, ed è costituito da colonne di roccia calcarea in una rete di miniere connesse tra loro i cui affioramenti si elevano fino a 10 m dalla base delle miniere. Le aree non soggette a scavo sono state utilizzate per strade e campi profughi.

Nella zona sud occidentale dell'isola si riconosce la laguna di Buada, uno stagno profondo circa 3 metri con un fondale costituito da sedimenti fangosi. Il bacino della laguna è individuato all'interno di un considerevole cedimento carsico di 120000 m² e come anticipato precedentemente, rappresenta l'unico corpo idrico superficiale significativo. Secondo Jacobson e Hill, la laguna di Buada potrebbe far parte di una più estesa laguna ridottasi progressivamente a causa dell'alternarsi di periodi glaciali e interglaciali.

Nella zona nord dell'isola è presente un'altra area di subsidenza, la depressione di Ewa. Diversamente da Buada, la depressione di Ewa è attualmente secca.



Figura 19 Digital terrain model realizzato dal Politecnico di Milano nel 2010. Si distinguono il Topside, il Bottomside e le aree depresse

In Figura 19 è riportato il Digital Terrain Model (DTM) implementato dal Politecnico di Milano nel 2010 a partire dai rilievi fotogrammetrici effettuati dalla Nauru Rehabilitation Company nel 2009.

Le indagini realizzate da Jacobson e Hill (Jacobson e Hill,1987) identificano l'isola di Nauru come appartenente ad una montagna vulcanica sottomarina che sorge a 4300 m dalla superficie oceanica. Dall'analisi dei risultati degli studi sulle forze gravitazionali e magnetiche si evince che l'isola si appoggia su un tappo di 500 m di calcare dolomitizzato (Figura 20).

La roccia calcarea risulta intensamente carsificata per i primi 55 m di profondità almeno, con cavità piene di sedimenti fosfatici che indicano che probabilmente l'isola è stata sommersa per quasi tutta la sua storia geologica recente.



Figura 20 Una sezione trasversale della batimetria di Nauru riportata da Jacobson e Hill nel 1993

Come individuato già in precedenti studi (Jacobson et al., 1997), i sedimenti sabbiosi che costituiscono il Bottomside giacciono su rocce carbonatiche che distinguono i calcari dolomitici del pliocene del Topside da i calcari del Pleisto-Olocene che costituiscono la barriera corallina. L'isola di Nauru è interessata da significativi fenomeni carsici, i cui effetti hanno alterato in maniera considerevole i flussi di acqua sotterranea creando cave e vuoti nel sottosuolo.

Lo strato più superficiale del suolo dell'isola è stato notevolmente compromesso dalle attività di estrazione mineraria condotte fin dal 1906. Agli inizi del ventesimo secolo infatti, Nauru conteneva uno dei più grandi giacimenti di fosfati del pianeta. Si stima che le riserve originali fossero di 90 milioni di tonnellate (Hutchinson, 1950), mentre ad oggi la risorsa è praticamente esaurita.

3.4 Idrogeologia

Negli ultimi anni sono stati condotti diversi studi relativi all'idrogeologia dell'isola di Nauru. A partire dagli anni '80 diversi studiosi hanno approfondito e analizzato i dati raccolti attraverso carotaggi, misure di conducibilità elettrica delle acque e pozzi di monitoraggio al fine di stimare il carico idraulico e la salinità delle acque sotterranee e di conseguenza, la possibilità di sfruttare risorse alternative alle acque desalinizzate e di origine piovana. Gli studi condotti da Jacobson e Hill negli anni '80, hanno fornito un primo modello concettuale dell'isola, informazioni fondamentali relative alla distribuzione delle acque sotterranee e una stima della posizione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

Il livello di falda medio riscontrato in questi studi è pari a 0.3 m sul livello medio del mare, e il flusso radiale verso il mare, mentre lo spessore della zona di transizione è stimato intorno ai 60 m. L'entità dell'ampiezza della zona di transizione è spiegata in queste ricerche, tenendo conto dell'alta conducibilità idraulica dei calcari carsificati nel sottosuolo di Nauru che permette un flusso consistente di acqua marina verso l'entroterra. Altro fattore da elencare tra le possibili cause è la fluttuazione delle maree che determina un gradiente idraulico variabile in verso e direzione. Infatti, in condizioni di bassa marea il flusso d'acqua è rivolto verso il mare mentre in condizioni di alta marea l'acqua di mare si muove verso la costa determinando una zona di transizione molto ampia. Le maree influenzano significativamente anche i livelli della falda, ad eccezione di quelli della laguna di Buada, le cui oscillazioni si pensa possano dipendere unicamente dall'evapotraspirazione nei periodi di siccità. La variazione del livello di falda dovuto all'oscillazione delle maree è mediamente di 0,5 m e il ritardo del picco di marea varia tra 1.5 e 3 ore nei pozzi nel centro dell'isola e di un'ora nei pozzi sulla costa (Jacobson et al.,1988).

Nell'ambito degli studi condotti negli anni '80 e sopra brevemente descritti, furono condotte anche le indagini relative alla conducibilità elettrica delle acque per studiare la posizione delle lenti di acqua dolce nel sottosuolo dell'isola. Furono riconosciute due lenti d'acqua dolce identificate come principali, rappresentate in Figura 21: una nella zona centro settentrionale dell'isola con un'area di circa 1.3 km², e un'altra nei pressi della laguna di Buada di estensione pari a circa 2.4 km². La soglia di concentrazione scelta per la stima della salinità dell'acqua in questo studio è 1500 mg/L di solidi totali disciolti.



Figura 21 Le lenti di acqua dolce identificate da Jacobson e Hill nel 1987

Questo studio è stato condotto alla fine di un periodo umido, condizione in cui lo spessore delle riserve di acqua dolce utilizzabili è stato stimato essere circa 7 m e le quantità di risorsa disponibile rilevanti.

Al contrario, gli studi del 2008 di Falkland, sono stati condotti dopo un lungo periodo di siccità e i risultati ottenuti evidenziano una situazione abbastanza differente. La lente d'acqua dolce del Topside non appare essere resiliente e la quantità totale di acqua potabile disponibile risulta molto ridotta, ad eccezione di alcuni rilievi effettuati nei distretti di Ewa e Anetan dove appare possibile la presenza di una piccola lente di acqua dolce resiliente rispetto all'intrusione saline anche in condizioni di siccità.

Si deduce che la quantità di acqua dolce sotterranea disponibile dipende in maniera molto considerevole dalle precipitazioni, dalla permeabilità e dall'effetto delle maree.

Si rileva dunque, che difficilmente le risorse di acqua dolce possono soddisfare i fabbisogni della popolazione durante lunghi periodi di siccità.

Nel mese di aprile del 2010 il SOPAC (South Pacific Applied Geoscience Commission) ha condotto un ulteriore indagine che indica che lo spessore medio di acqua dolce è pari a 0.77 m circa per tutta la frangia costiera. In questa analisi la soglia di delimitazione tra acqua dolce e acqua salata è stata assunta pari a 2500 μ S / cm (corrispondente a una concentrazione di 1,725

 kg/m^3 (TDS), secondo la formula proposta da Ghassemi et al., ovvero TDS (mg/l) = 0,69 EC). È necessario, nel leggere i risultati di questo studio, tener conto del fatto che le misure sono state effettuate dopo 8 mesi di piogge sopra la media, e che quindi anche in questo caso si riconosce l'importanza dell'impatto delle acque piovane sulla salinità delle acque di falda.

In tutti gli studi sopra elencati si evince la forte sensitività del sistema idrogeologico di Nauru rispetto alle variazioni del clima e quindi la vulnerabilità delle risorse acquifere sotterranee.

Nello studio condotto nel 2017 dal Politecnico di Milano (Alberti et al. 2017) è ulteriormente approfondito il meccanismo di accumulo delle acque sotterranee nelle lenti di acqua dolce individuate dalle precedenti ricerche e ne viene chiarito il fenomeno di accumulo nelle diverse zone dell'isola.

L'attività di monitoraggio dei pozzi condotta durante un periodo di sei mesi, ha permesso di individuare la presenza di lenti di acqua dolce nella parte sabbiosa della costa e ne ha messo in evidenza la caratteristica di resilienza rispetto ai periodi di siccità.

Le analisi portate avanti dal Politecnico di Milano si sono concentrate in maniera particolare sui sedimenti sabbiosi costieri.

In questa zona le lenti d'acqua dolce sono resilienti per effetto della bassa conducibilità idraulica delle sabbie che determina il rallentamento del flusso di acqua dolce verso la costa, permettendone l'accumulo proprio lì dove ci si aspetta un'infiltrazione maggiore delle acque marine.

Le lenti d'acqua dolce ospitate nelle zone calcaree invece, scompaiono nei lunghi periodi di siccità per effetto del mescolamento rapido delle acque piovane con le acque salate sottostanti dovuto all'alta conducibilità idraulica.

Lo studio individua la zona nord dell'isola come l'area con maggior accumulo di acqua dolce disponibile agli usi degli abitanti ed individua le cause di questo fenomeno in tre fattori geomorfologici e idrogeologici:

- i venti soffiano da Est e da Ovest rispettivamente nel periodo secco e in quello umido, e quindi nelle zone Sud e Nord i fenomeni di erosione delle sabbie dovuti alle maree sono minori;
- l'elevato spessore dei sedimenti sabbiosi nella parte nord dell'isola;
- nella zona nord dell'isola il fondale ha un andamento più continuo, l'intensità della marea quindi è minore rispetto ad altre zone dell'isola e di conseguenza i fenomeni di sedimentazione delle sabbie e di accumulo di acqua dolce più probabili.

In conclusione il modello concettuale descritto nell'ambito dello studio condotto dal Politecnico di Milano identifica due acquiferi separati ma connessi verticalmente e lateralmente. Uno è rappresentato dai sedimenti sabbiosi nel Bottomside, l'altro dai calcari e dalle dolomiti che compongono il resto dell'isola. L'acqua attraversa velocemente il Topside e rallenta accumulandosi nell'acquifero sabbioso.

3.5 Flusso di falda

La rappresentazione della superficie piezometrica di Nauru più recente è quella costruita nell'ambito del "Progetto Nauru", condotto dal DIIAR del Politecnico di Milano, a partire dai dati raccolti tenendo conto delle fluttuazioni dei livelli di falda con la variazione delle maree. In via generale, nella zona del Topside il gradiente idraulico risulta piuttosto basso, minore dello 0.05 %, e aumenta muovendosi verso il bottomside raggiungendo lo 0.1 % circa. I risultati di questo studio confermano che il flusso di falda assume direzione radiale verso l'Oceano. A differenza di quanto si concludeva in studi precedenti però, si è osserva che la laguna di Buada non influenza in maniera significativa i flussi di falda e non rappresenta una zona di drenaggio. Le mappe piezometriche ottenute dai dati raccolti nel novembre 2010 e nell'ottobre 2011 sono riportate in Figura 22



Figura 22 Mappe piezometriche dei carichi a novembre 2010 e ottobre 2011

Jacobson e Hill hanno osservato che in condizioni di bassa marea si riscontra la presenza di diversi sbocchi di sorgenti di acqua dolce in corrispondenza della barriera corallina e che nella

zona ridosso del pianoro costiero un numero cospicuo di cave dell'entroterra forniscono un'entrata di acqua salata verso l'interno dell'isola.

3.6 Approvvigionamento idrico

Il fabbisogno totale di acqua a Nauru è stato stimato in circa 1000 m³/d di risorsa non potabile e in 1500 m³/d di acqua potabile.

L'acqua potabile ad oggi è fornita per la maggior parte dalla Nauru Phosphate Company attraverso operazioni di desalinizzazione delle acque e da sistemi di raccolta di acque piovane. Stando ai dati del 2001 l'impianto di desalinizzazione fornisce 950 t/d di acqua potabile. Risorse supplementari vengono importate nei casi di necessità.

In Figura 23 è rappresentata la distribuzione delle diverse fonti di acqua potabile sull'isola di Nauru.



Figura 23 Ripartizione delle fonti di acqua potabile a Nauru

Le acque piovane vengono utilizzate per alcuni scopi domestici e industriali e, come si nota dal grafico in Figura 23, esse rappresentano una percentuale consistente dell'approvvigionamento idrico sull'isola.

Le acque sotterranee sono estratte per lo più attraverso il sistema di pozzi situato lungo la costa e intorno alla laguna di Buada e vengono utilizzate per lo più per gli sciacquoni, per la doccia e per altri usi domestici, perché nella maggior parte dei pozzi l'acqua estratta non raggiunge gli standard di qualità della WHO (World Health Organization). Nei periodi particolarmente

siccitosi le acque di falda sono utilizzate anche per altri scopi nonostante l'elevato contenuto di solidi disciolti.

La qualità della risorsa sotterranea è però sotto continua minaccia da un lato, a causa degli effetti inquinanti del percolato da discarica e della contaminazione dovuta al trattamento dei fosfati estratti, dall'altro dai fenomeni di intrusione salina legati al sovrasfruttamento della risorsa e all'innalzamento dei livelli del mare

La carenza di combustibile e la conseguente necessità di importazione dello stesso a prezzo di mercato, influenzano il funzionamento degli impianti di desalinizzazione aggiungendo un ulteriore elemento di difficoltà nel sistema di gestione.

Come si evince dalle considerazioni sopra riportate Nauru affronta una situazione di estrema criticità sia in termini di disponibilità che di qualità di risorsa acquifera. Il sistema risulta quanto mai vulnerabile e una gestione oculata e sostenibile assume un ruolo di priorità assoluta.

3.7 La gestione della risorsa idrica nelle isole del Pacifico

I PICs, sigla che indica Pacific Islands Countries, sono un gruppo di stati, per lo più isole di piccole dimensioni, della regione dell'Oceano Pacifico. Dal punto di vista morfologico sono un gruppo eterogeneo di piccole isole basse, gruppi di atolli corallini e isole vulcaniche di grandi dimensioni (Falkland,2002). Una grande parte della popolazione di questi paesi, nel complesso abbastanza esigua, risiede in zone rurali, ma si osserva una crescente migrazione verso le aree urbane (Falkland,2002).

La gestione integrata e sostenibile delle risorse acquifere è una sfida tra le più importanti del terzo millennio. Nelle piccole isole in particolare, essa assume un ruolo centrale tra le strategie dei governi nazionali e locali nei campi ambientale, sociale, sanitario ed economico.

Il progressivo peggioramento dei livelli qualitativi e quantitativi delle risorse naturali, legato ai fattori di cambiamento climatico, di sovrasfruttamento e di inquinamento antropico, identifica la scelta di un modello di gestione adeguato della risorsa come un'assoluta priorità per tutti i livelli di governo.

Limiti strutturali, finanziari e istituzionali determinano una difficoltà costante nell'affrontare i problemi derivanti dalla limitatezza di acqua potabile nei PICs.

Secondo UNICEF e ONU circa 3 milioni di persone nella regione dell'Oceania non hanno accesso ad acqua potabile di qualità e servizi sanitari soddisfacenti

Ai limiti sopra citati si aggiunge un elevato livello di complessità nello studio del problema legato alla variazione della distribuzione delle risorse di acqua dolce tra le diverse nazioni e tra le diverse isole all'interno dello stesso stato.

Inoltre nella maggior parte dei casi l'insufficienza dei dati idrogeologici a disposizione rende molto difficili un'analisi e una programmazione adeguate delle misure governative da adottare. Werner et al. (Werner et al., 2017). hanno dimostrato che negli ultimi cinquanta anni sono stati fatti importanti progressi nella comprensione dei sistemi idrogeologici degli atolli corallini ma che ad oggi, in quasi tutti i casi mancano ancora dati a sufficienza.

I fattori che implicano questa mancanza dipendono dalla carenza di strumentazioni adatte ai sondaggi per la valutazione dei parametri di interesse idrogeologico ma anche dai conflitti per l'uso delle risorse naturali, dalle caratteristiche del sistema di approvvigionamento idrico, dalle difficoltà nell'implementazione di progetti e dal basso livello di partecipazione, attenzione ed educazione della popolazione sul tema.

Le fonti di acqua potabile disponibili nelle piccole isole possono essere divise in convenzionali e non convenzionali. Le risorse presenti in natura, o fonti convenzionali, sono le acque superficiali, le acque sotterranee e le acque piovane, mentre le fonti non convenzionali includono le risorse rese disponibili a fronte di un alto consumo energetico, o comunque, dell'impiego di tecnologie abbastanza costose: acque sottoposte a processi di desalinizzazione, acque di importazione, acque reflue riutilizzate dopo trattamenti di depurazione spinti, acque salate o salmastre utilizzate per sciacquoni e raffreddamento impianti (Carpenter et al., 2003). Le acque sotterranee nelle piccole isole si presentano in acquiferi sospesi o di base. Gli acquiferi sospesi si formano al di sopra di strati di confinamento orizzontali, mentre quelli di base sono costituiti da corpi d'acqua dolce confinati, freatici o parzialmente confinati al di sotto del livello del mare.

Nel caso degli acquiferi di base, la riserva di acqua dolce è alimentata dalla percolazione delle piogge attraverso il suolo ed è individuata da un equilibrio idrodinamico, spesso molto fragile, tra la stessa acqua dolce e l'acqua salata sottostante. Questa "lente d'acqua dolce" può estendersi fino ad occupare la zona al di sotto dell'intera isola, come indicato in Figura 24.



Figura 24 Lente d'acqua dolce tipica delle piccole isole. In rosso la variazione dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata dovuta all'estrazione da pozzi costieri (fenomeno dell'upconing)

Ad ogni modo si noti che per le particolari caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi negli atolli corallini, è possibile che riserve di acqua dolce siano contenute anche nella parte sabbiosa prossima alla costa. In alcuni casi infatti, è possibile osservare un complesso idrostratigrafico composta da sabbie carbonatiche dell'Olocene a bassa permeabilità, dove risiede la lente di acqua dolce, sovrapposta a un'unità a permeabilità di uno o due ordini di grandezza maggiore, formata da calcari del Pleistocene. I materiali a bassa permeabilità possono ostacolare i fenomeni di salinizzazione e fare in modo che anche in zone prossime alla costa e poco elevate sul livello del mare le acque sotterranee risultino dolci (Nakada et al. 2012).

Le risorse di acqua dolce nelle piccole isole sono estremamente vulnerabili alla contaminazione. I fenomeni di sovrasfruttamento, e quindi di intrusione salina, l'inadeguatezza degli impianti igienico sanitari, la penetrazione di inquinanti in acquifero e lo scarico di reflui in mare possono avere effetti molto pericolosi per la salute e il benessere di tutti gli abitanti, soprattutto nelle situazioni oggetto di studio, in cui le scorte d'acqua alternative sono decisamente scarse e i periodi di siccità spesso molto lunghi. La situazione risulta ancora più grave se si tiene conto delle proiezioni relative ai cambiamenti climatici a livello globale, che prevedono un allungamento dei periodi aridi e quindi una progressiva riduzione della disponibilità delle acque sotterranee per ampi periodi dell'anno.

Altri fattori che influenzano la necessità di adottare modelli di gestione efficienti e sostenibili della risorsa sono la rapida urbanizzazione e l'aumento della popolazione, con la conseguente espansione della domanda di acqua nella maggior parte dei Paesi. Buona parte delle comunità rurali inoltre, dipende dall'estrazione di acque sotterranee da pozzi scavati a mano e spesso sfoderati e lasciati scoperti, con conseguente contaminazione da parte di feci animali e di inquinanti.

Diversi Paesi che nelle zone rurali e remote basano le loro scorte sull'acqua piovana, non si sono ancora dotati delle strutture adeguate per lo stoccaggio e la raccolta, andando incontro quindi un alto rischio di inquinamento. Anche a livello familiare, la consapevolezza e la sensibilità riguardo alla tutela della risorsa idrica è solitamente scarso e quindi il livello di contaminazione spesso risulta elevato.

Per tutti questi motivi la tutela della qualità delle fonti di acqua sotterranea e di acqua piovana e una gestione accurata delle stesse risultano quanto mai fondamentali per tutta la popolazione.

4 Modello numerico 3D dell'isola di Nauru

In questo capitolo è presentato il modello numerico 3D dell'area dell'isola in Feflow 7.0 implementato allo scopo di simulare la disponibilità di risorse acquifere di Nauru per diversi scenari di cambiamento climatico.

Durante lo sviluppo del progetto di tesi, in una fase successiva alla discretizzazione dell'area di studio, il dominio è stato ridotto a circa metà isola in modo da diminuire i tempi di calcolo per le numerose simulazioni da svolgere. Essendo l'area a Nord dell'isola quella con maggiore disponibilità di acqua dolce (Falkland, 2008), si è deciso di concentrare gli sforzi di interpretazione e simulazione in questa zona. Al fine di studiare in maniera esaustiva i fenomeni di intrusione salina e simulare l'estensione dell'acquifero al di sotto del mare si è scelto di estendere il dominio del modello di un centinaio di metri oltre la line di costa.

La fase di calibrazione, i cui risultati sono presentati nei paragrafi successivi, è stata svolta sull'area intera nell'ambito di un lavoro di tesi diverso da quello qui presentato.

4.1 Discretizzazione orizzontale

La griglia orizzontale del modello è stata sviluppata con l'obiettivo di ottenere una discretizzazione che tenesse in pari considerazione le necessità di ottimizzare i tempi di calcolo e di assicurare un livello di accuratezza dei risultati alto. In questo modo si è provato a massimizzare il numero di simulazioni nel tempo disponibile e di conseguenza ampliare il campo degli scenari di cambiamento climatico analizzati.

Nella fase di implementazione della mesh, a partire dai criteri sopra indicati, si è mirato ad ottenere una griglia con il minor numero possibile di elementi, con zone a diversa densità e dimensione di primitive, con passaggi morbidi tra una zona e l'altra e con elementi di dimensione massima di 5 m nella fascia costiera.

Inizialmente sono state individuate le quattro aree concentriche in Figura 25, alle quali sono state assegnate densità di elementi decrescenti verso il centro dell'isola. Ad eccezione dell'area interna, ognuna di queste zone è stata definita parallelamente alla linea di costa.



Figura 25 Le aree concentriche individuate per l'implementazione della griglia a densità variabile

La griglia è stata generata in Feflow 7.0 attraverso il codice di triangolazione *Triangle*. Esso supporta la combinazione di poligoni, linee e punti, permette di scegliere l'angolo minimo per gli elementi che saranno creati e di impostare un target di dimensione massima sia per gli elementi dei poligoni che per quelli intorno alle linee e ai punti inseriti nella *supermesh*.

All'area interna dell'isola è stata assegnata una densità pari a 0.5 mentre per quella esterna si è optato per il valore 1. Le due aree intermedie hanno densità rispettivamente pari a 40 e a 3. Le densità sono state individuate per tentativi provando a bilanciare le esigenze di ottenere un numero totale di elementi ridotto, rendere il passaggio tra una zona e l'altra quanto meno rigido e più graduale possibile e raggiungere le dimensioni desiderate per gli elementi sulla costa.

Si è inoltre proceduto a raffittire la griglia lungo la linea di costa impostando un target di degli elementi pari a 8 m. In questo modo sono state ottenute dimensioni variabili tra i 5 m nella fascia costiera, e i 150 m per la zona interna dell'isola.

Infine per migliorare la modellazione del dominio si è proceduto alle operazioni di *smoothing* sui nodi, effettuata con lo strumento "*refiniment*" di Feflow, e a quella di "*snapping*" dei lati degli elementi con angoli ottusi in modo da ridurre il rischio di instabilità dei risultati. Ogni layer per il modello completo dell'isola contiene circa 177000 elementi, mentre il dominio

dell'area di studio per le simulazioni, ridotto alla parte nord di Nauru, contiene circa 75000 elementi.

In Figura 26 si osserva la griglia definitiva del modello.



Figura 26 La discretizzazione orizzontale del dominio di interesse ridotto a metà isola

4.2 Discretizzazione verticale

Il dominio del modello è stato discretizzato lungo la verticale definendo 18 layers di spessore variabile con la profondità. Le quote del layer superficiale, assegnate importando il DTM (Digital Terrain Model) in feflow, sono comprese tra i 1.592 m sopra il livello del datum di Nauru nella zona costiera, e i circa 50 m raggiunti nella zona interna del dominio; lo spessore di questo layer infatti varia con la quota della superficie e riproduce la configurazione

altimetrica dell'isola. La base del dominio invece, rappresentata dalla slice 19, è posta a -82.1 m rispetto al datum di Nauru.

La parte più superficiale del modello è quella da studiare con maggiore attenzione per valutare l'evoluzione dei fenomeni di intrusione salina.

Inoltre si è osservato nei capitoli precedenti che le maggiori riserve di acqua dolce di Nauru si accumulano nei sedimenti sabbiosi della zona nord dell'isola che si estendono per i primi venti metri di profondità. Quindi, sono stati assegnati spessori costanti lungo la superficie dell'isola e crescenti con la profondità. Così facendo infatti, la zona più superficiale del modello viene discretizzata in maniera più fitta ed è possibile ottenere dei profili di concentrazione più accurati in quest'area.

Come si nota nella Figura 27 e nella Figura 28, dove sono riportate rispettivamente le quote (e i relativi spessori) dei layers in cui è diviso il modello e la rappresentazione 3D del dominio, la discretizzazione è più fitta per tutta la profondità in cui si trovano le sabbie (fino alla slice 12).

Slice 🛛 💌	Quota [m] 💌	Spessore Layer [m] 💌
1	Segue DTM	variabile
2	0.852	0.74
3	-0.14	0.99
4	-0.64	0.50
5	-1.35	0.71
6	-2.4	1.05
7	-3.9	1.50
8	-6.2	2.30
9	-8.6	2.40
10	-11.1	2.50
11	-13.6	2.50
12	-17.1	3.50
13	-22.1	5.00
14	-27.1	5.00
15	-32.1	5.00
16	-42.1	10.00
17	-52.1	10.00
18	-62.1	10.00
19	-82.1	20.00

Figura 27 Quote e spessori delle slices di discretizzazione verticale del modello



Figura 28 Visualizzazione 3D della griglia orizzontale e verticale

4.3 Condizioni al contorno

Le condizioni al contorno rappresentano le condizioni matematiche attraverso le quali il modello si connette con le aree esterne al dominio di interesse. Per questo motivo la loro definizione è un aspetto fondamentale della fase di implementazione e deve essere portata avanti con estrema attenzione.

Le condizioni al contorno scelte per il modello di Nauru sono di due tipi: flusso nullo e carico e concentrazione costante.

La condizione di flusso nullo è stata assegnata lungo la zona tracciata per dividere il modello in due parti. O meglio, l'isola è stata divisa in due parti seguendo, per quanto possibile, le parallele alle linee di flusso e per questo motivo attraverso questa superficie il flusso è nullo. Infatti la maggior parte dell'acqua presente al centro dell'isola si muove verso la scarpata più vicina e quindi in direzione dei contorni a est e ovest del modello. Questa condizione è valida per tutti i layers.

In Figura 29, dove sono riportati i carichi idraulici per il modello calibrato sull'intera isola, è possibile osservare quanto appena descritto: le linee di flusso sono perpendicolari alle linee equipotenziali riportate in figura e quindi parallele alla superficie di divisione del modello.



Figura 29 Isolinee di carico idraulico per il modello calibrato dell'intera isola. In giallo la parte di isola considerata nel modello ridotto.

Le condizioni di carico e concentrazione costante sono state assegnate su tutti gli elementi che costituiscono la parte del modello corrispondente al mare. Si è tenuto conto dell'andamento del fondale imponendo le condizioni su tutta la costa per i primi due layer e solo sul contorno esterno al modello per i layer sottostanti.

La condizione di concentrazione costante è stata fissata per tutti i nodi al valore comunemente utilizzato per le acque dell'Oceano Pacifico pari a 35700 mg/l.

Per quanto riguarda il carico idraulico invece, si è assegnata la condizione di carico equivalente di acqua dolce secondo la formula:

$$H_{c.c.} = h_{mare} + Density ratio (quota mare - quota_{c.c.})$$

Dove il *density ratio* è definito come:

$$\frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s}$$

Il valore di h_{mare} , relativo al carico idraulico in superficie, varia, nell'ambito degli scenari simulati, tra 1.592, 1.732 e 1.932 m.

In Figura 30 si riporta la rappresentazione 3D della griglia, da cui si evince la distribuzione dei nodi sui quali sono assegnate le condizioni di carico e concentrazione costante lungo la

verticale. Come sopra descritto, in superficie le condizioni sono assegnate a tutta la costa mentre dalla terza slice in giù solo sul contorno esterno.



Figura 30 Posizione delle condizioni al contorno. In giallo i nodi su cui sono assegnate le condizioni di carico e concentrazione costante.

4.4 Parametri idrogeologici

La fase di calibrazione del modello è stata svolta nell'ambito di un lavoro di tesi differente rispetto a quello qui presentato.

I parametri iniziali sono stati assegnati a partire dai valori ottenuti nella fase di calibrazione del modello dell'isola di Nauru implementato dal DIIAR del Politecnico di Milano con il software Modflow.

Nell'ambito del lavoro appena citato sono stati ottenuti dei risultati soddisfacenti sia rispetto al carico idraulico che al flusso di acqua sotterranea. Per questo motivo, nella fase di calibrazione del modello in Feflow 7.0 ci si è concentrati sui valori e sulla distribuzione di salinità, seguendo un approccio trial and error e facendo variare i valori di permeabilità idraulica, di dispersività e di porosità.

Se da un lato il modello è apparso stabile fin dalle prime fasi della calibrazione, dall'altro, nelle zone in cui la conducibilità idraulica e la dispersività variano, si è notata da subito la presenza di valori di concentrazione negativa in un numero cospicuo di nodi. Sono state create, quindi, delle zone di buffer nelle aree suddette, in modo da rendere la transizione da un valore all'altro di conducibilità e/o dispersività meno rigida. È stato infine effettuato un ulteriore "refiniment" della griglia intorno ai buffer.

Queste operazioni si sono rivelate efficaci e sono stati ridotti considerevolmente i valori negativi di concentrazione.

Il modello così ottenuto è stato ritenuto pronto per le fasi di validazione e simulazione.

I valori dei parametri calibrati sono riassunti in Figura 31.

La conducibilità idraulica varia lungo le tre zone rappresentate in Figura 32,mentre per gli altri parametri sono stati individuate solo due zone eterogenee, relative ai calcari e alle sabbie.

Le conducibilità verticale è stata assegnata riducendo di un ordine di grandezza i valori di quella orizzontale.

Parametro idrogeologico 🛛 💌	Simbolo 💌	Calcari 💌	Sabbie 1 💌	Sabbie 2 💌
Conducibilità idraulica orizzontale	K _{x,y} [m/d]	800	15	10
Conducibilità idraulica verticale	K _z [m/d]	80	1.5	1
Porosità efficace	Sγ	0.007	0.1	0.1
Ricarica	R [mm/a]	620.5	620.5	620.5
Dispersività longitudinale	$\alpha_L[m]$	20	8	8
Dispersività trasversale	α _τ [m]	0.5	0.002	0.002

Figura 31 I parametri idrogeologici calibrati



Figura 32 Le zone a differente conducibilità idraulica. Come suggerisce la legenda i valori calibrati sono rispettivamente 800,15 e 10 m/d

5 Cambiamenti climatici e intrusione salina: risultati delle simulazioni

5.1 Vulnerabilità dell'acquifero di Nauru

Nei capitoli introduttivi di questo lavoro di tesi si è osservata l'importanza e la centralità del ruolo delle acque di falda nell'ambito della gestione della risorsa idrica.

Nelle isole la gestione integrata e sostenibile delle acque sotterranee assume una rilevanza primaria per la salute e il benessere dei cittadini, per la tutela dell'ambiente e per lo sviluppo economico e sociale.

A maggior ragione nei piccoli atolli, a causa della limitatezza delle risorse idriche naturali e dell'estrema vulnerabilità delle stesse, le acque sotterranee sono un'importante, e spesso la principale, fonte d'acqua dolce a disposizione della popolazione. Per questo motivo la tutela della quantità e della qualità della risorsa idrica è diventata una priorità di livello assoluto per i governi e gli enti gestori.

In queste situazioni i sistemi acquiferi risultano estremamente fragili e minacciati da un lato dai fenomeni di inquinamento antropico legati alla contaminazione dei suoli e della falda e dal sovrasfruttamento della risorsa, dall'altro dagli effetti dei cambiamenti climatici.

Le risorse sotterranee di Nauru sono relativamente ridotte. Nello specifico, studi precedenti tra cui Jacobson e Hill (1988), Falkland (2008), Bouchet e Sinclair (2010) e Alberti et al. (2017), hanno evidenziato che la disponibilità di acqua dolce nelle diverse zone dell'isola varia considerevolmente con il variare della ricarica meteorica. La zona maggiormente sfruttata in termini di uso diretto da falda è la zona costiera, dove risiede la maggioranza della popolazione e dove si concentrano buona parte dei pozzi di estrazione e diversi pozzi minori a uso domestico. Ad eccezione di quelli posti nella zona nord, nei distretti di Ewa e Anetan, i valori di salinità nei pozzi superano il limite soglia di potabilità suggerito dal World Health Organization (WHO) pari a 1500 mg/l. Come osservato da Alberti et al. (2017), nell'ambito del Progetto Nauru del Politecnico di Milano, nella zona sopra citata risiede una lente d'acqua dolce ospitata dai sedimenti sabbiosi costieri che può rappresentare un'importantissima risorsa di acqua potabile per Nauru. Tra le lenti d'acqua dolce individuate fino ad oggi essa, è l'unica che si è dimostrata essere resiliente alle variazioni di ricarica meteorica.

Le quantità d'acqua reimmesse in falda provenienti dall'impianto di desalinizzazione e dai serbatoi di acqua piovana alimentano questa riserva di acqua dolce che è "protetta" dall'intrusione salina delle sabbie presenti nel pianoro costiero dotate di valori bassi di conducibilità idraulica, come spiegato nei capitoli precedenti.

Lo spessore ridotto e la vulnerabilità della lente di acqua dolce dell'isola sono alcuni dei problemi che complicano il sistema di approvvigionamento idrico a Nauru. Secondo il rapporto SOPAC (2010) inoltre, il 26% del fabbisogno idrico totale della popolazione è fornito da acque sotterranee ma, a causa dei fenomeni di inquinamento organico solo lo 0.2% di questo viene utilizzato a scopi potabili.

Un sovrasfruttamento della risorsa in tale area potrebbe determinare un fenomeno significativo di upconing e di conseguenza, anche a causa dell'aggravarsi degli effetti negativi dei cambiamenti climatici, una forte contaminazione salina dell'acqua anche nello strato più superficiale.

In questo capitolo saranno descritti i risultati delle simulazioni effettuate con il codice Feflow 7.0 per valutare la variazione della disponibilità di acqua dolce al variare della ricarica meteorica e del livello del mare.

5.2 Scenari di cambiamento climatico simulati

Il modello descritto al capitolo precedente è stato quindi utilizzato per osservare gli effetti causati dai cambiamenti climatici sulla qualità della risorsa idrica a Nauru, ponendo particolare attenzione per le zone che potrebbero rivelarsi di interesse strategico nei prossimi anni (es. la lente d'acqua dolce nei distretti di Ewa e Anetan), andando inoltre a chiarire l'impatto della variazione di ricarica e del livello del mare sulla salinità delle acque di falda nella zona costiera settentrionale e nella parte centrale dell'isola.

Come brevemente accennato in precedenza, i tassi di infiltrazione sono abbastanza simili in tutta l'isola e la ricarica meteorica è stata considerata uniforme: nella zona maggiormente abitata (lungo la costa, presso il Bottomside), dove l'urbanizzazione è più intensa, le acque di pioggia vengono raccolte per scopi potabili presso le abitazioni ed in seguito reimmesse in falda attraverso fosse settiche dopo il loro utilizzo. Questo fenomeno non va quindi a determinare una variazione del tasso di infiltrazione in falda.

I valori delle variabili con cui sono stati impostati gli scenari di cambiamento climatico sono stati individuati a partire dall'analisi del report di previsione dei cambiamenti climatici sviluppato dal Governo Australiano per Nauru (Climate variability, Extremes and Change in the Western Tropical Pacific 2014).

In questo studio si osserva che gli eventi legati al El Niño e La Niña continueranno ad influenzare significativamente il clima dell'isola: si prevede che la media annuale delle piogge medie potrebbe aumentare e si afferma con un buon margine di sicurezza l'aumento della frequenza e dell'intensità degli eventi di precipitazione estremi. Inoltre, la frequenza dei periodi di siccità diminuirà mentre si osserverà un innalzamento del livello del mare, un aumento delle temperature medie annuali ed un incremento del processo di acidificazione dell'oceano.

Gli scenari presi in considerazione in questo rapporto sono direttamente legati agli RCPs (Representative Concentration Pathways) adottati dal IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) nell'ambito del *fifth Assessment Report* pubblicato nel 2014. Gli RCPs sono traiettorie di concentrazione di gas serra e sono state individuate al fine di descrivere quattro scenari futuri dipendenti dalle quantità di gas emesse nei prossimi anni. Essi sono definiti in base alla differenza di valori di *radiative forcing* nel 2100 rispetto a quelli dell'epoca pre-industriale: RCP2.6, RCP4.5, RCP6 e RCP8.5 indicano rispettivamente +2.6, +4.5, +6.0 e +8.5 W/m².

I quattro scenari analizzati a partire dagli RCPs sono nominati come segue:

- very low emissions per RCP 2.6;
- low emissions per RCP 4.5;
- medium emissions per RCP 6;
- very high emissions per RCP 8.5.

Variable	Season	2030	2050	2070	2090	Confidence (magnitude of change)
Surface air temperature (°C)	Annual	0.7 (0.4 to 1)	0.9 (0.6 to 1.4)	0.9 (0.5 to 1.4)	0.9 (0.6 to 1.5)	Medium
		0.7 (0.4 to 1.2)	1.1 (0.6 to 1.5)	1.4 (0.8 to 2.1)	1.5 (1.1 to 2.5)	
		0.7 (0.4 to 1)	1 (0.7 to 1.6)	1.5 (0.9 to 2.3)	1.9 (1.1 to 3)	
		0.9 (0.5 to 1.2)	1.5 (1 to 2.2)	2.3 (1.5 to 3.5)	3 (2 to 4.5)	
Maximum	1-in-20 year	0.6 (0.1 to 1.1)	0.7 (0.2 to 1.2)	0.8 (0.4 to 1.4)	0.8 (0.4 to 1.3)	Medium
temperature (°C)	event	0.6 (0.2 to 0.9)	0.9 (0.5 to 1.3)	1.2 (0.6 to 1.8)	1.4 (0.8 to 2.2)	
		NA (NA to NA)				
		0.9 (0.4 to 1.2)	1.5 (0.8 to 2.4)	2.3 (1.4 to 3.5)	3 (1.9 to 4.4)	
Minimum	1-in-20 year	0.7 (0.3 to 1)	0.8 (0 to 1.6)	0.8 (0.2 to 1.6)	0.8 (0.4 to 1.2)	Medium
temperature (°C)	event	0.6 (0.2 to 0.9)	1 (0.6 to 1.3)	1.2 (0.6 to 1.6)	1.4 (0.8 to 2.1)	
		NA (NA to NA)				
		0.8 (0.4 to 1.3)	1.5 (0.8 to 2.8)	2.4 (1.5 to 3.6)	3 (2 to 4.3)	
Total rainfall (%)	Annual	11 (-7 to 27)	19 (-9 to 56)	25 (5 to 72)	30 (-4 to 60)	Low
		18 (2 to 40)	24 (1 to 61)	33 (0 to 84)	37 (-1 to 105)	
		18 (-1 to 38)	26 (2 to 49)	29 (4 to 65)	40 (6 to 79)	
		21 (1 to 52)	32 (-3 to 69)	52 (-2 to 142)	63 (6 to 168)	
Total rainfall (%)	Nov-Apr	7 (-16 to 27)	16 (-17 to 47)	21 (-8 to 59)	28 (-9 to 60)	Low
		15 (-4 to 41)	19 (-7 to 50)	26 (-3 to 65)	27 (-7 to 90)	
		18 (-3 to 46)	24 (-11 to 50)	25 (-11 to 57)	34 (-12 to 83)	
		13 (-4 to 32)	26 (-12 to 74)	35 (-12 to 105)	45 (-7 to 139)	
Total rainfall (%)	May-Oct	16 (-1 to 51)	24 (-4 to 63)	31 (-3 to 93)	31 (-2 to 76)	Low
		22 (-1 to 50)	32 (3 to 108)	43 (0 to 128)	48 (10 to 143)	
		17 (-8 to 43)	28 (-7 to 73)	33 (-4 to 80)	48 (8 to 100)	
		32 (5 to 90)	41 (7 to 107)	73 (2 to 212)	86 (3 to 202)	
Aragonite saturation	Annual	-0.3 (-0.6 to -0.1)	-0.4 (-0.7 to -0.1)	-0.4 (-0.6 to -0.1)	-0.3 (-0.6 to -0.1)	Medium
state (Ωar)		-0.3 (-0.6 to 0.0)	-0.5 (-0.8 to -0.2)	-0.6 (-0.9 to -0.4)	-0.7 (-1.0 to -0.4)	
		NA (NA to NA)				
		-0.3 (-0.6 to -0.1)	-0.6 (-0.9 to -0.4)	-1.0 (-1.3 to -0.7)	-1.4 (-1.6 to -1.1)	
Mean sea level (cm)	Annual	12 (8-17)	22 (14-30)	32 (19-45)	42 (24-60)	Medium
		12 (7-17)	22 (14-31)	35 (22-48)	48 (29-68)	
		12 (7-16)	22 (14-30)	34 (21-48)	49 (30-69)	
		13 (8–18)	25 (17-34)	42 (28-58)	63 (41-89)	

Figura 33 Proiezione della variazione del clima a Nauru per i quattro scenari di emissione di gas serra. In blu scuro lo scenario a very low emissions, in azzurro quello a low emissions, in arancione medium emissions e in rosso lo scenario very high emissions. New Science and Updated Country Reports (2014)

In Figura 33 sono riportati i cambiamenti medi previsti e il grado di incertezza per alcune delle variabili osservate dal governo australiano su proiezione di diversa durata e per diversi scenari di incremento delle emissioni di gas serra (GHG) a livello globale.

Le direzioni delle evoluzioni delle variabili sono previste con un alto, o altissimo margine di sicurezza, mentre l'ordine di grandezza con cui potrebbero variare è riportato con un margine di incertezza medio o basso.

Nell'ambito di questo lavoro di tesi sono stati studiati 30 scenari di cambiamento climatico possibili tenendo conto della variazione di tre variabili principali:

- Precipitazioni
- Uso del suolo
- Livello del mare

L'uso del suolo determina in maniera diretta l'entità dell'evapotraspirazione che permette, insieme all'entità delle precipitazioni, di stimare la ricarica di cui tener conto nell'implementazione del modello di flusso e trasporto (il deflusso superficiale è trascurato come accennato nei capitoli precedenti):

Ricarica = *Precipitazione* - *Evapotranspirazione*

I 30 scenari da simulare sono stati scelti considerando tutte le possibili combinazioni di tre valori di livello del mare (0,0.14 e 0.34 m s.l.m.), tre livelli di precipitazione (0.0055, 0.0065 e 0.0073 m/d) e tre livelli di evapotraspirazione (60%, 48% e 30% della precipitazione) e di sei scenari aggiuntivi. In questi ultimi si è valutato l'andamento della concentrazione per i tre possibili livelli del mare precedentemente individuati, incrociandoli sia con il valore di ricarica meteorica fornito dal modello calibrato, pari a 0.0017 m/d (620.5 mm/anno), sia con un valore di ricarica meteorico inferiore all'attuale, in controtendenza dunque rispetto alle previsioni fornite dal governo Australiano, e pari a 0.0007 m/d (255.5 mm/anno).

I valori di precipitazione che definiscono i tre scenari di ricarica derivano da:

- Precipitazione media attuale pari a 0.0055 m/d
- Proiezione al 2050 scenario *very low emissions*: 19% di aumento rispetto allo scenario attuale, con precipitazione media pari a 0.0065 m/d
- Proiezione al 2050 in caso di incremento massimo delle emissioni: 32 % di aumento rispetto allo scenario attuale, con precipitazione media pari a 0.0073 m/d

Per quanto riguarda i valori di livello del mare sono stati presi in considerazione gli stessi scenari di emissione utilizzati già per le precipitazioni, ossia quelli con gli incrementi minimi e massimi delle emissioni al 2050. Il valore di variazione minimo è pari a 14 cm di aumento, e quello massimo è pari a 34 cm di aumento; tale scelta è stata effettuata in modo da poter valutare la situazione più rischiosa in termini di eventuale compromissione della risorsa.

L'orizzonte temporale della simulazione è stato infine fissato al 2050, coerentemente con le l'orizzonte di proiezione per gli scenari presi in esame dal governo australiano.

Il time step iniziale è stato impostato pari a 0.001 giorni e il fattore di crescita massimo tra un time step e il successivo pari a 2.

In Figura 34 sono riportati tutti gli scenari simulati.

	Variables Model input parameters			
Simulation #	rainfall (m/d)	evapotranspiration (m/d)	Recharge (uniform) (m/d)	Sea level boundary (m s.l.m.)
0	0.00425	0.00255	0.0017	0
0.1	0.00425	0.00255	0.0017	0.14
0.2	0.00425	0.00255	0.0017	0.34
1	0.0055	0.00330	0.0022	0
2	0.0055	0.00330	0.0022	0.14
3	0.0055	0.00330	0.0022	0.34
4	0.0055	0.00264	0.0029	0
5	0.0055	0.00264	0.0029	0.14
6	0.0055	0.00264	0.0029	0.34
7	0.0055	0.00165	0.0039	0
8	0.0055	0.00165	0.0039	0.14
9	0.0055	0.00165	0.0039	0.34
46	0.0065	0.00393	0.0026	0
47	0.0065	0.00393	0.0026	0.14
48	0.0065	0.00393	0.0026	0.34
49	0.0065	0.00314	0.0034	0
50	0.0065	0.00314	0.0034	0.14
51	0.0065	0.00314	0.0034	0.34
52	0.0065	0.00196	0.0046	0
53	0.0065	0.00196	0.0046	0.14
54	0.0065	0.00196	0.0046	0.34
94	0.0073	0.00348	0.0038	0
95	0.0073	0.00348	0.0038	0.14
96	0.0073	0.00348	0.0038	0.34
97	0.0073	0.00218	0.0051	0
98	0.0073	0.00218	0.0051	0.14
99	0.0073	0.00218	0.0051	0.34
100	0.0018	0.00105	0.0007	0
101	0.0018	0.00105	0.0007	0.14
102	0.0018	0.00105	0.0007	0.34

Figura 34 Scenari simulati: combinazioni di precipitazione, evapotraspirazione e livello del mare

5.3 Risultati delle simulazioni

Al fine di monitorare le possibili evoluzioni del sistema, sono stati individuati 84 punti d'osservazione in cui si è valutato l'andamento della concentrazione fornito alla fine di ogni simulazione effettuata con il modello calibrato. Sono stati tenuti in considerazione in maniera particolare le prime 13 slices del modello in modo da poter valutare gli effetti dell'intrusione alle profondità dove risiedono i sedimenti sabbiosi (fino alla slice 12) e alla profondità dove essi scompaiono (slice 13).

I punti di osservazione sono stati ordinati in differenti cluster in modo da poter individuare le caratteristiche simili dei risultati per diverse zone dell'isola. In Figura 35è riportata la pianta dell'isola che indica la posizione dei vari cluster individuati.

I cluster da 1 a 5 raggruppano i punti di osservazione che si trovano sulla medesima verticale a distanza crescente dalla costa. Nel cluster 1 si concentrano i punti più vicini alla costa mentre nel cluster 5 quelli nella parte più centrale dell'isola.



Figura 35 La posizione dei cluster sulla pianta dell'isola

I clusters 6 e 7 sono costituiti dai punti localizzati nei depositi sabbiosi che ospitano la lente d'acqua dolce situata nei distretti di Ewa e Anetan, nella parte nord dell'isola. I punti del cluster 6 si trovano in sedimenti sabbiosi a conducibilità idraulica lievemente più bassa di quelli, sempre costituiti da sabbie, in cui ricadono i punti del cluster 7.

In Figura 36 è riportato lo schema dei punti di osservazione che compongono ogni cluster e viene indicata la quota e la litologia di riferimento.

CLUSTER	2	OBS POIN1	SLICE 🔽	QUOTA m s.l.m. 💌	Litologia 🗾 🔽
-	1	1-13	1-13	1.592: -22.1	Sabbie 1-9; Calcari 10-13
2	2	18-30	1-13	1.592: -22.1	Sabbie 1-9; Calcari 10-13
3	3	56-70	1-13	25: -22.1	Calcari
4	4	55;77-88	1-13	24: -22.1	Calcari
Į.	5	35-47	1-13	26: -22.1	Calcari
E	6	100-104	3,6,7,8,9	-0.14: -8.6	Sabbie k basso
	7	111-114	4,6,7,9	-0.64: -8.6	Sabbie
5	8	129-138	7	-3.9	Sabbie

Figura 36 L'organizzazione in cluster dei punti di osservazione con le relative quote e l'unità idrogeologica di riferimento

Come ci si poteva aspettare, si osserva che in via generale la salinità delle acque di falda aumenta all'aumentare del livello del mare e diminuisce all'aumentare della ricarica meteorica. In Figura 37 e Figura 38 sono riportati, come esempio a supporto di quest'ultima osservazione, gli andamenti delle concentrazioni per il cluster 1.

Per i punti di osservazione più superficiali (1 e 2 in figura) la concentrazione sembra raggiungere un asintoto: in questa situazione infatti, l'esigua distanza dal mare influisce più dell'incremento di acqua dolce dovuto all'aumento della ricarica, che probabilmente viene immediatamente persa nel deflusso a mare.



Figura 37 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 1 al variare del valore di ricarica per livello del mare fissato a 0,34 m



Figura 38 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 1 al variare del livello del mare per ricarica fissata al livello base di 620,5 mm/a

Analizzando la variazione della concentrazione e tenendo costante, a seconda del caso, il livello del mare o la ricarica, risultano più evidenti alcuni aspetti fondamentali e caratterizzanti di ogni cluster.

Nei punti di osservazione del cluster 6, nei pressi dei distretti di Ewa e Anetan, si osserva che la lente di acqua dolce è fortemente influenzata dalla ricarica meteorica, e lo spessore della stessa può variare da una decina di metri nel caso più favorevole in cui il livello del mare è invariato rispetto all'attuale ed in cui è impostato il valore massimo di ricarica (pari a 1861.5 mm/a) fino a circa 1.5 m nel caso in cui il livello del mare è pari 0.34 m ed in cui la ricarica è minima e pari a 255.5 mm/a.

In Figura 39 si osserva che per i punti di osservazione più profondi i valori di concentrazione variano in maniera molto significativa, nell'ordine delle decine di migliaia di mg/l, con la variazione di ricarica, fino ad assumere valori man mano più stabili a cavallo di valori di ricarica tra i 1000 e i 1500 mm/a.



Figura 39 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 6 al variare della ricarica livello del mare 0. Per i punti più in superficie si osservano concentrazioni basse anche per i valori di ricarica più modesti

L'entità della variazione di concentrazione si riduce intorno al valore di ricarica di 1500mm/a al crescere del valore del livello del mare. Al diminuire della profondità invece, le variazioni di concentrazione per variazione di ricarica sono molto minori, e le acque risultano mantenere concentrazioni inferiori alla soglia di potabilità posta dal WHO (1500 mg/l) già per valori di ricarica inferiori ai 1000 mm/a. Si può ipotizzare che già dai primi valori di ricarica le concentrazioni nei punti di osservazione più superficiali siano già prossime a quelle raggiunte all'equilibrio per cui la variazione di concentrazione in superficie risulta minore.

Per lo scenario con livello del mare pari a 0 m s.l.m. la salinità delle acque è inferiore ai 1500 mg/l per tutto lo spessore di acquifero analizzato in caso di valori di ricarica maggiori di 1241mm/a.

Per le ricariche pari a 1058.5, 949 e 803 mm/a invece, lo spessore della lente d'acqua dolce si estende fino ad una profondità di circa 8 metri fino a 6 m circa nello scenario base di ricarica pari a 620.5 mm/a, mentre si riduce fino a raggiungere profondità intorno ai 2.5 metri per la ricarica di 255.5 mm/a.

Per lo scenario con livello del mare pari a 0.14 m (Figura 40), lo spessore della lente d'acqua dolce si estende intorno ai dieci metri per valori elevati di ricarica, mentre assume valori poco inferiori agli 8 m per ricariche pari a 1058.5 e 1241 mm/a, riducendosi progressivamente al diminuire dei valori di precipitazione fino alla profondità di 1.5 m per il valore di ricarica minimo (255.5 mm/a).



Figura 40 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 6 al variare della ricarica livello del mare 0.14m

La situazione meno favorevole è chiaramente quella con livello del mare 0.34 m rappresentata in Figura 41:



Figura 41 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 6 al variare della ricarica livello del mare 0.34m

Gli spessori della lente d'acqua dolce non variano in maniera significativa rispetto al caso precedente anche se nella maggior parte dei punti di osservazione le concentrazioni risultano maggiori.

I punti di osservazione del cluster 7 si concentrano nella zona costiera dei distretti di Ewa e Anetan e sono disposti lungo una sezione verticale in prossimità della costa, nei sedimenti sabbiosi dotati di permeabilità bassa ma lievemente maggiore rispetto ai sedimenti che ospitano i punti di osservazione del cluster 6.

In Figura 42 si osserva una situazione abbastanza simile a quella del cluster 6 ma con concentrazioni lievemente più alte e spessori della lente d'acqua dolce più ridotti, probabilmente perché, pur trovandosi nella zona a permeabilità minore, è in una posizione più periferica della lente di sabbia che occupa il pianoro costiero rispetto a quanto non sia il cluster 6 dove l'acqua dolce ha più possibilità di accumularsi.



Figura 42 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 7 al variare della ricarica livello del mare 0.34m
Per il livello del mare 0,34 m l'acqua dolce si trova fino a profondità di circa 6 m per tutti i valori di ricarica presi in considerazione maggiori di 949 mm/a, mentre per valori inferiori lo spessore si riduce intorno ai 4 m (con ricarica pari a 803 mm/anno) e circa 2 m per il livello di ricarica base. Infine nel caso con ricarica minima anche i punti di osservazione posti negli strati più superficiali indicano concentrazioni maggiori della soglia di 1500 mg/l.

Dal confronto tra la Figura 43 e la Figura 44 si deduce che per valori medio-bassi (inferiori a 1058,5 mm/a) di ricarica, le concentrazioni non subiscono variazioni significative all'aumentare del livello del mare da 0,14m a 0,34 m mentre per valori-medio alti le differenze appaiono più rilevanti.

Gli spessori della lente di acqua salata seguono grosso modo l'andamento descritto per il livello del mare 0,34 m.



Figura 43 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 7 al variare del livello del mare per ricarica fissata a 255.5 mm/a



Figura 44 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 7 al variare del livello del mare per ricarica fissata a 1861.5.5 mm/a

Come si nota in Figura 45 la lente d'acqua dolce assume invece profondità maggiori nel caso di livello del mare uguale a zero: nello scenario ottenuto dalla combinazione del valore di ricarica massima (1861.5 mm/a) e del valore di livello del mare 0, la lente di acqua dolce si estende fino ad una decina di metri di profondità. Si tenga presente che questo scenario prende in considerazione un valore di ricarica ottenuto da una proiezione di pioggia relativa allo scenario *very high emissions* e un livello del mare inalterato rispetto alla situazione attuale. Per la ricarica di 620.5 mm/a lo spessore si attesta intorno a 4 m mentre per tutti gli altri valori di ricarica, ad esclusione dello scenario con valore minimo in cui non si osservano quantità di acqua dolce significative alle profondità analizzate, la profondità della lente d'acqua dolce è di

circa 6 m.



Figura 45 La concentrazione nei punti di osservazione del cluster 7 al variare della ricarica livello del mare 0 m.

In linea di massima si può osservare che la riserva di acqua dolce presente nei depositi sabbiosi presso i distretti di Ewa e Anetan può assumere spessori inferiori a quelli osservati nei precedenti studi, ma comunque non trascurabili. All'aumentare del livello del mare, in caso di valori di ricarica bassi (255.5-803 mm/a) la profondità a cui si trova l'acqua salata (concentrazione maggiore di 1500 mg/l) diminuisce significativamente. Questo aspetto è da valutare con la massima attenzione ed è necessario approfondire la conoscenza del comportamento del sistema relativamente a questo tipo di stress restringendo magari il campo di studio agli scenari più probabili, in quanto, come già osservato precedentemente, la lente d'acqua dolce in questa zona è una risorsa fondamentale per l'approvvigionamento dell'isola. Le concentrazioni simulate nei punti di osservazione del cluster 1 sono fortemente influenzate dalle condizioni al contorno. I punti di questo cluster si trovano infatti nell'area nord est dell'isola, a pochissimi metri dalla linea di costa. Come si evince facilmente dal grafico in

Figura 46 anche per i punti più superficiali, per le ricariche maggiori e livello del mare 0, i valori di concentrazione superano abbondantemente la soglia dei 1500 mg/l.



Figura 46 Concentrazioni nei punti del cluster 1 al variare della ricarica superficiale per livello del mare fissato a 0 m

Informazioni più significative rispetto alla presenza di acqua dolce in prossimità della costa possono essere tratte dall'analisi dei risultati relativi al cluster 2, insieme di punti posti su una verticale distante circa 50 m dalla costa e per questo meno influenzata dalla presenza delle condizioni al contorno.

Osservando l'andamento delle concentrazioni e tenendo fisso il livello del mare a 0,34 m (Figura 47) nei punti del cluster 2 si rilevano, a differenza del cluster 1, concentrazioni di acqua dolce anche a profondità considerevoli.

Nel caso di ricarica massima e in quello con ricarica pari a 1679 mm/a, lo spessore d'acqua dolce si estende fino agli 8 metri di profondità, mentre per il valore di ricarica minimo si riduce fino a raggiungere i 2 m. In tutti gli altri casi intermedi la profondità alla quale è ancora riscontrabile acqua dolce è circa 6 m.

In generale fissando il livello del mare a 0,14 m e 0 m si osserva che lo spessore d'acqua dolce varia rispettivamente tra i 2 e gli 8 m e tra i 3 e gli 8 m. Nel secondo caso però, si osservano spessori con valore massimo, pari a 8m, per tutti gli scenari con ricarica maggiore di 1085.5 mm/a.

In tutti i casi osservati, a prescindere dal valore di ricarica e del livello del mare si osserva che lo spessore della riserva di acqua dolce non raggiunge mai la profondità alla quale si presenta la litologia dei calcari, ovvero circa 12 m. Nella zona costiera a nord dell'isola quindi, ad esclusione degli scenari particolarmente sfavorevoli in cui si simulano i casi con livello del mare più elevato e con valore di ricarica molto basso, si osserva in generale la permanenza di un volume di acqua dolce che potrebbe assumere un'importanza significativa nel sistema di gestione della risorsa idrica dell'isola di Nauru.



Figura 47 Concentrazioni nei punti del cluster 2 al variare della ricarica superficiale per livello del mare fissato a 0 m

I punti del cluster 3 sono disposti a poco meno di 1 km dalla costa e ricadono tutti all'interno dei calcari.

Qui le concentrazioni sono sempre maggiori del limite di potabilità suggerito dal WHO e, come si nota inFigura 48, anche in questa zona variano significativamente con ricarica e profondità. In alcuni dei punti più superficiali, per gli scenari con livello del mare basso e ricarica elevata, le concentrazioni arrivano ad essere molto prossime alla soglia di 1500 mg/l ma comunque superiori, confermando quanto riportato da Alberti et al. 2017 riguardo alla scarsa capacità dei calcari di trattenere l'acqua dolce che, a causa dell'elevato grado di fratturazione della roccia e quindi della sua alta permeabilità, si muove velocemente dalla parte centrale dell'isola verso la zona costiera.



Figura 48 Concentrazioni nei punti del cluster 3 al variare della ricarica superficiale per livello del mare fissato a 0 m

Tuttavia, i punti del cluster 4 distano poco meno di 2 km dalla costa e si trovano nella zona dei calcari. I valori osservati in questa zona, insieme ai risultati ottenuti per il cluster 5, indicano la presenza di una consistente lente di acqua dolce nella parte centrale dell'isola per la maggior parte degli scenari simulati.



Figura 49 L'andamento delle concentrazioni nei punti del cluster 4 al variare della ricarica per valore del livello del mare pari a 0 m s.l.m.

Dalla Figura 49 infatti si evince che all'aumentare della ricarica si osservano sempre più punti con salinità al di sotto della soglia della potabilità. Solo per i punti di osservazione 87 e 88, quelli più in profondità, nessuno degli scenari evidenzia valori di concentrazione inferiori ai 1500mg/l.

Le osservazioni sviluppate a partire dalla valutazione dei risultati dei punti del cluster 4 trovano sostegno dall'analisi relativa al cluster 5:



Figura 50 L'andamento delle concentrazioni nei punti del cluster 5 al variare della ricarica e livello del mare fissato a 0.34 m

Spostandoci verso l'interno dell'isola infatti, a una distanza di circa 2.5 km dalla costa, si osservano punti a salinità inferiori al limite di 1500 mg/l, a profondità ancora più elevate che nel caso del cluster 4.

Come si evince dal grafico in Figura 50 già considerando il livello del mare pari a 0.34 m e a partire dal valore di ricarica base di 620.5 mm/a si riscontra un abbassamento significativo delle concentrazioni anche per i punti di osservazione più profondi. In questo caso gli spessori di acqua dolce variano tra gli 8 e 18.5 m circa per ricariche rispettivamente di 620.5 mm/a e di 1241, 1387, 1423.5,1679 e 1861.5 mm/a.

Gli spessori della lente di acqua dolce aumentano fino a raggiungere i 20 m circa nello scenario con livello del mare fissato a 0 m e ricarica massima.

I risultati appena descritti sembrano confermare quanto evidenziato da Falkland (2008) che aveva riscontrato una lente d'acqua dolce nella zona centrale dell'isola, individuata in precedenza anche da Jacobson e Hill (1987), ma la cui presenza si è dimostrato essere legata solo a periodi particolarmente piovosi. Figura 51 si osserva la posizione della lente d'acqua dolce in questione e si nota che i punti di osservazione dei clusters 4 e 5 ricadono in questa stessa zona.



Figura 51 La posizione dei clusters 4 e5 e della lente d'acqua dolce nella zona centrale dell'isola

Al fine di valutare l'incidenza sulle concentrazioni della ricarica e dei livelli del mare nelle varie zone dell'isola sono state calcolate le variazioni di concentrazione per unità di ricarica (mm/a) e per unità di variazione di livello del mare (cm). La prima è stata calcolata come variazione media della concentrazione nel range di ricarica analizzato per ognuno dei punti di osservazione e di livello del mare, mentre la seconda è stata calcolata come media nel range di variazione del livello del mare, valutato in cm, per tutti i punti di osservazione e per i valori di ricarica minimo, base, medio e massimo.

$$Variazione media \ conc \ per \frac{mm}{a} \ di \ ricarica = \frac{Conc_{max} - Conc_{min}}{Ricarica \ max} - Ricarica_{min}$$

 $Variazione media \ conc \ per \ cm \ di \ liv \ del \ mare = \frac{Conc_{max} - Conc_{min}}{Liv \ del \ mare \ _{max} - Liv \ del \ mare_{min}}$

È stata poi calcolata la media in ogni cluster per ognuno di questi due indici.

Una prima osservazione che si può fare è relativa al fatto che, all'aumentare del livello di ricarica meteorica, l'influenza della variazione del livello del mare si riduce. All'opposto, all'aumentare del livello del mare la variazione di concentrazione per mm/a di ricarica diventa sempre più consistente. Questo dimostra quindi una sensibilità maggiore dei risultati del

modello alla ricarica meteorica che diventa quindi un parametro particolarmente importante per le simulazioni previsionali la cui stima deve quindi essere il più possibile affidabile.

Come ci si aspettava e come si nota per l'esempio relativo alla ricarica 1861.5 mm/a in Figura 52, muovendosi verso il centro dell'isola l'aumento del livello del mare influenza sempre meno i risultati delle simulazioni.

La variazione della concentrazione per mm/a di ricarica si mantiene più o meno simile per tutti e tre i valori di livello del mare.



Figura 52 Variazione media della concentrazione per cm di variazione del livello del mare

Per i cluster relativi al Topside, i cui punti fanno riferimento ai calcari, si nota che all'aumentare della profondità le variazioni di ricarica e livello del mare incidono più che in superficie, dove le concentrazioni sono già relativamente basse.

Effettuando un confronto tra i cluster dell'area costiera dei distretti di Ewa e Anetan si evidenzia che i punti del cluster 7 subiscono maggiormente l'influenza delle variazioni di ricarica e livello del mare rispetto a quelli del cluster 6. La spiegazione potrebbe stare nel fatto che, come anticipato in precedenza il cluster 6 rappresenta punti che si trovano in depositi sabbiosi a permeabilità inferiore rispetto a quelli raggruppati nel cluster 7 e che quindi l'effetto della minore conducibilità idraulica può tradursi in una maggiore inerzia del sistema agli stress imposti. Non è da escludere in ogni caso anche la possibilità che la vicinanza alle condizioni al contorno determini lo stesso effetto e sia la causa principale dei valori osservati.

Successivamente si è proceduto a calcolare la variazione percentuale della concentrazione ottenuta alla fine di ogni simulazione rispetto allo scenario base (livello del mare 0 m s.l.m. e ricarica 620,5 mm/a). Il valore così ottenuto è stato pesato sulla concentrazione dell'acqua salata pari a 35700 mg/l.

$$\frac{Conc_{Scenario} - Conc_{Scenario Base}}{35700} * 100$$

Infine, è stata poi calcolata la media per ogni cluster.

I risultati ottenuti in questo modo sono riportati in Figura 53.

In quest'ultimo grafico è riportato anche il caso del cluster 8 in cui sono raggruppati dieci punti di osservazione situati nella parte ovest dell'isola che è indicata nello studio condotto da Alberti et al. nel 2017 come una delle aree potenzialmente sfruttabili in termini di estrazione della risorsa idrica sotterranea.

La presenza di valori negativi indica che le concentrazioni sono mediamente diminuite rispetto allo scenario base, viceversa per la presenza di valori positivi.

Si nota che per i tre scenari con ricarica inferiore rispetto a quella base i valori osservati sono positivi per ogni cluster, cioè la concentrazione aumenta e la disponibilità di acqua dolce diminuisce.

Viceversa per le simulazioni con valore di ricarica maggiore di quello base (620.5 mm/a) le variazioni sono tutte negative, per questi scenari le salinità medie diminuiscono e la disponibilità di acqua aumenta. Fanno eccezione i cluster 1 e 2, per i quali si hanno variazioni leggermente positive anche negli scenari con ricarica 803.5 mm/a (cluster 1 e cluster 2) e 949 mm/a (solo cluster 1)



Figura 53 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base

Il cluster 1 è quello più prossimo al mare ma proprio per questa ragione qui non si evidenziano significative variazioni di concentrazione al variare della ricarica a causa della forte influenza delle condizioni al contorno. Come atteso si verifica un aumento di concentrazione nei cluster più vicini alla costa per valori di ricarica bassi e per valori del livello del mare maggiori di quello base (0 m s.l.m.). Questo è dovuto alla vicinanza dell'oceano ma anche alla presenza delle sabbie del pianoro costiero che sono in grado di accumulare acqua dolce in quella zona nonostante questa sia così prossima al mare. In tutti gli altri casi, in generale, le variazioni di concentrazione risultano contenute evidenziando quindi una grande inerzia del sistema agli stress imposti. Soprattutto nelle zone lontane dalla costa, dove sono presenti i calcari, le variazioni risultano poco importanti a causa dell'elevata conducibilità che non permette all'acqua dolce di accumularsi nonostante l'aumento della ricarica meteorica.

Nelle figure che seguono sono rappresentate le proiezioni dei risultati del grafico in Figura 53 sui piani relativi ai tre livelli del mare 0, 0.14 e 0.34 (Figura 54, Figura 55 e Figura 56 rispettivamente) m s.l.m. e sui piani passanti per i valori di ricarica 255.5, 1058.5 e 1861.5 mm/a (Figura 57, Figura 58 e Figura 59 rispettivamente).



Figura 54 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano livello del mare = 0 m s.l.m.



Figura 55 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano livello del mare = 0.14 m s.l.m.



Figura 56 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano livello del mare = 0.34 m s.l.m.



Figura 57 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano ricarica = 255.5 mm/a



Figura 58 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano ricarica = 1058.5 mm/a



Figura 59 Variazione % media nel cluster della concentrazione rispetto allo scenario base sul piano ricarica = 1591.5 mm/a

Nella parte più interna dell'isola, come si nota dai risultati ottenuti per i clusters 4 e 5, l'influenza della variazione del livello del mare è abbastanza relativa mentre si risente in maniera considerevole delle variazioni di ricarica. Mettendo a confronto gli andamenti dei due cluster si osserva che il cluster 5 subisce variazioni maggiori. Il comportamento dei cluster 4 e 5 evidenzia la rapidità con la quale il sistema risponde agli stress laddove sono presenti i calcari a elevata permeabilità.

Infine, si osserva che le concentrazioni del cluster 8 sono fortemente influenzate dalle precipitazioni, la lente d'acqua dolce in questa zona quindi non sembra essere resiliente alle variazioni di ricarica.

CASE STUDY II: IL CORPO IDRICO PIANA DEL VOLTURNO-REGI LAGNI

6 Il corpo idrico sotterraneo Piana Volturno- Regi Lagni

Il corpo idrico sotterraneo del Piana del Volturno e Regi Lagni comprende quasi tutta la depressione della piana Campana, ad esclusione del settore meridionale. Esso è delimitato a nord ovest dal rilievo carbonatico del Monte Massico, a est dai rilievi del Monte Maggiore e dei Monti Tifatini, a sud est dai monti di Durazzano, a nord est dal Roccamonfina, a sud dal distretto vulcanico flegreo e ad ovest dal Mar Tirreno (Figura 60).

Esso occupa una superficie di 1068 km², l'altitudine varia tra un minimo di 0 m sul livello del mare a un massimo di 528 m slm, con una media di 36 m slm. La maggior parte della superficie

è occupata da aree agricole (81.8%), le aree urbane si estendono per 163.4 km² (15.3%) mentre boschi e ambienti umidi rappresentano rispettivamente il 2.4% e lo 0.5% della superficie totale. (DI MEO et alii, 2006). Gli abitanti residenti sono circa 830000, per una densità abitativa di 776 ab/km² (ARPA Campania, 2007).

L'area ricade tra le zone di competenza dell'Autorità di Bacino Nazionale dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno e dell'Autorità di Bacino Regionale della Campania Centrale. Inoltre l'area ricade nell'ente d'ambito Napoli Volturno: Ato2 Campania.



Figura 60 I limiti del corpo idrico Piana del Volturno- Regi lagni

In questa zona della Piana Campana adiacente alla costa tirrenica, l'assetto territoriale e insediativo, le caratteristiche ambientali e il sistema socio-economico risentono in maniera particolarmente significativa dei processi di trasformazione antropica avvenuti negli ultimi decenni. Nello specifico la zona è interessata da problematiche fisico-ambientali e socio-economiche rilevanti: rischio idraulico, erosione costiera, talora basso livello di qualità delle risorse idriche, subsidenza, degrado ambientale e del sistema insediativo. I processi di degrado che ne seguono incidono negativamente sulla qualità e la produttività dei suoli, sulla quantità disponibile e la qualità della risorsa idrica e sulla qualità del sistema ambientale, sociale ed economico.

Da un lato un'espansione urbanistica caotica e disordinata, dall'altro un considerevole numero di insediamenti industriali, agricoli e - soprattutto nella zona costiera- zootecnici, determinano, per l'elevato numero di pozzi perforati a soddisfacimento delle diverse attività, il sovrasfruttamento della risorsa idrica sotterranea.

Per questi motivi l'area di studio richiede particolare attenzione per quel che riguarda la salinizzazione delle falde e dei suoli dovuta al fenomeno d'intrusione marina. Il fenomeno della risalita del cuneo salino è particolarmente diffuso ed incisivo laddove l'eccessivo sfruttamento della risorsa, gli interventi di modifica dei corsi d'acqua e il cambiamento delle condizioni climatiche determinano l'oscillazione dell'interfaccia tra acqua dolce di falda e l'acqua marina. I suoli inoltre, subiscono un deterioramento significativo in termini di inaridimento, dovuto all'utilizzo per scopi agricoli delle acque sotterranee e il conseguente accumulo di sali negli stessi.

Il fenomeno sopra descritto interessa alcune aree del CIS prospicienti il mare, tanto che in ampie zone costiere gli agricoltori non possono più utilizzare l'acqua di pozzo per irrigare o addirittura sono stati costretti a rinunciare a coltivare alcune porzioni di territorio.

Il tratto di costa dell'area oggetto di studio soggetto a tale fenomeno, è in forte evoluzione per la presenza del fiume Volturno e per diversi fattori di pressione antropica.

Nelle zone a nord e a sud del fiume, il territorio presenta caratteristiche molto differenziate che consentono di dividere l'area in quattro zone: un'area orientale più elevata topograficamente, un'area a cavallo del corso del fiume Volturno più depressa, un'area costiera occidentale retrodunare depressa, un'area occidentale della spiaggia e delle dune più elevata topograficamente

Queste zone sono caratterizzate, da un lato, dall'elevato livello di antropizzazione sopra descritto, dall'altro dalla presenza di siti di rilevante interesse naturalistico ambientale e da lembi di vegetazione ripariale a vario stato di conservazione.

Un altro elemento che contraddistingue il settore della Piana Campana a sud del fiume Volturno è il sistema di canali di bonifica dei Regi Lagni, un'opera realizzata al fine di recuperare suolo agricolo e migliorare le condizioni sanitarie generali nelle vaste aree paludose del territorio. Questo reticolo idrografico è composto da una rete di canali artificiali con alveo e sponde cementificate per la maggior parte della loro estensione.

Nel settore a sud dell'ambito territoriale di interesse si rinviene la presenza del Lago Patria, che con un'estensione di circa 2 km² rappresenta il più grande lago della regione Campania.

Tra il Lago Patria e il fiume Volturno, ma in maniera maggiore nella zona a nord dei Regi Lagni, insistono diversi stagni -alcuni dei quali di dimensione abbastanza significativa- creatisi per affioramento della falda in seguito alla dismissione di cave a fossa realizzate per lo sfruttamento dei litotipi piroclastico-alluvionali della zona: sabbie, cineriti (pozzolane) e tufi.

Tra gli interventi di modifica del paesaggio si segnalano anche quelli realizzati per le opere di difesa del litorale, tra cui pennelli trasversali alla linea di costa e scogliere in roccia. In Figura

61 si nota l'evoluzione della linea di costa e la modifica della sua posizione in seguito agli interventi adottati nel corso degli anni: le linee azzurra e verde rappresentano la linea di riva nel 1975 e nel 1990 mentre la linea gialla si riferisce al 2001 e quella rossa al 2006.



Figura 61 Analisi dell'evoluzione della linea di costa a foce Volturno da immagine satellitare. Fonte: Piano stralcio erosione costiera AdB Liri-Garigliano-Volturno

6.1 Caratteristiche geologiche e geomorfologiche

Il corpo idrico Piana del Volturno-Regi lagni si colloca nell'ampia area pianeggiante della Piana Campana. Dal punto di vista geologico quest'ultima costituisce il riempimento di un graben da parte di sedimenti alluvionali e costieri e vulcaniti quaternarie (Civita et al, 1973; Ortolani e Aprile, 1978; 1979; 1985; Celico, 1983; Corniello et al, 1990), limitato a nord dal Monte Massico, a nord-est dai Monti di Caserta, a est dai Monti di Sarno, a sud dalla piana di Sarno e dai Monti Lattari e a ovest dal Mar Tirreno (Figura 62).



Traccia delle sezioni geologiche interpretative; 7) Sondaggi meccanici.

Le faglie dirette quaternarie lungo cui è avvenuto l'abbassamento, orientate NE-SO, NO-SE, ai bordi della pianura individuano i limiti della struttura. In superficie si osservano le strutture marginali del graben.

La struttura profonda è stata indagata nel corso degli anni, sia attraverso la rete di pozzi profondi presente sul territorio che con prospezioni geofisiche. Dalle indagini si evince che il sottosuolo dell'area del corpo idrico di riferimento è composto da spessori, che in alcune zone arrivano anche a diverse migliaia di metri, di depositi prevalentemente piroclastici e detritico-alluvionali con orizzonti di origine marina. L'alternanza di questi spessori indica una forte subsidenza. I pozzi profondi non raggiungono profondità tali da fornire gli strumenti per un'interpretazione totalmente affidabile della parte centrale del graben al di sotto dei suddetti depositi.

Per quanto riguarda invece, la porzione più superficiale del sottosuolo – fino ad un centinaio di metri dal piano campagna- si riconoscono diverse unità litologiche: depositi alluvionali e piroclastici prevalentemente sabbiosi, depositi limosi-argillosi di ambiente marino e palustre, depositi dunari e di sabbia. Nella parte bassa del corso del Volturno e Regi lagni si ritrovano depositi prevalentemente limo-sabbiosi e orizzonti talora torbosi.

Un ruolo particolarmente rilevante sia in termini di estensione che di spessore, lo assume lo strato di Ignimbrite Campana, o Tufo Grigio Campano. Quest'ultima formazione si ritrova a profondità man mano maggiori avvicinandosi alla costa e il suo spessore si assottiglia in maniera significativa a ridosso del fiume Volturno. A luoghi si rinvengono lenti di scorie laviche e terreni pozzolanici associati alla formazione dell'ignimbrite campana.

Al di sotto dell'Ignimbrite si individua una successione di depositi piroclastici a granulometria medio-grossolana che poggia su depositi limo-argillosi e limo-sabbiosi di ambiente probabilmente marino.

Da quanto si evince in letteratura (Ortolani & Aprile, 1978; 1985; Aprile & Ortolani, 1979), alle profondità comprese tra alcune centinaia di metri fino a qualche chilometro dal piano campagna sono presenti banchi di rocce vulcaniche. Il bedrock della successione clastica è costituito dalle rocce carbonatiche che limitano la piana, presenti a 2-3 migliaia di metri.

I diversi fattori sedimentari, tettonici e vulcanici che hanno interessato tutta la piana campana determinano un assetto idrostratigrafico particolarmente complesso soprattutto nei primi duecento metri di profondità, dove si individuano vari complessi litologici piroclastico-alluvionali che si succedono lungo la verticale, talora in eteropia di facies e con ricorrenti forme lenticolari.

6.2 Caratteristiche idrogeologiche del CIS della Piana del Volturno – Regi Lagni

Le litologie affioranti e quelle riconosciute in sondaggio sono state accorpate in diversi complessi idrogeologici (cfr carta idrogeologica) descritti di seguito a partire da quelli più recenti (ENEA Sezione Prot-Idr, 2001):

Complesso prevalentemente sabbioso, costituito da sabbie litorali e dunari piuttosto uniformi a granulometrie molto fine. Esso affiora solo nella parte costiera su una fascia larga circa 2 km a nord e che si restringe avvicinandosi al Lago Patria, con spessori che variano da pochi metri fino ad alcune decine verso il mare. La permeabilità è medio-bassa.

Complesso sabbioso argilloso, costituito da un'alternanza irregolare e a granulometria variabile di argille, sabbie e lenti di ghiaie spesse fino a qualche metro. Il complesso affiora in corrispondenza del corso del Fiume Volturno ed è presente in spessori tra i 40 e i 60 metri. Questi depositi si osservano dal Volturno verso sud per circa 2 chilometri dove passano per eteropia ai materiali del complesso argilloso torboso. La permeabilità è in generale piuttosto

bassa ma si osservano innalzamenti della stessa in corrispondenza degli orizzonti più grossolani.

Complesso argilloso torboso, si localizza a ridosso dei canali dei Regi Lagni ed è rappresentato da limi ed argille assai spesso associati a livelli torbosi. Questo complesso è collegato ad antichi espandimenti alluvionali dei canali dei Regi Lagni e si sviluppa con spessori crescenti verso mare, arrivando in prossimità della costa ad alcune decine di metri. La permeabilità risulta bassa o molto bassa per la prevalenza di materiali a granulometria fine.

Complesso piroclastico superiore, costituito da piroclastiti di granulometria da media a fine, tra cui piccole pomici, ceneri e lapilli, quasi sempre sciolte o debolmente cementate. Questo complesso è il deposito di eruzioni flegree e vesuviane successive a quella del Tufo Grigio Campano (ROMANO et al., 1994), avvenute quasi sempre in sede. I sondaggi che hanno interessato questo complesso indicano una notevole variabilità granulometrica sia lungo la verticale che in senso areale. Gli spessori sono assai variabili dato che il deposito piroclastico si è accumulato sulla superficie sottostante che presenta una morfologia molto articolata. La permeabilità è piuttosto ridotta per la frequente presenza di materiali fini.

Complesso tufaceo dell'Ignimbrite Campana, formato da cineriti grigiastre associate a scorie nere e brandelli di lava riconducibili, per la maggior parte, alla formazione del Tufo Grigio Campano (ROMANO et al., 1994). Il complesso è caratterizzato dall'alternanza di livelli con gradi di diagenesi differenti sia arealmente sia sulla verticale. Quest'ultima caratteristica è probabilmente dovuta alla variabilità dei fenomeni diagenetici del tufo. Il complesso è non affiorante nella zona di interesse dello studio, gli spessori sono variabili, con potenze che variano dai 40-50 m nei settori di Casal di Principe, Aversa e Lago Patria, fino ai 10-30 m nelle zone in cui le azioni erosive intervenute nel periodo appena successivo alla deposizione del tufo. Anche la permeabilità è altrettanto variabile: valori molto bassi sono stati individuati nelle zone in cui il grado di diagenesi è maggiore e la potenza dello spessore è elevata, mentre valori assimilabili a quelli del complesso sovrastante delle piroclastiti sono stati rinvenuti dove diagenesi e spessore sono ridotti. Questa caratteristica di variabilità della permeabilità rende il ruolo idrogeologico del complesso importante ma non univoco. Infatti, laddove la permeabilità è minore, il complesso svolge il ruolo di letto per le falde accolte nei materiali sovrastanti nonché quello di confinamento per le acque più profonde, dove invece gli spessori sono ridotti e i materiali poco diagenizzati sono possibili flussi di drenanza significativi.

Complesso piroclastico inferiore, composto da piroclastiti sciolte e piuttosto grossolane (sabbie, scorie, pomici) con locali depositi intercalati argillosi di ambiente marino rinvenuti a diverse altezze. Talvolta sono presenti anche travertini. Il complesso non è presente in

affioramento e si sviluppa in maniera abbastanza continua al di sotto del Tufo Grigio Campano con spessori di qualche decina di metri. La permeabilità globale è medio-alta, ragion per cui il complesso rappresenta l'acquifero principale dell'intera Piana Campana. Il ruolo delle intercalazioni a granulometria minore è di scarsa rilevanza per la notevole variabilità areale degli spessori.

Complesso argilloso-sabbioso, formato per la maggior parte da argille marine con intercalazioni di sabbie rappresentate da piroclastiti rimaneggiate. A luoghi, intercalazioni di livelli discontinui di piroclastiti sabbiose subaeree e rari eventi travertinosi. La potenza è piuttosto significativa in tutta l'area, e il complesso nel CIS è quello più profondo in assoluto. Il tetto del complesso si ritrova a profondità di 10-30 m sotto il livello del mare nella zona est dell'area di studio e si approfondisce fino ai 70-90 metri procedendo verso la costa.

La permeabilità è molto ridotta, tanto che il complesso è il substrato della circolazione idrica sotterranea per quasi tutta l'area della piana. Dove prevale la parte più sabbiosa, esso rappresenta un approfondimento dell'acquifero piroclastico.

Complesso carbonatico, rappresenta l'ossatura dei rilievi a Est e a Nord del CIS e comprende rocce calcaree stratificate e fratturate.

Queste rocce sono molto permeabili per carsismo e per fessurazione e rappresentano acquiferi di rilevanza regionale. L'elevata infiltrazione efficace contribuisce alla formazione di cospicue falde di base che alimentano sorgenti e/o il CIS stesso per travasi sotterranei.

6.3 Schema di circolazione idrica sotterranea

Come si evince dalla descrizione dei complessi idrogeologici presenti nel sottosuolo dell'area del corpo idrico Piana del Volturno - Regi lagni, la granulometria dei depositi clastici e il loro stato di addensamento e cementazione variano arealmente e lungo la verticale, determinando una variazione altrettanto marcata della permeabilità.

Questa notevole complessità litologica e stratigrafica, dà origine ad una circolazione idrica sotterranea che si esplica secondo uno schema "a falde sovrapposte"; le acque sotterranee defluiscono preferenzialmente nei depositi a granulometria più grossolana e/o negli orizzonti litoidi dell" Ignimbrite Campana" più fessurati e/o incoerenti (Celico,1983).

È possibile quindi riconoscere a livello locale due falde "separate".

La distribuzione areale di vecchi pozzi poco profondi e di grande diametro indica che la prima di queste due falde, quella più superficiale, a carattere freatico, è accolta nei depositi rappresentati dai complessi sabbioso costiero, sabbioso argilloso ed argilloso torboso presenti a tetto del complesso dell'"Ignimbrite Campana". È una falda che risulta poco produttiva sia per la dimensione e lo spessore ridotti che per le modalità di alimentazione che risultano legate all'alimentazione meteorica e agli apporti irregolari del Fiume Volturno. I recapiti ultimi sono il mare e il Lago Patria nella zona sud occidentale. Nella zona prossima alla costa la falda superficiale risulta sub affiorante perché il piano campagna ha quote inferiori allo zero topografico. Tale depressione della falda può dipendere dall'attivazione dell'idrovora presente presso il lago Patria.

Il riconoscimento del limite inferiore di questa falda non è agevole, soprattutto laddove il complesso tufaceo manca o si fa meno spesso e/o discontinuo. In questo zone si determina una qualche connettività idraulica tra i depositi alluvionali e i materiali piroclastici dell'acquifero principale e la falda risulta semi confinata o libera.

La falda principale invece è presente lungo tutta l'area di studio (Viparelli, 1967, 1978; Celico, 1983; GEOLAB, 1988; Bellucci et al., 1990; Corniello et al., 1990; Celico e de Paola, 1992; Celico et al., 1994; Budetta et al., 1994; Celico et al., 1997) ed è per la maggior parte contenuta nei depositi vulcano-sedimentari presenti al di sotto dell'orizzonte tufaceo. Nelle zone del complesso argilloso sabbioso sottostante in cui prevale la parte più grossolana, e in quelle in cui la parte bassa del complesso sovrastante dell'Ignimbrite Campana è poco diagenizzato, la falda si estende parzialmente anche in questi due complessi superiore ed inferiore. Questo corpo idrico presenta caratteri di confinamento legati alla potenza e alle caratteristiche tessiturali e strutturali del tufo stesso. Laddove il Tufo Grigio Campano è assente o di ridotto spessore la falda presenta carattere freatico, altrove è confinato.

La falda principale è alimentata dagli apporti meteorici e dai travasi provenienti dai massicci carbonatici ai bordi della Piana.

Il limite inferiore dell'acquifero coincide con il complesso argilloso sabbioso ad esclusione delle zone in cui a prevalere è la frazione più grossolana. In quest'ultime zone, il limite non è distinguibile in maniera certa ma dai dati raccolti con rilievi geoelettrici (Corniello et al., 1990), sembra che possa identificarsi ad una profondità di 100- 150 m.

Le varie ricostruzioni storiche della piezometria (Celico, 1983; Corniello et al, 1990; Celico et al, 2004; Autorità di Bacino Nazionale dei fiumi Liri Garigliano e Volturno, 1996; Autorità di Bacino Regionale Nord Occidentale della Campania, 2004) indicano che nonostante il carattere separato delle due falde finora descritto, è possibile, a grande scala, riferirsi ad un'unica

circolazione idrica sotterranea per l'intercomunicabilità dei diversi orizzonti acquiferi in diverse zone dell'area. Quest'ultima caratteristica, come brevemente anticipato precedentemente, è dovuta:

- alla presenza di soluzioni di continuità tra i livelli impermeabili e semipermeabili lungo la verticale, dovuti alla presenza dell'Ignimbrite Campana in facies non litoide;
- a flussi di drenanza che in condizioni indisturbate, sono diretti dal basso verso l'alto;
- all'elevatissimo numero di pozzi che essendo mal condizionati consentono la diretta comunicazione tra i diversi livello piezometrici.

A questa scala quindi, la direzione generale del flusso sotterraneo è orientata da est verso ovest, il recapito ultimo è il mar Tirreno (cfr. Carta idrogeologica della Campania – *Tavola 1*) e i gradienti idraulici variano da poche unità per mille a poche unità per cento ad eccezione delle zone ai margini della piana dove si riscontrano valori più elevati per effetto dell'alimentazione connessa ai travasi idrici dei massicci carbonatici. Dalle diverse piezometrie si evince che anche dagli acquiferi carbonatici in corrispondenza dei Monti Maggiore, dei Monti Tifatini e dei Monti di Durazzano, si verificano cospicui travasi che alimentano la falda.

Anche l'interazione tra le acque sotterranee e la rete idrografica superficiale risulta molto complessa ed articolata. Dai dati disponibili in letteratura (Celico, 1983) risulta che la falda superficiale, ove presente, è drenata parzialmente dal Fiume Volturno anche se l'interscambio falda-Volturno è piuttosto variabile sia nello spazio che nel tempo e fortemente dipendente da fattori naturali e antropici.

Le caratteristiche idrodinamiche dell'acquifero sono state sintetizzate da Corniello et al, nell'ambito di un lavoro del 1990, e confermati indagini più recenti (2004) effettuate dal Autorità di Bacino regionale nord occidentale della Campania. I valor medi forniti per la trasmissività sono dell'ordine dell' 10^{-2} - 10^{-3} m²/s con minimi di 10^{-4} - 10^{-5} raggiunti a ridosso del corso dello Volturno e nella fascia costiera. Il coefficiente di immagazzinamento varia tra 10^{-3} - 10^{-4} confermando la condizione di confinamento della falda.

6.4 Caratterizzazione dello stato delle risorse idriche

Il PTA Regione Campania e Piano di Gestione delle Acque - Distretto Idrografico dell'Appennino Meridionale forniscono un quadro generale dello stato ambientale dei principali *corpi idrici superficiali* dell'area del Piana del Volturno-Regi lagni.

La forte presenza di attività agricole e zootecniche, tipiche della bassa piana del Volturno, e lo scarico di reflui non adeguatamente depurati, determinano una situazione di criticità abbastanza diffusa. In particolare il fiume Agnena presenta uno stato di qualità ecologico pessimo, mentre non destano eccessiva preoccupazione gli aspetti relativi alla quantità.

Anche per il reticolo dei Regi lagni lo stato ambientale risulta pessimo (fonte monitoraggio A.R.P.A.C.) dal punto di vista qualitativo mentre non si evidenzia uno stato di sofferenza per gli aspetti quantitativi. Le fonti di pressione risultano ancora lo sversamento in alveo di reflui civili ed industriali non adeguatamente depurati e carichi inquinanti legati alle attività agricole. I monitoraggi condotti sul Fiume Volturno evidenziano uno stato di qualità sufficiente nella zona della Piana Campana e scadente o pessimo nel tratto terminale del corso.

Anche in questa situazione le criticità sono connesse ai carichi inquinanti delle attività agricole e zootecniche. I reflui vengono immessi nel corpo idrico sia in maniera diretta che per effetto delle acque raccolte dai sistemi di bonifica.

Dal Piano di Tutela delle Acque della Regione Campania infine, risulta che anche lo stato ambientale dell'area lagunare del Lago Patria è pessimo.

Le risorse idriche sotterranee, sono diffusamente caratterizzate da depauperamento qualitativo e quantitativo dovuti a fattori antropici e naturali (Corniello e Ducci, 2013).

Tra i fattori naturali si evince la presenza di fluoruri, ferro, arsenico e manganese legata principalmente alla natura vulcanica dell'area e alle caratteristiche riducenti dell'ambiente.

Relativamente agli aspetti quantitativi, negli anni tra il 2000 e il 2010, aspetto è emerso un abbassamento della quota piezometrica in corrispondenza del Volturno di 1.5-2 metri ma che in generale il livello della falda tende progressivamente ad abbassarsi creando condizioni più favorevoli allo sviluppo dei fenomeni di intrusione salina.

Il bilancio idrico è fortemente sbilanciato con scarsità di acqua sia per uso irriguo che idropotabile e la disponibilità di risorsa idrica sotterranea ancora sfruttabile diminuisce progressivamente.

Sempre per lo stesso periodo, lungo la fascia costiera si è osservato un arretramento delle piezometrie di circa un metro rispetto alla costa, con quote piezometriche della falda inferiori al livello del mare.

Il Fiume Volturno alimenta in molte zone la falda superficiale e quindi i livelli della stessa sono fortemente condizionati dalle portate registrate nel fiume.

Tra le cause principali del degrado quantitativo appena descritto si annoverano tra tutte il sovrasfruttamento degli acquiferi e l'impermeabilizzazione dei canali di drenaggio e quindi la riduzione della ricarica delle falde.

Già nel 1992 i livelli di falda risentivano enormemente delle opere idrauliche realizzate sui Regi lagni, registrando un innalzamento dei livelli monitorati a seguito del dragaggio dei sedimenti dal fondo del canale e un abbassamento continuo dopo l'impermeabilizzazione dei canali. Anche per la falda profonda si rilevano degli abbassamenti significativi, che si manifestano in tutta l'area in maniera eterogenea in quanto risente dei forti emungimenti localizzati. Gli aspetti qualitativi sono altrettanto preoccupanti.

Il forte impatto antropico determina un inquinamento diffuso delle acque sotterranee.

I monitoraggi effettuati da ARPAC (2004-2006), dall'AdB Nord-Occidentale per il Piano di Tutela delle Acque (tabella PTA AdB Nord Occidentale), da ENEA ed Università degli Studi di Napoli (2003) nell'ambito del Progetto Regi lagni e dagli studi condotti dalla Federico II di Napoli (Corniello, Ducci, Hydrogeology and Hydrogeochemistry of the Plain between monte Massico and the river Volturno. 2007), rilevano uno stato di elevata compromissione qualitativa dei corpi idrici sotterranei.

Nel settore nord dell'area del corpo idrico di riferimento la falda risulta contaminata da acque marine, nel settore compreso tra il Volturno e i Regi lagni si registrano elevate concentrazioni di cloruri e nitrati sia nella falda superficiale che in quella profonda mentre nel settore a sud, in sinistra idrografica del canale dei Regi lagni risulta una forte contaminazione marina nella falda superficiale e in entrambe le falde elevate concentrazioni di nitrati.

Le fonti che determinano gli alti tenori di inquinamento riscontrati sono molteplici ed interconnesse:

- perdite in fognatura
- sversamenti abusivi
- pozzi neri disperdenti
- scarichi diretti in falda
- scarichi in corpi idrici superficiali drenati dalle falde sotterranee
- spandimento dei reflui zootecnici sui suoli
- infiltrazioni di acque superficiali in terreni impiegati in attività zootecniche e agricole
- inquinamento diffuso da area urbana
- percolazione da aree adibite a discarica
- ingenti prelievi per gli usi agricoli, idropotabile ed industriale

Per tutto quanto detto sopra si evince che gli aspetti qualitativi e quantitativi del depauperamento della risorsa sono strettamente connessi. Da un lato una forte compromissione

dello stato qualitativo delle acque e dei suoli e dall'altro l'impoverimento della risorsa disponibile.

Quest'ultimo aspetto risulta particolarmente evidente lungo la linea di costa dove il sovrasfruttamento della falda determina una sempre maggiore intrusione del cuneo salino e quindi un degrado qualitativo della risorsa idrica, che potrebbe avere come conseguenza una riduzione drastica della produttività del settore agricolo dell'area.

7 Il modello idrogeologico concettuale dell'area di studio

7.1 Scelta del dominio di interesse modellistico

Lo scopo del lavoro qui presentato è quello di implementare un modello numerico finalizzato allo studio, l'analisi e la gestione del fenomeno dell'intrusione salina caratterizzante il sistema acquifero costiero della Piana del Volturno-Regi lagni.

In questa zona, infatti, il livello di salinizzazione della falda è piuttosto elevato. Le acque estratte dai pozzi più vicini alla costa è, in vari casi, inutilizzabile per scopi agricoli e in alcuni casi, il livello di contaminazione è tale che gli agricoltori hanno dovuto rinunciare a coltivare ampie porzioni di territorio.

Per questo motivo si è scelto di concentrare l'attenzione su una porzione costiera del corpo idrico sotterraneo succitato, immediatamente a Sud del F. Volturno ove si registrano in maniera più evidente i fenomeni intrusivi. Il dominio di modellazione è stato scelto prendendo in considerazione una porzione di corpo idrico abbastanza ampia da poter studiare complessivamente gli andamenti del flusso della falda e del fenomeno di intrusione salina.

Con lo sviluppo del modello numerico ci si prefigge di studiare i legami che intercorrono tra i fattori di pressione antropica – emungimento a scopo irriguo, idropotabile e industriali - e l'intrusione salina in atto.

Il modello comprende un'area che si estende per circa 220 km² situata nel settore sud occidentale del corpo idrico Piana del Volturno Regi Lagni. Il dominio di calcolo è delimitato dal Fiume Volturno a nord e dal Mar Tirreno ad ovest, mentre il limite ad est è stato tracciato parallelamente alla linea di costa e quello a sud è rappresentato da una definita linea di flusso (perpendicolare alle linee piezometriche) così da potervi imporre la condizioni al contorno di flusso nullo. I limiti del modello sono rappresentatati in Figura 63.



Figura 63 Limiti del modello

7.2 Analisi ed elaborazione delle sezioni idrogeologiche

Come anticipato nel capitolo precedente, la particolare genesi sedimentaria e vulcanicotettonica che ha interessato l'area di studio, ha determinato un assetto idrostratigrafico particolarmente complesso ed eterogeneo non ancora del tutto accuratamente noto per fini modellistici. Nei primi duecento metri di profondità si individuano diversi complessi litologici (cfr. Capitolo 6) che consentono di definire una geometria semplificata del sistema idrogeologico secondo quattro unità idrostratigrafiche. Si è assunto che ciascuna unità possa essere caratterizzata (arealmente e verticalmente) da omogeneità nelle caratteristiche idrauliche I parametri idraulici derivanti dalle prove di emungimento, infatti, riguardando solo alcuni settori dell'area di studio non hanno consentito di derivare una schematizzazione geometrica – idrostratigrafica più dettagliata di quella di seguito descritta.

La giacitura e la continuità dei limiti delle unità idrostratigrafiche sono state analizzate sulla base delle sezioni geologiche riportate nelle figure seguenti (Autorità di Bacino Nord-occidentale della Campania, 2004).



Figura 64 Pianta delle sezioni geologiche utilizzate. In rosso i confini del dominio del modello







Figura 66 Sezione B-B'



Figura 67 Sezione C-C'



Figura 68 Sezione D-D'



Figura 69 Sezione W2-W2'

Come anticipato sopra, si è proceduto alla schematizzazione verticale accorpando le diverse litologie presenti in quattro unità idrogeologiche principali, le cui caratteristiche sono riportate di seguito a partire dalla più profonda e procedendo verso la superficie:

L'unità idrogeologica più profonda è composta da argille marine con intercalazioni di sabbie, queste ultime quasi sempre rappresentate da piroclastiti rimaneggiate. Questa unità rappresenta il letto della falda principale.



Complesso argilloso-sabbioso. Argille marine con intercalazioni di sabbie (ag); queste ultime, quasi sempre rappresentate da piroclastiti rimaneggiate, sono talora prevalenti (ags); intercalazioni di discontinui livelli di piroclastiti sabbiose sub-aeree (psb); rari episodi travertinosi (tr). Pleistocene sup. La permeabilità è nell'insieme molto bassa, tende comunque a farsi più alta in corrispondenza dei livelli sabbiosi soprattutto se di notevole spessore.

La falda principale è accolta in un complesso di piroclastiti sciolte e piuttosto grossolane (sabbie, scorie e pomici) con locali intercalazioni argillose di origine marina di scarsa rilevanza idrogeologica a causa delle dimensioni e della variabilità degli spessori.



Complesso delle piroclastiti pre Ignimbrite Campana. Piroclastiti sciolte e piuttosto grossolane (sabbie, scorie e pomici) (pg) con locali intercalazioni argillose di origine marina (pa). A luoghi sono presenti sabbie fossilifere e ghiaie (sg) di ambiente transizionale e marino e, talvolta, anche travertini (tr). Pleistocene sup. La permeabilità globale è medio-alta; di scarsa rilevanza il ruolo delle intercalazione argillose anche per la notevole variabilità in termini di spessore e continuità.

Il tetto della falda principale è rappresentato dal complesso dell'"Ignimbrite campana "a cui è associato, per la comparabilità del comportamento idraulico, il complesso dei tufi flegrei. Questa unità è formata da cineriti grigiastre associate a scorie nere e brandelli di lava (tufo grigio campano) in facies lapidea o debolmente cementata; a luoghi livelli scoriacei intercalati e cineriti a diverso grado di litificazione, spesso con grandi scorie e pomici, tufo giallo napoletano e tufi precedenti e successivi.



L'unità idrogeologica superficiale vede l'alternanza spaziale di diverse formazioni litologiche. Essa è composta dai complessi dei depositi piroclastici sciolti dell'area flegrea, il complesso delle piroclastiti prevalentemente da caduta, dal complesso delle sabbie litorali e dunari, dal complesso sabbioso-argilloso e da quello argilloso torboso. Quest'unità risulta molto disomogenea sia in termini litologici che di proprietà idrogeologiche, ma si è assunto che il livello di conoscenza del comportamento di queste formazioni non fosse tale da provvedere ad una schematizzazione più approfondita.



La schematizzazione 3D dei contatti tra le quattro unità idrogeologiche è stata effettuata con l'impiego dei software ArcGis 10.3 e Surfer 9, assumendo come ipotesi di lavoro, in assenza di informazioni più precise, la continuità areale dei contatti stratigrafici tra le unità da parte a parte della sezione.

Le immagini delle sezioni disponibili nell'area di studio del modello (Autorità di Bacino Nordoccidentale della Campania, 2004), sono state georeferite e digitalizzate in ArcGis. Come si nota in Figura 70, dove è riportato il lavoro di georeferenziazione per una sezione esempio, in questa fase si è adottata una lunghezza ridotta di un ordine di grandezza per favorire la visualizzazione della sezione che sarebbe stata altrimenti troppo "allungata".

.IIIK											
🛎 🖩 🐗 🔹 🔹			Total F	RMS Error:	Forward:2,53984e-005						
	Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual			
1	1	1,099021	4,094735	0,000000	0,000000	-2,51329e-005	-3,66277e-006	2,53984e-005			
1	2	1,099021	1,944177	0,000000	-110,000000	2,51329e-005	3,66277e-006	2,53984e-005			
1	3	11,003326	4,094735	1251,400000	0,000000	2,51329e-005	3,66277e-006	-006 2,53984e-005			
1	4 11,003326		1,944177	1251,400000	-110,000000	-2,51329e-005	-3,66277e-006	06 2,53984e-005			
] Auto Adjust			Transforma Forward Re:	tion: 1st	Order Polynomial (A	Affine)	•				
Juegre	es minutes .	Seconds	T OF WAR A TKC.								
							P4 P4'				
		:=1 ¹			E ON C	الكفد مرو		3			
		2						4			

Figura 70 Esempio di georeferenziazione delle sezioni in ArcGis.

Sulle sezioni così georeferite, sono stati creati i contatti che identificano i passaggi da un'unità idrostratigrafica all'altra così come descritto precedentemente (Figura 71).



Figura 71 I contatti tra le quattro unità idrostratigrafiche

Conoscendo le coordinate x e y degli estremi delle sezioni e la pendenza della traccia delle stesse sul piano, sono state calcolate le coordinate x, y, z dei punti rappresentanti i contatti appena creati tramite le semplici elaborazioni geometriche un cui esempio è riportato in Figura 72)

K2 ▼ : × ✓ fx =SE(H2>\$B\$8; 12+\$B\$5;12+\$B\$1)											
	А	В	С	D E	F	G	н	I	J	K	L
1	X _A	411130.87		FID	Z	Α	В	D	С	х	Y
2	Y _A	4544947.70		0	-70.52	5.16	51.58	31.29933	-40.9974	411162.17	4544906.70
з	X _{A'}	420767.15		1	-68.63	21.54	215.40	130.7086	-171.209	411261.58	4544776.49
4	Y _{A'}	4527704.48		2	-68.63	34.77	347.70	210.9907	-276.366	411341.86	4544671.33
5	X _{A"}	419427.11		3	-68	51.15	511.50	310.3875	-406.561	411441.26	4544541.14
6	Y _A "	4534080.87		4	-67.37	67.53	675.30	409.7843	-536.756	411540.65	4544410.94
7	Lunghezza	20120		5	-67.37	87.69	876.90	532.1188	-696.996	411662.99	4544250.70
8	Lunghezza AA"	13604		6	-65.48	107.9	1079.00	654.7568	-857.633	411785.63	4544090.07
9	Lunghezza A"A'	6516			-64.22	125.5	1255.00	761.5567	-997.525	411892.43	4543950.17
10	tgß	-1.31		8	-64.22	136.8	1368.00	830.1272	-1087.34	411961.00	4543860.36
11	ß	-0.92		9	-64.85	153.2	1532.00	929.6454	-1217.7	412060.52	4543730.00
12	tgß	-4.76		10	-64.85	163.9	1639.00	994.5749	-1302.74	412125.44	4543644.96
13	ß	-1.36		11	-64.85	174	1740.00	1055.864	-1383.02	412186.73	4543564.68
14				12	-64.85	188.5	1885.00	1143.852	-1498.27	412274.72	4543449.43

Figura 72 Calcolo delle coordinate dei punti di contatto idrostratigrafico

Una volta ottenute le coordinate dei punti, si è proceduto alle interpolazioni dei tre contatti in con il metodo del kriging. Prima di tutto si sono svolti i calcoli dei variogrammi sperimentali per la stima della correlazione spaziale dei dati in ingresso e successivamente quelli per la definizione delle superfici di interfaccia stratigrafiche.

Per il contatto stratigrafico tra l'unità composta dal complesso argilloso e quella composta dalle piroclastiti pre Ignimbrite Campana si è scelto un variogramma sferico.



Figura 73 Variogramma sferico relativo al contatto stratigrafico argille-piroclastiti pre Ignimbrite campana

In Figura 74 è riportata la carta delle isopache calcolata. Si nota che il contatto raggiunge una profondità massima di circa 120 metri e una minima di circa 40 dal livello medio mare



412000 414000 416000 418000 420000 422000 424000 426000 428000

Figura 74 Carta delle isopache relativo al contatto stratigrafico argille-piroclastiti pre Ignimbrite campana

Per il contatto tra l'unità delle piroclastiti pre ignimbrite Campana e il complesso dell'ignimbrite Campana il variogramma sperimentale è di tipo sferico.



Figura 75 Variogramma sferico per l'interfaccia tra le unità delle pre ignimbrite Campana e dell'ignimbrite Campana.

La Figura 76 riporta la relativa mappa delle isopache per quest'ultimo contatto stratigrafico. Le profondità variano tra circa 90 metri e una decina di metri dal livello del mare.



Figura 76 Carta delle isopache per l'interfaccia tra le unità delle pre ignimbrite Campana e dell'ignimbrite Campana

Per l'interfaccia tra il complesso dell'ignimbrite Campana e l'unità idrostratigrafica superficiale si è optato per un variogramma di potenza.



Figura 77 Variogramma di potenza per l'interfaccia tra il complesso dell'ignimbrite Campana e l'unità idrostratigrafica superficiale

Le profondità oscillano dai 70 metri sotto il livello del mare a valori maggiori della quota del mare nella parte più interna dell'area (Figura 78)


Figura 78 Carta delle isopache per l'interfaccia tra il complesso dell'ignimbrite Campana e l'unità idrostratigrafica superficiale

La visualizzazione in 3D di Figura 79 fornisce un quadro d'insieme dell'andamento della giacitura dei contatti schematizzati secondo le ipotesi descritte in questo paragrafo.



Figura 79 Visualizzazione 3D delle giaciture dei contatti tra le unità idrostratigrafiche individuate

7.3 Mappe piezometriche

Il corpo idrico è stato rappresentato, sulla base delle informazioni riportate nel capitolo precedente, come costituito da due falde separate. La prima di natura freatica e la seconda, la principale, di natura confinata e sottostante alla prima. Le conoscenze dei meccanismi di connessione idraulica tra le due falde sono molto limitate, per cui si è optato per descriverle come idrogeologicamente indipendenti l'una dall'altra.

La falda freatica è ospitata nell'unità idrostratigrafica superficiale mentre quella profonda risulta confinata superiormente dallo strato dell'Ignimbrite campana e inferiormente dall'unità idrostratigrafica delle argille marine.

Il modello concettuale descritto sarà utilizzato per una prima simulazione numerica dei fenomeni di trasporto conseguenti all'immissione salina in falda. Allo stesso tempo, esso potrà essere uno strumento utile allo svolgimento di indagini relative al comportamento della falda al variare delle condizioni di alimentazione o al monitoraggio delle quote piezometriche in corrispondenza di eventi naturali e di interventi antropici.

A partire dai dati ENEA (ENEA, 2001) si è proceduto alla valutazione dell'andamento piezometrico e di conseguenza allo studio della direzione del flusso nei due acquiferi.

Nella fase inziale del lavoro è stata realizzata una campagna di campo con l'obiettivo di verificare eventuali trend di variazione delle quote piezometriche rispetto a quelle fornite.

Sfortunatamente non sempre è stato possibile effettuare le misure per diverse difficoltà di accesso a molti dei pozzi misurati nel 2001. Infatti soprattutto nella zona a sud del modello molti dei proprietari hanno chiuso la parte superiore del pozzo per evitare eventuali furti delle pompe, o si sono detti non disponibili ad autorizzare la misurazione. In diversi altri casi, nelle zone in cui gli agricoltori si sono organizzati in consorzio e utilizzano l'acqua fornita dallo stesso, i pozzi sono in disuso da anni e quindi l'accesso per la misurazione risulta particolarmente complicato. Dove possibile si è rilevato il livello piezometrico in pozzi adiacenti a quelli inseriti nel database fornito.

I dati raccolti sono rappresentati in Figura 80. Dato che non si evince alcun trend riconoscibile nella variazione dei valori piezometrici, si è scelto di costruire le mappe piezometriche di riferimento per il modello concettuale a partire dai dati del database ENEA.



Figura 80 Mappa delle differenze tra i valori misurati e quelli forniti dal DICEA

Per l'interpolazione delle mappe piezometriche è stato utilizzato il metodo del kriging, previa analisi strutturale del modello di correlazione. Il modello di variogramma scelto per la falda superficiale è il variogramma di potenza (Figura 81)



Figura 81 Analisi variografica: confronto tra modello e variogramma sperimentale dati falda superficiale

In Figura 82 è riportata la mappa piezometrica relativa alla falda superficiale



Figura 82 Interpolazione geostatistica piezometria superficiale: kriging

Anche il modello sperimentale per il variogramma relativo alla piezometria profonda è un variogramma di potenza (Figura 83)



Figura 83 Analisi variografica: confronto tra modello e variogramma sperimentale dati falda profonda

In Figura 84 è riportata la mappa piezometrica relativa alla falda profonda



Figura 84 Interpolazione geostatistica piezometria profonda: kriging

7.4 Parametri idrogeologici

Per ognuna delle unità idrogeologiche definite nei paragrafi precedenti si sono stimati i valori della conducibilità idraulica basandosi sulle indagini svolte dall'autorità di Bacino regionale nord occidentale della Campania nell'ambito della redazione del piano di tutela delle acque (AdB,2007), sulle relazioni di ENEA nell'ambito del progetto Regi Lagni (ENEA,2001) e dagli studi condotti dalla Federico II (Corniello et al.,2007).

Nello specifico, per le unità idrostratigrafiche superficiale e quella delle piroclastiti pre ignimbrite campana, si è fatto riferimento ai risultati ottenuti nelle prove di pompaggio svolte dall'AdB. Sfortunatamente solo due dei pozzi contenuti nel database, rientrano nell'area oggetto di studio.

Le prove di pompaggio forniscono una stima del valore di trasmissività, mentre la profondità e la quota assoluta del pozzo sono riportate all'interno di una sezione diversa dello stesso database. Tenendo in considerazione il valore della quota piezometrica si è stimato lo spessore dell'acquifero cui fa riferimento la prova.

Utilizzando la formula inversa $K = \frac{T}{b}$ dove T è la trasmissività, K la conducibilità e b lo spessore dell'acquifero, si è stimato il valore di conducibilità.

Nello specifico risulta che per l'acquifero principale (in Figura 85 "pozzo1") il valore della conducibilità è pari a $6.3*10^{-3}$ m/s mentre per l'acquifero freatico si ottiene k=0.0031 m/s. I

	Pozzo 1		Pozzo 2	
Trasmissività	0.02	m²/s	0.01	m²/s
Quota assoluta pozzo	21	m.slm	2.74	m.slm
Profondità	50	m	5.5	m
Quota piezometrica	3	m.slm	0.5	m.slm
Spessore	32	m	3.26	m
К	0.00063	m/s	0.0031	m/s

calcoli e i risultati per entrambi i pozzi nel dominio di studio sono riportati nella tabella seguente.

Figura 85 Stima della conducibilità a partire dai risultati dei test di pompaggio

Per l'unità stratigrafica dell'Ignimbrite campana si assume come dato di partenza il valore riportato in letteratura $k=3*10^{-5}$ m/s (Corniello et al., 2003).

I valori di conducibilità qui riportati sono da intendersi come valori di conducibilità lungo il piano: $K_{xx}=k_{yy}$, mentre il valore di k_{zz} è stimato dai precedenti considerando un fattore di riduzione di un ordine di grandezza.

L'infiltrazione efficace annuale media per la zona oggetto di studio invece, è pari a 60 mm/a.

Questo valore è stato assunto come dato di partenza costante per tutta l'area ad eccezione delle zone maggiormente urbanizzate e per le aree interessate a depositi di ecoballe (Figura 86), per le quali si sono stimati dei valori di ricarica superficiale ridotti, a causa dei ridotti tassi di infiltrazione.

L'infiltrazione netta si è stimata pari al 15% del valore calcolato come descritto sopra (Figura 87)

Nello specifico si è valutato un consumo idropotabile pro-capite costante e pari a 160 m³/a, mentre la superficie urbanizzata è stata calcolata considerando solo le aree interne al modello a partire dal database "aree urbanizzate" della regione Campania (Figura 86). Il numero di abitanti è stato calcolato moltiplicando il numero totale di abitanti del comune per il rapporto tra l'area interna al modello e l'area urbanizzata totale del comune di riferimento. L'infiltrazione netta si è stimata pari al 15% del valore calcolato come descritto sopra (Figura 87)

La ricarica netta nelle aree a deposito di ecoballe è stata considerata pari al minimo valore di ricarica netta trovato per le aree urbanizzate.



Figura 86 I centri abitati e la zona delle ecoballe

Consumo idropotabile	160	m^3/a(p.c.)	Comune	Area	Abitanti	Area Modello (km^2)	Area Modello (m^2)	Rapporto Aree	Abitanti Modello	Ricarica (mm/a)
Superficie		m^2	CANCELLO ED ARNONE - CENTRO	1728883.5	5665	0.74	740234.567	0.428157575	2426	0.08
Popolazione		abitante	CASTEL VOLTURNO - CENTRO	19967645.4	25466	13.58	13575953.69	0.679897575	17314	0.03
			GRAZZANISE	2847480.1	7059	0.19	186876.1311	0.065628599	463	0.06
Ricarica	0.15	mm/a	CASAL DI PRINCIPE - CENTRO	3614232.2	21487	2.94	2938957.662	0.81316238	17472	0.14
			VILLA LITERNO - CENTRO	2600995.1	12040	2.60	2600995.146	1.00000027	12040	0.11
			SAN CIPRIANO D'AVERSA - CENTRO	2452942.6	13661	2.02	2023898.048	0.825089853	11272	0.13
			CASAPESENNA - CENTRO	1769266.7	7044	1.14	1144808.483	0.64705253	4558	0.10
			CASTEL VOLTURNO - CENTRO	19967645.4	25466	0.28	276142.0639	0.013829476	352	0.03

Figura 87 Calcolo della ricarica superficiale per le zone urbanizzate

8 Il modello numerico 3D

L'area oggetto di studio, descritta nel capitolo precedente, è il dominio di interesse del modello numerico implementato con lo scopo di simulare il flusso delle acque sotterranee della zona. Si noti che al fine di studiare in maniera esaustiva i fenomeni di intrusione salina si è scelto di estendere il dominio del modello di un centinaio di metri oltre la line di costa.

Il modello numerico presentato in questo capitolo è stato implementato a partire da dati, presenti in letteratura, che risultano insufficienti per il livello di approfondimento necessario alla costruzione di uno strumento efficace per la simulazione del flusso delle acque sotterranee.

Questo lavoro va visto quindi, come un modello di prima approssimazione per la descrizione dell'area di interesse.

Quanto riportato nei capitoli precedenti rispetto alle difficoltà interpretative dell'idrogeologia dell'area in questione si riflette in maniera diretta sul livello di accuratezza del modello numerico. L'implementazione di quest'ultimo infatti, è strettamente connessa alla struttura idrostratigrafica e alla concettualizzazione dell'area.

8.1 Discretizzazione orizzontale

La scelta della discretizzazione orizzontale è stata effettuata tenendo in prima considerazioni due esigenze: da un lato quella di garantire tempi di calcolo contenuti e dei livelli di precisione dei risultati accettabili, in modo da poter effettuare un numero di simulazioni quanto più elevato possibile in fase di calibrazione manuale del modello, dall'altro lato quella di ottenere un "raffittimento" più spinto nella zona prossima alla costa in modo da poter valutare con maggior efficacia l'effetto del fenomeno di intrusione salina.

Alla luce di queste considerazioni e tenendo presente la necessità di ottenere variazioni di dimensioni tra gli elementi quanto più graduali possibile, si è scelto di dividere il dominio nelle tre sotto aree rappresentate in Figura 88, alle quali è stata assegnata una densità di elementi via via decrescenti procedendo verso il monte idraulico.

Il codice scelto per la generazione della griglia in feflow è il *triangle*, un codice di triangolazione che supporta la combinazione di poligoni, linee e punti. Questo strumento permette di scegliere l'angolo minimo per gli elementi che saranno creati e di impostare un target di dimensione massima sia per gli elementi dei poligoni che per quelli intorno alle linee e i punti inseriti nella *supermesh*.



Figura 88 I poligoni individuati all'interno dell'area di studio per effettuare la discretizzazione a densità variabile

Per il poligono 1, quello più vicino alla zona di costa, è stata scelta una densità pari a 30, mentre per i poligoni 2 e 3 si è optato per densità pari a 7 e 3 rispettivamente. La scelta dei valori di densità di elementi all'interno di ognuno dei poligoni di riferimento è stata effettuata procedendo per tentativi provando ad ottenere il minor numero possibile di elementi delle dimensioni desiderate.

Un raffittimento ulteriore è stato effettuato lungo due linee parallele alla costa e distanti dalla stessa 20 e 70 m rispettivamente, impostando target di dimensione massima degli elementi pari a 10 metri.

I lati degli elementi così ottenuti misurano dai cinque metri in corrispondenza della linea di costa fino ai circa 300 m nella zona a monte del dominio.

Per ottenere una migliore modellazione del dominio si è proceduto alle operazioni di *smoothing* sui nodi, effettuata con lo strumento "*refiniment*" di Feflow e al fine di ridurre il rischio di instabilità dei risultati a quella di "*snapping*" dei lati degli elementi con angoli ottusi.

Ogni layer del dominio di interesse contiene circa 190000 elementi.

In Figura 89 è riportata la discretizzazione orizzontale definitiva del modello.



Figura 89 Discretizzazione orizzontale del modello

8.2 Discretizzazione verticale

La discretizzazione verticale dell'area è stata effettuata con riferimento alla concettualizzazione descritta al capitolo precedente: le quattro unità idrostratigrafiche individuate sono state scelte come punti fermi del profilo verticale che si estende fino a circa 120 m di profondità. La base del modello è stata scelta coincidente con il contatto stratigrafico tra l'unità composta dal complesso argilloso e quella composta dalle piroclastiti pre Ignimbrite Campana mentre le quote del layer più superficiale sono state ottenute dal DTM dell'area. Nella parte centrale del profilo verticale sono stati inserite due slice relative ai contatti tra le piroclastiti pre ignimbrite Campana e il complesso dell'ignimbrite Campana e tra quest'ultimo e il complesso più superficiale.

Tra i layer così definiti sono state inserite altre 7 slices in modo da individuare un totale di dieci layers con spessori che variano aumentando con la profondità. In questo modo si ottiene una discretizzazione più fitta nella zona più vicina alla superficie ed è possibile studiare più da vicino l'andamento delle concentrazioni e il fenomeno dell'intrusione salina.

Gli spessori dei layer ottenuti quindi variano sia verticalmente che orizzontalmente. In Figura 90è riportato lo schema delle quote e degli spessori medi per ogni layer mentre la Figura 91 rappresenta la visualizzazione 3D del modello da cui si può notare la discretizzazione verticale del modello.

Slice 💌	Quota [m s.l.m.] 💌	Spessore layer [m] 🔽
1	Segue DTM	Variabile
2	-0.5	0.5
3	-1.5	1
4	-3.5	2
5	-7.5	4
6	-15.5	8
7	-29.5	14
8	-48.6	19.1
9	-67.7	19.1
1	-89.6	21.9
11	-117.7	28.1

Figura 90 Quote e spessori delle slices di discretizzazione verticale del modello



Figura 91 Rappresentazione 3D della griglia del modello

8.3 Le condizioni al contorno

Le condizioni al contorno sono state assegnate per descrivere, in maniera quanto più efficace possibile, la complessa interazione tra il dominio del modello e l'area esterna.

Alcune delle scelte prese in questa fase riflettono in maniera particolare le difficoltà legate alla mancanza di dati nella zona del corpo idrico Piana Volturno-Regi Lagni: infatti per alcuni confini del modello, non è stato possibile "ancorare" le condizioni al contorno a delle conoscenze solide delle variabili idrodinamiche e si è dovuto procedere a delle approssimazioni che influenzano significativamente i risultati delle simulazioni.

Le condizioni assegnate sono di tre tipi: flusso nullo, carico costante e condizione di Cauchy o "Fluid Transfer".

Per il confine ad Est, coincidente con il Mar Tirreno, è stata imposta una condizione di carico costante e pari a 0 m su tutti i nodi della slice più superficiale compresi tra la costa e la chiusura del modello, mentre lo stesso carico costante e pari a 0m è stato assegnato solo sui nodi del limite esterno per tutte le slices inferiori.

Il limite a Sud-Est del modello è stato tracciato, come descritto al capitolo precedente, lungo le perpendicolari alle linee piezometriche; su questo contorno quindi è stata imposta la condizione di flusso nullo.

In Figura 92 è riportato lo schema utilizzato in Surfer per l'individuazione del limite appena descritto: in blu sono rappresentate le linee piezometriche mentre le frecce nere indicano le direzioni del flusso lungo le quali è stato tracciato il confine suddetto, riportato in rosso nella parte bassa della figura.



Figura 92 Il confine a Sud Est del modello (in rosso). In blu è riportata la mappa piezometrica mentre le frecce indicano le direzioni del flusso

A Nord il modello è chiuso dal fiume Volturno: dato che l'interazione tra falda e fiume è molto variabile si è scelto di assegnare per i primi tre layer, ossia fino alla quota del letto del fiume, la condizione al contorno fluid transfer. I parametri "In-transfer rate" e Out-transfer rate" sono stati stimati a partire dalla conducibilità idraulica $(1*10^{-6} \text{m/s})$ e dallo spessore (5m) dei sedimenti limoso sabbiosi che costituiscono il letto del fiume Volturno e assegnati entrambi pari a $2*10^{-7}$ s⁻¹.

Per il layers 4,5,6 e 7, relativi all'acquifero freatico è stato imposto un carico costante dedotto dalla piezometria superficiale, mentre per il layers 8,9,10, che rappresentano l'acquifero confinato, si è assegnato il carico costante ricavato dalla piezometrica profonda.

In quest'ultimo modo sono state imposte le condizioni al contorno sul limite Nord-Nord Est: si sono ricavati i valori di carico idraulico dalla piezometria superficiale e profonda e si sono assegnati come carico costante rispettivamente per l'acquifero freatico (layers da 1 a 7) e per quello confinato (layers 8,9 e 10).

Infine sono state assegnate condizioni di carico costante e pari a 0.1 m per il layer superficiale sul Lago Patria e sui laghi dell'ecoparco del Mediterraneo.

In Figura 93 è rappresentato uno schema riassuntivo delle condizioni al contorno imposte al modello e visualizzate sulla slice 1: la condizione di Cauchy è rappresentata dai nodi verdi, quella di carico costante dai nodi blu mentre la condizione di flusso nullo, imposta sul limite Sud-Est, non è evidenziata.



Figura 93 Le condizioni al contorno imposte al modello viste sul layer 1.

8.4 Calibrazione del modello numerico

La fase di calibrazione del modello è stata realizzata con il metodo *Trial and Error*. Sono stati fatti variare, step by step, i valori della conducibilità idraulica per le tre unità idrostratigrafiche e i valori di ricarica. Ad ogni step, al fine di determinare il grado di precisione raggiunta dal modello, sono stati confrontati i carichi piezometrici calcolati con quelli osservati (carichi piezometrici forniti dal DICEA della Federico II).

Come descritto nei capitoli precedenti lo strato superficiale, (layer da 1 a 7), è composto da diversi complessi idrogeologici e la valutazione della conducibilità idraulica orizzontale media risulta molto complicata.

Essa è stata quindi fatta variare in un range molto ampio tra i 3×10^{-3} m/s, valore indicato dalla prova di pompaggio dell'Autorità di Bacino descritta al capitolo precedente, e 1×10^{-5} m/s, mentre la conducibilità verticale è sempre stata assegnata riducendo di un ordine di grandezza il valore scelto per quella orizzontale.

Anche la conducibilità idraulica per l'ignimbrite campana assume valori in un range molto ampio, tra i $3*10^{-5}$ m/s (Corniello et al.,2003) e i $3*10^{-8}$ m/s. Il limite inferiore dell'intervallo di variabilità per questa unità idrostratigrafica è stato ridotto in maniera così significativa nel tentativo di rappresentare al meglio la separazione degli acquiferi superficiale e profondo.

Infine le conducibilità idrauliche del complesso delle piroclastiti pre ignimbrite campana assumono valori compresi tra 2.3*10⁻⁴ m/s (Corniello et al.,2003) e i 6.5 *10⁻⁴ forniti dai risultati delle prove di pompaggio dell'AdB. In Figura 94 sono sintetizzati i range di variabilità delle conducibilità idrauliche orizzontali per i tre complessi idrostratigrafici modellati.

Complesso idrostratigrafico	🖌 Conducibilità k _x , ky [m/s] 🔻	Range di condicibilità c 🔻	Range di condicibilità a:	-
Complesso superficiale	0.003	0.00001	0.003	
Complesso dell'Ignimbrite Campana	0.00003	0.0000003	0.00003	
Complesso delle piroclastiti pre Ignimbrite Campana	0.00065	0.00023	0.00065	

Figura 94 I range di variabilità delle conducibilità idrauliche per i tre complessi idrostratigrafici modellati

I valori della ricarica meteorica sono caratterizzati da un livello di incertezza altrettanto ampio. Inizialmente si è assegnata una ricarica pari a 60mm/a su tutta l'area ad eccezione delle zone maggiormente urbanizzate, delle aree a deposito di ecoballe e dell'area dell'ecoparco del mediterraneo, per le quali i valori di ricarica meteorica sono stati stimati così come descritto al capitolo precedente. Nei tentativi successivi al primo, in cui si è scelto un livello di approssimazione maggiore per velocizzare i tempi di calcolo, si sono assegnate ricarica uniformi per tutto il dominio e variabili tra 0 e 60 mm/a.

La porosità è stata assegnata costante su tutti i layer e pari in prima approssimazione a 0.2.

La scarsa disponibilità di dati determina da un lato un livello di approssimazione del modello concettuale dell'isola molto alto e dall'altro un'incertezza considerevole per i valori dei parametri idrogeologici.

In Figura 95 è riportata la mappa piezometrica elaborata a partire dai carichi idraulici simulati sui punti del layer più superficiale in condizioni stazionarie.



Figura 95 La mappa piezometrica ottenuta dalla simulazione in caso stazionario per il layer 1.

Si osserva che i risultati non raggiungono ancora i target individuati in maniera perfetta; per un confronto più immediato si guardi ai risultati della mappa piezometrica riportata in Figura 96. Guardando ai risultati per i layers inferiori si osservano differenze dello stesso ordine di grandezza tra caso simulato e caso reale.



Figura 96 Mappa piezometrica acquifero superficiale ricavata dai dati forniti dal DICEA della Federico II

Nel paragrafo seguente si porranno in evidenza i prossimi passi da seguire per aumentare l'affidabilità del modello e l'accuratezza dei risultati ottenuti.

8.5 Osservazioni conclusive e sviluppi futuri

È stato già evidenziato in premessa a questo capitolo che il modello numerico qui presentato deve essere inteso come una prima base di partenza per la costruzione di uno strumento efficace alla rappresentazione e alla simulazione degli effetti dell'intrusione salina nell'area del corpo idrico Piana del Volturno-Regi Lagni.

Come si osserva al paragrafo precedente, allo stato attuale delle conoscenze del complesso sistema idrogeologico dell'area di interesse, il modello implementato non è abbastanza robusto da poter simulare in maniera adeguata il flusso delle acque sotterranee e risulta, a maggior ragione, ancora acerbo per la simulazione del trasporto e dello studio dei fenomeni di intrusione salina.

Infatti, nella fase di concettualizzazione del modello, è stato necessario procedere con un livello di approssimazione troppo alto per gli scopi appena elencati.

Seguendo lo schema di ragionamento proposto da Anderson e Woessner (Anderson e Woessner, 1992) si ordineranno le osservazioni relative ai problemi connessi all'implementazione del modello concettuale secondo tre linee principali:

- definizione delle unità idrostratigrafiche
- bilancio idrico
- sistema di flusso idrico.

Con riferimento al primo gruppo, si nota che la definizione delle unità idrostratigrafiche così come è stata descritta al capitolo precedente, rappresenta probabilmente una semplificazione piuttosto considerevole. Le proprietà idrogeologiche dei diversi complessi che compongono l'unità più superficiale infatti, risultano troppo disomogenee ed è per questo necessario rappresentare quest'area del modello in maniera più precisa ed approfondita. Allo stesso modo risultano incerte le definizioni degli spessori e delle estensioni areali di tutti i complessi suddetti. Infine, anche per le altre unità idrostratigrafiche individuate i valori di conducibilità idraulica sono ritenuti validi solo in prima approssimazione.

Per quanto riguarda la definizione del bilancio idrico e del sistema di flusso idrico, il modello concettuale implementato nell'ambito di questo lavoro di tesi presenta numerose incertezze.

Prima di tutto è necessario notare che il complesso meccanismo di interazione tra la falda principale e la falda freatica non è del tutto chiaro: anche forzando molto la calibrazione dei parametri di conducibilità idraulica nelle tre diverse unità idrostratigrafiche infatti, i risultati delle simulazioni non evidenziano in maniera decisa il carattere di separazione delle due falde. In alcune zone del modello, probabilmente, le due falde risultano interconnesse e la concettualizzazione separata delle stesse può aver indotto in errori significativi.

La scelta forzata dei limiti del dominio, il conseguente livello di imprecisione nell'assegnazione delle condizioni al contorno a Est e la definizione stessa del limite a Sud-Est lungo le perpendicolari alle linee isopieziche aumentano considerevolmente il grado di approssimazione complessivo del modello.

Infine la definizione del sistema di flusso è influenzata negativamente dalle informazioni parziali che si hanno a disposizione relative alle precipitazioni meteoriche, all'evapotraspirazione, al deflusso superficiale e ai prelievi da falda sotterranea.

Dalle osservazioni appena esposte si evince che al fine di ottenere uno strumento efficace per la simulazione dell'intrusione salina, che possa effettivamente fornire un supporto al sistema di gestione della risorsa idrica nell'area del corpo idrico è necessario approfondire il livello di conoscenza dell'idrogeologia dell'area.

125

Di seguito saranno affrontati alcuni possibili sviluppi futuri di questo lavoro che potranno essere utili da un lato al fine di implementare un modello numerico affidabile e dall'altro per la comprensione dei complessi meccanismi di intrusione salina costiera e per la gestione della risorsa idrica nell'area di interesse.

È necessario programmare una campagna di raccolta dati e di test di campo per approfondire la conoscenza dell'area del corpo idrico di riferimento e proseguire nella direzione degli obiettivi tracciati nell'ambito di questo lavoro.

Ottenere le informazioni necessarie per la modellazione non è mai semplice. Nello specifico caso in esame, da un lato i dati presenti in letteratura non sono sufficienti, dall'altro il lavoro sul campo, pianificato e svolto nella prima fase di questo lavoro di tesi, è risultato particolarmente difficile: l'accesso ai pozzi per i rilievi è molto limitato, soprattutto nella zona a sud del modello, dove molti dei proprietari hanno chiuso la parte superiore del pozzo per evitare eventuali furti delle pompe, o si sono detti non disponibili ad autorizzare alcun tipo di misurazione.

Nella zona suddetta è probabilmente necessario intervenire con una campagna di educazione e sensibilizzazione sui temi della tutela della risorsa idrica e ricostruire un rapporto di fiducia tra le istituzioni, anche accademiche, e la popolazione che si è dimostrata in molti casi disinformata e diffidente.

Le problematiche riscontrate nell'implementazione del modello, elencate nelle osservazioni iniziali di questo paragrafo, tracciano la strada da seguire nell'ambito del lavoro di raccolta dati. Per ottenere una definizione più precisa dell'estensione areale e verticale dei complessi geologici presenti e la loro schematizzazione in unità idrostratigrafiche è necessari prevedere carotaggi e costruire sezioni geologiche distribuiti in maniera più regolare in tutto il dominio di interesse.

Al fine di definire il bilancio idrico e i meccanismi che regolano il sistema di flusso, compresi i meccanismi di separazione e interazione tra le due falde nelle zone incluse nel modello e la definizione delle condizioni al contorno, è fondamentale raccogliere informazioni sulle proprietà degli acquiferi, sulla distribuzione dei carichi idraulici e sugli stress idrogeologici a cui è sottoposto il modello. Per questi motivi risulta fondamentale predisporre:

- misurazioni del carico idraulico aggiornate e più densamente distribuite nell'area del modello
- rappresentazione di mappe piezometriche relative all'acquifero profondo e superficiale
- prove di pompaggio e analisi della distribuzione spaziale della conducibilità idraulica e/o della trasmissività

- prove di pompaggio e valutazione degli spessori dei sedimenti costituenti il letto del fiume Volturno
- analisi delle proprietà di immagazzinamento degli acquiferi
- raccolta dei dati di distribuzione spaziale e temporale dei tassi di evapotraspirazione, di precipitazione, di deflusso superficiale e di prelievo da falda.

A fronte di queste analisi più approfondite relative alla distribuzione dei carichi idraulici sarà possibile valutare in maniera più precisa la direzione del flusso di acqua sotterranea e di conseguenza valutare la posizione del limite a chiusura del modello a Sud-Est.

Ai fini di implementare un modello di trasporto e di studiare l'evoluzione del sistema in transitorio è necessario prevedere inoltre, dei test di conducibilità elettrica nella zona a ridosso della fascia costiera e valutare i parametri di dispersività longitudinale e trasversale, di porosità efficace e di immagazzinamento degli acquiferi.

In conclusione, data la difficoltà nella definizione delle condizioni al contorno, potrebbe essere utile valutare di estendere i confini del modello ai limiti idrogeologici del corpo idrico. Di contro in questo caso, il dominio si estenderebbe in maniera considerevole e ci si troverebbe di fronte alla scelta tra una discretizzazione meno fitta (e di conseguenza risultati meno precisi) e dei tempi di calcolo probabilmente proibitivi.

9 Conclusioni

L'intrusione salina è una problematica da osservare con particolare attenzione nei sistemi acquiferi costieri.

L'avanzamento di acque marine verso l'entroterra e il conseguente mescolamento tra acqua salata e acqua dolce, determina il peggioramento della qualità della risorsa idrica sotterranea fino a renderla inutilizzabile per gli scopi civili, industriali e agricoli. Allo stesso tempo, l'intrusione salina causa un progressivo depauperamento qualitativo dei suoli e influenza negativamente la crescita delle piante. Una volta avvenuta l'intrusione salina i processi necessari per la desalinizzazione delle acque estratte o per il ripristino negli acquiferi delle condizioni iniziali risultano spesso molto costosi e di difficile attuazione. Pertanto, azioni volte alla prevenzione e/o al controllo del fenomeno possono essere considerate particolarmente efficaci.

La gestione integrata e sostenibile delle risorse idriche sotterranee è un obiettivo primario per tutte le istituzioni a livello mondiale. Da essa dipendono in maniera diretta la tutela dell'ambiente, lo sviluppo economico e sociale, il benessere e la salute dei cittadini.

Per questi motivi - e in maniera particolare negli acquiferi costieri e nelle piccole isole, dove la disponibilità di risorse idriche alternative è particolarmente ridotta e i rischi di contaminazione più alti - la tutela della quantità e della qualità delle acque sotterranee deve essere considerata prioritaria.

Le problematiche connesse alla gestione sostenibile delle acque inoltre assumono caratteri critici a fronte dell'aumento costante della pressione antropica e dei cambiamenti climatici.

La popolazione mondiale è in forte crescita e ancor di più lo è la domanda di acqua potabile: si prevede dunque uno sfruttamento sempre maggiore della risorsa idrica sotterranea e di conseguenza un aumento degli stress a cui sono sottoposti gli acquiferi.

Allo stesso tempo, i cambiamenti climatici possono incidere in maniera significativa sulla disponibilità delle risorse idriche con effetti che ancora non si riescono a quantificare ma che si cercano di prevedere per poter affrontare le criticità future da essi derivati.

Per tali motivi le autorità sono chiamate a gestire in maniera consapevole la disponibilità delle risorse idriche sotterranee e a mettere in campo tutte le misure necessarie a realizzare uno sfruttamento sostenibile delle stesse. Il lavoro di tesi ha affrontato due casi di modellazione del fenomeno di intrusione salina in acquiferi costieri; il primo relativo all'isola di Nauru, nell'Oceano Pacifico, e il secondo relativo al settore nord occidentale della 'Piana del Volturno Regi Lagni', nella zona a nord di Napoli. Il primo caso di studio ha affrontato la modellazione numerica 3D e la simulazione di alcuni scenari previsionali di cambiamento climatico individuati per Nauru dal Governo Australiano. Sono stati presi in considerazione gli scenari ottenuti dalle combinazioni di tre valori di livello del mare (0, 0.14 e 0.34 m s.l.m.), di tre livelli di precipitazione (0.0055, 0.0065 e 0.0073 m/d) e di tre livelli di evapotraspirazione (60%, 48% e 30% della precipitazione) previsti per il 2050. Sono stati considerati inoltre sei scenari di cambiamento climatico con ricarica meteorica pari e inferiore a quella attuale (0.0017 m/d e 0.0007 m/d rispettivamente) per i tre valori di livello del mare scelti.

Sono state osservate le variazioni delle concentrazioni di sali nelle acque di falda della porzione settentrionale dell'isola con particolare attenzione alla zona costiera dei distretti di Ewa e Anetan nota per la presenza di acque sotterranee dolci.

In generale, come ci si poteva aspettare, la salinità delle acque di falda aumenta all'aumentare del livello del mare e diminuisce all'aumentare della ricarica meteorica.

I risultati ottenuti evidenziano tuttavia una forte correlazione tra i valori di concentrazione e quelli di ricarica, mentre dipendono meno dalle variazioni del livello del mare.

Nei depositi sabbiosi, soprattutto presso i distretti di Ewa e Anetan, si rileva in tutte le simulazioni la presenza di una lente d'acqua dolce, indipendentemente dai valori di ricarica utilizzati. In questo settore, la profondità a cui si rinviene l'acqua dolce (concentrazione inferiore alla soglia di 1500 mg/l suggerita da WHO) varia tra i due e i dieci metri circa e la lente assume spessori non trascurabili anche negli scenari più sfavorevoli.

In questa zona infatti, come osservato già da Alberti et al. (2017), la ridotta conducibilità idraulica dei sedimenti sabbiosi determina una maggiore inerzia del sistema agli stress imposti e il conseguente accumulo di acqua dolce che risulta quindi una risorsa fondamentale per l'approvvigionamento idrico.

Con riferimento alla lente d'acqua dolce presente nei calcari della parte centrale dell'isola si osservano spessori significativi, tra gli otto e i venti metri circa, solo negli scenari caratterizzati da valori di ricarica maggiori di 620 mm/a (valore attuale di ricarica). Come già osservato da Falkland (Falkland, 2008) la presenza di questa lente è connessa a periodi particolarmente piovosi. L'elevata conducibilità dei calcari infatti, non permette in periodi mediamente piovosi l'accumulo in questa zona di quantitativi significativi di acqua dolce.

Le previsioni di cambiamento climatico al 2050 sembrano descrivere uno scenario piuttosto rassicurante per quanto riguarda lo sfruttamento della risorsa idrica sotterranea a Nauru.

Considerando però il ruolo strategico della risorsa idrica sotterranea nel sistema di approvvigionamento complessivo, potrebbe essere importante approfondire i meccanismi di accumulo di acqua dolce in casi di innalzamento del livello del mare maggiori di quelli indicati dal governo Australiano e considerati in questo lavoro di tesi.

L'andamento delle concentrazioni e l'evoluzione del fenomeno di intrusione salina sull'isola potrebbero essere ulteriormente approfonditi tenendo conto, nel modello tridimensionale, dell'estrazione di acqua dai pozzi presenti sulla costa e della ricarica addizionale dovuta alla reimmissione in falda delle acque utilzzate tramite le fosse settiche.

In conclusione, bisogna tener presente che le lenti d'acqua dolce presenti sull'isola sono molto vulnerabili. Per questo motivo è necessario mettere in campo un modello di gestione sostenibile che eviti ulteriori contaminazioni e che regolamenti l'uso della risorsa idrica per tenere sotto controllo il fenomeno di intrusione salina.

Nella seconda parte del lavoro di tesi si è affrontato il secondo caso di studio.

Il lavoro svolto sulla 'Piana del Volturno Regi Lagni' è stato incentrato sulla concettualizzazione idrogeologica dell'area di studio e sull'implementazione di un modello numerico valido come base di partenza per la valutazione del fenomeno dell'intrusione salina nella parte costiera della piana.

In questa zona, infatti, il livello di salinizzazione della falda è già piuttosto elevato. Le acque estratte dai pozzi più vicini alla costa è, in vari casi, inutilizzabile per scopi agricoli e in alcuni casi, il livello di contaminazione è tale che gli agricoltori hanno dovuto rinunciare a coltivare ampie porzioni di territorio.

La tutela delle risorse idriche sotterranee nel settore individuato come area di studio, ma in generale in tutta la regione Campania, assume un valore strategico di assoluta importanza.

In generale, la quasi totalità delle acque sotterranee nelle piane costiere della Campania risente in maniera particolare degli effetti dell'incremento della pressione antropica. Da un lato l'aumento della domanda idrica a scopi potabili, agricoli e industriali, dall'altro i fenomeni di contaminazione legati a molteplici fattori come sversamenti abusivi, perdite in fognatura, scarichi diretti in falda, scarichi in corpi idrici superficiali drenati dalle falde sotterranee, spandimento dei reflui zootecnici sui suoli, infiltrazioni di acque superficiali in terreni impiegati in attività zootecniche e agricole, inquinamento diffuso da area urbana, percolazione da aree adibite a discarica rendono necessaria un'azione efficace di tutela

130

Inizialmente si è proceduto alla schematizzazione concettuale dell'area sulla base delle informazioni disponibili in letteratura e sui dati acquisiti durante la campagna di misurazioni piezometriche svolta nella prima fase del lavoro di tesi. Tale fase di rilevamento, estremamente importante per il lavoro di tesi, ha riscontrato diverse difficoltà legate all'accesso ai pozzi per la frammentazione del territorio e in molti casi per la diffidenza degli agricoltori, dovuta alla cattiva fama della "Terra dei Fuochi". Tale fama ha creato nel corso del tempo una grave diffidenza e una paradossale difesa dei territori da intrusioni istituzionali.

La circolazione idrica sotterranea è articolata in due falde generalmente separate. Quella più superficiale, a carattere freatico, e quella principale confinata.

I diversi complessi litologici sovrapposti nei primi duecento metri di profondità sono stati schematizzati secondo quattro unità idrostratigrafiche principali con caratteristiche idrauliche considerate in prima approssimazione omogenee: l'unità più superficiale contiene la falda freatica ed è composta dai complessi dei depositi piroclastici sciolti dell'area flegrea, dalle piroclastiti prevalentemente da caduta, dal complesso delle sabbie litorali e dunari, dal complesso sabbioso-argilloso e da quello argilloso torboso; il complesso dell'"Ignimbrite campana ", è il tetto confinante della falda principale, contenuta nell'unità idrostratigrafica delle piroclastiti pre ignimbrite campana; infine l'unità idrogeologica più profonda rappresenta il letto della falda principale ed è composta da argille marine con intercalazioni di sabbie.

La conoscenza dei meccanismi locali di interconnessione delle due falde e i rapporti di interazione idraulica con i corpi idrici superficiali, restano da approfondire attraverso ulteriori analisi riguardanti le relazioni tra carichi piezometrici superficiali e profondi, i fenomeni di drenanza, le interazioni tra la rete idrologica superficiale ed i fenomeni mareali.

I risultati modellistici ottenuti indicano inoltre che l'accuratezza del modello potrà migliorare introducendo, nelle implementazioni che potranno essere sviluppate in futuro, gli esiti di specifiche prove di emungimento da praticare nei domini di studio dove mancano conoscenze circa le trasmissività e i coefficienti di immagazzinamento in varie zone sia della falda superficiale che di quella profonda.

Sulle basi concettuali attualmente disponibili si è implementato il modello numerico 3D.

Quest'ultimo costituisce uno strumento di studio da sviluppare ulteriormente in futuro in previsione di una gestione del fenomeno di intrusione salina negli acquiferi costieri presi in considerazione. Come anticipato nel capitolo 8, il modello numerico qui presentato è la prima fase di un progetto più ampio, avente lo scopo di realizzare in futuro uno strumento di analisi, previsione e prevenzione del fenomeno di intrusione salina.

L'implementazione del modello numerico ha dunque permesso di individuare le analisi necessarie ad aumentare l'accuratezza del modello concettuale.

Al fine di raggiungere una calibrazione soddisfacente vanno approfondite le conoscenze relative alle caratteristiche idrogeologiche di tutte le unità individuate, alla distribuzione dei carichi idraulici e agli stress idrogeologici a cui è sottoposto il modello.

La complessità del sistema idrogeologico considerato e l'importanza della risorsa sotterranea per la zona del corpo idrico Piana del Volturno- Regi lagni, rendono decisamente auspicabile l'applicazione di modelli numerici nel settore di intervento per la tutela delle acque sotterranee. In considerazione dei rischi connessi ai cambiamenti climatici e alla crescente pressione antropica, diventa ancora più importante guardare alla gestione delle risorse idriche in termini integrati e sostenibili, considerandole come beni comuni e condivisi tra le generazioni attuali e quelle future.

10 Bibliografia

Agenzia Regionale Protezione Ambientale Campania - ARPAC 2004 - P.O.R. Campania 2000l2006 – Misura 1.1.: "Realizzazione del Sistema Regionale di Monitoraggio Ambientale" – Progetto "Monitoraggio Acque Sotterranee". Allegati Tecnici e Cartografici. Agenzia Regionale Protezione Ambientale Campania - Regione Campania (2004).

Alberti L., Francani V. e La Licata I., 2008. *Studies and Technology improvement for water availability in Nauru Island*. Politecnico di Milano-DIIAR.

Alberti L., Francani V., La Licata I., Scott Rigamonti D.,2008. *Influenza dei parametri idrogeologici sull'intrusione salina e sua caratterizzazione in un'area industriale costiera*. Giornale di Geologia Applicata 2008, 8 (1) 89-99 - doi: 10.1474/GGA.2008-08.1-09.0193

Alberti L., La Licata I, Cantone M., 2017. Saltwater Intrusion and Freshwater Storage in Sand Sediments along the Coastline: Hydrogeological Investigations and Groundwater Modeling of Nauru Island. Politecnico di Milano- DIIAR

Anderson Mary P., Woessner William W., 1992- Applied Groundwater Modeling. Simulation of flow and advective transport

ARPA Campania, 2007 - Acqua – il monitoraggio in Campania 2002 -2006

Australian Bureau of Meteorology and Commonwealth Scientific and Industrial. Research Organization (CSIRO), 2014 - Climate Variability, Extremes and Change in the Western Tropical Pacific: New Science and update Country reports

Australian Bureau of Meteorology, 2011 - CSIRO. Climate Change in the Pacific: Scientific Assessment and New Research.Volume 1: Regional Overview; Australian Bureau of Meteorology: Melbourne, Australia; CSIRO: Canberra, Australia, 2011;

Autorità Di Bacino Nazionale Dei Fiumi Liri-Garigliano E Volturno, 1996 - Studi propedeutici finalizzati alla redazione del Piano di Bacino del fiume Volturno – ottimizzazione delle risorse idriche del Bacino del F. Volturno. Autorità di Bacino dei fiumi Liri-Garigliano e Volturno, Napoli.

Autorità Di Bacino Regionale Nord Occidentale Della Campania 2004 -Lo stato delle conoscenze acquisite sulle acque superficiali del bacino Nord Occidentale propedeutico alla redazione del Piano di Tutela delle Acque. Vol. 3. Autorità di Bacino Regionale Nord Occidentale della Campania, Napoli.

Bellucci F., Corniello A., De Riso R. e Russo D. 1990 - *Idrogeologia della piana a N-E di Napoli*. Mem. Soc. Geol. It., 45, Roma

Budetta P., Celico P., Corniello A., De Riso R., Ducci D., Nicotera P. 1994 - *Carta idrogeologica della Campania 1/200.000*. IV Conv. Inter. Di Geoing. "Difesa e valorizzazione del suolo e degli acquiferi", Torino, 10-11marzo 1994

Carpenter C., Falkland T., Overmars M. e Scott D., 2003. *Pacific Dialogue on Water and Climate. Synthesis Report.* South Pacific Applied Geoscience Commission, Suva, Fiji. Celico P. 1983 - *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionale, Abruzzo, Molise e Campania).* Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno, 4/2, Roma.

Celico P., De Paola P. 1992 - *La falda dell'area napoletana: ipotesi sui meccanismi naturali di protezione e sulle modalità di inquinamento*. Gruppo Scient. It. Studi e Ricerche. Atti della Giorn. di Studio "Acque per uso potabile – Proposte per la tutela e il controllo della qualità". 14-15 febbraio, Milano

Celico P., De Vita P., Monacelli G., Scalise A. R. e Tranfaglia G. 2004 -*Hydrogeological Map* of the Southern Italy. 32nd International Geological Congress, Florence, August 20-28, 2004 - Italy.

Celico P., Esposito L., De Gennaro M., Mastrangelo E. 1994 - *La falda ad oriente della città di Napoli: idrodinamica e qualità delle acque*. Geologica Romana, Vol. XXX, Roma.

Celico P., Esposito L., Guadagno F.M. 1997 - Sulla qualità delle acque sotterranee nell'acquifero del settore orientale della Piana Campana. Geologia Tecnica & Ambientale, Roma.

Civita M. 1973 - *L'infiltrazione potenziale media annua nel massiccio carbonatico del Matese (Italia meridionale)*. Atti del II Conv. Intern. Sulle Acque Sotterranee (1973), Palermo.

Corniello A., De Riso R., Ducci D. 1990 - *Idrogeologia e idrogeochimica della Piana Campana*. Mem. Soc. Geol. It. 45 (1990), Roma.

Corniello A., Ducci D., 2013- *Hydrogeochemical characterization of the main aquifer of the "Litorale Domizio-Agro Aversano NIPS" (Campania — southern Italy)* Journal of Geochemical Exploration 137 (2014) 1–10

Corniello, A., Cardellicchio, N., Cavuoto, G., Cuoco, E., Ducci, D., Minissale, A., Polemico, M. 2015-*Hydrogeological Characterization of a Geothermal system: the case of the Thermomineral area of Mondragone (Campania, Italy).* International Journal of Environmental Research, 9(2).

Corniello, A., Ducci, D., Ruggieri, G., & Iorio, M.,2018 - Complex groundwater flow circulation in a carbonate aquifer: Mount Massico (Campania Region, Southern Italy). Synergistic hydrogeological understanding. Journal of Geochemical Exploration.

Corniello, Ducci,2007 - Hydrogeology and Hydrogeochemistry of the Plain between monte Massico and the river Volturno.

Ducci D. e Tranfaglia G. 2008 - *The Effect of Climate Change on the Hydrogeological Resources in Campania Region (Italy).* In and climatic changes. Geological Society, London, Special Publications, 288: 25-38. Dragoni, W. (ed) Groundwater E

ENEA Protezione Unità Tecnica Valutazioni Ambientali- Laboratorio Protezione e Gestione della Risorsa Idrica, 2001 – Progetto Regi Lagni

Falkland T., 2002. - From Vision to Action: Towards Sustainable Water Management in the Pacific, Overview paper for Theme 1: Water Resources Management, at the Pacific Regional Consultation on Water in Small Islands Countries. Sigatoka, Fiji, 29 July – 3 August 2002

Falkland, T., 1999- *Water resources issues of small island developing states*. Nat. Resour. Forum 1999.

Falkland, T.,2010 - *Country Implementation Plan for Improving Water Security in the Republic of Nauru*; South Pacific Applied Geoscience Commission, Suva, Fiji, 2010.

GEOLAB 1988 - Indagini integrative e di dettaglio per lo studio idrogeologico della Piana Campana, dal fiume Savone allo spartiacque con il bacino del Sarno tra Ottaviano e Palma Campania. Relazione idrogeologica. ASMEZ, Agenzia per la Promozione dello Sviluppo del Mezzogiorno, Rip. CSI, Div. 4, Napoli

Jacobson G. e Hill P.J., 1988. *Hydrogeology and groundwater resources of Nauru Island, central Pacific Ocean*. Bur. Miner. Resour. (Aust.), Geol & Geophys.

L. Alberti, M. Cantone, G. Oberto, D. Sampietro, 2011 - GNSS Static Survey Report

Mirti A.V. e Davies S., 2005. - Drinking Water Quality in the Pacific Island Countries: Situation Analysis and Needs Assessment. SOPAC Joint Contribution Report 181, July 2005.

Nakada S., Umezawa Y., Taniguchi M., Yamano H.,2012- Groundwater Dynamics of Fongafale Islet, Funafuti Atoll, Tuvalu. Groundwater 2012 Nauru

Ortolani F., Aprile F. 1978 - Nuovi dati sulla struttura profonda della Piana Campana a sudest del Fiume Volturno. Boll. Soc. Geol. It., 97, 591-608, Roma.

Ortolani F., Aprile F. 1979 - Sulla struttura profonda della Piana Campana. Boll. Soc. Nat., Napoli

Ortolani F., Aprile F. 1985 - Principali caratteristiche stratigrafiche e strutturali dei depositi superficiali della Piana Campana. Boll. Soc. Geol. It., Roma.

Regione Campania, 2010 – Piano di Azione Locale per la lotta alla siccità e alla desertificazione della regione Campania.

Regione Campania, 2017- Piano di Tutela delle Acque. Napoli

Regione Campania, Sogesid S.P.A., 2006- Piano di Tutela delle Acque. Napoli

Romano P., Santo S., Voltaggio M. 1994 - L'evoluzione morfologica della pianura del Fiume Volturno (Campania) durante il tardo Quaternario (Pleistocene medio-superiore). Il Quaternario, **7**

UNICEF & WHO, 2004 - Meeting the Millennium Development Goals on Water and Sanitation Targets: A midterm assessment of the progress. World Health Organization, Geneva.

Viparelli C. 1967 - Le acque sotterranee. In "Il sottosuolo di Napoli", a cura del Comune di Napoli, AGIF, Aversa

Werner, A.D.; Sharp, H.K.; Galvis, S.C.; Post, V.E.A.; Sinclair, P.,2017- Hydrogeology and management of freshwater lenses on atoll islands: Review of current knowledge and research needs. J. Hydrol. 2017

11 Sitografia

www.como.polimi.it/Nauru