



POLITECNICO DI MILANO
DIIAR-Gruppo Geologia Applicata

Comune di Milano-EXPO 2015

PROGETTO NAURU

Sintesi delle attività del primo anno

luglio 2011

AMB-POLI_MI1/11/1

Dott. Alberti Luca

Ing. La Licata Ivana

Dott. Cantone Martino



PREMESSA	3
1 INTRODUZIONE AL PROBLEMA	7
2 L'ISOLA DI NAURU	11
2.1 DESCRIZIONE DEL CLIMA	11
2.2 DISPONIBILITÀ IDRICA	15
2.3 STRUTTURA IDROGEOLOGICA	19
3 SINTESI DEGLI INCONTRI E DELLE ATTIVITÀ SVOLTE NEL PRIMO MEETING IN NAURU	27
3.1 MEETING CON LE AUTORITÀ PUBBLICHE LOCALI	27
3.2 ATTIVITÀ DI CAMPO	30
3.3 ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO, PROGRAMMA 2011	31
4 REALIZZAZIONE DEL GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM	35
5 MODELLAZIONE MATEMATICA	40
5.1 SCELTA DEL CODICE DI CALCOLO	40
5.2 SIMULAZIONI BIDIMENSIONALI	41
5.2.1 <i>Dominio di modellazione e discretizzazione</i>	42
5.2.2 <i>Condizioni al contorno</i>	44
5.2.3 <i>Condizioni interne e parametri idrogeologici</i>	47
5.2.4 <i>calibrazione e risultati delle simulazioni</i>	48
5.3 SIMULAZIONI 3D	52
5.3.1 <i>Discretizzazione orizzontale e verticale</i>	56
5.3.2 <i>Condizioni al contorno, condizioni interne e target</i>	58
5.4 CALIBRAZIONE	63
6 BIBLIOGRAFIA	78



PREMESSA

Il presente report riassume le attività svolte dal Politecnico di Milano nel primo anno di lavoro svolto nell'ambito del Progetto Nauru-Expo 2015. Seguendo le tempistiche definite nella proposta del progetto, le azioni svolte hanno riguardato principalmente i Work Package 1 e 2 e marginalmente alcuni Task del WP 3 e 4. Nella Tabella 1 vengono riassunti i Tasks, i Deliverables ed i Milestones raggiunti sino ad oggi.

Riassumendo è stato sino ad oggi svolta tutta l'attività di raccolta dati per la costruzione del modello concettuale di circolazione idrica relativa all'isola di Nauru. Grazie all'incontro svoltosi presso l'isola nel Novembre 2010 è stato anche avviato un programma di monitoraggio e raccolta dati specifico per la calibrazione dei modelli matematici di flusso densità dipendenti. La fase di modellazione matematica è stata anch'essa avviata: la modellazione 2D per la definizione base dei parametri è stata conclusa, mentre quella 3D è stata avviata. Grazie ai risultati preliminari della modellazione matematica è stato possibile iniziare i lavori relativi ad alcuni Task del WP2 quali l'identificazione di aree pilota per approfondimenti e la scelta delle tecnologie di estrazione da utilizzarsi. Per il WP4 sono stati organizzati gli incontri con le pubbliche autorità nauresi, si sono avviati i contatti con SOPAC per l'organizzazione della conferenza finale ed è stato realizzato il sito web del progetto.

Nonostante il progetto nell'ambito del primo anno di svolgimento abbia subito un ritardo di circa 2 mesi rispetto alla data ufficiale, è possibile affermare che la tabella di marcia è stata rispettata. I prossimi compiti attesi riguardano la conclusione della modellazione 3D, la progettazione e la realizzazione di opere di estrazione in aree sperimentali, la stesura di linee guida e l'organizzazione e realizzazione della conferenza finale. A tal proposito si è concordato con le autorità di Nauru di svolgere tale meeting nelle isole Fiji per tre importanti ragioni:

1. un convegno in Nauru avrebbe poco successo per le difficoltà nel raggiungere l'isola da parte delle restanti nazioni del Sud Pacifico;
2. le Fiji sono molto più accessibili e offrono strutture più adeguate ad una conferenza internazionale;



3. SOPAC nel Luglio 2012 organizza nelle Fiji una conferenza internazionale ed ha informalmente dato disponibilità ad ospitare una sessione parallela dedicata al progetto Nauru.

Un ultimo aspetto da affrontare riguarda i tempi di realizzazione del progetto. Nell'ambito del secondo anno di svolgimento si sono verificati forti ritardi causati dalla ridotta collaborazione offerta dai referenti di Nauru da Febbraio 2011 sino ad oggi. Le ragioni di tale situazione non sono del tutto chiare, ma si ritiene che lo stato di povertà in cui versa l'isola, la forte siccità che stanno vivendo ormai da quasi un anno e i ritmi molto rilassati delle popolazioni del Sud Pacifico, non favoriscano la celerità delle operazioni. Per tali motivi e considerando l'occasione della conferenza SOPAC, si propone di posticipare il termine dei lavori al 15 Ottobre 2012. Nei prossimi mesi è previsto l'avvio delle operazioni per la trivellazione dei nuovi punti di monitoraggio e delle opere di captazione sperimentali. L'incarico verrà affidato a NRC, unica società presente sull'isola che possieda i macchinari necessari alle operazioni di scavo. Data l'estrema distanza di Nauru da altri Stati, non risulta economicamente vantaggioso affidare l'incarico a società esterne che dovrebbero trasportare i macchinari in situ mediante trasporto marittimo.



Tabella 1 - Riassunto dei Task, Deliverables e Milestones conclusi o in fase di sviluppo al febbraio 2011

WP1		WP2		WP3		WP4	
T1/1 Collection of previous studies and available data	done	T2/1 Identification of areas where to start the groundwater exploitation (pilot areas)	running	T3/1 Improvement of existing monitoring well network	running	T4/1 Coordination with Nauru public authorities and stakeholders through three workshops	running
T1/2 Hydrogeological parameter survey	running	T2/2 Analysis of available technologies for groundwater exploitation avoiding salt water intrusion	running	T3/2 Installations of the system for groundwater exploitation (horizontal wells or/and infiltration galleries or/and shallow wells)	waiting	T4/2 Final conference in Nauru for the dissemination of the project results with the participation of the other Pacific islands water managers	July 2012
T1/3 GIS implementatio	done	T2/3 Design of the systems for groundwater exploitation	waiting	T3/3 Recommendations for the correct management of the groundwater exploitation system	waiting	T4/3 Training action for specialised personnel (possibly extended to the conference participants)	July 2012
T1/4 Mathematical modelling og GW flow and salt water intrusion	running	T2/4 Evaluation of the impact of renewable energy for operating systems	waiting	D3/1 Improved monitoring well network for groundwater survey and GIS update	waiting	T4/4 Website implementation and project documents release	running
T1/5 Identification of areas where GW exploitation are increasing salt water intrusion	waiting	T2/5 Definition of protection areas surrounding the new facilities for groundwater exploitation	waiting	D3/2 New system for groundwater exploitation	waiting	D4/1 Final project documentation	waiting
D1/1 Piezometric and conductivity maps based on collected data	done	D2/1 Project of the systems for groundwater exploitation	running	D3/3 Guidelines for the correct management of the groundwater exploitation system	waiting	D4/2 Training course	July 2012
D1/2 Geographical Information System	done	D2/2 Guidelines regarding the protection of areas surrounding the new facilities for groundwater exploitation	waiting	M3/1 Drilling of new monitoring wells	waiting	M4/1 Meeting with Nauru public authorities and stakeholders	running
D1/3 Conceptual model of the island	done	M2/1 Choice of the pilot areas	running	M3/2 Installation of groundwater exploitation system	waiting		
D1/4 Mathematical model of the island or of a pilot area	done	M2/2 Choice of the best technology for groundwater exploitation avoiding salt	waiting				

Committente: Comune di Milano.

Progetto Nauru- Sintesi delle attività del primo anno * AMB-POLI_MI1/11/1 * luglio 2011



		water intrusion					
D1/5 Maps of areas impacted by salt water intrusion	running	M2/3 Presentation of WP2 results in Workshop 3	waiting				
M1/1 Kick-off meeting (Workshop 1)	done						
M1/2 Evaluation of needs to improve the monitoring well system	running						
M1/3 Analysis of water availability in different scenarios focused specially on droughts periods	running						
M1/4 Recommendation and strategies for the sustainable groundwater use during droughts	waiting						
M1/5 Presentation of WP1 results in Workshop 2	Sept 2011						



1 INTRODUZIONE AL PROBLEMA

Ogni zona nel mondo in contatto con acqua salata può essere soggetta al verificarsi del fenomeno di intrusione salina, indipendentemente dal fatto che la zona sia la linea di costa di un'area continentale o di un'isola (Figura 1).

In generale, il fenomeno viene originato a causa della differenza di densità tra acqua dolce e acqua salata ed è funzione del livello del mare, del livello dell'acqua di falda in prossimità della costa e della sua portata, della permeabilità dell'acquifero costiero dove avviene il contatto tra acqua sotterranea e acqua di mare.

L'intrusione salina può aumentare in seguito ad una incontrollata estrazione di acqua dolce dalla falda, con conseguente salinizzazione dell'acquifero costiero causata dalla saturazione dei pori da parte dell'acqua di mare. È molto difficile porre rimedio ad un fenomeno di questo genere che, una volta verificatosi, può durare a lungo negli anni rendendo l'acqua dolce che scorre nell'acquifero insalinato non più utilizzabile per i bisogni della popolazione o dell'agricoltura.

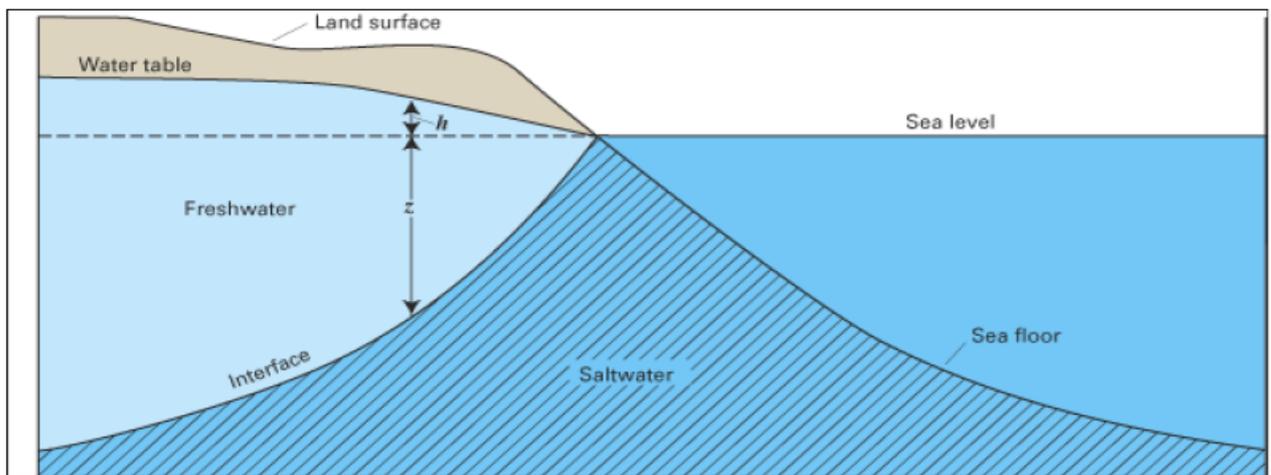


Figura 1 - Cuneo di intrusione salina (azzurro scuro) che si sviluppa al di sotto della falda di acqua dolce (azzurro chiaro) in un acquifero costiero



L'analisi dell'estensione e dello sviluppo del fenomeno di intrusione salina negli acquiferi costieri deve essere quindi condotto sempre con molta attenzione, ma assume un'importanza particolare nel caso di piccole isole, che spesso emergono per pochi metri al di sopra del livello del mare, nelle quali la lente di acqua dolce sotterranea può presentarsi molto sottile e altamente sensibile ai differenti stress (naturali o antropici) che possono portare ad un suo depauperamento.

Sono definite "piccole isole" (small islands) quelle che presentano una superficie inferiore ai 2000 km² o di larghezza minore di 10 km, mentre vengono definite "isole molto piccole" (very small islands) quelle con superficie inferiore ai 100 km² e larghezza minore di 3 km.

In generale, il termine piccole isole viene utilizzato per riferirsi ad entrambe le categorie (UNESCO, 1991).

Il SIDS (Small Island Developing States) è un'unità dell' UN Sustainable Development Division che comprende l'elenco delle piccole isole accumulate da caratteristiche e problemi simili come, tra gli altri, la poco numerosa popolazione, le risorse limitate e la lontananza dalla terraferma.

I corpi d'acqua dolce superficiali sono normalmente presenti nelle isole vulcaniche sotto forma di lagune, laghi, sorgenti o torrenti. Al contrario, le basse isole coralline sono generalmente povere di risorse idriche superficiali (tranne in quei casi dove l'apporto della pioggia è abbondante) e di solito i pochi laghi, lagune e paludi, specie se prossimi alla costa, si presentano salmastri.

L'acqua dolce sotterranea nelle piccole isole coralline assume la forma di una sottile lente che si sviluppa al di sotto dell'intera isola e che galleggia al di sopra dell'acqua salata che occupa il fondo dell'acquifero. Tipicamente lo spessore della zona di acqua dolce è intorno ai 10 m mentre al di sotto si sviluppa una spessa zona di transizione (Falkland, 2002) e quindi l'acqua salata vera e propria (Figura 2).

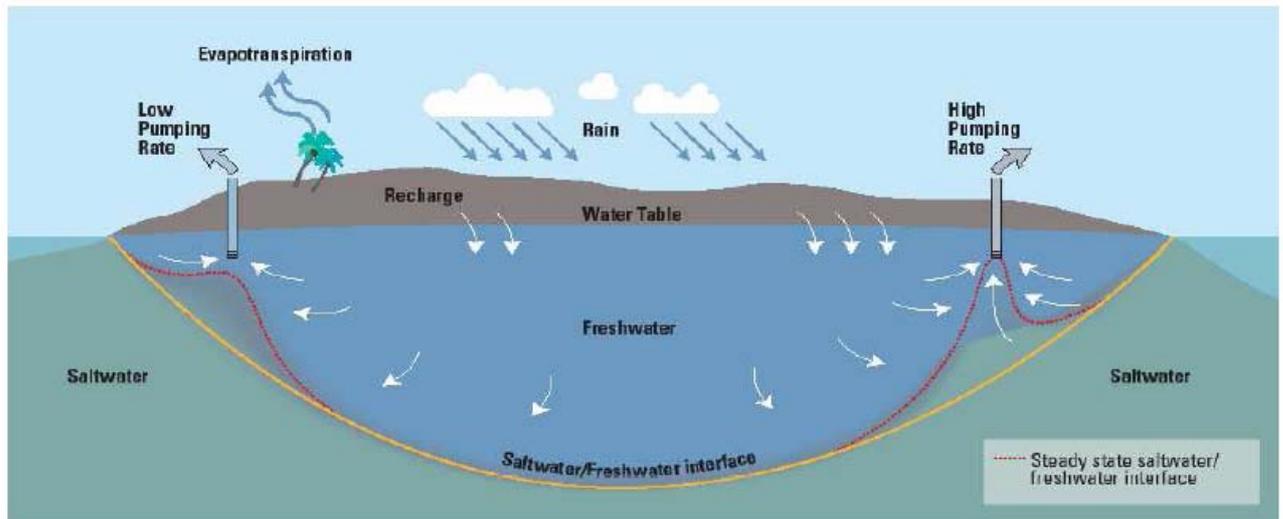


Figura 2 - Lente di acqua dolce al di sotto di un'isola. L'acqua dolce è in contatto con quella salata attraverso una zona di transizione nella quale le proprietà variano da quelle proprie dell'acqua dolce a quelle dell'acqua salata. In prossimità della costa è rappresentato l'effetto che l'estrazione dell'acqua sotterranea può avere sulla distribuzione della salinità in falda.

I PICs (Pacific Islands Countries) sono per lo più isole di piccole dimensioni sparse in tutto l'Oceano Pacifico e la loro morfologia varia da isole vulcaniche di grandi dimensioni, a piccole isole basse, fino a gruppi sparsi di atolli corallini (Falkland, 2002). La popolazione in questi paesi è relativamente esigua, ad eccezione di Papua Nuova Guinea (PNG) in cui sono insediati 4,4 milioni di abitanti; nonostante la crescente migrazione verso le zone urbane, nella maggior parte di questi stati una grande percentuale della popolazione risiede in aree rurali (Falkland, 2002).

L'accessibilità ad adeguati rifornimenti di acqua potabile è fondamentale per la salute e il benessere degli uomini. Gli Stati della regione dell'Oceano Pacifico, ed in particolare gli Stati raggruppati come PICs, affrontano costantemente i problemi derivanti dalla scarsità di acqua potabile; secondo un'indagine del 2004 condotta da UNICEF e dall'ONU, circa 3 milioni di persone nella regione dell'Oceania non hanno accesso ad acqua potabile di qualità e servizi sanitari soddisfacenti (Mirti e Davies, 2005). Limiti strutturali, finanziari e istituzionali contribuiscono all'incapacità di fornire acqua potabile nella maggior parte dei PICs e pertanto il problema di approvvigionamento idrico non può essere affrontato singolarmente da ogni



paese, ma necessita di una rete di collaborazioni, come quella del SOPAC (South Pacific Applied Geoscience Commission).

A causa delle caratteristiche 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. Presenti in natura o come fonti convenzionali di acqua dolce potabile, nei PICs si trovano acque superficiali, sotterranee e di origine piovana. Le fonti non convenzionali di acqua dolce sono quelle sottoposte a processo di desalinizzazione, l'importazione e il riutilizzo delle acque reflue, dopo appositi trattamenti e l'uso di acqua salata e salmastra per scopi generici e per i sanitari (Carpenter et al. 2003).

Le sorgenti di acqua potabile sono estremamente vulnerabili alla contaminazione, causata da inadeguati impianti igienico-sanitari, dallo scarico di reflui direttamente in mare e dalla penetrazione di inquinanti nell'acquifero: questo può portare all'insorgere di gravi malattie come colera, tifo e gastroenterite. Poiché le scorte d'acqua nella regione del Pacifico non vengono di norma trattate, il mantenimento della qualità delle fonti idriche è fondamentale per la salute della popolazione.

In sintesi, l'analisi della situazione della qualità dell'acqua potabile nei PICs mette in evidenza una serie di aspetti prioritari, che includono la necessità di una maggiore tutela delle fonti idriche, l'adozione di approcci corretti di gestione dei rischi e l'aumento della consapevolezza delle comunità riguardo ai legami tra qualità dell'acqua e salute.

In aggiunta i governi dei PICs necessitano di rafforzare i quadri normativi e la legislazione relativa alla gestione delle risorse idriche e di sviluppare metodi di finanziamento, tecnologie e capitale umano per il controllo ed il trattamento dell'acqua potabile (Mirti e Davies, 2005).



2 L'ISOLA DI NAURU

Nauru è una piccola isola del Sud Pacifico e come tante piccole isole è caratterizzata da una limitata disponibilità di acqua dolce. Per questo motivo il Gruppo di Geologia Applicata del D.I.I.A.R., Politecnico di Milano, è stato coinvolto in un progetto finanziato dal Comune di Milano nell'ambito dell'Expo 2015 e riguardante lo studio delle acque sotterranee ed il miglioramento dell'approvvigionamento idrico dell'isola.

2.1 Descrizione del clima

La Repubblica di Nauru ($0^{\circ}32' S$ lat., $166^{\circ}56' E$ long.) è uno Stato facente parte dell'Oceania; si tratta di un'isola collocata nell'Oceano Pacifico, 41 km a sud dell'equatore, a circa 2200 km a est di Papua Nuova Guinea (Figura 3).



Figura 3 - Posizione di Nauru nell'Oceano Pacifico



Nauru ha una forma pressoché circolare e presenta una superficie totale di circa 22 km² suddivisa in 14 distretti (Figura 4); la popolazione conta circa 10000 abitanti, secondo l'ultimo censimento del 2010, la cui maggioranza vive a ridosso del litorale. L'isola è circondata da una barriera corallina larga fino a 300 m, oltre la quale il fondale degrada rapidamente fino a circa 4000 m di profondità. La fascia costiera, di larghezza compresa tra i 120 e i 300 m, confina con una scarpata di roccia calcarea carsificata, alta fino a 30 metri sul livello del mare, formando il perimetro del pianoro interno dell'isola conosciuto come Fesa o Topside. Tale altopiano (il cui punto più alto raggiunge i 71 m) è composto da calcare dolomitico precedentemente coperto da grandi depositi di difosfato tricalcico ormai in gran parte cavati. La superficie del pianoro, soggetta a lavori di scavo, si presenta come un campo di pinnacoli carsici.

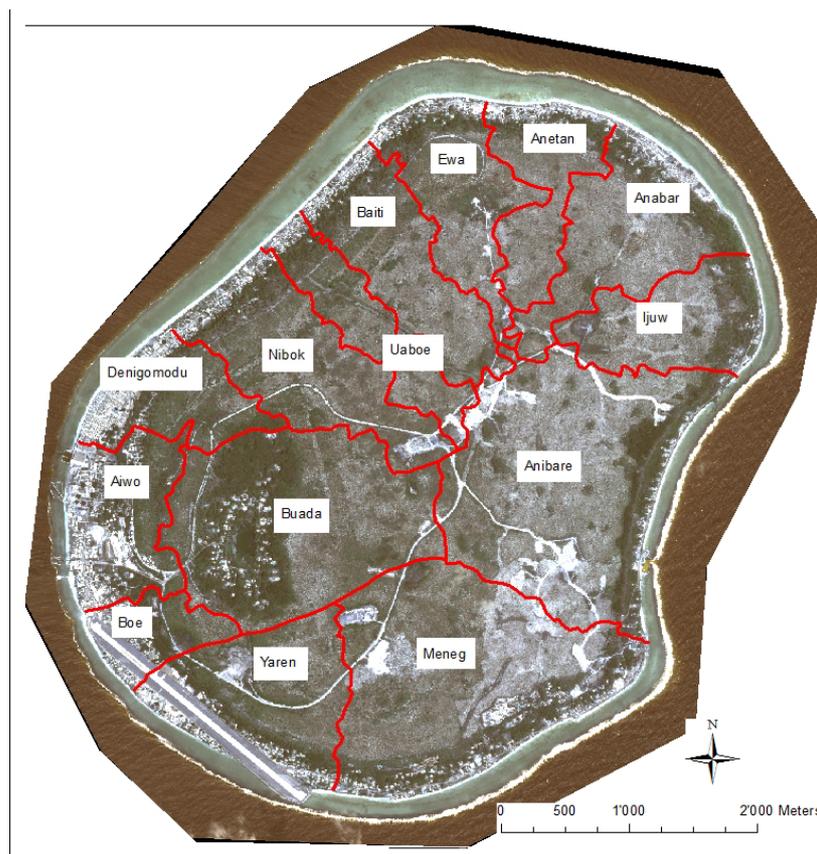


Figura 4 - Isola di Nauru in un'immagine da satellite e distretti



Se si fa eccezione per la Buada Lagoon, situata nella parte sud-ovest dell'isola, non esistono risorse d'acqua superficiali, sebbene ci siano degli stagni di acqua salmastra in prossimità della base della scarpata che divide il Topside dal pianoro costiero ed alcuni laghetti sotterranei contenuti nelle grotte Matquae (distretto di Yaren), Anatan Cave (distretto di Anetan) e Ijuh Cave (distretto di Ijuw) (Figura 5).



Figura 5 - Mappa dell'isola di Nauru

L'isola presenta una lente di acqua sotterranea, dolce o salmastra a seconda della stagione, di spessore medio e massimo pari rispettivamente a 4,7 m e circa 7 m (Jacobson e Hill, 1988), che fluisce radialmente verso il mare e che risulta essere l'unica significativa risorsa di acqua dolce.

La vegetazione sull'isola è molto ridotta, limitata a sole 60 specie autoctone di piante vascolari, mentre la maggior parte delle specie sono state importate. Ci sono un totale di circa 500 specie vascolari, rappresentate da alberi di cocco e altri alberi da frutta (pandanus), erbacce e piante ornamentali. La limitata biodiversità è associata alle attività minerarie per l'estrazione



dei fosfati effettuata in passato: è stato infatti stimato che il 63% della vegetazione che ricopre l'isola è stata rigenerata dopo il termine dell'attività mineraria alla fine degli anni '90.

Il clima a Nauru è caldo e umido, con temperatura media massima giornaliera pari a 29-31°C e media minima di 24-26°C uniformi per tutto l'anno. I venti sono generalmente calmi e provengono 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. Benché Nauru abbia una discreta piovosità media annua, sperimenta anche periodi di grave siccità associati a La Niña, in particolare nei mesi tra Novembre e Marzo, che si contrappongono a quelli di El Niño fenomeno con periodo di 4-5 anni in cui si verifica un raffreddamento delle correnti oceaniche con conseguente aumento di piovosità nel Pacifico Occidentale. La Figura 6 mostra che il periodo compreso tra il 1998 e il 2001 è stato particolarmente secco proprio a causa de La Niña.

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 è stata stimata pari a 2117 mm/y con un elevato grado di variabilità, come si vede dal grafico in Figura 6.

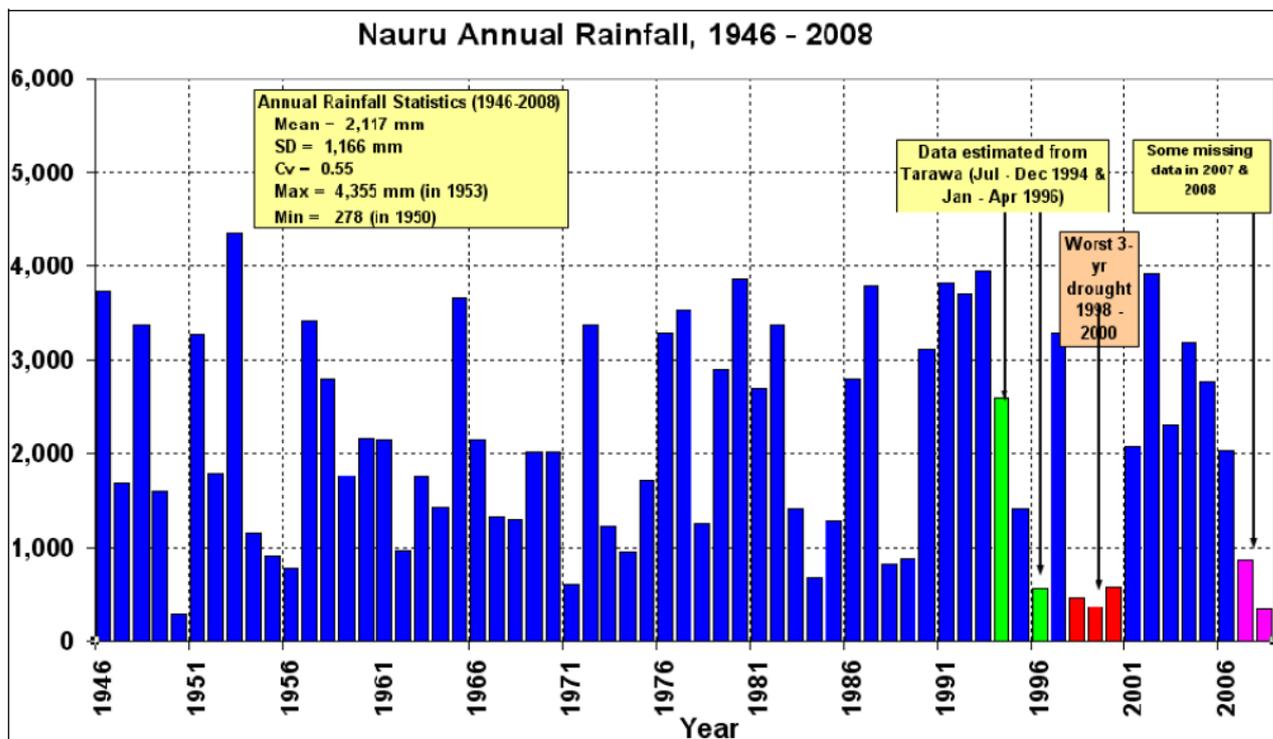


Figura 6 - Dati annuali di piovosità (mm) nel periodo 1946-2008 (Nauru Government Data)

2.2 Disponibilità idrica

Le risorse di acqua dolce sull'isola sono limitate a:

- acqua piovana (62%),
- acqua d'importazione,
- falde non-confinare e poco profonde nel pianoro costiero (22%),
- desalinizzazione di acqua salata attraverso impianto ad osmosi inversa (16%),

L'acqua piovana è una risorsa particolarmente importante per l'isola grazie alla sua qualità che la rende adatta per l'uso domestico e per alcuni scopi industriali. Ad esempio, in un campionamento del Luglio 1994 (SOPAC,2010) è stata misurata nell'acqua piovana raccolta una concentrazione di sali disciolti (TDS) pari a 52 mg/l, molto al di sotto del limite di



potabilità suggerito da World Health Organization (W.H.O). di 1500 mg/l. Tale risorsa si recupera facilmente ma è quella che più di tutte è dipendente dai fattori climatici. Quasi tutte le abitazioni a Nauru sono dotate di sistemi di grondaie con serbatoio di raccolta ma, con la realizzazione dell'impianto di desalinizzazione, che rese disponibile acqua di qualità migliore, molti di questi sistemi vennero abbandonati e lasciati deteriorare (a causa della presenza di fosfati nell'aria dovuta alle opere di estrazione, le lamiere delle grondaie arrugginiscono velocemente).

Per molti anni, durante il periodo di estrazione di fosfati, Nauru ha fatto grande affidamento sull'acqua importata che arrivava come carico di ritorno sulle navi che esportavano i fosfati. Negli anni 2001-2002, l'acqua importata da Kosrae (isola facente parte degli Stati Federati di Micronesia) integrava l'acqua piovana e l'acqua desalinizzata nella scorta d'acqua potabile (SOPAC, 2010). E' documentato da SOPAC che un carico di 1,5 milioni di litri costasse 87'000 AU\$ (dollari australiani): il costo unitario del carico d'acqua era 10 volte più grande del costo stimato di desalinizzazione. Non ci sono dati disponibili sul consumo di acqua imbottigliata importata negli anni più recenti, ma l'indagine sottolinea che una percentuale molto piccola di popolazione fa ancora affidamento su questa risorsa (0,2%).

L'acqua di falda è estratta da circa 350 pozzi domestici poco profondi situati in prossimità della costa che forniscono acqua a circa metà della popolazione, per scopi principalmente non potabili. La risorsa idrica sotterranea è infatti considerata di qualità scadente ed è utilizzata principalmente per usi igienici, scopi domestici secondari e come risorsa di riserva in periodi di siccità, ma sempre in percentuale trascurabile. L'acqua estratta viene normalmente trattata tramite bollitura. La maggior parte dei pozzi è di proprietà privata, mentre i pozzi pubblici forniscono acqua a sole 15 famiglie (SOPAC, 2010).

La qualità delle acque sotterranee è uno dei principali problemi a Nauru, a causa del rischio elevato di contaminazione fecale da fosse settiche sfoderate o da pozzi neri in cui l'effluente è in grado di percolare senza detenzione direttamente nel sottosuolo e quindi in falda. Inoltre, i valori di TDS registrati nelle acque estratte dai pozzi, legati al fenomeno di intrusione salina, sono generalmente abbastanza elevati; esistono tuttavia alcuni pozzi caratterizzati da valori bassi di salinità anche nei periodi siccitosi, in particolare nella zona nord, presso i distretti di



Ewa e Anetan. Alcuni valori relativi all'uso di acqua di falda a Nauru sono riportati in Tabella 3 (SOPAC,2010).

Tabella 2 - Uso dell'acqua di falda estratta da pozzi attivi nel 2010 a Nauru (SOPAC, 2010)

Volume minimo di acqua di falda estratta in l/d (scuole escluse, solo abitazioni)	Volume massimo di acqua di falda estratta in l/d (scuole incluse)	Volume medio di acqua di falda estratta in l/d (scuole escluse, solo abitazioni)	Volume medio di acqua di falda estratta da pozzi attivi in l/d (scuole escluse, solo abitazioni)	Volume medio di acqua di falda estratta pro.capite in l/d (scuole escluse, solo abitazioni)
215,144	401,642	297,557	1,328	94

L'acqua desalinizzata viene prodotta dagli impianti 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 sull'isola la prima risorsa di acqua potabile disponibile e la più affidabile e i serbatoi di acqua piovana vengono utilizzati per immagazzinarla.

Il primo impianto di desalinizzazione fu operativo dal 1994 al 2002: la desalinizzazione dell'acqua veniva ottenuta attraverso una tecnica di evaporazione che usava il calore in eccesso estratto dalle centrali elettriche come risorsa energetica. La potenziale capacità dell'impianto di desalinizzazione era pari a 1200 m³/d, mentre circa 700 m³/d di acqua dolce venivano prodotti e distribuiti ove richiesto. La concentrazione di TDS in un campione d'acqua desalinizzato, risultava pari a 34 mg/l. Successivamente l'impianto è stato modificando adottando 3 unità ad osmosi inversa (RO) ognuno con una capacità produttiva di 120 m³/d di acqua dolce. Tuttavia, ad Aprile 2010, SOPAC registrava solo 2 impianti che operavano 5 giorni a settimana, a seconda della domanda, dato che è stato confermato durante il sopralluogo effettuato dal Politecnico di Milano nel novembre 2010. Dopo il 2005 all'impianto pubblico gestito da NUA si sono aggiunti 3 impianti RO privati (c/o Menen Hotel, Chapelle e OD-N-Aiwo Hotel), attivati per fornire una riserva di scorta.

Una stima del fabbisogno di acqua pro capite è presentata in Tabella 2 sulla base dei dati dell'indagine SOPAC del 2010: da tale studio risulta una richiesta totale di acqua che varia da



un minimo di 88 ad un massimo di 141 l/d/pro capite; il fabbisogno di acqua potabile è stato stimato in base al consumo di acqua da bere (5 l/d/pro capite) e per cucinare (15 l/d/pro capite). Queste stime si confrontano ragionevolmente bene con le stime di Falkland (2009), che riporta un bisogno di 100- 150 l/d/pro capite.

Tabella 3 - Stime dell'utilizzo di acqua a Nauru (SOPAC, 2010)

	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

Molte famiglie fanno affidamento sulla raccolta di acqua piovana per una sostanziale porzione della loro riserva d'acqua dolce, ma i volumi dei serbatoi sono raramente sufficienti per far fronte ad un lungo periodo di siccità. Si stima 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 (SOPAC, 2007). E' stato verificato che, sull'isola di Nauru, in condizioni di precipitazioni medie, sia possibile raccogliere abbastanza acqua per vivere in salute. Tuttavia, per anni siccitosi aventi tempo di ritorno decennale (anno con meno del 50% della pioggia media), non ci sarebbe abbastanza acqua piovana immagazzinata in grado di sostenere una vita salutare.

In Tabella 4 sono riportate le quantità d'acqua piovana che sarebbero a disposizione degli abitanti di Nauru in differenti scenari climatici (National Integrated Water Resouece Management Report, Nauru - SOPAC 2007).



Tabella 4 - Quantità di acqua piovana raccolta nel caso di annate siccitose aventi tempi di ritorno da 5 a 20 anni

Stagione	Pioggia	Acqua raccolta	Acqua pro capite (l/d/pro capite)
Precipitazione media annua	2090 mm	360 m ³	140
1 anno piovoso ogni 5 anni di secca	1000 mm	170 m ³	65
1 anno piovoso ogni 10 anni di secca	600 mm	100 m ³	40
1 anno piovoso ogni 20 anni di secca	400 mm	67 m ³	26

Il riscaldamento globale accentua ovviamente il rischio di carenza d'acqua sull'isola di Nauru e comporta gravi effetti come l'innalzamento del livello del mare, e la conseguente accentuazione del fenomeno di intrusione salina, nonché i cambiamenti delle rotte delle correnti oceaniche con modificazioni nella lunghezza e frequenza dei periodi siccitosi.

2.3 Struttura idrogeologica

L'isola di Nauru è situata nell'omonimo bacino oceanico, profondo 4-5 km, che si estende dalle isole Marshall e Gilbert, a Nord-Est, fino al plateau di Ontong Java a Sud-Est (Figura 7). All'interno del bacino di Nauru sono presenti i lineamenti delle anomalie magnetiche dal Giurassico fino al Cretacico Inferiore (Larsen, 1976; Candee et Al, 1978); nel dettaglio l'isola di Nauru è collocata in prossimità dell'anomalia magnetica M15 che corrisponde al Cretacico inferiore e ciò comporta che i basalti sottostanti l'isola risalgono ad una età di circa 132 Ma.

In passato sono stati sviluppati due modelli magnetici, per ricostruire l'evoluzione e l'attuale latitudine e longitudine dell'isola di Nauru (Hill & Jacobson, 1988), dai quali si evince che il seamount ha avuto una direzione di spostamento verso Nord rispetto alla placca pacifica, con una velocità relativa compresa tra i 25 mm/y e i 72 mm/y. L'età del seamount è stata stimata tra i 47 e 29 Ma, quindi l'edificio carbonatico che caratterizza l'isola di Nauru si è sviluppato tra l'Eocene medio e l'oligocene.

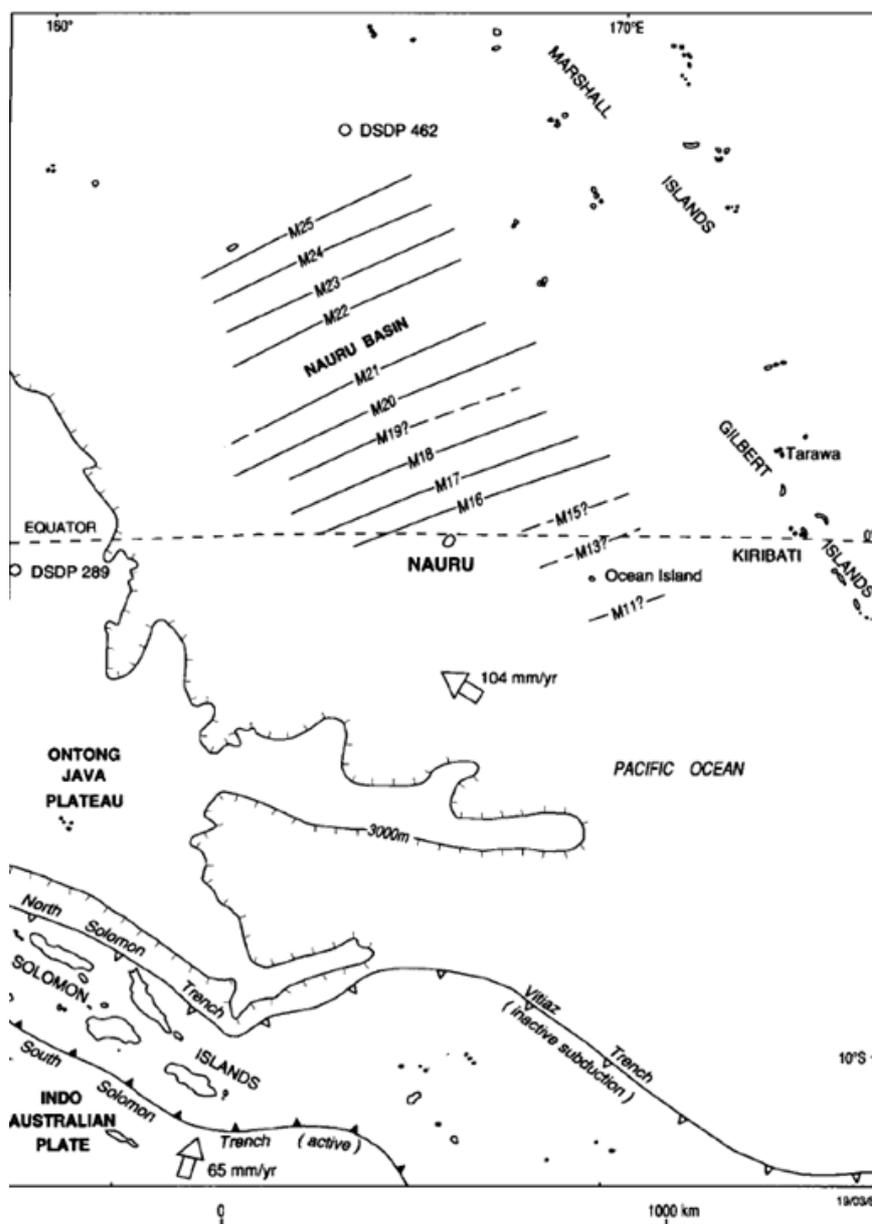


Figura 7 - Inquadramento strutturale dell'isola di Nauru. In evidenza i lineamenti magnetici in prossimità dell'isola (Hill & Jacobson, 1993)

E' possibile riassumere l'evoluzione geodinamica di Nauru in sei fasi:

1. Cretacico Inferiore (132 Ma). Formazione della crosta oceanica in prossimità del bacino di Nauru.



2. Cretacico Medio e Superiore (100 Ma). Sollevamento regionale indotto da anomalie termiche ed estese eruzioni di complessi vulcanici.
3. Cretacico Inferiore (70 Ma). Termine degli episodi vulcanici e fenomeni di subsidenza legati al raffreddamento della litosfera.
4. Eocene Medio fino all'Oligocene. Eruzione di basalti in seguito alla rottura della placca pacifica e al transito al di sopra dell'hot spot samoano.
5. Oligocene fino al Pleistocene. Erosione meteorica e subsidenza isostatica dell'edificio vulcanico e sviluppo della piattaforma carbonatica.
6. Pleistocene-Olocene. Durante i periodi glaciali, temporanea emersione della piattaforma carbonatica con sviluppo di fenomeni carsici e deposizione di fosfati. L'alternarsi dei periodi glaciali e interglaciali favorisce la formazione degli orli di terrazzo costieri.

Le informazioni relative al sottosuolo possono essere ricavate dai 127 pozzi georeferenziati censiti dell'isola, alcuni dei quali sono attualmente utilizzati esclusivamente per il monitoraggio della falda e della conducibilità elettrica (35) mentre altri sono stati realizzati per gli studi preliminari svolti da (Jacobson e Hill nel 1993) ma ormai non sono più rintracciabili o utilizzabili. I rimanenti pozzi sono di proprietà di privati, quindi utilizzati come pozzi ad uso domestico, e raramente vengono monitorati dalle autorità locali. Grazie ai dati relativi al sottosuolo è stato possibile ricostruire la geologia dell'isola, anche se, essendo a volte lacunose le descrizioni delle stratigrafie, non è stato possibile ricostruire l'evoluzione geologica con il dettaglio necessario.

Dal punto di vista geologico e geomorfologico è possibile distinguere l'isola in due parti (Figura 8):

1. Bottomside, area costiera con una altezza media di circa 3 metri slm;
2. Topside, area centrale con una altezza media di circa 25 metri slm.

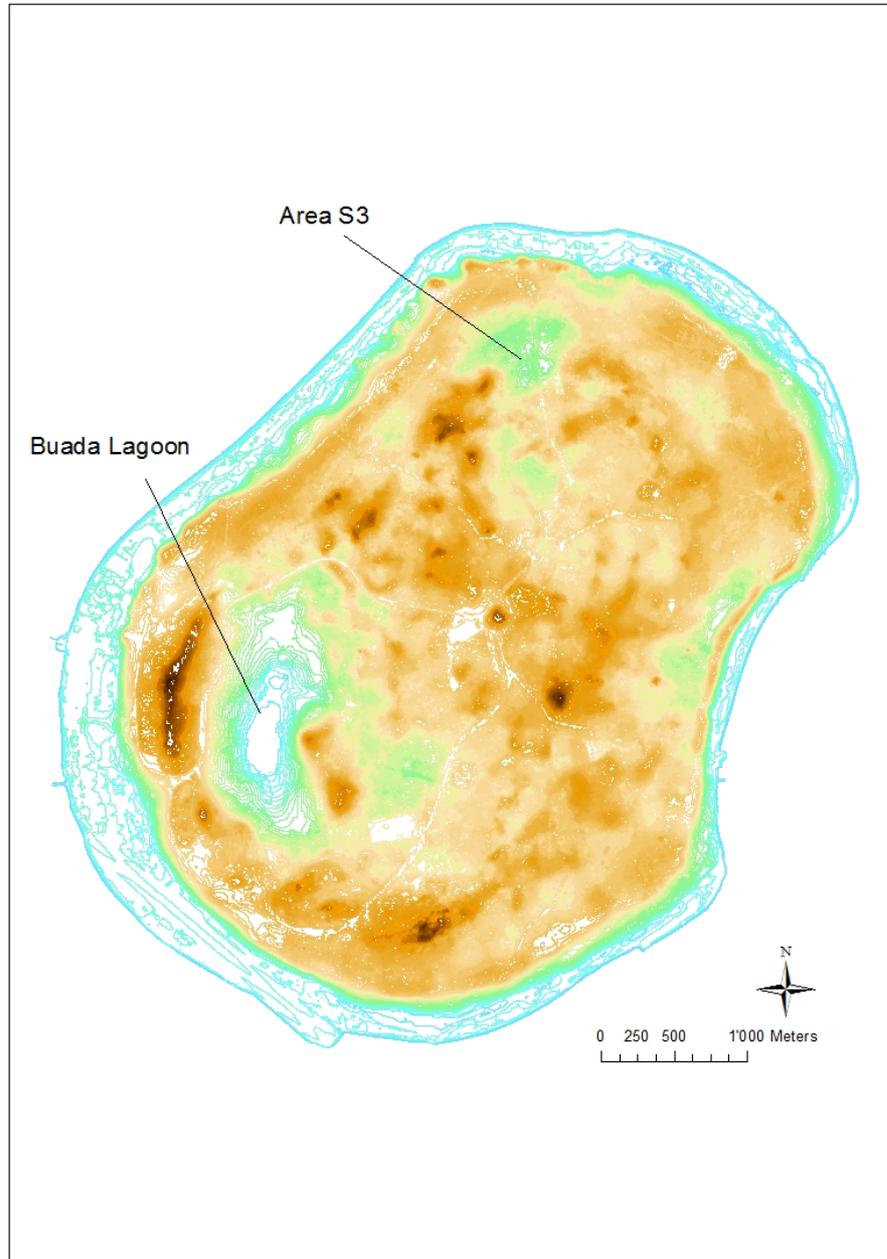


Figura 8 - DTM elaborato da Politecnico di Milano sulla base dei dati desunti dal rilevamento aereo fotogrammetrico eseguito nel 2010: Bottomside (area di colore azzurro) e Topside (in marrone)

Il Bottomside occupa l'intera area costiera ed è compreso tra la linea di costa e la scarpata dell'orlo di terrazzo principale, verso il Topside. A Sud dell'isola, presso il distretto di Yaren, il Bottomside raggiunge la larghezza maggiore, circa 400 metri, mentre presso la baia di Anabar



risulta largo soltanto i 70 metri; in generale la larghezza media è di circa 150 metri. Lungo la costa, nel settore Nord, è presente una piccola laguna di acqua salmastra chiamata Anabar Lagoon. L'intero Bottomside è costituito da sedimenti sabbiosi paralici omogenei e ben selezionati che raggiungo una profondità media di circa 5 metri dal piano campagna. Scendendo stratigraficamente i sedimenti sciolti poggiano sulle rocce carbonatiche come mostra la Figura 9 e come viene anche documentato da Jacobson e Hill (1993). Grazie a datazioni radiometriche svolte sui coralli aragonitici, Jacobson e Hill (1993) sono riusciti a distinguere i calcari dolomitici pliocenici del Topside dai calcari pleisto-olocenici che costituiscono l'attuale barriera corallina (Figura 10).

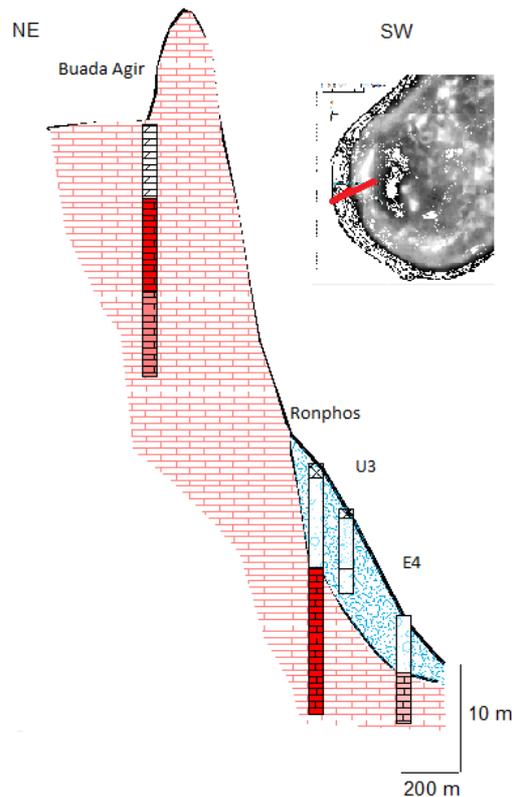


Figura 9 - Stralcio di sezione geologica ortogonale alla linea di costa (a destra). Il mattonato rappresenta i calcari mentre in azzurro sono indicati i sedimenti costieri.

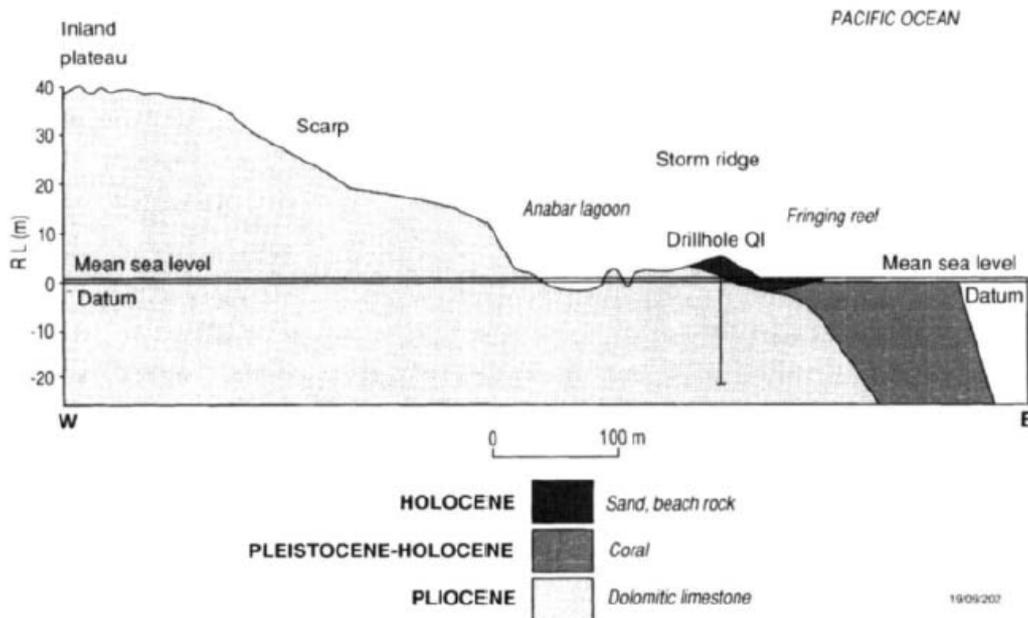


Figura 10 - Sezione geologica (da Jacobson and Hill, 1993)

Il Topside ha un'area di circa 16 km² e occupa il 70% dell'isola, è caratterizzato da un'altezza media di 25 metri con quote massime di 70 metri e delimitato dal Bottomside dall'orlo di terrazzo principale. Grazie al Modello Digitale del Terreno (DTM) è stato possibile distinguere le zone depresse, come quella in prossimità del piezometro S3 o quella della Buada Lagoon che presenta valori altimetrici vicini a quelli del mare, dalle zone più elevate (Figura 8). La Buada Lagoon occupa una superficie di circa 1 km² ed è caratterizzata da acque molto salmastre (20000 μS/cm); la profondità della laguna non è nota in quanto non sono mai state effettuate misure. L'altra zona depressa è situata a Nord dell'isola, occupa un'area di circa 0.20 km² e, a differenza della Buada Lagoon, si presenta asciutta, anche se è possibile ipotizzare che in passato fosse anch'essa una laguna. Entrambe le zone sono circondate da rilievi calcarei, come ad esempio il Command Ridge nella parte Sud-Est dell'isola che arriva a quote di circa 65 metri.

Dal punto di vista geologico l'intero Topside è costituito da calcari e dolomie fortemente carsificati ma, nonostante l'elevato numero di dati, non è stato possibile eseguire correlazioni



stratigrafiche di dettaglio in quanto le descrizioni dei sondaggi sono molto sommarie. In prossimità delle aree depresse i calcari sono coperti da sedimenti sciolti molto omogenei e ben selezionati che raggiungono una profondità massima di circa 8 metri. Il carsismo presso l'isola di Nauru è molto intenso, infatti tutti i calcari presentano forme di tipo Karren (pinnacoli). La depressione presso il sondaggio S3 può essere interpretata come una dolina creata per fenomeni di subsidenza. Tuttavia ad oggi non esistono dati e studi sufficientemente dettagliati per poter comprendere il grado d'influenza del sistema carsico sulla circolazione idrica sotterranea e il fenomeno d'intrusione salina.

La realizzazione di sezioni geologiche ha permesso di ricostruire schematicamente l'andamento e le geometrie di alcuni canali carsici, così come la presenza di sedimenti sciolti nelle depressioni (Figura 11).

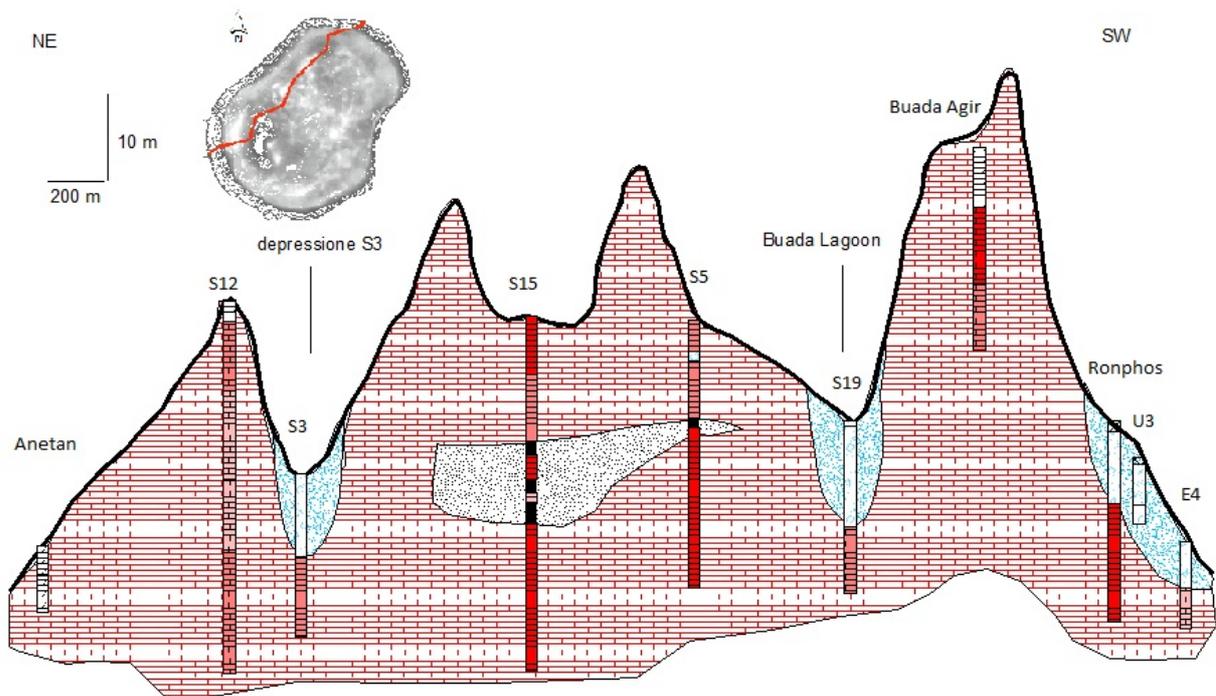


Figura 11 - sezione geologica che attraversa le due aree depresse di maggior importanza. Il mattonato rappresenta i calcari, in azzurro sono indicati i sedimenti sciolti mentre il grigio indica i probabili condotto carsici



Precedenti studi idrogeologici (Jacobson and Hill, 1993; Falkland, 2008) hanno permesso di valutare la distribuzione del carico idraulico e della salinità nelle acque sotterranee. In particolare Falkland, in collaborazione con i tecnici della Nauru Rehabilitation Company (NRC), ha svolto indagini sulla risposta della falda alle oscillazioni di marea valutando che quest'ultima genera una variazione della superficie piezometrica di circa 50 cm con un ritardo temporale compreso tra un'ora e tre ore a seconda della posizione del punto di monitoraggio. Sulla base di tale analisi, i singoli valori di carico idraulico sono stati ricalcolati, in questo studio, per ottenere una carta piezometrica depurata dagli scarti legati alle oscillazione di marea, inoltre sono stati utilizzati anche per calibrare i parametri idrogeologici dell'isola. Come verrà esposto più avanti, si è visto che la marea influenza notevolmente la distribuzione della salinità in falda perché tende a mescolare l'acqua dolce con l'acqua salmastra sottostante riducendo quindi notevolmente la disponibilità di acqua dolce sotterranea.



3 SINTESI DEGLI INCONTRI E DELLE ATTIVITÀ SVOLTE NEL PRIMO MEETING IN NAURU

Nella settimana dal 24 Novembre al 1 Dicembre 2010, il Politecnico di Milano, rappresentato dal Dott. L. Alberti e dal Dott. M. Cantone, ha visitato per la prima volta l'isola di Nauru. Gli obiettivi di questo viaggio erano:

- incontrare le autorità pubbliche di Nauru che si occupano delle risorse idriche dell'isola,
- iniziare la raccolta di una serie di dati idrogeologici che non erano disponibili in letteratura o negli studi svolti in precedenza.

3.1 Meeting con le autorità pubbliche locali

Durante il periodo passato a Nauru è stato possibile incontrare personalmente: le autorità pubbliche locali, alcuni managers della Nauru Rehabilitation Company (NRC), qualche membro del Pacific Islands Applied Geoscience Commission (SOPAC) e dell'International Monetary Found (IMF).

Il 25 Novembre, nell'ufficio governativo del Dipartimento del Commercio, Industria e Ambiente (CIE) c'è stata per i membri del Politecnico di Milano la possibilità di conoscere il Project Manager Haseldon Buraman ed il Project Coordinator Mavis Brechtefeld Depaune i quali hanno mostrato i dati a disposizione nonché la loro esperienza e le loro conoscenze nel campo delle acque.

Il Dipartimento del Commercio, Industria e Ambiente si occupa principalmente del monitoraggio ambientale dei pozzi pubblici e privati e della raccolta dei dati relativi alla temperatura e alle precipitazioni; in particolare ha fornito al gruppo di ricerca del Politecnico i dati di temperatura e precipitazione raccolti negli ultimi anni e numerosi reports relativi a studi sulle acque sotterranee svolti in collaborazione con i tecnici SOPAC. Inoltre il CIE ha fornito un rapporto dettagliato riguardante la posizione e le caratteristiche dei pozzi privati e dei pozzi neri presenti sull'isola. Non era disponibile un database che raggruppasse tutte queste informazioni ma le mappe contenute nel rapporto danno una buona idea della distribuzione



spaziale dei pozzi e dei valori di Conducibilità Elettrica in falda da Novembre 2009 ad Aprile 2010.

La società NRC, diretta dall'amministratore delegato Vinci Clodumar, è responsabile della riqualificazione ambientale dell'isola di Nauru a seguito dello sfruttamento del fosfato; nel quartier generale, situato nel distretto di Meneg, Vinci Clodumar e Benedict Abouke hanno spiegato quali sono gli obiettivi dell'NRC e hanno mostrato i dati di cui sono in possesso: l'NRC gestisce circa 35 pozzi e piezometri per il monitoraggio dei livelli di falda e della salinità. Negli anni più recenti Benedict Abouke, insieme a Peater Sinclair del SOPAC, ha costantemente monitorato molti di tali pozzi e piezometri al fine di capire l'evoluzione della tavola d'acqua e della distribuzione di concentrazione in falda, in risposta agli eventi meteorici.

L'NRC ha fornito al Politecnico i dati idrogeologici, numerose stratigrafie e dati grezzi relativi al Digital Terrain Model (DTM) utili per la modellazione dell'isola di Nauru. Diversamente non era disponibili alcun dato riguardante la conducibilità idraulica degli acquiferi calcarei e delle sabbie presenti sulla costa.

Come già detto, a Nauru era presente un consulente di SOPAC (David Duncan) e qualche funzionario dell'IMF (Andrew McIntire e altri) che hanno evidenziato i problemi e le difficoltà che si incontrano generalmente nello sviluppare progetti in situ, elencando anche i principali progetti portati a termine nell'isola e fornendo indicazioni per trovare i relativi reports. Da questi incontri è emerso chiaramente che un punto importante per raggiungere gli scopi prefissati in questo progetto, è necessario coinvolgere (ad esempio come supervisore) qualche organizzazione che ha avuto recentemente a che fare con progetti simili riguardo alla gestione della risorsa idrica.

Il 26 Novembre si è tenuto un incontro al quartier generale dell'NRC per presentare il progetto di Nauru che il Politecnico sta sviluppando nell'ambito dell'Expo 2015 e finanziato dal Comune di Milano. Al meeting erano presenti l'amministratore delegato dell'NRC (Vinci Clodumar), un delegato del CIE (Haseldon Buraman), un membro del SOPAC (David Duncan) e un delegato dell'AMU, Aid Management Unit, (Miss A. Tiata).



Riassumendo brevemente, il programma del progetto Expo 2015-Nauru è suddiviso in due parti principali (www.como.polimi.it/nauru/aim-of-the-project.html): la prima fase del lavoro è dedicata alla modellazione matematica del flusso dell'acqua sotterranea e dell'intrusione salina con lo scopo, tra l'altro, di raccogliere tutti i dati disponibili, evidenziare le carenze di informazioni e le attività di monitoraggio/sperimentazione necessarie per migliorare la comprensione del comportamento del sistema idrico sotterraneo dell'isola di Nauru ed implementare uno strumento utile per la gestione delle acque di falda. Lo sviluppo della seconda fase del lavoro deve essere valutata sulla base dei risultati raggiunti attraverso l'attività di modellazione ma, indicativamente, i fondi disponibili dovrebbero essere utilizzati per: miglioramento della rete di monitoraggio, progettazione e costruzione di un campo pozzi pilota, perfezionamento dello sfruttamento della risorsa idrica sotterranea attraverso nuove infrastrutture e l'organizzazione di sessioni dedicate durante la Conferenza SOPAC che si terrà nel Luglio del 2012 (www.SOPAC.org).

Alla fine della presentazione, durante la discussione, è risultato che il progetto Expo 2015 Nauru rappresenta una buona occasione per le autorità pubbliche di Nauru di proseguire il lavoro svolto fino a Luglio 2010 da Peter Sinclair e Benedict Abouke. Quello che è emerso dalle indagini del SOPAC è che gli studi di Jacobson e Hill (1993) ed il modello da loro implementato sono troppo generici e non hanno il livello di dettaglio necessario per rappresentare in maniera accurata l'idrogeologia dell'isola. Ad esempio è noto che fino ad ora c'è una grande carenza di informazioni relative ai valori di conducibilità idraulica in alcuni settori dell'isola (Top site, Buada Lagoon, pianoro costiero) ed è necessario pianificare una serie di prove di pompaggio e il prolungamento delle attività di monitoraggio svolte da Peter Sinclair. L'incontro si è concluso con il seguente accordo:

- il Politecnico di Milano preparerà una lista di attività di monitoraggio da effettuare nel corso del 2011,
- B. Abouke dell'NRC sarà il responsabile di tali attività e della trasmissione dei dati al Politecnico,
- Il prossimo meeting nell'isola di Nauru è pianificato indicativamente per Luglio-Settembre 2011.



3.2 Attività di campo

Le attività di campo sono state svolte dal Politecnico in collaborazione con i tecnici dell'NRC ed in particolare con lo staff di Benedict Abouke. Il 26 Novembre è stata effettuata una prova di pompaggio nel pozzo T1 al fine di ottenere i parametri idrogeologici dell'area del Topside; la prova è stata condotta utilizzando la pompa in dotazione all'NRC. Il piezometro S8, distante 5 m dal primo, è stato usato come piezometro di monitoraggio per valutare gli effetti dell'estrazione mentre il piezometro S10, posto ad una distanza di 123 m da T1 è stato utilizzato per monitorare le oscillazioni naturali della tavola d'acqua. Dopo circa 6 ore è stata effettuata una prova di risalita sempre sullo stesso pozzo. sfortunatamente però, entrambe le prove non hanno dato risultati accettabili a causa della troppo bassa portata massima estraibile con la pompa a disposizione (0.85 l/s). La prova ha dato una indicazione di massima riguardo a un elevato valore della conducibilità idraulica del sottosuolo ($>1 \cdot 10^{-3}$ m/s). Nel piezometro di monitoraggio S10 è stata osservata una variazione del livello della tavola d'acqua dovuta solamente alle oscillazioni di marea.

I giorni successivi (27 Novembre - 30 Novembre) è stata effettuata una campagna di misura dei livelli di falda e della conducibilità elettrica in modo da ottenere una rappresentazione accurata della distribuzione del carico idraulico e della concentrazione: queste misure sono state effettuate durante i primi due giorni su tutta l'isola impiegando la mattina del primo giorno per la parte meridionale e proseguendo nella parte settentrionale il mattino del secondo giorno. Le misurazioni sono state fatte nello stesso momento di due giorni differenti al fine di ottenere carichi e concentrazioni riferiti a livelli di marea comparabili. Le due mattine successive sono state impiegate per raccogliere ancora valori di conducibilità elettrica e carico idraulico sulle due sezioni che si era deciso di simulare con i modelli bi-dimensionali. La conducibilità elettrica, in particolare, è stata misurata sulla profondità dei piezometri ad intervalli di 1 m; per lo stesso parametro è stata effettuata anche una misura nelle acque della Anabar Lagoon, situata nella zona settentrionale dell'isola, e nella Buada Lagoon posta nella zona meridionale. Nei pressi dell'aeroporto la conducibilità elettrica è stata misurata nella Maqua Cave.

A causa delle continue variazioni dei livelli di falda generate dalle oscillazioni di marea, si è ritenuto importante monitorare un piezometro situato in prossimità della costa (T2) e uno nell'area del Topside (S10) al fine di valutare la risposta della tavola d'acqua nel tempo. I dati



raccolti in tre giorni di monitoraggio hanno permesso la ricostruzione dei livelli di marea con l'individuazione di quelli massimi e minimi.

3.3 Attività di monitoraggio, programma 2011

In questo paragrafo vengono riportate le attività di monitoraggio suggerite dal Politecnico di Milano. A Dicembre 2010 i punti seguenti sono stati comunicati a B. Abouke (NRC):

Livelli di falda e misure della conducibilità elettrica nel piezometro T1

Programmare il data logger CD3000 e posizionarlo nel piezometro T1 al di sotto del livello di falda.

PRIMO STEP: per la prima settimana dalla messa in opera del datalogger raccogliere i dati ogni 30 minuti. Scaricare i dati raccolti alla fine della prima settimana di monitoraggio. I dati verranno usati per determinare il segnale nell'area del Topside.

SECONDO STEP: dopo il primo step resettare il datalogger CD3000 per raccogliere misure ogni 2 ore e lasciarlo nel piezometro T1 per 1 anno. Scaricare comunque i dati ogni mese e, per favore, inviarli al Politecnico via e-mail. È stato anche suggerito di scaricare i dati usando un notebook al fine di evitare di muovere il datalogger (altrimenti ogni volta che vengono scaricati i dati si rischia di cambiare la profondità alla quale lo strumento viene posizionato). Tali dati verranno utilizzati per monitorare i movimenti della tavola d'acqua e correlarli con gli eventi meteorici che verranno misurati per 1 anno attraverso il pluviometro.

Livelli di falda e misure della conducibilità elettrica nel piezometro S3

Programmare il data logger CD3000 e posizionarlo nel piezometro T1 al di sotto del livello di falda.

Programmare lo strumento per immagazzinare i dati ogni 2 ore e lasciarlo nel piezometro S3 per 1 anno. Scaricare comunque i dati ogni mese e, per favore, inviarli al Politecnico via e-mail. È stato anche suggerito di scaricare i dati usando un notebook al fine di evitare di muovere il datalogger (altrimenti ogni volta che vengono scaricati i dati si rischia di cambiare



la profondità alla quale lo strumento viene posizionato). Bisogna anche assicurarsi che il livello piezometrico in S3 non si abbassi mai troppo da lasciare lo strumento scoperto che potrebbe in tal caso rompersi. I dati verranno utilizzati per monitorare i movimenti della tavola d'acqua e correlarli con gli eventi meteorici e con l'infiltrazione dalla superficie.

Misure pluviometriche

Come stato già fatto per Falkland (SOPAC), continuare a misurare ogni giorno lo spessore dell'acqua nel pluviometro prossimo al T1. Immagazzinare i dati nel foglio di calcolo di Falkland ed inviarli al Politecnico ogni mese via e-mail.

Sarebbe utile per il Politecnico ricevere ogni mese anche i dati registrati dal pluviometro automatico dell'NRC.

Buada Lagoon

Pontile: chiedere al servizio di monitoraggio di misurare il livello del punto del pontile dal quale sono state effettuate le misure di livello della Buada Lagoon.

Conducibilità elettrica e misure di profondità: provare a individuare il punto più profondo della laguna e misurare lì la conducibilità elettrica e la temperatura per ogni metro di profondità, dalla superficie fino al fondo.

Prove di pompaggio

Alcune copie di pozzi sono state scelte dove la profondità della tavola d'acqua non è piccola al fine di effettuare alcune prove di pompaggio con la pompa che c'è sull'isola (2,5 l/s). Le prove devono avere inizio di mattina al fine di sfruttare appieno la giornata lavorativa. Quando si effettua la prova di pompaggio è necessario assicurarsi che il datalogger nel piezometro T1 sia posizionato e funzionante.

O11-E5:



- posizionare la pompa nel pozzo O11 e mettere il tubo di scarico dell'acqua il più lontano possibile,
- posizionare lo ST datalogger nel piezometro E5, 1 m al di sotto della tavola d'acqua, e settare la registrazione dei dati ogni 30 secondi,
- 1 minuto prima di accendere la pompa misurare il livello in O11 e E5 e quindi iniziare la prova di pompaggio,
- prendere le misure di livello nel pozzo O11 seguendo i tempi indicati dal Politecnico (timesheet),
- misurare la portata della pompa usando il secchio a 5 minuti dall'inizio della prova e quindi ogni ora,
- come indicato nel timesheet lasciato dal Politecnico, registrare i livelli in E5 usando un freatometro; assicurarsi di non muovere il datalogger altrimenti i dati non saranno corretti,
- misurare la conducibilità elettrica in O11 e E5 come indicato nel timesheet,
- ogni tanto controllare il livello di carburante nel generatore per evitare improvvisi spegnimenti della pompa,
- dopo 9 ore misurare manualmente i livelli in O11 ed E5 e quindi spegnere la pompa.
- misurare il livello della tavola d'acqua in risalita nel pozzo O11 seguendo i tempi del timesheet,
- interrompere le misure dopo 1 ora,
- lasciare il datalogger nel piezometro E5 per le 24 ore successive allo spegnimento della pompa.

Tubazioni di rivestimento

È stato suggerito di effettuare un piccolo foro (circa 3 mm di diametro) alla base di ogni tubazione di rivestimento dei piezometri per evitare che l'acqua piovana si accumuli all'interno.



Campagne di misura di livelli e conducibilità elettriche

È stato suggerito di effettuare una campagna di monitoraggio dei livelli di falda e dei valori di conducibilità elettrica in tutti i piezometri ogni 2 mesi, mentre ogni mese misurare gli stessi parametri, in superficie, a media profondità e sul fondo, dei seguenti pozzi:

S18- S1- S21-S24-S12-S2-S4-S3-E2-S8-T1-S10-E8-T2-E3.



4 REALIZZAZIONE DEL GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEM

I dati raccolti ed elaborati sono stati informatizzati e georeferenziati grazie al software ArcGis 9.2 (ESRI). ArcGIS è una suite di applicazioni integrate composta da ArcCatalog, ArcMap, ArcGlobe, ArcToolbox e ModelBuilder; tramite le diverse applicazioni è possibile effettuare tutte le operazioni proprie di un GIS, da quelle più semplici a quelle più complesse, in particolare:

- Creare mappe,
- Effettuare analisi geografiche,
- Eseguire l'editing di dati geografici e alfanumerici,
- Eseguire la compilazione, la gestione, la visualizzazione dei dati,
- Eseguire il geoprocessing.

Le informazioni geografiche ed i dati idrogeologici raccolti sono stati inseriti all'interno del geodatabase NAURU.gdb (Figura 12), all'interno del quale sono presenti due feature dataset definiti rispettivamente *Nauru* e *Sottosuolo*. Il dataset "Nauru" contiene tutte le feature classes con i dati di natura topografica e idrogeologica, mentre il dataset "sottosuolo" contiene le informazioni riguardanti le stratigrafie dei pozzi e la loro posizione spaziale.

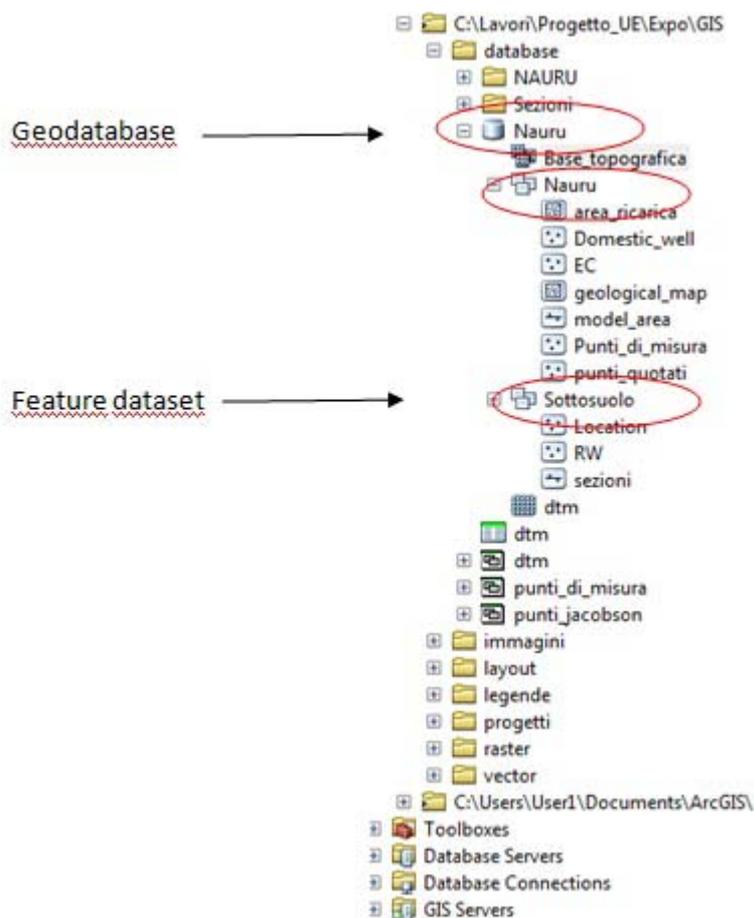


Figura 12 – Struttura del Geodatabase utilizzata per le informazioni idrogeologiche raccolte presso l'isola di Nauru

Le feature classes *Location* (posizione dei pozzi) e *RW* (dati di sottosuolo) sono state utilizzate per costruire le sezioni geologiche grazie all'estensione CrossView™, che ha permesso di lavorare non più in 2 dimensioni, ma di poter rappresentare i dati idrogeologici in tre dimensioni, infatti la Figura 14 mostra la distribuzione della conducibilità elettrica sia in pianta che in profondità. Tali carte tematiche è possibile costruirle sia per i dati geologici che meteo climatici.

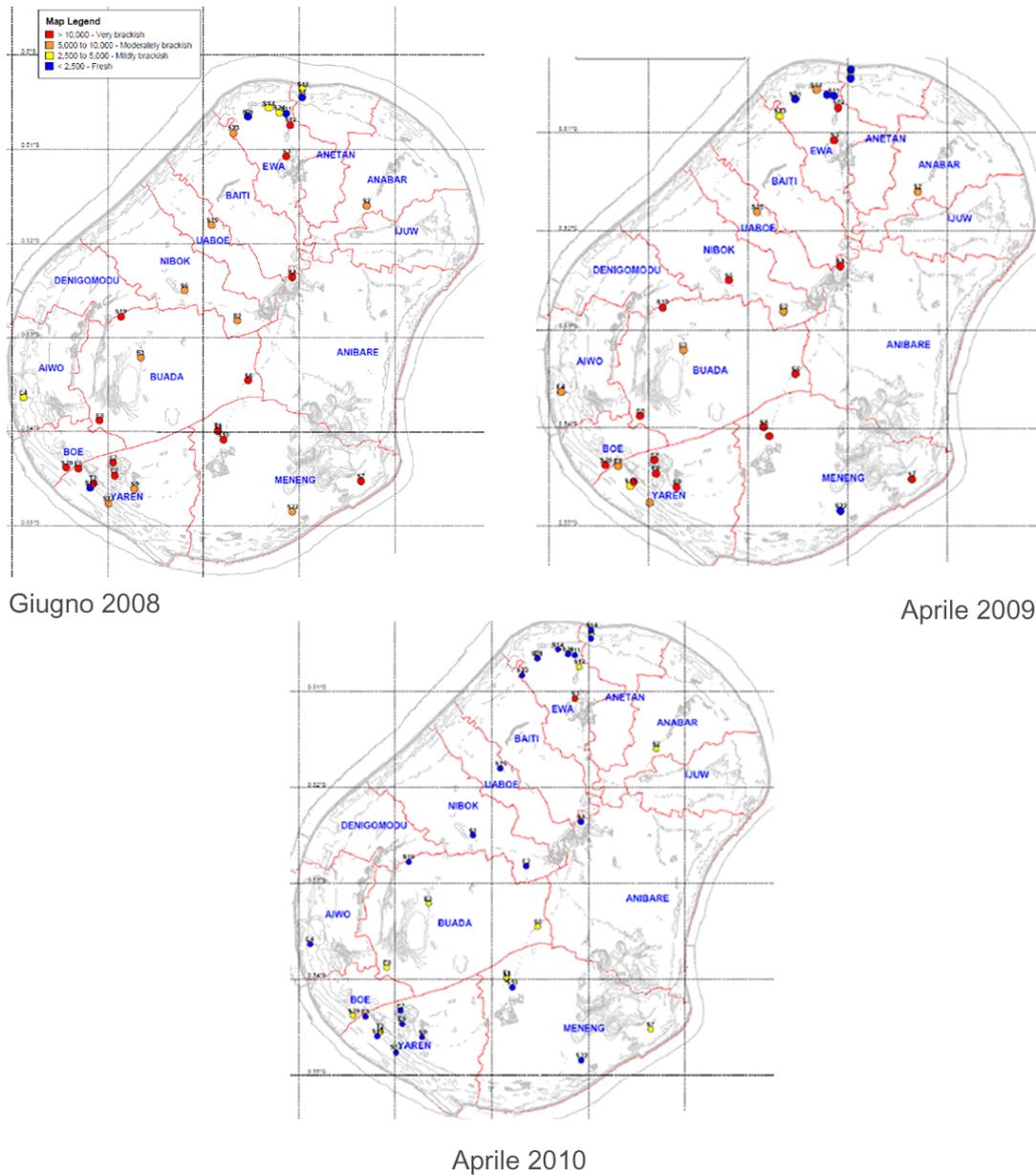


Figura 13 – Carte tematiche inerenti la distribuzione dei valori di conducibilità elettrica nelle acque sotterranee ($\mu\text{S}/\text{cm}$), rilevati ad 1 m di profondità nei pozzi e piezometri di monitoraggio

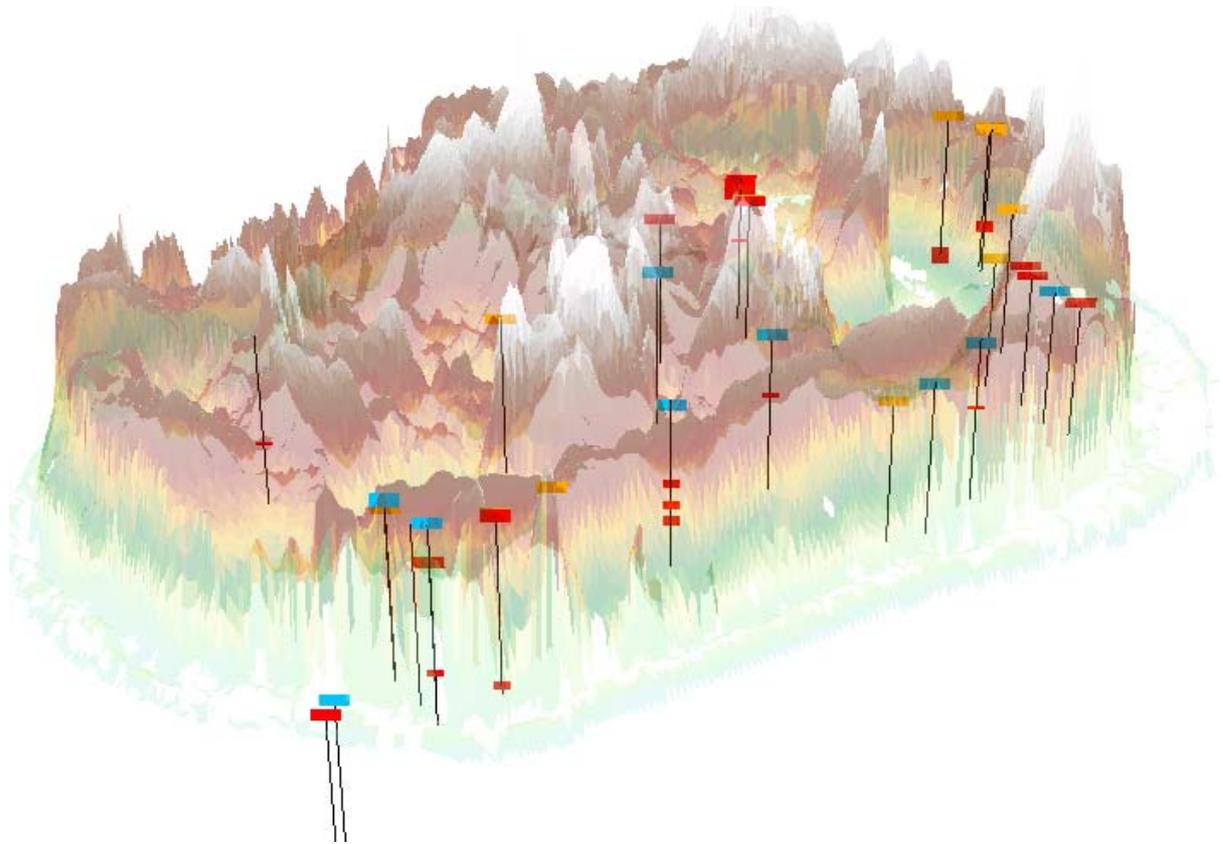


Figura 14 - Distribuzione della conducibilità elettrica in 3D. In corrispondenza dei pozzi le icone in rosso indicano le Conducibilità più elevate e in blu le minori.

L'implementazione del GIS è stata fondamentale in quanto ha permesso di creare carte tematiche, ad esempio la Figura 13, ed eseguire analisi spaziali utili all'implementazione dei modelli matematici di flusso densità dipendenti.

Le mappe tematiche e gli shapefile costruiti con il GIS sono stati esportati ed utilizzati per la modellazione matematica di flusso e trasporto, infatti per definire la zonazione delle permeabilità, della ricarica meteorica e di altri parametri il GIS è stato fondamentale in quanto è il punto di collegamento tra la rappresentazione cartografica e l'attribuzione dei parametri idrogeologici per la parte di modellazione matematica.

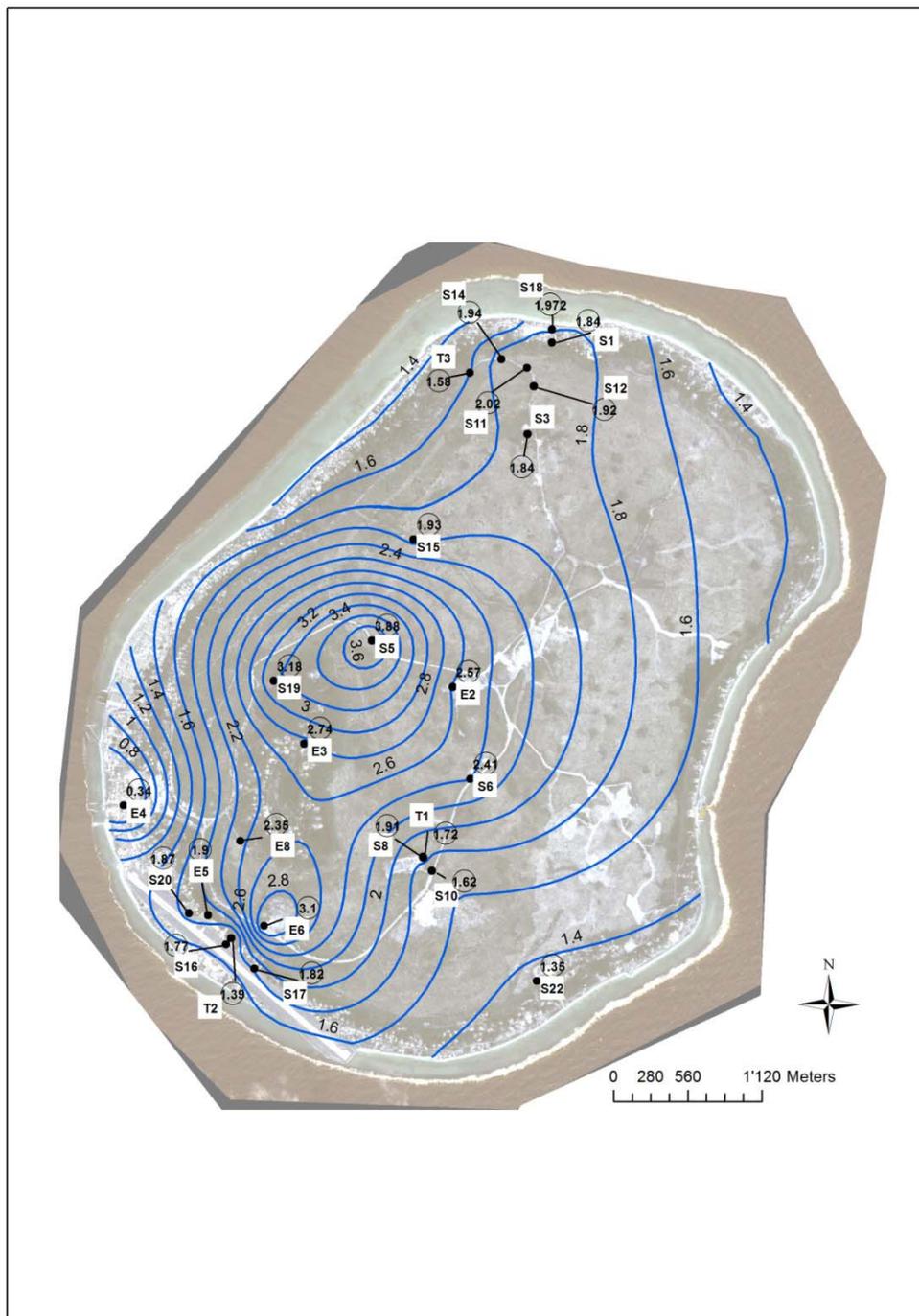


Figura 15 – Carta piezometrica redatta mediante il GIS e riguardante i valori misurati durante la campagna condotta dal Politecnico di Milano nel Novembre 2010



5 MODELLAZIONE MATEMATICA

5.1 Scelta del codice di calcolo

Un modello matematico è uno strumento utilizzato per rappresentare la realtà in modo semplificato e può essere usato a fini interpretativi, con lo scopo di controllare la variazione di determinati parametri, ma può anche essere un valido sistema di supporto alle decisioni. Anche i modelli relativi alle acque sotterranee sono rappresentazioni della realtà e, se adeguatamente costruiti, possono essere strumenti previsionali per la gestione della risorsa idrica sotterranea. L'attendibilità delle previsioni (simulazioni) dipende da quanto bene il modello approssima la realtà.

Un fluido (o una fase fluida) è di fatto considerato come un mezzo di densità ρ spesso non uniforme. In generale, il fluido è composto da N specie chimiche miscibili, ognuna caratterizzata da una densità parziale ρ_k (massa del componente k per unità di volume del

fluido) così che, per la miscela la densità risulta $\rho = \sum_{k=1}^N \rho_k$. Inoltre, la densità del fluido può essere influenzata dalla temperatura (T), alla quale è inversamente proporzionale, e dalla pressione (p) il cui incremento genera un aumento della densità a causa della compressibilità del fluido.

L'acqua di falda contiene normalmente, tra le sostanze disciolte, anche i sali che si trovano comunemente nell'acqua di mare. A concentrazioni relativamente basse, tali costituenti non influiscono sostanzialmente sulla densità del fluido che invece aumenta con l'aumentare della concentrazione dei sali in soluzione. Se le variazioni spaziali di densità sono limitate, indipendentemente dal valore assoluto della densità stessa, i metodi matematici per simulare il flusso sotterraneo sono relativamente semplici; in caso di variazioni spaziali importanti della densità, come accade negli acquiferi costieri, la simulazione del flusso idrico sotterraneo è più complicata in quanto tali variazioni influiscono significativamente sul flusso stesso.

Per la modellazione matematica bi e tri-dimensionale dell'isola di Nauru è stato scelto il codice alle differenze finite SEAWAT2000 (Langevin e al., 2003; Langevin e Guo, 2006), prodotto da



USGS (United States Geological Survey), e sviluppato per simulare flusso e trasporto dipendente da densità accoppiando i codici di calcolo per la simulazione del flusso e del trasporto di soluto maggiormente in uso, ovvero MODFLOW (McDonald e Harbaugh 1996), codice alle differenze finite per la simulazione del flusso di falda e MT3D (Zheng 1990), codice per la simulazione del trasporto di soluto. SEAWAT è stato testato con una serie di problemi noti (Guo e Langevin 2002; Langevin e al. 2003; Bakker e al. 2004; Langevin e Guo 2006) ed è stato utilizzato nello studio di diversi casi legati al flusso di acqua di falda in ambiente sottomarino (Langevin 2001, 2003), all'intrusione salina (Shoemaker and Edwards 2003; Rao et al. 2004; Shoemaker 2004; Masterson 2004; Dausman and Langevin 2005), allo sviluppo di aree paludose costiere (Langevin et al. 2004, 2005) e all'idrogeologia di alcune isole (Schneider and Kruse 2003).

5.2 Simulazioni bidimensionali

Al fine di raggiungere una buona calibrazione, sono state inizialmente implementate due sezioni bi-dimensionali in modo da rendere più veloce il processo di valutazione del migliore set di parametri in grado di rappresentare correttamente la piezometria e la distribuzione di salinità delle acque sotterranee dell'isola. Le informazioni ricavate da queste prime simulazioni sono state poi utilizzate nella fase di calibrazione del modello 3D, trattato in seguito, implementato solo su una porzione dell'isola, quella nella quale si registra la maggior presenza di acqua dolce (zona nord), al fine di ottenere simulazioni più semplici e quindi anche più veloci dal punto di vista computazionale.

Come descritto nel paragrafo 5.2, il livello piezometrico è influenzato dalle oscillazioni di marea. Studi precedenti, svolti da Falkland nel 2008, hanno permesso di valutare i tempi di risposta della falda alle variazioni di marea sia presso il Topside che lungo il Bottomside.

Per valutare i parametri idrogeologici dell'isola, le prime simulazioni bidimensionali di flusso sono state condotte con lo scopo di ricreare le oscillazioni di marea e la relativa risposta della falda.



5.2.1 DOMINIO DI MODELLAZIONE E DISCRETIZZAZIONE

La modellazione bi-dimensionale è stata effettuata su due sezioni che attraversano l'isola di Nauru in direzione NE-SW (sezione AA') ed in direzione NW-SE (sezione CC'), le cui tracce sono indicate in Figura 16. Le due sezioni sono state scelte sulla base di alcune considerazioni: la sezione AA' passa per la possibile area pilota a nord dell'isola, caratterizzata dalla presenza di un numero relativamente elevato di pozzi con concentrazioni di TDS al di sotto del limite di 1500 mg/l e che sarà oggetto della modellazione 3D.

I domini di modellazione 2D si estendono per una lunghezza di 7500 m e raggiungono la profondità di 60 metri, risultando così costituiti da 3878 colonne, 1 riga e 17 layers per un totale di 65926 celle attive. La larghezza delle colonne è stata posta ovunque pari a 10 metri ma si è proceduto ad un infittimento più spinto (fino a meno di 1 m) nella zona costiera. La griglia è stata infittita, per le due sezioni, anche in corrispondenza di alcuni piezometri (S1, E2, e T2) utilizzati per il monitoraggio dei livelli in campo e come target per la calibrazione del flusso (Figura 25): i valori di carico idraulico misurati nei piezometri sono stati confrontati con quelli simulati negli stessi punti dal modello.

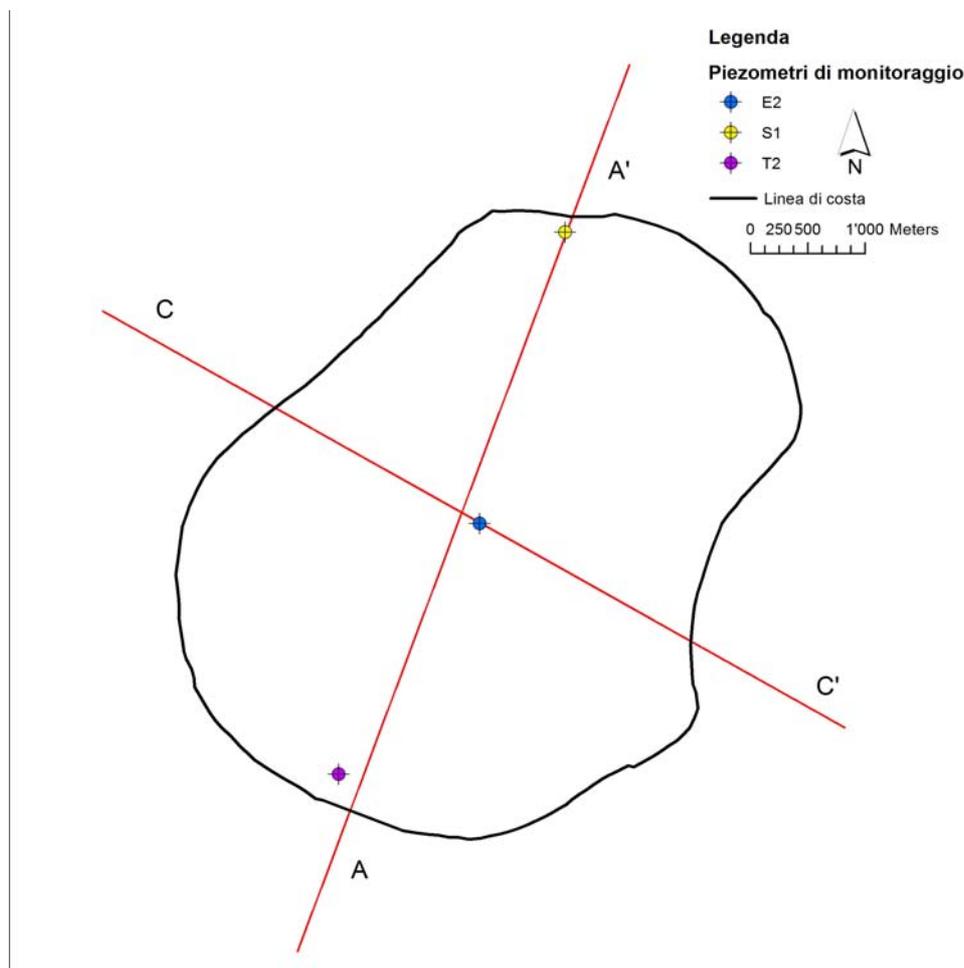


Figura 16 - tracce delle sezioni e punti di monitoraggio utilizzati nella calibrazione

I 17 layers hanno dimensioni crescenti con la profondità (Tabella 5) e l'incremento di spessore tra i vari layers rispetta sempre il fattore m moltiplicativo di 1.5; per rappresentare la superficie topografica sono stati utilizzati i valori di quota derivanti dal Modello Digitale del Terreno (DTM). Le due sezioni si presentano quindi come mostrato in Figura 17.

Tabella 5 – profondità e spessori dei layers del modello bi-dimensionale

Layer	Profondità	Spessore
1	-1	
2	-1.5	0.5
3	-2	0.5



4	-2.7	0.7
5	-3.75	1.05
6	-5.25	1.5
7	-7.5	2.25
8	-10	2.5
9	-12.5	2.5
10	-15	2.5
11	-18.5	3.5
12	-23.5	5
13	-30.5	7
14	-37.5	7
15	-45	7.5
16	-52.5	7.5
17	-60	7.5

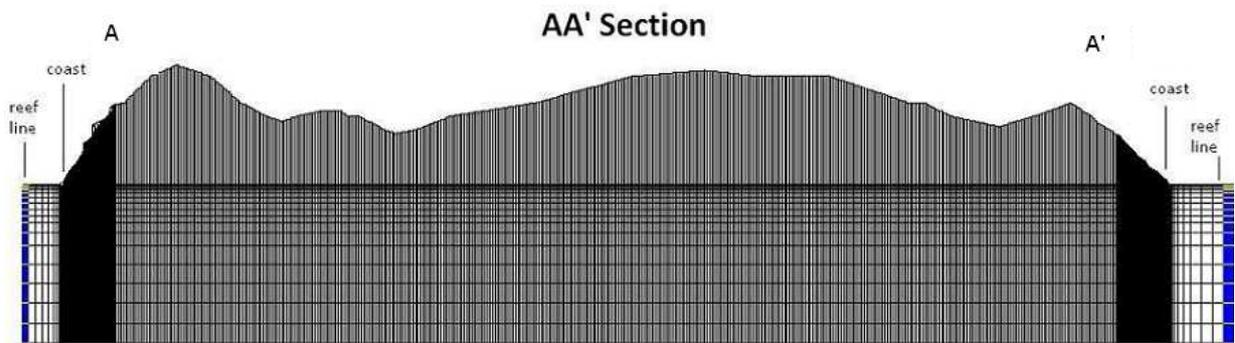


Figura 17 – griglia di modellazione per la sezione AA'

5.2.2 CONDIZIONI AL CONTORNO

Alle due estremità delle sezioni sono state assegnate le condizioni al contorno di carico al fine di rappresentare l'oceano: tali condizioni sono state attribuite alle celle del primo layer rappresentanti il mare e lungo il fondale sugli altri layers, in modo da rappresentare il graduale approfondimento del fondo marino fino alla fine del reef dopo il quale si ha la scarpata, come mostrato in Figura 18.

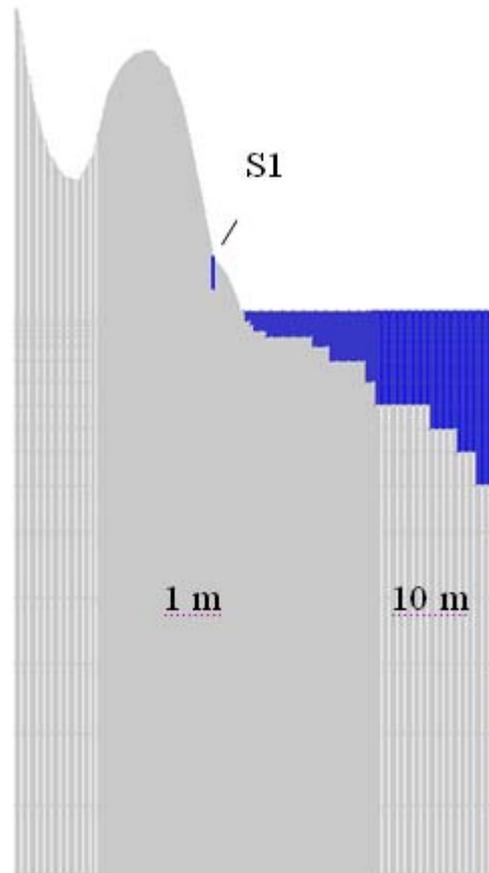


Figura 18 - Condizioni al contorno di carico (il blu) in prossimità della linea di costa

Per ridurre i tempi di calcolo sono state svolte simulazioni di solo flusso nelle quali quindi è stata trascurata la concentrazione e la variazione di densità a questa legata. Per rappresentare però correttamente i carichi che si hanno in corrispondenza del mare, alle condizioni al contorno sono stati assegnati i "carichi equivalenti" calcolati in funzione della profondità a partire dalla relazione $h = \rho_f g (h_f - z)$, dove h è il carico equivalente assegnato ad una determinata profondità z , h_f rappresenta il carico di acqua dolce, ρ_f la densità dell'acqua dolce e g l'accelerazione di gravità.

In particolare, le misure delle variazioni di carico nei piezometri, effettuate con un datalogger da Falkland nel 2008, erano state condotte nei giorni 9-11 Giugno per E2 e 28-31 Luglio per S1; il numero di dati disponibili quindi è molto elevato come dimostra la curva di risposta della falda alle oscillazioni mareali del piezometro E2 (Figura 19).

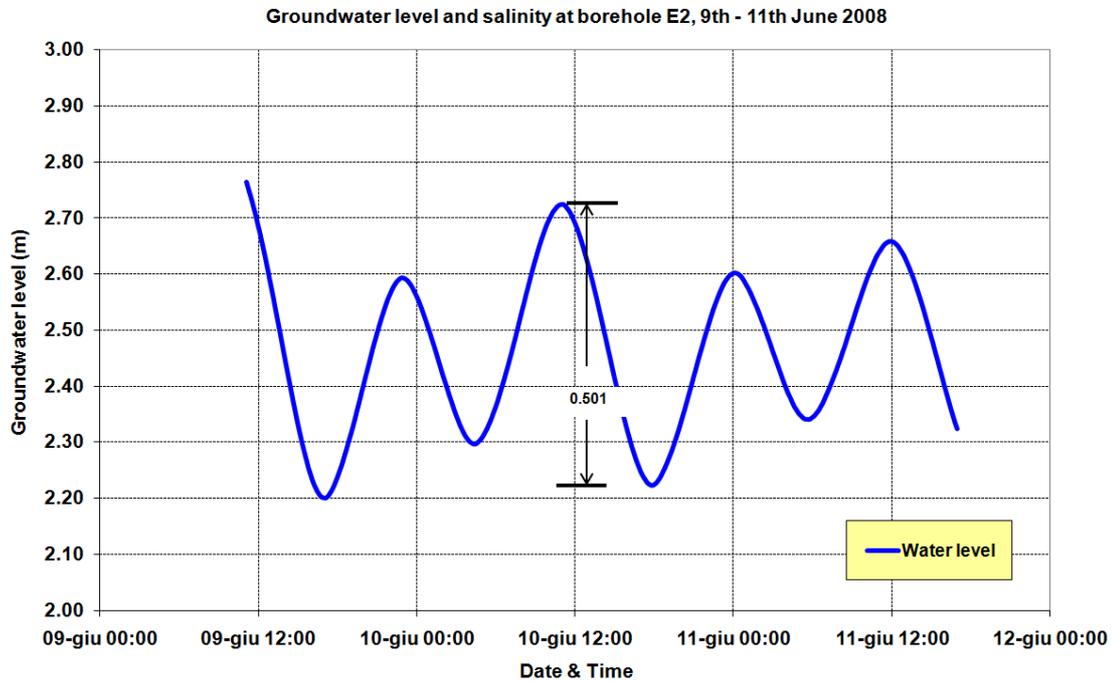


Figura 19 - oscillazione della tavola d'acqua presso il piezometro E2 (Falkland 2008)

Per simulare tali variazioni nel modello, si sono quindi recuperati i livelli di marea relativi agli stessi giorni (Commonwealth of Australia 2010, Bureau of Meteorology) ed è stata operata la trasformazione di questi in carichi equivalenti che sono stati poi assegnati come condizione al contorno variabile nel tempo (Figura 20).

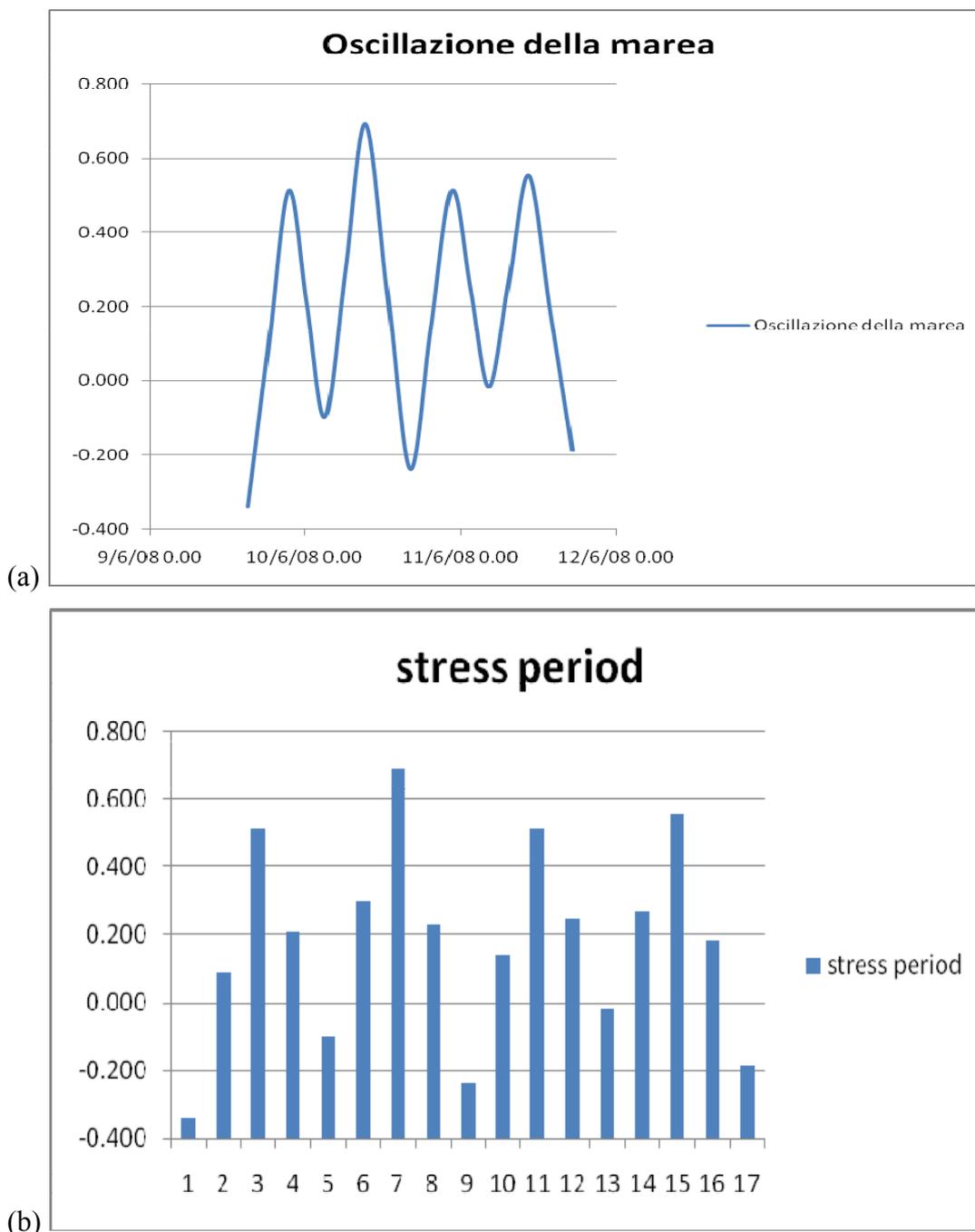


Figura 20 - Oscillazioni della marea ricavate dai dati del Bureau of Meteorology per il periodo dal 9 all' 11 Giugno (a) e relativa suddivisione in stress periods assegnati alla condizione di carico variabile del primo layer (b)

5.2.3 CONDIZIONI INTERNE E PARAMETRI IDROGEOLOGICI



Le prime simulazioni bidimensionali sono state svolte con i valori di conducibilità idraulica e ricarica superficiale reperiti in bibliografia (Ghassemi et al. 1996) e sintetizzati in Tabella 6.

Tabella 6 - Parametri idrogeologici utilizzati per le prime simulazioni

Parametro idrogeologico	Valore adottato		
Conducibilità idraulica (K_x, K_y, K_z)	900 m/d	900 m/d	18 m/d
Porosità	0.3		
Immagazzinamento e Specific Yield (S_s, S_y)	0.0003 m ⁻¹	0.3 m ⁻¹	

5.2.4 CALIBRAZIONE E RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

In seguito alle osservazioni delle stratigrafie e si è deciso, per meglio rappresentare le condizioni idrogeologiche dell'isola, di distinguere due zone differenti di conducibilità idraulica: l'area costituita dai calcari dolomitici del Topside e l'area dei sedimenti sciolti del Bottomside come mostrato in Figura 21.

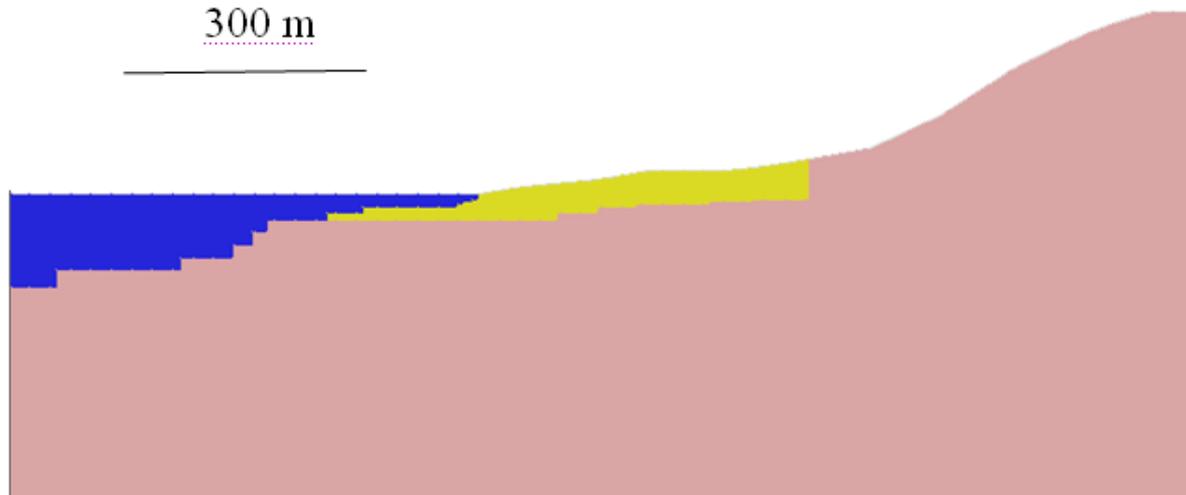


Figura 21 - Distribuzione della idrogeologiche conducibilità idraulica in prossimità della zona di costa, in giallo l'area del Bottomside e in rosa il Topside. In blu le condizioni al contorno rappresentanti il mare.

In funzione dei risultati delle prime simulazioni, per simulare correttamente la risposta della falda alle oscillazioni di marea, sono stati modificati anche i valori di porosità, coefficiente d'immagazzinamento e specific yield come mostrato in Tabella 7.

Tabella 7 - Parametri idrogeologici utilizzati nelle simulazioni 2D

Parametro	area	Valori
Conducibilità idraulica (m/day)	TopSide	780
	BottomSide	44
Coefficiente di immagazzinamento	TopSide	0.00001
	BottomSide	0.00001
Specific yield	TopSide	0.0015
	BottomSide	0.01

Le modifiche effettuate ai parametri idrogeologici hanno permesso di ottenere una buona corrispondenza tra i dati simulati e quelli osservati nel piezometro E2 (Figura 22): il residuo medio risulta infatti pari a 0.02 metri, mentre il residuo massimo è di 0.05 metri. Ottimi risultati sono stati anche raggiunti nei piezometri S1 e T2 (Figura 23 e Figura 24).

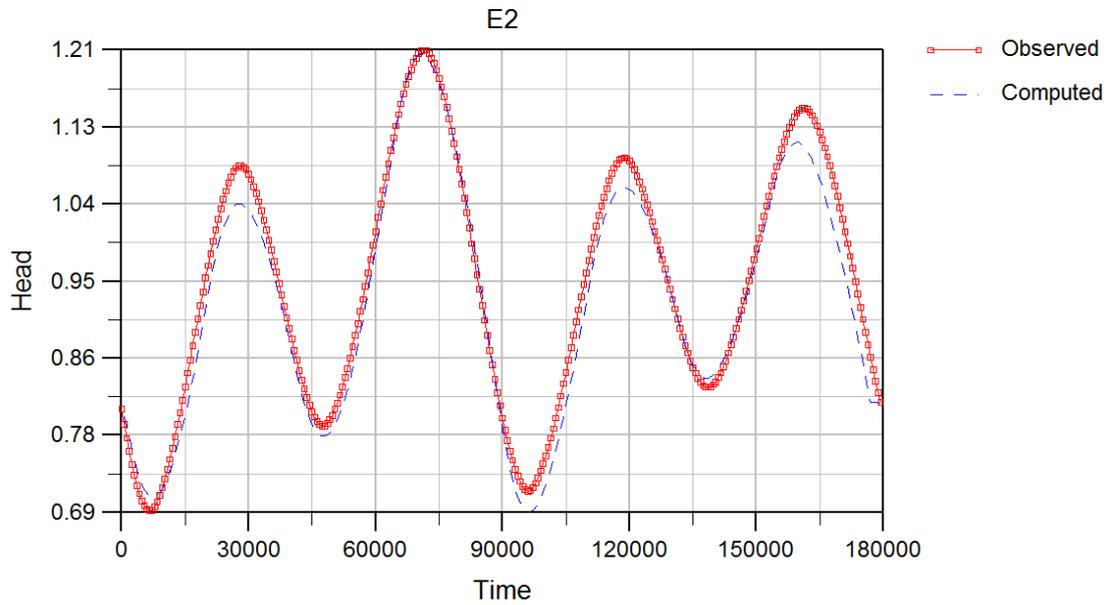


Figura 22 - Confronto tra i dati misurati e quelli simulati nel piezometro E2

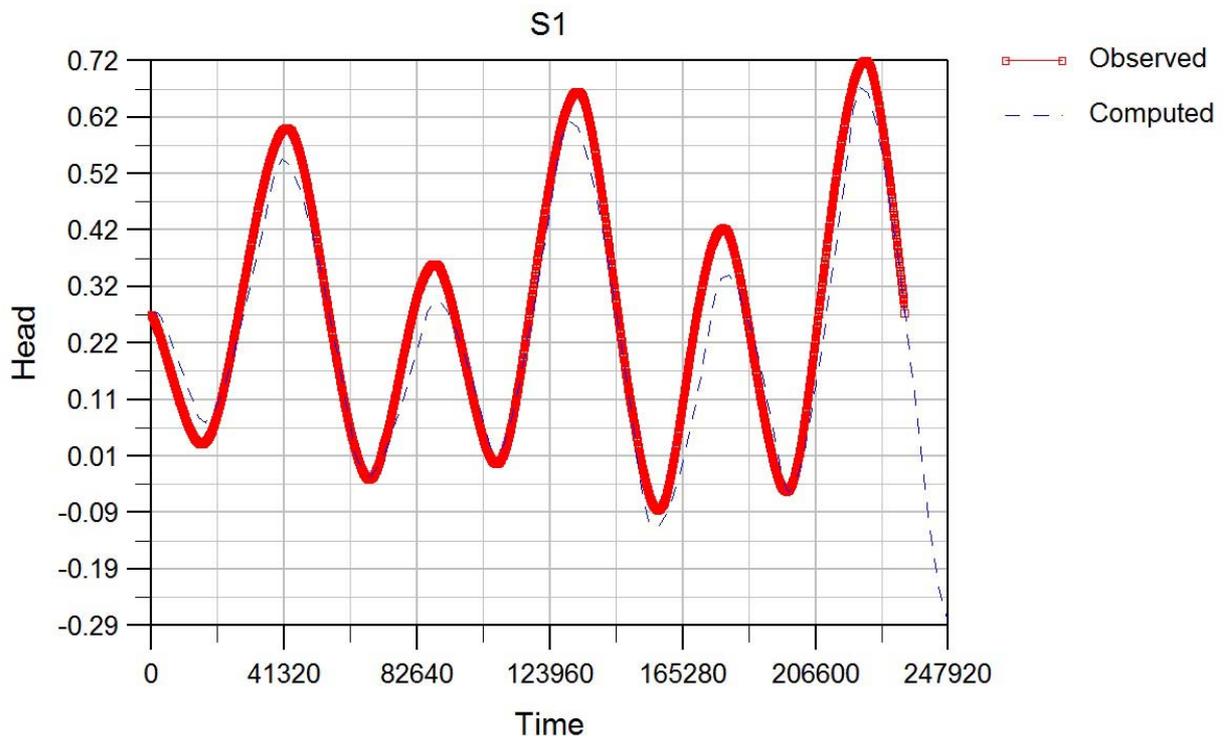


Figura 23 - Confronto tra i dati misurati e quelli simulati nel piezometro S1

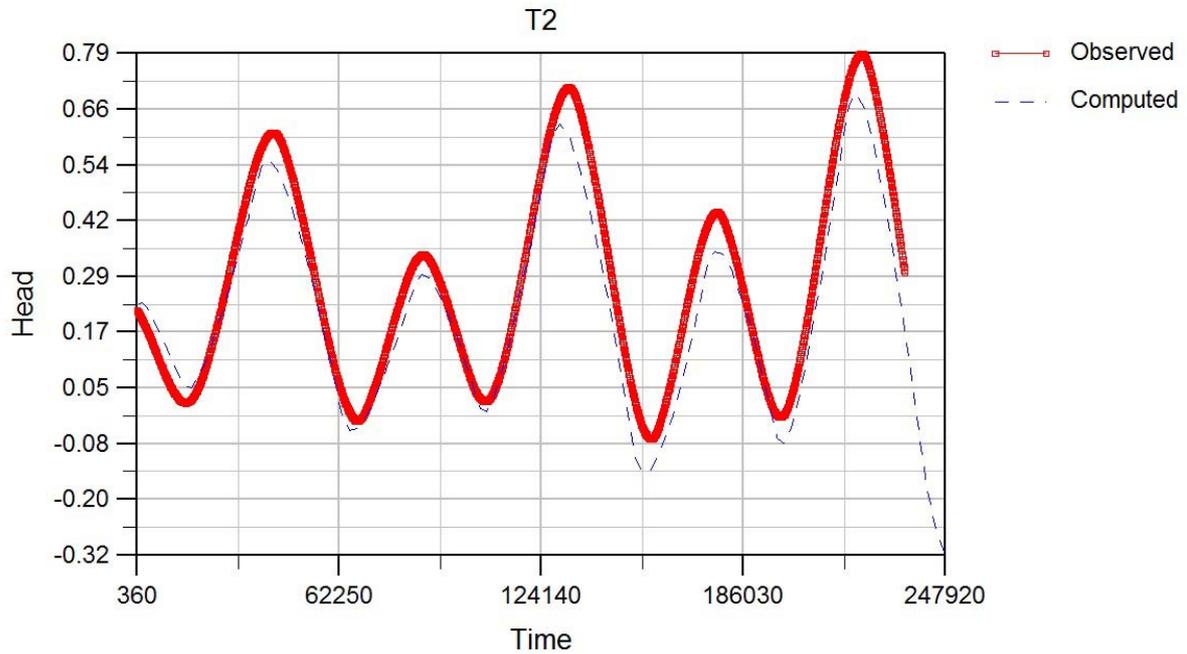


Figura 24 - Confronto tra i dati misurati e quelli simulati nel piezometro T2

Le simulazioni bi-dimensionali sono servite, come già evidenziato, come punto di partenza per la modellazione tri-dimensionale in quanto hanno permesso al modellista di acquisire sensibilità nelle simulazioni e nella gestione dei parametri idrogeologici e di comprendere come questi influenzino la distribuzione dei carichi idraulici all'interno dell'isola.

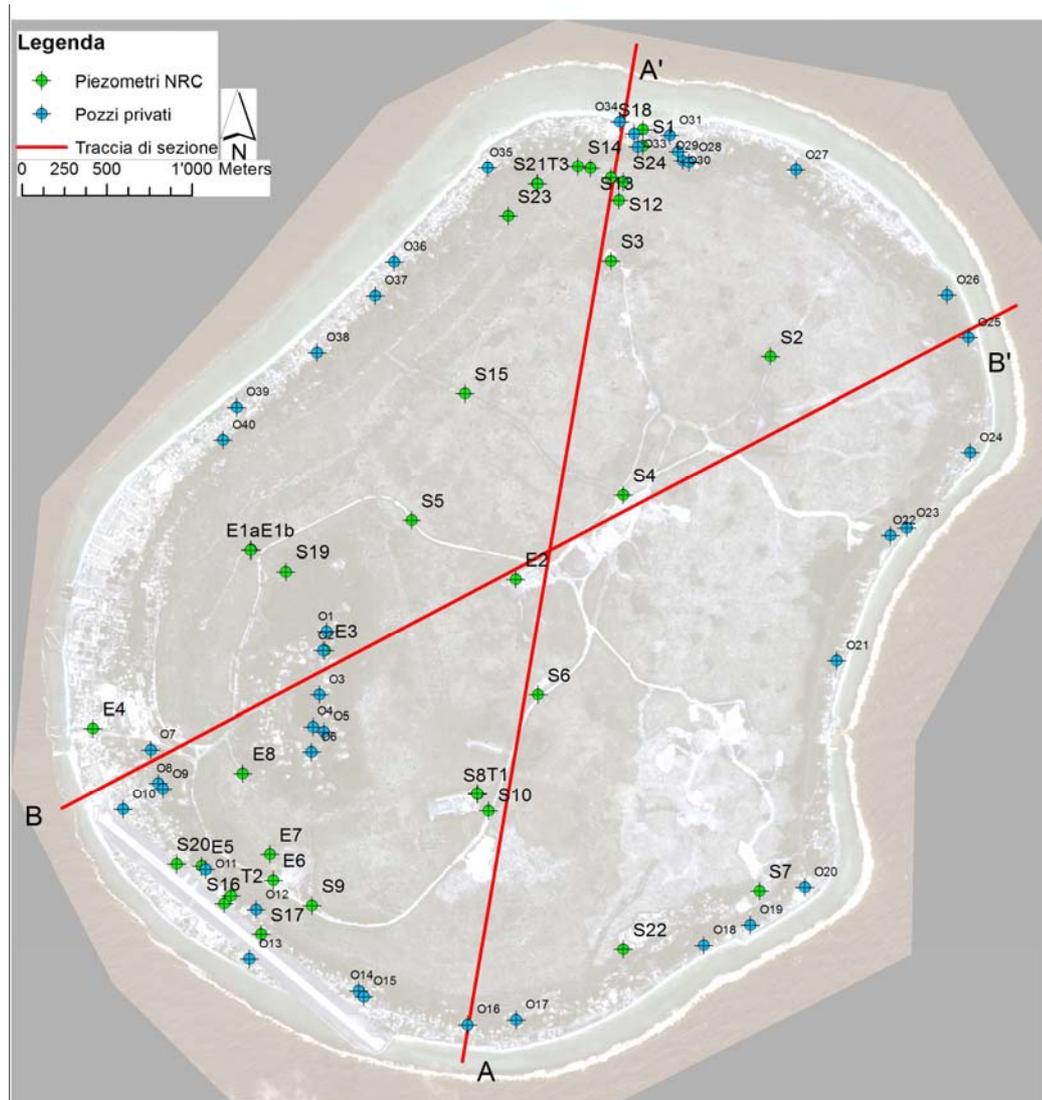


Figura 25 - Tracce delle sezioni rappresentate nella simulazione 2D e posizione dei pozzi presenti sull'isola (O: pozzi domestici utilizzati per monitoraggio, T: pozzi sperimentali per prove di pompaggio, E: pozzi per il monitoraggio della contaminazione della falda, S: pozzi per il monitoraggio della salinità, D: pozzi richiesti da NRC per il rifornimento di acqua salmastra)

5.3 Simulazioni 3D

Osservando la carta della distribuzione dei pozzi di estrazione e monitoraggio dell'isola di Nauru è possibile comprendere che lo sfruttamento maggiore della falda si ha in prossimità della costa, ove risiede la popolazione (unica eccezione la zona della Buada Lagoon a sud-ovest dell'isola). In particolare, lungo la costa sono posti 64 pozzi di estrazione (su 106 totali);



secondo le misure effettuate nei pozzi di monitoraggio e fornite dal Governo di Nauru, nella maggior parte di questi pozzi la conducibilità elettrica è nettamente superiore al valore di 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, limite di potabilità indicato da W.H.O.. La sola eccezione riguarda la costa nord dell'isola, nei pressi del distretto di Anetan ed Ewa (Figura 26), dove la misura della conducibilità elettrica nei pozzi di monitoraggio multilivello S1 (5 pipes) e S18 (4 pipes) rileva valori che si mantengono in maniera costante al di sotto del limite di 2200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nelle pipes più superficiali, mostrando una profondità della lente d'acqua dolce variabile tra i 6 m di Giugno 2008 fino agli oltre 10 m di Aprile 2010 (Figura 27 e Figura 28), a differenza degli altri pozzi di monitoraggio costieri, come ad esempio S20 situato a Sud-Ovest (Figura 29).

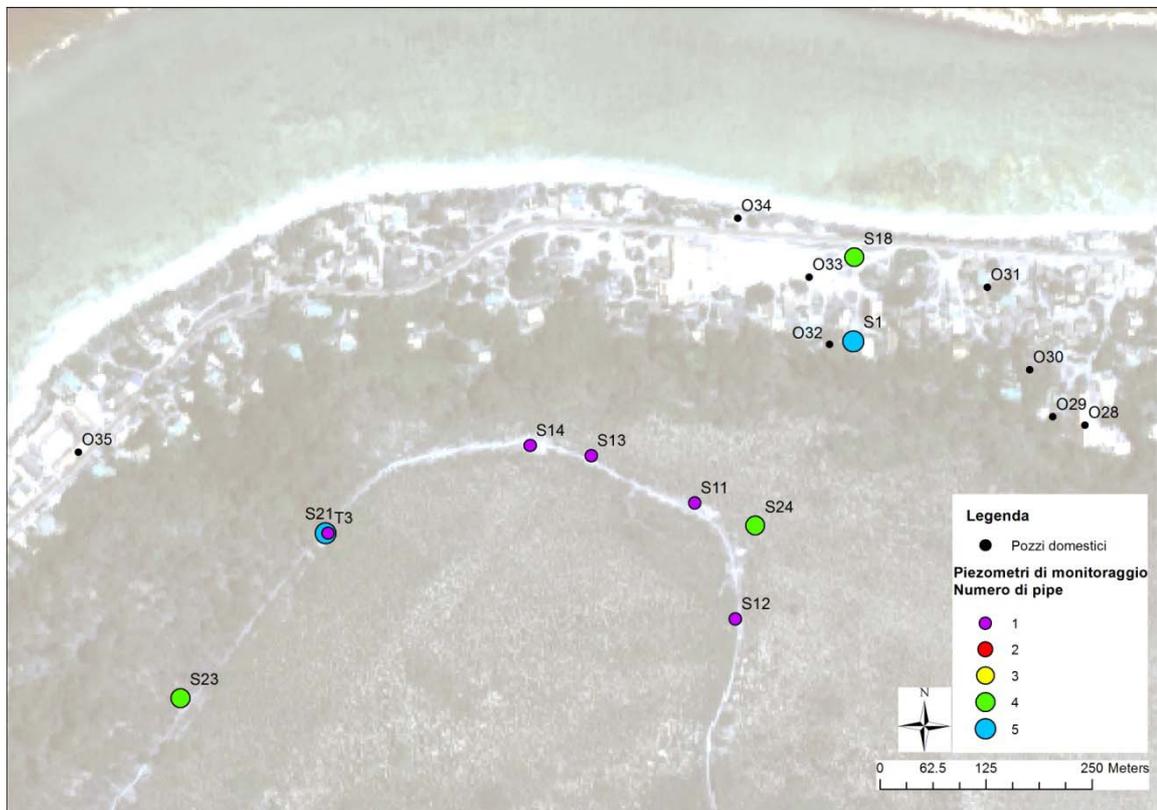


Figura 26 - Pozzi di estrazione domestici (O) e piezometri (S) nei pressi dei distretti di Anetan e Ewa

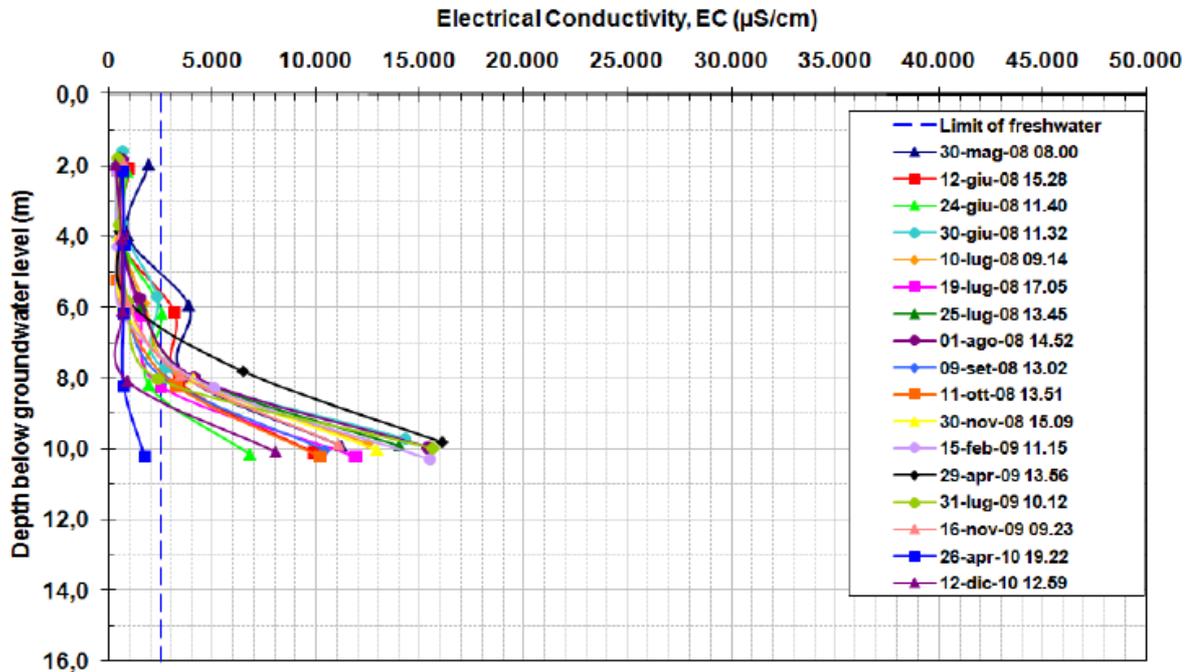


Figura 27 - Misure di conducibilità elettrica lungo la profondità del pozzo di monitoraggio S1

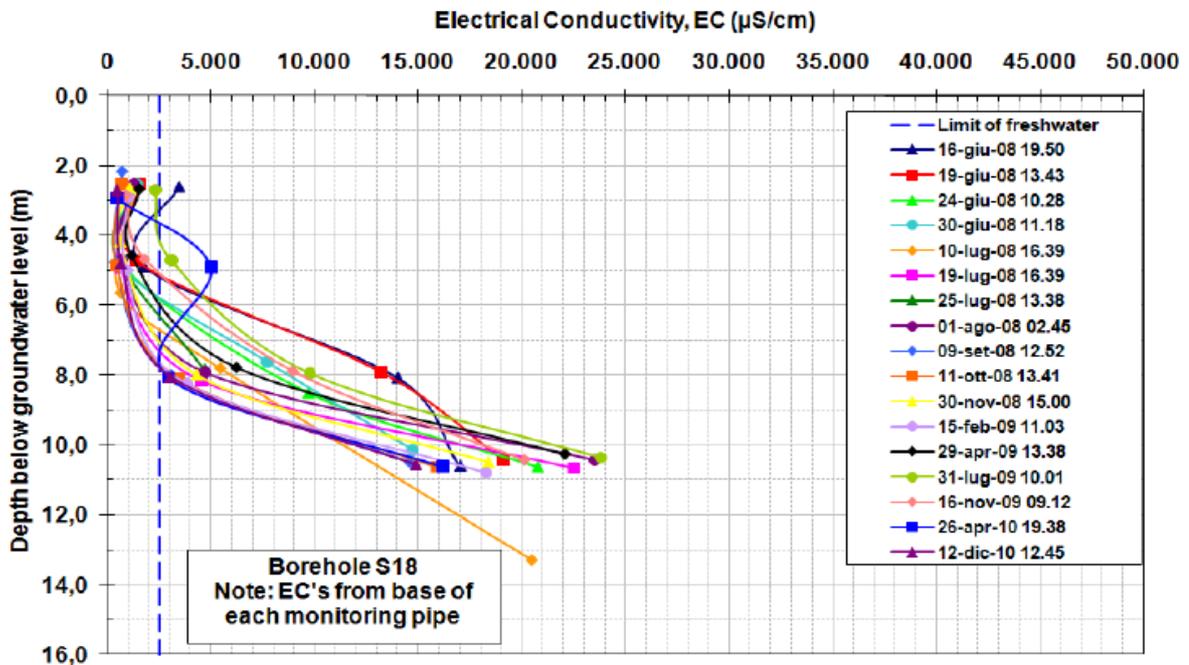


Figura 28 - Misure di conducibilità elettrica lungo la profondità del pozzo di monitoraggio S18

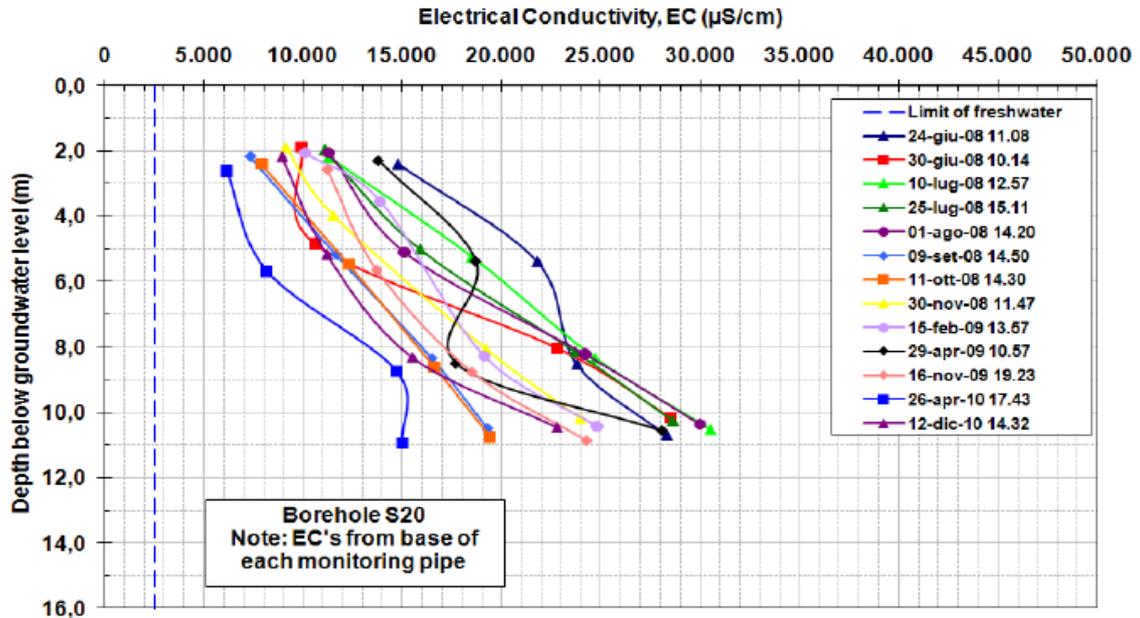


Figura 29 - Misure di conducibilità elettrica lungo la profondità del pozzo di monitoraggio S20

La zona a nord dell'isola, che presenta quindi la maggiore disponibilità di acqua dolce anche nei periodi più siccitosi, è stata scelta come area di studio pilota. Il modello 3D rappresenta uno spicchio dell'isola al centro del quale si trova posta la sezione AA', mentre la BB' lo delimita a sud-est (Figura 30). La calibrazione è stata condotta al fine di rappresentare in maniera accurata il flusso idrico e la concentrazione di sali rilevati durante la campagna di caratterizzazione del 16 Novembre 2009 (SOPAC, dati non pubblicati).

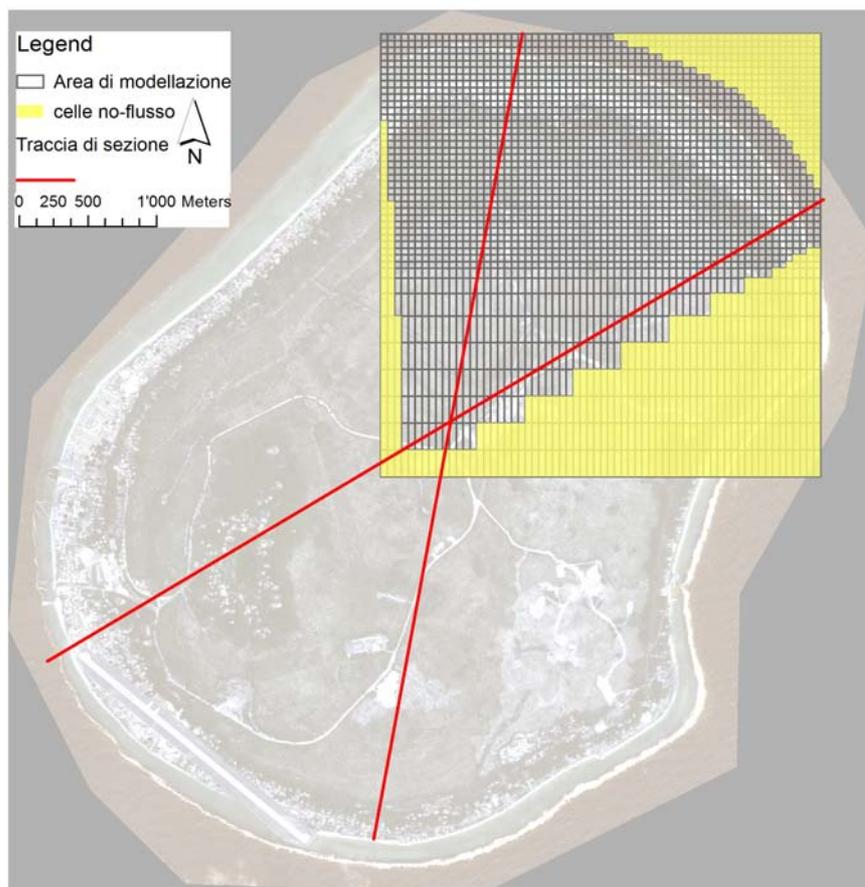


Figura 30 - Delimitazione dell'area del modello 3D (area trasparente con griglia)

5.3.1 DISCRETIZZAZIONE ORIZZONTALE E VERTICALE

In base ai risultati delle simulazioni 2D precedentemente condotte, la griglia di discretizzazione tridimensionale è stata costruita in modo da ottimizzare tempi di calcolo ed il livello di accuratezza dei risultati ed risulta costituita da 44 righe e 64 colonne (Figura 31). La dimensione delle righe varia dai 50 m della zona costiera Nord, dove la discretizzazione è più fitta in modo da avere una maggiore precisione dei risultati, fino ai 200 m nella zona Sud; la variazione della larghezza delle celle è stata effettuata in base al criterio secondo il quale le dimensioni di colonne/righe adiacenti devono differire al massimo di un fattore moltiplicativo di 1,5; la spaziatura delle colonne è stata imposta uniforme e pari a 50 m.



Per rappresentare la porzione dell'isola che si è deciso di modellizzare sono state assegnate lateralmente le condizioni di No Flusso (in nero in Figura 31) parallele al flusso idrico sotterraneo che, come detto in precedenza, risulta radiale e diretto verso l'oceano. Le celle sulle quali tale condizione è stata assegnata non risultano attive e sono ovviamente le stesse su ogni layer del dominio.

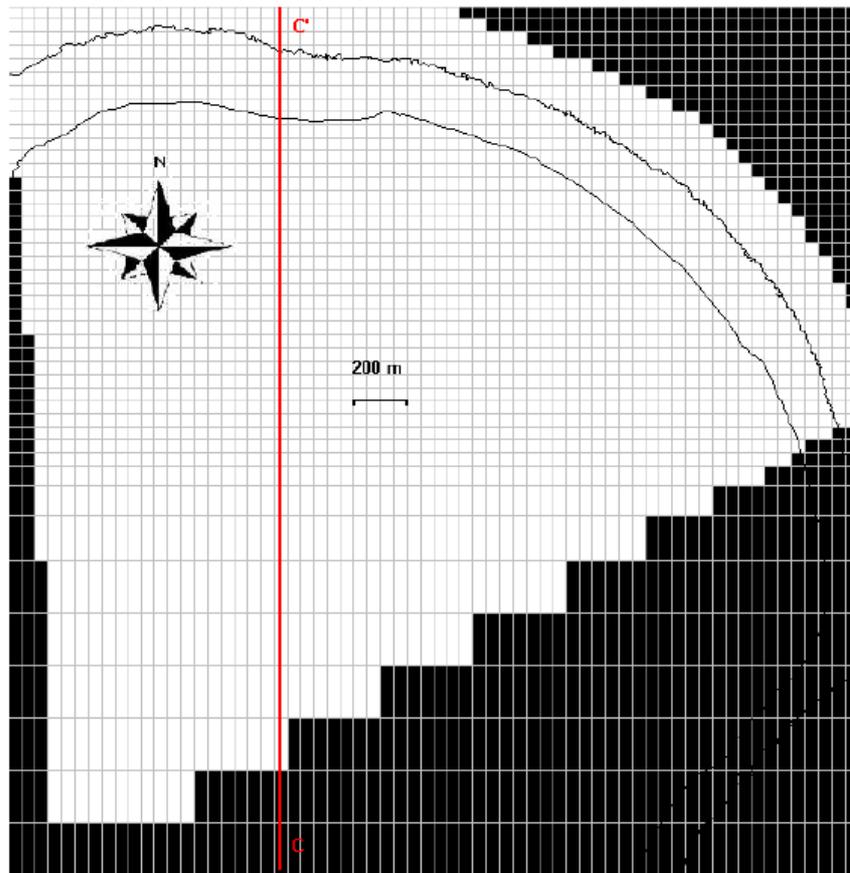


Figura 31 - Discretizzazione orizzontale della griglia di modellazione e celle inattive (No Flusso), in nero. La linea rossa è la traccia della sezione CC' che verrà sempre raffigurata nel seguito.

La discretizzazione verticale è stata modificata rispetto a quella utilizzata nei modelli bi-dimensionali per evitare che un numero eccessivo di celle rendesse la simulazione particolarmente onerosa dal punto di vista computazionale. In particolare i layers sono stati ridotti a 12, sempre di spessore crescente andando verso il fondo, ma ora si arriva ad una profondità di circa 70 m al fine di simulare l'avanzamento del cuneo di intrusione salina fino



alla zona più interna del dominio di modellazione. La scelta di rappresentare in maniera più fitta i layers superficiali è dovuta al fatto che i dati di concentrazione osservati nei piezometri di monitoraggio si trovano ad una profondità massima di 10 m rispetto al livello medio del mare. Lo spessore del primo layer è variabile in base alla quota della superficie topografica che è stata ricreata attraverso l'utilizzo di un file DTM il quale è stato poi importato ed interpolato dal codice di calcolo. Una sezione trasversale (CC') che mostra la discretizzazione verticale della griglia è riportata in Figura 32.



Figura 32 - Sezione trasversale CC'

5.3.2 CONDIZIONI AL CONTORNO, CONDIZIONI INTERNE E TARGET

Le condizioni di carico e concentrazione costanti sono state assegnate, per quanto riguarda il primo layer, alle celle rappresentanti il mare, seguendo l'andamento della linea di costa (Figura 33). Le stesse condizioni sono state poste, nei layers sottostanti al primo, seguendo l'andamento del fondale; al di là della barriera corallina le condizioni di carico e concentrazione costante sono state assegnate su tutta la profondità (Figura 34). Il carico idraulico attribuito a tali celle è la quota media dell'oceano espresso rispetto al piano di riferimento adottato da Jacobson e Hill (1993) per l'isola di Nauru (livello medio mare 1,352 m sopra il datum dell'isola) mentre la concentrazione assegnata risulta pari a quella dell'acqua dell'oceano Pacifico, ovvero 35,7 kg/m³ (Ghassemi et al., 1996).

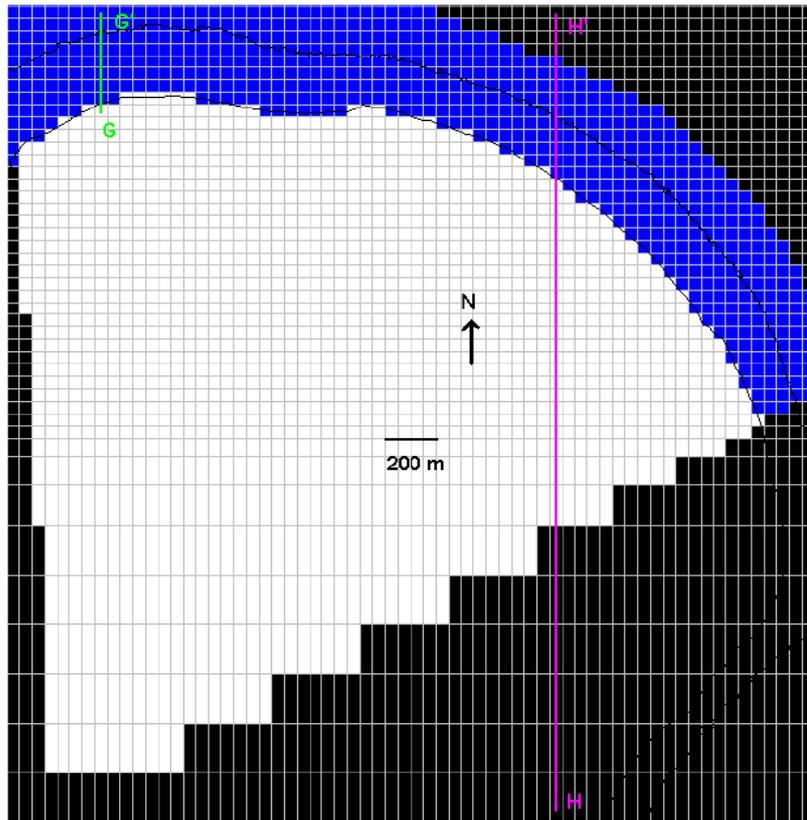


Figura 33 - Condizioni di carico e concentrazione costanti nel primo layer (blu). In verde è indicata la traccia della sezione GG' rappresentata in Figura 34 mentre in fucsia è la traccia della sezione HH'

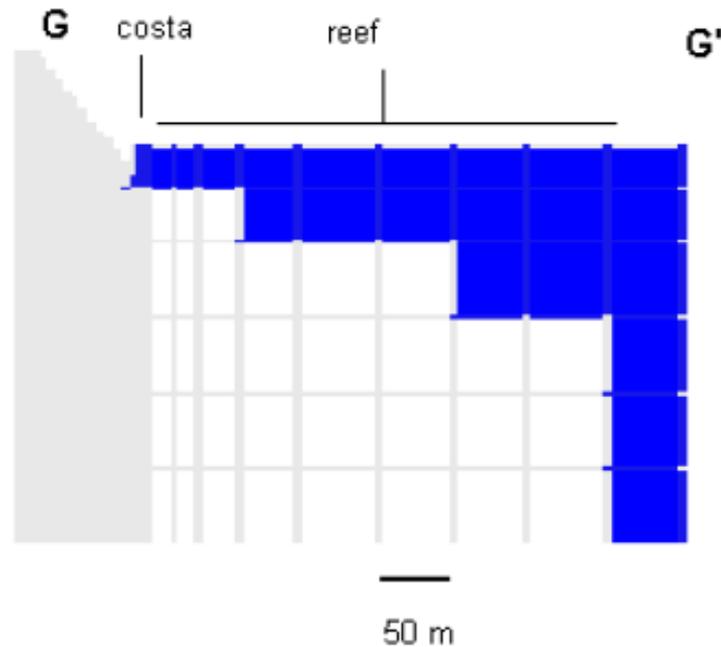


Figura 34 - Sezione trasversale GG' con evidenziate le condizioni di carico e concentrazione costanti (blu)

I parametri idrogeologici sono stati calibrati confrontando i valori di carico idraulico e concentrazione simulati con quelli misurati in alcuni pozzi di monitoraggio presenti nell'area del modello. In particolare, valutando l'attendibilità delle misure di quota della boccapozzo, carico idraulico e conducibilità elettrica, si è deciso di adottare i target elencati in Tabella 8 e disposti nell'area del modello come rappresentato in Figura 35.



Tabella 8 - Targets utilizzati in fase di calibrazione con indicazione delle coordinate (UTM zona 58 Sud) e del layer corrispondente alla profondità di rilevamento del dato di salinità

Nome	Coordinata X (m)	Coordinata Y (m)	Layer
S1a	714929	9941486	2
S1b	714929	9941486	3
S1c	714929	9941486	4
S1d	714929	9941486	5
S1e	714929	9941486	6
S2a	714929	9941486	2
S2b	714929	9941486	3
S3	714929	9941486	2
S4	714929	9941486	2
S11	714929	9941486	1
S12	714929	9941486	4
S14	714929	9941486	1
S15	714929	9941486	2
S18a	714929	9941486	2
S18b	714929	9941486	3
S18c	714929	9941486	5
S18d	714929	9941486	6
E2	714929	9941486	2

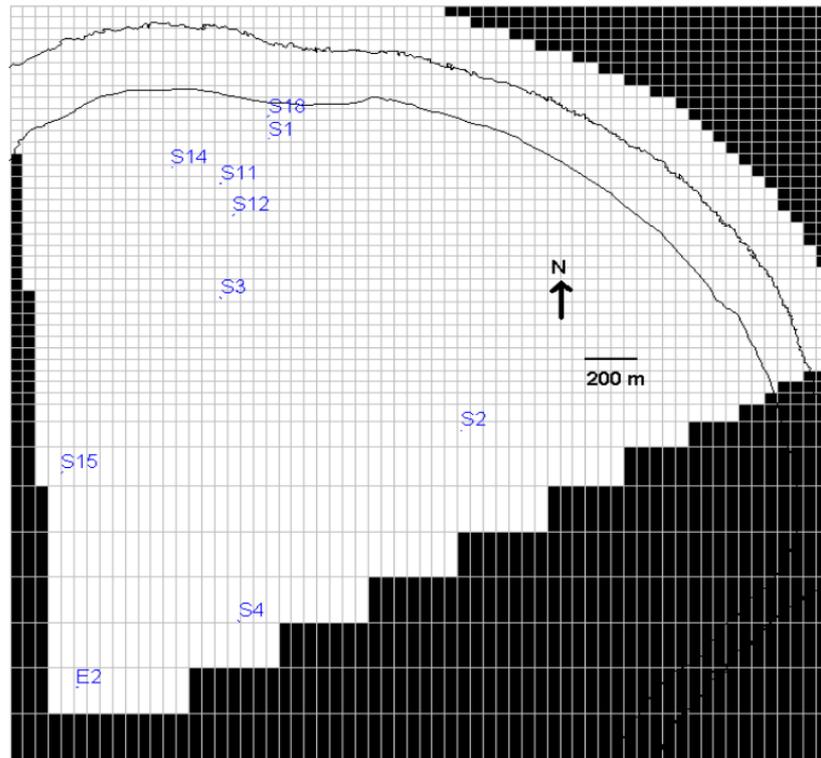


Figura 35 - Posizione dei target all'interno del dominio di modellazione

I punti di monitoraggio S1, S18 e S2 hanno misure di concentrazione a diverse profondità essendo pozzi multilivello mentre i pozzi di monitoraggio S15, S4 e E2, che sarebbero in realtà poco oltre i confini del dominio, sono stati comunque inseriti nel modello in modo da avere delle misure utili alla calibrazione anche per la parte più interna dell'area rappresentata. In generale, per Novembre 2009 si nota una concentrazione relativamente elevata in quasi tutti i target: come si può osservare in Figura 36, la lente d'acqua dolce è presente pressoché esclusivamente nell'area costiera di Anetan, nei pozzi S1 e S18, con profondità che varia da un minimo di circa 5 m in S18 ad un massimo di circa 8 m in S1.

Come parametri di partenza per la calibrazione sono stati adottati, così come per il modello 2D, i valori utilizzati da Ghassemi et al. (1996). Questi sono stati poi modificati in fase di calibrazione anche in funzione dei nuovi dati che si avevano a disposizione in seguito alla campagna di caratterizzazione effettuata nel Novembre 2010. In particolare la conducibilità idraulica di una roccia carbonatica cavernosa, come la roccia calcarea carsificata dell'isola di



Nauru, è stata stimata intorno a 3500 m/d (Jacobson e Hill, 1993) mentre la porosità è stata assegnata pari a 0,14. Il rapporto tra conducibilità verticale e orizzontale è stato posto pari a 0,1.

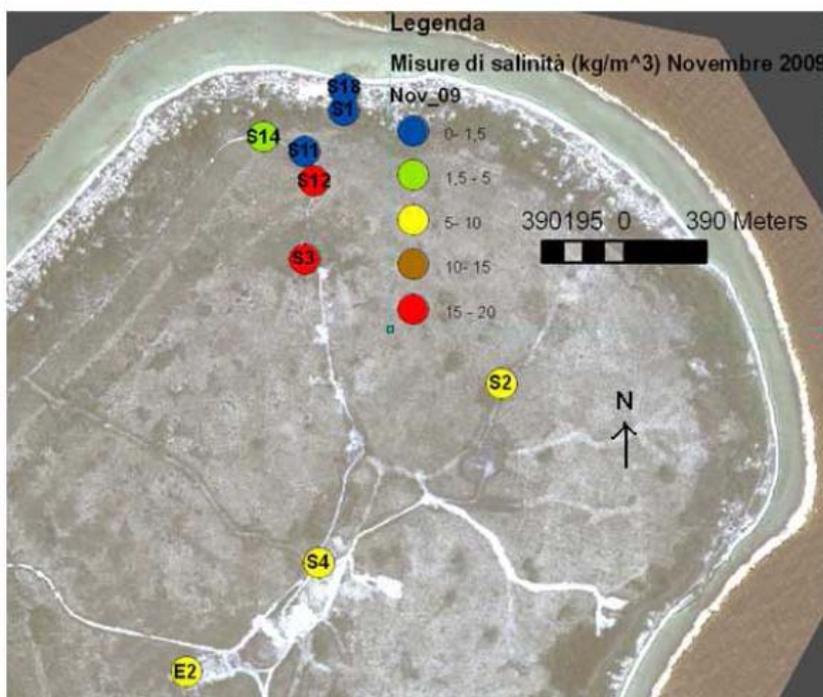


Figura 36 - Carta delle misure di salinità rilevate a Novembre 2009 nei target del dominio di modellazione (SOPAC, dati non pubblicati)

5.4 Calibrazione

Una prima calibrazione è stata condotta attraverso la rappresentazione della condizione statica "fotografata" durante la campagna di monitoraggio del Novembre 2009. Il processo di taratura, trattandosi di un modello densità dipendente, ha richiesto l'esecuzione di simulazioni in transitorio molto lunghe (durata 100 anni) nelle quali, si raggiunge la stazionarietà dei valori di carico idraulico e concentrazione approssimativamente intorno ai 70 anni.

Osservando i dati di precipitazione precedenti la campagna di misura di Novembre 2009, si è deciso di modificare la ricarica superficiale iniziale dedotta dal lavoro Ghassemi et al., 1996 (540 mm/y) utilizzando quella media misurata tra Dicembre 2008 e Novembre 2009, calcolata dal Governo di Nauru, pari a 590 mm/y (



Figura 37).

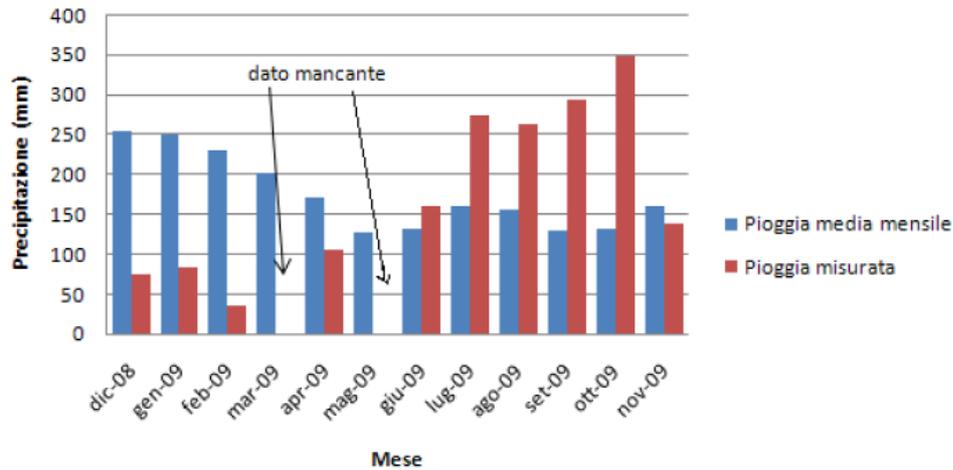


Figura 37 - Precipitazioni misurate mensili nell'anno precedente la campagna di misura di Novembre 2009 e confronto con i dati di precipitazione medie

Durante la fase di calibrazione è chiaramente emerso come modellisticamente fosse impossibile rappresentare i dati di conducibilità rilevati lungo la costa adottando un termine di ricarica uniforme su tutto il dominio di modellazione. Per tale ragione è stato introdotto lungo costa un termine di ricarica aggiuntivo che si ritiene essere legato agli scarichi di acqua dolce effettuati nel sottosuolo da parte dei residenti dell'area. I villaggi di Nauru non sono infatti dotati di un sistema fognario ed ogni abitazione scarica le acque in pozzi perdenti. Trovandosi la popolazione totalmente concentrata lungo il Bottomside, risulta evidente che nell'area esista un termine di ricarica aggiuntivo rispetto a quello naturale. Tale termine aggiuntivo, utilizzato dalla popolazione e poi scaricato nel sottosuolo, è costituito dalle acque osmotizzate ed in parte dalle acque di pioggia accumulate nei mesi precedenti a quelli siccitosi. Infatti, come riferisce il rapporto SOPAC di Aprile 2010, da parte delle persone che hanno accesso a pozzi d'estrazione a Nauru vi è un utilizzo medio di acqua per scopi non potabili pari a 114 l/d/p.c., di cui 94 l/d/p.c. provenienti da estrazione di acqua di falda e 20 l/d/p.c. da raccolta dell'acqua piovana e dall'impianto di desalinizzazione. Tuttavia, nei distretti di Aneatan e Ewa aree che fanno parte del dominio del modello (Figura 38), la popolazione avente accesso all'uso dei costituisce solo il 20% del totale. Per la restante parte è stato stimato un uso medio di acqua pari a 100 l/d/p.c., forniti dalla sola acqua piovana o dall'impianto di desalinizzazione. Parte di questa acqua venendo utilizzata e poi dispersa nel sottosuolo attraverso i pozzi neri costituisce



una ricarica aggiuntiva per il sistema idrico sotterraneo costiero. Al fine di calcolare il quantitativo aggiuntivo da utilizzarsi nel modello per i distretti di Ewa ed Anetan, è stato preso in considerazione il numero di persone (946) non aventi accesso ai pozzi rispetto a quello totale (1180 Nauru, 2007). Per i primi si è questi si è stimato in base al report SOPAC, che mediamente 17 l/d /p.c. vengano usati per scopi alimentari, mentre i restanti 83 l/d/p.c. sono destinati ad essere dispersi nel sottosuolo. Moltiplicando quest'ultimo valore per le 946 persone si è ottenuto un valore di ricarica aggiuntivo giornaliero pari a 79 m³/d che diviso per l'area totale dell'insediamento urbanizzato (area di circa 257500 m²) fornisce una ricarica annuale aggiuntiva pari a 110 mm/y.

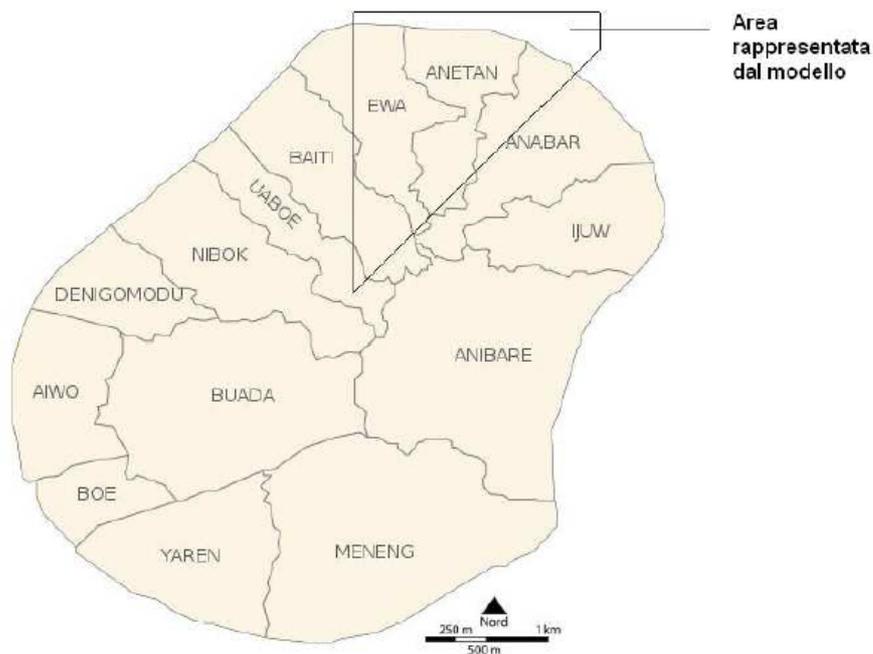


Figura 38 - Distretti di Nauru e area del modello

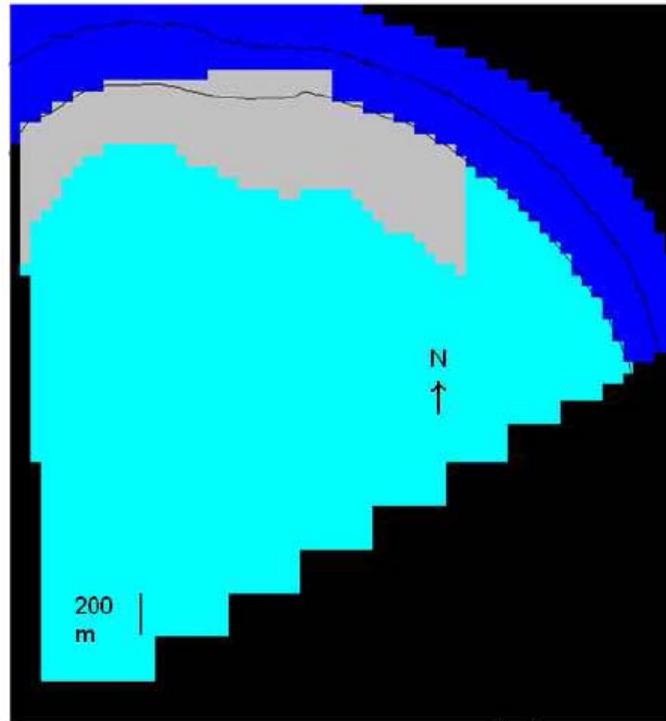


Figura 39 - Rappresentazione in pianta della zona con ricarica superficiale aggiuntiva (grigio) pari a 110 mm/y che viene sommata a quella di 590 mm/y assegnata uniformemente sul dominio di modellazione (azzurro)

Per quanto riguarda invece la distribuzione di permeabilità dai dati stratigrafici disponibili risulta come lungo il Bottomside , ed in particolare nella zona di Anetan, siano presenti dei sedimenti sabbiosi che ricoprono lo strato di roccia calcarea carsificata fino ad una profondità variabile tra 1 e 10 m: questi sedimenti sono stati probabilmente originati dall'erosione operata dagli agenti atmosferici e dal moto ondoso in seguito all'abbassamento del livello del mare avvenuto nell'ultima fase di formazione dell'isola che ha anche portato alla formazione della scarpata che divide il pianoro costiero dall'altopiano centrale dell'isola. Le diverse profondità a cui si ritrova lo strato sabbioso sono probabilmente dovute alla direzione della corrente oceanica. Questa configurazione del sottosuolo è stata quindi rappresentata attraverso l'utilizzo di due zone diverse di permeabilità e dispersività (Figura 40 e Figura 41): una conducibilità idraulica e dispersività più basse (ricavati da dati di letteratura e dalle simulazioni 2D), per rappresentare questo strato sabbioso nel pianoro costiero, assegnata sui vari layers in funzione della diversa profondità dei sedimenti, e una zona di conducibilità



idraulica e dispersività con valori simili a quelli calibrati da Ghassemi et al. (1996) il Topside e i calcari profondi in zona costiera (Figura 42).

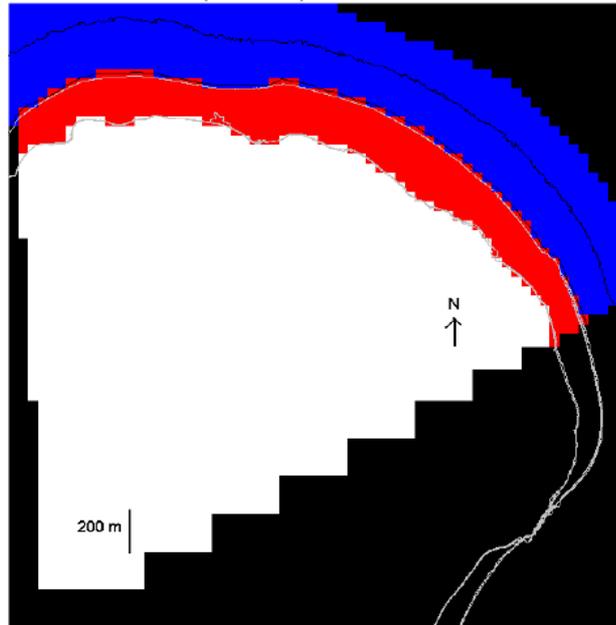


Figura 40 - Rappresentazione in pianta delle due zone a diversa conducibilità idraulica e dispersività (α) nel primo layer. In rosso lo strato sabbioso ($K_x=40$ m/d, $K_y=20$ m/d, $\alpha_x=5$, $\alpha_y=0.5$ e $\alpha_z=0.05$ m), in bianco la roccia calcarea ($K_x=1200$ m/d, $K_y=24$ m/d, $\alpha_x=20$, $\alpha_y=0.5$ e $\alpha_z=0.05$ m)

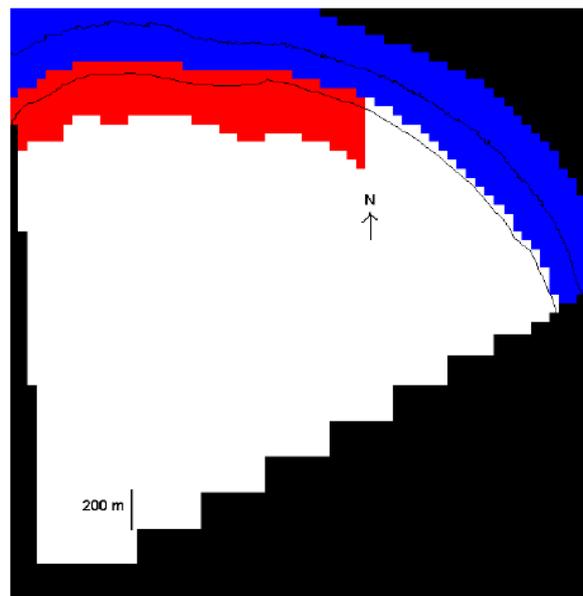


Figura 41 - Rappresentazione in pianta delle zone a diversa K e α nel secondo layer

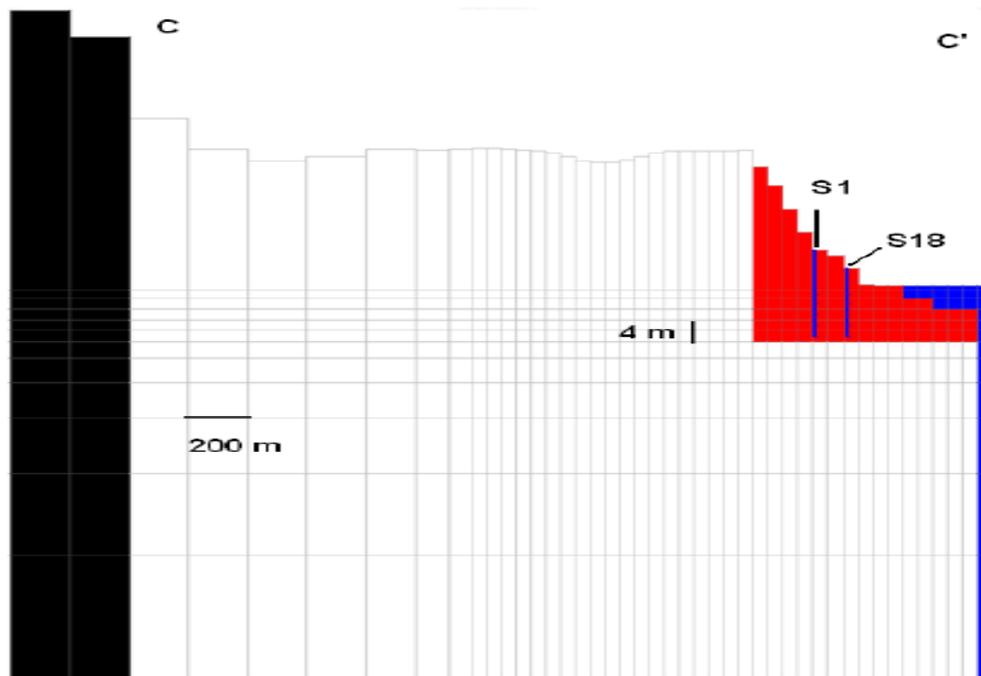


Figura 42 - Rappresentazione in sezione delle zone a diversa conducibilità idraulica e dispersività (sezione CC')

Attraverso queste modifiche nell'area costiera (piezometri S1 e S18) si è giunti ad un buon livello di calibrazione del modello rispetto ai valori misurati nel novembre 2009. Tuttavia la concentrazione risulta comunque sottostimata nella zona più interna del dominio di modellazione (piezometri E2 e S4) e nella zona di depressione contenente il piezometro S3. Quest'ultimo target, in particolare, si presenta sempre molto salato (17700 mg/l a Novembre 2009, 10700 mg/l di TDS ad Aprile 2010) anche in periodi di precipitazione intensa: si è pertanto ipotizzato che i valori elevati di salinità fossero dovuti al fatto che il piezometro si trova in una zona che un tempo era una laguna e che quindi potrebbe essere caratterizzata dalla presenza di sedimenti più salati, rispetto a quelli delle aree circostanti, che spiegherebbero i valori elevati di conducibilità elettrica registrati nelle acque di quella zona. Al fine di riprodurre questa condizione è stata assegnata, in corrispondenza della paleo laguna, una zona con condizioni di concentrazione costante di 17,7 kg/m³ (misura di S3 a Novembre



2009) fino al 4° layer (Figura 43). Una nuova campagna di caratterizzazione che si effettuerà con ogni probabilità nel settembre 2011, verrà utilizzata per trovare riscontro di quanto ipotizzato e giustificare quindi pienamente l'utilizzo di tale condizione al contorno.

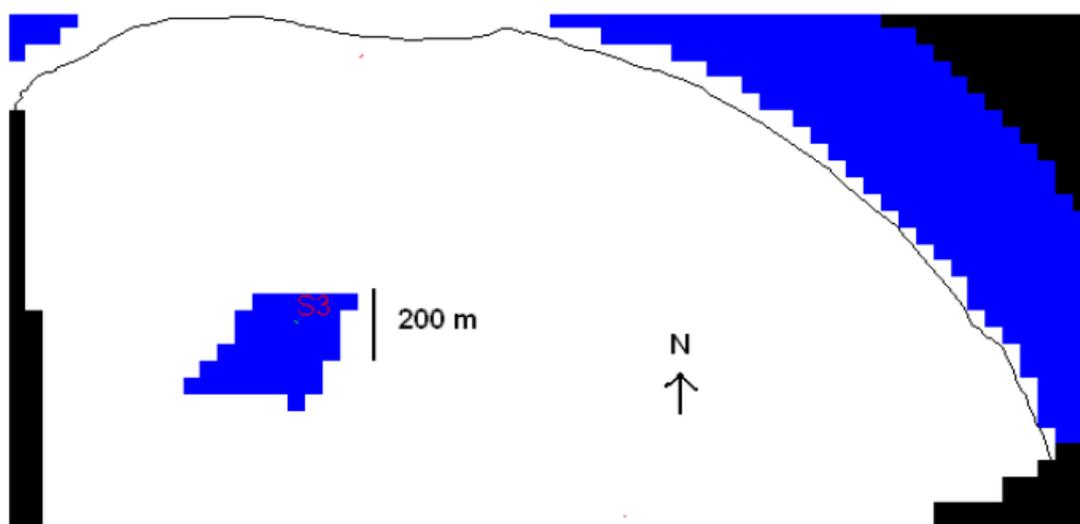


Figura 43 - Celle a concentrazione costante (blu) nell'area della paleo laguna nei pressi del pozzo S3

Per quanto riguarda invece la zona interna dove sono posizionati i target S4 e E2, durante la calibrazione si è notato una sensibilità maggiore alla variazione di ricarica: infatti, durante periodi secchi questi pozzi tendono ad avere misure di concentrazione molto elevate mentre, al contrario, in fase di precipitazione intensa, si registrano valori bassi di salinità. Jacobson e Hill (1993) riportano che fino a 55 m di profondità rispetto al livello del mare si ha in questa zona un intenso fenomeno di carsismo, ma ovviamente risulta praticamente impossibile conoscere la reale posizione dei vari condotti carsici visto soprattutto il numero esiguo di sondaggi realizzati dagli stessi studiosi (Jacobson e Hill, 1988). Per tale motivo si è deciso di creare nell'area più interna una zona ad alta dispersività longitudinale e verticale (coefficienti di dispersività longitudinale, trasversale e verticale= 65, 0.5 e 0.65 m), come mostrato in Figura 44 e Figura 45, in modo da riprodurre almeno gli effetti di un possibile fenomeno di carsismo locale.



Figura 44 - Rappresentazione in pianta della zona ad alta dispersività (in rosso) nella zona più interna del dominio di modellazione, in prossimità dei target E2 e S4

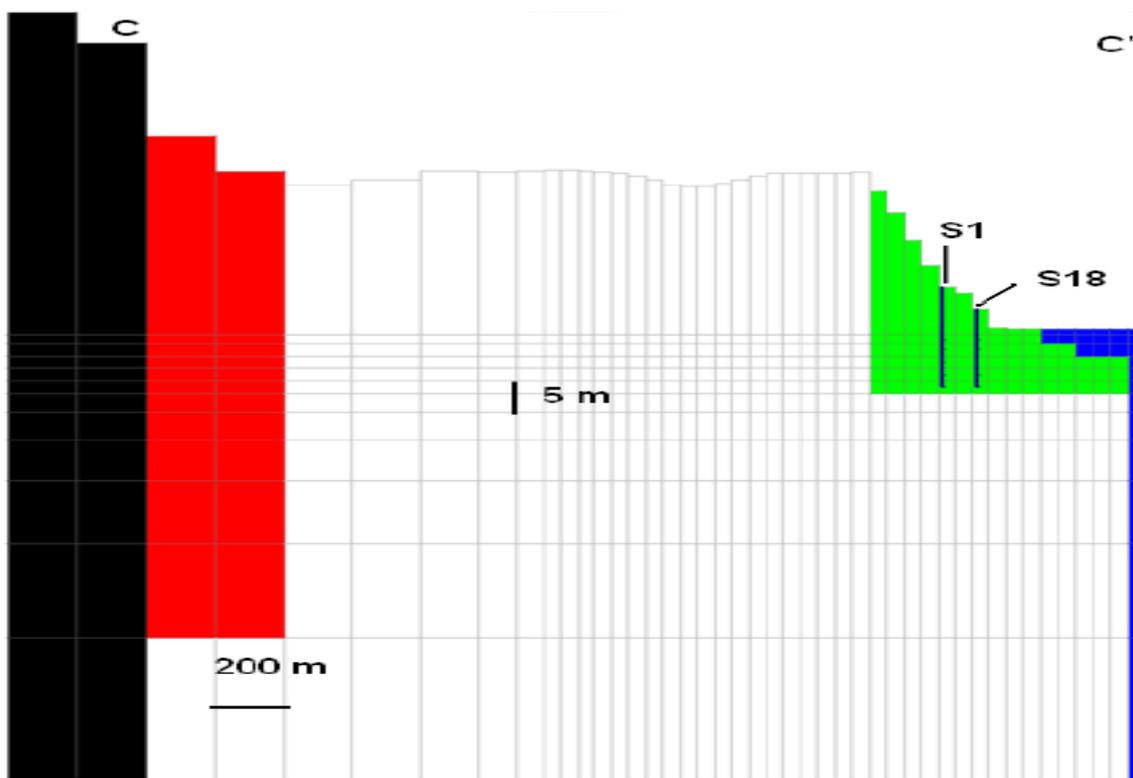


Figura 45 - Rappresentazione in sezione (CC') della zona ad alta dispersività (in rosso) nella zona più interna del dominio di modellazione. In verde la zona con i valori assegnati in prossimità della costa mentre in bianco la zona di dispersività iniziale



In questo modo, attraverso tutte le modifiche descritte e comunque sempre giustificate attraverso evidenze di campo o dati di letteratura, si è giunti ad una buona corrispondenza tra i valori di concentrazione misurati nei target e quelli simulati negli stessi punti dal modello, con uno scarto medio dei valori simulati rispetto ai target di 1.33 kg/m³ che corrisponde ad un errore del 7,7 %. Dall'analisi della distribuzione dei punti sul grafico "valori osservati vs simulati" si nota un buon allineamento lungo la retta a 45° e la linea di tendenza presenta un coefficiente R² pari a 0,86 (Figura 46); se poi si prendono in considerazione i soli target con filtri nel secondo layer, dove si ha il 55% dei valori misurati, si nota un coefficiente R² pari a 0,98 con scarto medio pari a 0,68 kg/m³ ed errore medio del 3,9% rispetto alle concentrazioni misurate (Figura 47). I parametri idrogeologici necessari per raggiungere tale grado di calibrazione sono riportati in

Tabella 9

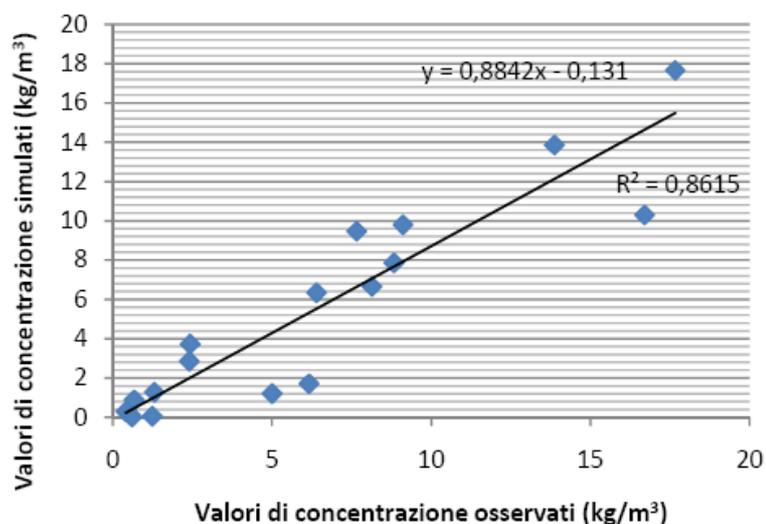


Figura 46 - Confronto tra i valori osservati in campo e quelli simulati dal modello calibrato, con relativa linea di tendenza

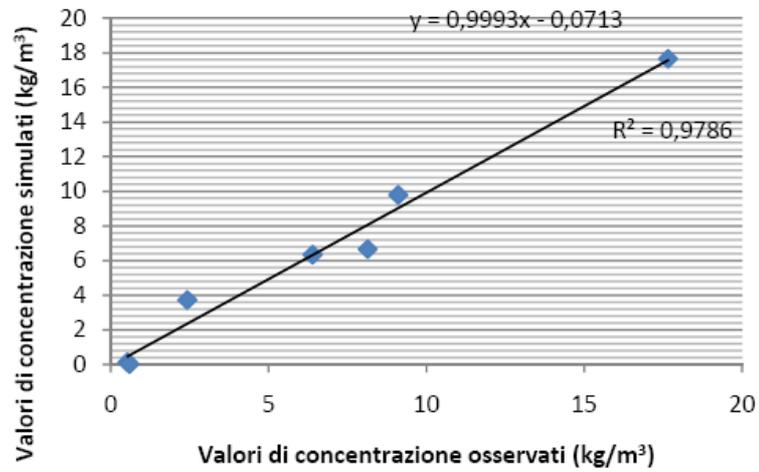


Figura 47 - Confronto tra i valori osservati in campo e quelli simulati dal modello calibrato nel secondo layer, con relativa linea di tendenza

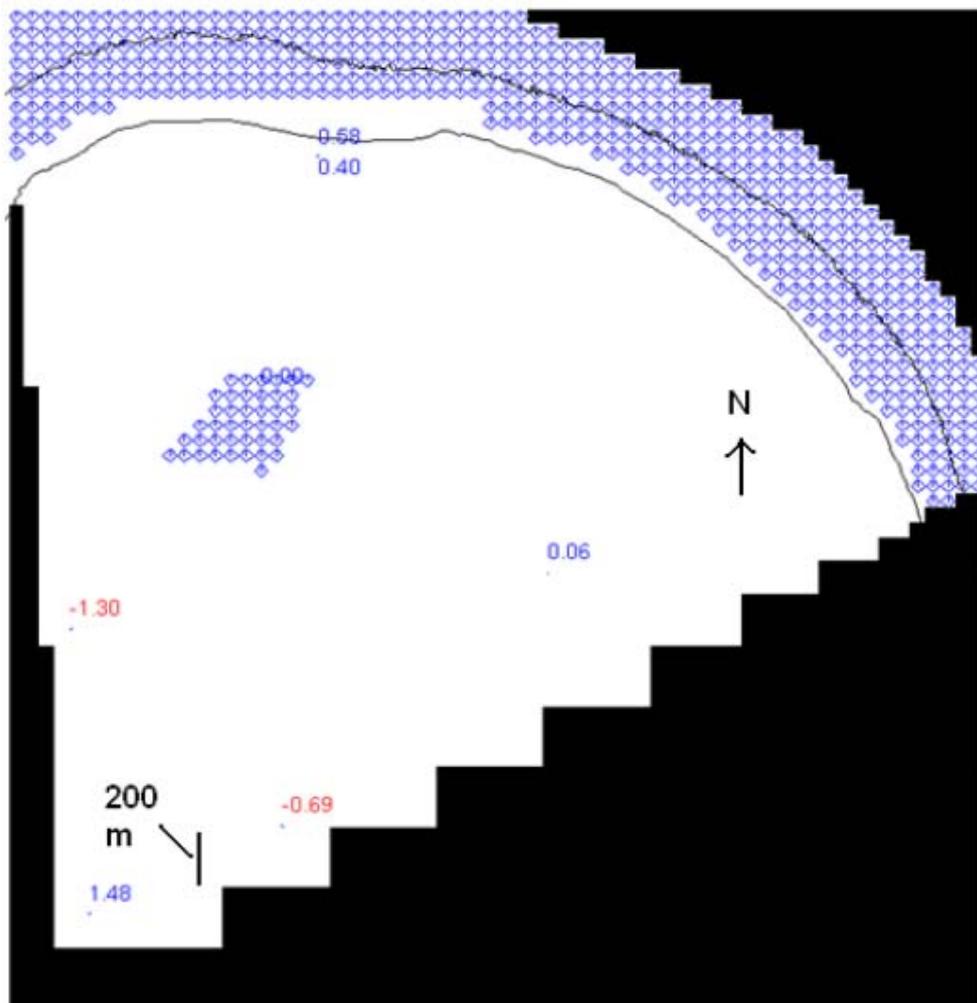


Figura 48 – Residui di calibrazione dei target del secondo layer dopo la simulazione con i parametri calibrati



Tabella 9 - Parametri idrogeologici calibrati e testati

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 di dispersività longitudinale sabbia (m)	3	1; 1,5; 2; 2,5; 5
Coefficiente di dispersività trasversale sabbia (m)	0,3	0,5; 0,1
Coefficiente di 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 di dispersività longitudinale calcare (m)	30	12, 15, 18, 25, 30
Coefficiente di dispersività trasversale calcare (m)	0,5	0,1; 0,3; 0,8; 0,12; 0,75; 1; 2
Coefficiente di dispersività verticale calcare (m)	0,06	0,01; 0,03; 0,05; 0,1; 0,12; 0,15; 0,65
Coefficiente di dispersività longitudinale zona interna carsificata (m)	65	35,40,50
Coefficiente di dispersività trasversale zona interna carsificata (m)	0,5	-
Coefficiente di dispersività verticale zona interna carsificata	0,65	0,1; 0,2; 0,35; 0,5
Porosità sabbia (-)	0,3	-
Porosità calcare (-)	0,14	-
Coefficiente di diffusione molecolare (m ² /d)	8,64 x 10 ⁻⁶	-

Di seguito vengono riportati una carta delle isoaline e della distribuzione di concentrazione nella sezione verticale CC' (Figura 49 e Figura 50) ed il confronto tra i profili di concentrazione nei pozzi S1 e S18 (Figura 51 e Figura 52).

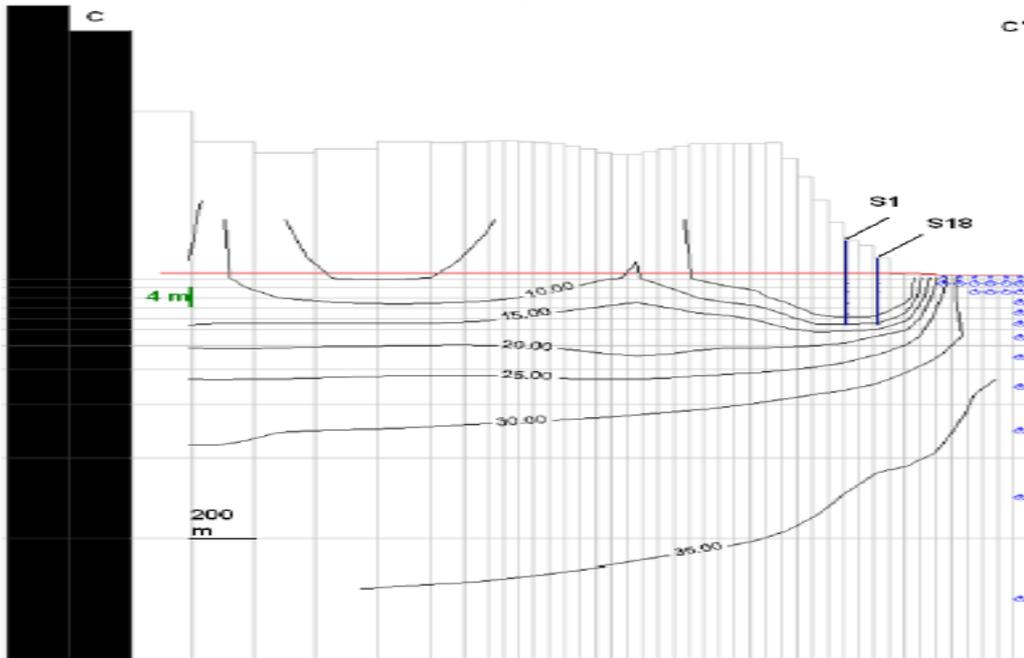


Figura 49 - Rappresentazione in sezione (CC') delle isoaline (linee nere) da 5 a 35 kg/m³ risultanti dal modello calibrato (i punti blu rappresentano le celle assegnate a carico e concentrazione costanti)

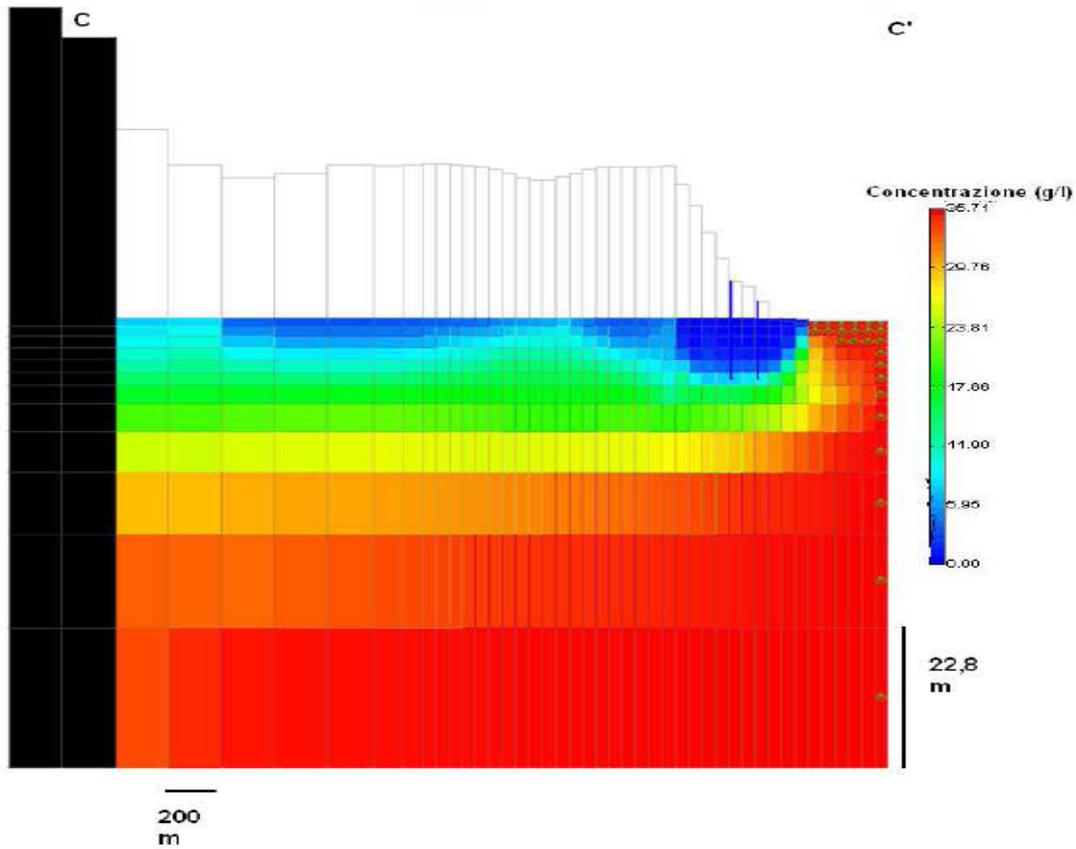


Figura 50 - Rappresentazione in sezione (CC') della distribuzione di concentrazione (kg/m³) risultante dal modello calibrato (i punti blu rappresentano le celle assegnate a carico e concentrazione costanti)

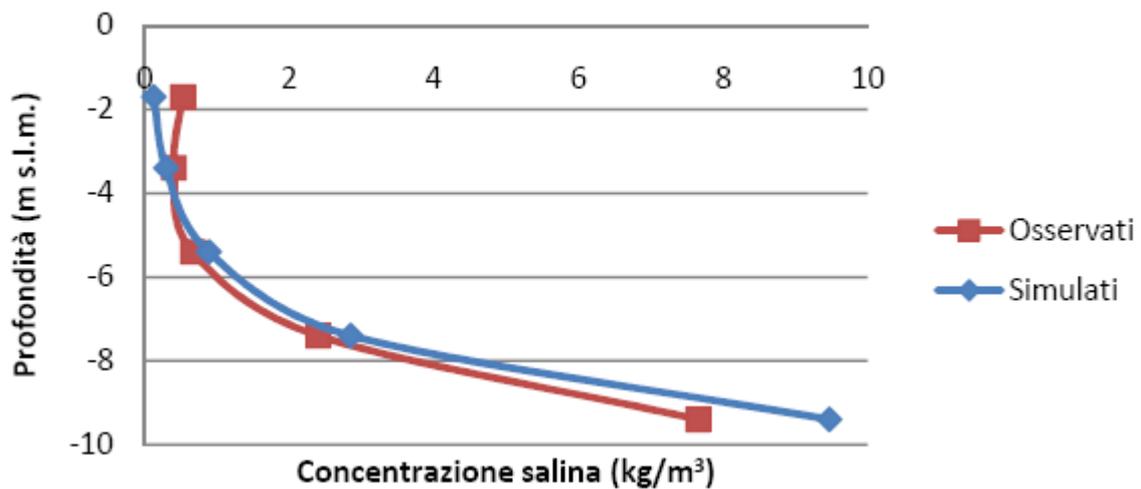


Figura 51 - Confronto tra i valori misurati e quelli simulati sulla profondità del pozzo di monitoraggio S1

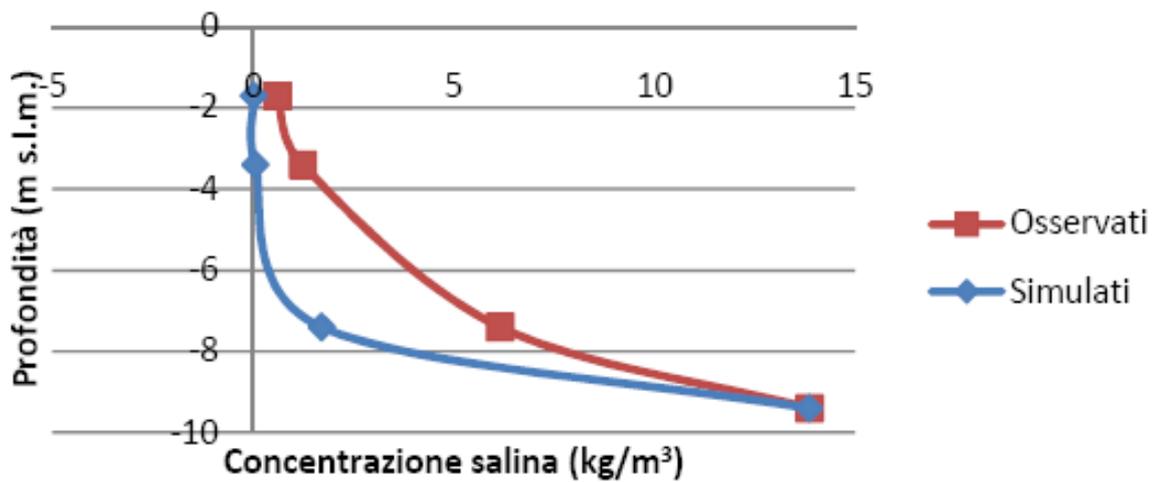


Figura 52 - Confronto tra i valori misurati e quelli simulati sulla profondità del pozzo di monitoraggio S18



6 BIBLIOGRAFIA

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.

Carpenter C., Falkland T., Overmars M. e Scott D., 2003. Pacific Dialogue on Water and Climate Synthesis Report. South Pacific Applied Geoscience Commission, Suva, Fiji.

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.

Nauru Government, 2011. Nauru Monthly Rainfall 1896-2011 with gaps. Excel File, updated 01/17/2011.

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

SOPAC, 2007. Sustainable Integrated Water Resources and Wastewater Management in Pacific Island Countries: National Integrated Water Resource Management Diagnostic Report – Nauru. Suva, Fiji Islands, 43 pp.

Larson, LM 1976. Late Jurassic and Early Cretaceous evolution of western central pacific ocean. J geomagn geoelec, 28: 219-236

Candeet, S.C., Larson, R.L. and LaBrecque, J.L., 1978. Magnetic lineations in the Pacific Jurassic quiet zone. Earth Planet. Sci. Lett., 41: 434-440.

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.



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.

Nauru, Bureau of Statistics, Secretariat of the Pacific Community, 2007. 2002 Nauru Census Main Report and Demographic Profile of the Republic of Nauru, 1992 – 2002. Noumea, New Caledonia.