Politecnico di Milano

Facoltà di Ingegneria - Dipartimento di Elettronica e Informazione

Corso di Laurea in Ingegneria per l 'Ambiente ed il Territorio

Individuazione di alternative paretiane per la gestione di un acquifero: il caso dell'Isola di Nauru.

Relatore:
Prof. Rodolfo SONCINI SESSA

Correlatore:
Ing. Andrea CASTELLETTI

Tesi di Laurea di:

Federica BERTOLINI
Mat. 725147

Anno Accademico 2011-12

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto il Prof. Soncini per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro di tesi e per l'appoggio. Ringrazio inoltre il Prof. Castelletti e L'Ing. Pianosi per avermi dedicato tempo e pazienza e avermi seguito nel corso di tutto questo periodo. Ringrazio il Prof. Alberti e l'Ing. La Licata per i preziosi consigli e un ringraziamento speciale a Gabriele e Vittorio per la loro disponibilità. Ringrazio i miei genitori, i miei amici per avermi sempre sostenuto e tutti coloro insieme ai quali ho condiviso tratti più o meno lunghi di questo percorso.

Grazie, grazie davvero *Federica*

Indice

Introduzione **9**

1 Problematiche **11**
1.1 I PICs 11
1.2 L'Intrusione salina. 13
1.2.1 Soluzioni proposte: i pozzi *scavenger* 17
1.3 L'isola di Nauru 19
1.3.1 Clima e precipitazioni 22
1.3.2 Geologia e Idrogeologia 23
1.3.3 Risorse idriche disponibili 27

2 Come affrontare il problema e valutare le alternative **31**
2.1 Il processo decisionale: soggettività e alternativa di miglior compromesso. 31
2.1.1 Pianificazione e gestione 34
2.2 La procedura di pianificazione integrata e partecipata 35
2.3 Introduzione alla problematica ed elementi del problema . . . 38
2.3.1 Elementi del problema e sua formulazione. 40
2.4 Gli approcci classici alla soluzione: l'analisi *What - if* 43
2.4.1 Analisi *What - if*: definizione e aspetti qualitativi. . . 45
2.4.2 Analisi *What - if*: aspetti quantitativi. 49

3 Azioni, Criteri e Indicatori **54**
3.1 Ricognizione e Azioni. 54
3.1.1 I Criteri di valutazione. 55
3.1.2 Indicatori: fattori che ne influenzano la scelta. 56
3.2 Le azioni, le variabili di decisione e gli insiemi di ammissibilità delle variabili. 57
3.3 Criteri e Indicatori. 60
3.3.1 Concentrazione_Limite 61
3.3.2 Costo_Spazzino 63

4 Il Modello **66**
4.1 Identificazione del modello 66
4.1.1 La relazione tra modello e indicatori. 67
4.2 Il Codice di Calcolo 69
4.2.1 Equazioni per il flusso sotterraneo e di conservazione della massa. 70
4.2.2 Equazioni del flusso e trasporto densità-dipendente e per il trasporto di soluto. 71
4.3 Il Modello 2D 78
4.4 Il Modello 3D 82
4.4.1 Modellazione numerica 3D di flusso e trasporto densità dipendente: applicazione alla zona nord di Nauru. . . . 83
4.4.2 Prima fase di calibrazione: Aprile 2010. 87
4.4.3 Seconda fase di calibrazione: Novembre 2009. 89
4.4.4 Validazione 94

5 Ottimizzazione di un sistema di pozzi *scavenger* con un sistema di supporto alle decisioni. **97**
5.1 Il sistema di supporto alle decisioni. 97
5.1.1 Formulazione del problema di ottimizzazione. 99
5.1.2 Il processo decisionale: molti obiettivi e molti decisori. 101
5.1.3 Design delle alternative. 103
5.1.4 Problematiche connesse ai disturbi. 104
5.2 Scegliere tra infinite alternative in caso di pura pianificazione. 105
5.2.1 Formulazione del problema in caso di pura pianificazione: frontiera di Pareto e stima degli effetti. 106
5.2.2 Le fasi successive: dalla comparazione alla scelta politica 110
5.3 Valutazione dell'efficacia di un sistema di pozzi *scavenger*: applicazione alla zona nord di Nauru. 112
5.3.1 Simulazioni con un pozzo *scavenger*. 115
5.3.2 Applicazioni e Risultati: il caso dell'isola di Nauru. . . 126

Conclusioni **134**

Bibliografia **137**

Sitografia **141**

Elenco delle figure

1.1 Rappresentazione grafica del cuneo salino in un acquifero costiero 14
1.2 Posizione dell'interfaccia tra i carichi di acqua dolce (h_f) sopra il livello del mare e del livello del mare (h_s) secondo la teoria di Ghyben e Herzberg. 16
1.3 Schema che rappresenta levoluzione del fenomeno di *upconing* dovuto allintroduzione di un pozzo destrazione in prossimità della costa. 17
1.4 Tipica lente dacqua dolce di piccole isole che mostra il fenomeno di risalita dellinterfaccia acqua dolce/acqua salata estraendo da pozzi lungo la costa 18
1.5 Posizione di Nauru nel Pacifico 20
1.6 Mappa di Nauru 21
1.7 Dati di piovosità (mm) ogni anno nel periodo 1946 2008, Nauru Government data 22
1.8 Spessore delle lenti di acqua dolce e posizionamento delle sezioni e dei pozzi analizzati da Jacobson e Hill nel 1987 25
1.9 Ripartizione delle diverse risorse dacqua potabile a Nauru . . . 27

2.1 Procedura di partecipazione integrata e partecipata 36
2.2 Spazio delle alternative e spazio degli obiettivi nell'ipotesi in cui sia possibile conoscere J data la conoscenza di U 44
2.3 Insieme delle soluzioni ammissibili U, corrispondente mappa J nello spazio degli obiettivi e frontiera di Pareto 44
2.4 Analisi *What-if* come design delle alternative 45
2.5 Lo spazio delle decisioni e lo spazio degli obiettivi nell'analisi *What - if* J data la conoscenza di U 53

4.1 Due piezometri, uno riempito con acqua dolce e l'altro con acqua dall'acquifero salino, filtrati nello stesso punto nell'acquifero 72
4.2 Grafo generalizzato del processo del codice SEAWAT 77

4.3 Mappa con posizionamento delle sezioni simulate e i pozzi di osservazione (O: pozzi di osservazione, T: pozzi per prove di pompaggio, E: pozzi per monitoraggio dell'inquinamento, S: pozzi per il monitoraggio della salinità, D: pozzi richiesti da NRC per rifornimento di acqua salmastra). 79
4.4 Sezione trasversale A-A' rappresentante la distribuzione di concentrazione [kg/m3]. In nero sono rappresentate le isoaline, ovvero le linee a uguale concentrazione. 81
4.5 Posizionamento dei punti di monitoraggio lungo la sezione AA'. 81
4.6 Delimitazione dell'area del modello. 84
4.7 Posizione dei pozzi di estrazione (O) e monitoraggio (S) nell'area di interesse, nei pressi del villaggio di Ronave. 85
4.8 Dati di precipitazione mensile da Maggio 2009 ad Aprile 2010, confrontati con i valori medi mensili di pioggia. 87
4.9 Carta delle misure di salinità relative ai *target* del dominio del modello effettuate ad Aprile 2010 [kg/m3]. 88
4.10 Precipitazioni mensili nell'anno precedente la campagna di misura di Novembre 2009 e confronto con precipitazioni medie per ogni mese. 89
4.11 Carta delle misure di salinità effettuate a Novembre 2009 [kg/m3] nei *target* di dominio del modello. 90
4.12 Confronto tra valori misurati e simulati in S1 con parametri calibrati. 92
4.13 Confronto tra i dati di precipitazione mensili, registrati tra Dicembre 2009 e Novembre 2010, e precipitazioni medie mensili. 94
4.14 Carta delle misure di salinità relative al dominio del modello effettuate a Novembre 2010 [kg/m3]. 95

5.1 Schema di funzionamento di un pozzo *scavenger* (estrae acqua salata) e un pozzo d'approvvigionamento (estrae acqua dolce). 113
5.2 Discretizzazione orizzontale della griglia più fine, usata per il lavoro di ottimizzazione sui pozzi *scavenger*. 114
5.3 Precipitazioni registrate mensilmente a Nauru dal gennaio 1972 al dicembre 2010. In verde la media mobile per un periodo di 6 mesi (Nauru data government). 115
5.4 Andamento della concentrazione nel punto di estrazione S1 nel periodo di simulazione, in assenza di estrazione. 116
5.5 Andamento della concentrazione estratta in S1 con portata pari a 1 l/s, in assenza di pozzi *scavenger*. 117
5.6 Visualizzazione in pianta della configurazione con pozzo *scavenger* (seguendo la linea di flusso) dal pozzo S1. 118

5.7 Ingrandimento della sezione trasversale CC' con distribuzione della concentrazione dopo la simulazione di calibrazione (prima fase: Aprile 2010). In linea rossa è posta l'isoalina di 1,5 kg/m3. I filtri del pozzo *scavenger* sono posti al di sotto di tale isoalina. 119
5.8 Sezione trasversale (ingrandimento nell'intorno di S1 della sezione DD') raffigurante la posizione dei filtri del pozzo *scavenger* sulla medesima verticale. 120
5.9 Confronto grafico tra l'andamento di concentrazione estratta in S1 nelle diverse configurazioni di profondità dei filtri del pozzo *scavenger*. 120
5.10 Confronto tra gli scenari di simulazione con variazione della portata estratta dal pozzo *scavenger*. 121
5.11 Andamento di concentrazione estratta in S1 al variare della distanza in piano del pozzo *scavenger* da S1. 122
5.12 Confronto tra gli andamenti di concentrazione estratta in S1 in assenza del pozzo *scavenger* e con la sua configurazione: portata 8 l/s, profondità filtri 7° e 8° *layer*, distanza 0 m da S1. 123
5.13 Confronto tra gli andamenti di concentrazione estratta in S1 variando la portata estratta dallo stesso in assenza di pozzo *scavenger*. 124
5.14 Confronto tra gli andamenti di concentrazione estratta in S1 con portata estratta di 0,5 l/s, in assenza di *scavenger* e con presenza dello stesso (portata 8 l/s, stessa posizione di S1 in piano e profondità dei filtri nel 7° e 8° *layer*). 125
5.15 Frontiera di Pareto 131

Elenco delle tabelle

1.1 Popolazione di Nauru (2002 2010), da SOPAC, 2010 19
1.2 Situazione riassuntiva dell'uso dell'acqua di falda estratta da pozzi attivi nel 2010 a Nauru 29
1.3 Stime dell'uso dell'acqua a Nauru (2010) 29

4.1 Parametri idrogeologici dell'acquifero adottati da Ghassemi et al.(1996) nel lavoro di modellazione su Nauru. 80
4.2 Parametri idrogeologici calibrati e testati nella seconda fase di calibrazione (calibrazione rispetto ai dati della campagna di misura di Novembre 2009) 93

5.1 Alternative efficienti 131
5.2 Matrice degli effetti 131

Introduzione

Il lavoro di tesi sviluppato si pone come parte di un progetto finanziato dal Comune di Milano nell'ambito di Expo 2015 e affidato al gruppo di Geologia Applicata della sezione Infrastrutture Viarie (DIIAR) del Politecnico di Milano. Scopo del progetto è migliorare l'approvvigionamento idrico dell'isola di Nauru, nel Sud dell'Oceano Pacifico, per consentirne lo sfruttamento sostenibile delle acque sotterranee e fornire le direttive generali per un loro corretto utilizzo, anche in termini di gestione del fenomeno di intrusione salina.

In un lavoro di tesi precedente è stato identificato un modello idrogeologico concettuale dell'isola.

Scopo di questa tesi è la realizzazione di uno strumento che aiuti il Governo di Nauru nella valutazione dell'efficacia del sistema proposto per la protezione dell'acquifero costiero dalla problematica dell'intrusione salina, i pozzi*scavenger*. Per questo è stato impostato un sistema di supporto alle decisioni ripercorrendo alcune fasi della procedura di partecipazione integrata (PIP): in particolare sono state definite le azioni di intervento e sono stati formulati gli indicatori di valutazione, sulla base di criteri concordati con un esperto di settore. Il design delle alternative è stato realizzato avvalendosi dell'analisi *What- if*.

Nel Capitolo 1 viene illustrato il fenomeno di intrusione salina, la condizione per la quale in un acquifero costiero si ha l'avanzamento dell'acqua di mare. Questa problematica diventa importante nelle zone in cui la risorsa idrica è scarsa, come nella maggior parte delle piccole isole dell'Oceano Pacifico delle quali fa parte l'isola di Nauru.

Nel Capitolo 2 vengono illustrati i passi del processo decisionale e la procedura (PIP) che struttura il problema decisionale per scegliere l'alternativa di miglior compromesso. Si fornisce inoltre la descrizione dell'analisi *What*

if, usata per la ricerca delle alternative efficienti.

Nel Capitolo 3 sono trattate le azioni, i criteri e gli indicatori in base ai quali si è valutata l'efficacia del sistema di pozzi *scavenger*.

Successivamente nel Capitolo 4 è stato presentato del modello idrogeologico di una specifica area dell'isola (zona a nord nei pressi del villaggio di Ronave) dove lo spessore della lente d'acqua dolce sotterranea è maggiore, anche in periodi relativamente siccitosi.

Nel Capitolo 5 vengono presentati i risultati ottenuti. E' stato impostato un sistema di supporto alle decisioni per la valutazione delle alternative di intervento: con la tecnica di analisi *What - if* tra le alternative simulate vengono isolate quelle dominanti in senso paretiano rispetto agli indicatori formulati. In questo modo viene verificata l'applicabilità e l'efficacia dei pozzi *scavenger* per comprendere quali siano le prestazioni che questa tecnologia può fornire in termini di salvaguardia dell'acquifero e se si tratti in effetti della soluzione migliore relativamente alla problematica di Nauru.

Capitolo 1

Problematiche

La maggior parte delle piccole isole dell'Oceano Pacifico (PICs, *Pacific Islands Countries*) è afflitta da problematiche riguardanti la scarsità della risorsa idrica, la bassa qualità dell'acqua potabile e l'approvvigionamento difficoltoso a cui vanno aggiunti limiti strutturali, finanziari e istituzionali che contribuiscono all'incapacità di fornire acqua potabile nella maggior parte dei PICs. A questa già cruciale situazione si somma il fenomeno dell'intrusione salina nelle aree in prossimità del mare dove risiedono lenti di acqua dolce potenzialmente sfruttabili. L'intrusione salina è la condizione per la quale in un acquifero costiero si ha l'avanzamento dell'acqua salata dal mare verso l'entroterra. L'acqua marina, a causa della presenza di sali, è più densa di quella dolce perciò solitamente fluisce sotto l'acqua dolce, formando quello che viene chiamato cuneo salino, mentre l'acqua dolce scorre al di sopra dell'acqua salata muovendosi verso il mare.

1.1 I PICs

Le piccole isole sono particolarmente sensibili a qualsiasi questione concernente l'acqua dal momento che solitamente presentano scarsità di acqua dolce superficiale e quella sotterranea si configura come una lente che galleggia sopra l'acqua salata occupante la parte profonda dell'acquifero. Quindi è comprensibile che il problema dell'intrusione salina rappresenti una questione molto pressante e di grande interesse.

È riconosciuto che l'accessibilità ad adeguati rifornimenti di acqua potabile e fondamentale per la salute e il benessere degli uomini. Un'analisi generale rivela come gli Stati della regione dell'Oceano Pacifico, e soprattutto i PICs, si ritrovano sistematicamente a dover affrontare disagi di notevole portata derivanti dalla mancanza di acqua potabile. Per sopperire all'incapacità di

fornire acqua a scopi potabili nella maggior parte dei PICs si è avvertita la necessità di costituire una rete di collaborazioni, come quella con il SOPAC (*South Pacific Applied Geoscience Commission*), coscienti che il problema di approvvigionamento idrico non può essere affrontato dai singoli paesi.

I PICs sono isole di piccole dimensioni sparse in tutto l'Oceano Pacifico con presenza di popolazione relativamente esigua. La morfologia varia da isole vulcaniche di grandi dimensioni, a piccole isole basse, fino a gruppi sparsi di atolli corallini [Falkland, 2002]. A causa della variazione delle condizioni spaziali, topografiche e climatiche, la distribuzione delle risorse di acqua dolce varia a seconda delle nazioni e tra le diverse isole all'interno di uno stesso stato. Nei PICs si trovano acque superficiali, sotterranee e di origine piovana presenti in natura o come fonti non convenzionali di acqua dolce potabile, più precisamente si tratta di acque sottoposte a processo di desalinizzazione,di importazione o di riutilizzo delle acque reflue, dopo appositi trattamenti. Altre fonti includono l'uso di acqua di mare e salmastra utilizzata per sciacquoni o per raffreddamento di impianti, comunque non a scopo potabile. Il mantenimento della qualità delle fonti idriche è fondamentale per la salute della popolazione poiché le scorte d'acqua, sia nelle zone rurali che in alcune zone urbane della regione del Pacifico, non vengono di norma trattate: perciò oltre ad essere quantitativamente carenti, le sorgenti di acqua potabile sono estremamente vulnerabili alla contaminazione, provocata ad esempio da inadeguati impianti igienico-sanitari, dallo scarico di reflui in mare e dalla penetrazione di altri inquinanti in acquifero. Questo rischia seriamente di provocare l'insorgenza di gravi malattie che hanno l'acqua come vettore di diffusione quali colera, tifo e gastroenterite.

In generale la popolazione rurale è predominante nella maggior parte dei paesi insulari del Pacifico, ma in tutta la regione si assiste a un fenomeno che rappresenta una grande sfida per soddisfare la crescente domanda di approvvigionamento idrico: una rapida urbanizzazione e l'aumento della popolazione con la conseguente espansione della domanda di acqua nella maggior parte dei Paesi che prova duramente le risorse idriche a dispetto dello stato del rifornimento idrico, che non migliora né quantitativamente né qualitativamente. A proposito dello stato della qualità dell'acqua potabile nei PICs il Country Health Profile del 2005 [WHO, 2005]. segnala negli ultimi anni un aumento dell'incidenza di malattie causate dalla scarsa qualità dell'acqua potabile. Le fonti dei contaminanti differiscono nei singoli Paesi ma la maggior parte dei PICs ha indicato che i problemi principali di contaminazione derivano da strutture igienico-sanitarie improprie e da un inadeguato smaltimento di percolato dai rifiuti urbani. Ne deriva che la protezione delle fonti di acqua sotterranea e di acqua piovana è in cima alle preoccupazioni riguardo la qualità delle acque. Ad esempio una percentuale elevata delle

comunità rurali dipende dall'estrazione di acque sotterranee da pozzi scavati a mano che mancano totalmente di protezioni adeguate.

In aggiunta alle cause di origine antropica e alla predisposizione naturale delle isole, le lenti d'acqua dolce negli atolli corallini come Nauru sono vulnerabili all'intrusione di acqua salata o per il sovra -sfruttamento delle risorse idriche o per la tracimazione di acqua di mare, dovuta al moto delle maree. In alcuni dei Paesi che basano le loro scorte idriche sull'acqua piovana, nelle zone rurali e remote non esistono strutture adeguate allo stoccaggio e alla raccolta e anche nei casi in cui siano state costruite strutture funzionanti, non sono sottoposte a corretta manutenzione e gestione, e questo le mette a rischio di contaminazione. Un elevato livello di contaminazione dell'acqua si riscontra per le medesimi ragioni nei pozzi domestici usati dalle famiglie a causa di bassa consapevolezza per il problema idrico. L'assenza di strutture adeguate alla gestione della risorsa idrica o della manutenzione delle stesse è dovuta al fatto che i PICs non dispongono di attrezzature tecnologiche tali da garantire sicuro l'approvvigionamento di acqua potabile, come sistemi di controllo, monitoraggio e gestione di dati di qualità dell'acqua o strutture per il trattamento delle acque e la loro disinfezione nel caso di comunità urbane e rurali e tecnologie alternative, come semplici sistemi di trattamento delle acque reflue per le isole più esterne e le zone remote.

In sintesi, l'analisi della situazione dello stato di qualità dell'acqua potabile nei PICs mette in evidenza una serie di aspetti prioritari quali la necessità di una maggiore tutela delle fonti idriche, l'adozione di approcci corretti di gestione dei rischi e il miglioramento della consapevolezza della popolazione sulla stretta relazione tra qualità dell'acqua e salute. Come interventi da realizzare in un secondo tempo i governi dei PICs necessitano di rafforzare i quadri normativi per la legislazione sulla gestione delle risorse idriche e di sviluppare metodi di finanziamento, tecnologie e capitale umano per il controllo ed il trattamento di acqua potabile [Mirti e Davies, 2005].

1.2 L'Intrusione salina.

Il fenomeno dell'intrusione salina consiste nella penetrazione di acqua salata in un acquifero costiero. Di norma l'acqua di mare fluisce al di sotto dell'acqua dolce, formando quello che viene chiamato cuneo salino, mentre l'acqua dolce scorre al di sopra dell'acqua salata in movimento verso il mare, movimento favorito dalla differenza di densità. Infatti l'acqua marina ha una densità maggiore di quella dolce a causa della presenza dei sali : 1023,8 kg/m3 è la densità dell'Oceano Pacifico [acquaportal.it] contro 1000 kg/m3 dell'acqua dolce. Comunque l'acqua dolce e quella salata sono due fluidi

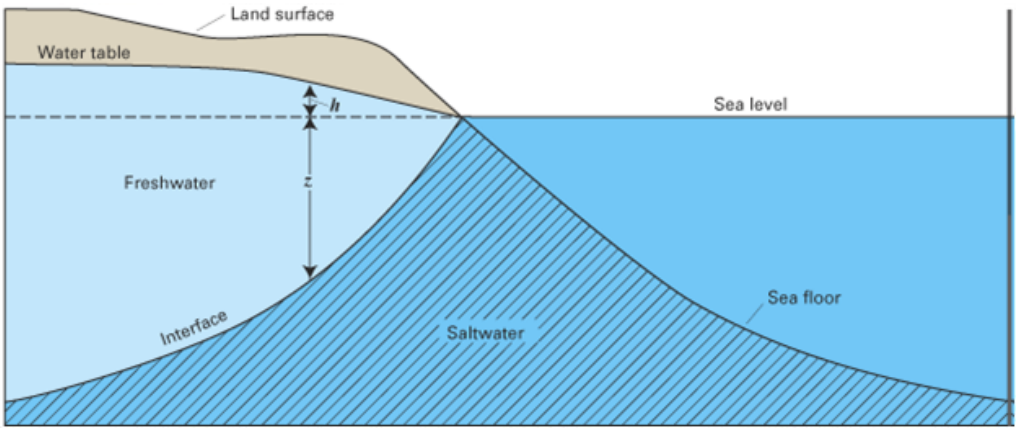

Figura 1.1: Rappresentazione grafica del cuneo salino in un acquifero costiero

miscibili, quindi non esiste una netta linea di separazione, chiamata anche interfaccia, ma il passaggio, che avviene per diffusione, da acqua dolce ad acqua salata attraverso una regione di mescolamento, detta zona di transizione, nella quale approssimativamente si raggiunge l'equilibrio tra le pressioni dei due fluidi. È all'interno della zona di transizione che l'acqua si muove sia a causa della differenza di densità sia seguendo l'andamento del livello piezometrico dei due fluidi. La distribuzione di acqua dolce, salmastra e salata in un acquifero costiero è il risultato di processi naturali molto complessi con grandi variazioni che hanno avuto corso in migliaia di anni: ciò è dovuto sia a cause naturali, come cambiamenti climatici e movimenti tettonici, sia, recentemente, all'intervento umano. Può trattarsi dell'estrazione non controllata di acqua di falda tramite pompaggio o della bonifica degli acquiferi, che può avvenire sia attraverso l'abbassamento del livello di falda (condizione sfavorevole alla redistribuzione dell'acqua dolce e salata) sia attraverso l'immissione di acqua dolce (condizione favorevole alla redistribuzione). Il tempo necessario al raggiungimento di un nuovo stato di equilibrio nella distribuzione di acqua dolce e salata è considerevole perciò è molto difficile comprendere la causa che ha provocato l'intrusione salina: influenzano la durata le dimensioni dell'acquifero, la consistenza dell'abbassamento di falda rispetto al livello originale della tavola d'acqua e il moto periodico delle maree, infatti in una situazione di alta marea la spinta del mare verso l'entroterra aumenta e di conseguenza l'intrusione salina ha un impatto maggiore.

A livello di studi si parla di teoria dell'intrusione salina, oggetto di studio da molti anni: i primi scopritori di una formulazione valida furono Ghyben e Herzberg, i quali trovarono una relazione matematica che descrive la forma e la posizione dell'interfaccia di separazione che si crea tra acqua dolce e

acqua salata quando queste sono messe in contatto. Il punto di partenza furono ipotesi semplificative: il flusso di acqua dolce in uscita dalla costa è considerato perfettamente orizzontale, l'acqua salata è in condizione di stazionarietà e la zona di transizione ha spessore nullo (è presente la sola linea d'interfaccia teorica).

Considerando quindi che in un generico punto dell'interfaccia la pressione dell'acqua salata equivale alla pressione di acqua dolce si ha:

$$h_s = \frac{\gamma_d}{\gamma_s - \gamma_d} h_d \tag{1.1}$$

- h_s è la quota del livello del mare [m];
- h_d è la quota sopra il livello del mare dell'acqua dolce [m];
- γ_s, γ_d sono il peso specifico rispettivamente dell'acqua salata (1025 kg/m3) e dell'acqua dolce (1000 kg/m3);

L'assunzione in base alla quale la zona di transizione avrebbe spessore nullo è un'approssimazione distante dalla realtà ma viene comunque accettata perché a favore di sicurezza, in quanto l'interfaccia reale risulta più profonda di quanto sarebbe quella calcolata con tale l'ipotesi. Si aggiunga come ulteriore correzione che l'acqua salata si muove verso l'entroterra poiché nell'acquifero si trova a un livello piezometrico inferiore rispetto a quello che ha in mare aperto.

In situazioni analoghe lo sfruttamento della risorsa idrica può provocare il fenomeno di *upconing*. L'*upconing* avviene in una situazione di estrazione di acqua di falda tramite un pozzo di pompaggio in un acquifero costiero, dove l'interfaccia acqua dolce/acqua salata è meno profonda. L'*upconing* consiste nell'innalzamento del livello dell'interfaccia al di sotto del pozzo di estrazione, causato dall'abbassamento del carico idraulico dell'acqua dolce estratta: ciò conduce al rischio che il pozzo nel lungo periodo possa estrarre acqua salmastra o salata.

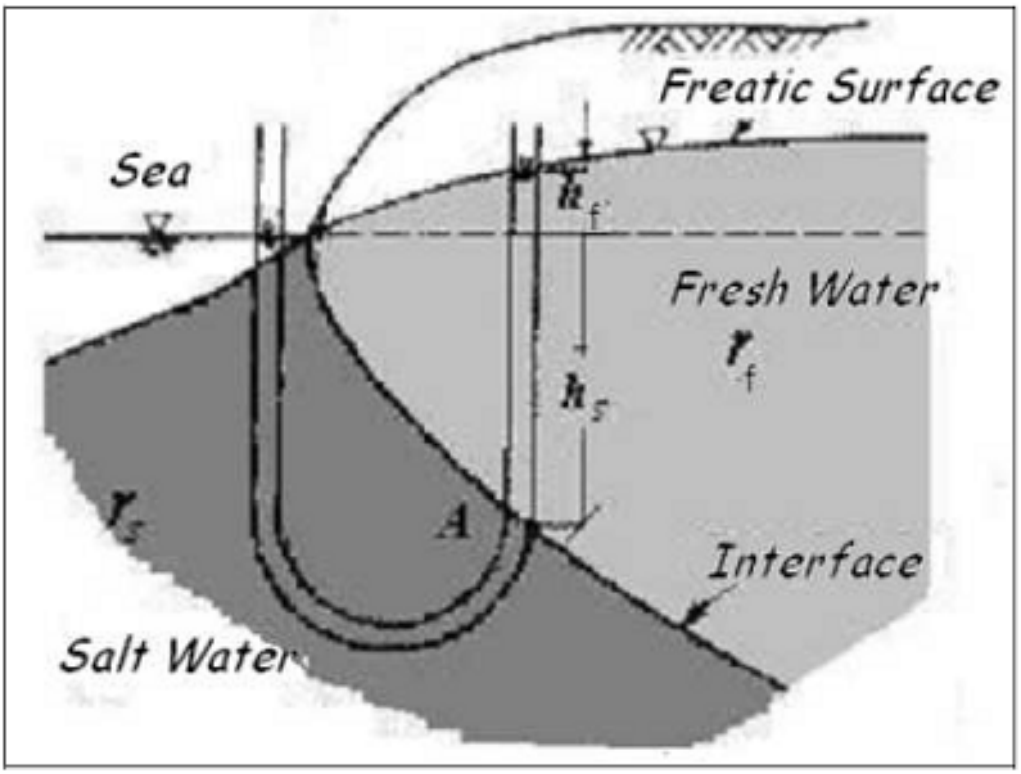

Figura 1.2: Posizione dell'interfaccia tra i carichi di acqua dolce (h_f) sopra il livello del mare e del livello del mare (h_s) secondo la teoria di Ghyben e Herzberg.

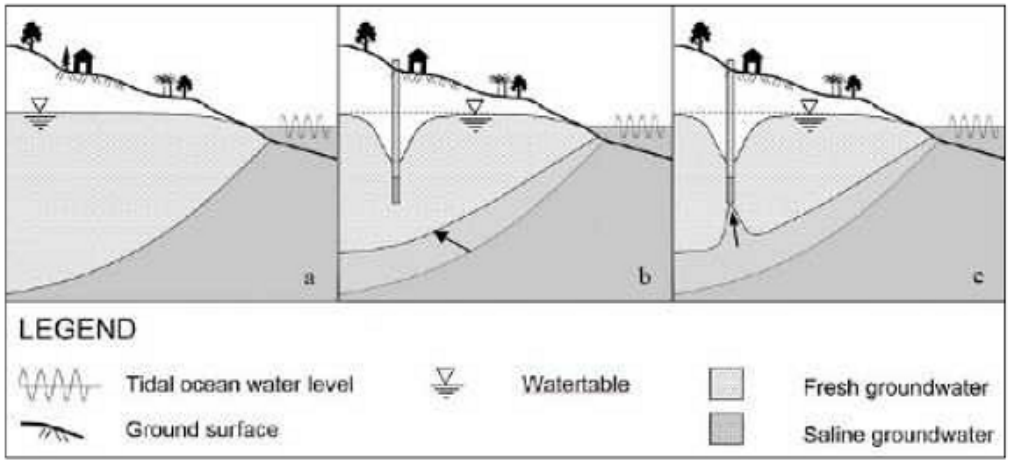

Figura 1.3: Schema che rappresenta levoluzione del fenomeno di *upconing* dovuto allintroduzione di un pozzo destrazione in prossimità della costa.

In genere ciò che provoca l'intrusione salina negli acquiferi costieri è lo sfruttamento mal gestito della risorsa idrica, sia per la portata, spesso eccessiva, di acqua dolce estratta sia per il posizionamento dei pozzi. Una volta che si è verificato il fenomeno del'*upconing* occorre ricalcolare la posizione dell'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata. Per ottenere una stima del riposizionamento dell'interfaccia una delle possibili opzioni adottabili è l'equazione di Bear (1972), utilizzabile nel caso di fluidi miscibili in cui la zona di transizione può essere considerata come una sottile interfaccia, se di dimensioni relativamente piccole rispetto allo spessore dell'acquifero.

1.2.1 Soluzioni proposte: i pozzi *scavenger*

Di norma, la soluzione più rapida per evitare l'avanzamento del cono di intrusione salina e il generarsi dell'*upconing* è la riduzione dei tassi di estrazione. In alcuni casi si aumenta la portata di ricarica idrica naturale con la realizzazione di dighe di controllo per le acque superficiali. Al di là delle soluzioni immediate la questione più gravosa è la difficile depurazione dell'acquifero, una volta che si sia verificato l'avanzamento del cono di acqua salata. Soluzioni tecniche per cercare di prevenire tale situazione sono la realizzazione di pozzi *scavenger*, detti anche pozzi spazzini, considerati in questo lavoro, o di dreni orizzontali i quali evitano l'estrazione puntuale della risorsa di falda a favore di una distribuita superficialmente [Alberti et al., 2008].

Questo tipo di pozzi per l'estrazione di acqua viene usato per prevenire la risalita dell'acqua salata dall'interfaccia, e anche per prevenire l'intrusione

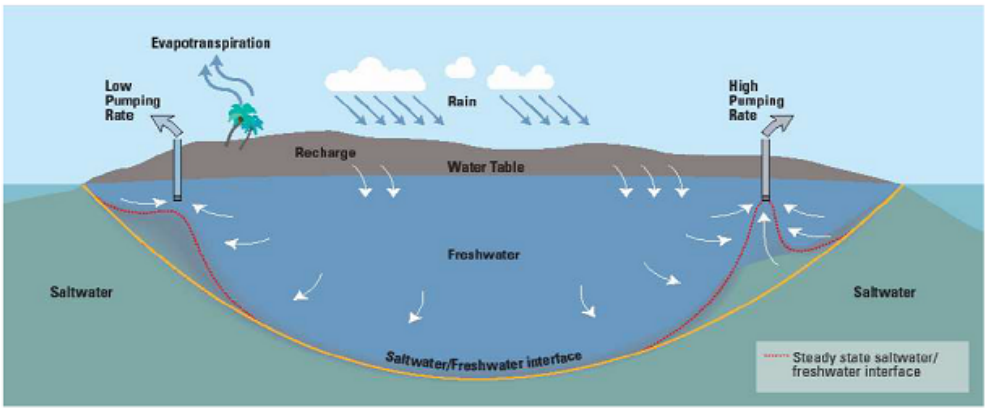

Figura 1.4: Tipica lente dacqua dolce di piccole isole che mostra il fenomeno di risalita dellinterfaccia acqua dolce/acqua salata estraendo da pozzi lungo la costa

di acqua di mare negli acquiferi costieri.

Negli ultimi anni i pozzi *scavenger* sono usati a difesa dei pozzi per l'estrazione dell'acqua dolce con lo scopo di incrementare il prelievo di acqua dolce dagli acquiferi costieri senza aumentare l'intrusione di acqua salina e per ridurre la risalita di acqua di mare. Un sistema di pozzi *scavenger* consiste nell'estrazione contemporanea di acqua dolce e di acqua salata/salmastra dall'acquifero: l'estrazione di quest'ultima avviene da una quota più bassa dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata tramite un pozzo che può essere filtrato sia nella zona di transizione sia nella stessa zona di acqua salata, ma sempre in prossimità del punto di estrazione d'acqua dolce. Il principio di funzionamento è il seguente: l'estrazione dal pozzo filtrato nella zona salata dell'acquifero ha la funzione di equilibrare l'effetto di risalita dell'interfaccia acqua dolce - salata (fenomeno di *upconing*) causato dal pompaggio dal pozzo che agisce nell'area di acqua dolce dell'acquifero . La posizione dell'interfaccia viene controllata attraverso il tasso di estrazione dell'acqua da ognuno dei due pozzi. Altri parametri molto importanti e che influenzano il processo sono: il rapporto tra tasso di ricarica della falda e l'estrazione di acqua dolce, la distanza tra il pozzo di estrazione dell'acqua dolce e l'iniziale posizione dell'interfaccia, la permeabilità verticale dell'acquifero. In base alle conoscenze acquisite, è opportuno monitorare con frequenza la posizione della zona di transizione per mantenere il tasso di estrazione nei pozzi e per assicurare il raggiungimento degli obiettivi per cui il pozzo *scavenger* è usato. Occorre prestare attenzione a non eccedere nel tasso di estrazione di acqua salata, poiché può provocare una perdita di acqua dolce che verrebbe estratta dal

Year	Population	Source
2002	10.065	2002 census (NBS 2009)
2006	9.086	2006 mini census Nauru Boreau of Statistics Fact sheet (NSO 2006)
2009	9.771	Pacific Regoinal Information System (PRISM 2010)
2010	9.976	Pacific Regoinal Information System (PRISM 2010)

Tabella 1.1: Popolazione di Nauru (2002 2010), da SOPAC, 2010

pozzo per l'acqua salata. Alcuni studi riportano esempi di tassi di estrazione, ma tutti ricavati empiricamente caso per caso. Uno dei problemi riguardanti questa metodologia risiede nell'utilizzo dell'acqua salata estratta dal pozzo *scavenger*: l'impiego più frequente è in impianti di desalinizzazione o per usi domestici.

1.3 L'isola di Nauru

L'isola di Nauru è un atollo corallino il cui regime di precipitazione è fortemente influenzato dai fenomeni di La Nina ed El Nino, che alternano periodi siccitosi a periodi piovosi: queste variazioni nei fenomeni di pioggia, che rappresentano il più importante elemento di ricarica della falda acquifera, hanno significative ripercussioni sulla disponibilità della risorsa idrica sotterranea.

L'isola di Nauru , nel Sud Pacifico, è oggetto di studio di un progetto finanziato nell'ambito di EXPO 2015 e affidato al DIIAR, Politecnico di Milano, che mira al miglioramento dell'approvvigionamento idrico dell'isola attraverso lo sfruttamento sostenibile delle acque sotterranee e la messa a disposizione di una risorsa supplementare di acqua in caso di necessità. L'obiettivo è fornire a Nauru nuove infrastrutture per lo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee e le direttive generali per la gestione sostenibile delle stesse.

La Repubblica di Nauru è uno Stato facente parte del continente dell'Oceania: si tratta di un'isola collocata 41 km a Sud dell'Equatore, nell'Oceano Pacifico, a circa 2200 km verso est da Papua Nuova Guinea. Le sue coordinate sono 0° 32' S di latitudine e 166° 56' E di longitudine.

La popolazione dell'isola e di circa 10000 abitanti, secondo l'ultimo censimento del 2010, e la maggior parte vive a ridosso del litorale; la superficie totale dell'atollo e di circa 22 km2, e il punto più alto è 71 m sul livello del mare, presso il Command Ridge nel centro-est dell'isola.

L'isola è circondata da una fascia costiera di una larghezza compresa tra i 120 e i 300 m che confina con una scarpata di roccia calcarea carsificata alta fino a 30 metri sul livello del mare, formando il perimetro del pianoro interno

Figura 1.5: Posizione di Nauru nel Pacifico

Figura 1.6: Mappa di Nauru

dell'isola (conosciuto come Topside). Tale altopiano è composto da calcare dolomitico precedentemente coperto da grandi depositi di difosfato tricalcico ormai in gran parte minati, a causa dello sfruttamento dei giacimenti di fosfati, di cui l'isola era ricca, negli anni passati. La superficie del pianoro infatti, soggetta a lavori di scavo, si presenta come un campo di pinnacoli carsici.

La vegetazione presente sull'isola è molto ridotta, limitata a sole 60 specie autoctone di piante vascolari, mentre la maggior parte delle specie sono state importate. La bassa biodiversità è da attribuirsi alle attività minerarie per l'estrazione dei fosfati effettuate in passato: infatti è stato stimato che il 63% della vegetazione che ricopre l'isola e stata rigenerata dopo il termine degli scavi nelle miniere alla fine degli anni 90. L'isola è circondata da una barriera corallina di larghezza fino a 300 m, oltre la quale il fondale degrada fino a circa 4.000 m di profondità. A eccezione della laguna di Buada, situata nella parte sud-ovest dell'isola, non esistono risorse d'acqua superficiali, inoltre è presente un lago sotterraneo nella cava di Moqua, nel distretto di Yaren, nella parte sud-orientale di Nauru. L'unica significativa risorsa di acqua dolce è

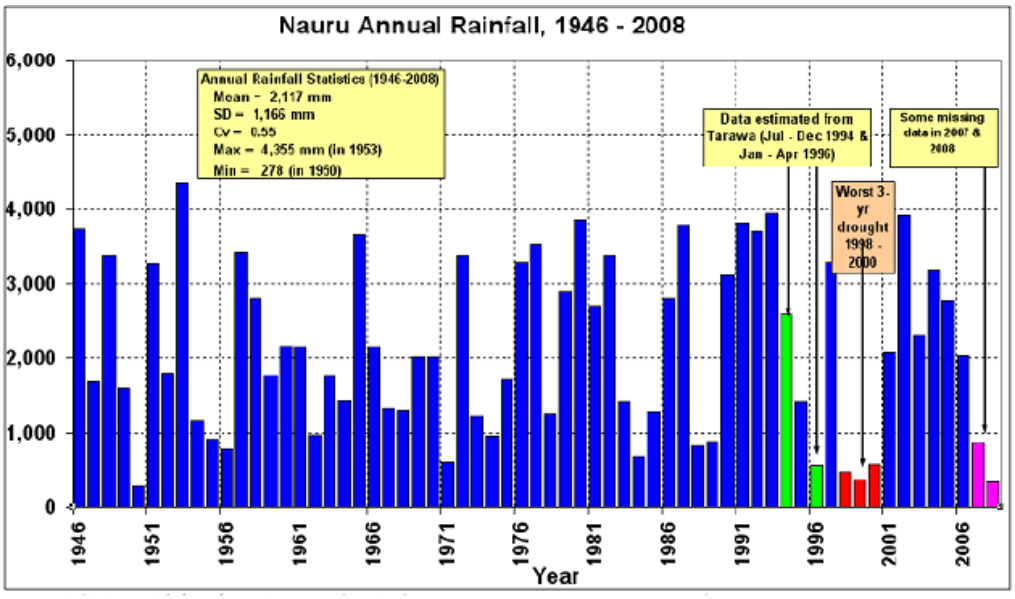

Figura 1.7: Dati di piovosità (mm) ogni anno nel periodo 1946 2008, Nauru Government data

una lente di acqua dolce-salmastra sotterranea di spessore medio e massimo pari rispettivamente a 4,7 m e circa 7 m. [Jacobson e Hill, 1988]. L'elevazione di tale lente sul livello del mare e il livello di salinità variano a seconda della geologia, della morfologia dell'isola, e in base alla quantità di acqua utilizzata e sopratutto è condizionata dalla variabilità delle precipitazioni piovose.

1.3.1 Clima e precipitazioni

Per tutto l'anno il clima è caldo e umido, con la temperatura media massima giornaliera uniforme per tutto l'anno pari a 29-31°C e la media minima di 24-26°C. I venti sono generalmente calmi, soffiando da Est tra Maggio e Novembre a velocità variabili tra i 2.6 e 5.1 m/s, mentre tra Dicembre e Aprile soffiano da Ovest tra 5.1 e 9.3 m/s. Nauru ha una moderata piovosità media annua,in particolare nei mesi tra Novembre e Marzo, ma sperimenta anche periodi di grave siccità associati a episodi di La Nina, in contrapposizione a quelli di El Nino, un fenomeno meteorologico periodico (con periodo di 4-5 anni) in cui si verifica un raffreddamento delle correnti nel Pacifico con conseguente aumento di piovosità nel Pacifico Occidentale. Utilizzando i dati di precipitazione mensile per il periodo 1946-2008, nel quale sono stati raccolti in maniera continuativa tali informazioni, la piovosità media annua e stata stimata pari a 2117 mm/y con un elevato grado di variabilità.

Si noti come il periodo tra il 1998 e il 2001 sia stato un periodo particolarmente secco, dovuto al verificarsi del fenomeno di La Nina.

1.3.2 Geologia e Idrogeologia

Da un punto di vista geologico Nauru si configura come un atollo corallino, la cui altitudine massima e di 71 m sopra il livello del mare e corrisponde al Command Ridge nella parte occidentale dell'isola. La topografia dell'atollo riporta tracce di terreno sopraelevato,oltre 50 m sul livello del mare, nel centro di Nauru, le quali possono segnare la linea di una precedente scogliera; l'altopiano interno sale bruscamente dal pianoro costiero attraverso una ripida scarpata. L'altopiano interno, conosciuto localmente come Topside, è costituito da una matrice di pinnacoli corallini calcarei affiorati, tra cui sono depositi di fosfato il cui sfruttamento ha rappresentato la principale fonte di ricchezza economica fino alle fine degli anni Novanta. L'altopiano interno copre una superficie approssimativamente pari a 16 km2, che comprende più del 70% della superficie dell'isola, e la maggior parte di tale area fu scavata per l'estrazione di fosfato per più di 80 anni. Infatti Nauru ospitava uno dei più grandi giacimenti di fosfati nel mondo e questo deposito è stato economicamente importante fin dal 1906, anno di inizio degli scavi. Le riserve originali erano probabilmente di circa 90 milioni di tonnellate, ma ormai tale risorsa è praticamente esaurita.

Una scarpata, conosciuta localmente come Bottomside, collega l'altopiano interno con il pianoro costiero. Il confine con l'entroterra di tale area è segnato da zone di depressione e lagune salmastre, come la Laguna di Anabar, nella parte nord-orientale dell'isola. L'isola è circondata da una barriera corallina che si estende radialmente dalla linea di costa fino a 300 m di larghezza.

Per quanto concerne il sottosuolo dell'isola alcune indagini effettuate da Jacobson e Hill nel 1987 rivelano che Nauru è alla base di una montagna vulcanica sottomarina che sorge a 4300 m di profondità dalla superficie oceanica. La roccia calcarea è fortemente carsificata fino a una profondità di almeno 55 m sotto il livello del mare, con cavità piene di sedimenti fosfatici che suggeriscono che Nauru e stata sommersa per gran parte della sua storia geologica recente.

Le principali indagini sulle acque sotterranee sono state effettuate nel 1987 da Jacobson e Hill e da Falkland nel 2008. Dei pozzi di monitoraggio sono stati perforati in ogni indagine per valutare il carico idraulico e la conducibilità elettrica delle acque sotterranee dell'isola al fine di determinare se fosse possibile sfruttare risorse d'acqua dolce supplementari, rispetto a quelle di origine piovana o da desalinizzazione. A seguito delle indagini che fanno riferimento all'anno 1987 le quantità utilizzabili di acqua dolce sono

state stimate fino a 7 metri di spessore ma esse sono state svolte alla fine di un periodo piuttosto umido. Sempre nel corso di tale studio dalle misure di Jacobson e Hill furono identificate due lenti principali una nella parte centro-settentrionale di Nauru di area pari a circa 1,3 km2, l'altra di superficie 2,4 km2 nella parte centro-meridionale.

Per la precisione furono scavati 12 pozzi complessivamente ad una profondità variabile tra 26 e 83 m sotto la superficie e vennero eseguiti un totale di 10 sondaggi in 3 diversi ambienti idrogeologici:

1. Sull'altopiano interno di Nauru, tra 12 e 27 m s.l.m. di quota della superficie;

2. Adiacentemente alla Laguna di Buada, ad un'elevazione tra 2 e 3 m s.l.m.;

3. Sul terrazzo costiero, tra 3 e 4 m di elevazione s.l.m.

Al contrario, l'indagine del 2008 [Falkland, 2009] ha avuto luogo dopo un lungo periodo secco e indica risorse sotterranee di acqua dolce molto limitate.

I risultati dei due sondaggi riflettono la grande influenza che le precipitazioni hanno sulla disponibilità delle risorse di acqua dolce sotterranea, assieme alla permeabilità e la miscelazione dovuta al moto delle maree.

Si è concluso che data la limitatezza delle risorse sotterranee di acqua dolce di Nauru è improbabile che esse siano sufficienti per sopperire alle significative necessità della popolazione di avere a disposizione acqua potabile di buona qualità durante i lunghi periodi di siccità.

Al di là degli studi specifici, in generale si sa che nella maggior parte dell'isola il livello di falda si trova a circa 1,5 m di quota rispetto al datum di Nauru (circa 1,3 m di profondità sul livello del mare). Il bacino della laguna di Buada è un'eccezione, apparendo come un sistema idrologico differente: ha un carico idraulico di circa 2,4 m rispetto al datum e presenta al di sotto una lente locale, poggiante presumibilmente su una cava fosfatica impermeabile. Il flusso dell'acqua di falda è radiale dall'interno dell'isola verso il mare ed è provocato dalla differenza di carico idraulico tra il livello di falda all'interno dell'isola ed il livello medio del mare. Durante la bassa marea diverse sorgenti di acqua dolce hanno uno sbocco in corrispondenza della barriera corallina e numerose cave dell'entroterra a ridosso del pianoro costiero forniscono un'entrata per l'acqua di mare verso l'interno dell'isola. La più grande di queste è la cava di Moqua nel sud-ovest dell'atollo.

All'epoca dell'indagine di Jacobson e Hill lo spessore medio dello strato di acqua dolce misurava circa 4,7 m: il bordo inferiore era definito da un livello di salinità di 1.500 mg/l di solidi disciolti totali (TDS), equivalente ad

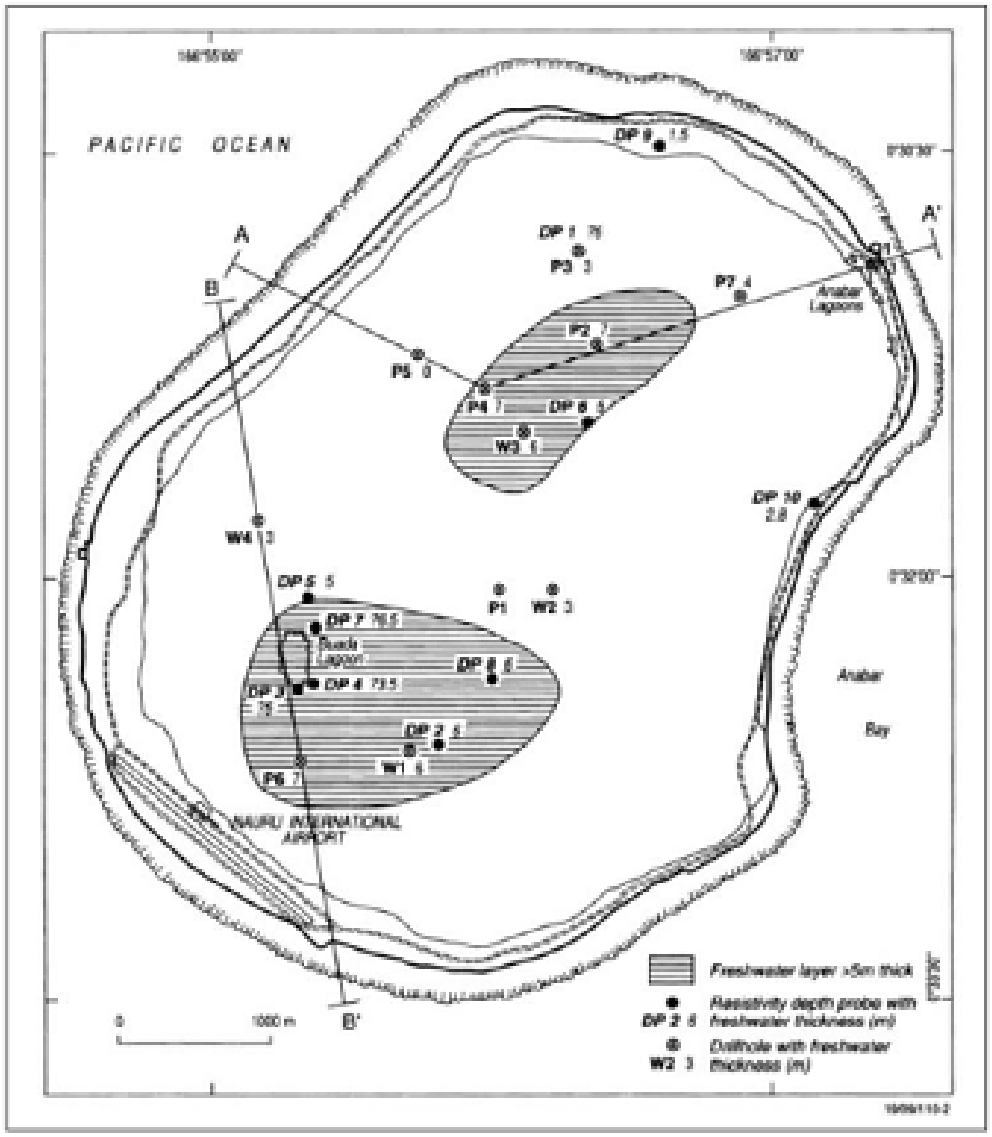

Figura 1.8: Spessore delle lenti di acqua dolce e posizionamento delle sezioni e dei pozzi analizzati da Jacobson e Hill nel 1987

una conducibilità elettrica (EC) di 2.200 S/cm, definito come limite superiore di salinità per l'acqua potabile dal WHO (*World Health Organization*). La salinità e un parametro che esprime il contenuto di sali di un corpo idrico. L'unità di misura ufficialmente adottata si basa sulla conducibilità elettrica EC (espressa in S/m), direttamente proporzionale alla salinità, e quindi rende conto di tutto l'insieme dei sali presenti in soluzione o in alternativa si adotta il TDS, parametro che esprime il contenuto di solidi totali disciolti (Total Dissolved Solid), in termini di sostanze organiche e inorganiche presenti in un corpo liquido. Il TDS è espresso di norma in forma di concentrazione massa su volume (mg/l o kg/m3). Si considera dolce un'acqua che ha un contenuto di solidi disciolti totali inferiore a 1500 mg/l.

La natura carsica del calcare dolomitizzato, come indicato da Jacobson e Hill (1988), ha portato ad un calcare molto permeabile nella fase del suo sviluppo: questo facilita il mescolamento dell'acqua dolce, infiltrata attraverso le cavità, con l'acqua salata sottostante. Contemporaneamente, le cavità carsiche aperte nella roccia consentono all'acqua di mare il movimento in tutta la sottostruttura dell'isola e attraverso i movimenti delle maree la lente d'acqua dolce si mescola per diffusione all'acqua di mare creando la spessa zona di transizione di acqua salmastra osservata. Durante l'indagine SOPAC del 2010, si è registrato che le lente d'acqua dolce superficiali attorno alla piana costiera hanno spessore molto variabile e che solo la metà dei pozzi circa, se lo scenario non fosse cambiato, avrebbe avuto accesso ad acqua con conducibilità elettrica al di sotto dei 1500 mg/l.

È importante sottolineare come l'unica forma di ricarica idrica per l'isola sia quella rappresentata dal regime delle precipitazioni, mentre l'evapotraspirazione è il secondo principale termine all'interno del bilancio idrico. L'evapotraspirazione potenziale (PE) e stata stimata da Jacobson e Hill (1988) per Nauru, sulla base della formula di Fleming (1987) ricavata empiricamente. Non esistendo alcun deflusso superficiale verso il mare e senza tenere conto di alcun rilascio idrico superficiale in falda e dell'evaporazione dalle lagune, il bilancio d'acqua approssimato per Nauru è stimato :

- R = AET + GWR

dove AET e l'evapotraspirazione attuale (minore del valore di PE per la presenza di vegetazione al suolo) e GWR è la ricarica superficiale in mm/mese. La stima di AET richiede informazioni su umidità del suolo e caratteristiche della vegetazione, ma, comunque, una stima per Nauru è stata eseguita da Jacobson e Hill (1988) basandosi su studi a proposito di atolli simili e vicini e in seguito Ghassemi et al. (1996) hanno calcolato il bilancio idrico medio annuale per Nauru e inoltre il Governo di Nauru, tramite il

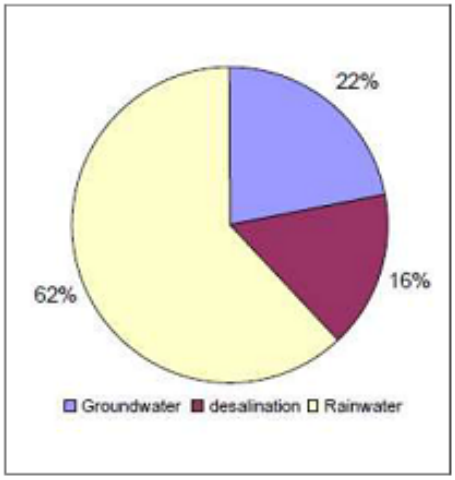

Figura 1.9: Ripartizione delle diverse risorse dacqua potabile a Nauru

suo report mensile delle precipitazioni, calcola la ricarica superficiale sull'isola utilizzando il programma di bilancio idrico WATBAL, ipotizzando una copertura vegetale del 20% sull'isola. Attraverso questo programma è stata quindi stimata la ricarica superficiale, eseguendo un bilancio tra precipitazione e evapotraspirazione mensile (valore corrispondente al relativo mese nell'anno); il valore di ricarica superficiale ottenuta in quel mese si ricava sottraendo tale valore di evapotraspirazione al valore misurato di precipitazione nel mese in studio. In caso di un valore di precipitazione minore di quello evapotraspirazione si ha ricarica nulla, il che equivale a dire che si e in presenza di una situazione di deficit idrico.

1.3.3 Risorse idriche disponibili

Le risorse di acqua dolce sull'isola sono ristrette all'acqua di origine piovana, d'importazione dall'Australia, agli acquiferi in falde non-confinate e poco profonde presenti soprattutto nel pianoro costiero, e all'acqua di mare sottoposta a processi di desalinizzazione in un impianto ad osmosi inversa.

È importante ricordare, indipendentemente dal tipo di fonte utilizzata, che il livello di vulnerabilità per quanto concerne le risorse idriche è molto alto poiché i rischi e le problematiche relativi da affrontare sono aggravati dalla limitatezze delle risorse come quelle presenti a Nauru, sia per quanto riguarda la quantità nel lungo periodo, sia per quanto riguarda la sua qualità (contaminazione, intrusione salina, ecc.).

L'acqua piovana è una risorsa che riveste grande importante nel contesto dell'isola grazie alla sua buona qualità che la rende adatta per uso domestico e per alcuni scopi industriali e la si recupera facilmente, tanto che quasi tutte le abitazioni sono dotate di sistemi di grondaie con serbatoio a fini di raccolta, anche se alla costruzione degli impianti di desalinizzazione, che resero disponibile acqua qualitativamente migliore, molti di questi sistemi vennero lasciati deteriorare. Inoltre furono realizzate, ed esistono tuttora, una serie di vasche e serbatoi, in acciaio e calcestruzzo, per la raccolta e il deposito di acqua piovana. Nonostante la facilità con la quale viene reperita non è possibile fare tranquillamente affidamento su questa risorsa poiché tra tutte le fonti di approvvigionamento possibili è quella qualitativamente migliore senza essere trattata ma anche la risorsa maggiormente dipendente dai fattori climatici.

Per molti anni, durante il periodo di estrazione di fosfati, Nauru dipendeva in massima parte dall'acqua importata che arrivava come carico di ritorno sulle navi che esportavano i fosfati. Durante gli anni tra il 2001 e il 2002, l'acqua importata da Kosrae, isola degli Stati Federati di Micronesia, integrava l'acqua piovana e l'acqua desalinizzata nella scorta d'acqua potabile. Questo ha inciso enormemente sul bilancio economico dell'isola poiché, come documenta il SOPAC, il costo unitario del carico d'acqua era 10 volte più grande del costo stimato di desalinizzazione, sistema di per sé tutt'altro che economico. Mancano dati disponibili sul consumo di acqua imbottigliata importata negli anni recenti, ma l'indagine sottolinea che una percentuale molto piccola di popolazione faccia affidamento su questa risorsa (0,2%).

L'acqua delle falde che si trovano nei pressi della costa, invece, è estratta da centinaia di pozzi domestici poco profondi: circa 350 pozzi sfruttano le acque sotterranee nella zona costiera, fornendo acqua fino a metà della popolazione, per scopi principalmente non potabili. Infatti quest'acqua è relegata a risorsa di seconda classe utilizzata per fognature, scopi domestici secondari e , comunque in percentuale trascurabile, come risorsa di riserva in periodi di siccità. L'acqua estratta è normalmente trattata tramite bollitura. Ma questo spesso non si dimostra sufficiente e non rende assolutamente potabile l'acqua. Infatti le falde dell'isola sono soggette a rischio inquinamento causato soprattutto dall'intrusione di acqua salata dovuta a sovra sfruttamento, specie nelle zone costiere, dalla contaminazione a cause di perdite dai sistemi di fognatura e acque reflue, dalla contaminazione da percolato di rifiuti e discariche e dovuta al trattamento dei fosfati estratti dalle miniere.

La risorsa di acqua di mare dissalata è prodotta dagli impianti di desalinizzazione ad osmosi inversa della *Nauru Utilities Authority (NUA)*, una società di proprietà del governo, ed è distribuita da camion cisterna. Durante i periodi di siccità, l'acqua desalinizzata diventa la prima risorsa disponibile

Volume minimo di acqua di falda estratta in l/d (scuole escluse, solo abitazioni)	215.144
Volume massimo di acqua di falda estratta in l/d (scuole incluse)	401.642
Volume medio di acqua di falda estratta in l/d (scuole escluse, solo abitazioni)	401.642
Volume medio di acqua di falda estratta da pozzi attivi in l/d (scuole escluse, solo abitazioni)	1.328
Volume medio di acqua di falda estratta pro-capite in l/d (scuole escluse, solo abitazioni)	94

Tabella 1.2: Situazione riassuntiva dell'uso dell'acqua di falda estratta da pozzi attivi nel 2010 a Nauru

	Minimo l/d/pro-capite	Massimo l/d/pro-capite	Medio l/d/pro-capite
Acqua di falda	68	121	94
Acqua potabile (desalinizzazione o acqua piovana)	20	20	20
Consumo totale di acqua	88	141	114

Tabella 1.3: Stime dell'uso dell'acqua a Nauru (2010)

e più affidabile di acqua potabile sull'isola, e, pertanto, i serbatoi di acqua piovana sono usati per immagazzinare l'acqua desalinizzata. Ad Aprile 2010, SOPAC registrava solo 2 impianti che operavano 5 giorni a settimana, in funzione della domanda. Una problematica molto sentita in proposito è data dalla carenza di combustibile e mancanza di energia infatti tutto il carburante di cui Nauru necessita deve essere importato. Come conseguenza delle limitate risorse economiche, Nauru soffre per la carenza di combustibile fossile e per le mancanze giornaliere di corrente. Questo comporta in particolare una riduzione del rendimento degli impianti di desalinizzazione che necessitano di considerevoli quantitativi di energia per il loro funzionamento.

A prescindere dalla disponibilità si stima il fabbisogno idrico dell'isola di Nauru sulla base dei dati dell'indagine SOPAC del 2010 e se ne deduce un fabbisogno d'acqua potabile pari a 20 l/d pro capite. Sempre in linea con questa indagine è stata quindi stimata una richiesta totale di acqua da 88 a 141 l/d/pro capite: il fabbisogno di acqua potabile e stimato in riferimento al consumo di acqua per bere (5 l/d/pro capite) e cucina (15 l/d/pro capite).

Molte famiglie fanno affidamento sulla raccolta di acqua piovana per una sostanziale porzione della loro riserva d'acqua dolce, ma i volumi dei serbatoi raramente sono sufficienti per resistere ad un lungo periodo di siccità. Si

valuta che la quantità d'acqua potabile necessaria per vivere in buona salute sia pari a 100 l/d pro capite, con un valore di 80 l/d/pro capite per la sopravvivenza. E' stato verificato che, sull'isola, in condizioni di precipitazioni medie, sia possibile raccogliere abbastanza acqua per vivere in salute. Tuttavia, anche se ci fosse solo un anno di siccità (stimato come anno con meno del 50% della pioggia media) su 10 anni, non ci sarebbe abbastanza acqua piovana immagazzinata da sostenere una vita salutare. Questo rischio è accentuato dal fenomeno del riscaldamento globale, che potrebbe aumentare la gravità e la frequenza dei periodi siccitosi, oltre ad altre gravi conseguenze come l'innalzamento del livello del mare che porterebbe la possibile sommersione della barriera corallina con conseguenti danni alle zone costiere in caso di tempeste marine e che accentuerebbe il fenomeno di intrusione salina. Ulteriori effetti includono i cambiamenti delle rotte delle correnti oceaniche, che possono causare modifiche nella frequenza dei periodi siccitosi e lo sbiancamento dei coralli provocato dall'innalzamento della temperatura, oltre ad una variazione alla biodiversità marina e alla quantità di risorsa ittica, fonte principale di sostentamento per la popolazione di Nauru.

Capitolo 2

Come affrontare il problema e valutare le alternative

Assumere decisioni, soprattutto in ambito pubblico, si configura come un problema complesso e di difficile risoluzione. Nella definizione di un progetto che deve consentire la risoluzione di un problema e prendere una decisione un elemento fondamentale è la scelta dell'alternativa, data da una combinazione integrata di azioni, che permette di raggiungere determinati obiettivi. È importante ricordarsi che non è opportuno escludere nessun intervento prima di averlo valutato, a meno che esso non precluda la realizzazione di altri tipi di intervento e che deve essere sempre possibile lasciare le cose come stanno (alternativa zero o di non intervento).

2.1 Il processo decisionale: soggettività e alternativa di miglior compromesso.

Una volta illustrato il sistema oggetto di studio, individuato il problema e definiti anche solo a grandi linee gli obiettivi del progetto vengono descritti i possibili interventi considerati risolutivi: questi opportunamente combinati prendono la forma di una delle possibili alternative per la risoluzione della situazione critica. Va definita una procedura per strutturare il processo decisionale che porti alla scelta dell'alternativa da realizzare. Tale procedura deve permettere di identificare le alternative, tutte quelle possibili, e valutare gli effetti che avrebbero sul sistema se implementate per permettere al Decisore di selezionare quella che più lo soddisfa. Gli elementi del problema caratterizzano e influenzano il processo decisionale, essi sono: la molteplicità dei soggetti coinvolti, la presenza di interessi conflittuali, la dinamica del sistema e la presenza di infinite alternative possibili.

Uno degli elementi principali è la presenza di più soggetti coinvolti nel problema tra decisori e portatori d'interesse, ognuno dei quali è portatore del proprio punto di vista e di esigenze specifiche. Alcuni dei portatori d'interesse sono attivamente coinvolti nel processo decisionale essendo in grado di influenzare la scelta politica. Sarebbe impossibile tenere conto direttamente di tutti i Portatori di Interesse per questo essi si avvalgono di rappresentanti e spesso della consulenza di esperti di settore, che li aiutino nell'interpretazione delle questioni più strettamente tecniche, inoltre, per meglio condurre la trattativa, tutti coloro che sono caratterizzati da un interesse o un gruppo di interessi omogenei vengono riuniti formando un settore. Decisori, Portatori di Interesse e esperti di settore devono interagire tra loro e con l'analista che coordina lo studio. I portatori quasi sempre hanno interessi divergenti e i conflitti da risolvere sono più di uno, questo complica la definizione della procedura decisionale e ne rappresenta il punto più delicato da affrontare. Una combinazione di più interventi forma un'alternativa e scegliere quella più efficiente, dal punto di vista del Decisore, vuol dire prendere decisioni alcune da assumere una volta per sempre mentre altre sono recursive, queste ultime impongono di tenere in considerazione che il sistema in esame ha una sua dinamica cioè evolve nel tempo. Nel definire la procedura una parte importante è dedicata all'individuazione di tutti i possibili interventi e della maniera opportuna di combinarli tra loro per definire le alternative: definire gli interventi significa anche quantificarli, altrimenti le alternative non sono univocamente individuate. La difficoltà di questa operazione risiede nel fatto che molto frequentemente i possibili interventi sono in numero infinito o comunque elevatissimo, anche se viene spontaneo considerare ragionevolmente solo un numero limitato di alternative sia per problemi di calcolo sia perché non tutti le proposte sono realizzabili o sensate: in ogni caso, per quanto finito, il numero di alternative praticabili è comunque altissimo e concorre ad aggiungere complessità al sistema.

Questi elementi sono i principali da affrontare per risolvere problemi decisionali in ambito pubblico, la cui soluzione richiede la scelta di un metodo per individuare, tra quelle generate, l'alternativa che più soddisfa il Decisore in base ai bisogni dei Portatori di Interesse. I possibili approcci alla soluzione sono fondamentalmente l'analisi costi-benefici, utilizzata fino a non molto tempo fa, e i metodi a molti criteri.

L'analisi costi-benefici prevede di eseguire un bilancio tra i vantaggi che porterebbe implementare un certo intervento e gli svantaggi, cioè i costi, che comporterebbe: questo è quantificabile se si monetizzano tutti gli elementi che caratterizzano il problema, compresi i benefici e i costi sociali. Il beneficio netto che risulta dalla differenza tra costi e benefici è fondato su un principio

di efficienza economica. L'applicazione dell'analisi costi-benefici comporta una serie di problemi dettati primariamente perché certi beni, quelli per cui non esiste un mercato, non sono di fatto monetizzabili e a questo va aggiunta la considerazione che, per sua natura, questo tipo di approccio guarda all'efficienza economica complessiva, senza valutare la distribuzione degli effetti delle alternative, o benefici, e non riconosce che soggetti diversi in genere hanno una diversa utilità marginale dal denaro poiché effetti economici di uguale valore monetario non sono equivalenti per soggetti diversi. Questa ottica perciò, non mettendo in condizione di poter contare gli aspetti soggettivi della procedura decisionale, non tiene conto dei conflitti a cui può portare selezionare un'alternativa al posto di un'altra. Il conflitto verrebbe quindi affrontato a decisione presa, rischiando di fermare lo svolgimento del progetto: ciò fa comprendere che le opposizioni vanno gestite a priori. Inoltre l'analisi costi-benefici propone come alternativa perseguibile unicamente quella che massimizza il beneficio netto economico, senza reale coinvolgimento dei decisori e dei Portatori di Interesse che possono solo accettare o rifiutare quello che viene loro proposto senza riconoscersi nel processo decisionale.

L'idea è quella di sviluppare una procedura che affianchi il Decisore e non si sostituisca ad esso , un metodo di supporto alle decisioni. Alla necessità di trovare un modo che sia di aiuto ai decisori in maniera efficace ma senza il carattere impositivo e monodimensionale dell'analisi costi-benefici si è risposto con un insieme di metodi, detti a molti attributi, il cui principio poggia sull'idea che gli effetti di un'alternativa non siano valutabili attraverso un unico criterio: occorrono molti criteri tali da riflettere la pluralità di interessi dei soggetti coinvolti per permettere l'analisi dei conflitti che possono insorgere. Questo sistema di gestione del processo decisionale non consente di concludere individuando l'alternativa ottima dal momento che ogni criterio ha un proprio ottimo. Si realizzano due possibili casi: la presenza di alternative dominanti e dominate, le prime sono migliori delle altre rispetto ad almeno un criterio e non peggiori rispetto a tutti gli altri e quindi sono scelte sempre rispetto alle seconde che invece vengono scartate non appena le si riconosce; una volta individuate tutte le alternative non dominate si ha a disposizione un certo numero di opzioni di risoluzione nessuna delle quali oggettivamente preferibile rispetto alle altre, ognuna infatti soddisfa al meglio il proprio criterio di riferimento e per ragioni di equità, a meno che non siano i Portatori di Interesse stessi a pronunciarsi, nessun criterio è da ritenersi più importante degli altri. La scelta tra alternative efficienti implica l'assunzione di un giudizio di valore relativo, ovvero di natura soggettiva. L'ordinamento delle alternative avviene in due tempi, sempre rispetto alle preferenze dei decisori: in prima analisi si individua l'insieme delle alternative efficienti, sulla frontiera di Pareto, in seguito ai decisori politici spetta il compito di ordinare

l'insieme ottenuto estrapolandone l'alternativa di miglior compromesso o più soddisfacente rispetto alle esigenze dei Portatori di Interesse reciprocamente in conflitto.

Il cambio di prospettiva rispetto ai metodi tradizionali risiede proprio nella molteplicità dei criteri di cui tenere conto alla pari senza dare precedenza a nessuno di essi: questo si traduce nel sostituire all'idea di alternativa ottima quella di alternativa di miglior compromesso. In aggiunta si risolve il problema della mancata monetizzazione dei beni per cui non c'è mercato poiché per ogni criterio si usano le unità di misura di volta in volta più adatte. La difficoltà che rimane riguarda il numero di decisori a cui rivolgersi in fase di giudizio finale, nel caso dei metodi a molti criteri si ammette la presenza di un singolo Decisore cosa che spesso, soprattutto per problematiche che coinvolgono Stati diversi, rappresenta una difficoltà di non semplice soluzione.

2.1.1 Pianificazione e gestione

Solitamente per i problemi complessi non esiste una unica tipologia di risoluzione, ma diversi tipi di decisione chiamati livelli: nell'ordine si tratta di pianificazione, di gestione e di controllo operativo. Nel passaggio dall'uno all'altro cambia l'oggetto su cui si punta l'attenzione ma soprattutto questa si focalizza su differenti l'orizzonte temporale in cui il sistema opera. A livello di pianificazione vengono fissati gli obiettivi e ci si orienta rispetto agli strumenti da adottare per ottenere i risultati desiderati, l'orizzonte temporale è di lungo periodo. Il seguito della pianificazione è la gestione: a questo livello si progetta su un orizzonte temporale di breve o medio periodo e le decisioni prese hanno lo scopo di utilizzare in modo efficiente le risorse, limitate, a disposizione adottando le indicazioni procedurali stabilite in pianificazione. Infine il controllo operativo è il livello preposto a stabilire con quali azioni mettere in atto le decisioni prese nella fase di gestione. Nessuno di questi tre livelli può prescindere dall'altro, infatti un problema di pianificazione che coinvolga un sistema in evoluzione, dinamico, non si esaurisce in una decisione definitiva ma include sempre la necessità di progettare una politica di regolazione per la fase di gestione, che deve essere conforme con le direttive stabilite nella fase precedente e permettere l'adattamento alle situazioni che si presentano. Dunque Pianificazione e gestione non sono momenti isolati, ma profondamente interconnessi. Le decisioni pianificatorie si assumono con un progetto confrontando tra loro le possibili alternative di intervento e individuando quella che soddisfa maggiormente il Portatore di Interesse. Anche le decisioni gestionali devono essere considerate da subito: occorre pianificare la gestione stabilendo una politica di regolazione che specifichi le decisioni da

assumere per ogni istante di tempo e in base allo stato del sistema, poiché la gestione ha influenza sugli effetti della pianificazione. La costruzione di una infrastruttura, decisione di pianificazione, non è sufficiente a sapere come andrà a finire, serve avere almeno un'idea di come, quando e quanto verrà distribuita la risorsa oggetto del conflitto e per i sistemi ambientali che non sono mai del tutto uguali a se stessi conviene avere a disposizione più decisioni equivalenti. Per ognuna delle tre fasi è indispensabile un sistema di monitoraggio e raccolta dati.

2.2 La procedura di pianificazione integrata e partecipata

La procedura che si segue per la risoluzione di decisioni in ambito pubblico prende il nome di PIP (procedura di pianificazione integrata e partecipata) ed è articolata in fasi che permettono di affrontare il problema scomponendone la complessità di partenza. Le fasi della procedura vengono presentate in maniera seriale ma questa è più che altro una modalità per facilitarne la rappresentazione: infatti i passaggi di cui si compone la PIP sono solo indicativamente in successione poiché le recursioni sono frequenti, dal momento che ad ogni passaggio si producono nuove informazioni che spesso portano a dover rivedere passi precedenti, alcuni rami del processo corrono paralleli e manca la linearità perché i risultati di una fase possono influenzare più fasi successive. Tutto ciò può apparire macchinoso ma si è rivelato funzionale a uno degli scopi essenziali della procedura: aumentare la comprensione che i soggetti coinvolti hanno della problematica che li riguarda, il che gli consente di formulare richieste via via più precise e motivare più chiaramente i propri pareri.

La fase iniziale è di ricognizione e definizione degli obiettivi. Oltre a quest'ultimo, gli altri scopi sono individuare i confini del sistema e determinare i Portatori di Interesse coinvolti. Ciò richiede buona conoscenza del sistema in analisi che può venire o dalla letteratura, quando ve ne sia a disposizione, o da studi diretti sul campo. L'attività di partecipazione deve essere fortemente favorita perché tutti i Portatori di Interesse devono essere concordi sulla definizione degli obiettivi e sull'identificazione dei confini del sistema, altrimenti le fasi successive sarebbero impraticabili. Il passaggio seguente è la definizione degli interventi che permettono di conseguire gli obiettivi.

Il secondo punto fondamentale è la definizione di criteri e indicatori per valutare in modo efficace gli effetti che le alternative producono sul sistema. Come per la definizione degli obiettivi è fondamentale che i criteri vengano

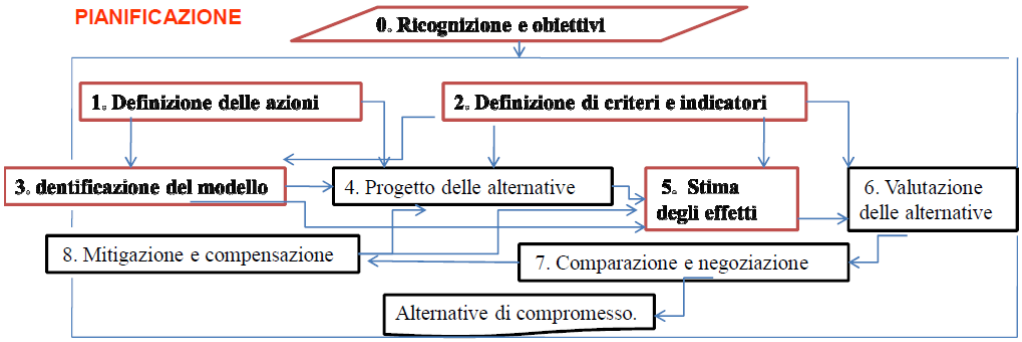

Figura 2.1: Procedura di partecipazione integrata e partecipata

formulati interagendo con i Portatori di Interesse perché riflettano le caratteristiche del problema ed esprimano correttamente i valori che stanno alla base del modo col quale i soggetti coinvolti giudicano le alternative e i risultati prodotti. Per semplificare il compito ai Portatori di Interesse si strutturano i criteri in una gerarchia, andando dal generale al particolare, e raggruppando in settori i criteri di valutazione che esprimono i punti di vista di un gruppo di persone che rivelano interessi simili. L'ultimo livello nella gerarchia dei criteri è quello di maggior dettaglio tecnico, dove i criteri vengono tradotti in indicatori cioè funzioni che, raccolti i dati sul fenomeno di studio, restituiscono un risultato quantitativo ovvero una misura di quanto l'alternativa calcolata soddisfa le aspettative dei portatori a proposito di un determinato criterio.

La fase successiva prevede l'identificazione delle alternative dalla combinazione degli interventi in seguito alla quantificazione delle possibili azioni specificate dagli interventi. Le prime azioni ad essere definite sono di natura pianificatoria, strutturali o normative, e in seguito si stabiliscono le azioni di regolazione, le politiche: comunque, tutti i tipi di azione in qualunque momento della procedura discendono e devono essere conformi con i criteri e gli indicatori individuati per tracciare un percorso coerente, trasparente e ripercorribile. Le caratteristiche dell'ambiente in cui evolve il sistema e quegli elementi sui quali non è possibile intervenire direttamente attraverso le azioni decisionali costituiscono vincoli e scenario di progetto, esse sono le condizioni nelle quali muoversi ed influenzano il valore dei parametri che identificano il sistema.

Per la valutazione degli effetti delle alternative è necessario disporre di un modello che descriva in maniera efficace la dinamica del sistema rispetto al tipo di azione che bisogna analizzare, pianificatoria o gestionale, e al livello di dettaglio richiesto dagli indicatori e dalle alternative. In particolare: per

conoscere gli effetti delle alternative occorre avere un modello, ma frequentemente sapere quali elementi definiscono le alternative è di grande importanza per lo sviluppo del modello stesso. Tra identificazione delle alternative e del modello si crea dunque una prima possibile recursione.

Una volta che si dispone del modello del sistema e delle alternative si procede alla stima degli effetti con il calcolo dei valori assunti dagli indicatori relativamente alle alternative selezionate. Il calcolo si esegue attraverso la simulazione del modello che va alimentato con una serie di dati e in genere si attinge alle serie storiche per favorire nei Portatori di Interesse il confronto tra ciò che si è verificato nel passato e ciò che sarebbe potuto accadere prendendo diverse decisioni. L'orizzonte temporale e la serie di dati scelti deve essere sufficientemente rappresentativa, soprattutto per quanto riguarda gli eventi più estremi che sovente sono quelli che maggiormente preoccupano i soggetti coinvolti. Gli indicatori vanno inoltre validati, cioè è necessario accertarsi che siano significativi e colgano in modo esatto il fenomeno descritto.

Dopo aver ottenuto gli effetti quantitativi associati alla realizzazione delle alternative si passa alla loro valutazione: questo richiede di associare a ciascun risultato ottenuto il livello di utilità che i Portatori di Interesse decidono. Ogni criterio è espresso nell'unità di misura che meglio si adatta al settore che descrive, quindi per eseguire la valutazione delle alternative bisogna trasformare gli effetti delle alternative sui settori in utilità. Questo può avvenire in molti modi, ad esempio con l'analisi a molti criteri, una tecnica che dall'analisi di ogni settore ricava gli indici che esprimono il grado di soddisfazione per singolo criterio. Il passaggio tra l'unità di misura fisica al valore di utilità si realizza elaborando una funzione, detta di utilità parziale, per ogni indicatore e sommando tra loro tutte le funzioni si calcola l'indice. La fase di valutazione permette di iniziare a risalire la gerarchia dei criteri.

La settima fase è la comparazione delle alternative che ha l'obiettivo di individuare tra esse un insieme che raccolga tra i portatori il consenso più ampio possibile: si esplora l'insieme delle alternative settore per settore in base alle indicazioni fornite dai soggetti coinvolti. Data un'alternativa, si individuano i portatori che se ne dichiarano più e meno soddisfatti e se ne cerca un'altra che migliori le prestazioni critiche senza peggiorare gli aspetti positivi per il settore selezionato. Si continua procedendo in questo modo per aumentare il consenso in maniera condivisa e allargare l'insieme dei Portatori d'Interesse che si ritengono soddisfatti, finché non si perviene a un numero di alternative oltre le quali non si riesce più a trovare pareri concordi. Dal momento in cui si arriva a tali alternative, dette di attrazione, è più facile che emergano i conflitti poiché non esistono alternative che migliorino un aspetto del problema senza peggiorarne altri e soprattutto perché le decisioni prese saranno sempre più influenzate dalla soggettività. Nell'eventualità si sia ri-

conosciuta un'alternativa che è confacente alle esigenze della maggior parte dei portatori d'interesse si studia l'eventualità che, con determinate azioni, non si riesca ad allargare il consenso fornendo ai soggetti insoddisfatti misure per compensare lo scontento: le azioni da individuare sono da includere nell'alternativa e riguardano solo i settori insoddisfatti. Questo provoca una recursione tra l'identificazione delle alternative generate con le nuove azioni, la stima degli effetti, la valutazione e comparazione delle alternative e, al limite, la mitigazione. Il gruppo di risoluzioni così ottenuto non è più di alternative efficienti ma di compromesso, e tra queste i decisori politici scelgono quella di miglior compromesso che mette d'accordo i diversi interessi. Con la scelta dell'alternativa di miglior compromesso termina la fase di pianificazione ma lo studio tecnico finisce con l'individuazione delle alternative efficienti, poiché da questo momento la valutazione diventa soggettiva.

La creazione di un sistema di supporto alle decisioni, uno strumento informatico per percorrere la procedura integrata di partecipazione, è condizione sufficiente per interagire in maniera efficiente con i Portatori di Interesse e per utilizzare le informazioni ricavate da ogni fase. L'informazione deve essere: completa e condivisa tra tutti i soggetti, altrimenti non è possibile ricercare il consenso, trasparente, nota e comprensibile da tutti, ripercorribile, semplice da interrogare e flessibile, in modo da essere utilizzabile in ambiti diversi rispetto a quelli che l'hanno prodotta.

2.3 Introduzione alla problematica ed elementi del problema

In tutto il mondo è in continuo aumento la pressione sulle risorse idriche a causa della crescita demografica, dello sviluppo economico e dei cambiamenti climatici: è evidente l'importanza di introdurre nuove pratiche gestionali, che portino a un utilizzo più efficiente dell'acqua e consentano di bilanciare il fabbisogno dell'uomo con quello dell'ambiente. È quindi necessario un processo decisionale che promuova la gestione e lo sviluppo coordinato dell'acqua, del territorio e delle risorse che vi sono connesse, al fine di massimizzare in modo equo i benefici economici e sociali che ne derivano, senza compromettere nessun ecosistema vitale [GWP, 2003]. Uno strumento di cruciale importanza per promuovere lo sfruttamento bilanciato e sostenibile in termini sociali, economici e ambientali della risorsa idrica è l'integrazione di problematiche di qualità e quantità dell'acqua nella pianificazione e gestione. Nella gestione dell'acqua in genere si prediligono gli aspetti quantitativi, ad esempio produzione idroelettrica, irrigazione, fornitura civile e industriale, a quelli qualita-

tivi, spesso trattati come un problema indipendente. Una delle conseguenze di tale pratica è il grave stato di deterioramento in cui verte buona parte delle riserve idriche mondiali. Uno dei motivi della mancanza di integrazione tra tematiche relative alla quantità e alla qualità è da ricercare nel loro diverso grado di complessità fisica e in una differente disponibilità di dati, che ha storicamente determinato lo sviluppo e l'affermazione di due distinti approcci modellistici e, conseguentemente, differenti modalità di gestione del problema. La complessità del modello costituisce un ovvio beneficio quando lo scopo del modello è di migliorare la conoscenza del sistema (obiettivo scientifico), ma si rivela uno svantaggio ai fini della gestione (obiettivo ingegneristico), dal momento che ne impedisce l'integrazione con le tradizionali tecniche di ottimizzazione. In pratica, con questo tipo di modelli, la pianificazione e la gestione possono essere sviluppate spesso solo con analisi di tipo *What - if* su un numero limitato e definito a priori di alternative di intervento tipicamente caratterizzate da un numero relativamente piccolo di parametri di progetto. L'analisi *What - if* non è un processo sistematico di ottimizzazione, ma si avvale di una serie di simulazioni selezionate sulla base dell'intuizione dell'analista e non mediante un processo formalizzato. È inoltre auspicabile l'utilizzo di una procedura che consenta di arrivare a una rappresentazione esplicita del conflitto tra gli obiettivi, in modo da rendere evidente e trasparente al Decisore la problematica che sta affrontando: questa rappresentazione è la frontiera di Pareto.

La ricerca di un sistema per integrare modelli per scopi scientifici con modelli per scopi ingegneristici e la conseguente possibilità di considerare aspetti sia di quantità sia di qualità dell'acqua all'interno dello stesso contesto decisionale può permettere di soddisfare le richieste di acqua a lungo termine preservando sia i delicati equilibri ecologici sia gli interessi economici.

Un problema di progetto ha come obiettivo la determinazione delle alternative efficienti in senso paretiano. Un'alternativa è in generale un pacchetto integrato e coordinato di azioni, che si suddividono in due gruppi: azioni pianificatorie e azioni gestionali. La differenza tra queste due categorie consiste nel passo temporale con cui le azioni vengono decise: un'azione pianificatoria è decisa una tantum, senza tenere conto di come essa possa influenzare una analoga decisione futura nello stesso contesto; sono invece gestionali le azioni che si decidono frequentemente o periodicamente. Un'alternativa si definisce efficiente quando non è possibile migliorarne le prestazioni rispetto a un obiettivo senza peggiorarle rispetto a un altro. Gli obiettivi sono gli strumenti che vengono utilizzati per esprimere formalmente il punto di vista dei Portatori di Interesse, cioè di tutti coloro (persone, istituzioni o organizzazioni) che risentono degli effetti che una determinata alternativa produce.

Un ruolo fondamentale nel processo di scelta è assunto dal Decisore, che ha l'autorità politica per scegliere, tra le alternative efficienti, quale di queste verrà realmente realizzata. Il compito del Decisore è in generale quello di scegliere l'alternativa di miglior compromesso che meglio contempera i diversi interessi in gioco.

2.3.1 Elementi del problema e sua formulazione.

Ogni possibile intervento, le possibili opzioni risolutive, viene scomposto in una o più azioni ciascuna caratterizzata dagli specifici valori da assegnare a un insieme di attributi che le caratterizzano. Le decisioni da assumere concernono le opzioni di intervento cioè il valore da dare agli attributi delle azioni. Le azioni da intraprendere possono essere di varia natura, strutturali o non strutturali, pianificatorie o gestionali e possono riferirsi a qualunque momento della vita del progetto: ad esempio il problema da affrontare può riguardare la valutazione della costruzione o meno di una infrastruttura o decidere della gestione di un opera esistente. Le prime azioni da intraprendere in ordine di tempo sono quelle pianificatorie e le loro conseguenze possono solo essere stimate mentre quando si prende un'azione gestionale si dispone di informazioni aggiornate sul sistema e sono possibili variazioni del sistema decisionale in tempo reale, inoltre occorre tenere presente gli effetti che essa avrà sugli stati futuri del sistema. Il passaggio dalla fase pianificatoria a quella gestionale è data dalla scelta dell'alternativa di miglior compromesso.
.

Le alternative di un problema di progetto vengono definite attraverso un vettore di elementi ognuno dei quali rappresenta una determinata decisione. È ragionevole pensare che non tutte le alternative date dalla combinazione di diversi valori degli elementi del vettore delle decisioni possano essere realizzate: è allora opportuno definire un insieme, definito come insieme delle alternative possibili, che contenga tutte le possibili alternative fisicamente realizzabili. Per risolvere un problema di progetto è necessario disporre di un modello matematico che valuti, attraverso le relazioni di causa-effetto, il grado di soddisfazione degli obiettivi in corrispondenza delle alternative simulate. Gli obiettivi di un problema di progetto sono valutabili attraverso indicatori quantitativi, funzionali delle traiettorie delle variabili del sistema. Il problema di progetto a molti obiettivi è costituito fondamentalmente da tre elementi: il modello del sistema, gli obiettivi e i disturbi.

Prima di descriverli in maniera dettagliata, definiamo in maniera più rigorosa quale forma abbia la soluzione di un problema di progetto a molti obiettivi.

Un problema di progetto a molti obiettivi non ha in genere un'unica soluzione ottima, poiché non esiste un'unica soluzione che minimizzi tutti gli obiettivi contemporaneamente dal momento che gli obiettivi sono per definizione in conflitto tra loro, altrimenti è possibile ricondurre tutto a uno singolo. Esisteranno però molte alternative, al limite infinite, che possono risultare interessanti per un Decisore. Tra di esse le uniche soluzioni che vale la pena considerare sono quelle per cui non esiste alcuna decisione che fornisca prestazioni migliori rispetto agli obiettivi: tali decisioni sono dette dominanti, o efficienti, o paretiane, come i corrispondenti punti nello spazio degli obiettivi, mentre le altre si dicono dominate, se ne esiste almeno un'altra che migliora entrambi gli obiettivi, o semi-dominate, se ne esiste almeno un'altra che migliora un obiettivo senza peggiorare l'altro. L'insieme delle soluzioni efficienti costituisce di fatto la soluzione del problema di progetto a molti obiettivi e la fine della fase più strettamente tecnica della procedura: i passi successivi saranno sempre più influenzati dalla soggettività.

Appresa la forma della soluzione cercata, si analizzano i tre elementi principali che costituiscono un problema di progetto: modello del sistema, obiettivi e disturbi.

Per poter quantificare gli effetti che le diverse alternative produrrebbero se fossero applicate bisogna disporre di un modello che descriva le relazioni causa-effetto presenti nel sistema. Queste relazioni hanno quasi sempre una forma matematica utile per definire le equazioni dei processi fisici che avvengono nel sistema in esame. A patto di disporre di un numero sufficiente di condizioni iniziali tali modelli possono fornire una descrizione molto accurata del sistema, a prezzo però di un alto costo computazionale.

La funzione di transizione di stato utilizzata dal modello matematico per descrivere i fenomeni fisici in atto dipende, oltre che dallo stato del sistema, anche da una serie di ingressi o disturbi. Da un lato vengono definite le azioni pianificatorie in esame e dunque individuata l'alternativa considerata, e questa è la parte del problema su cui si ha diretta influenza mentre dall'altro si hanno elementi riguardo ai quali non si possono prendere decisioni ma rivestono comunque grande importanza sugli effetti che le azioni hanno sul sistema in esame: si tratta degli ingressi al sistema, classificati come deterministici, stocastici o incerti. Gli ingressi esogeni si dicono deterministici se sono noti nell'istante di tempo in cui viene presa la decisione, invece un disturbo stocastico è descritto dalla conoscenza della sua distribuzione di probabilità o può essere caratterizzato da un livello di incertezza ancora maggiore, nel caso in cui sia noto solo l'insieme dei valori che può assumere: in tal caso si parla di disturbi incerti. Nel seguente studio sono stati considerati solo disturbi di natura deterministica, il che significa che tutti gli ingressi del

modello sono stati descritti tramite traiettorie predefinite. Esse costituiscono lo scenario di progetto, vale a dire lo sfondo su cui si assume che il sistema si evolva durante l'orizzonte di progetto. Questo genere di simulazione prende il nome di simulazione deterministica. La semplificazione appena descritta limita la portata dell'analisi, perché non considera l'incertezza intrinseca nel sistema, relativa in particolare agli ingressi di natura meteorologica. L'unica alternativa ipotizzabile sarebbe quella di effettuare molte simulazioni utilizzando diversi scenari di progetto, scelti in base a serie storiche oppure generati attraverso un modello stocastico che porterebbe a notevoli vantaggi dal punto di vista dei risultati, ma nel contempo anche alti costi computazionali del modello a parametri distribuiti. La consapevolezza di questa limitazione porta a ricercare la scelta di uno scenario di progetto che sia il più opportuno rispetto agli indicatori da calcolare, in modo che i risultati non siano eccessivamente condizionati da questa scelta. Senza addentrarsi in maniera dettagliata su questa decisione, si vuole chiarire che questo problema non è di facile risoluzione e non può prescindere da un'ottima conoscenza del sistema naturale in analisi.

Le caratteristiche costitutive del sistema devono essere descritte da opportuni indicatori che le valutino in maniera quantitativa in base alle traiettorie delle variabili simulate con il modello. Un obiettivo è un indicatore al quale è applicato un criterio di filtraggio per la casualità del disturbo [Soncini - Sessa, 2004]. In assenza di disturbi casuali gli indicatori, identificati dalla natura del disturbo, risultano deterministici e di conseguenza non si ha bisogno di utilizzare criteri per il filtraggio della casualità: indicatori e obiettivi divengono pertanto sinonimi. Se l'indicatore è separabile è esprimibile come combinazione tramite un opportuno operatore, molto spesso la somma, di funzioni elementari: ogni funzione, o indicatore per passo, rappresenta il costo prodotto nella transizione del sistema da uno stato all'altro nell'unità di tempo i cui argomenti sono le variabili relative al suddetto intervallo di tempo. Nella formulazione matematica degli indicatori compare spesso una funzione che prende il nome di penale e dipende solo dallo stato finale e dalle decisioni di pianificazione. La penale serve a tenere conto dei costi futuri oltre all'orizzonte di tempo considerato, che, per la definizione stessa di sistema dinamico, dipendono dallo stato che viene raggiunto al termine dell'orizzonte. La presenza della penale dipenderà dall'orizzonte temporale scelto: per un orizzonte infinito la penale non è necessaria, esempi di indicatori di questo tipo sono il costo totale attualizzato dove il coefficiente di attualizzazione, il cui valore, compreso tra 0 e 1, è tanto minore quanto più il valore si presenta lontano nel tempo, oppure il costo medio su orizzonte infinito (AEV). Per simulazioni deterministiche spesso non è possibile estendere la lunghezza delle simulazioni oltre a un orizzonte temporale relativamente breve e si è dunque

costretti a limitare il calcolo degli indicatori a un orizzonte temporale finito. La scelta della penale è particolarmente ardua, poiché non è semplice quantificare come un determinato stato possa influenzare parametri futuri. In questo lavoro di tesi essa non verrà pertanto considerata, ciò non toglie che una sua accurata definizione porterebbe a una migliore accuratezza dei risultati finali.

2.4 Gli approcci classici alla soluzione: l'analisi *What - if*

Una volta descritti gli elementi del problema di progetto da analizzare e le difficoltà operative che caratterizzano l'uso di modelli a parametri distribuiti nel caso di questioni inerenti alle problematiche ambientali, si analizzano le procedure classiche adoperate per la sua risoluzione.

La risoluzione di un problema di progetto consiste nel mappare l'insieme delle decisioni ammissibili nello spazio degli obiettivi e nel trovare la frontiera di Pareto. I punti mappati nello spazio degli obiettivi costituiscono l'insieme omonimo. Se fosse possibile dato l'insieme delle alternative conoscere l'insieme degli obiettivi, la frontiera di Pareto sarebbe individuabile come sottoinsieme dell'insieme degli obiettivi: quest'ultimo può essere calcolato solo mediante simulazione, e dunque deve essere ricostruito per punti.

Quando l'insieme delle alternative da esaminare è finito e il numero dei suoi elementi è piccolo, la procedura di risoluzione consiste nel valutare gli obiettivi in corrispondenza di ogni alternativa, si ottiene un numero finito di punti che compongono l'insieme degli obiettivi e si ricava la frontiera di Pareto. È importante sottolineare che questa frontiera è calcolata in maniera esaustiva, ed è quindi la migliore ottenibile in base alle informazioni forniteci dal modello ma nella pratica capita raramente di trovarsi in situazioni di questo tipo. È molto più frequente il caso in cui l'insieme delle decisioni sia molto grande, al limite infinito, e una procedura esaustiva di valutazione delle alternative tramite il modello risulti per questo motivo impraticabile. I metodi classici di ottimizzazione sfruttano alcune proprietà del problema, quali ad esempio la forma degli obiettivi, la forma del modello o le caratteristiche dell'insieme delle decisioni, per generare una soluzione approssimata: in questi casi non è in generale possibile individuare l'esatta frontiera di Pareto e bisogna accontentarsi di una sua buona approssimazione ma la complessità dei modelli a parametri distribuiti non consente di seguire procedure di questo tipo perché i tempi complessivi di calcolo diventerebbero proibitivi. Tradizionalmente si procede in modo empirico, sfruttando conoscenze a priori di

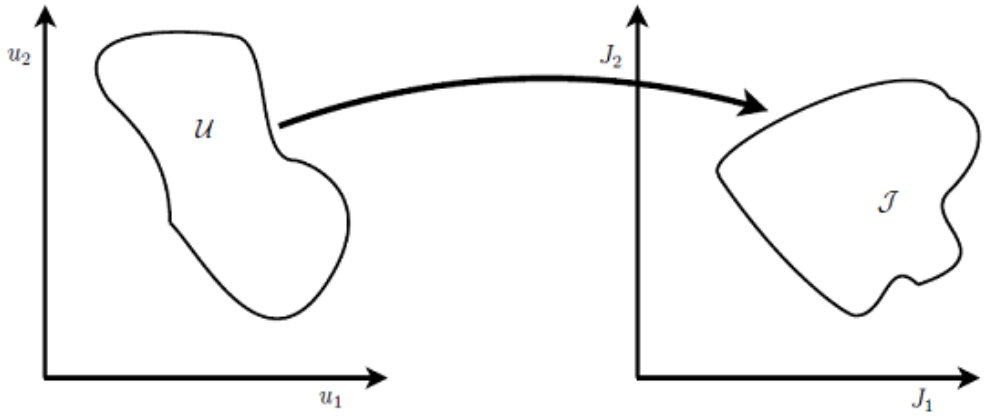

Figura 2.2: Spazio delle alternative e spazio degli obiettivi nell'ipotesi in cui sia possibile conoscere J data la conoscenza di U

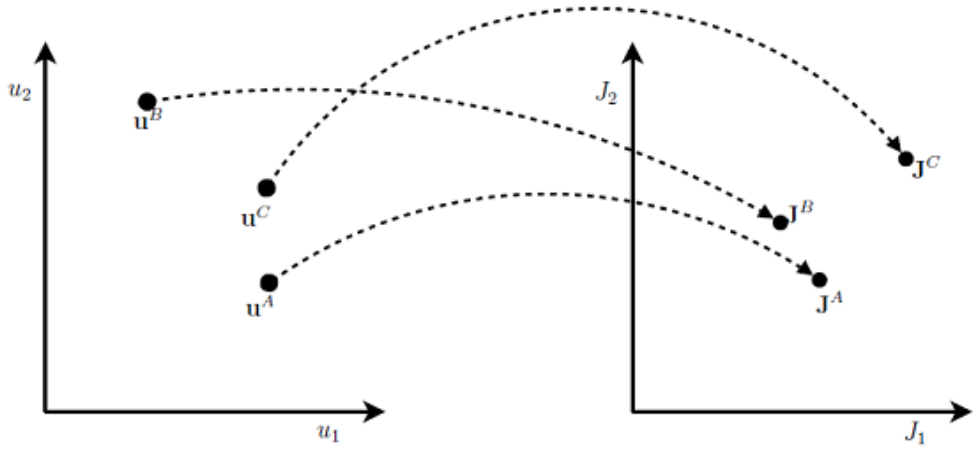

Figura 2.3: Insieme delle soluzioni ammissibili U, corrispondente mappa J nello spazio degli obiettivi e frontiera di Pareto

varia natura quali l'esperienza dell'analista o informazioni sul funzionamento del modello per ridurre l'insieme delle alternative a un sottoinsieme trattabile attraverso la simulazione. Si parla in questo caso di analisi What if (una procedura di questo tipo è stata utilizzata da Morillo et al. [2008] per lo studio di interventi di riqualificazione del lago di Como).

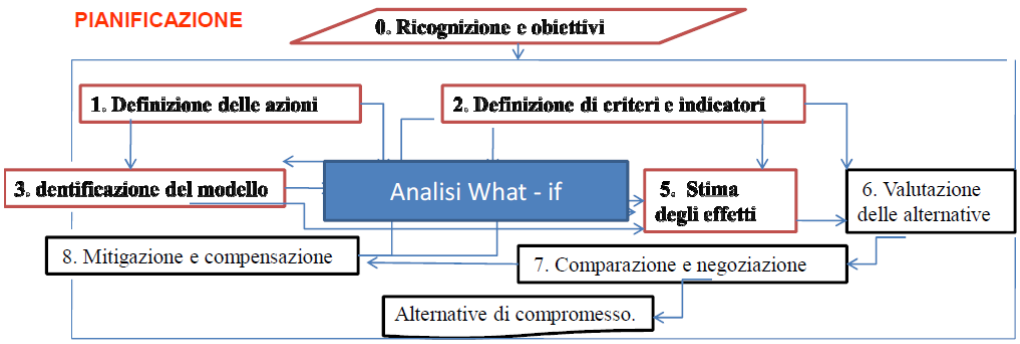

Figura 2.4: Analisi *What-if* come design delle alternative

2.4.1 Analisi *What - if*: definizione e aspetti qualitativi.

L'analisi «*What if*» consiste nel valutare le prestazioni di un sistema reale in particolari condizioni ipotizzate, attuabili in breve tempo e a bassi costi: consente di ottenere con semplicità le previsioni sugli andamenti futuri delle variabili più significative. L'obiettivo finale dell'analisi è quello di trovare delle condizioni ottimali per il sistema, in cui vi sia la migliore allocazione possibile delle risorse ed un costo di processo minimo. Essa è realizzabile attraverso numerose tecniche, anche a livello semplicemente qualitativo o avvalendosi di modelli matematici per la simulazione di processi. In generale l'analisi *What - if* ? (Cosa accadrebbe se...?) è una tecnica sfruttata, ad esempio in ambito economico, con l'obiettivo di stimolare la formulazione di idee avvalendosi di domande generali e liberamente strutturate per scoprire e valutare modi alternativi di usare prodotti e processi, valutare criticamente le prassi correnti e cercare soluzioni alternative, riflettere sugli approcci utilizzati e valutare eventuali cambiamenti. L'analisi Cosa accadrebbe se ? può essere definita una valutazione sistematica, ma liberamente strutturata, che in genere viene realizzata da uno o più gruppi con esperienze e provenienze diverse. E' applicabile a qualsiasi attività o sistema, e genera delle descrizioni qualitative dei problemi formulati come domande e risposte, insieme eventualmente ad una lista di raccomandazioni per prevenirli. Il

valore dell'analisi dipende dalla qualità della documentazione, dalle capacità del facilitatore, e dall'esperienza del gruppo di lavoro. Questa tecnica è normalmente adeguata per qualsiasi genere di valutazione, o quasi, data la sua flessibilità e occasionalmente viene utilizzata da sola, ma in genere si applica associandola a metodologie più strutturate. In particolare l'analisi *What - if* è usata per determinare ciò che potrebbe accadere se certi eventi ritenuti dannosi si verificassero e giudicare la probabilità e le conseguenze di queste situazioni, cioè viene spesso usata per la valutazione del rischio. Le risposte a queste domande costituiscono la base per formulare giudizi sull'ammissibilità di tali rischi e determinare un percorso consigliato di interventi per quei rischi giudicati inaccettabili. Attraverso un gruppo scelto per il lavoro di revisione è possibile discernere le questioni importanti relative ad un processo o sistema: guidati da un facilitatore ogni membro della squadra partecipa nel valutare cosa può andare storto in base alle proprie esperienze passate e alla conoscenza delle situazioni simili. Aspetti molto importanti per la riuscita dell'analisi *What - if* sono quindi: la scelta delle persone che compongono il gruppo di lavoro e di un facilitatore che abbia il compito di guidare il gruppo, la definizione dei confini del sistema e raccolta delle informazioni. Schema procedurale per analisi *What - if*. La procedura per eseguire una analisi *What - if* è costituita da sette fasi:

1. Definire l'attività o sistema di interesse: specificare e definire chiaramente entro quali limiti è necessario effettuare la raccolta di informazioni relative ai rischi;

2. Specificare i problemi che l'analisi dovrà affrontare come problemi di sicurezza, questioni ambientali o valutazioni economiche;

3. Suddividere l'attività o il sistema per l'analisi nei suoi elementi o sottosistemi principali. L'analisi vera e propria inizierà a questo livello;

4. Generare domande per ciascun elemento dell'attività o sistema attraverso un gruppo di lavoro incaricato di postulare situazioni ipotetiche (generalmente iniziano con la frase *What if ...*) che i membri del team credono potrebbero tradursi in un problema di interesse;

5. Rispondere alle domande utilizzando un team di esperti in materia per rispondere a ciascun quesito e sviluppare raccomandazioni per il miglioramento di potenziali problemi;

6. Suddividere ulteriormente gli elementi del sistema qualora si ritenga necessario effettuare un'analisi più dettagliata;

7. Utilizzare i risultati nel processo decisionale valutando le raccomandazioni dall'analisi e implementare quelle che porteranno più benefici rispetto ai costi nel ciclo di vita dell'attività o del sistema.

Nel dettaglio:

1. Definire l'attività o il sistema di interesse: poiché tutte le valutazioni dei rischi si occupano di modi in cui le funzioni previste possono fallire, una chiara definizione di queste è un primo passo in ogni valutazione ed è inoltre importante stabilire i confini del sistema dal momento che attività o sistemi operano in modo isolato, anche se la maggior parte interagisce con gli altri.

2. Definire i problemi di interesse per l'analisi *What - if*: essenzialmente problemi di sicurezza, questioni ambientali per esempio il gruppo di lavoro può essere invitato a cercare i modi in cui il comportamento di una determinata attività o il fallimento di un sistema può influenzare negativamente l'ambiente, impatti economici tra cui rischi aziendali, costi di ripristino ambientale o costi di sostituzione, come ad esempio il costo di sostituzione delle apparecchiature danneggiate. È da sottolineare che una particolare analisi può concentrarsi solo sugli eventi al di sopra di una certa soglia di preoccupazione in una o più di queste categorie;

3. Suddividere l'attività o il sistema per l'analisi: un'attività o un sistema possono essere suddivisi a vari livelli di risoluzione e gli analisti dovrebbero cercare di descrivere le caratteristiche dei rischi connessi a un'attività o un sistema al livello più ampio possibile. La procedura, tipicamente ripetitiva, parte da una suddivisione in sezioni principali al più alto livello e serve a promuovere una valutazione dei rischi efficace ed efficiente, a garantire che tutti gli attributi principali vengano considerati, a evitare inutili dettagli. La suddivisione in elementi di maggior dettaglio prosegue fin quando si ritiene che sia necessario;

4. Generare domande per la realizzazione dell'analisi *What - if* vera e propria per ogni elemento dell'attività o sistema a partire dal processo di *brainstorming* da parte del gruppo di lavoro che può essere costituito o da esperti in materia, i quali però data la loro vicinanza alla problematica possono non vedere alcuni potenziali problemi, o da persone esterne con il rischio che la loro analisi si allontani dalle problematiche specifiche. Per la formulazione delle domande che servono per realizzare l'analisi occorre ricordare alla squadra gli obiettivi del progetto,

spiegare le regole in base alle quali devono essere formulate le domande, registrare le idee che vengono proposte, terminare la messa in discussione e organizzare le domande in gruppi logici per la risoluzione ad esempio coniugando strettamente le voci relative a seconda dei casi ed eliminare le domande che si sovrappongono;

5. Rispondere alle domande: in genere ogni questione deve essere risolta da un gruppo di esperti in materia che definiscano le variazioni delle condizioni iniziali che si verificherebbero sul sistema se la situazione postulata (cioè, il *What - if*) dovesse verificarsi e le conseguenze di interesse come gli eventuali effetti indesiderati che potrebbero prodursi se non venissero attenuati in qualche modo, indicare opportune misure di salvaguardia e quali controlli mettere in atto per impedire la situazione ipotizzata si verifichi o attenuare gli effetti qualora la situazione si verifichi. Le risposte possono essere complete per ogni domanda o più semplicemente proposte di miglioramento, al limite anche un elenco di raccomandazioni;

6. Suddivisione: nel caso in cui la fase 5 dia esiti non soddisfacenti si passa ad una ulteriore suddivisione degli elementi del sistema realizzabile a condizione che siano disponibili dati per un'analisi a maggior livello di dettaglio. Fintanto che questo criterio si dimostri applicabile a uno o più sottosistemi, tali sottosistemi possono essere ulteriormente suddivisi in componenti e in modo simile, ampie attività o compiti possono essere suddivisi in singole fasi;

7. Utilizzare i risultati nel processo decisionale: per mettere in pratica le risposte alle domande è necessario verificarne l'accettabilità e decidere se la stima del rischio relativo alle prestazioni in analisi per l'attività o il sistema incontra un obiettivo. Stabilito questo bisogna vanno identificate le opportunità di miglioramento e gli elementi dell'attività o del sistema che sono più suscettibili di contribuire al rischio di futuri problemi relativamente ai quali sono state formulate le indicazioni per il miglioramento e vanno sviluppati i suggerimenti specifici per migliorare le prestazioni del sistema. Come ultima fase viene giustificata l'allocazione delle risorse per il miglioramento, si stimano l'attuazione delle raccomandazioni costose o controverse per il miglioramento sulle prestazioni future e si confrontano i rischi connessi ai benefici che si spera di ottenere rispetto al ciclo di vita totale confrontandoli con il costo di realizzazione di ogni intervento.

2.4.2 Analisi *What - if*: aspetti quantitativi.

Per poter valutare in anticipo l'impatto di una mossa strategica o tattica così da pianificare in modo ottimale le strategie per raggiungere i loro obiettivi, i decisori devono affidabili sistemi predittivi. L'analisi *What - if* è una tecnica che tramite l'utilizzo di simulazioni ha l'obiettivo di controllare il comportamento di un sistema complesso, come un'impresa un'attività o una parte di essa, sotto alcune ipotesi indicate dagli scenari di simulazione. In particolare, l'analisi *What - if* misura come i cambiamenti in un insieme di variabili indipendenti incida su un insieme di variabili dipendenti con riferimento ad un dato modello di simulazione: tale modello è una versione semplificata della rappresentazione ad esempio del business, regolato secondo i dati storici aziendali. In pratica, la formulazione di un scenario permette la costruzione di un mondo ipotetico che l'analista può quindi interrogare ed esplorare.

Sebbene l'analisi *What - if* condotta attraverso simulazione può essere considerata come una disciplina relativamente recente, la sua storia è radicata nella confluenza di aree di ricerca diverse, alcune delle quali risalgono ad alcuni decenni fa. Le simulazioni sono utilizzate in un'ampia varietà di contesti pratici, comprese fisica, chimica, biologia, ingegneria, economia e psicologia e sono documentate in da una vasta letteratura che riguarda principalmente la progettazione di esperimenti di simulazione e la validazione di modelli. L'analisi *What - if* presenta alcuni delle tecniche sviluppate all'interno della comunità di simulazione contestualizzate nel campo economico, quello maggiormente indagato con questa metodologia . L'analisi *What - if* si basa pesantemente sul database e la tecnologia di data warehouse. Anche se i dati immagazzinati hanno svolto un ruolo di primo piano nel sostenere il processo decisionale fino ad ora questi sono finalizzati a supportare l'analisi dei dati passati (*What* - " era") piuttosto che dare indicazioni che siano di anticipazione delle tendenze future (*What - if*), anche se i dati storici utilizzati per la costruzione affidabile di analisi *What - if* di tipo predittivo sono presi proprio dai dati, per lo più aziendali, di magazzino: infatti, l'analisi *What - if* può essere vista come una combinazione di processi elementari ciascuno dei quali presenta la trasformazione di un flusso di dati in ingresso un'uscita.

L'applicazione dell'analisi *What if* quantitativa è centrata su un modello di simulazione che stabilisce una serie di complesse relazioni tra alcune variabili, ad esempio aziendali, corrispondente alle entità significative nel dominio nell'esempio i prodotti, le filiali, clienti, costi, ricavi, ecc. Un modello di simulazione supporta uno o più scenari, ciascuno dei quali descrive uno o più modi alternativi di costruire una predizione di interesse per l'utente. Uno scenario è caratterizzato da un sottoinsieme di variabili, sempre aziendali per

proseguire con l'esempio, chiamate variabili di origine, e da un insieme di parametri addizionali, chiamati parametri dello scenario, ai quali l'utente deve dare valore al fine di eseguire il modello e ottenere la previsione. Mentre le variabili aziendali sono legate al business di dominio, i parametri dello scenario trasmettono informazioni tecnicamente correlate alla simulazione, come il tipo di regressione adottato per la previsione e il numero degli anni passati, e quindi quali dati, sono da prendere in considerazione per la regressione. Distinguere le variabili di origine, o controlli, tra tutte quelle che è possibile formulare è importante poiché permette all'utente di comprendere quali sono gli elementi del problema su cui può indipendentemente intervenire per guidare la simulazione. Ogni scenario può dar luogo a diverse simulazioni, uno per ogni assegnazione delle variabili di origine e dei parametri.

È importante sottolineare che l'analisi *What - if* non dovrebbe essere confusa con l'analisi di sensitività, finalizzata a valutare come cambia il comportamento del sistema a una minima variazione di uno o più parametri. Inoltre, vi è una differenza importante tra analisi *What - if* e semplice previsione, ampiamente utilizzato soprattutto nel settore bancario e assicurazione campi: mentre la previsione è normalmente effettuata in base alle tendenze estrapolando dalla serie storica dei dati memorizzati nei sistemi informativi, l'analisi *What - if* richiede la simulazione di fenomeni complessi i cui effetti non possono essere determinati semplicemente come una proiezione di dati passati, d'altra parte l'applicazione di tecniche di previsione è spesso richiesta durante l'analisi *What - if* ma in quadro generale più complesso. Tra i metodi di previsione ne esistono alcuni semplicemente basati sul parere forniti da esperti di settore e tecniche di *role-playing*, alcuni si avvalgono dell'uso della matematica e della statista come i metodi di estrapolazione, e i sistemi esperti basati su regole di previsione. L'applicabilità di questi metodi viene discussa per i differenti domini in modo da scegliere la tecnica più adatta al caso in esame, in seguito viene segnalato un algoritmo per la risoluzione in base alla specifiche caratteristiche del problema. Per quanto concerne la dinamica del sistema si tratta di trovare il corretto approccio per modellare il comportamento di sistemi non lineari descrivibili nella maggior parte delle situazioni da relazioni di causa-effetto tra le variabili numeriche; questi sistemi dal punto di vista matematico vengono risolti da equazioni differenziali,lo strumento adatto per la modellazione di tali sistemi. Nel caso generale, tuttavia, non è sempre possibile trovare una soluzione analiticamente, così vengono spesso utilizzate tecniche numeriche sempre all'interno di modelli matematici. Eseguendo simulazioni su un modello l'utente può capire come il sistema evolverà nel tempo a seguito di un'ipotetica azione intrapresa e può anche osservare, ad ogni passo temporale, i valori assunti dalle variabili del modello e cercare di modificarli cambiando il valore dei

parametri. in questo modo la dinamica del sistema può essere efficacemente resa e dalle prove svolte si verificano gli stati futuri visitabili. Progettare un'analisi *What - if* per un'applicazione quantitativa richiede l'adozione di un metodo,in genere si percorrono cinque fasi:

1. occorre stabilire quale sia l'obiettivo dell'analisi, al fine di determinare quali attività o fenomeni sono da simulare e come dovranno essere caratterizzati. Gli obiettivi sono espressi individuando l'insieme di variabili di origine che l'utente vuole controllare, ad esempio di business e definendo gli scenari rilevanti;

2. viene costruito un modello cioè una rappresentazione semplificata della realtà, il dominio di applicazione, al fine di aiutare il progettista a comprendere il fenomeno fornendo indicazioni preliminari su quali aspetti possono essere trascurati o semplificati per la simulazione;

3. si esegue l'analisi dei dati di origine serve per capire quali informazioni sono disponibili a guidare la simulazione e di conseguenza come può essere effettivamente strutturata;

4. realizzazione della simulazione: il modello di simulazione permette di realizzare la previsione per ogni dato scenario dai dati di origine disponibili;

5. validazione: la fase è volta a valutare, insieme con gli utenti, quanto il modello di simulazione sia fedele al modello, nell'esempio di business, reale e quanto sia affidabile la previsione. Se l'approssimazione introdotta dalla simulazione è considerata inaccettabile,bisogna iterare le fasi di formulazione e applicazione del modello per produrre un nuovo prototipo. In genere quando si usa la parola modello si fa riferimento a tecniche di modellazione matematica.

Tra i principali campi di applicazioni dell'analisi *What - if* vale la pena menzionare l'analisi della redditività nel commercio, l'analisi del rischio (in qualunque settore), le analisi per la promozione della finanza, l'analisi dell'efficacia nella produzione e nella pianificazione. Meno tradizionali, ma interessanti applicazioni descritte in letteratura si trovano nel settore della pianificazione urbana e regionale sostenute da basi di dati spazialmente distribuiti e le applicazioni in campo ambientale. A prescindere dal settore studiato gli effetti delle ipotesi formulate vengono analizzati basandosi su un ampio set dei modelli di previsione.

La tecnica di analisi *What - if* è semplice da usare ed è stata efficacemente applicata ad una varietà di processi. I risultati dell'analisi sono immediatamente disponibili e possono generalmente essere applicati rapidamente, ciò è particolarmente vero se i membri della squadra di revisione riescono a operare o mantenere il sistema in fase di valutazione. D'altra parte la tecnica fa molto affidamento sull'esperienza e l'intuizione del team di revisione ed molto più soggettiva rispetto ad altri metodi che richiedono un approccio più formale e sistematizzato. Sebbene l'analisi *What - if* sia molto efficace nell'identificare i rischi di sistema vari, questa tecnica ha principalmente tre limitazioni: si rischia di non considerare alcuni potenziali problemi poiché la struttura a maglie larghe dell'analisi *What - if* si basa esclusivamente sulla conoscenza dei partecipanti per identificare i problemi potenziali e se la squadra non riesce a porre le domande giuste, è probabile che non si identifichino debolezze del sistema potenzialmente importanti; è difficile controllarne la completezza, infatti la revisione di una analisi *What - if* per rilevare sviste è difficile perché non vi è alcuna struttura formale con cui controllare e la revisioni stesse tendono a diventare mini-analisi *What if*, cercando di inciampare sulle sviste da parte del gruppo di lavoro originale; tradizionalmente fornisce solo informazioni qualitative senza dare stime quantitative di rischio, questo approccio semplicistico offre un grande valore per un investimento minimo ma può rispondere a interrogativi più complessi solo se un certo grado di quantificazione viene aggiunto. Questa tecnica in genere non produce stime quantitative, ma solo risultati qualitativi. E' un approccio semplice che dà molto a fronte di un investimento minimo, ma può servire a gestire dei temi più complessi e rischiosi solo se vi si aggiungono degli elementi quantitativi.

In conclusione si può affermare che il limite dettato dall'aspetto qualitativo dei risultati dell'analisi viene appunto superato nel caso in cui ci si avvalga dell'utilizzo di modelli matematici per la simulazione del sistema studiato. Le uscite del modello sono infatti variabili quantitative che rappresentano l'andamento di fenomeni di interesse. I valori assegnato alle variabili di controllo definiscono l'alternativa di cui si vuole verificare l'effetto sul caso studiato. Una volta implementata, nell'analisi *What - if* la scelta dell'alternativa è svolta dal Decisore confrontando l'uscita del modello per ogni possibile realizzazione delle alternative. Per raggiungere questo scopo, spesso si esegue una indagine via visualizzazione confrontando le traiettorie delle variabili di uscita in punti significativi dopo averle mappate su un grafico. Questo approccio è fattibile solo se il numero di alternative è molto ridotto, circa una decina, in modo che lo spazio delle simulazioni venga esplorato in maniera esaustiva. In presenza di un consistente numero di alternative un'analisi così diretta non è una strada percorribile, sia perché simulare tutte le soluzioni praticabili richiederebbe un tempo improponibile sia perché lo stesso Decisore non

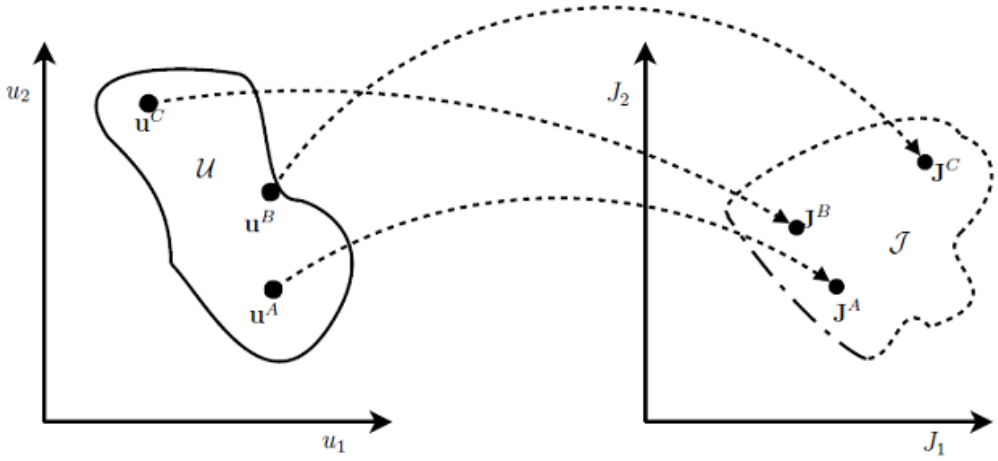

Figura 2.5: Lo spazio delle decisioni e lo spazio degli obiettivi nell'analisi *What - if* J data la conoscenza di U

riuscirebbe a districarsi nella scelta per l'eccessivo numero di possibilità. La soluzione a questo problema può essere effettuare la selezione di un sottoinsieme di alternative giudicato promettente su cui focalizzare l'analisi. Tale sottoinsieme può essere fissato a priori basandosi sull'intuizione di un esperto di settore o scelto iterativamente sulla base delle valutazioni del Decisore su simulazioni precedenti. Intuitivamente, se le alternative simulate sono scelte con cura dall'esperto, si otterranno dei punti che saranno collocati nei pressi della frontiera di Pareto (nel disegno è rappresentata mediante un tratteggio linea punto - linea), ma nulla garantisce che essi facciano effettivamente parte di tale frontiera: ciò è dovuto al fatto che la scelta delle alternative da analizzare è totalmente empirica e la riduzione delle alternative possibili a un sottoinsieme ha come conseguenza la rinuncia alla valutazione completa.

In questo lavoro la fase di design delle alternative è svolta attraverso un'analisi *What - if.*

Capitolo 3

Azioni, Criteri e Indicatori

3.1 Ricognizione e Azioni.

Le principali fasi per la realizzazione di un progetto sono: ricognizione, analisi dello scopo, delimitazione del sistema e formalizzazione degli obiettivi. La prima fase del lavoro vuole individuare infine l'obiettivo del progetto dall'analisi della problematica emersa che necessita di risoluzione. Si limitano i confini spaziali e temporali del sistema e si descrive il contesto in cui si opera: per portare a compimento questa fase, detta di ricognizione, è necessario individuare le informazioni disponibili e quelle mancanti, e se queste ultime possono o meno essere recuperate. Inoltre è fondamentale capire chi sono i portatori di interesse, quali esigenze hanno ma anche quali sono le loro aspettative e quali i timori. La conoscenza del sistema e l'accordo delle parti in causa sulla modalità da adottare sono il punto di partenza per la risoluzione del problema. È dunque possibile definire gli obiettivi che il progetto intende perseguire, ricavandoli in genere dagli obiettivi strategici dei Portatori di Interesse e dal contesto pianificatorio normativo. Questa fase è delicata ma fondamentale e deve essere risolta all'inizio, al punto che nel caso in cui i soggetti coinvolti siano restii alla partecipazione o abbiano difficoltà a formalizzare, anche solo abbozzandoli, gli obiettivi cui la pianificazione e/o la gestione tendono gli scopi del progetto possono essere espressi attraverso una visualizzazione tramite un'immagine obiettivo soffermandosi e ripetendo laddove necessario fino a che comunque non si raggiunga un punto di accordo condiviso da tutti. In teoria le formulazioni dell'obiettivo possono essere anche molto vaghe, anche se generalmente hanno tutte a che fare con i costi, ma acquisiscono valore per il caso specifico se a giudicare le alternative sono i diretti interessati e il compromesso scaturisce da una negoziazione condotta direttamente tra gli stessi. Nel definire l'obiettivo l'interazione con i porta-

tori di interesse o i loro rappresentanti permette successivi raffinamenti che forniscono informazioni utili a stabilire le azioni elementari chiare e condivise.

Segue la definizione delle azioni la quale prevede innanzitutto l'identificazione delle opzioni di intervento che si suppone permettano di raggiungere l'obiettivo. Le operazioni da realizzare sono spesso suggerite dagli stessi portatori di interesse, in base alle loro speranze e timori. È importante chiarire da subito quale sia l'effettivo spazio decisionale, cioè l'ambito relativamente al quale ci può realisticamente muovere: in questa fase si distinguono gli interventi sensati da quelli che non hanno nulla a che vedere con il problema in esame. Gli interventi vengono successivamente scomposti in azioni. Queste prime fasi vanno rigorosamente discusse con i portatori d'interesse o dei loro rappresentanti, che possono essere sia politici sia più facilmente tecnici, o esperti di settore, cui viene accordata fiducia. Nello stabilire le possibili operazioni da eseguire occorre partire da ciò che si può fare, da tutti gli interventi possibili, e soprattutto da quello che desiderano, auspicano, propongono i portatori di interesse stessi, soprattutto quelli insoddisfatti, perché sono proprio i diretti interessati quelli che meglio conoscono la situazione e ciò di cui hanno bisogno e soprattutto si tratta di coloro la cui vita subirà modifiche in seguito agli interventi realizzati. Spesso alcune proposte nascono come controproposte di altri gruppi di PI che si pongono come antagonisti tra loro, anche per questo è importante valutare le alternative tutte insieme. Alcune azioni possono essere scartate perché ritenute irrealizzabili ma bisogna tenere presente l'eventualità che sia necessario riprenderle in considerazione nel caso in cui gli elementi a disposizione non permettano la risoluzione del conflitto. Una azione, di qualunque tipo, è univocamente individuata quando si stabilisce come debba essere realizzata in modo quantitativo: è definita da un vettore i cui elementi specificano i valori assunti dagli attributi (o dalle funzioni), da matrici nel caso di politiche di regolazione. In genere un'alternativa è definita dalla coppia di vettori determinata dalle azioni pianificatorie e gestionali, cioè una loro combinazione integrata e coordinata, o anche solo da una di esse. Tra tutte le alternative praticabili la risoluzione del problema di progetto è data dall'alternativa di miglior compromesso,scelta dopo una negoziazione tra quelle cosiddette non dominate.

3.1.1 I Criteri di valutazione.

Valutare e confrontare gli effetti delle alternative sul sistema da studiare è indispensabile per fare scelte corrette e per ottenere una valutazione in linea con il giudizio dei portatori di interesse è necessario individuare un insieme di criteri che riflettano le caratteristiche del problema da indagare e i valori sottesi ai pareri espressi dai soggetti coinvolti. I criteri devono

riguardare tutto ciò che si augurano o paventano le parti in causa, negli effetti positivi i negativi, oltre ovviamente agli obiettivi del progetto. Per rendere efficiente questo modo di procedere è opportuno strutturare i criteri secondo una gerarchia che va dal generale al particolare, fino a raggiungere un livello di dettaglio tale da permettere di tradurre con chiarezza l'ultimo livello in un indicatore, una funzione che restituisca una misura di quanto lo specifico criterio in esame sia soddisfatto dall'alternativa applicata. Questa è una fase in cui l'interazione con i portatori di interesse è fondamentale perché ogni settore deve riconoscersi in almeno un indicatore, altrimenti la negoziazione fallirebbe inevitabilmente: i soggetti in causa devono essere attivamente coinvolti nella definizione di criteri e dei successivi indicatori. La partecipazione è richiesta anche nel caso in cui il sistema sia affetto da disturbi che rendono il calcolo difficoltoso e il valore degli indicatori incerto: in situazioni di questo tipo i portatori di interesse non vengono chiamati in causa nella risoluzione operativa che si avvale di strumenti matematici, ma si tiene conto dell'avversione al rischio del decisore.

Le discussioni nelle fasi successive sono guidate in base a uno o più criteri di valutazione stabiliti a priori assolutamente insieme ai diretti interessati o a loro rappresentanti. I criteri di valutazione sono appunto attributi in base ai quali i portatori di interesse valutano le prestazioni di un'alternativa rispetto a ciò che per loro è importante. Per semplificare coloro che condividono lo stesso criterio sono raggruppati in uno stesso settore. I criteri non sono in genere espressi in modo operativo, non definiscono una procedura per ottenere risultati quantitativi che possono essere confrontati ma piuttosto chiariscono il punto di vista del portatore di interesse e stabiliscono cosa è significativo dal suo punto di vista. Quindi il criterio è strettamente soggettivo ed è corretto che sia così.

3.1.2 Indicatori: fattori che ne influenzano la scelta.

Il modo per associare un valore misurabile al criterio è stabilire un indice che dipenda dall'alternativa, un funzionale delle traiettorie delle variabili che rappresentano lo stato del sistema in conseguenza alla decisione applicata e che ne stimi gli effetti. Raramente ci si accontenta di risposte qualitative, poiché sono facile oggetto di discussioni non costruttive che non risolvono nulla. Nelle situazioni complesse non è semplice associare direttamente un indice ad un criterio, può essere meglio suddividere il criterio per passi successivi in livelli via via inferiori in una gerarchia fino a poter associare al cosiddetto criterio-foglia una procedura di misura detta indicatore, funzione delle variabili. Risalendo la gerarchia viene attribuito un valore numerico all'indice di settore che formalizza il criterio. La gerarchia deve sempre es-

sere trasparente e ripercorribile. La non unicità dei criteri rende necessario il confronto tra i Portatori di interesse poiché ognuno ha una propria scala di importanza: questo avviene durante la negoziazione, la fase deputata alla gestione diretta del conflitto. Nel caso in cui il decisore sia unico ma si sia comunque in presenza di più criteri chi ha il compito di prendere la decisione deve esprimere e soprattutto motivare giudizi di importanza relativa. In molti casi è necessario operare dei distinguo tra gli effetti dell'alternativa misurata in transitorio, mentre il sistema si adatta alla nuova situazione, o a regime: è una decisione che va presa valutando il singolo caso se esiste un rischio concreto che i disagi dovuti alla realizzazione dell'alternativa in transitorio siano tali da renderla poco attrattiva. Altrimenti in genere si considerano gli effetti a regime. Infine occorre associare a ogni alternativa un vettore di indici, risultanti dalla riaggregazione degli indicatori risalita la gerarchia dei criteri , in modo che il Portatore di Interesse possa confrontare tra loro i possibili interventi e ottenere un ordinamento delle alternative. È fondamentale che il Decisore venga coinvolto attivamente nel corso di tutto il lavoro perché deve riconoscere negli obiettivi, nei criteri e negli indicatori l'espressione della propria soggettività: infatti, tranne alternative oggettivamente peggiori di altre, al termine si arriverà alla scelta tra soluzioni per cui non saranno più possibili singoli miglioramenti se non a discapito delle altre. Spesso il portatore di interesse si avvale della consulenza di esperti di settore che lo supportano nei vari passaggi, anche finali. La scelta delle gerarchie di valutazione e della definizione degli indicatori devono essere guidate dallo scopo del progetto. Per coerenza nei passi futuri, realizzazione della politica di regolazione, e per l'interezza della progettazione è necessario che gli indicatori siano compresi negli obiettivi del progetto.

3.2 Le azioni, le variabili di decisione e gli insiemi di ammissibilità delle variabili.

Nel definire le opzioni di intervento per il caso dell'Isola di Nauru occorre considerare che lo studio della situazione sull'isola è in una fase iniziale: fino ad ora si è ricostruito il modello idrogeologico concettuale dell'isola con l'intento di studiare il comportamento della falda sottostante e il fenomeno dell'intrusione salina nella lente di acqua dolce che si vuole sfruttare.

Nella scelta dei possibili interventi è necessario tener presente che l'ambito entro il quale ci si muove è molto vasto e non può contare su grandi precedenti nella storia dell'isola: questa fino ad oggi ha sopperito alle proprie necessità idriche sfruttando un impianto di desalinizzazione dell'acqua di ma-

re il cui utilizzo ha cessato di essere conveniente per gli alti costi di esercizio da sostenere, soprattutto il costo dell'energia dal momento che il carburante è da importare, o acquistando acqua in bottiglia dall'esterno, principalmente dall'Australia. E' noto che sull'isola è presente una lente di acqua dolce che il governo intende sfruttare come nuova principale fonte di approvvigionamento, per ridurre i costi legati alla depurazione delle acque di mare e per rendere l'isola autonoma nel soddisfacimento delle proprie necessità. L'obbiettivo di utilizzare la falda per l'approvvigionamento idrico pone principalmente due problemi: uno relativo alla gestione della risorsa e l'altro alla posizione della riserva d'acqua, situata in prossimità dell'Oceano. Lo sfruttamento della lente d'acqua dolce deve essere sostenibile e studiato accuratamente, poiché l'unica possibilità di ricarica della falda sono le precipitazioni, che interessano l'isola principalmente nei mesi da novembre a marzo, garantendo una moderata piovosità media annua anche se Nauru non è estranea a fenomeni siccitosi causati principalmente da La Nina. Secondariamente, occorre cercare di proporre soluzione al fenomeno dell'upconing cioè la risalita di un cuneo di acqua salata come risultato dell'intrusione di acqua di mare nell'acquifero costiero.

Dal momento che esiste già un pozzo per l'estrazione dell'acqua dolce dall'acquifero pronto per entrare in funzione si è deciso di iniziare l'analisi cominciando dagli elementi già presenti. Il primo problema cui si tenta di porre rimedio è quello dell'intrusione salina, poiché la risalita del cono di acqua salata provocherebbe l'immediato fermo del pozzo per l'emungimento dalla falda con conseguenti danni per la collettività sia a livello economico che di vivibilità della situazione. Il problema relativo alla gestione è perciò rimandato, anche perché molto dipenderà da ciò che si riuscirà a ottenere dalla prima fase del lavoro. Una via praticabile in questo senso è quella di proteggere il pozzo per l'emungimento dell'acqua dolce con l'utilizzo di un secondo pozzo che estragga l'acqua salata prima che questa arrivi a invadere l'area coperta dall'acquifero costiero.

Le azioni proposte riguardano pertanto l' inserimento di pozzi barriera, almeno uno al principio.

Da un punto di vista operativo si tratterà di individuare il corretto posizionamento del pozzo barriera e il suo dimensionamento, in termini di portata da estrarre. Quest'ultimo aspetto infatti si presenta come particolarmente delicato: in base a quanto detto in precedenza si è portati a pensare che la soluzione del problema sia l'estrazione di grandi portate di acqua salata da parte del pozzo messo come barriera, così da arrivare a un consistente abbassamento del"interfaccia tra acquifero e acqua marina che eviterebbe il rischio che il pozzo che estrae acqua dolce raggiunga con il suo raggio di influenza l'acqua di mare. Tuttavia questa strada non è praticabile per due

motivi: il primo è rappresentato dai costi di funzionamento del pozzo barriera che diventerebbero troppo onerosi da sostenere, forse tanto da far sembrare attraente l'ipotesi di mantenimento in funzione dell'impianto di desalinizzazione; ma oltre alla motivazione economica ce n'è una di natura fisica, infatti si è verificato che l'estrazione di eccessive portate di acqua salata porterebbe a un richiamo di acqua dolce da parte del pozzo barriera, annullandone l'azione positiva di difesa.

In relazione alle azioni si stabiliscono le variabili di decisione:

- portata estratta dal pozzo per il prelievo dell'acqua salata ;
- distanza lineare, o longitudine, del pozzo che preleva acqua salata dal pozzo di acqua dolce per quanto riguarda la posizione;

Questo se si considera un solo pozzo per l'estrazione dell'acqua dolce accoppiato a un solo pozzo per l'acqua salata, ma nulla vieta, se lo sviluppo dello studio lo consiglia, di aumentare il numero di pozzi barriera, cioè la coppia data dal pozzo che estrae dall'acquifero costiero e l'acqua marina: in questo caso il numero delle variabili aumenta sia per il numero che per la configurazione, intesa come posizione rispetto alla costa, dei pozzi barriera (con più pozzi si aggiunge la coordinata che indica la latitudine).

Nel formulare queste istanze di lavoro si è tenuto di alcune ipotesi: la prima riguarda il pozzo per l'estrazione dell'acqua dolce già presente la cui portata estratta dal relativo pozzo e la relativa profondità di prelievo sono considerate come dati del problema; poi per valutare il posizionamento del pozzo per l'acqua salata si considera la forma dell'isola e solo la zona pianeggiante, e si posiziona il pozzo barriera tra il pozzo per l'acqua dolce e la costa. In base alla configurazione più comunemente utilizzata si associa un pozzo che preleva acqua salata a ciascun pozzo di prelievo dell'acqua dolce come protezione.

Si considera un insiemi di ammissibilità delle variabili di decisione che rispetti le seguenti condizioni, inizialmente considerate come costanti:

- portata del pozzo di acqua dolce: 1 l/s;
- profondità del pozzo di acqua dolce: circa 2 m al di sotto del livello del mare rispetto al datum di Nauru ;
- concentrazione salina massima ammissibile: 1500 mg/l (corrispondente a $EC = 2200 \mu S/cm$). È la soglia che divide l'acqua salmastra da quella dolce, in termini in solidi totali disciolti;

La scelta di questi valori non è casuale ma dipende dall'interazione con un esperto di settore e da esperimenti svolti: l'acqua dolce estratta è leggermente sovradimensionata rispetto al fabbisogno idrico degli abitanti; la profondità di estrazione dell'acqua dolce è stata trovata empiricamente. Di conseguenza sono stati stabiliti i parametri relativi al pozzo per l'estrazione di acqua di mare:

- portata di acqua salata, ad es. il doppio dell'attuale prelievo (2 l/s) o equivalente alla massima portata d'acqua dolce estraibile rispetto alla dimensione del pozzo, che varia da 1 a 4 l/s con un passo di 0.25 l/s, tasso di estrazione al di sotto del quale non si percepiscono cambiamenti. La portata salata estratta può arrivare a un valore massimo di 8 l/s;

- profondità estrazione acqua salata: da 2.5 a 4 m sotto isoalina interfaccia, tra i 12 e i 16 m al di sotto del livello del mare rispetto al datum di Nauru.

L'insieme delle alternative è dato dalle possibili combinazioni per mettere in relazione la portata di acqua salata da estrarre e la posizione dei pozzi barriera.

3.3 Criteri e Indicatori.

La problematica principale per Nauru è il rifornimento di acqua potabile. Attualmente come si è già detto sull'isola è in funzione un impianto di desalinizzazione di acqua di mare che presenta costi molto elevati e la differenza tra l'acqua depurata e la richiesta della popolazione viene sopperita dall'acquisto di acqua in bottiglia importata dall'Australia: si vorrebbe sostituire questo sistema di rifornimento con uno più economico. Dal momento che è stata rilevata una lente di acqua dolce nel sottosuolo dell'isola se ne è proposto lo sfruttamento ai fini dell'approvvigionamento idrico, inoltre in corrispondenza della lente è già presente un pozzo per l'estrazione di acqua: tale pozzo è considerato il primo da utilizzare poiché è già predisposto anche se non è ancora entrato in funzione stabilmente per l'emungimento di acqua ad uso potabile. Come importante valore aggiunto l'utilizzo della risorsa interna, rappresentata dall'acqua dolce presente nella falda costiera, permetterebbe all'isola di affrancarsi almeno in parte dalla dipendenza dalle importazioni: l'acquisto sia dell'acqua in bottiglia sia delle risorse energetiche per il funzionamento dell'impianto, in quanto Nauru non possiede giacimenti di petrolio o di altre materie prime. La preoccupazione principale del governo di Nauru

è legata alla possibilità di intrusione salina nel cono di richiamo del pozzo data la notevole vicinanza delle lente di acqua dolce alla costa e quindi all'oceano. La soluzione proposta per questo problema è la messa a punto di un sistema di pozzi *scavenger*, o spazzini, messi a protezione del sistema di pompaggio dell'acqua dalla lente nel sottosuolo: tali pozzi *scavenger* dovrebbero intercettare l'acqua salata prima che possa miscelarsi con quella dolce e comprometterne l'uso.

Si è deciso quindi di valutare l'efficacia della soluzione proposta per lo sfruttamento della falda in base a due criteri: uno di natura fisica relativo al rischio di intrusione dell'acqua di mare nell'estrazione di acqua dolce, l'altro di natura economica legato ai costi della messa in funzione del sistema di pozzi *scavenger*. Operativamente sono stati formulati due corrispondenti indicatori:

1. Concentrazione_Limite;
2. Costo_Spazzino.

3.3.1 Concentrazione_Limite

Si vuole valutare l'efficacia del sistema di pozzi *scavenger*. Lo scopo di tale difesa è che l'acqua dolce pompata dal relativo pozzo non venga compromessa da intrusioni saline che comporterebbero il fermo dell'attività di estrazione: quindi si decide monitorare quantitativamente i fenomeni indesiderati. L'indicatore valuta la media e il massimo dei superamenti, intesi come episodi in cui la concentrazione salina nell'acqua estratta dal pozzo per l'acqua dolce supera un valore limite stabilito di salinità. Il superamento è calcolato secondo una formula che restituisce i valori di concentrazione salina che superano il limite stabilito [1,5 kg/m3]:

$$Sup_Soglia_Conc = Concentrazione - Concentrazione_max \tag{3.1}$$

dove:

- Concentrazione_max: limite di concentrazione salina in acqua da non superare poiché al di sopra l'acqua non è più considerata dolce ma di mare in [kg/m3];
- Sup_Soglia_Conc: verifica l'esistenza del fenomeno di superamento dato dalla differenza tra il valore di concentrazione salina presente nell'acqua estratta dal pozzo per l'acqua dolce e il limite massimo consentito di salinità, in [kg/m3];

- Concentrazione: valori di concentrazione salina per il pozzo di acqua dolce in [kg/m3]. I pozzi sono composti da due filtri che pescano l'acqua in due *layer* , per l'acqua dolce il primo e il secondo, poi l'acqua viene rimescolata. La concentrazione considerata è data dalla media pesata sulla portata estratta in base a un rapporto determinato dalle caratteristiche dell'acquifero, principalmente la permeabilità.

Si calcola in base alla formula:

$$Concentrazione = \frac{(c_L1 * q_L1 + c_L2 * q_L2)}{(q_L1 + q_L2)} \tag{3.2}$$

dove:

- c_L1,c_L2: concentrazione salina nel *layer* 1 e 2 rispettivamente, in [kg/m3] ;
- q_L1,q_L2: portate estratte dal *layer* 1 e 2, scalari in [m3/d] o [l/s];

se non si conoscono le singole portate ma la portata totale estratta si considera:

$$q_dolce = q_L1 + q_L2 \tag{3.3}$$

dove:

- q_dolce: portata complessiva estratta dal pozzo per l'acqua dolce S1, scalare in [m3/d] o [l/s].

Quindi, in base al rapporto fisso per i primi due *layer* pari a 0,989 (ricavato empiricamente nota la permeabilità):

$$q_L1 = \frac{q_dolce}{(1 + rap_cost)} \tag{3.4}$$

$$q_L2 = rap_cost * q_L1 \tag{3.5}$$

- rap_cost: rapporto costante di estrazione tra i primi due *layer* , dipende dalla permeabilità dell'acquifero quindi può cambiare con la profondità. Per il *layer* 1 e 2 è $rap_cost = \frac{q_L2}{q_L1}$ pari a 0.989.

Una volta individuati i fenomeni critici di superamento se ne calcolano media e massimo, per controllarne l'andamento generale e i gli eventi maggiormente problematici che si vogliono contrastare con il sistema di pozzi *scavenger*.

$$I_ave = \frac{1}{N}\sum(Sup_Soglia_Conc) \tag{3.6}$$

$$I_max = \max(Sup_Soglia_Conc) \tag{3.7}$$

dove:

- I_ave: valor medio dei superamenti in [kg/m3];
- I_max: valor massimo dei superamenti in [kg/m3];

L'indicatore non considera la durata temporale del fenomeno critico, ne valuta solo gli aspetti quantitativi. Per la ricerca delle alternative Pareto - efficienti viene utilizzato l'indicatore che calcola la media degli episodi di superamento del limite, poiché si considera più significativo tenere conto l'andamento medio del fenomeno.

3.3.2 Costo_Spazzino

L'indicatore calcola i costi complessivi da affrontare per la costruzione e il mantenimento in funzione del sistema di pozzi *scavenger*. Il costo complessivo è dato dalla somma di due elementi: il costo fisso e i costi di gestione, da moltiplicare per il numero di pozzi *scavenger*, che hanno tutti uguali caratteristiche cioè estraggono la stessa portata. Il primo, costo fisso, è proporzionale alla profondità di scavo da raggiungere moltiplicata per il costo di realizzazione dello scavo:

$$Costo_fisso = C_fix * z \tag{3.8}$$

dove:

- Costo_fisso: costo sostenuto per la costruzione del pozzo [€];
- C_fix: costo per metro di scavo in [/m] ;
- z: profondità di estrazione acqua per il pozzo *scavenger*. Ogni pozzo è costituito da due filtri che pescano ciascuno da un *layer* , ad esempio uno dal settimo e l'altro dall'ottavo, perciò si considera la massima profondità di scavo in [m];

I costi di gestione sono determinati dalla potenza necessaria al funzionamento del sistema per il periodo di funzionamento del pozzo e il costo dell'energia. La potenza si calcola moltiplicando la portata totale estratta

dal pozzo *scavenger* per l'efficienza della pompa, la densità dell'acqua, l'accelerazione di gravità e la prevalenza idraulica. Quest'ultima rappresenta la quota che il pompaggio deve superare per l'emungimento dell'acqua di mare: si ottiene come differenza tra la quota del piano campagna e l'altezza della tavola d'acqua dell'acquifero che in questo caso è un acquifero libero. In formule:

$$P = \gamma * g * q_salata * \delta_H * \frac{\eta}{1000} \tag{3.9}$$

$$\gamma = \frac{(\gamma_dolce + \gamma_salata)}{2} \tag{3.10}$$

$$Durata_Scenario = 5 * 365 \tag{3.11}$$

$$\delta_H = p.c. - carico \tag{3.12}$$

Quindi:

$$Costo_Gestione = P * Ce_uni * Durata_Scenario * h_pozzo \tag{3.13}$$

$$3600kJ = 1kWh \tag{3.14}$$

dove:

- Costo_Gestione: costo sostenuto per la gestione del pozzo per il periodo di durata della simulazione, in [€];
- P: potenza necessaria per il funzionamento del pozzo in [kJ/s];
- q_salata: portata estratta dal pozzo spazzino in [m3/s];
- carico: altezza in [m] della tavola d'acqua rispetto al piano campagna per il calcolo della prevalenza idraulica, si considera l'altezza della tavola d'acqua del primo *layer* poiché quello di Nauru è un acquifero libero;
- Ce_uni: costo unitario dell'energia [€/kWh];
- γ_dolce: densità acqua dolce in [kg/m3];
- γ_salata: densità acqua salata in [kg/m3];
- γ: media tra la densità dell'acqua di mare e l'acqua dolce in [kg/m3];

- g: accelerazione di gravità in [m/s2];
- η: efficienza del sistema di pompaggio [%];
- Durata_Scenario: durata dello scenario di simulazione in [d] dato da $5a * 365d/a$ dove 5 anni è la durata del periodo di funzionamento del pozzo;
- h_pozzo: ore di funzionamento del pozzo al giorno in [h/d];
- p.c.: quota del piano campagna [m];
- δ_H: prevalenza idraulica da vincere per l'estrazione della portata d'acqua del pozzo *scavenger*, in [m];

Complessivamente:

$$Costi_Tot = (Costo_Fisso + Costo_Gestione) * n_scav \tag{3.15}$$

dove

- Costi_Tot: costo sostenuto per la costruzione e la gestione del pozzo in [€];
- n_scav: numero di pozzi *scavenger*, hanno tutti le medesime caratteristiche cioè estraggono tutti la medesima portata [-].

Il costo per metro di scavo e quello dell'energia, l'efficienza e la durata dei pozzi così come il tempo di funzionamento al giorno sono parametri che nel tempo potrebbero subire modifiche, ad esempio per motivi legati al prezzo del petrolio, quindi possono essere cambiati per eseguire in futuro analisi di sensitività.

Capitolo 4

Il Modello

La modellazione serve a quantificare, esprimendoli tramite indicatori, gli effetti che le differenti alternative produrrebbero sul sistema se implementate. I modelli matematici sono lo strumento più usato per la loro chiarezza: essi descrivono le relazioni di causa effetto che intervengono nel caso di studio. Il livello di dettaglio scelto dipende dalle informazioni a disposizione, dalle opzioni di intervento scelte, dagli indicatori. Le variabili di ingresso del modello comprendono i parametri che quantificano gli attributi delle azioni e i valori delle variabili che descrivono e condizionano il sistema: i primi sono l'oggetto delle decisioni da prendere, mentre le seconde non dipendono dalla volontà del decisore o dell'analista e non possono esserne condizionate ma costituiscono lo sfondo sul quale vengono valutati gli effetti delle alternative, sono lo scenario di progetto.

Come già accennato, il ruolo dell'indicatore è fornire una misura della soddisfazione del portatore di interesse rispetto al criterio di riferimento. L'indicatore operativamente è spesso un funzionale delle traiettorie delle variabili d'uscita che definiscono lo stato del sistema istante per istante per effetto di un'alternativa. Tale traiettoria è generata dall'applicazione dell'alternativa stabilita su un modello del sistema di cui si vuole verificare il comportamento.

4.1 Identificazione del modello

L'identificazione del modello è la 3°fase della procedura PIP (*Partecipated Integrated Procedure*). In ogni caso, il processo di modellizzazione è guidato dallo scopo per cui il modello viene realizzato, in genere o la stima degli effetti che un'alternativa produrrà o la previsione di eventi futuri sulla base di conoscenze note al momento di prendere la decisione. Il primo passo, o con-

cettualizzazione, consiste nell'individuare gli aspetti rilevanti del problema e che si prestano a essere formalizzati, riconoscere le relazioni di causa-effetto che collegano tali elementi, ricostruire la rete causale e rappresentare quantitativamente le relazioni riconosciute. La forma del modello dipende dalle conoscenze a disposizione: ad esempio, i modelli meccanicisti si prestano bene all'utilizzo se si hanno a disposizione teorie e informazioni sulla natura fisica del sistema, anche se questa loro maggior accuratezza li rende più complessi soprattutto in fase di calcolo. Una volta definito il meta-modello, cioè una struttura che si adegua a più istanze ugualmente descrivibili simili al sistema, occorre specificare il valore dei parametri, variabili introdotte apposta per il caso specifico: questa fase è detta taratura o stima parametrica. La taratura avviene in genere confrontando i valori di uscita del sistema reale, misurati in corrispondenza dei relativi ingressi, con quelli stimati dal modello in corrispondenza dei medesimi ingressi: l'obiettivo è fare in modo che la distanza tra modello e realtà sia minima. In seguito all'identificazione del modello ,dall'unione di concettualizzazione e taratura che da sole non sono sufficienti, è necessario far seguire la validazione per verificare che il modello sia in grado di riprodurre dati di ingresso-uscita altri rispetto a quelli usati in taratura. Il presupposto per l'affidabilità di identificazione e successiva verifica è la disponibilità di un quantitativo di dati rappresentativo della situazione o meglio che coprano in maniera uniforme i valori per gli ingressi e le uscite nelle condizioni che il modello deve riprodurre. Superata la fase di validazione il modello è pronto per essere usato.

4.1.1 La relazione tra modello e indicatori.

Il modello ha lo scopo di fornire le traiettorie delle variabili definite per il calcolo degli indicatori, che rappresentano le uscite del modello stesso. Gli indicatori esprimono dei costi, o benefici, su di un orizzonte temporale che corrisponde alla durata della simulazione, cioè del tempo in seguito al quale si vuole valutare l'effetto dell'applicazione dell'alternativa al sistema. L'indicatore fornisce la misura della prestazione del sistema in esame in base al criterio di fondo come combinazione delle singole prestazioni: queste sono dunque componenti di una qualche uscita del sistema. L'indicatore per passo può sempre essere visto come trasformazione d'uscita del modello che descrive il settore cui si riferisce il portatore di interesse, settore da includere tra i componenti del sistema. Sulla natura degli indicatori è noto che se il sistema è affetto da disturbo casuale anche l'indicatore sarà tale, ma in questo caso non si presterà a creare un ordinamento tra le alternative proprio per la sua natura aleatoria. E' necessario rendere l'indicatore deterministico assumendo come valore da prendere una sua statistica rispetto a tutte le possibili realizzazioni

delle traiettorie dei disturbi da filtrare e non direttamente l'indicatore. La scelta di tale statistica è vincolata alle esigenze del portatore di interesse e ai suoi criteri di giudizio. L'indicatore così ottenuto nelle fasi successive viene anche detto obiettivo per sottolineare la sua funzione di valutazione degli effetti dei risultati. L'identificazione degli indicatori, cioè la definizione dei funzionali che li specificano, comincia nella fase 2 in cui si stabiliscono criteri e indicatori e si conclude in fase 3 della procedura con l'identificazione del modello del quale i risultati degli indicatori rappresentano una componente. Infatti sovente alcuni elementi degli indicatori, spesso di natura parametrica, dipendono dalla forma del modello ed è bene stimarli contestualmente al modello del sistema, o ad alcuni suoi componenti, di cui costituiscono parte dell'uscita.

Affinché il modello mantenga le capacità predittive è necessario che il sistema modellizzato mantenga le proprie caratteristiche invariate nel tempo: il mantenimento di questa condizione permette che i dati raccolti spieghino quello che avverrà nel futuro. Il sistema deve quindi essere stazionario con parametri tempo-invarianti o perlomeno ciclostazionario, i cui parameri variano sì nel tempo ma con periodicità, o ciclo-ergodico, come i sistemi naturali . In questo modo il futuro è statisticamente indistinguibile dal passato e il modello , identificato sui dati del passato, riesce a spiegare situazioni future. In sintesi, se la struttura interna del sistema si modifica nel tempo, le stime di probabilità delle uscite non forniscono stime di probabilità affidabili per le condizioni future. In mancanza di questa possibilità le possibili alternative sono, ad esempio, identificare un modello che spieghi l'evoluzione del disturbo, operazione molto complessa, o, in assenza di opere da dimensionare tra le possibili azioni, identificare un modello che si presti a trattare il disturbo progettando la politica di regolazione in funzione di questo e ripetere l'operazione daccapo qualora ci si accorga che la natura del disturbo si è modificata. Il problema gestionale segue la fase di pianificazione, e si risolve definendo una politica di regolazione cioè una successione di leggi di controllo, funzioni ,il cui argomento è lo stato del sistema in questione. Per dare senso a questa operazione lo stato del sistema deve essere misurabile e tutti i modelli dei componenti devono essere espressi in forma interna: queste due condizioni non sono sempre verificate, in particolare lo stato potrebbe addirittura non essere definito qualora il modello fosse descritto in forma esterna, ma può in ogni caso essere stimato con una misura dell'uscita del sistema. Concludendo, la progettazione e l'utilizzo di politiche di gestione richiede la risoluzione delle seguenti problematiche: di stima dello stato non altrimenti misurabile date le traiettorie di ingresso e uscite delle variabili; di realizzazione minima, se si ha un modello in forma esterna che richiede di trovarne uno in forma interna con il minor numero sufficiente di variabili di stato per non eccede-

re nei tempi di calcolo. E' importante che tutte queste questioni una volta individuate vengano affrontate subito , nella fase di definizione del modello che viene usato sia per la pianificazione che per la gestione; diversamente si corre il rischio di perdere unità e coerenza proseguendo nella realizzazione della procedura.

4.2 Il Codice di Calcolo

L'acqua di falda contiene costituenti disciolti, come i sali che si trovano comunemente nell'acqua di mare in caso di acquiferi costieri. I costituenti disciolti a concentrazioni relativamente basse non influiscono sostanzialmente sulla densità del fluido, diversamente accade se la massa dei sali disciolti in soluzione cresce in concentrazione. I metodi matematici per quantificare il flusso sotterraneo sono relativamente semplici se le variazioni spaziali di densità sono limitate, indipendentemente dal valore assoluto. Al contrario in caso di considerevoli variazioni spaziali di densità, come accade negli acquiferi costieri, quantificare il flusso è più complicato dal momento che tali variazioni influiscono significativamente sul flusso stesso. In molte di queste situazioni idrogeologiche è necessaria un'accurata rappresentazione del flusso sotterraneo a densità variabile. Si consideri che negli acquiferi costieri esiste una zona di transizione tra acqua dolce che scorre verso l'oceano e acqua di mare salata che tende a muoversi verso l'entroterra: attraverso questa zona a concentrazione variabile, la densità del fluido può crescere da quella di acqua dolce (circa 1000 kg m-3) a quella di acqua di mare (circa 1025 kg m-3), ovvero un incremento del 2,5%. Osservazioni di campo e analisi matematiche dimostrano il peso che questa minima variazione di densità ha sulle caratteristiche del flusso.

Il codice di calcolo rappresenta l'insieme comandi delle equazioni utilizzate nella risoluzione di un modello matematico numerico con l'uso di un PC. Nello svolgimento dello studio precedente si è usato il codice SEAWAT2000 il quale permette la simulazione del flusso e del trasporto densità-dipendenti, come accade in acquiferi costieri, accoppiando MODFLOW (codice alle differenze finite per la simulazione del flusso di falda) e MT3D (codice per la simulazione del trasporto di soluto in un fluido). Essendo un codice di calcolo complesso SEAWAT2000 viene impostato attraverso un'interfaccia grafica, Groundwater Vistas 4 (ESI, 2004), che permette introduzione di parametri, composizione della griglia, simulazione e visualizzazione dei risultati.

4.2.1 Equazioni per il flusso sotterraneo e di conservazione della massa.

Il flusso sotterraneo è descritto dalla legge di Darcy e da un'equazione di bilancio di massa. Per quanto riguarda la legge di Darcy si consideri che in condizioni idrostatiche il gradiente di pressione esiste solo in direzione verticale, ovvero parallelamente all'accelerazione gravitazionale. Questo vale solo in caso di peso specifico dell'acqua costante ma in caso di flusso sotterraneo, quindi in condizioni non idrostatiche, l'equilibrio è dinamico e il gradiente di pressione si muove in più direzioni e occorre introdurre un termine che definisce il carico idraulico e tener presente elementi quali la velocità di flusso e la viscosità dinamica del fluido tra le forze in gioco. L'equazione di Darcy nella forma base è:

$$\bar{q} = -\bar{K}\nabla h \tag{4.1}$$

dove:

- $\bar{q}$: vettore che rappresenta la portata specifica (inteso come volume che attraversa in direzione normale una sezione in unita di tempo) [l/t];
- ∇: operatore gradiente ;
- h: carico idraulico derivato in tutte le direzioni;
- $\bar{K}$: tensore di secondo grado che esprime la conducibilità idraulica [l/t].

Si afferma che in base al principio di conservazione della massa per fluido e soluto, il tasso di accumulo della massa immagazzinata in un volume elementare è uguale alla somma algebrica dei flussi di massa attraverso le facce dell'elemento e lo scambio di massa dovuto a ingressi o uscite. L'espressione per la conservazione della massa [Guo et al., 2002] è :

$$-\nabla(\rho\bar{q}) + \bar{\rho}q_s = \frac{\delta(\rho\theta)}{\delta t} \tag{4.2}$$

dove:

- ρ: densità del fluido [m/l3];
- $\bar{\rho}$: densità dell'acqua entrante da una fonte o uscente attraverso una perdita;
- q_s: portata volumetrica per unità di volume dell'acquifero, rappresenta fonti o perdite [m/l3] ;

- θ: porosità [-];

La parte sinistra dell'equazione rappresenta il flusso netto di massa entrante attraverso le facce del volume di controllo; la parte destra è il tasso temporale di cambio nella massa immagazzinata nel volume su un dato periodo ed è funzione della densità del fluido e della porosità del materiale attraversato. I cambi di porosità considerati dipendono dalle variazioni di pressione del fluido; la densità del fluido, in condizioni isoterme, dipende dalla pressione sui pori e dalla concentrazione del soluto. A questo si aggiunga il termine che indica l'immagazzinamento nel volume di controllo definito in base a porosità, pressione e comprimibilità, che dipende da densità e pressione, del materiale poroso. La combinazione di questi elementi porta all'equazione finale che rappresenta la forma generale dell'equazione alle derivate parziali per un flusso di falda a densità variabile in un mezzo poroso:

$$-\nabla(\rho\bar{q}) + \bar{\rho}q_s = \rho S_p \frac{\delta P}{\delta t} + \theta \frac{\delta \rho}{\delta C}\frac{\delta C}{\delta t} \tag{4.3}$$

dove:

- S_p: immagazzinamento specifico in termini di pressione [mlt2]
- P: pressione sui pori [m/lt2] ;
- C: concentrazione del soluto [m/l3].
- t: tempo [t];

4.2.2 Equazioni del flusso e trasporto densità-dipendente e per il trasporto di soluto.

Lo sviluppo matematico è basato sull'ipotesi abituale che sia valida la legge di Darcy di flusso laminare. L'espressione standard per l'immagazzinamento specifico in un acquifero confinato è cosi applicabile come l'approccio diffusivo al trasporto dispersivo (basato sulla legge di Fick). Si ipotizzano condizioni isoterme ed il mezzo poroso è assunto come pienamente saturo d'acqua; come ultima ipotesi si assume che vi sia una sola fase liquida completamente miscibile di bassa compressibilità.

SEAWAT è basato sul concetto di carico d'acqua dolce o carico equivalente d'acqua dolce.

Per comprendere l'argomento si considerino due piezometri con filtro in un punto dato N in acquifero contenente acqua salata. Il piezometro A contiene acqua dolce ed è equipaggiato con un meccanismo che previene la

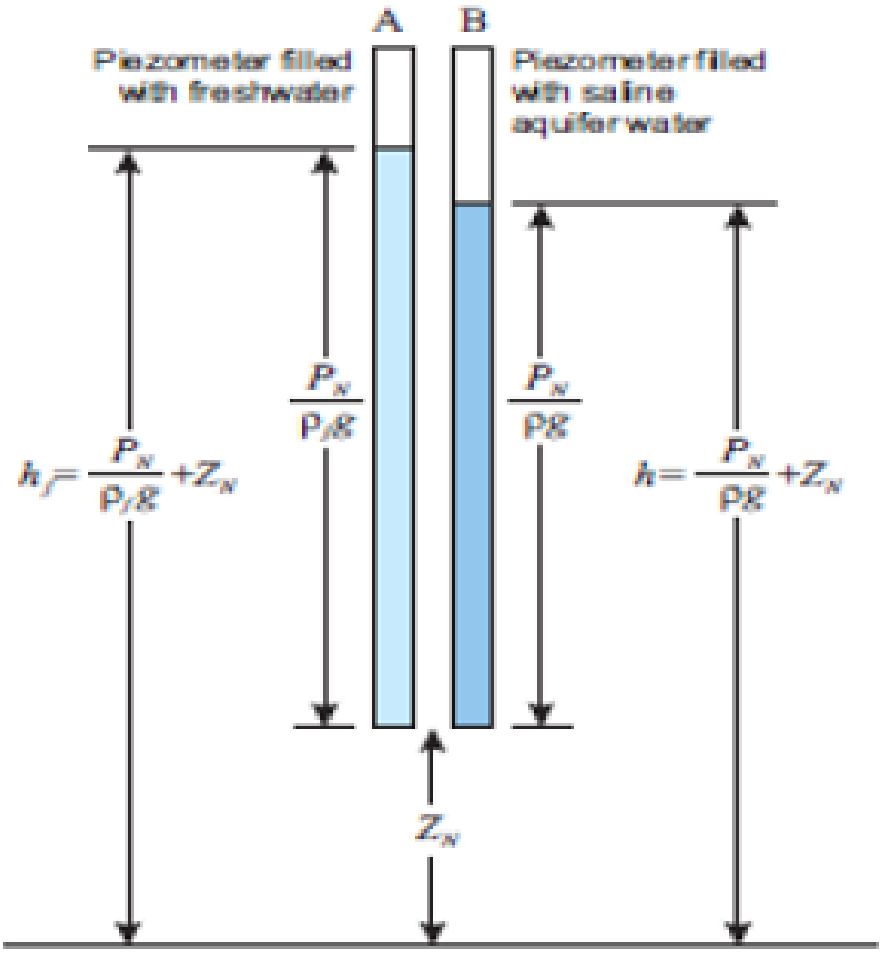

Figura 4.1: Due piezometri, uno riempito con acqua dolce e l'altro con acqua dall'acquifero salino, filtrati nello stesso punto nell'acquifero

miscibilità dell'acqua salata in acquifero con l'acqua dolce nel piezometro, mentre permette al piezometro di rispondere adeguatamente alla pressione nel punto N. Il piezometro B contiene acqua della stessa tipologia di quella presente nell'acquifero in N. La quota del tavolo d'acqua nel piezometro A rispetto al punto N è $\frac{P_N}{\rho_f g}$. Il carico d'acqua dolce al punto N è l'elevazione del tavolo d'acqua al piezometro A rispetto al livello di riferimento:

$$h_f = \frac{P_N}{\rho_f g} + Z_N \tag{4.4}$$

dove :

- h_f: carico equivalente d'acqua dolce [l];
- P_N: pressione al punto N [m/lt2];
- ρ_f: densità d'acqua dolce [m/l3];
- g: accelerazione di gravita [l/t2] ;
- Z_N: quota del punto N rispetto al datum [l].

Si ha convenienza nel calcolo per l'applicazione del software se il carico d'acqua dolce è definito in tutti i punti dell'acquifero affinché siano definite in ogni punto dell'acquifero pressione e quota; non si vuole che le misure di campo siano fatte in termini di carico d'acqua dolce. L'elevazione del livello d'acqua nel piezometro B rispetto a N è $\frac{P_N}{\rho g}$. Il carico espresso in termini di acquifero salino è il livello nel piezometro B rispetto al datum, ovvero:

$$h = \frac{P_N}{\rho g} + Z_N \tag{4.5}$$

dove:

- h: carico [l];
- ρ: densità dell'acqua salata in N [m/l3].

Il carico h varia in base a pressione, quota e densità: per due punti con uguale pressione e quota, ma con differente densità, si hanno carichi differenti. La formulazione dell'equazione di flusso in termini di carico di acqua dolce, piuttosto che di carico, permette l'uso di software, come MODFLOW, con relative piccole modifiche senza eccessive complessità computazionali. I valori calcolati dal programma SEAWAT nella simulazione a densità variabile sono valori di carico d'acqua dolce corrispondenti al livello nel piezometro A dell'esempio. Possono essere usati in una forma a densità variabile della

legge di Darcy per calcolare flussi volumetrici di falda. Bisogna prestare attenzione perché il valore calcolato del carico d'acqua dolce in un dato punto dell'acquifero non rappresenta il livello al quale l'acqua salata salirebbe in un piezometro filtrato in quel punto: l'acqua di falda salirà al livello di carico reale. Le conversioni tra carico reale misurato dall'acqua di falda e carico equivalente d'acqua dolce sono perciò necessarie nel convertire i risultati del modello o i dati di campo, sia nella calibrazione del modello sia nell'interpretazione dei risultati ottenuti. Con la versione SEAWAT2000 i valori di carico in input e output sono espressi in termini di carico reale dell'acquifero, o carico ambientale: il codice di calcolo converte i carichi di input in carico equivalente d'acqua dolce e in seguito all'ottenimento della soluzione delle equazioni di flusso e trasporto accoppiate,con carichi in termini di carico equivalente, che il programma utilizza riconverte i carichi equivalenti in carichi ambientali attraverso le densità. Inoltre la legge di Darcy e l'equazione del flusso sotterraneo possono essere espresse anche in termini di carico d'acqua dolce e, in conclusione, il codice di calcolo SEAWAT usa l'equazione del flusso a densità variabile scritta in termini di carico d'acqua dolce.

In aggiunta all'equazione di flusso sviluppata è richiesta un'altra equazione alle differenze parziali per descrivere il trasporto del soluto nell'acquifero. La massa di soluto è trasportata nel mezzo poroso da processi di advezione, diffusione molecolare e dispersione meccanica.

$$\frac{\delta C}{\delta t} = \nabla(D * \nabla C) - \nabla(\bar{v}C) - \frac{q_s}{\theta}C_s + \sum_{k=1}^{N} R_k \tag{4.6}$$

dove:

- h: carico [l];
- ρ: densità dell'acqua salata in N [m/l3].

dove:

- D: coefficiente di dispersione idrodinamica [l2/t];
- $\bar{v}$: velocità del fluido [l/t];
- C_s: concentrazione di soluto dell'acqua entrante da fonti o uscente da perdite [m/l3];
- R_k (k=1, ..., N):l tasso di produzione o decadimento di soluto nella reazione k di N differenti reazioni [m/l3t].

Il flusso sotterraneo causa una ridistribuzione della concentrazione di soluto, la quale a sua volta provoca un'alterazione del campo di densità che comporta variazioni nel movimento dell'acqua sotterranea: il movimento dell'acqua ed il trasporto dei soluti nell'acquifero sono processi accoppiati e le due equazioni devono essere risolte congiuntamente.

Nell'implementazione del modello con il sw le condizioni al contorno devono essere specificate per risolvere le equazioni differenziali di flusso e di trasporto in un problema particolare e sono di fondamentale importanza poiché rappresentano il collegamento tra il modello reale e quello simulato. Le condizioni al contorno matematiche sono solitamente divise in tre categorie: Dirichlet (carico o concentrazione costante), Neumann (flusso specificato) e Cauchy (flusso dipendente da carico o condizione al contorno mista). Le caratteristiche fisiche ed i processi che impongono le condizioni al contorno o regimi di flusso sotterraneo normalmente includono corsi d'acqua ed altri corpi d'acqua superficiali, dreni, confini a bassa permeabilità, facce d'infiltrazione, evapotraspirazione, pozzi di estrazione, di iniezione e ricarica. Nella teoria a proposito della simulazione, molte delle condizioni al contorno sono generalmente implementate attraverso il termine di ingresso/uscita nelle equazioni. Le condizioni iniziali rappresentano i valori di partenza per la variabile dipendente, come il carico d'acqua dolce per il flusso e la concentrazione per il trasporto, in un determinato tempo di partenza. I termini di ingresso e uscita per acqua e soluto quantificano lo scambio d'acqua e di massa in soluzione tra l'acquifero modellato e l'ambiente esterno. Ingressi e uscite possono essere distribuite (ricarica ed evapotraspirazione) o localizzate (pozzi,dreni e fiumi). La massa di soluto entrante o uscente per unità di tempo nell'equazione di trasporto dipende dalla portata volumetrica e dalla concentrazione di soluto dell'acqua che entra o esce nel modello attraverso fonti e perdite.

Come già accennato quando esiste una variazione di densità, flusso e trasporto sono processi collegati. Questo significa che per rappresentare adeguatamente il flusso sotterraneo dinamico è richiesta una soluzione totalmente accoppiata delle equazioni di flusso e trasporto. Per la maggior parte dei problemi è difficile, se non impossibile, sviluppare soluzioni analitiche perciò, generalmente, ci si avvale dei metodi numerici: in SEAWAT è stata sviluppata un'equazione alle differenze finite per simulare un flusso a densità variabile e per il trasporto di soluto in un campo sempre a densità variabile. Il metodo alle differenze finite è usato generalmente per risolvere equazione alle derivate parziali, dividendo il modello in celle singole attraverso l'uso di una griglia sull'area di interesse. L'approssimazione alle differenze finite dell'equazione alle derivate parziali è in seguito applicata al dominio del modello discretizzato. Sia MODFLOW sia MT3D usano griglie con nodo nel centro della cella:

in questa formulazione, le variabili dipendenti ottenute nella soluzione alle differenze finite rappresentano valori medi (che si assumono al centro della cella) per le rispettive celle.

L'applicazione SEAWAT è stata sviluppata per simulare il flusso sotterraneo tridimensionale a densità variabile e in transitorio attraverso mezzi porosi. Il codice SEAWAT segue una struttura modulare, quindi nuove funzioni possono essere aggiunte con una relativamente minima modifica del programma principale. SEAWAT legge e scrive gli insiemi di dati standard di MODFLOW e MT3DMS, anche se è richiesto qualche ulteriore dato di ingresso per le simulazioni in SEAWAT stesso. MODFLOW è stato modificato per risolvere l'equazione di flusso con densità variabile riformulando le equazioni in termini di massa fluida piuttosto che in termini di volume fluido. La densità del fluido è ipotizzata essere esclusivamente una funzione di concentrazione dei costituenti disciolti, gli effetti della temperatura sulla densità del fluido non vengono considerati. Le concentrazioni saline varianti temporalmente e spazialmente sono simulate in SEAWAT usando sottomoduli dal programma MT3DMS. SEAWAT può usare sia una procedura esplicita sia una implicita per accoppiare l'equazione di flusso con quella di trasporto in soluzione.

La discretizzazione temporale usata in SEAWAT2000 dipende dalla modalità di simulazione attiva: con o senza il trasporto. La simulazione è divisa in periodi di stress in cui viene inserito il valore di ricarica idrica ed ognuno di essi può essere suddiviso in passi temporali nei quali viene risolta l'equazione di flusso. Esiste un'opzione per consentire ai passi temporali di flusso di crescere di durata in base a serie geometriche, di modo che i primi passi temporali risultino più brevi rispetto agli ultimi in ogni periodo di stress: questo va a favore di realismo poiché i primi periodi di taratura necessitano tempi più brevi e più precisi. Per le simulazioni che includono anche la risoluzione dell'equazione di trasporto i passi temporali dell'equazione di flusso vengono ulteriormente suddivisi in passi temporali di trasporto: la loro durata è calcolata in accordo a criteri di stabilità o specifiche dell'utente. In SEAWAT2000 le equazioni di flusso e trasporto vengono entrambe risolte ad ogni passo temporale di trasporto: questo è dovuto alle variazioni di concentrazione che possono influire significativamente sulle caratteristiche del flusso di falda. La limitazione principale di SEAWAT2000 è quella di risolvere ad ogni passo temporale entrambe le equazioni di flusso e trasporto anche per sistemi a densità costante, da cui consegue un rilevante aumento del tempo di calcolo.

Il codice di calcolo alle differenze finite SEAWAT2000, in grado di simulare il flusso ed il trasporto densità-dipendente, è stato utilizzato in un lavoro di tesi precedente [Oberto e Pifferi, 2011] per implementare un modello

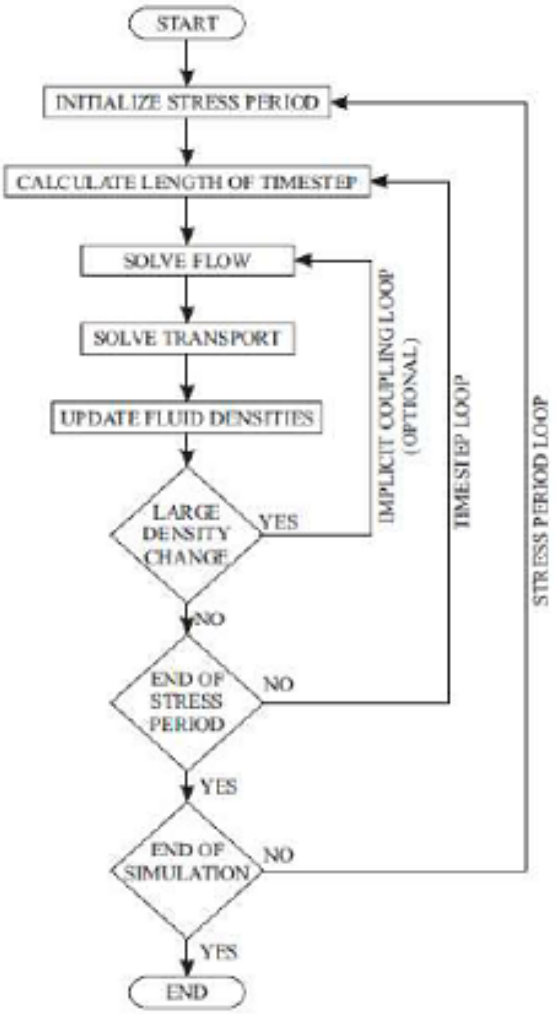

Figura 4.2: Grafo generalizzato del processo del codice SEAWAT

matematico ricavato sulla base delle indicazioni fornite dai dati di letteratura e da quelli raccolti in campo durante una campagna di caratterizzazione effettuata nel Novembre 2010 nell'isola di Nauru. Il modello è stato calibrato per l'area a nord dell'isola (nei pressi del villaggio di Ronave), la zona dove si e registrato, dai dati del Governo di Nauru, il massimo spessore della lente d'acqua dolce sotterranea dell'isola anche in periodi siccitosi.

4.3 Il Modello 2D

L'approccio iniziale alla modellazione dell'isola di Nauru è uno studio su alcune sezioni trasversali, due, ritenute di particolare interesse con lo scopo di testare la sensibilità del modello alla variazione dei vari parametri idrogeologici scelti per la successiva calibrazione del modello 3D.

Per la simulazione 2D del fenomeno di intrusione salina nell'isola, sono state scelte 2 sezioni entrambe significative per il caso di studio. La sezione AA' attraversa un'area a nord dell'isola caratterizzata dalla presenza di un numero relativamente elevato di pozzi con concentrazioni di sali al di sotto del limite imposto dal Governo di Nauru, che seguendo le norme del WHO stabilisce il limite per l'acqua dolce a 1500 mg/l di TDS; tale area è oggetto anche della modellazione 3D. La sezione BB' è stata invece tracciata passando per la laguna di Buada che è il più grande dei corpi idrici superficiali presenti sull'isola.

Il primo passo per la definizione del modello è la scelta della griglia con cui rappresentare la sezione di interesse. Questo perché il metodo alle differenze finite, usato nel codice di calcolo per risolvere numericamente l'equazione alle derivate parziali del modello, si applica dividendo il modello in celle singole tramite una griglia sull'area di interesse. Ad ogni cella della griglia corrispondono proprietà costanti, e le variabili dipendenti ottenute nella soluzione alle differenze finite rappresentano valori medi per le rispettive celle poiché gli elementi della griglia hanno il nodo nel centro della cella. In seguito si definiscono le condizioni al contorno di carico costante e concentrazione costante assegnate alle estremità delle due sezioni, ovvero le celle rappresentanti il mare. Per le condizioni interne il software richiede l'inserimento dei principali parametri idrogeologici, ovvero la conducibilità idraulica, la porosità, la ricarica superficiale, la dispersività (longitudinale, trasversale e verticale), la diffusione molecolare ed il coefficiente di carico specifico. Una volta impostate le condizioni al contorno e fissati i parametri è possibile eseguire l'analisi di sensitività. Le simulazioni sono state effettuate per un periodo di 200 anni nel quale si simula la formazione del cuneo di intrusione salina. Nonostante ciò si è osservato che nell'area centrale della sezione vengono a formarsi valori

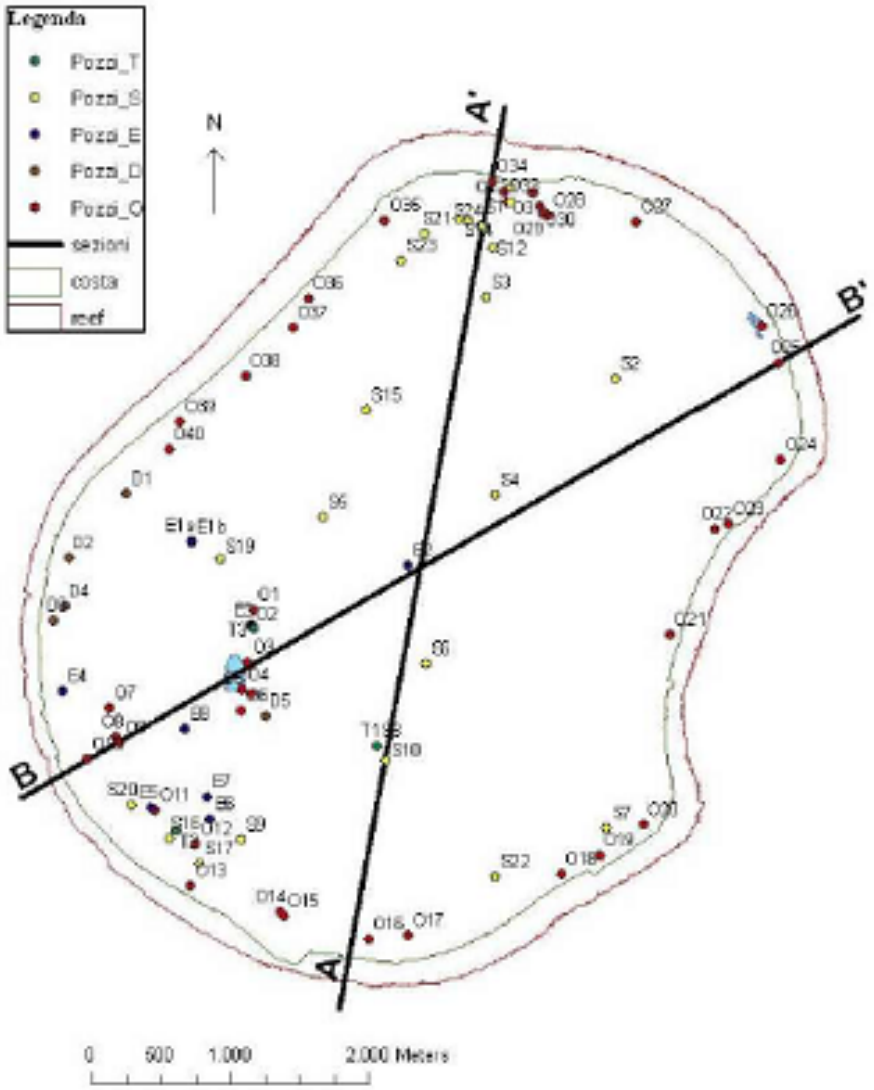

Figura 4.3: Mappa con posizionamento delle sezioni simulate e i pozzi di osservazione (O: pozzi di osservazione, T: pozzi per prove di pompaggio, E: pozzi per monitoraggio dell'inquinamento, S: pozzi per il monitoraggio della salinità, D: pozzi richiesti da NRC per rifornimento di acqua salmastra).

Parametro idrogeologico	Valore adottato
Conducibilità idraulica (Kx, Ky, Kz) [m/d]	900 |900 |18
Porosità [-]	0.3
Immagazzinamento e Specific Yeld (Ss, Sy) [1/m]	0.0003 |0.3
Dispersività longitudinale [m]	65
Dispersività trasversale [m]	0.15
Ricarica superficiale [mm/y]	540
Diffusione molecolare [m2/d]	8.64/10ˆ6

Tabella 4.1: Parametri idrogeologici dell'acquifero adottati da Ghassemi et al.(1996) nel lavoro di modellazione su Nauru.

di concentrazione anomali, più elevati rispetto ai valori circostanti a simulare un effetto di risalita di acqua salata nella zona centrale del dominio di modellazione. Questo ha portato a ipotizzare che il fenomeno di intrusione non fosse ancora arrivato in situazione stazionaria, ma l'osservazione dell'andamento delle concentrazioni in punti di osservazione in prossimità dell'effetto anomalo dimostrano che lo stato stazionario viene raggiunto addirittura prima dei 200 anni simulati. Inoltre il fenomeno di risalita osservato non è mai stato fisicamente rilevato in nessuna campagna di rilevamento dati a Nauru, ma viene documentato in alcune pubblicazioni riguardanti la modellazione matematica di piccole isole [Ghassemi et al., 1996; Ghassemi et al., 1999] senza tuttavia fornire una spiegazione esauriente delle cause.

E' stata eseguita un'analisi di sensitività su diversi parametri idrogeologici, prove servite anche come base per la calibrazione del modello 3D. I parametri sottoposti a variazione sono quelli che riguardano la ricarica superficiale, la conducibilità idraulica e la diffusione molecolare; infine è stata anche modificata la griglia di discretizzazione orizzontale poiché secondo Ghassemi et al.(1996) sembra che il fenomeno di risalita sia dovuto alla discretizzazione orizzontale e verticale della griglia, in aggiunta ad un effetto di dispersione numerica. Per realizzare le simulazioni sono stati utilizzati come parametri idrogeologici di partenza quelli standard adottati da Ghassemi et al. (1996).

Per poter analizzare nel dettaglio il fenomeno sono stati inseriti dei punti di monitoraggio (Monitoring Well) nella zone centrale, in prossimità della colonna in cui avviene la risalita (WR), nella zona costiera (WC) ed in una zona intermedia (WS) al fine di valutare l'andamento delle concentrazioni nel tempo lungo tutta la profondità del dominio simulato.

Esse rivelano che: all'aumento della ricarica superficiale corrisponde una diminuzione di concentrazione, perciò ci si aspetterebbe una riduzione dell'effetto di risalita; aumentando la conducibilità idraulica orizzontale si ha un

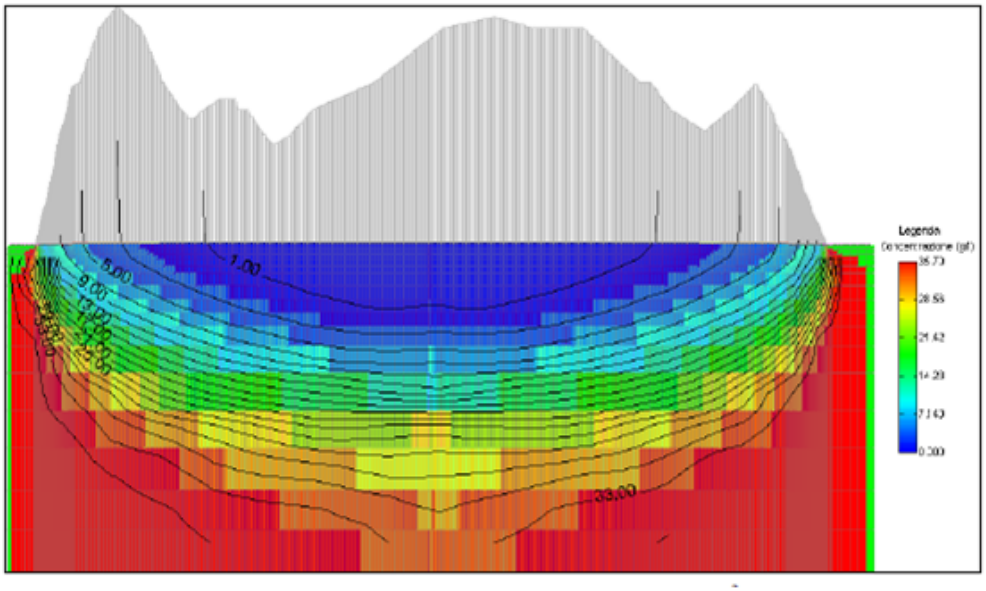

Figura 4.4: Sezione trasversale A-A' rappresentante la distribuzione di concentrazione [kg/m3]. In nero sono rappresentate le isoaline, ovvero le linee a uguale concentrazione.

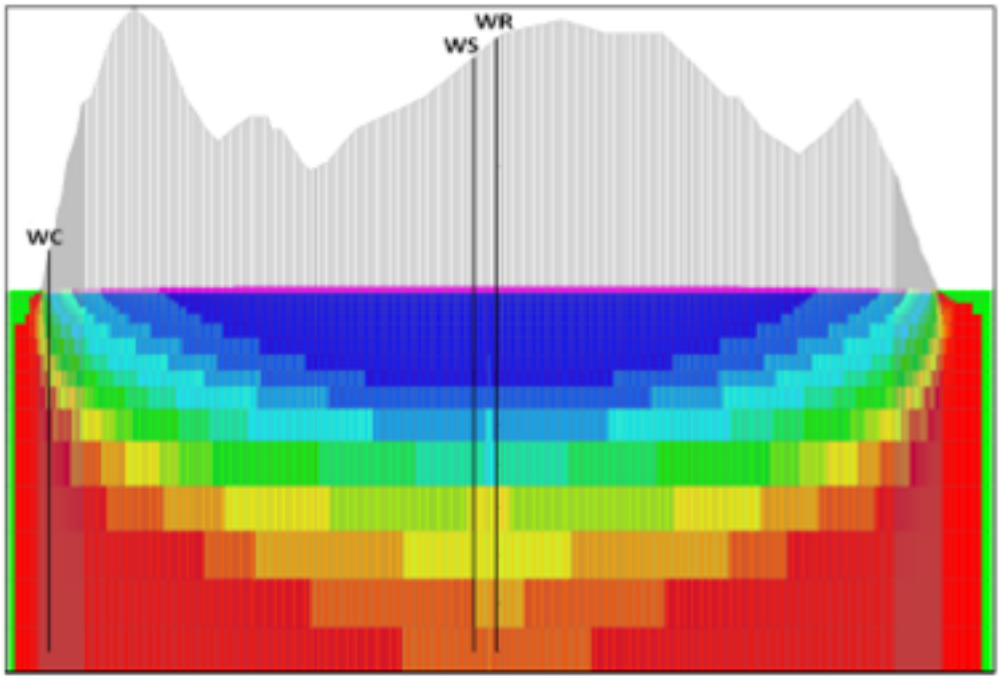

Figura 4.5: Posizionamento dei punti di monitoraggio lungo la sezione AA'.

aumento delle concentrazioni in quanto l'acqua salata raggiunge l'entroterra molto più velocemente, mentre con valori più bassi la concentrazione diminuisce, invece la variazione della conducibilità idraulica verticale non influisce significativamente sulla concentrazione finale delle simulazioni; variando il parametro relativo alla diffusione non si hanno variazioni significative di concentrazione. L'ultimo controllo è la variazione della discretizzazione orizzontale per avere la certezza che il formarsi della cuspide non sia legato alla definizione della griglia di partenza: sono state realizzate tre diverse griglie con differente discretizzazione orizzontale, modificando in particolare la dimensione delle celle nella parte centrale della sezione. Al termine dell'analisi si è riscontrato che non vi è correlazione tra il fenomeno e la discretizzazione spaziale orizzontale, perché si ha sempre la formazione della zona di risalita di acqua salata.

Non è stata svolta alcuna considerazione sulla sezione BB', in quanto dopo l'analisi di sensitività effettuata sulla sezione AA' si e ritenuto di essere in possesso di informazioni sufficienti per l'applicazione del modello 3D.

In conclusione l'analisi di sensitività mostra che il modello è fortemente influenzato dal variare dei valori di ricarica superficiale, permeabilità e conducibilità idraulica orizzontale. All'aumentare della prima o al diminuire della seconda l'acqua dolce tende ad accumularsi nella parte centrale dell'acquifero e a contrastare la risalita di acqua salata dal basso. Il fenomeno quindi sembra essere dovuto ai valori particolarmente elevati di permeabilità che caratterizzano il sottosuolo di Nauru. Rimane però il dubbio se si tratti di un problema numerico legato a valori di permeabilità particolarmente elevati o di un fenomeno fisico che si potrebbe riscontare in ogni piccola isola calcarea caratterizzata da scarsa ricarica superficiale. Un'analisi utile potrebbe essere quella di simulare lo stesso problema con un codice differente e chiarire forse meglio se si tratta di un problema numerico o altro.

4.4 Il Modello 3D

L'analisi di sensitività è stata usata come base per l'implementazione di un modello tridimensionale di una specifica area dell'isola di Nauru: la zona nord nei pressi del villaggio di Ronave. In quest'area è presente il maggior numero di pozzi di approvvigionamento idrico per la raccolta dei dati utili ai fini della calibrazione del modello ed è stato registrato lo spessore maggiore della lente d'acqua dolce sotterranea dell'isola, anche in periodi relativamente siccitosi. Il modello tridimensionale è stato utilizzato per la calibrazione dei carichi piezometrici e dei dati di concentrazione registrati in due diverse campagne di caratterizzazione: Novembre 2009 e Aprile 2010. In seguito si è svolto

un lavoro di validazione del modello calibrato su un periodo di 1 anno, da Novembre 2009 a Novembre 2010 per verificare che i parametri calibrati in stato stazionario dessero risultati corretti anche in transitorio.

4.4.1 Modellazione numerica 3D di flusso e trasporto densità dipendente: applicazione alla zona nord di Nauru.

Prima della calibrazione vera e propria occorre definire la metodologia di lavoro. Il primo passo è la scelta del dominio di modellazione, dall'osservazione della distribuzione dei pozzi di estrazione e monitoraggio dell'isola di Nauru e dai valori di conducibilità elettrica che indicano se l'acqua è dolce o salata. Lo sfruttamento maggiore della falda si ha in prossimità della costa, ove risiede la più parte della la popolazione. Secondo le misure effettuate nei pozzi di monitoraggio e fornite dal Governo di Nauru, nella maggior parte di questi pozzi la conducibilità elettrica supera il valore 2200 S/cm, limite di potabilità considerato dal Governo di Nauru. La sola eccezione riguarda la costa nord dell'isola, nei pressi del villaggio di Ronave, dove è posto il 40% dei pozzi di estrazione dell'acqua di falda e dove la misura della conducibilità elettrica nei pozzi di monitoraggio S1 e S18 rileva valori che si mantengono in maniera costante al di sotto del limite di 2200 S/cm mostrando una profondità della lente d'acqua dolce variabile tra i 6 m di Giugno 2008 fino agli oltre 10 m di Aprile 2010. La zona a nord dell'isola è stata scelta come dominio per l'implementazione e calibrazione del modello in quanto è l'area dell'isola che presenta la maggiore disponibilità di acqua dolce anche nei periodi più siccitosi.

La calibrazione dei parametri idrogeologici del modello avviene in due fasi distinte. In prima istanza è stata calibrata la zona del piano costiero nei pressi dei pozzi di monitoraggio S1 e S18 con i dati di carico e concentrazione salina del 26 aprile 2010; il modello risultante serve in seguito per la valutazione dell'efficacia di un sistema di pozzi *scavenger*, i quali, estraendo acqua salata a valle dell'estrazione di acqua dolce, hanno il compito di tenere in equilibrio il profilo dell'interfaccia fra acqua dolce e salata in modo da evitare fenomeni di *upconing* in corrispondenza del pozzo di estrazione dell'acqua dolce. Ai fini di un sistema di pozzi *scavenger*, è sufficiente una buona calibrazione del modello nell'area di interesse, la zona del pianoro costiero dell'isola. La seconda fase di calibrazione serve a rappresentare in maniera più accurata il flusso e la concentrazione salina dell'intero dominio di modellazione: in questa fase si e deciso di calibrare i parametri idrogeologici avendo come obiettivo le concentrazioni di sali del 16 novembre 2009. In seguito, è stata

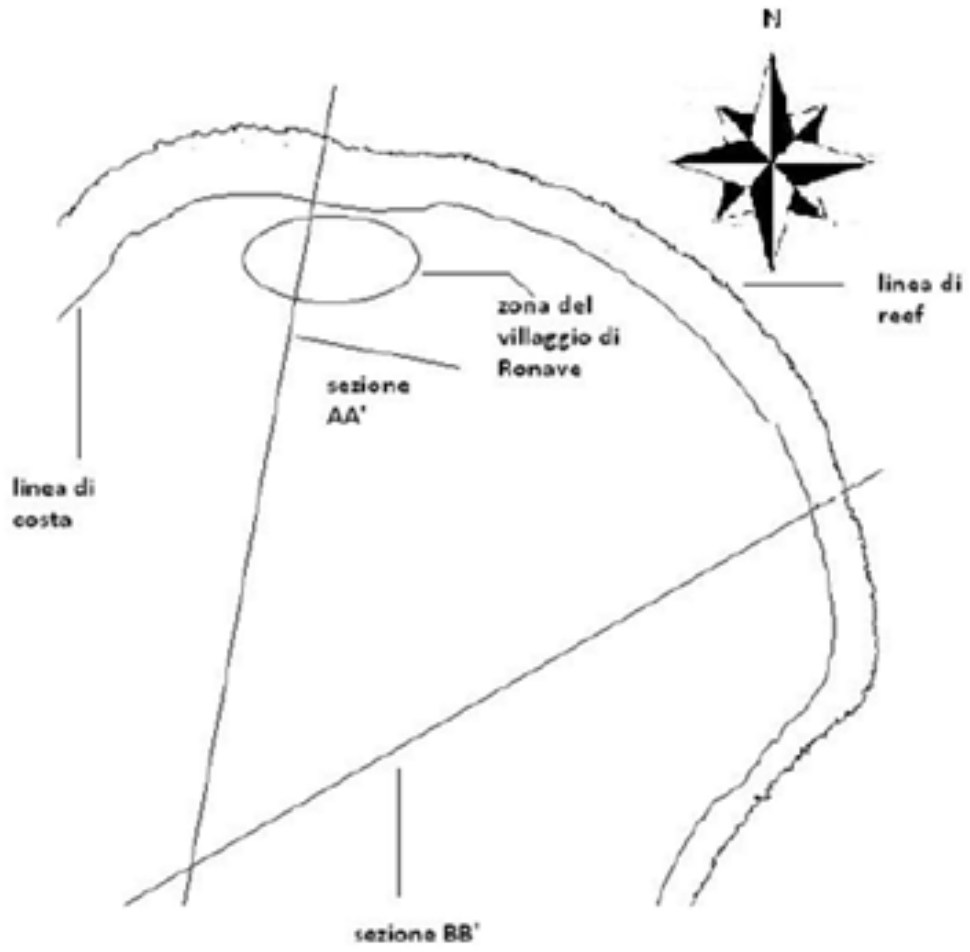

Figura 4.6: Delimitazione dell'area del modello.

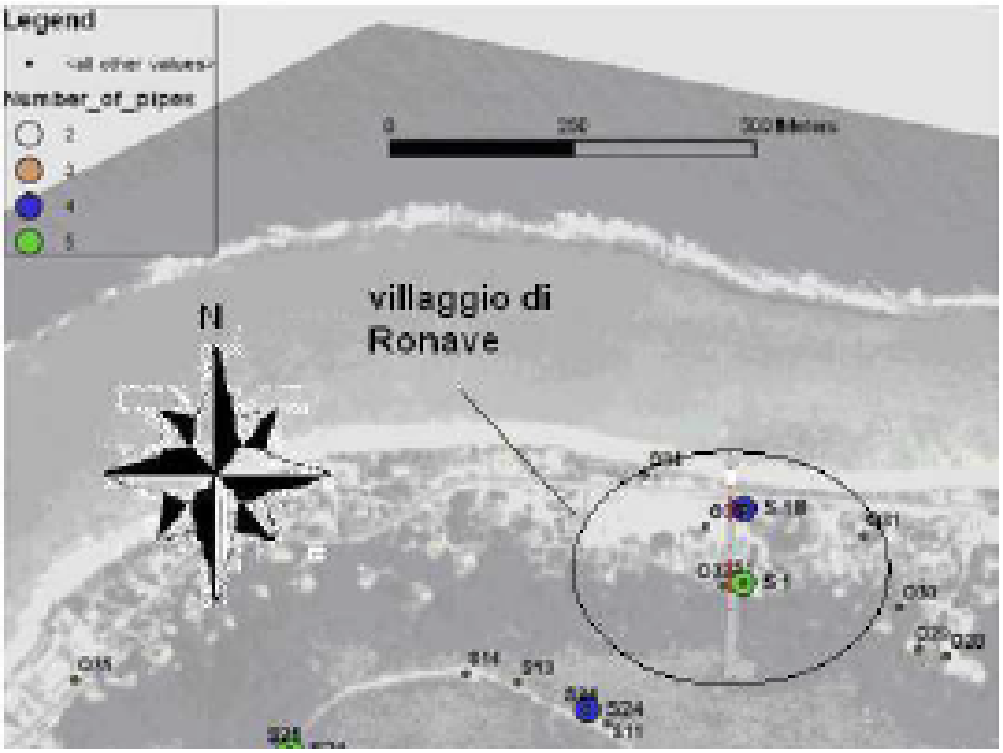

Figura 4.7: Posizione dei pozzi di estrazione (O) e monitoraggio (S) nell'area di interesse, nei pressi del villaggio di Ronave.

condotta una simulazione del comportamento in transitorio del modello, con i dati da novembre 2009 sino a Novembre 2010 per la validazione del modello stesso.

Le impostazioni del modello riguardano la discretizzazione della griglia, il posizionamento dei *target* di carico e concentrazione, stabilire le condizioni al contorno.

Per quanto concerne la scelta della griglia del dominio di modellazione si è deciso di discretizzare in maniera più fitta nei *layers* superficiali perché i dati di concentrazione osservati si trovano ad una profondità massima di 10 m rispetto al livello medio del mare. La calibrazione dei parametri idrogeologici necessari per la rappresentazione accurata del modello prevede l'inserimento delle misure di carico e concentrazione effettuate nei pozzi di monitoraggio presenti nell'area del modello, cioè gli obiettivi di calibrazione. Per questo sono stati scelti pozzi di monitoraggio che avessero sia le misure di concentrazione salina alla data scelta per la calibrazione sia le quote della testa del pozzo, per riuscire a valutare la profondità della tavola d'acqua ai fini del calcolo del carico e le profondità alle quali sono state effettuate le misure di conducibilità per il rilevamento della concentrazione salina. Le condizioni al contorno in un modello di flusso e trasporto sono fondamentali, in quanto rappresentano il collegamento tra modello e mondo reale. Nel modello trattato sono stati inseriti due tipi di condizioni al contorno e condizioni di carico e concentrazione costante: si è imposto che sulle celle esterne al dominio di modellazione non ci fosse flusso di acqua e le condizioni di carico e concentrazione costante sono state poste sulle celle rappresentanti il mare.

Per la calibrazione e la stima dei parametri idrogeologici la calibrazione è stata condotta attraverso l'iterazione del processo di valutazione degli errori di calibrazione e successiva variazione dei parametri al fine di ridurre l'errore residuo tra valori simulati e osservati. I valori di partenza dei parametri idrogeologici sono gli stessi utilizzati da Ghassemi et al. (1996), come nella calibrazione dei modelli 2D delle sezioni trasversali. Le simulazioni sono calcolate su un transitorio di 200 anni, al fine di ottenere la formazione del cuneo di acqua salata all'interno dell'isola e la stazionarietà dei valori di carico idraulico e concentrazione salina. Come per la modellazione 2D delle sezioni trasversali, sono stati utilizzati i seguenti valori: densità minima di riferimento pari a quella dell'acqua dolce (1000 kg/m3); densità massima pari a quella dell'acqua salata (1023,8 kg/m3, per l'Oceano Pacifico, www.acquaportal.it); gradiente densità-concentrazione pari a 0,6666.

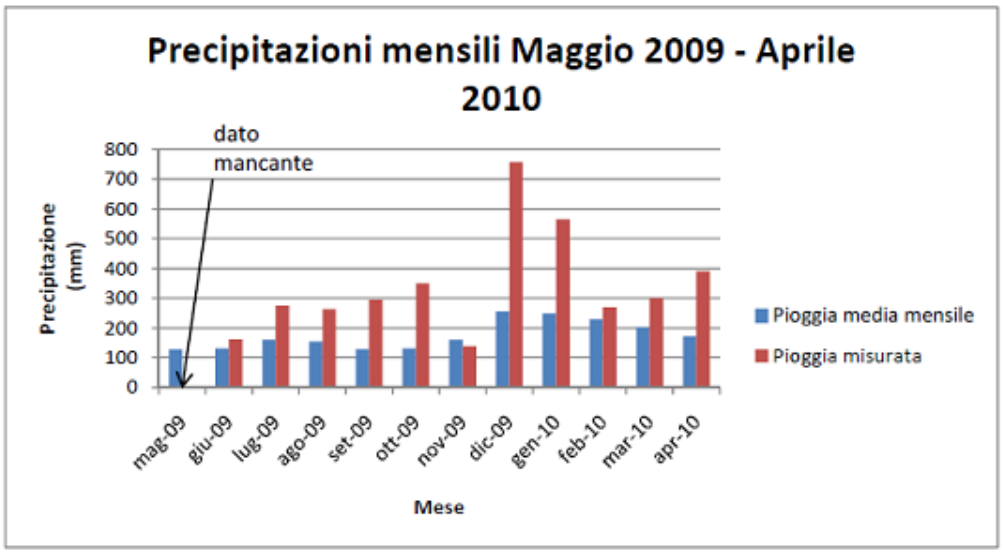

Figura 4.8: Dati di precipitazione mensile da Maggio 2009 ad Aprile 2010, confrontati con i valori medi mensili di pioggia.

4.4.2 Prima fase di calibrazione: Aprile 2010.

La situazione idrogeologica rappresentata in questa fase di calibrazione è quella osservata ad aprile 2010. È noto che nei 5 mesi precedenti la campagna di misura l'isola è stata interessata da precipitazioni decisamente sopra la media, pertanto la lente d'acqua dolce era particolarmente estesa. Si considera la ricarica meteorica come unico parametro di ingresso/uscita al modello, anche perché non si conoscono i tassi di estrazione dai pozzi di approvvigionamento relativi all'area di interesse.

Da un'indagine condotta dal DIIAR del Politecnico di Milano nel novembre 2010 si riscontra la presenza di sedimento sabbioso che ricopre lo strato di roccia calcarea carnificata nella zona del pianoro costiero e in particolare nella zona del villaggio di Ronave. Le diverse profondità, da 1 m a 10 m, alle quali ha fine lo strato sabbioso sono probabilmente dovute alla direzione della corrente oceanica: per tale motivo si sono considerate due diverse zone di conducibilità idraulica e dispersività, una delle quali a conducibilità idraulica e dispersività più bassa per rappresentare questo strato sabbioso nel pianoro costiero, e una che rappresentasse l'altopiano centrale e i sedimenti profondi in zona costiera. In seguito a un'analisi di sensitività sui parametri di conducibilità elettrica e dispersività per entrambe le zone, si è infine giunti ad una calibrazione ottimale della zona costiera, anche se rimangono ancora notevolmente sottostimati i *target* dell'altopiano centrale dell'isola. Al fine

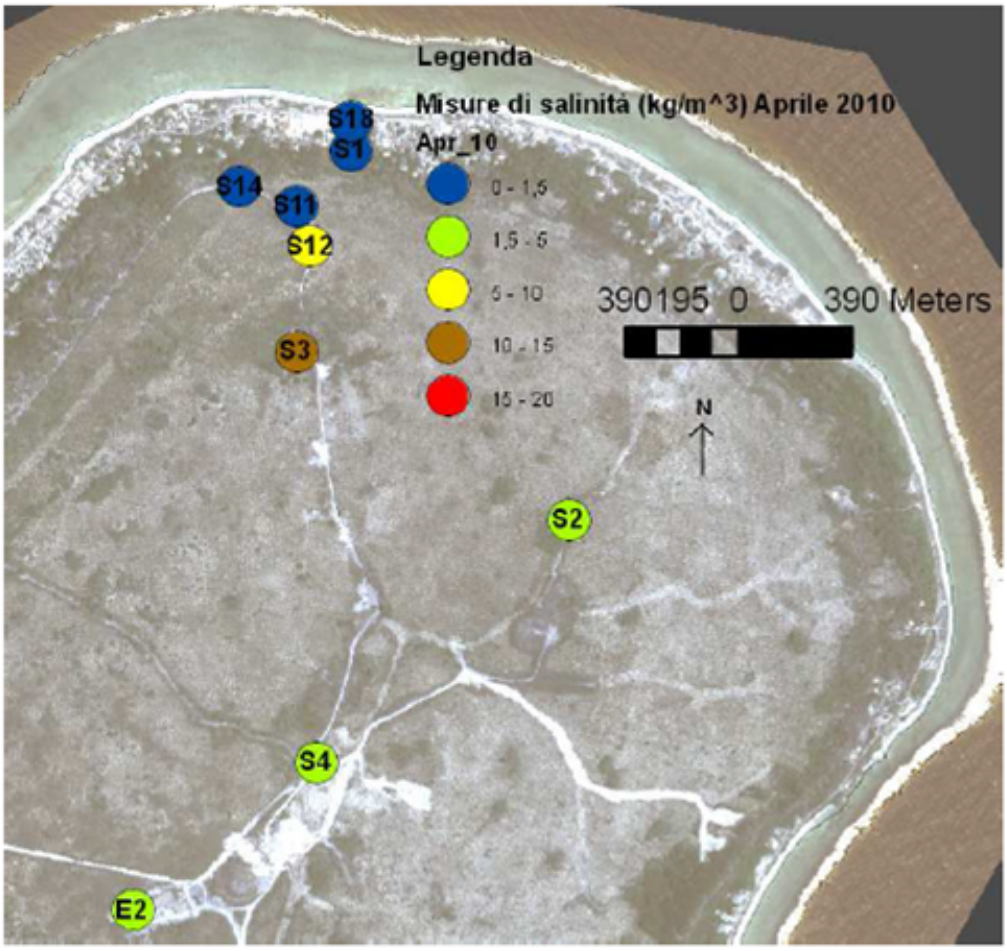

Figura 4.9: Carta delle misure di salinità relative ai *target* del dominio del modello effettuate ad Aprile 2010 [kg/m3].

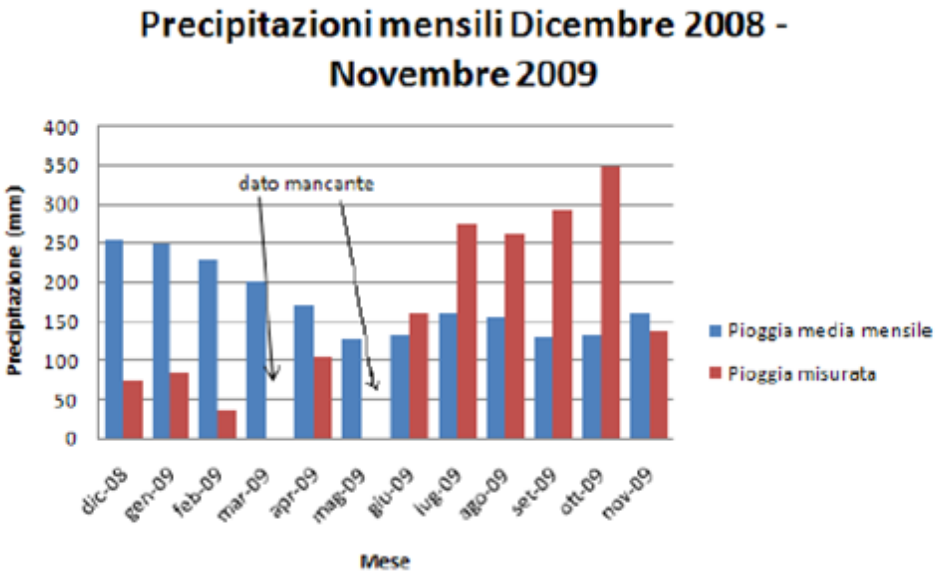

Figura 4.10: Precipitazioni mensili nell'anno precedente la campagna di misura di Novembre 2009 e confronto con precipitazioni medie per ogni mese.

di ottimizzare un sistema di pozzi *scavenger* nella zona del pianoro costiero, è stato sufficiente la calibrazione della zona costiera (pozzi S1 e S18) poiché la posizione del sistema formato dal pozzo di estrazione d'acqua dolce e relativo pozzo *scavenger* influenza solo le condizioni idrogeologiche della zona costiera.

4.4.3 Seconda fase di calibrazione: Novembre 2009.

La calibrazione del modello è completata procedendo con le simulazioni che interessano la zona dell'altopiano centrale. Le simulazioni hanno considerato un transitorio di 100 anni, in quanto viene raggiunta la stazionarietà dei valori di carico idraulico e concentrazione salina approssimativamente già dopo 70 anni. Le misure di concentrazione usate come obiettivo sono del mese di Novembre 2009. La media dei dati mensili di precipitazione dell'anno che precede tale campagna di misurazione è sostanzialmente in linea con la media globale delle precipitazioni per l'isola di Nauru. Rispetto alle misure di Aprile 2010 si nota mediamente una concentrazione di solidi disciolti più alta con il risultato che la lente d'acqua dolce è presente praticamente soltanto nei pressi del villaggio di Ronave con profondità che varia da un minimo di circa 5 m ad un massimo di circa 8 m, per i pozzi di monitoraggio S18 e S1.

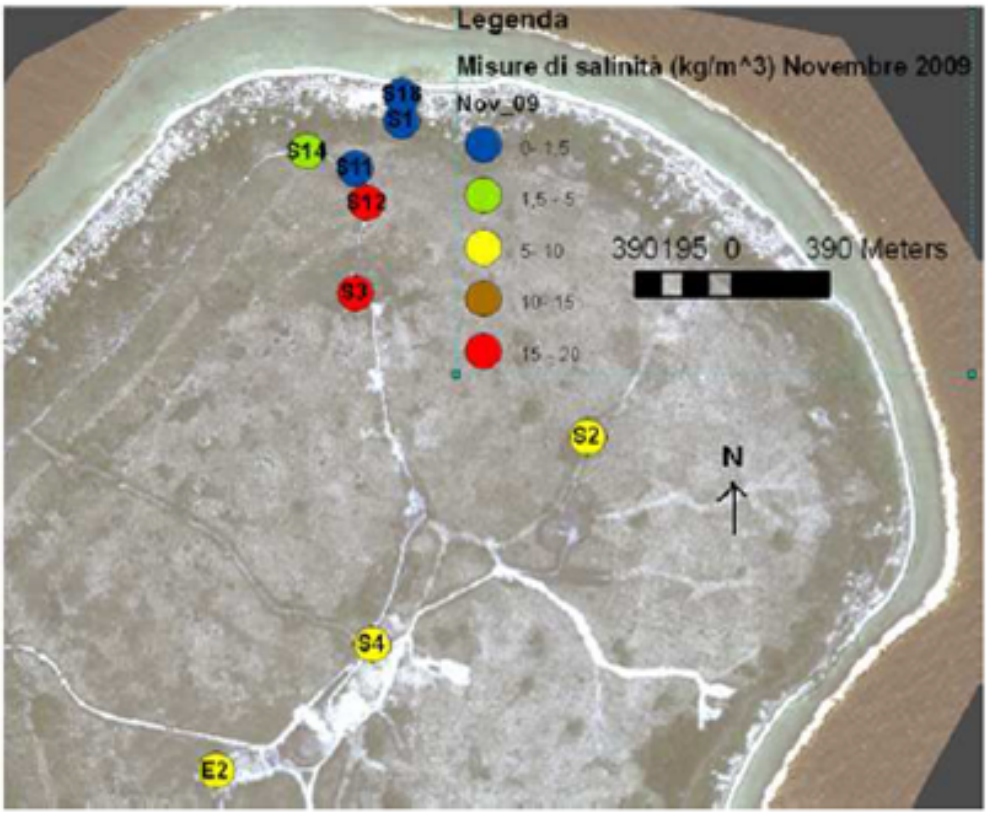

Figura 4.11: Carta delle misure di salinità effettuate a Novembre 2009 [kg/m3] nei *target* di dominio del modello.

In base ai dati di precipitazione precedenti la campagna di misura di Novembre 2009, si è deciso di utilizzare la ricarica media da Dicembre 2008 a Novembre 2009 , calcolata dal Governo di Nauru, come condizione iniziale di ricarica per la calibrazione, e per questo si è aumentato il valore di conducibilità idraulica e di porosità della zona con roccia calcarea carnificata. I restanti parametri idrogeologici sono stati mantenuti uguali a quelli calibrati nella prima fase, con i dati di Aprile 2010. Attuando questi cambiamenti il modello riporta la formazione di una sacca di acqua dolce nella zona del villaggio di Ronave, separata dal resto della lente d'acqua dolce nella zona più interna dell'altopiano. Nonostante i cambiamenti apportati si ha comunque una sottostima delle misure considerate come obiettivo per la calibrazione. Quindi sono stati variati i parametri di dispersività longitudinale e verticale, sia nella zona calcarea sia nella zona dei sedimenti sabbiosi costieri: il valore simulato si è dimostrato più sensibile a variazioni di dispersività verticale, soprattutto alle profondità maggiori dei pozzi di monitoraggio costieri.

Uno dei possibili motivi per cui S1 e S18 mantengono al loro interno un buono spessore di acqua dolce anche in periodi abbastanza siccitosi è probabilmente dovuto ad una ricarica aggiuntiva, causata dalla reimmissione in falda di acqua desalinizzata proveniente dal relativo impianto e di parte dell'acqua piovana raccolta attraverso grondaie e serbatoi. Dai dati elaborati dal rapporto SOPAC (2010) si stima un utilizzo non potabile di acqua piovana o desalinizzata per i due distretti in questione, con una possibile reimmissione della stessa quantità d'acqua in falda. Al fine di diminuire la sovrastima dei *target* più profondi di S1 e S18 è stata quindi inserita una ricarica aggiuntiva nella sola zona dove risiede la popolazione. Questo ha portato miglioramenti alla calibrazione dei pozzi di monitoraggio costieri ma permangono problemi di sottostima della concentrazione in particolare nella zona più interna del dominio del modello (pozzi S4 e E2) e in una zona che presenta una depressione dove si hanno valori di salinità molto alti anche in periodi di precipitazione intensa (pozzo S3): si è pertanto ipotizzato che, essendo in una zona facente probabilmente parte di una paleo laguna, potesse avere depositi salati. Riprodurre questa condizione ha richiesto la creazione di nell' area della depressione di una zona con condizioni di concentrazione costante. La zona interna registra una sensibilità maggiore alla variazione di ricarica: durante periodi i secchi questi pozzi tendono ad avere misure di concentrazione molto elevate mentre in fase di precipitazione intensa si hanno misure basse di concentrazione salina. Jacobson e Hill (1993) riportano che fino a 55 m di profondità rispetto al livello del mare si ha un fenomeno intenso di carsismo; non si conosce la reale posizione dei vari condotti carsici perché mancano dati a riguardo, ma questa informazione è stata sufficiente a giustificare la creazione di una zona ad alta dispersività longitudinale e

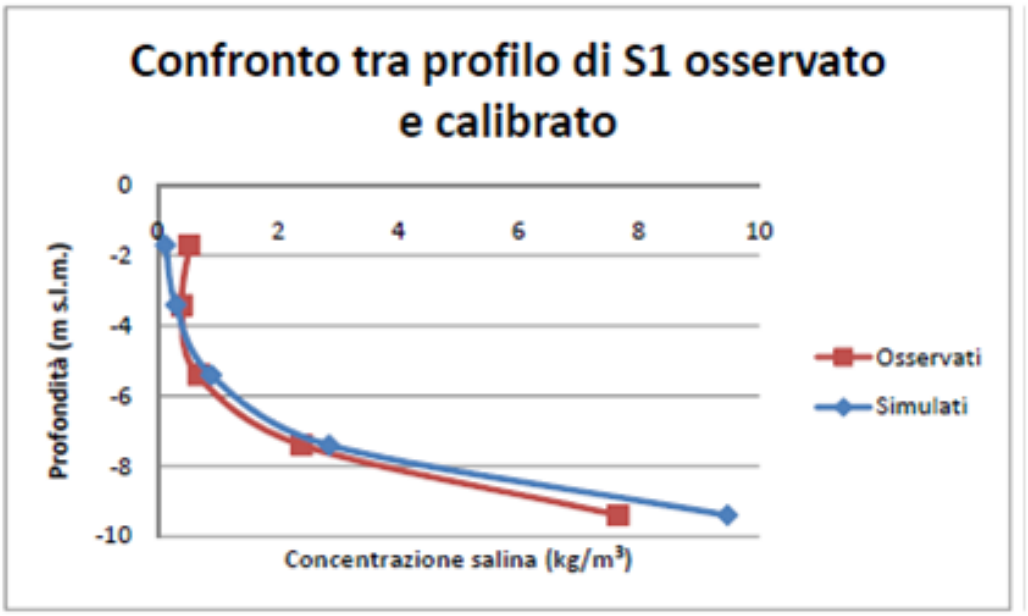

Figura 4.12: Confronto tra valori misurati e simulati in S1 con parametri calibrati.

verticale nell'area di interesse in modo da riprodurre un possibile fenomeno di carsismo locale. Attraverso ulteriori modifiche di dispersività, si e giunti ad un'ottima calibrazione definitiva.

Si notano ancora alcuni errori di sottostima nei *target* costieri (pozzo S18) a profondità intermedia e nella zona interna (pozzo di monitoraggio S12) ancora non abbastanza influenzato dal rilascio di concentrazione dalla zona dove si è riscontrata la depressione (pozzo S3): il pozzo di monitoraggio S1, scelto per testare la bontà del sistema di pozzi *scavenger*, riporta la stima migliore.

La calibrazione del modello potrebbe essere migliorata con una più vasta campagna piezometrica e di monitoraggio della salinità delle zone che presentano criticità, oltre a prove di permeabilità e di conducibilità idraulica in situ. Inoltre, a causa di fenomeni locali di carsismo e della notevole influenza delle maree sulla misura di concentrazione nei punti di monitoraggio, le misure effettuate hanno un alto grado di incertezza, che si aggiunge a quella dovuta a possibili errori di misura e di manutenzione dei filtri dei pozzi usati per il monitoraggio e l'estrazione. Oltre ai problemi legati alla carenza o imprecisione delle misure, una ulteriore limitazione alla calibrazione del modello si può sicuramente ricercare nel considerevole tempo di calcolo.

Parametro idrogeologico	Valore utilizzato in calibrazione	Altri valori testati
Ricarica superficiale [mm/y]	590	1200, 1000, 800 700, 500
Ricarica superficiale zona abitata [mm/y]	730	-
Conducibilità idraulica orizzontale sabbia [m/d]	40	-
Conducibilità idraulica verticale sabbia [m/d]	4	20, 10 8, 4
Coefficiente dispersività longitudinale sabbia [m]	3	1, 1.5, 2 2.5, 5
Coefficiente dispersività trasversale sabbia [m]	0.3	0.5, 0.1
Coefficiente dispersività verticale sabbia [m]	0.0001	0.05, 0.03, 0.01 0.005, 0.001, 0.0005
Conducibilità idraulica orizzontale calcare [m/d]	3500	2000, 2500, 3000
Conducibilità idraulica verticale calcare [m/d]	350	175, 250
Coefficiente dispersività longitudinale calcare [m]	30	12, 15, 18 25, 30
Coefficiente dispersività trasversale calcare [m]	0.5	0.1, 0.3, 0.8 0.12, 0.75, 1, 2
Coefficiente dispersività verticale calcare [m]	0.06	0.01, 0.03, 0.05, 0.1 0.12, 0.15, 0.65
Coefficiente dispersività longitudinale zona interna carsificata [m]	65	35, 40,50
Coefficiente dispersività trasversale zona interna carsificata [m]	0.5	-
Coefficiente dispersività verticale zona interna carsificata [m]	0.65	0.1, 0.2 0.35, 0.5
Porosità sabbia [-]	0.3	-
Porosità calcare [-]	0.14	-
Coefficiente diffusione molecolare [m2/d]	8.64/10ˆ6	-

Tabella 4.2: Parametri idrogeologici calibrati e testati nella seconda fase di calibrazione (calibrazione rispetto ai dati della campagna di misura di Novembre 2009)

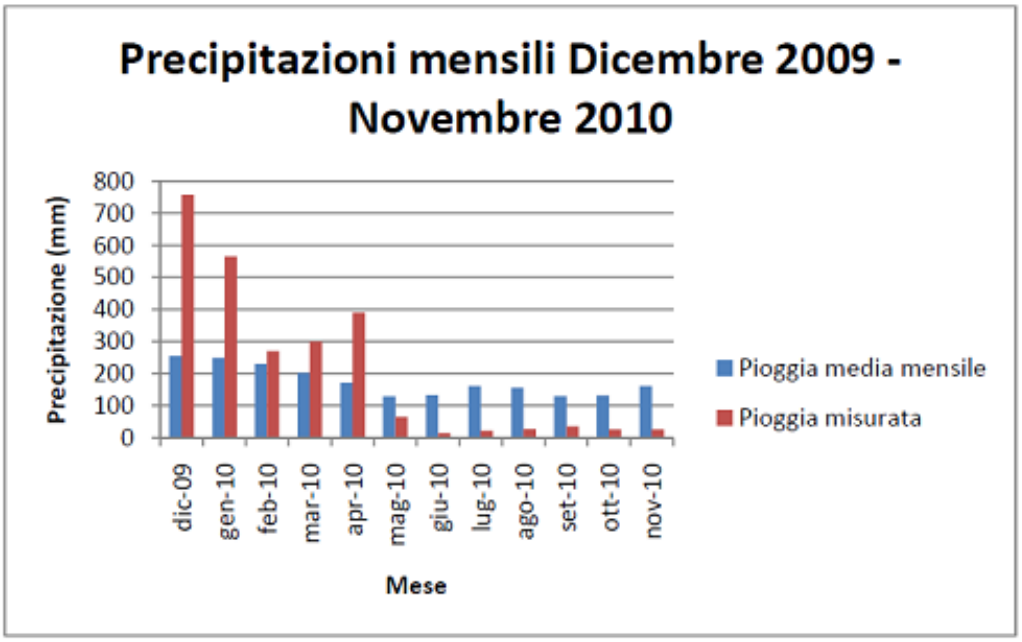

Figura 4.13: Confronto tra i dati di precipitazione mensili, registrati tra Dicembre 2009 e Novembre 2010, e precipitazioni medie mensili.

4.4.4 Validazione

Una volta calibrazione, è necessario osservare il comportamento del modello in fase di validazione: si simula lo stesso in un periodo transitorio avendo come dati di ingresso le ricariche idriche avute in quel lasso temporale. La validazione permette di osservare la risposta del modello in caso di condizioni di ingresso idrico differenti da quelle di calibrazione per verificarne accuratezza. Le misure scelta sono relative alla campagna di monitoraggio di un anno con i dati di precipitazione da Novembre 2009 a Novembre 2010.

Si possono distinguere due periodi distinti: un primo periodo, con piovosità da tre a quattro volte sopra la media del periodo che va da Dicembre 2009 ad Aprile 2010 ed un secondo periodo in cui si ha scarsità o assenza di precipitazioni nella seconda parte dell'anno simulato. I dati relativi alle misure di salinità confermano la sensibilità del sistema rispetto al parametro di ricarica superficiale. L'area del modello ha una copertura di vegetazione in percentuale minore rispetto a quella calcolata per l'intera isola, questo suggerisce un valore minore di evapotraspirazione ed un conseguente aumento del valore di ricarica superficiale: perciò si e deciso di aumentare i valori di ricarica mensili del 15% rispetto ai valori ufficiali calcolati. Nel periodo di deficit idrico da Maggio a Novembre, con evapotraspirazione con valori mag-

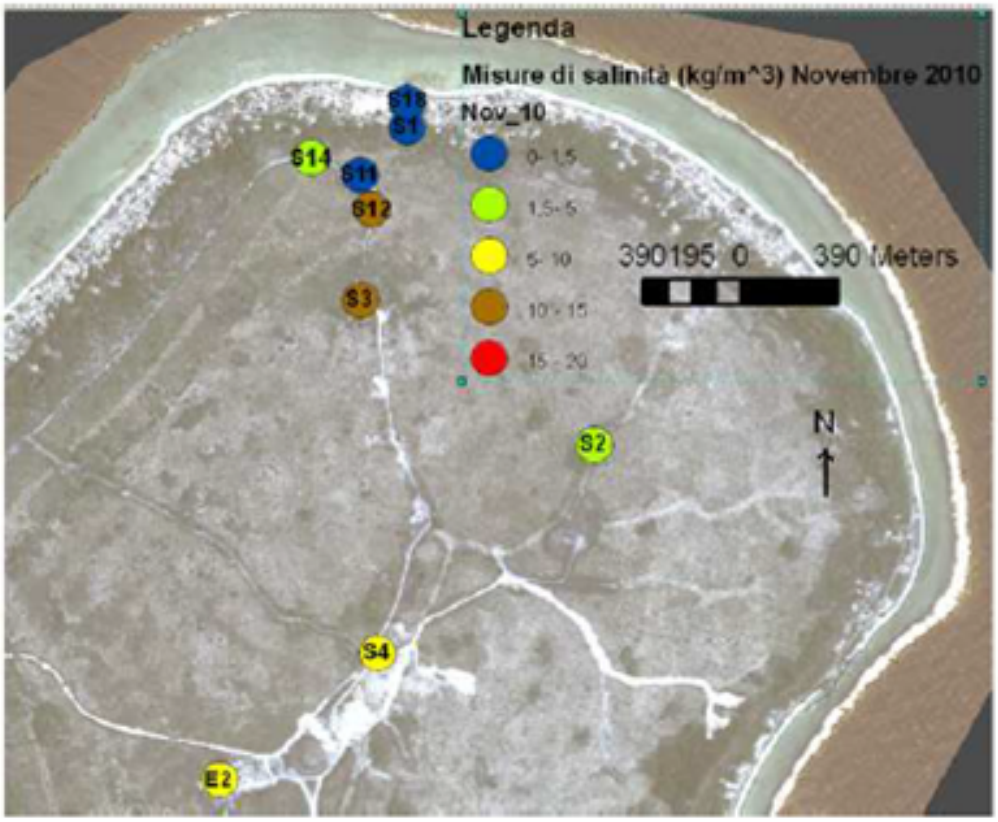

Figura 4.14: Carta delle misure di salinità relative al dominio del modello effettuate a Novembre 2010 [kg/m3].

giori rispetto a quelli di precipitazione, è stato ridotto notevolmente il valore di ricarica mensile in modo da simulare in maniera corretta il fenomeno di immagazzinamento della ricarica. Infine è stata apportata una modifica al valore del coefficiente di dispersività verticale nella zona più interna del dominio del modello. È da notare che mentre nel processo di calibrazione si giunge ad una soluzione del modello ottenuta con un parametro di ricarica costante ma non realistico, nel processo di validazione in transitorio si utilizzano le corrette variazioni di ricarica dovute al regime di precipitazione: questo giustifica le piccole variazioni di alcuni parametri legati al trasporto di soluto, ad esempio la dispersività. Osservando la stessa distribuzione di concentrazione con i valori simulati per Novembre 2010 si nota un sostanziale ritorno ai valori misurati l'anno precedente, a seguito del periodo di secca iniziato dal mese di Maggio. La validazione è sostanzialmente in linea con i valori ottenuti dalla calibrazione.

Capitolo 5

Ottimizzazione di un sistema di pozzi *scavenger* con un sistema di supporto alle decisioni.

Per la risoluzione del problema relativo alla formazione del cuneo salino nell'acquifero, dunque, in prima istanza si è deciso di far ricorso a un sistema di pozzi *scavenger*. La decisione di pianificazione e l'ottimizzazione del sistema sono trattati con un sistema di supporto alle decisioni, del quale vengono illustrati i principi teorici di base per comprendere la motivazione di tale scelta operativa.

5.1 Il sistema di supporto alle decisioni.

Si è già detto che decidere in ambito ambientale significa dover far fronte ad alcuni problemi, principalmente la complessità del dominio fisico in cui vengono prese le decisioni, dove la maggior parte dei processi sono altamente non lineari, e l'eterogeneità del contesto sociale, economico ed ecologico che essi influenzano e che comprende spesso molti obiettivi in conflitto tra loro. I metodi di decisione Multi - Obiettivo sono stati riconosciuti come importanti supporti per il Decisore nella gestione e pianificazione ambientale [Janssen,1992]: lo scopo è determinare l'Alternativa di Miglior Compromesso [Castelletti e Soncini-Sessa, 2006] tra un numero di opzioni decisionali in accordo con ciò che preferisce il Decisore: se si assume quest'ultimo come razionale, l'Alternativa di Miglior Compromesso deve essere un'alternativa Pareto - efficiente e rappresenta la soluzione al problema di ottimizzazione Multi - Obiettivo (MO). Esistono molti e differenti metodi per determinare la soluzione al problema di ottimizzazione MO e vengono classificati in

base al momento in cui il Decisore viene coinvolto nel processo [Hwang e Masud,1979], in sintesi:

- - i Metodi a-priori sono basati sull'articolazione della struttura di preferenza del Decisore al fine di trasformare un problema MO in un problema ad Obiettivo Singolo, la cui soluzione sia l'Alternativa di Miglior Compromesso. Uno dei maggiori svantaggi nell'applicazione di questi metodi sta nella difficile identificazione della struttura di preferenze del Decisore, che soffre di contraddizioni e dell'esistenza di una rappresentazione di preferenza non univoca. Inoltre l'identificazione della funzione di utilità che traduce le preferenze del Decisore prevede che questo risponda a una serie lunghissima di domande, confronti a coppie, cui una persona difficilmente riesce a dare risposte logiche e coerenti,e siccome la struttura di preferenze del Decisore è articolata a priori, senza un ri - bilanciamento degli obiettivi, si dice che diano decisioni non informate;

- - i Metodi interattivi, o in progressione, sono tali che il Decisore formula un'iniziale ipotesi sulle sue preferenze per poter trasformare in seguito il problema MO in un problema ad Obiettivo Singolo e in base alla soluzione di questo problema il Decisore ha la possibilità di ridefinire la sua struttura di preferenze ed il processo viene reiterato fino a trovare una soluzione soddisfacente. Con i metodi interattivi, il Decisore potrebbe essere capace di prendere una decisione informata, almeno parzialmente, ma rimane il problema dell'elevatissimo numero di domande cui il Decisore è chiamato rispondere eventualmente peggiorato dal consistente numero di iterazioni necessarie per il raggiungimento della soluzione;

- - nei Metodi a-posteriori le preferenze del Decisore per le alternative sono espresse dopo la rappresentazione della frontiera di Pareto e dopo l'identificazione delle alternative Pareto - efficienti, che vengono considerate inizialmente come equivalenti nella scala di preferenze del Decisore. In seguito, analizzando le curve di compromesso e selezionando un punto sulla frontiera di Pareto, il Decisore esprime la sua preferenza, ponendo l'alternativa associata come quella di Miglior Compromesso. I processi di ricerca e decisione della soluzione sono separati ed usati in sequenza e il Decisore si trova pienamente coinvolto nel processo di scelta, rendendo più trasparente il processo di decisione in cui il Decisore è completamente coinvolto e la decisione finale è presa una volta che questo sia stato informato e reso consapevole del processo. Nonostante i vantaggi rispetto ai metodi a priori e interattivi, questi

metodi sono stati poco utilizzati in ambito ambientale, in quanto soffrono di due problemi significativi: la grande richiesta computazionale per la risoluzione del problema MO, con crescita esponenziale a seconda del numero di variabili di stato del modello per la descrizione dei processi fisici e del numero di obiettivi, e per determinare la frontiera di Pareto e le alternative Pareto efficienti. Questo, come già spiegato, porta alla difficile combinazione tra le simulazioni dei modelli ad esempio a parametri distribuiti o basati sulla fisica del sistema e gli algoritmi di ottimizzazione disponibili per la risoluzione del problema a Molti-Obiettivi. Inoltre può essere molto difficile per il Decisore visualizzare ed esplorare la frontiera di Pareto e le alternative efficienti associate nei problemi con 3 o più obiettivi; in particolare può essere molto complicato valutare il tasso di miglioramento o peggioramento tra gli obiettivi che è la chiave dell'informazione utile per comprendere il processo decisionale. Senza una rappresentazione grafica della frontiera che consenta una presa di visione chiara dei problemi con più di tre obiettivi, molto comuni nel caso di tematiche di natura ambientale, le potenzialità dei metodi di decisione a-posteriori per fare scelte più consapevoli sono solo teoriche.

5.1.1 Formulazione del problema di ottimizzazione.

Si consideri un problema di pianificazione in cui si deve fissare il valore di più variabili di decisione. Un'alternativa di pianificazione è identificata dal vettore di decisioni definito su un insieme di raggiungibilità che rappresenta i vincoli economici, tecnici o normativi ai valori delle decisioni. Il comportamento del sistema è simulato da un modello dinamico per ogni alternativa e trasforma la stessa in una collezione di valori d'uscita, composta da traiettorie temporali di uscite distribuite nello spazio. Il modello è posto in forma di un codice computazionale e richiede anche molti giorni per calcolare l'uscita per ogni singola alternativa. Le informazioni contenute nelle uscite del modello possono essere usate per valutare le prestazioni dell'alternativa simulata sia singolarmente ma soprattutto rispetto ad altre alternative implementate e dal confronto emerge l'alternativa di miglior compromesso. Il confronto tra le alternative e la scelta di quella di Miglior Compromesso può avvenire in due modi: analisi *What - if* o l'approccio Multi - Obiettivo.

- - Analisi *What - if*: la decisione viene presa dal Decisore per comparazione delle uscite del modello con ogni alternativa raggiungibile. L'approccio è praticabile solo se il numero di alternative è molto basso, al massimo dodici, e se lo spazio delle decisioni può essere ben esplorato

tramite simulazione. La soluzione tradizionale per rendere meno pesante computazionalmente il processo e quella di scegliere un sottoinsieme di alternative, basandosi sull'intuizione dell'esperto;

- - Approccio Multi - Obiettivo: si tratta di una razionalizzazione delle preferenze del Decisore formalizzando i criteri decisionali in termini di indicatori, che dipendono dall'alternativa sia attraverso l'uscita associata del modello, sia direttamente. Conoscendo i valori degli indicatori prodotti da una data alternativa, il Decisore è in grado di compararla con ognuna delle altre. Il valore dell'indicatore contiene meno informazione rispetto all'uscita del modello, alla quale è legato da una relazione in genere matematica, ma ha il vantaggio di permettere un effettivo confronto tra le alternative. Si può ipotizzare che il Decisore voglia minimizzare i primi indicatori ed ottenere un valore per gli altri non più grande di una soglia posta a-priori: i primi indicatori verranno detti obbiettivi e rappresentano la formalizzazione, matematica, dei criteri di valutazione del Decisore, mentre gli altri saranno i vincoli del problema. L'introduzione di indicatori quantitativi permette di razionalizzare il processo decisionale frazionando il problema di pianificazione in un problema di ottimizzazione a Molti Obiettivi. Siccome ogni uscita può essere calcolata tramite simulazione per ogni alternativa, ogni indicatore può essere visto come funzione della sola alternativa che racchiude sia la relazione diretta tra gli elementi del vettore delle decisioni e quelli del vettore degli indicatori sia la relazione mediata dal modello. Quindi la risoluzione teoretica al problema diventa la frontiera di Pareto e le associate alternative Pareto - efficienti e dal punto di vista del Decisore l'uscita pratica del sistema rappresenta l'Alternativa di Miglior Compromesso.

Qualunque sia il sistema scelto per risolvere il problema a molti obiettivi, si prevede che il Decisore prenda attivamente parte alla procedura. In conclusione si ha che nei metodi a priori l'alternativa di miglior compromesso è ottenuta senza il calcolo dell'intera, o parziale, frontiera di Pareto: il sistema di preferenze del Decisore è formalizzato all'inizio del processo decisionale e usato per convertire il problema di, ad esempio, minimizzazione degli obiettivi in un problema a un obiettivo solo la cui soluzione è per l'appunto l'alternativa di miglior compromesso. Con il metodo interattivo si tende a ripetere più volte l'approccio a priori risolvendo un problema a un solo obiettivo per ogni interazione e usando la risposta ottenuta per il raffinamento della scelta del Decisore ed effettuare una nuova conversione del problema

multi obiettivo in un problema con mono obiettivo finché il Decisore non sarà soddisfatto della soluzione. Infine i metodi a posteriori risolvono direttamente il problema multi obiettivo e calcolano la frontiera di Pareto: il Decisore è poi chiamato a selezionare il punto, o i punti, che preferisce che vengono in seguito utilizzati per simulare le corrispondenti alternative, fino al raggiungimento di quella di giudicata di miglior compromesso.

5.1.2 Il processo decisionale: molti obiettivi e molti decisori.

Per la maggior parte dei casi le alternative da analizzare non possono essere valutate in base ad un solo criterio, quindi ad un solo indicatore. Infatti ognuno dei Portatori di Interesse ha un proprio modo di accostarsi al problema e ha interessi specifici in conflitto con quelli degli altri decisori e questo implica che il miglioramento di un indicatore provoca il peggioramento di almeno un altro: la conseguenza è che non si può trovare una soluzione ottima ma solo la soluzione di miglior compromesso. L'essenziale è individuare tutti i conflitti, ve ne sono in genere più di uno, prima che il processo decisionale abbia fine poiché l'efficacia della procedura risiede proprio nella sua capacità di anticipare l'emergere dei conflitti evitando che questi vengano alla luce dopo che la decisione, specialmente se di pianificazione, è stata presa: chi dovesse ritenersi danneggiato dalla decisione presa si opporrebbe alla sua realizzazione in fase operativa già avviata, causando ritardo e consumo inutile di risorse e denaro e nel caso di ripresa delle trattative queste si riavvierebbero in un clima di tensione. Se il Decisore non è unico, alla conflittualità tra obiettivi che traducono i criteri dei Portatori di Interesse, si somma la conflittualità tra decisori i quali hanno ciascuno dei quali a un proprio sistema di preferenze. Indipendentemente dalla specificità del problema in esame la procedura decisionale deve essere in grado di gestire la pluralità dei soggetti con ruolo decisionale, il conflitto che segue dai loro diversi interessi e permettere una mediazione efficace che porti alla scelta dell'alternativa migliore o perlomeno individuare le opzioni di intervento che raccolgono il consenso più ampio. Ai problemi puramente tecnici e operativi si aggiungono quelli più strettamente tipici del processo decisionale: quando non esiste un solo criterio di valutazione e/o il Decisore non è unico, si tratta di problemi a molti obiettivi e/o a molti decisori.

In un problema a molti obiettivi gli indicatori di valutazione sono più di uno, espressione dei molteplici e differenti interessi dei portatori, ma il Decisore è unico. Il concetto di alternativa ottima, adatto ai casi di completa razionalità, negli altri perde di significato perché l'alternativa ottima per un

indicatore non lo è di solito per gli altri. La valutazione riguardo l'efficacia delle alternative è preceduta dalla stima degli effetti che ogni alternativa produce sugli indicatori: una volta calcolata l'alternativa, sulla base dei valori assunti dall'indicatore, il Decisore esprime il suo sistema di preferenze ordinandole in base alla relativa soddisfazione delle sue esigenze. Identificare l'importanza relativa degli indicatori e ordinare le alternative prevede una metodologia rigorosa e la conoscenza approfondita delle conseguenze degli effetti delle decisioni sul sistema: questo porta gli interessati ad avvalersi dell'aiuto di esperti di settore che li aiutino nell'interpretazione dei risultati, lasciando al Decisore gli aspetti della scelta relativi ai giudizi di valore, l'ambito più soggettivo. La soggettività, per quanto sia molto difficile da gestire, è un aspetto imprescindibile del processo decisionale perché parte fondamentale della struttura delle preferenze del Decisore: il modo di affrontare la questione è rappresentare in maniera esplicita i conflitti esistenti e dichiarare in maniera trasparente gli elementi di soggettività.

Con un solo Decisore la scelta dell'alternativa di miglior compromesso può avvenire al termine della fase di valutazione, ma questo tende a escludere i portatori dalla decisione fatto non auspicabile qualora gli interessi in gioco siano molteplici e in conflitto, specchio dei diversi punti di vista. È quindi consigliabile che i Portatori di Interesse abbiano ruolo decisionale attivo e che le alternative di miglior compromesso emergano dalla negoziazione, in fase di comparazione, e solo in seguito avvenga la decisione politica per raccogliere il consenso, quando siano rivelate le alternative che i portatori ritengono più interessanti e perché e a quali si oppongono. Se la decisione politica non permette di raggiungere un accordo unanime, si evidenzia l'oggetto della non raggiunta soddisfazione e si percorrono due possibili vie: si tenta una miglior comprensione del conflitto e da qui si ricercano nuove alternative o si ricorre a misure di mitigazione e compensazione.

Il problema generalmente si risolve partendo dalla definizione delle alternative che si configurano come un pacchetto integrato di azioni, tutte quelle individuate assieme ai Portatori di Interesse e agli esperti di settore di loro fiducia e combinate in tutti i modi possibili. Spesso il numero di alternative potenzialmente realizzabili che ne deriva è talmente elevato che sarebbe impossibile esaminarle tutte, quindi occorre trovare un sistema per selezionarne solo alcune ritenute di maggior interesse ma sempre in accordo con i criteri stabiliti dai Portatori di Interesse. In problemi molto complessi e formalizzati in genere si ricorre alla definizione di un problema matematico, detto di progetto, che selezioni le alternative efficienti rispetto agli obiettivi del progetto stesso. Gli obiettivi vengono definiti su un orizzonte temporale all'interno di uno scenario di progetto rispetto a un sottoinsieme degli indi-

catori di valutazione, detti indicatori di progetto. La limitazione del numero di indicatori si rende necessaria quando considerare tutti gli indicatori in una volta sola richiederebbe un tempo eccessivo per la risoluzione del problema di progetto: il rischio di polarizzare il risultato escludendo dall'analisi potenziali risoluzioni si evita eseguendo una scelta accurata mentre nella fase successiva, di stima degli effetti, le alternative efficienti individuate vengono valutate rispetto all'insieme completo degli indicatori. Le proprietà del sistema si traducono in vincoli mentre le azioni normative e/o strutturali e gli elementi dello scenario di progetto concorrono a determinare il valore dei parametri che compaiono nel problema di progetto il quale una volta risolto fornisce le alternative da esaminare.

5.1.3 Design delle alternative.

Le prime fasi della procedura prevedono principalmente l'analisi del contesto, l'individuazione dello scopo, dei portatori di interessi coinvolti, di criteri e indicatori di valutazione, e l'identificazione del modello del sistema. Una volta definiti questi aspetti, occorre identificare le alternative di maggior interesse. Solitamente tra tutte le alternative, realizzate combinando in maniera integrata e coordinata le azioni, vengono prese in considerazione solo quelle suggerite dall'esperienza dell'esperto o quelle proposte dai Portatori di Interesse: se da un lato questo non è del tutto sbagliato, è più opportuno usare questo bagaglio di conoscenze come punto di partenza e comunque tenere presenti le alternative ricavate dalla combinazione di tutte le azioni individuate per non rischiare di escludere a priori possibili soluzioni senza analizzarle. Così facendo però si ricava un consistente numero di alternative che potrebbero richiedere un tempo di elaborazione eccessivo senza peraltro condurre a un risultato soddisfacente: quindi, dopo aver definito tutte le possibili opzioni di intervento, si esegue una selezione delle sole alternative ritenute di interesse in base ai criteri dei Portatori di Interesse.

Questo aspetto della questione si risolve nella definizione e risoluzione del cosiddetto problema di progetto che consiste nell'individuazione delle alternative efficienti rispetto agli obiettivi stabiliti sulla base degli indicatori concordati con i Portatori di Interesse. Tutto ciò è molto complesso e viene complicato ulteriormente dalla presenza, in generale, di una pluralità di obiettivi e dalla necessità di coinvolgere i Portatori di Interesse nel processo decisionale in quanto la partecipazione è l'unica garanzia di risoluzione del conflitto sulla risorsa. Il caso più semplice è quello in cui la decisione avviene in condizioni di completa razionalità, quando esiste un unico indicatore con cui valutare gli effetti di una sola alternativa per un unico portatore di interesse, il che però è davvero molto raro. Il caso in cui manchi pluralità di

Portatori di Interesse, quindi di obiettivi, è il solo in cui è possibile trovare l'alternativa ottima, quella che fornisce il miglior valore dell'indicatore; rimangono comunque difficoltà di risoluzione del problema di progetto a causa della presenza di un numero di alternative pressoché infinito, della presenza di decisioni ricorsive, dell'incertezza degli effetti dovuta alla casualità dei disturbi. Se il numero di alternative da calcolare è infinito, o molto elevato, non è possibile esaurirle tutte con una procedura esaustiva che rischia di non avere fine: occorre definire una procedura che ne esamini un numero finito selezionato accuratamente in base ai criteri dei Portatori di Interesse e permetta di avvicinarsi il più possibile all'alternativa ottima in un tempo di calcolo accettabile.

5.1.4 Problematiche connesse ai disturbi.

I disturbi casuali che agiscono sul sistema rendono tale anche l'indicatore, e l'obiettivo: come conseguenza si ha che non è più possibile ordinare le alternative. Per risolvere la questione o quantomeno fare in modo che si riesca ad applicare il processo decisionale si associa un valore deterministico tra tutti i possibili valori che può assumere l'obiettivo in concomitanza di ogni alternativa. La scelta del filtro da applicare dipende sia dalla natura del disturbo, incerto o stocastico, che dall'avversione al rischio del Decisore.

In molte fasi del lavoro si pone il problema del trattamento dell'incertezza, o disturbi , dovuta alle informazioni insufficienti o soggette a errori. L'incertezza può avere forme o origini differenti: i disturbi si dicono stocastici quando se ne conosce la distribuzione di probabilità e incerti se si conosce solo l'insieme dei valori che potrebbero assumere, comunque la natura del disturbo è fortemente influenzata dalla fonte che lo genera ad esempio gli errori di misura sono da attribuirsi a sbagli commessi nella raccolta dei dati. Oltre all'incertezza numerica in fase di definizione delle azioni si ha incertezza relativamente alla descrizione delle azioni stesse nel caso in cui non fosse chiaro il modo in cui di fatto verranno implementate. I disturbi che rendono incerti gli scenari di progetto e di valutazione sono la principale fonte di perplessità dei Portatori di Interesse che rispetto a questi manifestano la propria avversità al rischio di cui è necessario tener conto filtrandola opportunamente. Infine c'è l'eventualità che il modello non descriva esattamente la realtà, gli errori di processo. La combinazione di tutti questi disturbi genera l'incertezza che affligge i valori degli indicatori della matrice degli effetti e che si ripercuote sulla successiva valutazione e comparazione delle alternative e negoziazione.

Le azioni sono di due tipi, pianificatorie e gestionali: si riconducono le prime alle seconde tramite una politica di regolazione.

Nei problemi di pura pianificazione, quelli che richiedono solo azioni pianificatorie, vanno affrontate solo le prime due questioni: infinite alternative, incertezza degli effetti dovuta alla natura del disturbo e relativa avversione al rischio del Decisore.

5.2 Scegliere tra infinite alternative in caso di pura pianificazione.

Si consideri il caso in cui la scelta dell'alternativa avvenga in condizioni di pura pianificazione con disturbi deterministici (nel senso che si conosce a priori la traiettoria, o scenario, che seguirà il disturbo), ma il numero di alternative da analizzare sia infinito o comunque tale da non consentire una procedura esaustiva.

Gli elementi del problema di pianificazione sono: il modello del sistema, l'indicatore, lo scenario di progetto.

Un'azione pianificatoria è un'azione che viene presa una tantum senza preoccuparsi degli effetti che potrebbe avere in futuro su un'altra azione analoga. Queste sono decisioni non dinamiche, ma non è detto che il sistema interessato sia statico: viene comunque descritto dal modello globale ma in assenza di decisioni ricorsive, cioè senza la politica. Se è nota una traiettoria, o scenario, del disturbo si può dire che questo sia deterministico.

Le uscite del modello considerate sono gli indicatori, o costi per passo, che esprimono il punto di vista del Decisore dal momento che quello che interessa è misurare gli effetti. Lo scopo del problema è individuare l'alternativa ottima per il Decisore il cui punto di vista è specificato da un obiettivo. Si intende l'obiettivo come un indicatore al quale venga applicato un criterio per filtrare i disturbi casuali: se tali disturbi non sono presenti, indicatore e obiettivo sono sinonimi. L'indicatore è stato definito come un funzionale delle traiettorie dello stato, della decisione di pianificazione, del controllo se in presenza di politica di gestione, e del disturbo che agiscono sul sistema su un orizzonte temporale, o di progetto, e viene espresso come aggregazione, in genere la somma o il massimo, nel tempo di più funzioni dette indicatori per passo. Le traiettorie dello stato e del disturbo deterministico sono legate alla dinamica del sistema e vengono determinate risolvendo l'equazione di stato definita dal modello. Per valutare la prestazione del sistema nel caso di pura pianificazione si adottano due tipi di orizzonte temporale, finito e infinito. Spesso in caso di orizzonte temporale finito è presente una penale non nulla nella formulazione dell'indicatore, questo per evitare costi futuri non calcolati oltre l'orizzonte di tempo stabilito. Per tenere conto degli effetti di

un alternativa nel lungo periodo si considera un orizzonte infinito, in questo caso nella formulazione dell'indicatore si inserisce un limite che deve esistere ed essere finito, fatto non sempre garantito, e per fermare la simulazione, che ragionevolmente non può proseguire per sempre, si stabilisce una condizione di terminazione stabilendo una soglia per il valore dell'obiettivo . Per ottenere convergenza si adottano due opzioni: si attualizzano i costi futuri, quasi sempre con indicatori di significato economico, dando maggior peso a ciò che si verifica nel transitorio o si definisce l'indicatore come costo medio su orizzonte infinito, anche se questo metodo ha lo svantaggio di sminuire fortemente i costi sul breve periodo rispetto ai costi a regime. Indipendentemente dall'orizzonte temporale scelto è importante essere consapevoli che questo ha grande influenza su tutti i risultati successivi e sulla scelta finale dell'alternativa. La traiettoria del disturbo, come quella dei parametri, definisce il modello e non dipende dall'alternativa in esame e dalla scelta del Decisore: entrambe costituiscono lo scenario di progetto, cioè lo sfondo su cui il sistema evolve nel tempo. In caso di incertezza sullo scenario e di scarsa informazione sui disturbi casuali ci si riserva il diritto di eseguire analisi di sensitività su ciò che è dubbio. Per evitare errori ci si avvale della consulenza di esperti di settore o dell'ausilio di modelli (sotto ipotesi di stazionarietà).

5.2.1 Formulazione del problema in caso di pura pianificazione: frontiera di Pareto e stima degli effetti.

L'obiettivo di progetto, noti lo stato iniziale e la traiettoria del disturbo deterministico, è una funzione deterministica della decisione di pianificazione e viene, in genere, minimizzato per ottenere l'alternativa ottima, o sub-ottima nel caso di più indicatori. La decisione da prendere può essere scelta solo tra un insieme di alternative ammissibili concordato in precedenza. Nella formulazione del problema occorre decidere se considerare anche gli effetti nel transitorio o solo a regime. Risolvere il problema di pianificazione, esempio a regime, richiede il calcolo dell'equazione di stato del modello. Se il caso studio è non lineare non si risolve un sistema algebrico ma si simula finché non si giunge a stabilità, sfruttando l'ergodicità dei sistemi naturali che tendono a raggiungere l'equilibrio. In caso di numero infinito di alternative la procedura esaustiva è inapplicabile perché si tratterebbe di realizzare un numero infinito di confronti: la soluzione al problema di programmazione matematica può quindi essere solo la ricerca del valore sub-ottimo delle componenti del vettore di decisione tenendo presente che il tempo di calcolo aumenta con l'aumentare del numero di elementi del vettore di decisione. Per ovviare a queste e altre problematiche si utilizzano tecniche di modellazione matematica in base alle

proprietà del sistema che si desumono dalla sua conoscenza a priori.

In presenza di un molteplice numero di un obiettivi occorre rappresentare in maniera esplicita ed evidente il conflitto per mostrare al Decisore la soggettività all'interno del suo sistema di preferenze, cioè i giudizi di valore che sono politici per natura. Questo modo di rappresentare il problema di progetto prende la forma della frontiera di Pareto, la cui ricerca va ricondotta alla soluzione di una famiglia di problemi di progetto a un solo obiettivo, riassumendo in base a un criterio condiviso i numerosi indicatori. I diversi obiettivi producono diversi ordinamenti delle alternative, quindi ogni obiettivo considerato restituisce soluzioni differenti tra loro.

Nella definizione del problema di progetto si definiscono gli obiettivi e la forma del disturbo e si stabilisce il relativo criterio di filtraggio. Il problema di progetto può riguardare la ricerca di una politica a più valori, o a un valore solo, ma anche il vettore delle decisioni di pianificazione, strutturali o normative, entrambe o uno dei due aspetti. Nel caso il problema di progetto sia concernente molti obiettivi, o comunque più di uno, non si ottiene una soluzione ottima poiché i diversi obiettivi producono diversi ordinamenti delle alternative: occorre rivisitare il concetto di ottimo dal momento che la soluzione sarebbe differente a seconda dell'obbiettivo considerato. Per la creazione della frontiera di Pareto si consideri di dover ad esempio minimizzare più obiettivi i cui valori dipendono da vettori di decisione, pianificatorie o politiche, per le quali comunque gli unici valori ammessi sono compresi all'interno di un insieme, detto delle decisioni ammissibili. Ogni decisione presa viene visualizzata nello spazio delle decisioni e produce un punto, come risultato del calcolo dell'indicatore, nello spazio degli obiettivi. Al variare delle decisioni prese vengono individuati nuovi punti nello spazio degli obiettivi: tecnicamente, si dice che gli obiettivi definiti mappano l'insieme delle decisioni ammissibili nell'insieme degli obiettivi, che restituisce tutti i valori degli obiettivi raggiungibili ottenuti per tutte le decisioni ammissibili.

Lo scopo del Decisore è individuare le decisioni che producono gli obiettivi con miglior valore. Se la definizione degli obiettivi ha come scopo la loro minimizzazione, come spesso accade, l'ideale per il Decisore sarebbe trovare un unico punto sulla frontiera che li minimizzi tutti: questa soluzione auspicata è nella maggior parte dei casi impraticabile, proprio per la presenza di situazioni conflittuali che causano inconciliabilità, tipicamente perché non è mai possibile realizzare interventi efficienti a costi bassi. Per questo in genere ci si accontenta di trovare soluzioni per le quali il miglioramento di un obiettivo non comporti il peggioramento di un altro: queste soluzioni vengono dette efficienti o paretiane, il loro insieme definisce la Frontiera di Pareto che si caratterizza come insieme nello spazio delle decisioni e come insieme dei punti nello spazio degli obiettivi in cui la frontiera stessa si mappa,

poiché la frontiera si riferisce parimenti sia alle decisioni efficienti che alle loro prestazioni. È da precisare che non si restituisce l'indicazione univoca sulla decisione da prendere ma viene fornito un insieme di decisioni interessanti,in altre parole quelle da non escludere, per il Decisore il quale, proprio dalla visione della frontiera, potrebbe giungere a perplessità e ritornare sui suoi passi, per esempio decidere che un obiettivo che gli sembrava avesse importanza primaria in realtà può essere subordinato a un altro o rivedere alcune prese di posizione poiché dalla frontiera di Pareto emerge che ci sono obiettivi che, pur minimizzati rispetto al problema dato, non raggiungono comunque prestazioni soddisfacenti. E' da sottolineare che questa rappresentazione fa riferimento solo all'efficienza ma non affronta la delicata e importante tematica dell'equità e della distribuzione dei benefici: da ciò deriva che la frontiera di Pareto, per quanto possa essere efficace nel fotografare e portare alla luce il conflitto, non è lo strumento adatto per decidere in modo equo. Inoltre si deve tener conto che questo metodo è molto efficiente solo finché non sia richiesto esprimere giudizi di valore, cioè finché decidere non implichi la soggettività. Quando sia necessario esprimersi sull'importanza relativa degli obiettivi si entra in una nuova fase, detta di valutazione.

Le azioni pianificatorie, o le politiche, possono essere scelte solo nello spazio del vettore dei parametri: dopo aver risolto il problema di progetto è possibile che in alcune zone dello spazio degli obiettivi i punti che decrivono la frontiera siano più fitti, dal momento che la curvatura della frontiera di Pareto spesso non è costante, è necessario dunque ragionare su quali valori del parametro permettano di rendere più omogenea la frontiera.

Una volta identificate le alternative interessanti la fase successiva serve a stimarne gli effetti, ovvero i valori di tutti gli indicatori di valutazione calcolati in corrispondenza di ognuna, non solo del sottoinsieme di quelli di progetto. Un problema di progetto a molti obiettivi per essere risolto deve essere ricondotto a un problema a un solo obiettivo che porti all'individuazione delle alternative efficienti. Le alternative efficienti sono però tali che per il corrispettivo valore del parametro che serve a raggruppare insieme i diversi indicatori per il calcolo della frontiera, può essere il peso, in punto di riferimento o la soglia per il vincolo, si ottiene la coppia data dalla decisione di pianificazione e dalla politica, o una sola delle due, che risolve il problema di progetto a un solo obiettivo senza però restituire singolarmente il valore dei multipli obiettivi: conoscere il valore del mono - obiettivo che in qualche modo riassume gli altri non permette di conoscere il valore degli obiettivi che insieme lo definiscono, questo perché i metodi per identificare le alternative efficienti esplorano la frontiera di Pareto non nello spazio degli obiettivi ma in quello delle decisioni, infatti viene restituita la decisione di pianificazione migliore, e se richiesta anche la politica. La necessità di ricondursi ai valori

dei singoli obiettivi è la motivazione principale, anche se non l'unica, per la quale si procede alla fase di stima degli effetti. Inoltre è fondamentale per la procedura decisionale conoscere gli effetti prodotti dalle alternative su tutti gli indicatori di valutazione, non solamente su quelli selezionati per essere gli indicatori di progetto in modo da poter proseguire nelle successive fasi: infatti, se non conoscesse il valore degli indicatori formulati il portatore di interesse non sarebbe in grado di valutare l'effetto prodotto dalla realizzazione di determinate alternative sopratutto nel settore che lo riguarda più da vicino. Quindi bisogna individuare tutti i valori degli indicatori, e non solo degli obiettivi di progetto.

Nel caso di problemi di pura pianificazione lo scopo viene raggiunto calcolando le funzioni che definiscono gli obiettivi relativi alle alternative efficienti in corrispondenza del vettore delle decisioni di pianificazione.

Lo scenario rispetto al quale vanno stimati gli effetti delle alternative è composto dalla serie dei disturbi, dai parametri del sistema e dallo scenario di valutazione, o meglio di simulazione, di cui fa parte lo scenario di progetto che serve a stimare gli indicatori di progetto, sottoinsieme di quelli di valutazione. Nel caso in cui il sistema sia dinamico la simulazione richiede che ogni alternativa venga calcolata su un orizzonte temporale sufficientemente lungo perché si abbia la realizzazione di eventi estremi, ad esempio periodi estremamente siccitosi o al contrario molto piovosi, in modo da avere un quadro ampio e non trascurare gli eventi estremi che di norma sono quelli che si vuole gestire perché suscitano maggiori danni e quindi maggiori preoccupazioni. Il modello viene alimentato da opportuni ingressi cioè l'alternativa scelta e lo scenario di valutazione. In particolare spesso si ricorre al cosiddetto scenario storico, cioè la situazione storicamente rilevata, per permettere ai Portatori di Interesse un confronto verosimile tra quello che si è verificato in passato effettivamente e quello che sarebbe successo se si fosse adottata l'alternativa testata. Se lo scenario storico non presentasse un quantitativo di dati sufficiente, allora si passerebbe alla generazione di uno scenario artificiale equiprobabile: questa operazione, più realistica, soffre la perdita di pregnanza psicologica per i soggetti interessati. Indipendentemente dal tipo di scenario, storico o equiprobabile a quello storico, la condizione sufficiente è che i processi che li generano si mantengano immutati anche nel futuro, altrimenti gli effetti stimati delle alternative non sono rappresentativi. In tal caso occorre utilizzare modelli che descrivano il cambiamento di scenario atteso.

I valori degli indicatori calcolati vengono ordinati in una matrice, la matrice degli effetti. Precisamente una volta stimati i valori degli indicatori di valutazione in corrispondenza delle relative alternative questi vengono affiancati a formare la matrice degli effetti, o matrice di valutazione, le cui

colonne corrispondono alle alternative e le righe agli indicatori. La matrice degli effetti è il punto di partenza per la fase di valutazione.

Ogni indicatore misura l'effetto di una determinata alternativa sul sistema rispetto al criterio di riferimento, la misura è quantitativa ed espressa in unità fisiche coerenti con il criterio foglia di riferimento. Tuttavia spesso la soddisfazione che il portatore di interesse associa al risultato ottenuto non è direttamente proporzionale con il valore assunto dall'indicatore: di questo si tiene conto associando al valore numerico di ogni indicatore un indice adimensionale che esprima la soddisfazione effettiva dei soggetti coinvolti i quali vengono intervistati per ricavare un modo, in genere una funzione valore, per associare all'indice un valore per ogni alternativa corrispondente. Anche in questa fase quindi la partecipazione è imprescindibile, poiché i giudizi di valore dichiarati dai Portatori di Interesse sono espressione della loro soggettività. Il calcolo dell'indice porta alla definizione di un ordinamento tra le alternative. In presenza di più indicatori che sono espressione di più settori si generano più ordinamenti, e la scelta dell'alternativa che metta d'accordo tutti passa attraverso la definizione di giudizi di importanza relativa tra settori, richiede cioè che il Decisore politico manifesti le sue preferenze o che i Portatori di Interesse avviino un negoziato.

5.2.2 Le fasi successive: dalla comparazione alla scelta politica

.

Lo scopo di questa fase è raggiungere è individuare un'alternativa giudicata come un compromesso accettabile dai tutti i Portatori di Interesse e che non incontri opposizione. Se non esiste un'alternativa che migliori le prestazioni del sistema per tutti i soggetti coinvolti la fase di comparazione e negoziazione si conclude individuando le alternative che riscuotono il consenso maggiore e i favorevoli e contrari a ciascuna di esse. Questo si ottiene promuovendo attività che permettano ai Portatori di Interesse di venire a conoscenza dei punti di vista gli uni degli altri e degli eventuali effetti negativi che le alternative predilette hanno sulle altre parti in causa: in seguito alla condivisione delle informazioni si avvia una fase di negoziazione per la ricerca del compromesso. È possibile che la negoziazione debba essere interrotta e si instauri una iterazione per il progetto di nuove alternative e la loro successiva valutazione alla luce di quanto emerge sulle esigenze e richieste dei Portatori di Interesse che potrebbero emergere.

Qualora si individui una singola alternativa che gode del favore della maggioranza dei Portatori di Interesse occorre studiare azioni compensatorie e di

mitigazione che permettano di allargare il consenso a quei soggetti insoddisfatti. Le opzioni di intervento che agiscono in maniera specifica sui settori critici devono essere integrate nelle alternative e viene iterata la procedura poiché le nuove azioni devono essere quantificate, se ne devono stimare e valutare gli effetti e le nuove alternative che ne derivano vanno confrontate con le precedenti. In questo modo si identifica un nuovo sistema di alternative di attrazione oggetto della successiva negoziazione. Quando non è più possibile allargare ulteriormente il consenso si ricorre alla scelta politica.

Ai decisori politici spetta la scelta finale tra le alternative di compromesso dalla fase di mitigazione: l'alternativa di miglior compromesso è quella che meglio soddisfa le aspettative dei Portatori di Interesse, quella sulla quale si riesce a trovare un accordo.

L'aspetto fondamentale di tutte le fasi è la partecipazione dei Portatori di Interesse che deve essere continua e piena in tutte le fasi, altrimenti la negoziazione finale non ha senso poiché se i portatori non condividono la definizione delle azioni o non si riconoscono negli indicatori o negli obiettivi o non concordano la forma degli indici non si troverà mai un effettivo accordo e questo non porta alla risoluzione del conflitto di partenza. La partecipazione e il reciproco confronto dei soggetti coinvolti produce nuove informazioni e questo porta sovente a recursioni all'interno della procedura decisionale, necessarie per tener conto delle nuove conoscenze acquisite: l'accresciuta la consapevolezza dei Portatori di Interesse relativamente al problema in discussione permette che la formulazione di richieste più precise e pareri meglio motivati. Una volta trovata l'alternativa di miglior compromesso essa va implementata attraverso gli interventi strutturali e normativi stabiliti e , se presente, la politica di regolazione per la quale è comunque necessario un processo decisionale. L'alternativa di miglior compromesso rappresenta la conclusione del processo di pianificazione e l'inizio della gestione che si rinnova periodicamente sulla base delle nuove informazioni acquisite. Sarebbe comunque un errore pensare che il processo decisionale si esaurisce con la gestione: esso continua con la fase di monitoraggio che ha il fondamentale scopo di controllo e verifica. Vengono monitorati gli effetti prodotti dall'alternativa realizzata per accertarsi che siano quelli attesi e per continuità e coerenza si utilizzano gli indicatori definiti all'inizio della procedura. Qualora si scoprisse che alcune delle ipotesi o dei passaggi che reggono il lavoro non si adattano più al problema è necessario aprire un nuovo ciclo di intervento.

Esiste una differenza tra fase e metodo per portarla avanti. La fase definisce una serie di modi e regole per la sua realizzazione e il tipo di relazione è di uno a molti. La quantità, disponibilità e precisione dei dati ha un ruolo essenziale nell'arco dell'intero processo decisionale: i dati non vengono utiliz-

zati solo in modo quantitativo per definire le azioni o implementare il modello ma anche in modo qualitativo in fase di ricognizione per comprendere dove si può intervenire e quali siano le opzioni di intervento ragionevoli.

5.3 Valutazione dell'efficacia di un sistema di pozzi *scavenger*: applicazione alla zona nord di Nauru.

Nonostante la presenza della lente d'acqua dolce sotterranea a Nauru il suo esiguo spessore rappresenta la principale difficoltà per il suo potenziale sfruttamento ai fini dell'approvvigionamento idrico. Il rapporto SOPAC (2010) stima un bisogno d'acqua totale di circa 114 l/d pro capite, di cui a Nauru il 26 % è fornito dalla risorsa idrica sotterranea ma solo lo 0,2% di questo è utilizzato a scopi potabili. La sola zona che sembra mantenere un buon volume di acqua dolce anche in periodi siccitosi di media durata (2 - 3 anni) è l'area nell'intorno del villaggio di Ronave, come confermato dalla calibrazione del modello, che per questo si rivela l'area di maggior interesse per lo sfruttamento della risorsa idrica. Considerando il posizionamento di tale area, compresa fra 50 e 200 m dalla costa, una gestione mal condotta della falda sottostante, in particolare il suo sovra sfruttamento, comporterebbe un fenomeno di risalita di acqua a concentrazione salina più elevata (*upconing*) dagli strati inferiori e dalla costa. Per tale motivo è stato svolto uno studio sull'applicabilità di un sistema di pozzi *scavenger* che hanno lo scopo di prevenire la risalita dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata al disotto del pozzo di estrazione e di conseguenza di evitare l'intrusione salina negli acquiferi costieri [Mushtaha et al.,2000].

Prima di procedere con la simulazione si è valutato necessario ridefinire la discretizzazione orizzontale della griglia, il periodo di simulazione e il regime di ricarica superficiale. Nella zona della costa a nord del dominio del modello è stata usata una griglia più fine rispetto a quella utilizzata in fase di calibrazione per avere maggior precisione. In particolare la griglia è stata affittita fino ad ottenere celle di 1x1 m in corrispondenza del pozzo S1 già in uso a Nauru per l'approvvigionamento idrico di acqua sotterranea, nella zona del villaggio di Ronave.

Al termine della prima fase di calibrazione del modello si è proceduto a simulare in transitorio un periodo di 100 anni che rappresentasse la condizione iniziale di carichi e concentrazioni del mese di Aprile 2010 con la nuova griglia. La simulazione in transitorio di 100 anni, con i parametri ottenuti alla fine della prima fase di calibrazione, ha fornito quindi i valori iniziali di carico

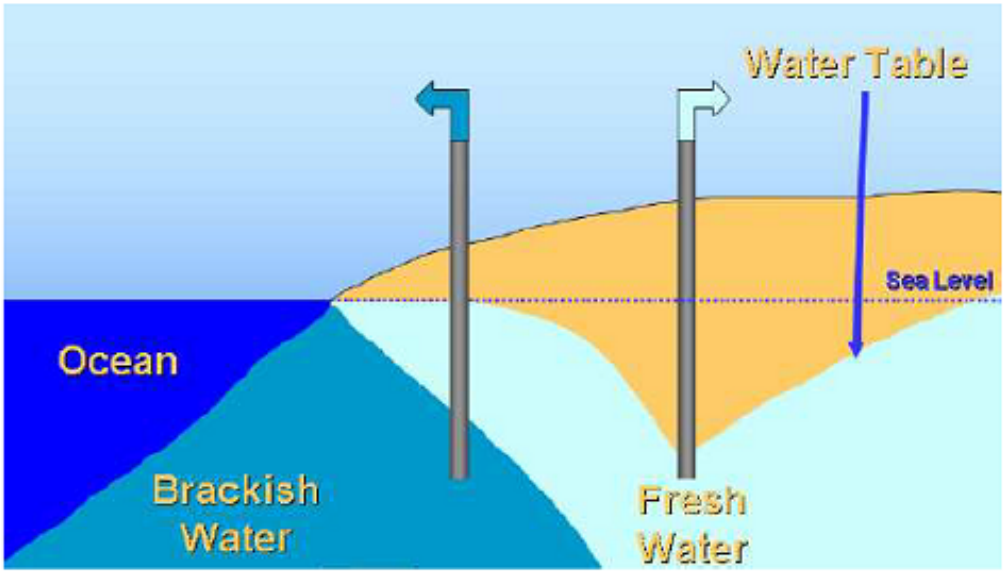

Figura 5.1: Schema di funzionamento di un pozzo *scavenger* (estrae acqua salata) e un pozzo d'approvvigionamento (estrae acqua dolce).

idraulico e concentrazione per il lavoro di valutazione dell'efficacia del sistema di pozzi *scavenger* nella zona del villaggio di Ronave.

Lo scenario di simulazione è costituito da un regime di ricarica superficiale di variabilità mensile, ovvero un periodo avente una buona variabilità di precipitazione per simulare le differenti possibili condizioni e una situazione di ricarica superficiale iniziale simile a quella di Aprile 2010, i cui parametri sono stati usati in fase di calibrazione: osservando lo ietogramma mensile nel periodo compreso tra il 1972-2010 e il regime di ricarica superficiale dello stesso periodo è stato scelto di utilizzare la ricarica relativa al quinquennio Settembre 1994-Agosto 1999 rappresentante una situazione caratterizzata in sequenza da 8 mesi di ricarica elevata, 22 mesi siccitosi, 1 anno molto piovoso e infine di nuovo 20 mesi di siccità.

La scelta del pozzo per le simulazioni come pozzo per l'approvvigionamento di acqua dolce è ricaduta sul pozzo di monitoraggio S1 che si trova nella zona dove è stato deciso di applicare il sistema di pozzi *scavenger* ed è già disposto per l'estrazione di acqua.

La concentrazione salina misurata è la media pesata nei due *layers* . Essa viene misurata ad ogni passo temporale di simulazione del modello ed è ricavabile attraverso la seguente equazione:

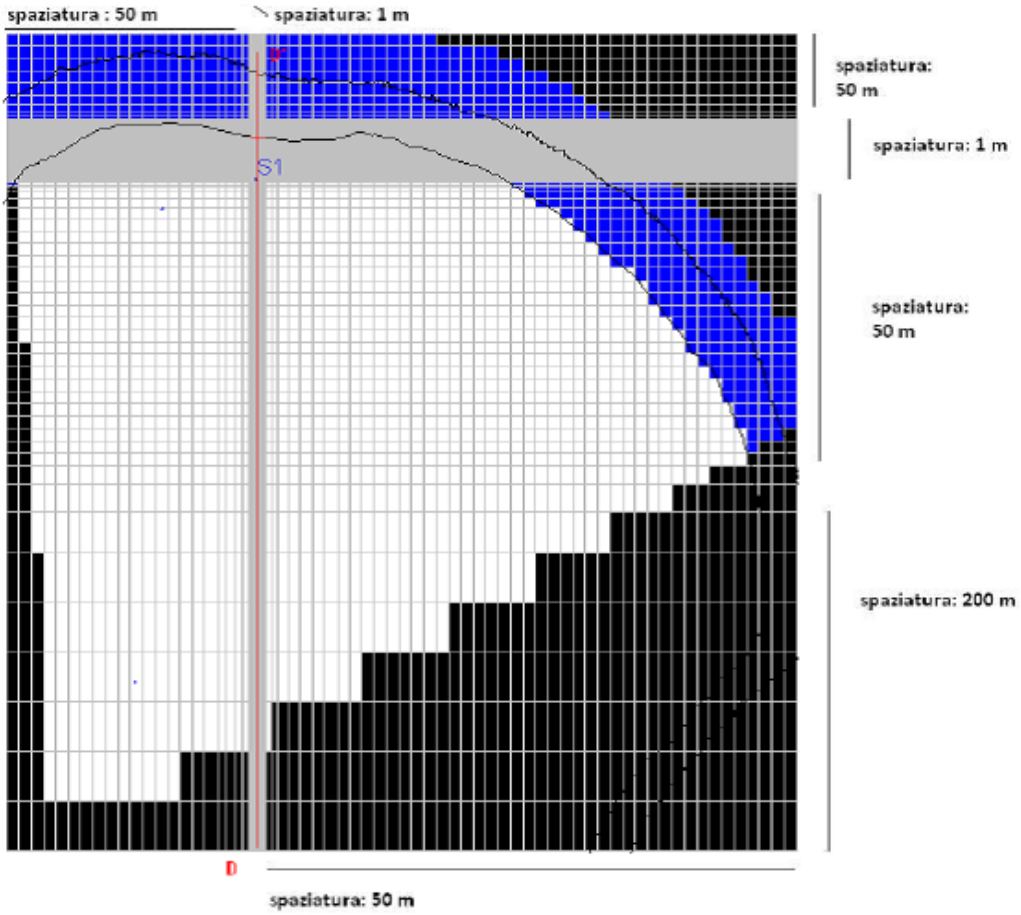

Figura 5.2: Discretizzazione orizzontale della griglia più fine, usata per il lavoro di ottimizzazione sui pozzi *scavenger*.

$$\bar{C} = \frac{Q_1 C_1 + Q_2 C_2}{Q_1 + Q_2} \tag{5.1}$$

dove:

- C è la concentrazione media estratta nei due *layer* dove sono applicati i filtri del pozzo di approvvigionamento (kg/m3);
- Q1 e Q2 sono rispettivamente la portata estratta dai filtri del primo e del secondo *layer*, in funzione dello spessore e della permeabilità dell'acquifero (m3/d);

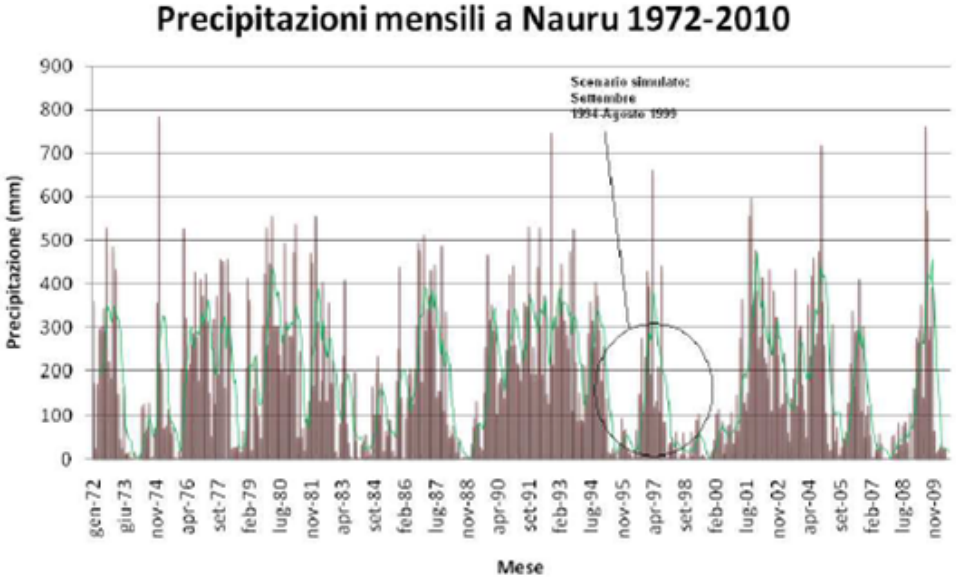

Figura 5.3: Precipitazioni registrate mensilmente a Nauru dal gennaio 1972 al dicembre 2010. In verde la media mobile per un periodo di 6 mesi (Nauru data government).

- C1 e C2 sono rispettivamente le concentrazioni dell'acqua estratta dai filtri del primo e del secondo *layer*, registrata per ogni passo temporale (kg/m3).

L'andamento della concentrazione in S1 nel periodo di simulazione in assenza di estrazione di acqua, né dolce né salata, mostra che, ad eccezione degli ultimi 10 giorni di simulazione, solo i valori dei primi due *layers* sono al di sotto del limite imposto di 1500 mg/l: perciò i filtri del pozzo di estrazione vengono posizionati nei primi due *layers* .

Successivamente è stata effettuata una simulazione con la sola estrazione di acqua dolce dal pozzo S1, utilizzando una portata continua di 1 l/s, per identificare la situazione che si avrebbe nel caso in cui non si mettesse in funzione nessun pozzo *scavenger*.

5.3.1 Simulazioni con un pozzo *scavenger*.

Inizialmente si è deciso di simulare l'azione di un solo pozzo *scavenger* da affiancare al pozzo S1.

Il primo parametro considerato è stata la profondità dei filtri del pozzo *scavenger* i quali devono necessariamente essere posti ad una quota dell'ac-

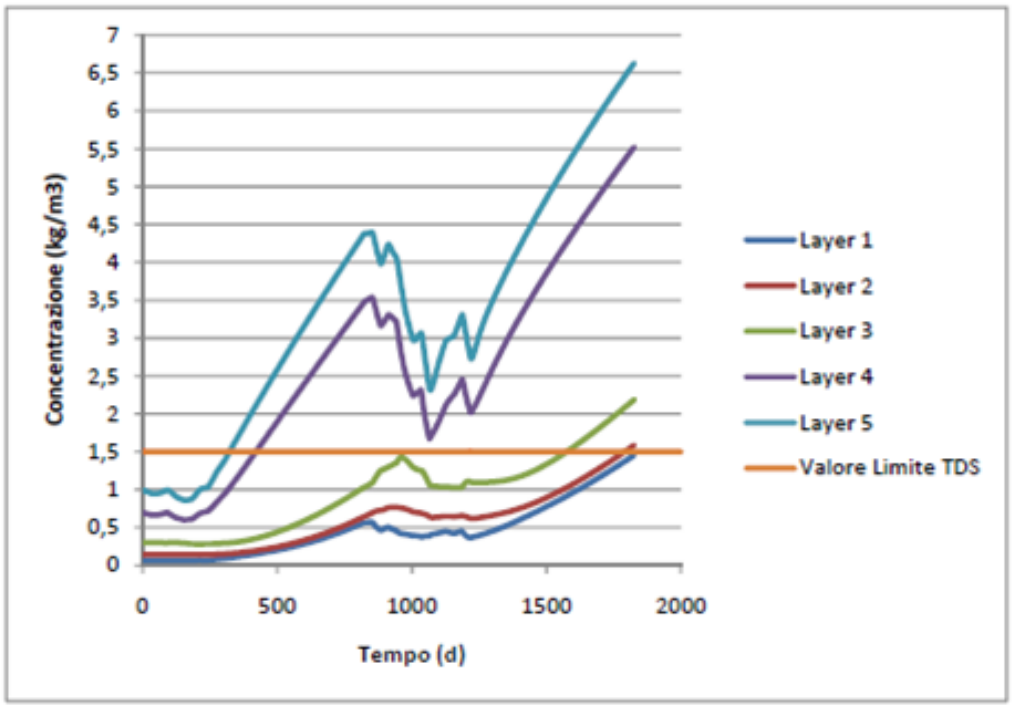

Figura 5.4: Andamento della concentrazione nel punto di estrazione S1 nel periodo di simulazione, in assenza di estrazione.

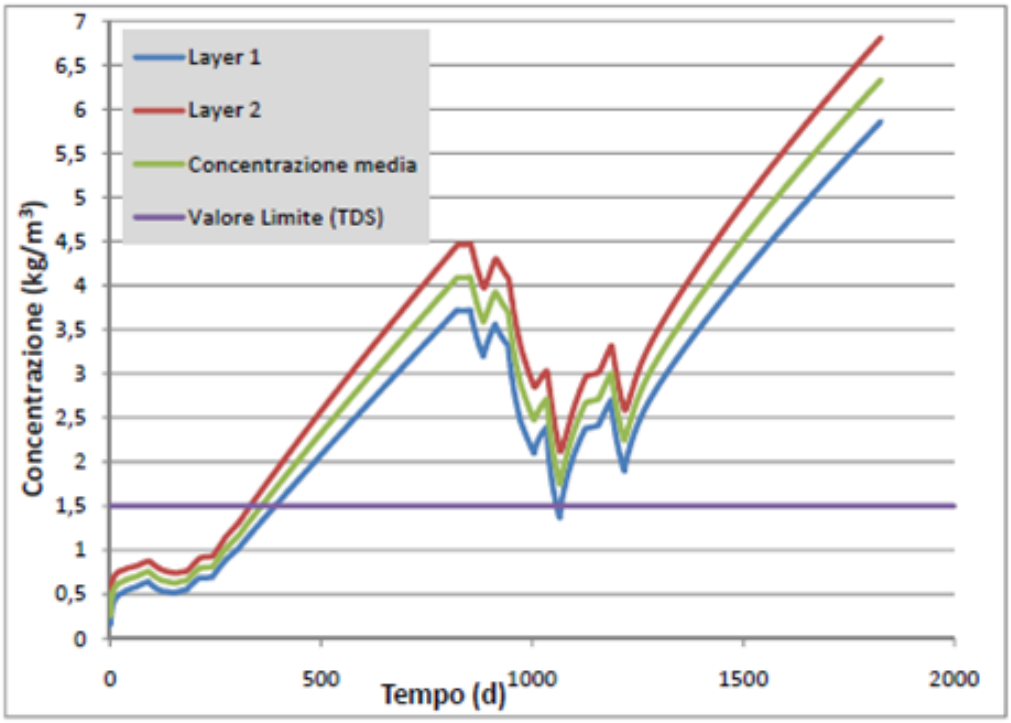

Figura 5.5: Andamento della concentrazione estratta in S1 con portata pari a 1 l/s, in assenza di pozzi *scavenger*.

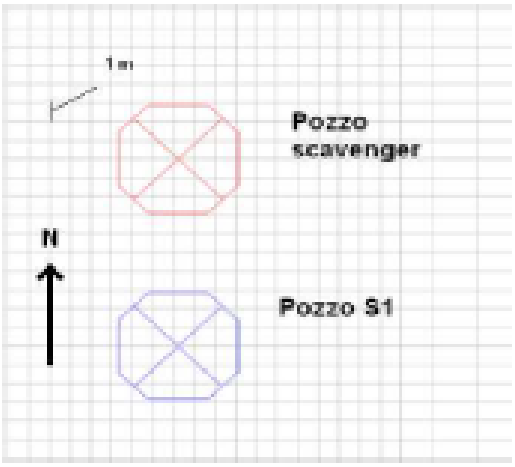

Figura 5.6: Visualizzazione in pianta della configurazione con pozzo *scavenger* (seguendo la linea di flusso) dal pozzo S1.

quifero che presenta una concentrazione maggiore del limite di 1500 mg/l, altrimenti preleverebbero acqua dolce, ma ad una distanza tale dai filtri del pozzo d'approvvigionamento che il pozzo *scavenger* possa influenzare positivamente la qualità dell'acqua dolce estratta. Osservando i valori di concentrazione in S1 di Aprile 2010 si intuisce che i filtri vanno posti al di sotto del 5° *layer* , ad una profondità di 7 m circa rispetto al datum di Nauru, in quanto la lente d'acqua dolce si estende fino a tale profondità e al di sotto di questa quota si posiziona l'interfaccia con l'acqua salata.

Mantenendo come portata di estrazione del pozzo *scavenger* un valore base di 4 l/s e mettendolo nella stessa posizione di S1 (longitudine nulla) si sono svolte prove di simulazione variando la quota dei filtri. Il miglioramento più significativo della qualità dell'acqua estratta da S1 è ottenuto con un posizionamento dei filtri del pozzo *scavenger* nel 7° e 8° *layer* corrispondente ad una profondità che varia da 9 a 16 m rispetto al datum.

In seguito, si e proceduto a variare la portata d'estrazione del pozzo *scavenger*, a partire da un valore minimo di 0,5 l/s fino ad un valore massimo di 8 l/s, mantenendo i filtri nella posizione precedentemente ottenuta ($7-8$ *layer*). Un valore di portata maggiore di 8 l/s avrebbe un dispendio energetico importante che non sarebbe possibile sostenere nel lungo periodo

L'andamento della concentrazione media estratta in S1 variando la portata d'acqua salata estratta mostra che la portata maggiore è quella che migliora in maniera più significativa la qualità dell'acqua di approvvigionamento. Infine si è deciso di variare la distanza del pozzo *scavenger* dal pozzo di approvvigionamento S1, mantenendo portata pari a 8l/s e profondità dei

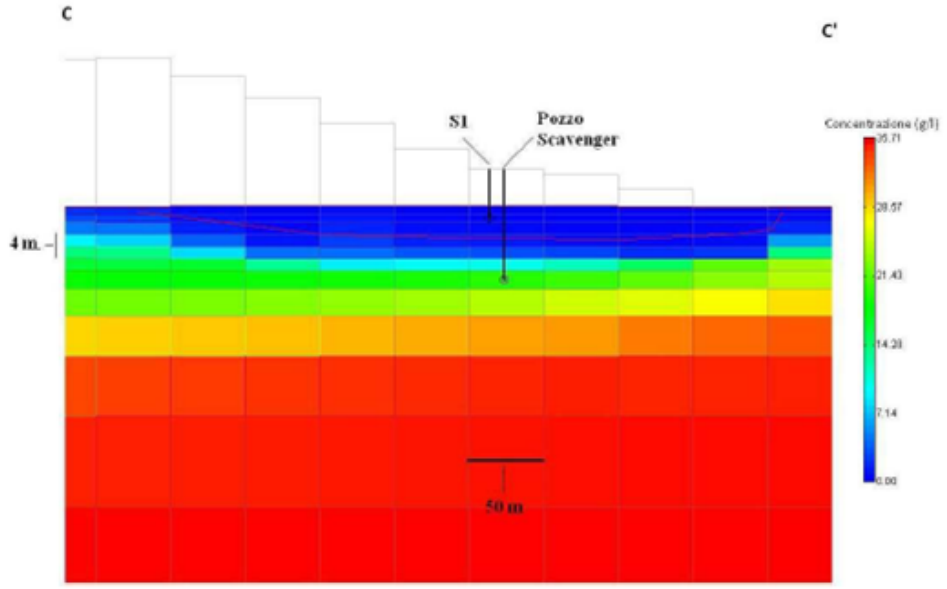

Figura 5.7: Ingrandimento della sezione trasversale CC' con distribuzione della concentrazione dopo la simulazione di calibrazione (prima fase: Aprile 2010). In linea rossa è posta l'isoalina di 1,5 kg/m3. I filtri del pozzo *scavenger* sono posti al di sotto di tale isoalina.

filtri nei *layer* 7 e 8. Il posizionamento del pozzo *scavenger* è sempre a valle di S1 in linea con la direzione di flusso di falda, diretta in questo caso a nord. Si è notato, distanziando il pozzo*scavenger* da S1, un peggioramento della qualità dell'acqua estratta.

La soluzione con la presenza di un solo pozzo *scavenger*, nonostante tenda a diminuire la concentrazione salina nell'acqua estratta dal pozzo per l'acqua dolce, non raggiunge tuttavia l'effetto desiderato di mantenere la concentrazione estratta in S1 al di sotto del limite di 1500 mg/l per l'intero scenario di simulazione.

Le simulazioni effettuate permettono comunque di calcolare i volumi di acqua dolce estratti dal sottosuolo nei due scenari. Nella situazione in assenza del pozzo *scavenger* sarebbe possibile estrarre un volume d'acqua pari a 30670 m3 nei primi 355 giorni scenario della simulazione, periodo in cui la concentrazione media rimane al di sotto del limite di 1500 mg/l, mentre attraverso l'utilizzo del pozzo *scavenger* con l'opzione migliore si avrebbe un periodo di 412 giorni di possibile estrazione con volume di 35600 m3 d'acqua potabile estratta. Questo fornisce un possibile tentativo di risolu-

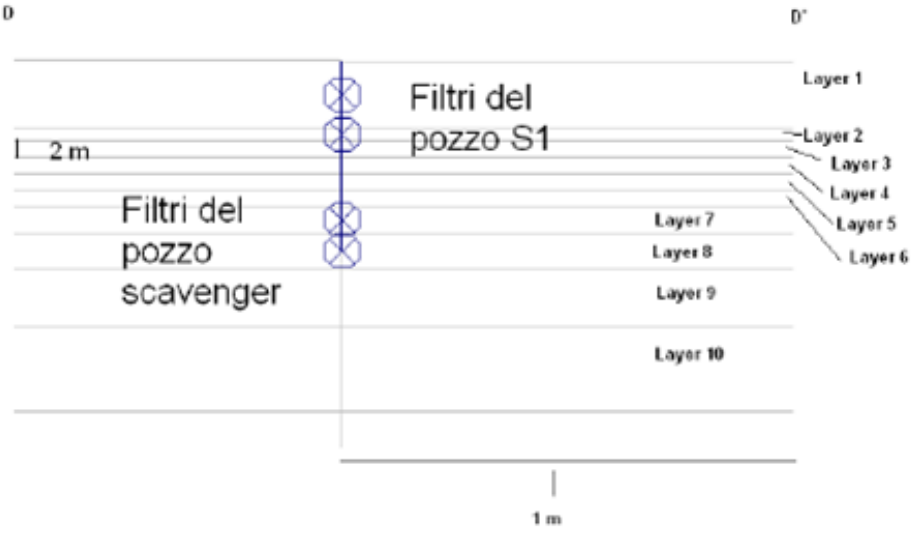

Figura 5.8: Sezione trasversale (ingrandimento nell'intorno di S1 della sezione DD') raffigurante la posizione dei filtri del pozzo *scavenger* sulla medesima verticale.

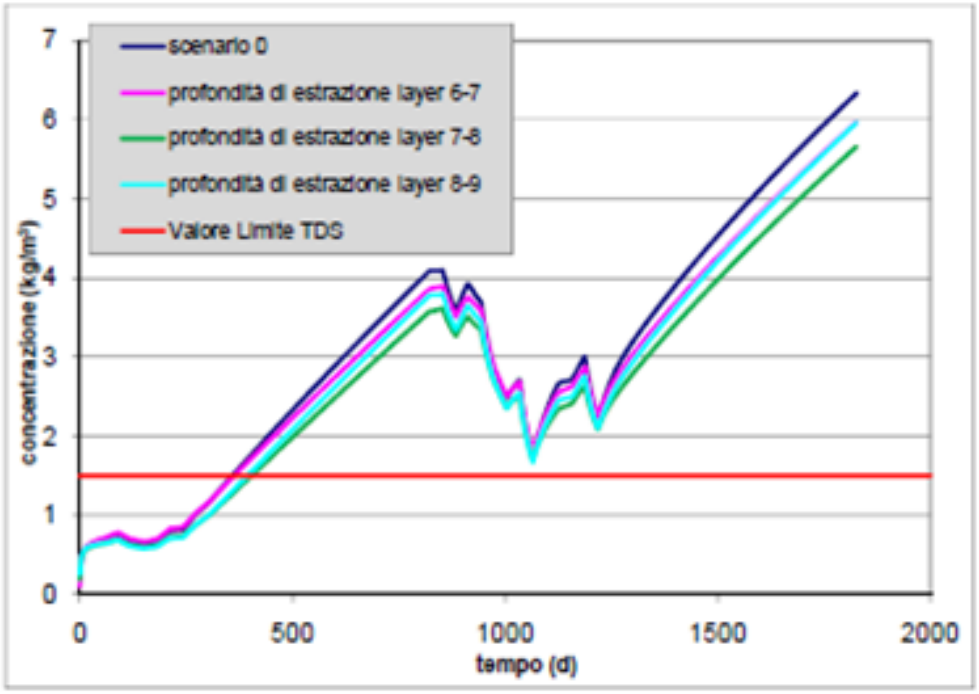

Figura 5.9: Confronto grafico tra l'andamento di concentrazione estratta in S1 nelle diverse configurazioni di profondità dei filtri del pozzo *scavenger*.

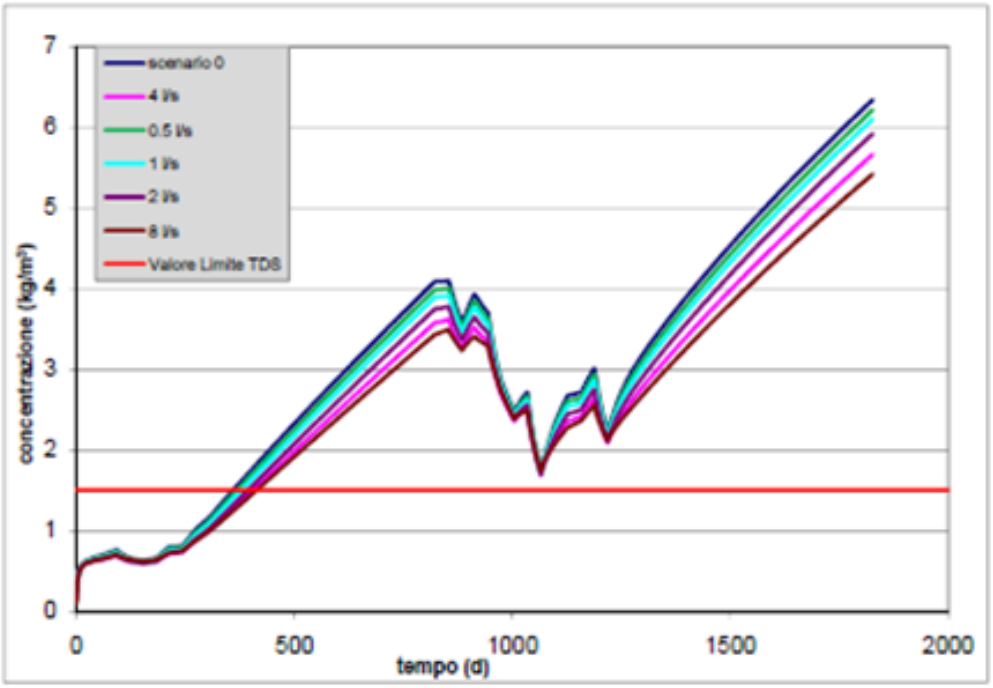

Figura 5.10: Confronto tra gli scenari di simulazione con variazione della portata estratta dal pozzo *scavenger*.

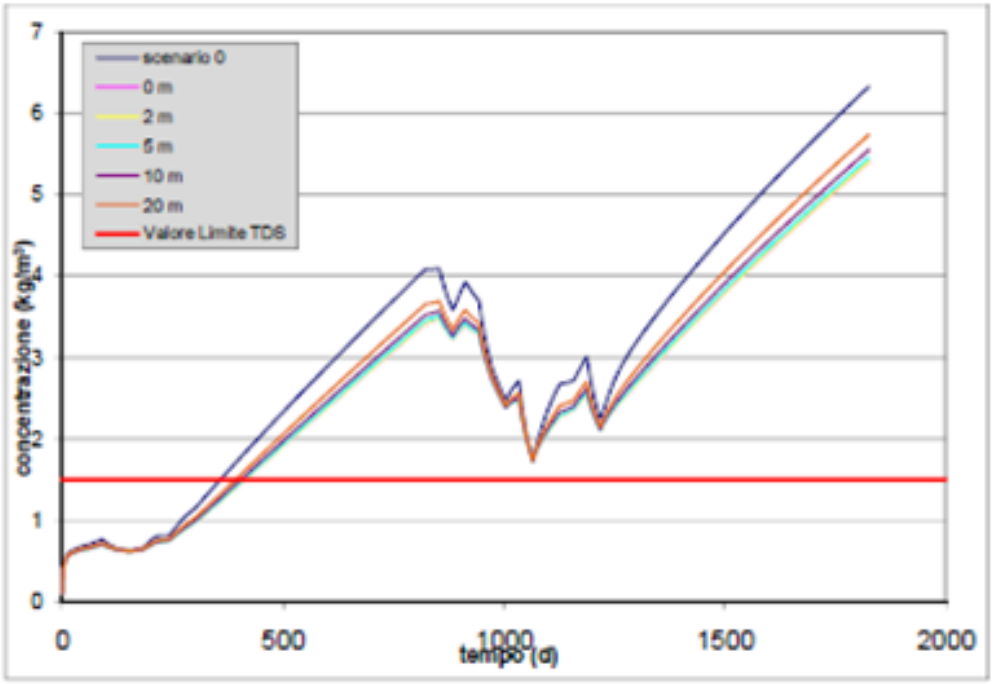

Figura 5.11: Andamento di concentrazione estratta in S1 al variare della distanza in piano del pozzo *scavenger* da S1.

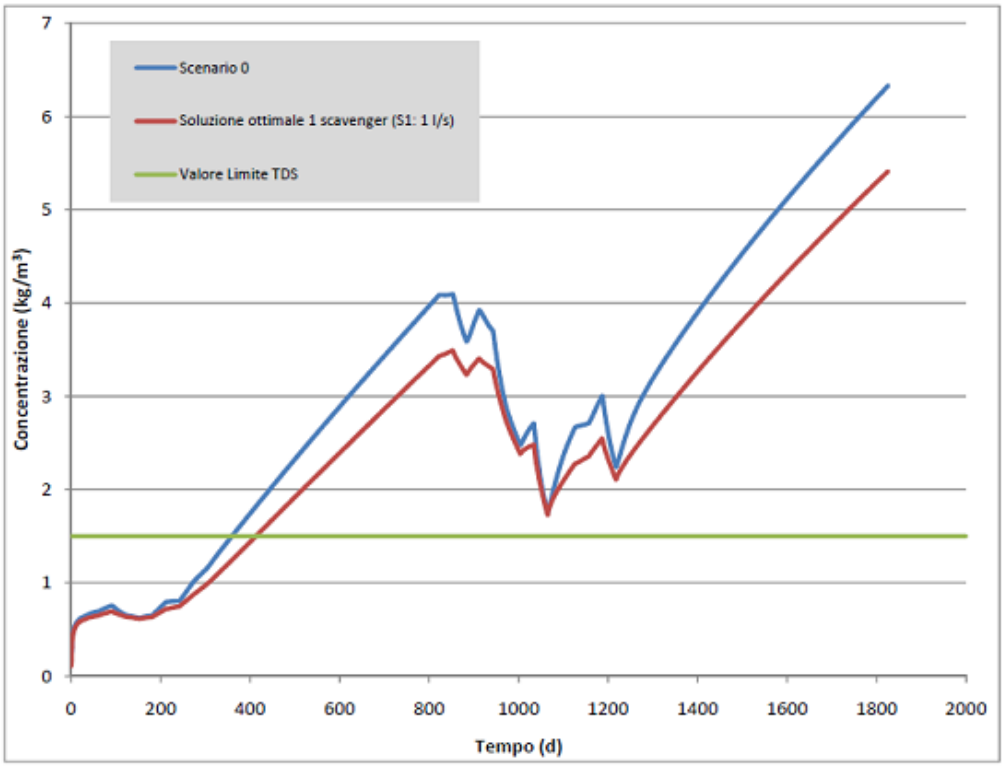

Figura 5.12: Confronto tra gli andamenti di concentrazione estratta in S1 in assenza del pozzo *scavenger* e con la sua configurazione: portata 8 l/s, profondità filtri 7° e 8° *layer*, distanza 0 m da S1.

zione attraverso l'utilizzo di serbatoi che sottoposti ad adeguati trattamenti di potabilizzazione consentano di immagazzinare l'acqua estratta in eccesso rispetto all'uso quotidiano (20 l/d pro-capite, [SOPAC 2010]). La stima dei giorni di crisi idrica sugli scenari di 5 anni simulati indica che in assenza di pozzo *scavenger* si avrebbero 526 giorni di mancanza d'acqua potabile dal sottosuolo, mentre con la soluzione ottimale del pozzo *scavenger* si avrebbero 316 giorni di crisi idrica, ovvero una riduzione del 40% di tale periodo. Sull'isola sono già presenti serbatoi per l'immagazzinamento d'acqua piovana e desalinizzata per un volume di 4240 m3 circa (diametro 30 m e altezza 6 m circa), servirebbero almeno 6 per immagazzinare l'acqua in eccesso estratta nel primo periodo dello scenario con lo *scavenger*.

In base al report SOPAC (2010) si sa che l'utilizzo medio di acqua sotterranea estratta è attualmente intorno ai 94 l/d/persona ma solo per scopi non potabili, inoltre è noto che nei due distretti (Anetan e Ewa) sono utilizzati 39 pozzi, a ciascuno dei quali accedono si stima 6 persone e che tali

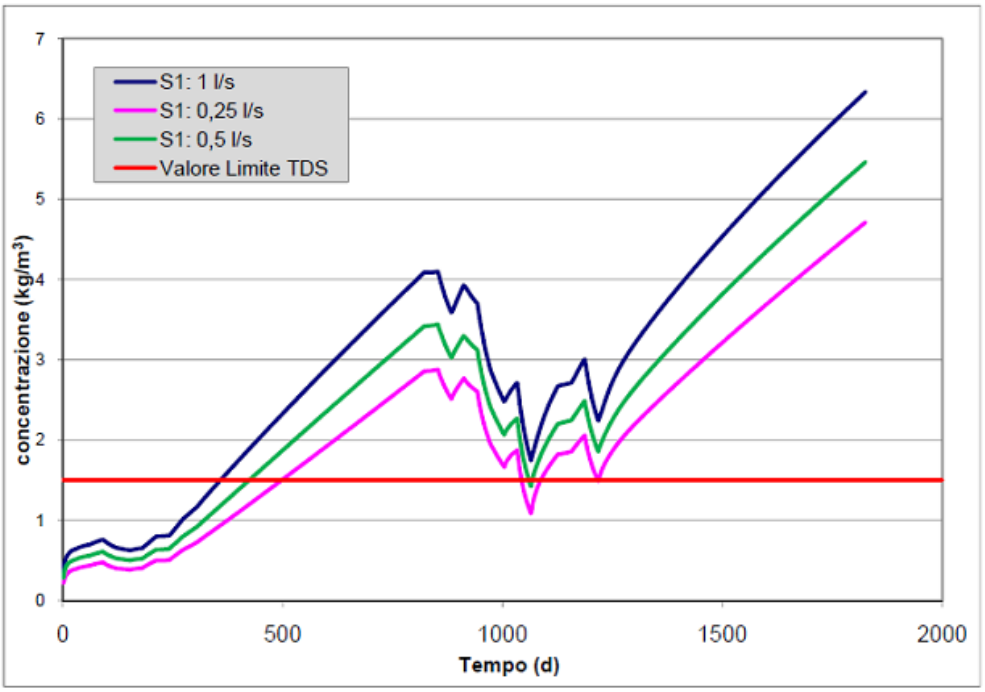

Figura 5.13: Confronto tra gli andamenti di concentrazione estratta in S1 variando la portata estratta dallo stesso in assenza di pozzo *scavenger*.

pozzi operano solo in alcuni momenti della giornata. Approssimativamente si ricava una portata estratta di 0,25 l/s sull'intera area del modello con un'estrazione continua di 24 h/d. Pertanto la portata continua di 1 l/s per S1 considerata potrebbe essere eccessiva se confrontata con i tassi di estrazione di acqua sotterranea rilevati sull'isola: sono state quindi effettuate simulazioni con una portata continua estratta da S1 pari a 0,5 l/s e 0,25 l/s. Da un confronto tra la concentrazione media estratta in S1 in assenza del pozzo *scavenger* diminuendo la portata d'acqua dolce estratta si nota un effettivo miglioramento della qualità dell'acqua. Inserendo nuovamente il pozzo *scavenger* non si nota un miglioramento della concentrazione dell'acqua estratta da S1 tale da giustificare l' utilizzo del pozzo *scavenger*.

Se da un lato la minor portata di acqua dolce estratta diminuisce la portata del cono di richiamo dell'acqua salata, la riduzione dello sfruttamento del pozzo di approvvigionamento porta contemporaneamente a una minore interazione con il pozzo *scavenger* . Si è deciso di porre i filtri del pozzo *scavenger* ad una quota più alta in modo da influenzare maggiormente il cono d'influenza di S1: i filtri sono stati quindi spostati dal 7° e 8° *layer* al 6° e 7° *layer*, al limite con l'interfaccia tra acqua dolce e acqua salata.

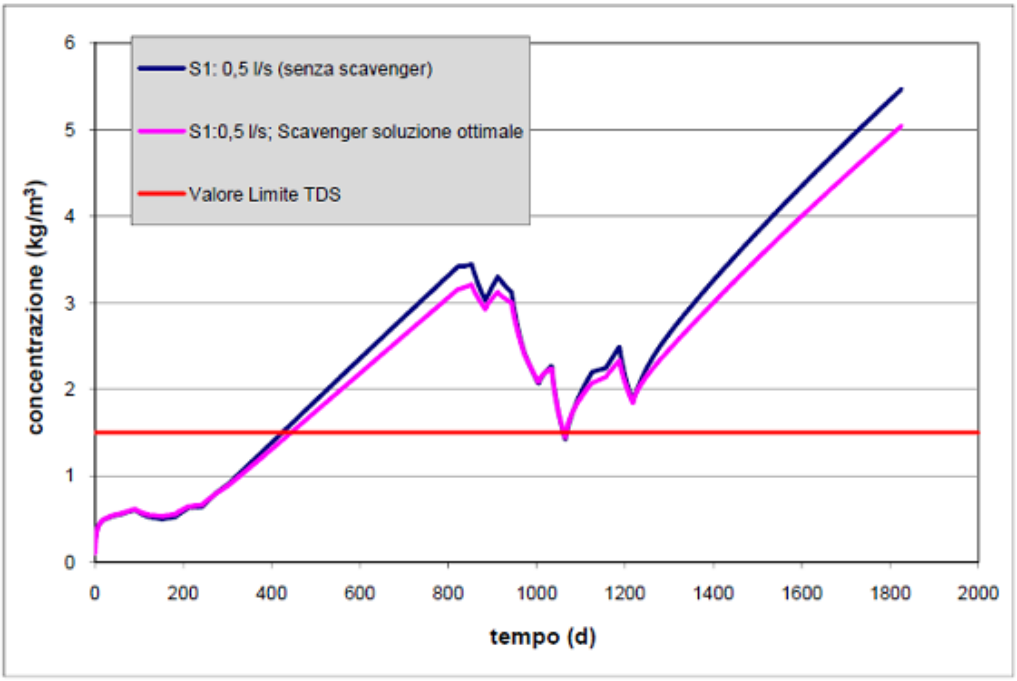

Figura 5.14: Confronto tra gli andamenti di concentrazione estratta in S1 con portata estratta di 0,5 l/s, in assenza di *scavenger* e con presenza dello stesso (portata 8 l/s, stessa posizione di S1 in piano e profondità dei filtri nel 7° e 8° *layer*).

Questa soluzione ha fatto osservare un leggero aumento della concentrazione media di solidi disciolti estratta in S1 e in aggiunta, applicando una portata estratta di 0,25 l/s , si riuscirebbe a soddisfare giusto il bisogno immediato di acqua potabile della popolazione dell'area del modello nel primo periodo dello scenario, quando la concentrazione è sotto il limite stabilito. Se ne deduce che non sarebbe possibile, con portate così basse, immagazzinare alcun volume d'acqua per il periodo di crisi idrica, che sarebbe, nello scenario simulato, di circa 1300 giorni, tre volte superiore al periodo stimato in caso di estrazione con 1 l/s da S1; con la presenza del pozzo *scavenger* si avrebbe soltanto una riduzione di 20 giorni di tale periodo.

5.3.2 Applicazioni e Risultati: il caso dell'isola di Nauru.

La situazione di Nauru dunque si presenta simile a quella di tante altre isole con problemi di reperibilità delle fonti di approvvigionamento idrico e limitate riserve di acqua dolce, la cui principale ricarica è data dalle precipitazioni piovose, per natura non troppo abbondanti, e soggette a fenomeni siccitosi. Oltre alle difficoltà relative alla configurazione naturale dell'isola si aggiunga che Nauru è esposta alla mala gestione delle risorsa idrica su due fronti: le acque nere non sono soggette a depurazione, quindi la falda sottostante l'isola è interessata da fenomeni di inquinamento da fonti organiche e quando, in passato, l'isola ha goduto di prosperità economica grazie allo sfruttamento dei giacimenti di fosforo il governo non ha provveduto allo sviluppo di un piano per affrontare la questione della mancanza di risorsa idrica. L'agricoltura e la pesca sono praticate per lo più per soddisfare i bisogni interni e il turismo è la terza principale fonte di reddito ora che le miniere di fosfati non vengono più sfruttate ma nessuna di queste attività economiche è particolarmente redditizia. Questo rappresenta un aggravante al problema dato dalla scarsità di risorse idriche: infatti le soluzioni finora adottate per sopperire alla mancanza di acqua si fondano sulla disponibilità economica e non sembrano ormai più praticabili. Si tratta da un alto di importare di acqua dall'esterno, idea che si è rivelata eccessivamente costosa oltre a rendere l'isola dipendente da terzi e dall'altro della costruzione e messa in opera in passato di un impianto di desalinizzazione il quale pure presenta notevoli oneri economici soprattutto in base alle oscillazioni di prezzo dei carburanti. Queste soluzioni si sono rivelate più o meno sostenibili fintanto che lo sfruttamento delle miniere di fosforo era redditizio ma ora, terminati i rapporti commerciali, tali vie non sono più praticabili soprattutto su lungo periodo. L'utilizzo di acqua estratta da pozzi domestici per scopi non potabili non

permette un risparmio della risorsa sufficiente perché siano bastevoli i rifornimenti costituiti dall'acqua in bottiglia e di mare trattata e la conservazione dell'acqua piovana nelle cisterne in funzione nell'isola non è igienicamente sicura. Il rilevamento della lente d'acqua dolce nella falda sottostante l'isola rappresenta dunque la principale speranza per ottenere acqua dolce in maniera duratura e rendersi indipendenti, almeno in parte. Al di là del fatto che l'unica fonte di ricarica della falda sono le precipitazioni, sulle quali non si può agire, occorre comprendere come sfruttare al meglio questa risorsa per evitarne la compromissione, ancora prima dell'esaurimento, poiché come si è già detto la falda è costiera, cioè in prossimità del mare, pertanto si rischia l'inquinamento da parte dell'acqua salata: una volta formatosi il cuneo di intrusione dell'acqua salata la bonifica richiederebbe tempi e costi eccessivi. La soluzione proposta per risolvere questa criticità è la sistemazione di pozzi *scavenger* a difesa della riserva idrica. Questa scelta è dettata principalmente dalla semplicità di questa tecnologia che presenta costi di realizzazione molto bassi: si tratta dunque di risolvere un problema di pianificazione riguardante la costruzione e la messa in opera di un sistema per la difesa della falda.

Il Governo di Nauru, che esercita il ruolo del Decisore, è portavoce degli abitanti dell'isola, i Portatori di Interesse, che in questo caso non sono in conflitto tra loro. Il Decisore politico quindi non deve mediare tra diversi settori ciascuno con il proprio specifico criterio di valutazione ma guardare all'interesse collettivo. Questo ha influenzato la definizione dell'obiettivo del problema che riguarda due aspetti molto generali: il primo è appunto evitare di compromettere la lente di acqua dolce che, una volta inquinata dall'acqua di mare, non sarebbe più sfruttabile data l'estrema difficoltà di eseguire una bonifica e secondariamente non si vuole che l'onere economico dato dalla gestione del pozzo *scavenger* sia tale da scoraggiarne la messa in atto. I criteri usati come fondamento per la definizione degli indicatori sono basilari e loro formalizzazione avviene in un solo passaggio, una volta presa coscienza che per verificare la salute della falda costiera occorre tenere sotto controllo la concentrazione salina nell'acqua, cioè l'uscita del modello, e che i costi dei pozzi sono determinati dai costi di scavo, per la costruzione, e dell'energia per il funzionamento. Altro elemento significativo sono gli ingressi del modello dati dai fenomeni di pioggia: per la verifica del sistema di pozzi *scavenger* il modello è stato calibrato con le precipitazioni mensili registrate da Maggio 2009 ad Aprile 2010 che, per il pozzo scelto per l'estrazione di acqua dolce, restituiscono buoni risultati in calibrazione e validazione: la posizione del sistema formato dal pozzo per l'acqua dolce e lo *scavenger* influenza solo la zona interessata dalla prima fase di calibrazione. I disturbi al sistema hanno natura deterministica poiché se ne conoscono le traiettorie e di conseguenza deterministici sono gli indicatori: come ricariche superficiali in ingresso

al sistema sono stati inseriti i valori di pioggia misurati nel quinquennio Settembre 1994-Agosto 1999 rappresentante una situazione caratterizzata in sequenza da 8 mesi di ricarica elevata, 22 mesi siccitosi, 1 anno molto piovoso e infine di nuovo 20 mesi di siccità.

Gli indicatori rappresentano le trasformazioni delle uscite del modello, servono a monitorare le variabili di interesse e a comprendere i fenomeni in corso dalle loro modifiche: non contengono tutta l'informazione di cui invece si disporrebbe se si fosse in grado di fornire giudizi analizzando direttamente l'alternativa ma, se ben formulati, ne costituiscono una valida sintesi e focalizzano meglio il punto di vista del Decisore concentrandosi su ciò che gli sta a cuore. Nel caso di Nauru si vuole appunto monitorare in prima istanza se il limite di concentrazione stabilito per l'acqua dolce viene rispettato poiché è fondamentale capire se la lente d'acqua dolce è sfruttabile in maniera continuativa, ipotesi non praticabile se gli episodi di intromissione dell'acqua di mare dovessero essere ingenti e accadere di frequente. Gli indicatori più rappresentativi sono il massimo dei superamenti e il valor medio, scelti per comprendere la gravità degli episodi che potrebbero verificarsi nella loro entità media e puntuale. In sviluppi futuri occorrerebbe eventualmente monitorare anche la durata di tali episodi. Dal totale di simulazioni effettuate ne sono state scelte solo alcune. Si è deciso di mantenere un sistema che prevede un solo pozzo *scavenger*, con filtri che pescano al di sotto dell'interfaccia tra acqua di mare e dolce (7° e 8° *layer*), a difesa del pozzo per l'acqua dolce (S1) che estragga una portata pari a 1 l/s. Con questa configurazione il pozzo per l'acqua salata si mantiene abbastanza distante rispetto alla lente di acqua dolce e la portata estratta dal pozzo già in funzione è sufficiente alla creazione di scorte idriche per attutire l'impatto di periodi di siccità. Per non gravare eccessivamente sui costi di pompaggio dell'acqua salata si è decisa una portata massima totale equivalente indipendentemente dal numero di pozzi *scavenger* adottati e siccome dalle prove svolte non si è notato un miglioramento significativo con dall'aumento del numero di *scavenger* si è mantenuto il rapporto uno a uno con il pozzo per l'acqua dolce. Inoltre sempre dalle simulazioni si è verificato come un eccessivo pompaggio di acqua di mare rischiasse di formare un cono di richiamo dell'acqua dolce da parte dello *scavenger*, con conseguente aumento della concentrazione di solidi disciolti misurati, perciò la portata dello *scavenger* deve comunque essere limitata. I valori delle costanti e delle variabili sono decisi con l'aiuto di un esperto di settore in base alle prove effettuate e alla conoscenza della fisica del problema e del contesto dell'isola.

Portata estratta dal pozzo per l'acqua dolce, profondità dei filtri del pozzo *scavenger* e loro numero sono costanti del problema mentre le variabili di decisone sono date dalla portata del pozzo per l'acqua salata e dalla distanza,

longitudine, di quest'ultimo con il pozzo per l'acqua dolce. Il valore minimo per la prima è di 0,5 l/s, cioè il doppio della minima portata del pozzo per l'acqua dolce, mentre per la seconda è di 0 m nel senso che entrambe i pozzi sono posizionati nel medesimo punto ma sempre con i filtri che si trovano a quote diverse. Si è deciso che il valore massimo per la portata di estrazione dal pozzo *scavenger* sia di 8 l/s mentre il valore per la longitudine è di 30 m. Questo perché il pozzo per l'acqua dolce si trova in prossimità della costa e lo *scavenger* è posizionato a valle rispetto a S1, quindi 30 m è la distanza tra il pozzo di approvvigionamento e il mare. Ogni alternativa è definita assegnando i valori alle variabili di decisione e il numero complessivo delle alternative è dato da tutte le possibili combinazioni dei valori delle variabili: ad esempio una alternativa, quella con i valori minimi, sarà determinata dal valore di portata pari a 0,5 l/s e di longitudine pari a 0 m invece un'altra, che presenti i valori massimi ammissibili, avrà valore di portata pari a 8 l/s e distanza tra pozzo di approvvigionamento e *scavenger* pari a 30 m. Ovviamente non si può limitare l'analisi a due soli possibili casi, soprattutto se così estremi e in fase iniziale di studio, oltre a mantenere aperta l'opzione di non intervento (alternativa zero), occorre identificare un insieme di alternative da valutare e il primo passo è stabilire quali siano i valori che le variabili di decisione possono assumere per ogni possibile opzione di intervento. Anche questo passaggio avviene consultando l'esperto di settore designato. Viene deciso che la portata di acqua salata da pompare con il pozzo *scavenger* abbia un passo di 0,5 l/s per volta, per la longitudine si stabilisce un incremento di 1 m. La scelta di questi valori è dettata da motivazioni inerenti la natura del caso di studio: la portata varia di 0,5 l/s ad ogni passo perché nelle simulazioni che sono state effettuate al di sotto di tale valore non si registrano variazioni significative nella concentrazione di solidi totali disciolti (TDS) calcolati dal modello per il pozzo di approvvigionamento; la distanza tra il pozzo per l'acqua dolce e lo *scavenger* viene incrementata di 1 m sostanzialmente perché questo è il minimo passo significativo per ottenere delle variazioni nei risultati e per la conformazione della griglia in base alla quale è suddiviso lo spazio.

In totale le alternative da analizzare sarebbero 497 date dalla combinazione dei 16 valori di portata con i 31 valori ammissibili per la distanza tra pozzo per l'approvvigionamento e pozzo *scavenger* più l'alternativa di non intervento. Non è ragionevole pensare di eseguire 497 simulazioni, una per alternativa, quindi è necessario identificare un sistema per selezionarne solo alcune, quelle più promettenti, rispetto alle quali calcolare in seguito gli indicatori. La metodologia scelta è l'analisi *What if* : durante la prima fase si chiede al Decisore, anche con l'aiuto dell'esperto di settore di sua fiducia, di scegliere tra le alternative per ogni realizzazione e di queste si calcolano i rispettivi indicatori che per il problema in questione corrispondono agli obiet-

tivi di progetto. In seguito, per migliorarne la visualizzazione, si mappano gli obiettivi su un grafo e lo si sottopone nuovamente all'attenzione del Decisore il quale ha il compito di indicare quali tra le possibili soluzioni gli sembrano le migliori. Tra le simulazioni effettuate le alternative scelte sono riportate in tabella. Come si è già specificato l'inserimento del pozzo *scavenger* non è determinante per la risoluzione della problematica dell'isola di Nauru in quanto da tutte le simulazioni effettuate emerge che prima o poi avviene il superamento della soglia massima ammessa per la concentrazione salina e non si riscontrano differenze marcate da una situazione all'altra: il miglioramento più significativo è determinato dalla possibilità di immagazzinamento dell'acqua dolce che verrebbe estratta dalla falda costiera per mitigare i danni provocati dai periodi di siccità ed evitare l'acquisto dell'acqua in bottiglia importata dall'Australia. In ogni caso comunque si è provato che la lente d'acqua dolce è sfruttabile, seppure per un periodo limitato. Da un punto di vista puramente fisico, i casi migliori sono rappresentati dalle alternative in cui si abbinano l'estrazione della massima portata di acqua salata e la distanza nulla tra pozzo di approvvigionamento e *scavenger* poiché il superamento del limite consentito per la potabilità dell'acqua avviene più in là nel tempo. Ma si sono tenute anche simulazioni in cui la portata di acqua salata estratta è inferiore poiché questa è un elemento determinante per l'indicatore di costo, infatti la spesa da affrontare per la gestione del pozzo barriera è direttamente proporzionale all'estrazione di acqua salata e soprattutto se la distanza tra *scavenger* e pozzo per l'acqua dolce è minima la vicinanza permette che l'azione del primo sul secondo sia avvertita anche in caso estrazioni di acqua di mare quantitativamente inferiori. Dalle simulazioni svolte aumentando la distanza tra pozzo di approvvigionamento e *scavenger* non sono emerse correlazioni specifiche tra la posizione dell'interfaccia e la longitudine, questo è dovuto presumibilmente alla particolare natura dell'acquifero interessato dal fenomeno del carsismo che è in parte anche la causa della scarsa efficacia del sistema di pozzi *scavenger* poiché provoca richiamo dell'acqua lateralmente e non solo da sotto la lente di acqua dolce.

Una volta simulate le alternative scelte e calcolati gli indicatori, i risultati sono stati inseriti nella cosiddetta matrice degli impatti per la stima degli effetti, la fase che anticipa la valutazione, e per la visualizzazione si sono mappati gli obiettivi su un grafico che presenta in ordinata i costi e in ascissa i risultati relativi alla concentrazione salina media (limite 1,5 kg/m3). Si è accennato che per problemi più complessi vengono scelti solo alcuni indicatori, o obiettivi, da simulare per essere mappati sul grafico e in seguito si calcolano tutti gli indicatori ma solamente per le alternative considerate più soddisfacenti. In questo caso, siccome gli indicatori sono due, possono essere entrambe visualizzati e calcolati insieme e in contemporanea.

Alternative	Portata *scavenger* [l/s]	Distanza *scavenger*-dolce [m]
A1	0.5	0
A32	1	0
A94	2	0
A218	4	0
A466	8	0

Tabella 5.1: Alternative efficienti

Alternative	CONCENTRAZIONE LIMITE [kg/m3]	COSTO SPAZZINO [€]
A1	1,7006	33.270
A32	1,6344	64.417
A94	1,535	126.270
A218	1,4194	251.410
A466	1,325	500.190

Tabella 5.2: Matrice degli effetti

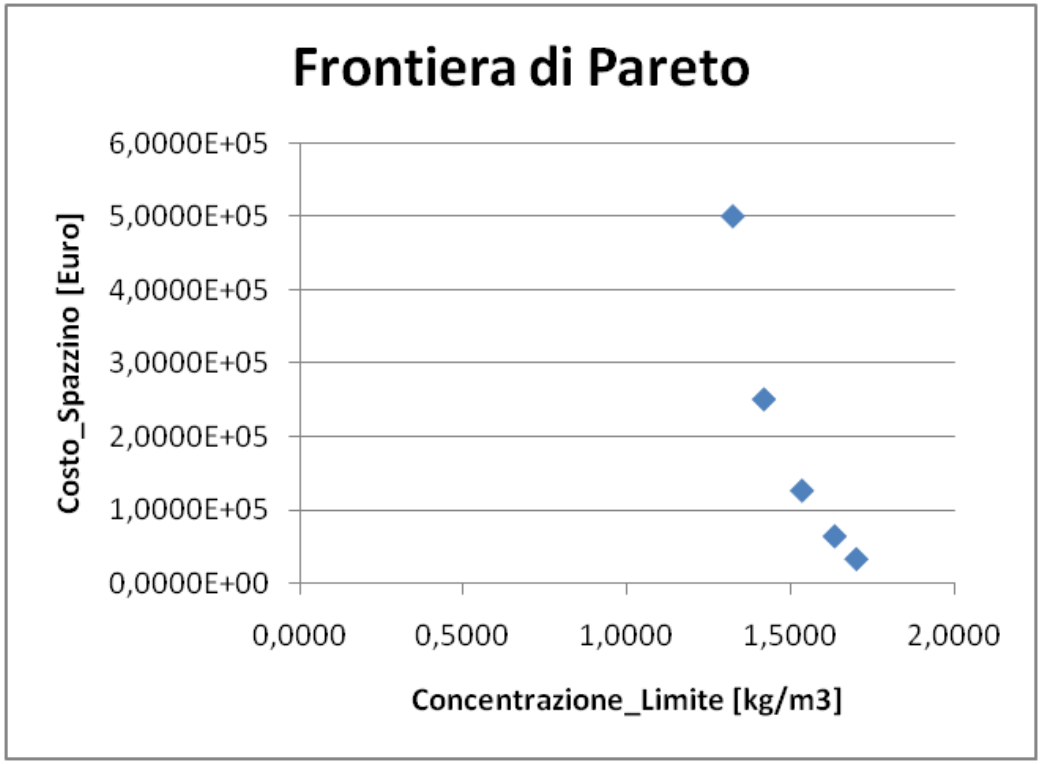

Figura 5.15: Frontiera di Pareto

Osservando la matrice e il grafico si nota come dal punto di vista dell'indicatore che considera i costi, in ordinata, le alternative migliori siano quelle che prevedono di estrarre minor portata di acqua salata cioè la A1 e la A32, in particolare la A1. Il secondo indicatore invece segnala che se viene estratta la massima portata stabilita di acqua salata, 8 l/s, la media dei superamenti è minima ma i costi da affrontare sono decisamente alti, infatti superano di un ordine di grandezza circa le prime due alternative come è prevedibile dato la portata estratta. L'alternativa A94, che prevede una portata salata estratta pari a 2 l/s e distanza nulla tra pozzo di approvvigionamento e *scavenger* presenta costi ridotti a un quarto rispetto all'alternativa 466. L'alternativa A218 rappresenta un buon compromesso poiché presenta costi dimezzati rispetto all'alternativa 466 ed è quella a minore distanza rispetto al minimo superamento medio.

Riassumendo si può affermare che le alternative dalla A1 alla A94 sono meglio dal punto di vista dell'indicatore di costo ma peggiori se si guarda dal punto di vista della media dei superamenti mentre l'alternativa A466 è la più efficiente per l'indicatore Concentrazione_Limite. Le alternative di maggior interesse potrebbero essere la A218 e la A466: la prima è la più prestante rispetto all'indicatore sulla media dei superamenti di concentrazione tra le alternative che migliorano l'indicatore di costo, mentre la seconda è la più prestante rispetto all'indicatore di concentrazione in assoluto. Si sottolinea come da un'alternativa all'altra i costi raddoppino.

Indirizzare il Decisore verso una scelta di questo tipo significa implicitamente dare la precedenza all'indicatore che indica la media dei superamenti, per ri bilanciare le valutazioni e non condizionare eccessivamente il Decisore si può aggiungere la A94 che presenta costi nettamente inferiori alla A466 e rispetto agli episodi di superamento di concentrazione si colloca a metà strada tra il caso migliore e quello peggiore. Volendo indagare più in profondità quindi si potrebbe suggerire al Decisore di sperimentare alternative con portate che variano da 4 l/s a 8 l/s mantenendo nulla la distanza tra pozzo di approvvigionamento e *scavenger* per mantenere una linea di continuità rispetto alle prove sperimentali per il miglioramento della qualità dell'acqua dolce o di cercare direttamente una soluzione diversa rispetto a quella ipotizzata per il problema di pura pianificazione, in quanto lo studio è nelle fasi iniziali e occorre decidere di un intervento strutturale: infatti prima di preoccuparsi della gestione delle acque è importante verificare quale sia la migliore forma di protezione possibile tra quelle ipotizzate.

L'azione dei pozzi *scavenger* ha sulla qualità dell'acqua estratta un'influenza minima: infatti l'indicatore Concentrazione_Limite non ha mai valore nullo, questo significa che il limite di potabilità non viene mai rispettato. Con le opportune misure di immagazzinamento di acqua si potrebbe ridurre

del 40 % il periodo di mancanza di acqua potabile dal sottosuolo. Addirittura il vantaggio di questa tecnologia sarebbe nulla nel caso si avessero portate di approvvigionamento basse. La causa della scarsa influenza dei pozzi *scavenger* sul sistema di approvvigionamento è sicuramente imputabile almeno in parte alla variazione della conducibilità idraulica che avviene intorno agli 8,5 m di profondità (rispetto al datum in zona costiera): a tale quota si passa ad un acquifero calcareo che presenta valori di conducibilità idraulica di 2 ordini di grandezza superiore allo strato sabbioso soprastante. I pozzi *scavenger* hanno i filtri posti proprio all'interno dell'acquifero ad alta conducibilità idraulica: l'elevata trasmissività della zona nella quale i pozzi *scavenger* operano fa sì che la maggior parte dell'acqua da essi estratta provenga lateralmente dal mare e non dai *layers* superiori, quindi l'effetto dell'estrazione di acqua salata è relativo sul pozzo di approvvigionamento filtrato invece nella zona a permeabilità inferiore.

Tale osservazione fa supporre che la tecnologia dei pozzi *scavenger* non sia quella ottimale da applicare in tale contesto ed in una situazione come quella di Nauru. Una possibile soluzione, oltre quella di estrarre 1 l/s da S1 e immagazzinare l'acqua in eccesso per i 412 giorni di abbondanza idrica che si avrebbero utilizzando uno *scavenger* , potrebbe essere quella di immagazzinare in serbatoi l'acqua estratta dopo i periodi con un elevato regime di precipitazione, per utilizzarla poi nel momento in cui si osserva la mancanza di acqua dolce nel sottosuolo oppure la realizzazione di pozzi/dreni orizzontali che, distribuendo la portata di estrazione su una superficie più estesa permettono di evitare il fenomeno di *upconing* che si genera invece, come si e visto, nel caso di estrazione puntuale. Nel periodo in cui mancasse acqua dolce dal sottosuolo si potrebbe ricorrere, come accade attualmente sull'isola [SOPAC 2010], all'utilizzo di acqua proveniente dall'impianto di desalinizzazione.

Conclusioni

Questo lavoro di tesi è stato svolto all'interno del progetto NAURU finanziato dal Comune di Milano nell'ambito di Expo 2015 affidato al gruppo di Geologia Applicata della sezione Infrastrutture Viarie (DIIAR) del Politecnico di Milano. Il progetto nel complesso ha l'obiettivo di fornire all'isola di Nauru, nel Sud Pacifico, nuove infrastrutture per lo sfruttamento delle acque sotterranee e le direttive generali per un loro corretto utilizzo.

Questa tesi mira alla realizzazione di uno strumento che aiuti il Governo di Nauru nella valutazione dell'efficacia del sistema proposto, i pozzi *scavenger*, per la protezione dell'acquifero costiero dalla problematica dell'intrusione salina. Se questo fenomeno dovesse verificarsi si avrebbe penetrazione di acqua salata nell'acquifero e ciò comprometterebbe notevolmente la possibilità di utilizzo dell'acqua sotterranea come fonte di approvvigionamento idrico.

Per la realizzazione di questo lavoro è stato impostato un sistema di supporto alle decisioni per la valutazione del sistema di pozzi *scavenger* applicabile all'area del dominio del modello ripercorrendo le fasi della procedura di partecipazione integrata (PIP) dalla ricognizione fino all'individuazione della alternative Pareto - efficienti, quest'ultima fase è stata realizzata eseguendo un'analisi *What - if*.

E' stata inizialmente sviluppata una breve trattazione del problema di intrusione salina in acquiferi costieri in particolare in situazioni critiche come quelle delle piccole isole dell'Oceano Pacifico del Sud e una breve descrizione generale della geologia, idrogeologia e regime climatico dell'isola di Nauru per analizzare la situazione dell'isola: le piogge, fortemente influenzate dai fenomeni di La Nina ed El Nino che determinano un'alternanza di periodi siccitosi a periodi molto piovosi, sono l'unica forma di ricarica della falda.

La variabilità del regime di precipitazioni unitamente al problema dato dal possibile verificarsi dell'intrusione salina rappresentano i principali fattori di vulnerabilità di Nauru.

Dal momento che l'obiettivo del Governo di Nauru è lo sfruttamento sostenibile della risorsa idrica sotterranea le azioni riguardano la messa in opera dei pozzi *scevenger*.

Per poter verificare il funzionamento dei pozzi barriera le variabili di decisione sono state individuate nei valori di portata d'estrazione e nel posizionamento dei pozzi *scavenger*. L'intervallo considerato per il valore da dare alle azioni è stato indicato dall'esperto di settore.

I criteri di valutazione rispecchiano gli interessi del Governo di Nauru: verificare l'efficacia dei pozzi *scavenger* e contenere i costi delle operazioni per la difesa dell'acquifero.

Sono stati individuati due indicatori in linea con i criteri: il primo calcola, nei casi di superamento di un limite di concentrazione dato , la media della differenza di concentrazione tra il superamento e tale limite (Concentrazione_Limite) e il secondo i costi totali di installazione e gestione dei pozzi *scavenger* (Costo_Spazzino). Entrambe devono essere minimizzati.

Il modello utilizzato per le simulazioni, ottenuto in un precedente lavoro di tesi, interessa la zona a nord dell'isola dove è situato S1 il pozzo di approvvigionamento per l'acqua dolce da monitorare per verificare la qualità dell'acqua. Lo scenario di simulazione copre un periodo di 5 anni: come ricarica superficiale in ingresso al sistema sono stati inseriti i valori di pioggia misurati nel quinquennio $Settembre1994 - Agosto1999$ che forniscono un quadro completo dei possibili casi.

Quindi dalle alternative simulate sono state selezionate quelle efficienti rispetto agli indicatori per mezzo dell'analisi *What - if*.

La Frontiera di Pareto mostra il conflitto esistente: è evidente che a costi superiori corrispondono valori di concentrazione inferiori e viceversa. La soluzione ricercata invece mira alla minimizzazione di entrambi gli indicatori: costi totali bassi e soprattutto nessun superamento del limite per l'acqua dolce (che equivale al valore nullo dell'indicatore di concentrazione).

Infatti il valore degli indicatori delle alternative Pareto - dominanti indica che nei casi in cui il valore di portata salata è minimo i costi sono bassi e l'indicatore di concentrazione ha valori elevati. Invece, se viene estratta la massima portata salata l'indicatore Concentrazione_Limite è inferiore ma i costi sono considerevolmente più alti: questo perché il costo di gestione dei pozzi è direttamente proporzionale al volume idrico pompato.

Il Governo di Nauru ha il compito di decidere se privilegiare l'aspetto economico, tollerando una peggiore qualità dell'acqua, o accettare di sostenere

costi più alti dal momento che lo scopo finale è lo sfruttamento sostenibile dell'acquifero.

Occorre tenere presente che l'azione dei pozzi barriera non è però completamente risolutiva poiché il limite stabilito per l'acqua dolce viene sempre superato (l'indicatore Concentrazione_Limite non ha mai valore nullo). Al più si potrebbe ridurre di circa il 40 % la durata del periodo di crisi idrica immagazzinando dell'acqua dolce estratta per portate elevate del pozzo S1 (¿1 l/s) e grazie all'utilizzo di un pozzo *scavenger*, a condizione che anche quest'ultimo estragga la massima portata salata (8 l/s) quindi scegliendo l'alternativa che presenta i costi maggiori. Diversamente, altre alternative efficienti individuate rappresentano un compromesso tra la necessità di contenere i costi di gestione e installazione dei pozzi barriera e il controllo della concentrazione di sali nell'acqua dolce.

In conclusione in base alle analisi svolte si è appurato che a fronte di costi non indifferenti, fino a 500.000 €, il sistema dei pozzi barriera fornisce una protezione solo parziale all'acquifero dal momento che non riesce a mantenersi al di sotto del limite imposto per legge. Inoltre solo in un caso, quello più oneroso dal punto di vista economico, è consentito l'immagazzinamento di un volume idrico tale da sostenere, almeno in parte, il fabbisogno interno. Queste osservazioni fanno supporre che la tecnologia dei pozzi *scavenger* non sia quella ottimale da applicare in tale contesto.

La situazione in cui versa l'isola non si presenta quindi particolarmente promettente: soluzioni alternative potrebbero essere l'utilizzo di serbatoi per la raccolta di acqua dolce in seguito a periodi molto piovosi o la costruzione di un dreno orizzontale che distribuendo la portata di estrazione su una superficie più estesa permetta di evitare il fenomeno di *upconing* che si genera invece comunque nel caso di estrazione puntuale. L'efficacia di tale tecnologia potrebbe essere testata utilizzando il medesimo sistema di supporto applicato in questo lavoro.

Bibliografia

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

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, 70 pp.

Ghassemi F., Jakeman A.J., Jacobson G. e Howard K.W.F., 1996. *Simulation of Seawater Intrusion with 2D and 3D Models: Nauru Island Case Study.* Hydrogeology Journal, vol. 4, no. 3: 4-22 pp.

Guo, Weixing e Langevin C.D., 2002. *Users guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three-dimensional variable-density groundwater flow.* U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A7, 77 p.

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.

SOPAC, 2010. *Assessing vulnerability of shallow groundwater domestic wells in Nauru.* Nauru, 109 p.

WHO, 2005. *Country Health Profile.* World Health Organization, Geneva.

Bear J., 1972. Dynamics of fluids in porous media. Elsevier. Environmental Science Series 4, 764 pp.

Castelletti A., Lotov A.V. e Soncini-Sessa R., 2010b. *Visualization-based multi-objective improvement of environmental decision-making using linearization of response surface.* Environmental Modelling & Software 25 (10) 1552-1564 pp.

Castelletti A., Pianosi F., Soncini-Sessa R. e Antenucci J.P., 2010a. *A multi-objective response surface approach for improved water quality planning in lakes and reservoirs.* Water Resources Research 46, W06502, 16 pp.

Castelletti A. e Soncini-Sessa R., 2006. *A procedural approach to strengthening integration and participation in water resources planning.* Environmental Modelling and Software 21 (10), 1455-1470 pp.

Mushtaha A., Aliewi A.S. e Mackay R., 2000. *The use of scavenger wells to control saltwater upconing in Gaza, Palestine. Proceedings SWIM 16, Miedzyzdroje Wolin Island, Poland, 2000.* Nicholas Copernicus University, 109-116 pp.

Zack A. e Lara F., 2003. *Optimizing fresh groundwater withdrawals in Cozumel, Quintana Roo, Mexico A feasibility study using scavenger wells.* Second International Conference on Saltwater Intrusion and Coastal AquifersMonitoring, Modeling, and Management. Merida, Mexico, March 30 April 2, 2003, 10 pp.

R. Soncini-Sessa. *MODSS per decisioni integrate e partecipate.* McGraw-Hill, Milano, I, 2004.

Oberto G., Pifferi V., Anno Accademico 2010 2011. *Modellazione matematica per la gestione della risorsa idrica sotterranea nellisola di Nauru Sud Pacifico.* Tesi di Laurea, Politecnico di Milano -Sede di Como.

Biasio L., Limosani D., Anno Accademico 2007- 2008. Response surface per la pianificazione di interventi di riqualificazione in laghi e serbatoi. Tesi di Laurea, Politecnico di Milano.

Vèlez Garcia S., Anno Accademico 2008 2009. *Analisi delle potenzialità degli scavenger wells per lapprovvigionamento idrico in acquiferi costieri.* Tesi di laurea, Tesi di Laurea, Politecnico di Milano -Sede di Como.

Hwang C.L. e Masud A.S.M., 1979. *Multiple Objective Decision Making e Methods and Applications.* In: Lecture Notes in Economics and

Mathematical Systems, vol. 164. Springer, Berlin, D.

Ali G., Muhammad N.A., Muhammad L. e Zakir H., 2004. *Optimizing operational strategies of scavenger wells in lower Indus Basin of Pakistan.* Agricultural Water Management Journal 66, 239249 pp.

Jacobson G. e Hill P.J., 1988. *Hydrogeology and groundwater resources of Nauru Island, central Pacific Ocean. Bur. Miner.* Resour. (Aust.), Geol & Geophys., Record 1988/12, 85 pp.

Jacobson G. e Hill P.J., 1993. *Groundwater and the rehabilitation of Nauru.* In: G. McNally, M.J. Knight and R. Smith (Editors), Collected Case Studies in Engineering geology, Hydrogeology & Environmental geology. Geol. Soc. Aust. Butterfly Books, Sydney, 103-119 pp.

Alberti L., Consonni M. e La Licata I. 2010. *La gestione quali quantitativa delle acque sotterranee: comprendere i modelli matematici di flusso. Esercitazione con il codice di calcolo Modflow.* Politecnico di Milano- DIIAR.

Janssen R., 1992. *Multiobjective Decision Support for Environmental Management.* Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL.

Castelletti A., Lotov A.V. e Soncini-Sessa R., 2010b. *Visualization-based multi-objective improvement of environmental decision-making using linearization of response surface.* Environmental Modelling & Software 25 (10) 1552-1564 pp.

Ghassemi F., Jakeman A.J., Jacobson G. e Howard K.W.F., 1996. *Simulation of Seawater Intrusion with 2D and 3D Models: Nauru Island Case Study.* Hydrogeology Journal, vol. 4, no. 3: 4-22 pp.

Castelletti A., Galelli S., Restelli M., Soncini-Sessa R. 2010. *Tree-based reinforcement learning for optimal water reservoir operation.* Water Resources Research 46, W09507, 19 pp.

Rajib Kumar Bhattacharjya, Bithin Datta, 2003. *Optimal Management of Coastal Aquifers Using Linked Simulation Optimization Approach.* Water Resources Management (2005) 19: 295 320.

Jùlio F. Fereira da Silva, Naim Haie, 2004. *Optimal Locations of Groundwater Extractions in Coastal Aquifers.* Water Resources Management (2007)

21: 1299 1311.

Behzad Ataie-Ashtiani, Hamed Ketabchi, 2009. *Elitist Continuous Ant Colony Optimization Algorithm for Optimal Management of Coastal Aquifers.* Water Resources Manage.

Chan-Hee Park, Mustafa M. Aral, 2003. *Multi-objective optimization of pumping rates and well placement in coastal aquifers.* Multimedia Environmental Simulations Laboratory.

Nauru Government, 2011. *Nauru. Proceedings of the Pacific Regional Consultation on Water in Small Island Countries Country Briefing Papers* . 101 107.

Soncini Sessa R., 2004. *Modellistica integrate e decisione partecipata in pratica. Il progetto Verbano.* McGraw-Hill

Anderson M.P., Woessner W. W. *Applied groundwater modeling. Simulation of flow and advective transport.* Scientific Press.

Sitografia

http://train4creativity.eu

http://www.ceet.niu.edu/tech/asse/$tech482/what_if_analysis.doc$

http://web.mit.edu/course/10/10.27/www/1027CourseManual

/1027CourseManual-AppVI.html

http://en.wikipedia.org/wiki/$What_If$

http://www-db.deis.unibo.it/ srizzi/PDF/ijdwm09-UML.pdf

it.wikipedia.org/wiki/Nauru

www.como.polimi.it/nauru

www.acquaportal.it