

Lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatico-Romagnola

Marco Antonellini, Enrico Balugani, Giovanni Gabbianelli, Mario Laghi,
Valentina Marconi e Pauline Mollema

Integrated Geoscience Research Group, University of Bologna, Via San Alberto, 163 - 48100 Ravenna
E-mail: m.antonellini@unibo.it

Riassunto

Studi condotti negli ultimi sette anni sulle dune costiere relitte della costa Adriatico-Romagnola hanno rilevato l'esistenza di lenti di acqua dolce al loro interno. Queste lenti di acqua dolce sono importanti per l'ecosistema delle zone umide costiere e per contrastare l'intrusione di acqua salina nell'acquifero freatico. Studi geochimici delle acque di falda contenute nelle dune indicano che è in atto una tendenza alla progressiva salinizzazione di questa risorsa idrica che peraltro è soggetta a forti oscillazioni in quantità e qualità durante le diverse stagioni dell'anno. Le ragioni di questa progressiva salinizzazione delle acque contenute nelle dune sono da ricercarsi nel drenaggio della zona costiera, nella presenza di vegetazione non in equilibrio con il locale ecosistema, nella subsidenza, nell'innalzamento del livello marino e nel progressivo smantellamento degli apparati di dune rimasti a causa di fattori antropici e naturali. Studi di modellistica analitica e numerica indicano che le dune costiere romagnole sarebbero ancora in grado di mantenere una lente di acqua dolce spessa alcuni metri se esse non fossero costantemente drenate. Dove la duna costiera è stata ricostituita, come è il caso di Foce Bevano, almeno per un anno dopo l'intervento si è registrata una tendenza alla formazione di una nuova lente di acqua dolce all'interno della duna artificiale. Le dune costiere per le loro caratteristiche di ottimi serbatoi, date la loro alta conduttività idraulica e porosità, sono dei luoghi ideali per interventi di ravvenamento artificiale dell'acqua sotterranea. Un ravvenamento artificiale in una duna oltre ad immagazzinare acqua che può poi essere utilizzata in periodi di siccità dall'ecosistema circostante permette anche la formazione di un battente d'acqua sopra il livello del mare che come previsto dalla legge di Ghyben-Herzberg costituisce una forte barriera contro l'intrusione di acqua salina negli acquiferi dell'entroterra.

Parole chiave: dune, intrusione salina, ricarica naturale, variazione stagionale, Ravenna, Italia

Abstract

The fresh water lenses in the dunes along the Adriatic coast in the Emilia-Romagna region (Italy) were studied with different methods including hydrologic monitoring, geochemistry, analytical, and numerical modelling over a period of time of seven years. This paper is a summary of the results of the studies done until now and discusses the issues that are still unresolved. There are two dune belts along the Adriatic coast south of the Po-delta. A so-called "paleo dune

belt" that used to be directly on the coast until about 300 years ago and that is now at a distance of 4 to 6 km from the current coastline. The second dune belt formed 300 years ago and is now adjacent to the beach. This paper considers the last, current coastal dunes. In many places pine trees were planted on top of the dune belts since Roman times. Exploitation of the coast and coastal erosion reduced the dunes in many places and subsidence in the area lowers the general topography. Although salt water invaded many of the waterways and surface waters and aquifers along the coast, lenses of fresh water still exist in the dunes. The fresh water lenses change size and shape along the seasons. The climate of the area is characterised by wet and cold winters and warm and relatively dry summers, which results in less natural recharge of the aquifer in summer. Irrigation water, however, may also feed the freshwater lenses as in Lido di Dante. Here the size of the freshwater lens is larger in summer rather than in winter. Drainage and evapotranspiration by pine forests greatly influence the size of freshwater lenses. Tides are proven to have a small influence on the size of the lens. Freshwater from the dunes has not been considered for a long time as a resource for human use, but from a few years it has been acknowledged that freshwater lenses do support vegetation and that they may form a barrier against further saltwater intrusion.

Three study sites are discussed in detail: (1) Marina Romea, (2) Lido di Dante - Bevano river mouth, and (3) Milano Marittima. In Marina Romea the dune topography was studied in detail using Lidar data. Although many of the dunes along the coast have been destroyed to create place for bathing establishments, there is enough topography left in the pine forest of Marina Romea to allow for a freshwater lens to exist, at least in theory. Analytical calculations show that even with a very small recharge the existence of a freshwater lens could be possible. Piezometer monitoring, however, shows that there is very little freshwater which is only present in summer directly at the back of the dunes opposite to the waterline. It has become clear by detailed water budget calculations that pine tree water use and drainage in Marina Romea during many months take out more freshwater than comes in with rainfall. In the stretch of coast between Lido di Dante and Bevano river mouth, a hydrogeochemical study based on the analysis of the BEX indicator, confirmed that the aquifer is under a salinisation trend. There is Arsenicum of natural origin in the groundwater that is present in higher concentrations during the summer due to evaporation of surface water.

Water level monitoring and salinity measurements by piezometers on and at the back of a dune at Milano Marittima show that the aquifer underneath the crest of that first dune undergoes more rapid changes in salinity than the aquifer at the back of the dunes. Salt spray and wave action from the open sea may be the cause of that. The water table below the crest, on the other hand, does not rise as much in autumn with rainfall as it does at the back of the dune.

The consequences of greenhouse warming will pose more severe threats to the freshwater lenses than those that already exist. Sea level rise will move the fresh-saltwater interface inland and will shrink the freshwater lenses that are surrounded by saltwater as in the Marina Romea site. Longer periods of drought and higher temperatures will further reduce the continuous natural recharge affecting the size of the lenses. In order to manage dune freshwater better, it is important to determine priorities and a management strategy that also includes the available fresh water.

Keywords: *dunes, saltwater intrusion, seasonal variations, natural recharge, Ravenna, Italy.*

Introduzione

Le dune costiere, grazie alle loro caratteristiche d'alta porosità e permeabilità, rappresentano un ottimo serbatoio d'acqua dolce facilmente ricaricabile dalle precipitazioni meteoriche (Stuyfzand 1989). Date la topografia rilevata e la buona capacità infiltrante, l'accumulo d'acqua piovana porta la superficie freatica sopra il livello del mare, formando uno strato o bolla d'acqua dolce che si estende anche sotto il livello del mare. Questo fenomeno è simile al galleggiamento di un iceberg, di cui si vede solo una piccola parte sopra il livello del mare, mentre la parte maggiore, grazie alla minore densità del ghiaccio, si trova sotto la superficie del mare. Lo spessore della lente d'acqua dolce dipende, così come previsto dalla "legge di Ghijben-Herzberg-Dupuit (Herzberg, 1901; Fetter, 2001) dalla differenza in densità fra l'acqua dolce e quella salata, dalla conduttività idraulica dell'acquifero e dalla ricarica. Questa bolla d'acqua dolce contrasta l'intrusione di acqua marina nell'acquifero costiero (Fig. 1; Bear, 1999; Scheidleger et al., 2004).

L'acqua salata, più densa, s'incunea sotto l'acqua dolce. In una situazione naturale esiste un'interfaccia stabile

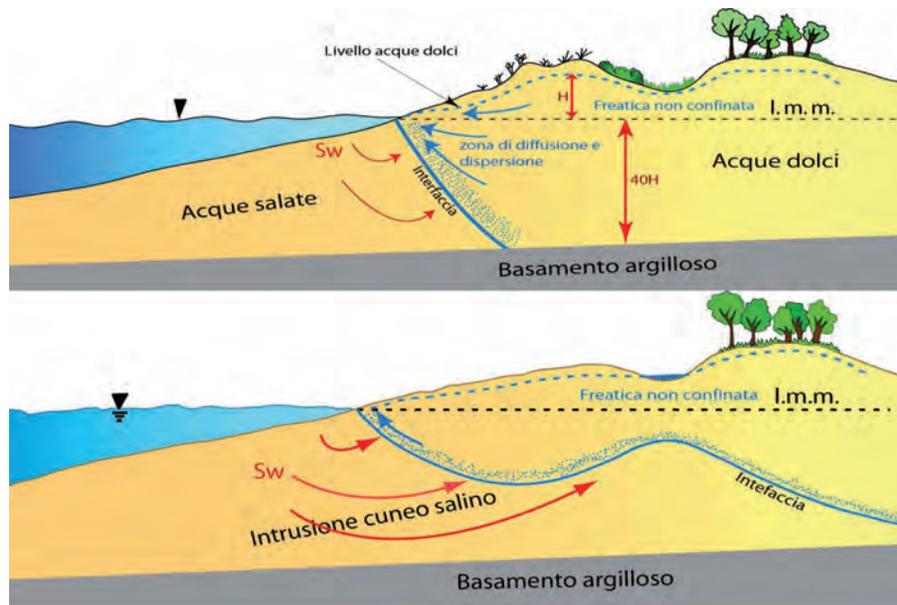


Figura 1 - Effetto barriera della bolla d'acqua dolce connesso alla presenza di un buon sistema di dune costiere naturali (condizione in alto) e di un sistema degradato (in basso).

fra acqua dolce e acqua salata che nella realtà è un'ampia zona di diffusione raramente in condizioni statiche. L'acqua si muove in senso circolare a partire dal fondo del mare (vedi frecce in Fig. 1). In prima approssimazione ed in termini idrostatici, l'interfaccia acqua dolce-acqua salata, per gli acquiferi costieri emiliano-romagnoli, si sviluppa quasi sempre fino ad una profondità dell'ordine di oltre 30 volte l'altezza del livello piezometrico rispetto alla superficie del mare; ciò significa che un abbassamento di 1 cm del carico idraulico causa la risalita di oltre 30 cm circa dell'interfaccia e viceversa (Fig. 1).

Lungo la costa dell'Emilia-Romagna il progressivo e costante incremento dell'attività antropica durante gli ultimi decenni ha ormai quasi completamente destabilizzato l'equilibrio idrostatico tanto che l'interfaccia acqua dolce-salata sta ovunque risalendo (Antonellini et al., 2007, 2008; Antonellini e Balugani, 2008; Gabbianelli e Antonellini, 2007; Marconi et al., 2010; Mollema, 2010; Ulazzi et al., 2007). Il territorio è frammentato da tante vie d'acqua: canali, fiumi rettificati, canali d'irrigazione che fanno defluire una grande quantità d'acqua dolce al mare invece di farla entrare negli acquiferi costieri.

Il problema dell'intrusione dell'acqua salata nel sistema idrico costiero è venuto alla ribalta della cronaca ed all'attenzione della pubblica opinione e degli amministratori (per esempio Repubblica, 2006) allorché, a causa delle scarse precipitazioni e delle basse portate fluviali, la risalita dell'acqua di mare lungo i rami del Po ha raggiunto diverse decine di km nell'entroterra, compromettendo l'attività agricola (impossibilità di irrigare colture e frutteti) e portando talora al blocco delle centrali elettriche per mancanza di acqua dolce da usare per il raffreddamento. La risalita dell'acqua di mare lungo i fiumi è, però, solo un aspetto del problema che sta profondamente modificando tutto il sistema idrologico-ecologico costiero emiliano-romagnolo che include le acque superficiali nelle zone umide e vallive, i boschi, i cordoni di dune, i fiumi e i canali, il reticolo idrico della bonifica e gli acquiferi freatici (Fig. 2).

Anche per questo, i modesti sistemi superstiti di dune ancora esistenti tendono ad avere sempre maggiori ed importanti funzioni di adattamento e resilienza; non solo in termini di contrasto ai fenomeni di erosione costiera ma anche rispetto a quelli di intrusione salina.

Il previsto innalzamento del livello marino come conseguenza dei cambiamenti climatici in combinazione con la subsidenza di origine antropica contribuirà ad esacerbare ancora di più questi fenomeni. Per questo motivo le autorità amministrative regionali hanno iniziato degli studi per la ricostituzione delle dune costiere (Regione Emilia-Romagna, 2009).



Figura 2 - Schematico assetto topografico- idrogeologico superficiale della zona costiera ravennate- ferrarese. I tre siti di studio dettagliati sono indicati.

L'acqua dolce contenuta negli acquiferi superficiali non confinati, tra cui le dune ha grande importanza per il mantenimento degli habitat costieri, per la biodiversità delle zone umide, per le caratteristiche geo-pedologiche ed agronomiche dei terreni coltivati (Antonellini e Mollema, 2010; Gabbianelli et al., 2007, 2008).

Una delle grosse differenze fra l'idrologia delle dune adriatiche e quella delle dune dell'Europa del Nord, sono le variazioni in ricarica naturale durante l'anno. Con una temperatura alta e precipitazioni limitate nell'estate, la ricarica delle dune nel bacino mediterraneo è minima durante la stagione calda e avviene prevalentemente durante l'autunno e l'inverno. Questa variabilità causa delle variazioni stagionali nella grandezza e forma delle lenti d'acqua dolce nelle dune adriatiche.

I primi studi idrogeologici negli acquiferi della nostra zona di studio sono stati fatti per stabilire dove c'è l'acqua salata e quali sono le possibili cause per la salinizzazione (Antonellini et al., 2008; Giambastiani et al., 2007; Ulazzi et al., 2007). Gli

ultimi studi sono fatti per migliorare i metodi di monitoraggio (Balugani e Antonellini, 2010) e soprattutto per quantificare i fattori che influenzano la grandezza delle lenti d'acqua dolce (fra altro Antonellini e Mollema, 2010; Laghi, 2010; Marconi et al., 2010 Mollema et al., 2010) Ad esempio domande importanti a cui si dovrebbe rispondere sono: quanto è l'evapotraspirazione? Quanto è la ricarica naturale? Quanto è il drenaggio? Quanto è l'influenza della marea? Quanto aiuta l'irrigazione a sostenere le lenti d'acqua dolce? Come sono le variazioni stagionali di tutti questi fattori e della grandezza delle bolle d'acqua dolce? Quali potenziali serbatoi di acqua dolce ci sono in zona costiera e come possono le dune aiutare a formare una barriera all'intrusione salina?

Questo articolo riassume gli studi fatti su tre aree: Marina Romea, Lido di Dante - Foce Bevano e Milano Marittima (Fig. 2). I metodi usati per rispondere alle domande elencate sopra sono diversi: monitoraggio idrologico, analisi chimiche, modellistica analitica e numerica, Lidar, rilievi geofisici e perforazione di pozzi. Non possiamo in questa sede descrivere in dettaglio tutti i metodi usati e le collezioni di dati acquisiti. Dove appropriato, peraltro, abbiamo inserito i riferimenti bibliografici agli articoli pubblicati e alle tesi di laurea e di dottorato a cui rimandiamo il lettore interessato.

Il contributo originale di questo articolo sta nei dati idrogeologici acquisiti nelle dune costiere. Dopo una descrizione generale dell'assetto geologico-morfologico della zona costiera romagnola presentiamo area per area (a partire da nord) i dati geoidrologici e idrogeochimici che si sono potuti acquisire nelle diverse zone. Per motivi pratici e logistici, I dati acquisiti non sono omogenei in tutte e tre le zone; ad esempio l'idrogeochimica è stata eseguita solo nell'area centrale (Lido di Dante-Foce Bevano), gli studi di fisiologia vegetale in quella settentrionale (Marina Romea) ed in quella meridionale, mentre la modellistica numerica è stata fatta solo a Marina Romea. Nella discussione cercheremo di integrare tutti questi diversi aspetti per trarre conclusioni di carattere generale.

Aspetto geologico- geomorfologico

La morfologia costiera, ovunque bassa e piatta, così come lungo tutta la costa Emiliano-Romagnola, è caratterizzata dalla presenza di spiagge sabbiose che, con modesto spessore, ricoprono materiali limoso-argillosi corrispondenti a più antichi depositi palustri, alluvionali o marini (Amorosi et al., 1999).

Lungo la costa ravennate è possibile individuare una serie di antichi cordoni dunosi, costituiti da sabbie di spiaggia e di duna, che rappresentano la “traccia” sedimentaria e paleomorfologica delle numerose linee di costa formatesi nel processo di progressiva progradazione che ha interessato queste aree durante l’Olocene (Ciabatti, 1968; Bondesan, 1988; Regione Emilia-Romagna, 2002).

Sotto il profilo altimetrico la maggior parte del retrospiaggia presenta quote generalmente molto prossime al livello medio mare o inferiori ad esso. E’ quindi diffusa la presenza di ampie aree depresse che includono zone umide generalmente salmastre. Sono ormai pressoché del tutto assenti i bacini naturali d’acqua dolce, in precedenza particolarmente diffusi sino al completamento della bonifica meccanica. La zona di transizione e i residui cordoni dunosi (antichi o attuali) sono quindi caratterizzati da quote medie di poco superiori al metro (tra 1 e 5 metri al massimo).

La stratigrafia del cuneo costiero di spiaggia include tre unità principali: (1) una sabbia di spiaggia superiore con spessore variabile fra 6 e 22 metri, (2) dei depositi limosi di prodelta con spessore variabile dai 2 ai 15 metri ed una irregolare distribuzione rispetto alla linea di costa attuale e (3) un deposito di spiaggia sabbioso subito sopra la trasgressione post-Flandriana con uno spessore di 1-2 metri. Nel suo complesso l’acquifero ha uno spessore variabile fra gli 11 ed i 28 metri (Fig. 3a e b).

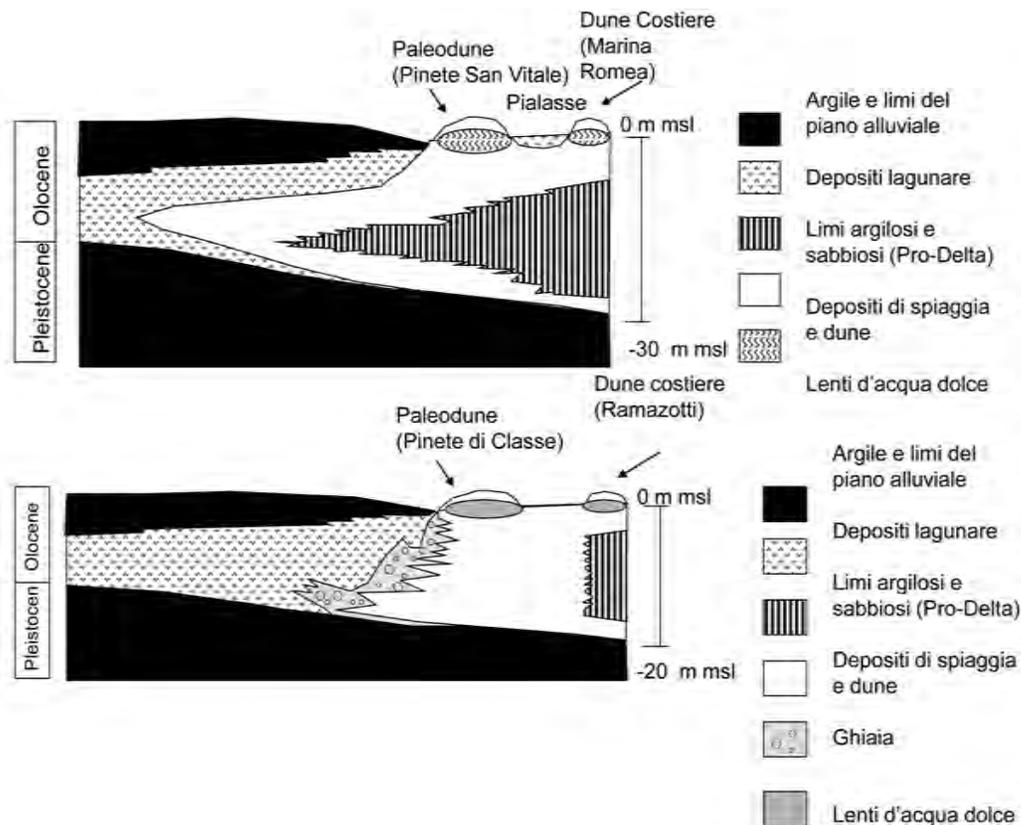


Figura 3 - Litostratigrafia schematica: sopra sezione perpendicolare alla costa vicino a Marina Romea (modificato da Amorosi et al., 1999 e Giambastiani et al., 2007); sotto sezione perpendicolare alla costa di Foce Bevano basata su dati della Regione Emilia Romagna (2002).

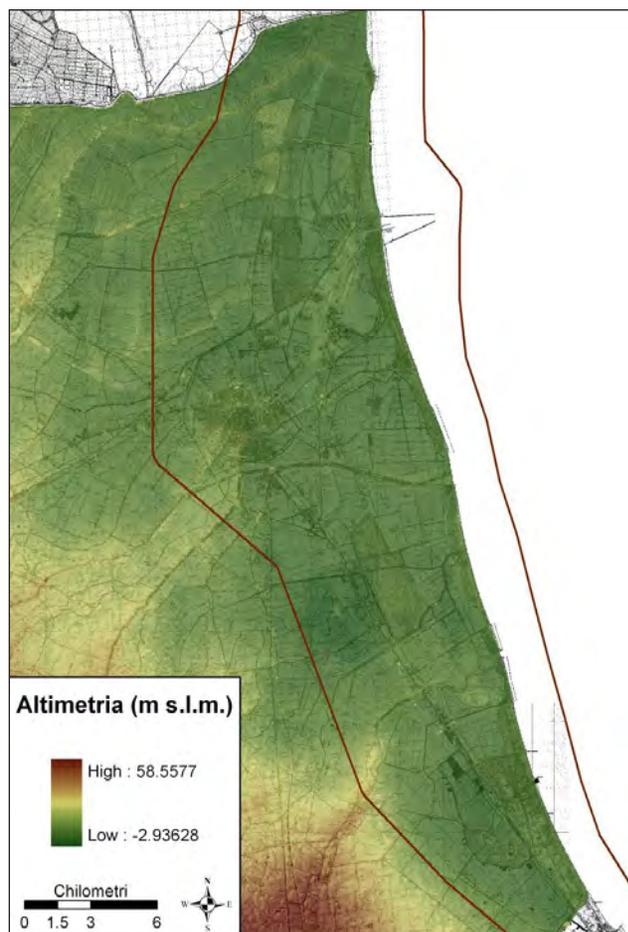


Figura 4 - Schematico assetto topografico e altimetrico della costa ravennate (DEM della Provincia di Ravenna).

La subsidenza naturale nell'area è 0,5 mm/anno ed è causata dalla compattazione naturale dei sedimenti (Carbognin e Tosi, 1995; Carminati et al., 2005). La componente maggiore della subsidenza, però, è quella antropica che è causata dall'estrazione d'acqua potabile (Teatini et al., 2006), di gas naturale (Bau' et al., 2000) e dal drenaggio per la bonifica. La subsidenza totale nel periodo 1950-1990 è arrivata fino a 1,0 m (Fig. 4). Anche se l'estrazione d'acqua dal sottosuolo è ora molto ridotta, la subsidenza, seppur in minor misura, continua. Se consideriamo anche l'innalzamento del livello marino, la subsidenza relativa è ancora maggiore. Teatini et al. (2005) e Simeoni et al. (2003), prevedono che a causa della subsidenza e dell'innalzamento del livello del mare, nel 2020 il 48 % del territorio costiero si troverà sotto il livello del mare invece del 15% rilevato nel 2003.

Area 1 - Marina Romea

Marina Romea è un bacino idrografico isolato in una penisola circondata da acqua marina. Al confine nord del bacino c'è il fiume Lamone che

porta acqua salina fino a 8 km dal mare (Laghi, 2010). Ad ovest ci sono le Pialasse che separano le dune costiere di Marina Romea dalle paleo-dune di San Vitale.

Le Pialasse sono una zona umida salata, ma poco profonda, in comunicazione col mare. Durante l'estate la salinità può superare quella del mare. A sud di Marina Romea c'è il canale Candiano che collega Ravenna ed il suo porto col mare ed ad est c'è il Mar Adriatico (Fig. 2).

Il cordone di dune a Marina Romea è stato fortemente frammentato e disarticolato per far posto agli stabilimenti balneari (Fig. 5). Una gran parte delle dune più interne è coperta da una pineta (*Pinus pinaster* e *Pinus maritimum*). In mezzo alla pineta c'è un'area topograficamente ribassata bassura che contiene uno scolo per il drenaggio; lo scolo è collegato alla vicina idrovora di Porto Corsini.

Idrogeologia delle dune a Marina Romea

Variazioni stagionali del livello freatico e della salinità nell'acquifero

Il monitoraggio della profondità e della salinità della falda mettono in luce forti variazioni stagionali Fig. 6a,b,c. In sintesi, possiamo dire che la falda è leggermente sopra il livello del mare nei mesi invernali e leggermente sotto il livello del mare (almeno nel centro delle pineta) durante l'estate. La salinità dell'acqua, invece, è elevata durante tutto l'anno e talora raggiunge 18 g/l. Solo al retro della prima fila di dune si trova acqua dolce durante il periodo invernale (salinità < 1,5 g/l).

Per sapere in che modo l'interruzione delle dune vicino a riva abbia influito sulla salinità della falda, abbiamo condotto uno studio usando i dati altimetrici LIDAR (AA. VV. 2004) e il modello numerico SEAWAT (Guo e Langevin, 2002). SEAWAT è un modello per la simulazione in tre dimensioni di flusso con densità variabile basato su due codici (MODFLOW e MT3D). I dati LIDAR hanno rilevato che la topografia delle dune sotto

la pineta e nel retroduna è ancora abbastanza elevata, con dune alte fino a 3 m sopra il livello del mare (Fig. 5). Per controllare se il fatto che la prima fila di dune direttamente a mare sia interrotta possa spiegare in sé lo stato di salinizzazione della falda, abbiamo importato in SEAWAT la topografia basata sui dati LIDAR di un'area di 360 per 520 m appartenente all'area nord est di Marina Romea. In pratica l'area esaminata rappresenta la metà verso mare della penisola di Marina Romea. Abbiamo assunto che la situazione sia simmetrica, perciò come confine del modello ad ovest abbiamo imposto un confine a carico costante di 0,2 m, che sarebbe uguale alla massima altezza della tavola d'acqua misurata nei piezometri. Questo modello, quindi, per isolare l'effetto della topografia ignora le variazioni stagionali nella tavola d'acqua. Lungo il confine superiore del modello è stata applicata una condizione di ricarica che dipende dall'uso del suolo: 15 mm/anno per le pinete, basato su i calcoli del bilancio idrologico (Antonellini et al., 2008) e 200 mm/anno sulle dune vicino al mare.

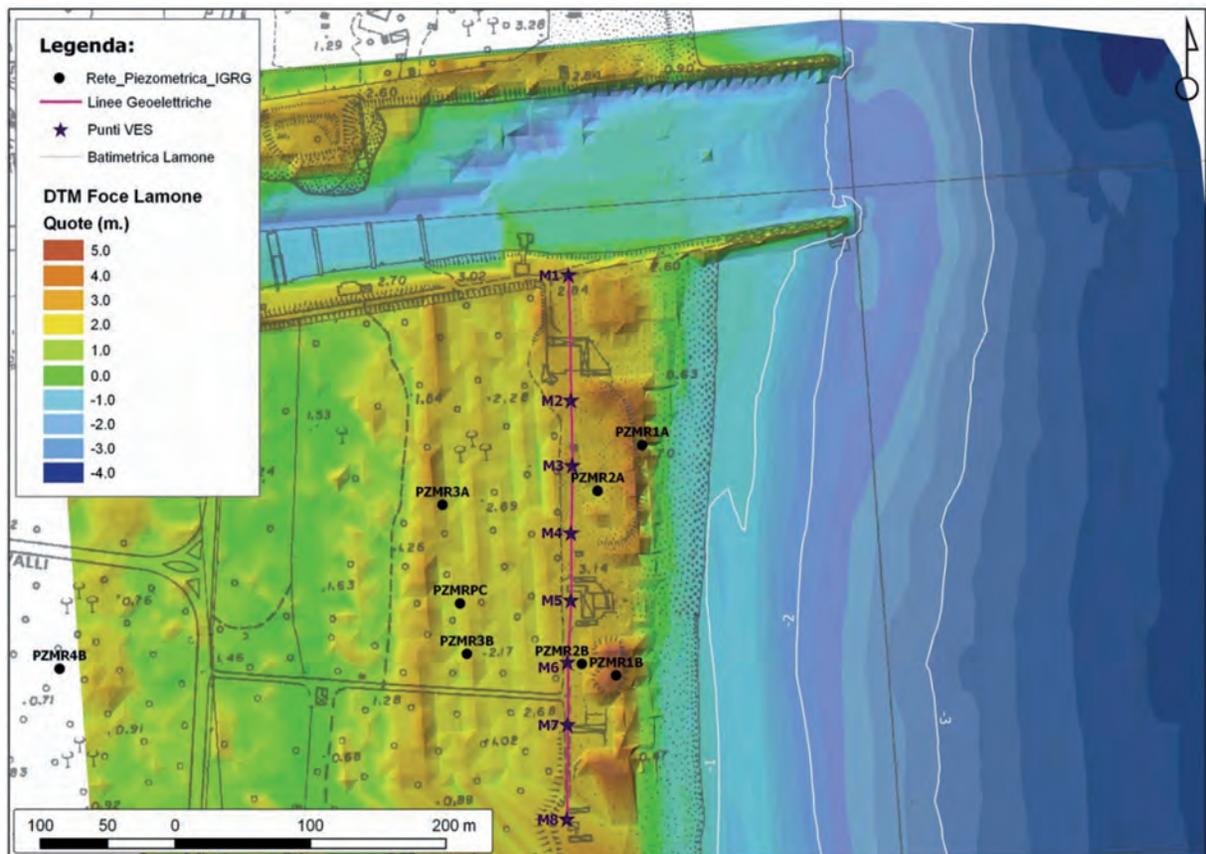


Figura 5 - Sito di Marina Romea. Topografia derivata dal rilievo LIDAR del 2003.

Al confine di alcuni modelli è stata aggiunta una condizione al contorno di drenaggio (*drain*) in direzione nord-sud, per simulare l'effetto del canale scolante esistente (conduttanza 10 m²/giorno). Tutti i modelli, con alta o bassa concentrazione salina iniziale e con o senza drenaggio, mostrano che dopo 60 anni si forma uno strato d'acqua dolce sotto le dune che però non si è ancora stabilizzato. Nei modelli col drenaggio, l'acqua salina si muove verso lo scolo ma, dopo 60 anni, non lo ha ancora raggiunto (Mollema et al., 2008). Questo suggerisce che la topografia e la ricarica attuale dalla pioggia dovrebbero essere sufficienti per mantenere uno strato d'acqua dolce sotto le dune. Il secondo cordone di dune, che è molto continuo, sembra avere un ruolo importante nel fermare l'intrusione salina. La salinità misurata nei piezometri sia in area di duna che nella pineta è in genere molto più alta di quella prevista dai modelli. Solo in due piezometri nelle dune (Fig. 6a) è stata osservata, per un periodo di alcuni mesi, una salinità più bassa di 1 g/l rispetto a quanto calcolato.

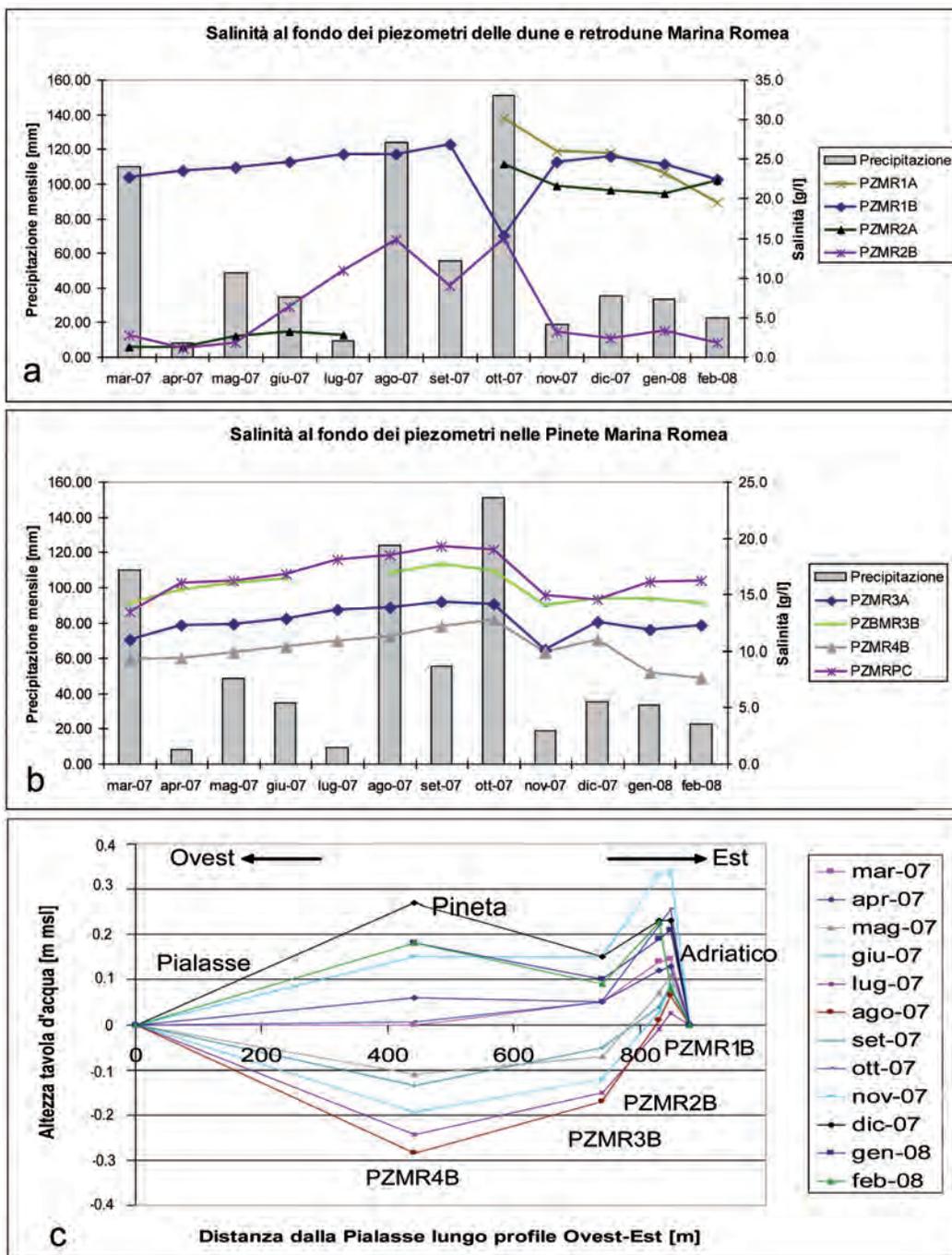


Figura 6 - (a) Andamento della salinità superficiale nei piezometri monitorati mensilmente messi a confronto con la piovosità nelle prime dune e (b) nella pinete retrostante. (c) Variazione mensile della falda monitorata lungo un profilo est-ovest nei piezometri PZMR1AB, PZMR2B, PZMR3B, PZMR4B. Sono stati aggiunti dei punti di riferimento per il mare e le Pialasse.

L'influenza della ricarica e dell'innalzamento del livello del mare sullo spessore delle lenti d'acqua dolce

Quando la topografia è sotto il livello del mare, non ci può neanche essere una falda con la tavola d'acqua dolce sopra il livello del mare e di conseguenza non si può formare la lente d'acqua dolce. Questo, in sintesi, è quanto prevede la legge di Ghijben-Herzberg. Dato che Marina Romea è circondata da acqua marina, possiamo considerarla un'isola oceanica allungata (Mollema et al., 2010).

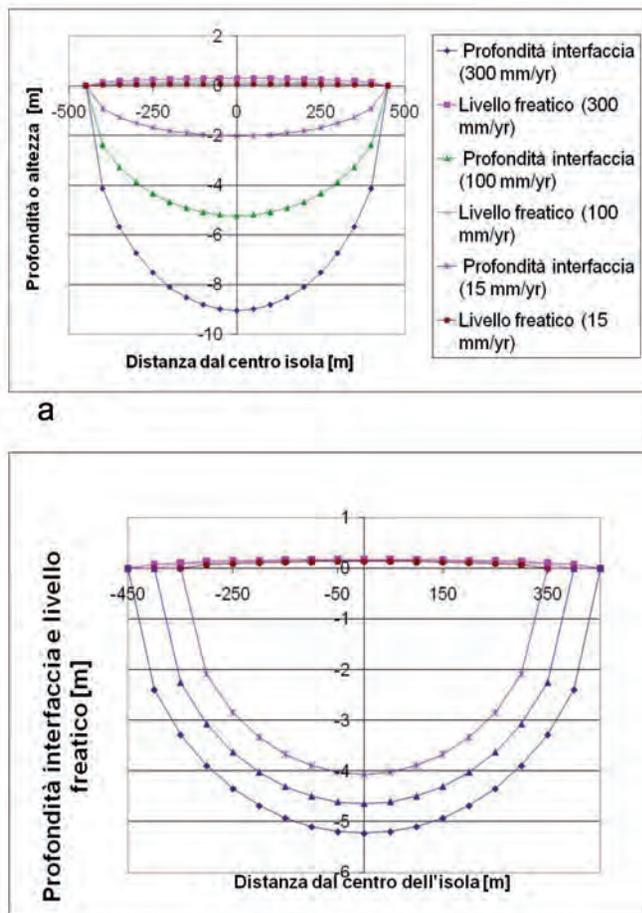


Figura 7 - (a) Grafico che mostra la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata ed il livello freatico previsto con la relazione di Ghyben-Herzberg-Dupuit, con diversi valori per la ricarica. (b) La stessa relazione ma questa volta variando la larghezza dell'isola simulando un livello del mare più alto (ed una Marina Romea più piccola).

La ricarica naturale e la conduttività idraulica dell'acquifero (K) determinano, in questo caso, la grandezza della lente d'acqua dolce. Assumendo che la lente sia stazionaria nel tempo e sia in equilibrio con ricarica naturale, flusso verso mare e pressione idrostatica nel mare, si può stimare lo spessore della lente con la relazione Ghyben-Herzberg-Dupuit (Herzberg, 1901; Vacher 1988; Oude Essink, 2001).

Usando una larghezza per l'isola di 900 m (che è la larghezza della penisola di Marina Romea), una differenza relativa fra densità dell'acqua salina e dolce di 0.033, una conduttività idraulica di $6.9E-4$ m/s e una ricarica che varia fra 15 e 300 mm/anno otteniamo che l'altezza della tavola d'acqua al centro dell'isola varia fra 0.07 m (m.s.l.) con una ricarica di 15 mm/anno e 0.3 m (m.s.l.) con una ricarica di 300 mm/anno (Fig. 7a). La profondità dell'interfaccia fra acqua dolce e salata varia fra -2 a -9 m

(m.s.l.). Una ricarica di 300 mm corrisponde, in pratica, alla metà delle precipitazioni annuali. Non è probabile che quella sia una ricarica realistica. Una ricarica più realistica potrebbe essere 15 mm/anno che è stata calcolata da Giambastiani et al. (2007). Un effetto possibile dell'innalzamento del livello del mare è che la larghezza dell'isola diminuisce e di conseguenza l'area di ricarica anche. Figura 7b mostra come diventerà più piccola la lente d'acqua dolce se la spiaggia si ritrae di 100 o 200 m, assumendo che la ricarica rimanga costante. Un limite di questo metodo è che non è possibile inserire variazioni temporali o spaziali nella ricarica. Si tratta sempre di una situazione stazionaria.

Contributo della traspirazione dei pini e del drenaggio artificiale al bilancio idrologico di Marina Romea

Usando dati del pompaggio all'idrovora di Porto Corsini, informazioni sul consumo d'acqua dei pini basati sul flusso di linfa misurato e pubblicato da Teobaldelli et al. (2004), dati sul livello della falda misurata mensilmente durante il periodo 2007-2008, Mollema et al. (2010) hanno calcolato un bilancio idrologico per ogni mese dell'anno 2007-2008 entro il bacino idrografico di Marina Romea. I pini sono capaci di traspirare fino a 30 litri al giorno per pianta. La distanza media fra i pini nella pineta è solo 5 m. Se facciamo un confronto fra la quantità d'acqua di precipitazione che cade nell'intorno di un pino e la quantità d'acqua che l'albero traspira, vediamo che nei mesi estivi i pini traspirano più acqua di quella fornita dalla pioggia. Poi si deve prendere in considerazione il fatto che una gran parte della pioggia evapora dalla superficie delle piante e dal suolo, prima ancora di raggiungere la falda. I volumi drenati artificialmente dall'impianto di sollevamento sono più grandi dei volumi di pioggia nel bacino durante ogni mese dell'anno monitorato. Questo suggerisce che in tanti mesi del periodo di monitoraggio, non c'è stata nessuna ricarica della lente d'acqua dolce sotto Marina Romea.

Il fatto che i pini sono capaci di traspirare più della pioggia fa supporre che ogni pino in tempi di siccità funzioni come una piccola pompa causando la risalita dell'acqua salina nella falda.

Area 2 - Lido di Dante, Foce Bevano e Lido di Classe

Le dune costiere fra i Fiumi Uniti a nord e Lido di Classe a sud che includono il Lido di Dante, la Pineta Ramazzotti, la foce del Fiume Bevano, e la continuazione della pineta Ramazzotti (Figg. 2 e 8), si trovano in un'area meno urbanizzata di Marina Romea o Milano Marittima. Quest'area ha un'elevata valenza naturalistica (Zona SIC/ZPS, Parco del Delta RER). Nella prima metà del 2006, è stato effettuato un intervento di

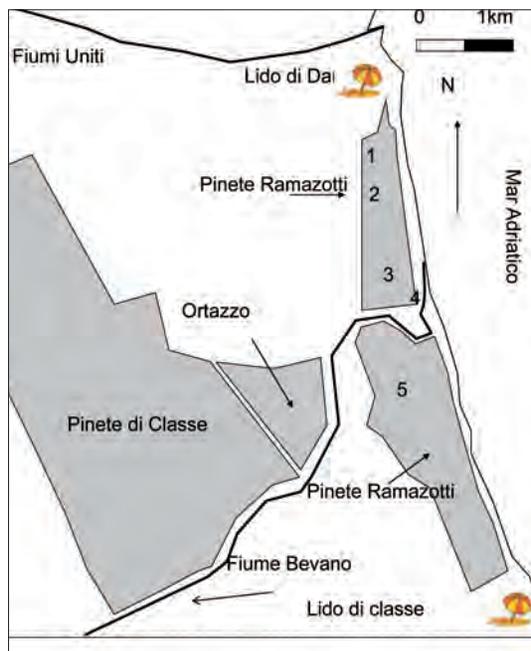


Figura 8 - Carta indice dell'area intorno alla foce Bevano. I numeri indicano dove sono stati fatti gli studi: 1) caratterizzazione geochemica; 2) relazione densità pini e salinità; 3) ricostruzione falda nella duna nuova; 4) studio dell'effetto di marea nella falda freatica.

diversione della foce fluviale del fiume Bevano, integrato dalla costruzione di un segmento di duna artificiale lungo oltre 700 m (Ciavola et al., 2005; Gardelli et al., 2007; Regione Emilia-Romagna, 2009). Quest'ultima condizione ha permesso anche una prima verifica sulla progressiva ricostituzione ed efficienza della falda dolce all'interno di questa duna artificiale e, nel contempo, confrontarla con quanto esistente nel contiguo sistema di dune naturali. Prima dell'intervento, la foce del Bevano era l'ultima foce naturale della costa romagnola. Il fiume è arginato ma non rettificato nella zona di foce avendo una serie di meandri fino al suo sbocco in mare.

Gli studi di monitoraggio ed elaborazioni dei dati idrologici e geochemici fatti in quest'area hanno stabilito come si ricostituisce la tavola d'acqua e la lente d'acqua dolce in una nuova duna, l'influenza della marea sulla tavola d'acqua, la tendenza della concentrazione salina nel tempo (tendenze alla salinizzazione o al raffrescamento della falda), la caratterizzazione della distribuzione dell'Arsenico naturale, un confronto fra osservazioni fatte ed un modello analitico che calcola l'infiltrazione di acqua nel suolo e nella falda, e la relazione fra salinità e la biodiversità.

Idrogeologia delle dune nella zona Lido di Dante - Lido di Classe

Caratterizzazione Idrogeochemica di Lido di Dante

Le analisi chimiche ed il monitoraggio della profondità e della conduttività elettrica di falda nell'area vicino a Lido di Dante (Fig. 8 n. 1) hanno incluso la raccolta di 22 campioni di acqua presi dalla superficie della falda e 3 campioni alla base dell'acquifero (Marconi et al., 2010). Le analisi chimiche mostrano che esiste una sottile lente d'acqua dolce nella zona di retrospiaggia; questa lente d'acqua dolce varia in grandezza e spessore con le stagioni. Il livello freatico medio nell'estate 2008 era - 0.4 m (m.s.l.) e + 0.1 m (m.s.l.) nell'Inverno 2009. La salinità misurata nelle trivellate (*auger holes*) varia da 1 g/l, nelle zone di retrospiaggia a 36 g/l vicino al laghetto pinetale (in estate) e da 0.6 g/l fino a 29 g/l durante l'inverno. La concentrazione media di arsenico alla superficie dell'acquifero è molto più grande durante l'estate (0.011 mg/l) che nell'inverno (0.002 mg/l).

L'intrusione salina e la sua tendenza possono in genere essere rivelati dai processi di scambio cationico (Stuyfzand, 1986). Ci sono certi indici di base che possono indicare se una falda sta diventando più salata o invece sta diventando più dolce. Stuyfzand (2008) trova che l'indice

$$\text{BEX} = \text{Na} + \text{K} + \text{Mg} - 1.0716 \text{Cl} \text{ (meq/L)}$$

non risulta quantificabile). Si nota anche un'oscillazione di lungo periodo del livello di falda dovuto alla componente meteorologica delle maree che è quindi fortemente correlata a come la pressione atmosferica o la forza e direzione del vento influiscono sull'Adriatico (non necessariamente in eventi di tempesta). La variazione nel livello di falda dovuto a quest'ultima causa è sicuramente la più importante, dell'ordine di 20 cm in soli 3 giorni a 30 m dal mare (Balugani, 2008).

Idrogeologia della duna artificiale alla foce del Fiume Bevano

Un segmento di duna artificiale è stato costruito a nord dell'attuale foce del Bevano (Fig. 10). In questa zona sono stati monitorati 3 piezometri di cui la Fig. 11a riporta i livelli della falda mentre la Figura 11b mostra la salinità. I valori di TDS (*Total Dissolved Solids*) da cui abbiamo ricavato la salinità dell'acqua, evidenziano un marcato trend di progressiva ricostituzione di una falda di acqua dolce, galleggiante sopra quella salata. Nelle dune a sud della foce del fiume Bevano i dati mostrano che in prossimità del retroduna, si ha un marcato approfondimento dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata.

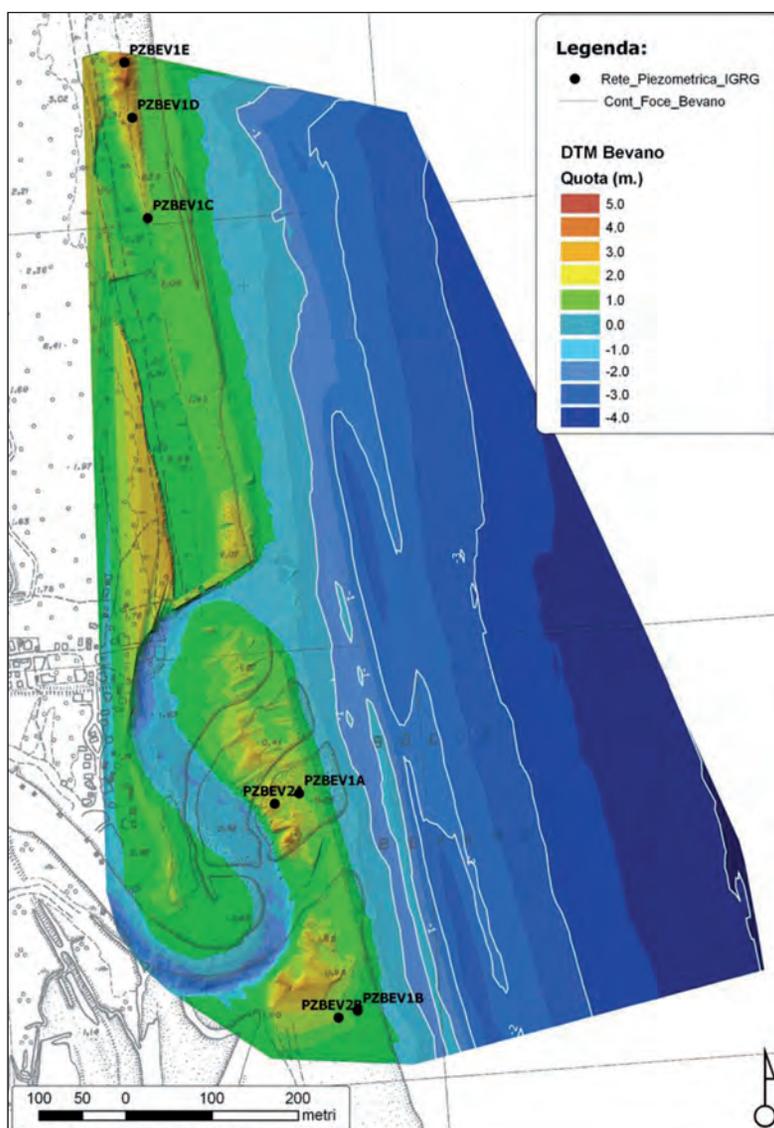


Figura 10 - Sito di Foce Bevano, dati LIDAR del 2003 con ubicazione dei piezometri.

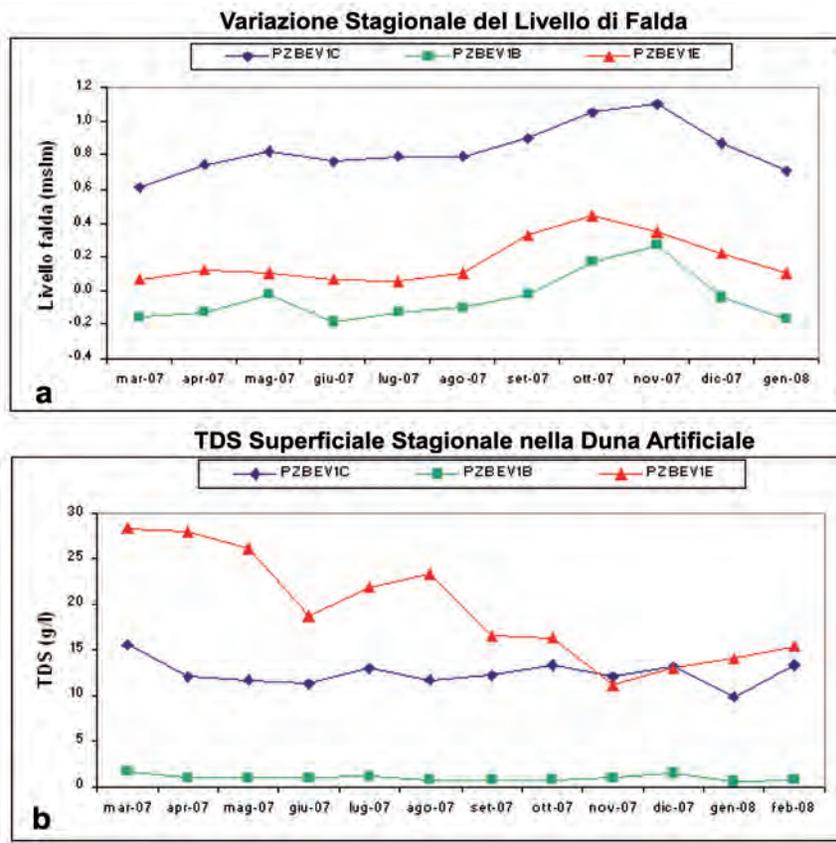


Figura 11 - (a) Sito di Focce Bevano. Andamento della falda nei piezometri entro la duna artificiale dal momento della costruzione. Il piezometro PZBEVIC è traslato di circa +0,5 m in quota. (b) Andamento del TDS nei piezometri entro la duna artificiale dal momento della costruzione.

Ricarica effettiva dell'acquifero freatico

I dati di monitoraggio dai piezometri nella zona di Marina Romea e Focce Bevano insieme con i dati meteorologici sono stati usati per calcolare la ricarica della falda usando il metodo di Lerner et al. (1990). Questo metodo, basato sulle oscillazioni di falda registrate in un piezometro, è riassunto dalla seguente formula:

$$\text{Ricarica netta (mm)} = \Delta h * S_y$$

dove Δh è l'escursione annua di livello in un piezometro (mm) e S_y è il coefficiente di immagazzinamento dell'acquifero freatico. La Fig. 12a riporta i valori di ricarica per i piezometri di Focce Bevano e Marina Romea calcolati con questo metodo; notare che i valori di ricarica effettiva sono compresi fra 100 e 200 mm/anno corrispondenti al 15-30% delle precipitazioni.

I dati di ricarica ottenuta sono stati verificati usando il modello MODBUD che permette di calcolare la ricarica naturale potenziale. Questo modello richiede in ingresso i dati giornalieri di precipitazione e temperatura, la porosità dell'acquifero, la quantità di acqua di ritenzione, il tipo di vegetazione e la profondità delle radici delle piante. Il modello calcola l'evapotraspirazione potenziale giornaliera sulla base delle formula di Hamon (1961) e calcola la traspirazione dell'acqua nella zona delle radici dei pini. L'output di MODBUD Marconi et al. (2008) sono l'infiltrazione potenziale e la relativa variazione del livello di falda. Questi parametri sono stati invertiti per ottenere i livelli di falda registrati durante il monitoraggio nei vari piezometri della zona (Fig. 12b). In questo modo si sono potute calibrare le proprietà del suolo quali la porosità e la ritenzione di acqua specifica. L'inversione dei dati misurati col modello mostra che la porosità dell'acquifero varia fra 0,28 e 0,35. Il livello della

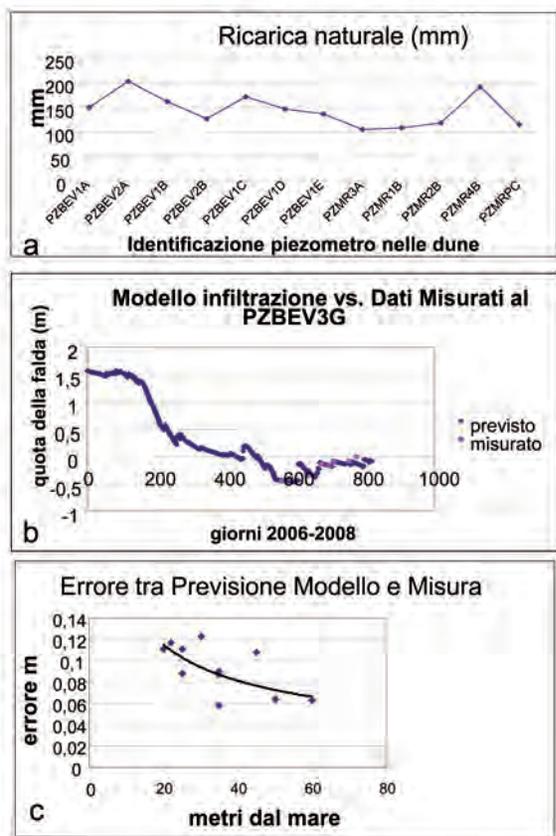


Figura 12 - (a) Ricarica media annuale calcolata per i piezometri di Marina Romea e la zona Bevano. (b) Livello di falda modellato con MODBUD (in blu) e misurato al piezometro PZBEV3G (punti in rosa) nella Pineta di Lido di Classe. (c) Scostamento fra il dato modellato e quello rilevato in funzione della distanza dal mare.

falda è direttamente correlato alle precipitazioni, mentre lo scostamento fra il dato modellato e quello misurato aumenta con la vicinanza della costa (Fig. 12c); questo è quasi certamente da imputarsi all'effetto delle maree e delle onde sul livello di falda che si risente per alcune decine di metri dalla linea della massima alta marea.

Relazione fra salinità della falda e biodiversità vegetale

Antonellini e Mollema (2010) hanno dimostrato che nelle foreste costiere e nelle zone umide vicino a Ravenna, un calo drammatico in numero delle specie vegetali avviene quando l'acqua sotterranea a contatto con le radici delle piante supera il livello soglia di 3 g/l; livello oltre il quale molte delle specie arboree vanno in crisi. L'eccezione è per le comunità di specie di *Pinus pinaster* e *Pinus pinea* che possono tollerare una salinità dell'acqua fino a 5 g/l (Fig. 13). Basandosi su studi di campagna e su una ricerca bibliografica, Antonellini e

Mollema (2010) concludono che I pini soffrono meno per la salinità dell'acqua che altre specie presenti in zona. Le loro osservazioni di campagna mostrano che quando la falda è superficiale (meno di 1 m), la biodiversità vegetale è grande ma la densità dei pini è bassa. Questo fatto suggerisce che una tavola d'acqua superficiale ha un'influenza più grande sulla salute dei pini che la siccità o la salinità dell'acqua nel sottosuolo. Antonellini e Mollema (2010) suggeriscono che la presente pratica di drenare le foreste di pini causa la salinizzazione dell'acqua sotterranea e mentre favorisce lo sviluppo dei pini essa causa anche una diminuzione della biodiversità vegetale.

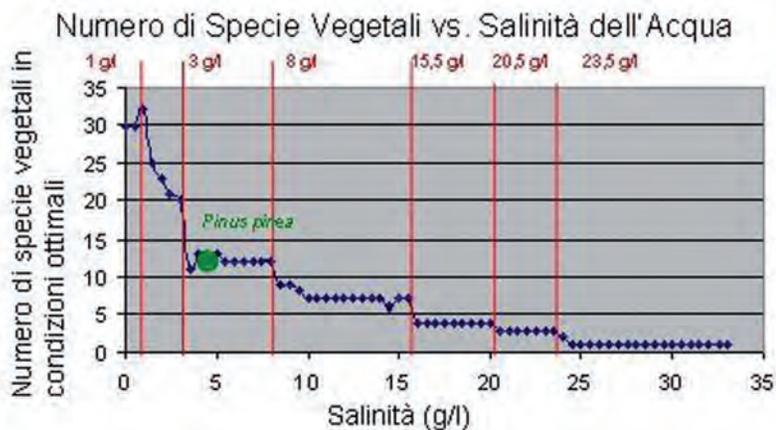


Figura 13 - Il grafico mostra il numero di specie vegetali su un totale di 39 tipiche per la zona di studio che tollerano una salinità dell'acqua sotterranea espressa sull'asse delle ascisse. Notare che I valori soglia di tolleranza per le specie vegetali si trovano a 1, 3, 8, 15,5, 20,5 e 23,5 g/l.

Area 3 - Milano Marittima

La colonia di Varese a Milano Marittima contiene un relitto di dune costiere. Tutto il primo cordone di dune a ridosso della spiaggia sia a Milano Marittima che a Cervia è stato distrutto per creare spazio a seconde case, alberghi e stabilimenti balneari.

Dal 1911 al 2003 la linea di costa adriatica è generalmente arretrata (Calabresi e Lorito, 2010) ma molti studi (Simeoni et al., 2003; Stecchi, 2009) mostrano come la costa cervese sia in progradazione o stabile, mentre la costa oltre il portocanale si trova in erosione; quest'ultima zona include Milano Marittima fino alla foce del Savio. Per contrastare questa erosione si sono costruite delle opere di difesa quali pennelli paralleli o perpendicolari alla costa come nella zona a nord del Savio o come nel resto della costa romagnola dove nel 2007 è stato eseguito un ripascimento di circa 40 m, nelle zone in erosione come Milano Marittima. Tre rilievi topografici delle dune alla colonia di Varese, che abbiamo eseguito nel gennaio 2007, giugno 2007 e gennaio 2008 (Fig. 14 e 15a e b) mostrano che l'attività erosiva non si è fermata ed il fronte della duna è già stato eroso (Rossi, 2007).

Idrogeologia delle dune a Milano Marittima

Quattro piezometri sono stati messi sulla duna della Colonia Varese (Fig. 14) per studiare il livello e la salinità della falda in relazione con le precipitazioni. Inoltre abbiamo caratterizzato la granulometria del sedimento sabbioso nella duna ed i cambiamenti nella sua topografia durante il periodo di monitoraggio fra il dicembre 2007 ed il marzo 2008 (Rossi, 2007).

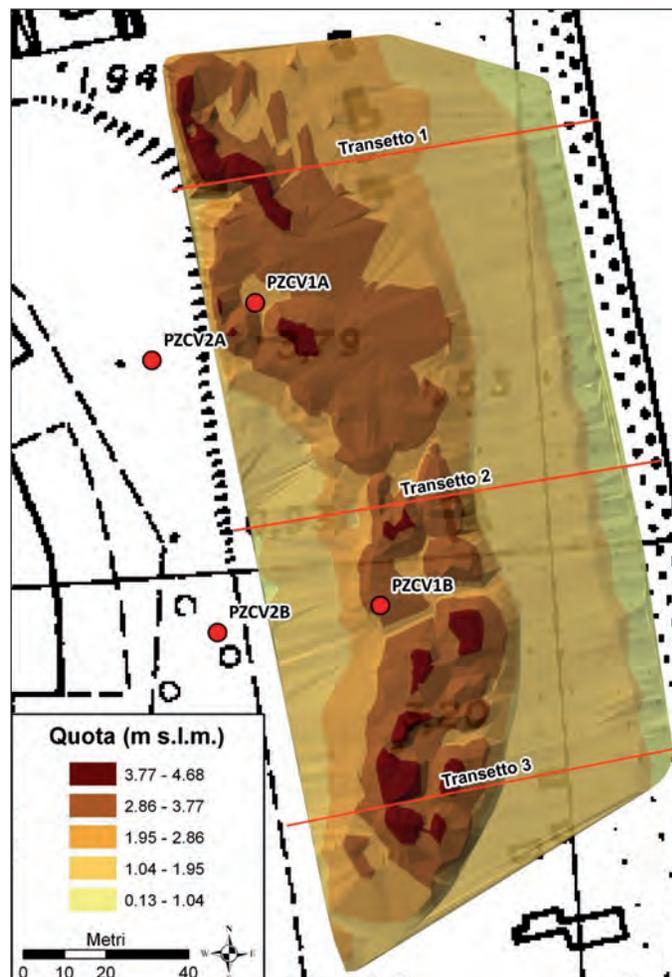


Figura 14 - Sito di Milano Marittima. Immagine LIDAR rappresentante la topografia del sito di studio e ubicazione piezometri.

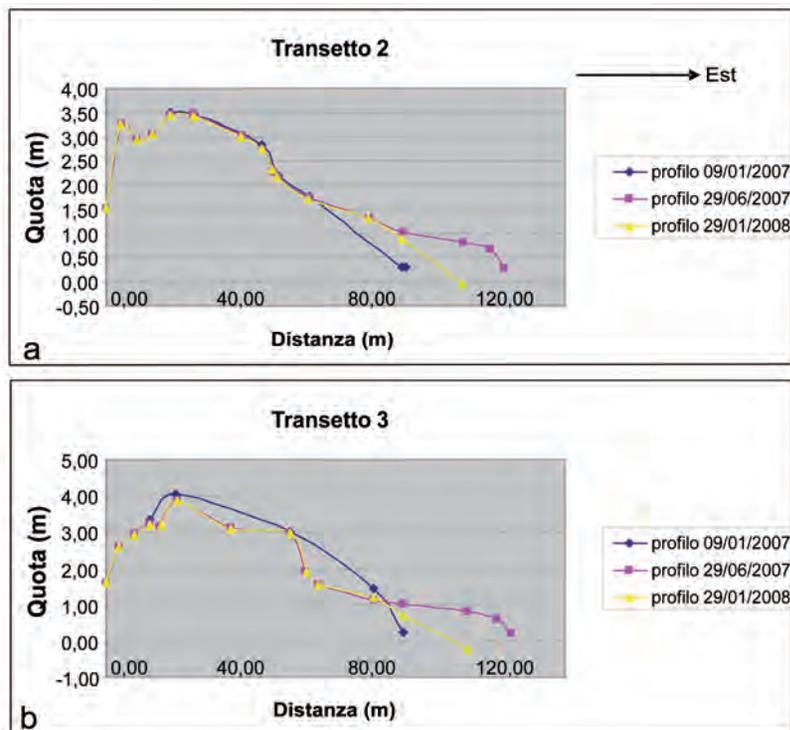


Figura 15 - (a) e (b) profili topografici a Milano Marittima.

Due dei piezometri si trovano sulla cresta della duna (PZCV1A e PZCV2A, Figg. 14 e 16) e due piezometri si trovano dietro la prima duna (PZCV2A e PZV2B). Nonostante la brevità del periodo di monitoraggio, i dati raccolti mostrano che la falda sotto la cresta della duna si comporta diversamente dalla falda nel retro duna. La tavola d'acqua misurata nel retro duna sale da -0.25 m (m.s.l.) a $+0.15$ m (m.s.l.) fra il dicembre 2007 e il marzo 2008, una differenza di $0,4$ m. Invece la tavola d'acqua sotto la cresta della duna scende da $+0,2$ m (m.s.l.) a $+0.09$ m (m.s.l.), una differenza di solo $-0,11$ m.

Nello stesso periodo la salinità misurata alla superficie della tavola d'acqua sotto la cresta della duna aumenta nel PZCV1A da 0.5 g/l fino a 6 g/l e nel PZCV1b sale dal 6.3 fino 7.5 poi scende fino a 0.5 g/l (Fig. 16). La salinità profonda nel PZCV1A sale da 0.5 g/l fino a 10 g/l e invece nel PZCV1B la salinità scende drasticamente da 11 g/l fino a 0.5 g/l (Fig. 16).

La salinità superficiale e profonda nei piezometri del retroduna, invece, non varia molto ed è sempre intorno a 0.5 g/l (Fig. 16). Queste osservazioni fatte da Rossi (2007) suggeriscono che i flussi e la concentrazione salina nell'acquifero sottostante la cresta della duna sono diversi da quelli nell'acquifero sottostante il retroduna. I dati raccolti a Marina Romea mostrano, in modo simile, che i cambiamenti nella piezometria vicino al mare sono più improvvisi dei cambiamenti nei piezometri più lontani dal mare (Fig. 6). Figura 17 riporta i diversi processi che possono giocare un ruolo nella duna vicino al mare.

Dato che la topografia della duna è moderata e la conduttività idraulica grande, le precipitazioni si infiltrano subito, si muovono rapidamente verso mare e terra in modo che la tavola d'acqua non può alzarsi più di tanto. Il retro duna, invece, nel tempo si ricarica anche con acque che provengono dalla cresta delle dune e la falda si alza di più che sotto la cresta. La Fig. 7 esemplifica questo fenomeno: l'altezza della tavola d'acqua massima nel centro dell'isola (che potrebbe rappresentare un buon modello della duna) calcolata con la relazione di Ghjben-Herzberg-Dupuit non cambia molto con la ricarica o la larghezza dell'isola; la sabbia è talmente conduttiva dal punto di vista idraulico che non sostiene una tavola d'acqua molto alta sul livello del mare. Gli sbalzi nella salinità sotto la cresta della duna possono probabilmente essere spiegati con l'acqua salata delle mareggiate che arriva sulle dune durante le tempeste invernali. Inoltre c'è anche l'effetto dello spray marino, le minute gocce d'acqua marina e aerosol che raggiungono la cresta della prima duna ed il retroduna (Fig. 17).

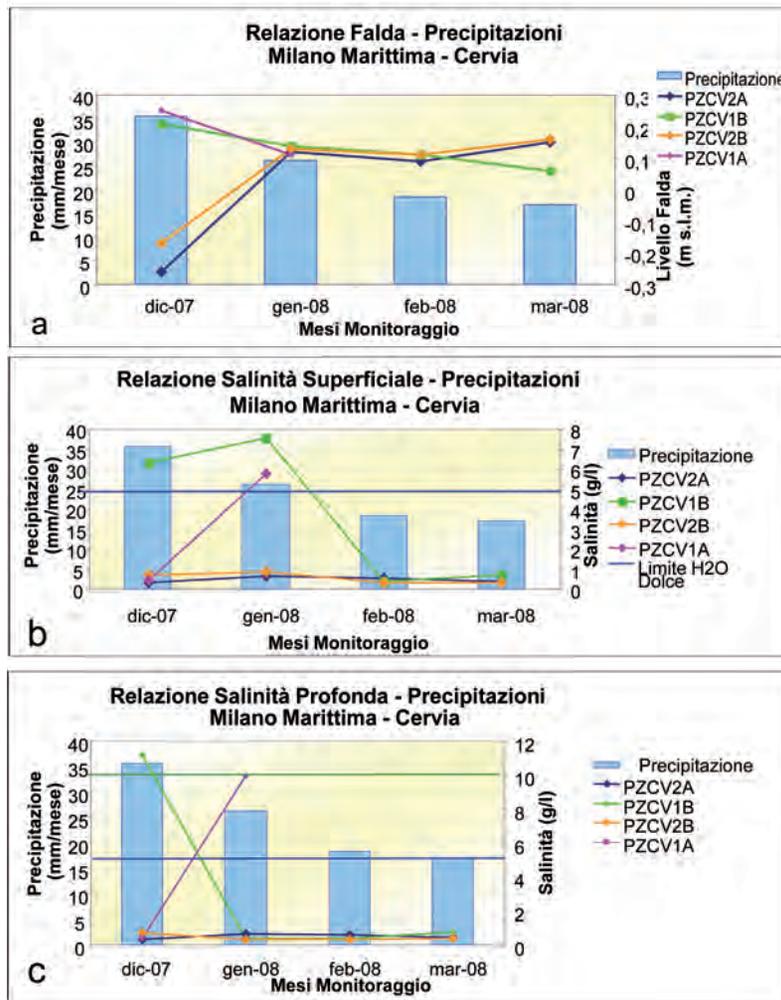


Figura 16 - (a) Livello della falda nella duna a Colonia Varese. (b) Salinità superficiale misurata alla tavola d'acqua. (c) Salinità profonda dei piezometri. In tutti i tre grafici sono riportate le precipitazioni.

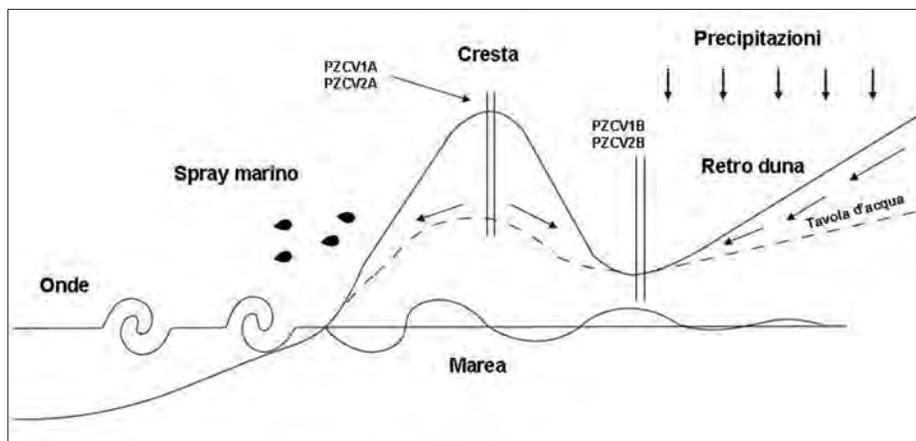


Figura 17 - Disegno schematico che raffigura i processi che avvengono sulla prima fila di dune e che contribuiscono alla salinizzazione dell'acqua sotterranea.

Discussione

Con gli studi descritti in questo articolo abbiamo individuato la presenza di lenti d'acqua dolce nelle dune della costa Adriatica dell'Emilia-Romagna e ne abbiamo studiate alcune caratteristiche. Tra queste, la più rilevante è che queste lenti sono molto variabili in spessore ed estensione durante l'anno. Inoltre, abbiamo anche appreso che le lenti si stanno evolvendo con una tendenza pluriennale indicante una loro progressiva salinizzazione. Molto rimane ancora da studiare su questi accumuli di acqua dolce nelle dune. I calcoli analitici che abbiamo fatto, ad esempio, ci danno facilmente e rapidamente una stima di quanta acqua dolce ci potrebbe essere in teoria sotto una certa duna ma non prendono in considerazione la geometria reale, le variazioni sedimentologiche, e le variazioni spaziali o la tempistica della ricarica. In questo studio abbiamo appurato che anche questi ultimi parametri sono molto importanti: le variazioni nella ricarica naturale e forse anche quella incidentale (artificiale) proveniente dall'irrigazione sono critici come importante sono le variazioni spaziali tridimensionali in forma dell'acquifero. Una situazione relativamente semplice dove non vi sono forti interazioni con acque superficiali è quella di Marina Romea dove la lente d'acqua dolce freatica è influenzata dalla vicinanza del mare e della Pialassa nonché dalla presenza del corpo sedimentario di prodelta all'interno dell'acquifero. All'altezza della foce del Fiume Bevano, invece, il prodelta non si estende tanto nell'entroterra dell'acquifero ma le dune con le lenti d'acqua dolce sono collegate per via sotterranea con una serie di acque superficiali dolci o salmastre quali cave e zone umide. Queste variazioni spaziali e la tempistica della ricarica, in teoria potrebbero essere studiati meglio con un modello numerico a doppia densità come SEAWAT in tre dimensioni (Guo e Langevin, 2002). La modellizzazione numerica di questo tipo di corpi idrici non è una cosa facile: uno dei parametri importanti da conoscere è la concentrazione salina iniziale. Il sale si sposta lentamente per avvezione e con processi di dispersione e diffusione. Le concentrazioni attuali del sale non sono ancora in equilibrio e si stanno aggiustando ai cambiamenti della linea della costa, agli spostamenti delle foci dei fiumi ed al cambiamento in uso del suolo che è iniziato centinaia di anni fa, per non parlare dei cambiamenti antropici più recenti. Per sapere, ad esempio, come si muoverà il sale nell'acqua nei prossimi 40 anni, dovremmo avere un punto di riferimento per lo stato iniziale. In altre parole dovremmo avere una distribuzione del sale misurata precisamente ad oggi. Forse siamo sulla buona strada per avere un'idea di questa distribuzione iniziale del sale, dato che abbiamo cominciato a raccogliere una notevole quantità di dati anche a livello storico. I nostri studi, però, mostrano che le variazioni stagionali sono così grandi che è difficile scegliere il punto di riferimento anche nel presente. A Marina Romea, con una lente d'acqua dolce molto contenuta ed una situazione simile a quella di un'isola oceanica, non è molto importante la conoscenza della distribuzione salina iniziale (come mostrano i risultati del modello numerico) ma per le lenti d'acqua dolce nelle altre spiagge che sono collegate con l'acquifero semi-confinato più profondo o con le acque superficiali dolci queste condizioni di concentrazione salina iniziale sono critiche. Sebbene cominciamo a capire la dinamica locale di queste lenti di acqua dolce, le tendenze su scala regionale a tempi lunghi non sono ancora studiate come pure poco compresa è la situazione della parte più profonda dell'acquifero e la sua tendenza evolutiva.

Un altro tipo di studio non ancora fatto ma che potrebbe aiutare molto a capire la provenienza delle acque saline è un'analisi geochemica del cosiddetto idrosoma o sistema idrochimico sotterraneo (Stuyfzand, 1999). Un'idrosoma è una unità coerente, tridimensionale di acqua sotterranea che ha la stessa specifica origine. Una simile divisione geochemica dei corpi d'acqua permette di scoprire l'origine e la provenienza dell'acqua, le modalità del processo di ricarica naturale, il mescolamento di diversi tipi d'acqua e l'età dell'acqua. In Olanda, Stuyfzand (1999) ha dimostrato che le fonti d'acqua per le dune costiere sono: (1) Acque sotterranee di duna costiera ricaricate direttamente dalle precipitazioni; (2) intrusione di acqua marina; (3) acqua fluviale ricaricata direttamente in falda; e (4) acque delle zone di bonifica. Queste acque di origine diversa formano degli idrosomi di età diversa che si sono accumulate in un periodo che va dagli ottomila anni fa al presente.

Nella nostra zona, oltre alla presenza di analoghi per molti di questi tipi di acque, ci sarebbe anche da considerare come origine l'acqua fluviale usata per l'irrigazione. Gattaceca et al. (2009) hanno concluso che l'acqua d'irrigazione causa un *freshening trend* (tendenza alla dolciificazione delle acque) nel Veneto; osservazione fatta anche da Marconi et al. (2010) nella nostra area di studio su scala locale e con tempistiche stagionali. Analisi di questo tipo

aiuterebbero anche a capire da dove viene e dove sta andando il sale.

Un'altra cosa non ancora completamente compresa è l'interazione fra vegetazione ed acqua di falda. Abbiamo stabilito che la vegetazione (i pini soprattutto) contribuiscono al ciclo idrologico in modo sostanziale consumando anche più della pioggia e che la salinità e il livello della falda determinano che tipo di vegetazione può sopravvivere nella zona costiera a ridosso delle dune (Antonellini e Mollema, 2010) ma altri parametri che inducono effetti nella qualità delle acque di duna come la presenza o meno di calcite nella sabbia ed il loro cambiamento nel tempo debbono ancora essere studiati (Stuyfzand, 1998).

Fino ad ora abbiamo dato per scontato che le componenti del ciclo idrologico sono conosciute e permanenti però, molto probabilmente, esse stanno cambiando a causa del riscaldamento globale (IPCC, 2007). Per esempio, l'evaporazione delle acque superficiali potrebbe aumentare a causa delle temperature più alte ma anche diminuire se il vento diminuisce e l'umidità dell'aria aumenta (Mollema et. al in press). Questo fatto influenza enormemente quanta acqua dolce rimane nel suolo.

Una delle problematiche da approfondire è quella della ricarica artificiale nelle dune costiere. Questo ci permetterebbe di usare l'acqua piovana invernale e che adesso sparisce nel mare. Quest'acqua dolce potrebbe essere usata per proteggere certi habitat come le foreste di pini, per immagazzinare acqua dolce che può poi essere usata in periodi di siccità o anche per contrastare l'intrusione salina nell'acquifero.

Conclusioni

Alcuni dei metodi usati in questo studio sono stati molto efficaci per la caratterizzazione delle dune costiere, delle loro risorse idrogeologiche e della loro tendenza evolutiva. Il LIDAR ha aiutato a stabilire in dettaglio la topografia delle dune. L'indice geochimico BEX è molto utile per stabilire se esista o meno un trend di salinizzazione a lungo termine nelle acque delle dune, cosa che non è facile fare da un semplice studio stagionale di variazione della conduttività elettrica. I modelli analitici basati sulla legge di Ghijben-Herzberg-Dupuit possono rapidamente fornirci una stima dell'acqua dolce contenuta in una duna costiera ma questa è anche fortemente influenzata da altri parametri difficili da quantificare quali le variazioni spaziali e la stagionalità della ricarica, nonché la forma tridimensionale dell'acquifero. La modellizzazione numerica aiuta a quantificare gli effetti dei diversi processi che contribuiscono alla salinizzazione ma questi sono talmente tanti che fino ad ora non è stato possibile costruire un modello completo per l'idrogeologia delle dune costiere.

Per quanto riguarda le località studiate possiamo dire che a Marina Romea la topografia ed estensione delle dune è sufficiente per formare una lente d'acqua dolce ma il drenaggio e l'evapotraspirazione sono talmente alti che lo rendono impossibile. Inoltre, in questa località la distribuzione dell'acqua salina è fortemente influenzata dalla stagionalità e non è stabile, perchè si sta ancora adattando alle modificate condizioni di uso del suolo e della costa. L'acquifero freatico a Lido di Dante e Foce Bevano mostra un trend geochimico di salinizzazione a lungo termine. Qui le lenti d'acqua dolce sono ricaricate anche dall'irrigazione nell'adiacente area agricola e le mareggiate invernali spesso provocano una salinizzazione più spinta dell'acquifero durante l'inverno.

Le dune di Milano Marittima ci hanno mostrato come la provenienza del sale nell'acqua di falda sia di origine diversa e si abbia un flusso sotterraneo di acqua dolce dalle zone in cresta alle dune verso l'entroterra.

Le dune costiere oltre ad essere una barriera naturale contro l'azione erosiva del mare sono un serbatoio d'acqua dolce che è importante per la vegetazione e per gli ecosistemi costieri. Studi futuri dovranno essere mirati ad una gestione integrata di quest'acqua dolce anche in vista della possibilità di immagazzinare nelle dune acque in surplus che poi possano essere usate nei periodi di siccità. Sarà anche molto importante caratterizzare in maggior dettaglio le interazioni fra quantità d'acqua dolce, ricarica effettiva ed uso dell'acqua da parte delle piante nelle dune costiere.

Ringraziamenti

Questo studio è in parte fatto nell'ambito del Progetto BeachMed "POSIDuNe ed in parte nell'ambito del progetto WATERKNOW, finanziato da CIRCLE-MED. Inoltre ringraziamo L' Hera di Ravenna, La Regione Emilia-Romagna, e l'Azienda Marani per condividere alcuni dati che ci hanno permesso di fare questo studio. In

particolare siamo riconoscanti al Comune di Ravenna e al Parco del Delta del Po per averci messo a disposizione il rilievo LIDAR 2003 della costa e alla Provincia di Ravenna per il DEM altimetrico della costa ravennate. Per i lavori in campagna e l'elaborazione dati siamo grati ad Andrea Minchio, Donato Capo, Laura Caruso, Beatrice Giambastiani, Nicolas Greggio, Valentina Rossi, Devarghes Savelli e Francesco Stecchi.

Bibliografia

- AA. VV. (2004) - *Master Plan del delta del Po; Regione Emilia-Romagna* - <http://www.parcodeltaipo.it/er/parco/il-master-plan/index.html>.
- Amorosi A., Colalongo M.L., Pasini G., Preti D. (1999) - *Sedimentary response to Late Quaternary sea-level changes in the Roagna coastal plain (northern Italy)*. *Sedimentology* 46: 99-121.
- Antonellini M., Minchio A., Gabbianelli G. (2007) - *L'Intrusione salina negli acquiferi costieri emiliano-romagnoli*. Atti Terzo Forum Nazionale sulla Pianificazione e Tutela del Territorio Costiero. Relazioni ad Invito. Volume 127 Collana "Ambiente e Territorio", pp. 8- 14, Maggioli Ed.
- Antonellini M., Mollema P., Giambastiani B., Banzola E., Bishop K., Caruso L., Minchio A., Pellegrini L., Sabia, M., Ulazzi E. and Gabbianelli G. (2008) - *Salt water intrusion in the coastal aquifer of the southern Po-plain, Italy*. *Hydrogeology Journal* 16 (8) 1541-1556.
- Antonellini M. and Mollema P. (2010) - *Impact of groundwater salinity on vegetation species richness in the coastal Pine forests and wetlands of Ravenna, Italy*. In press by Ecological Engineering doi:10.1016/j.ecoleng.2009.12.007.
- Balugani E. (2008)- *Caratterizzazione idrogeologica del sistema di dune tra foce Bevano e Lido di Classe*. Tesi di Laurea, Corso di Laurea in Sc. Ambientali, Università di Bologna- Campus di Ravenna.
- Balugani E. e Antonellini M.(2010) - *Measuring salinity within shallow piezometers: comparison of two field methods*. *Journal of Water Resource and Protection*, Paper ID 9401040.
- Bau' D, Gambolati G, Teatini P (2000) - *Residual land settlement near abandoned gas fields raises concern over Northern Adriatic coastland*. *EOS Trans Am Geophys Union* 81: 245-249.
- Bear J., A.H.-D. Cheng, S. Sorek, D. Ouazar, and Herrera I. (1999) - *Seawater Intrusion in Coastal Aquifers - Concepts, Methods and Practices*, in *Theory and Application of Transport in Porous Media*, edited by J. Bear, pp. 625, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Bondesan M. (1988) - *Aspetti e problemi geomorfologici del territorio deltizio padano: 2a Escursione Delta del Po*. In: Bondesan M., Elmi C., Nesci O., Dal Cin R. e Veggiani A. (a cura di), Guida alle escursioni. Gruppo Nazionale di Geografia Fisica e Geomorfologia, riunione annuale: Riccione - Delta del Po, 21-24 giugno 1988: 31-58.
- Calabrese L. e Lorito S. (2010) - *Geomorfologia costiera*, in *Il Sistema Mare-Costa dell'Emilia-Romagna*, a cura di L. Perini e L. Calabrese, Pendragon.
- Carbognin L., Tosi L. (1995) - *Analysis of actual land subsidence in Venice and its hinterland (Italy)*. In: *Land subsidence*. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp 129-137.
- Carminati E., Dogliosi C., Scrocca D. (2005) - *Magnitude and causes of natural subsidence of Venice*. In: Fletcher C Spencer T (eds) *Flooding and environmental challenges for Venice and its lagoon*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 21-28.
- Ciabatti M. (1968) - *Ricerche sull'evoluzione del Delta Padano*. *Giornale di Geologia*, XXXIV: 318- 410.
- Ciavola, P., Billi, P., Armaroli, C., Preciso, E., Salemi, E. e Balouin, Y. (2005) - *Valutazione della morfodinamica di foce del Torrente Bevano (RA): il ruolo del trasporto solido di fondo*. *Geologia Tecnica ed Ambientale*, pp. 41-57.
- Fetter C W (2001) *Applied hydrogeology*, 4th edn. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, USA.
- Gabbianelli G. e Antonellini M. (2007) - *Scenari di adattamento ai Cambiamenti Climatici negli usi della risorsa idrica in ambito costiero*. Atti Conferenza "Cambiamenti climatici e ambiente marino – costiero: scenari futuri per un programma nazionale di adattamento", Palermo. http://www.conferenzacambiamenticlimatici2007.it/site/it/Sezioni/workshop_e_convegni/Live/presentazioni/workshoppalermo.html

- Gabbianelli G., Antonellini M., Mollema M., Minchio A., Stecchi F., Balugani E., Savelli D. (2008) - *Caratterizzazione idrologico-idrogeologica delle dune costiere ravennati*. Atti Convegno "BeachMed in Emilia. Romagna: i risultati". pp. 45-48, Bologna.
- Gardelli, M., Caleffi, S., Ciavola, P. (2007) - *Evoluzione morfodinamica della foce del Torrente Bevano*, Studi Costieri, 13: 53-74.
- Gattacceca J. C., Vallet-Coulomb C., Mayer A, Claude C., Radakovitch O, Conchetto E, Hamelin B. (2009) *A Isotopic and geochemical characterization of salinization in the shallow aquifers of a reclaimed subsiding zone: The southern Venice Lagoon coastland* Journal of Hydrology 378: 46-61.
- Giambastiani B.M.S., Antonellini M., Oude Essink G.H.P., Stuurman R. J. (2007) - *Salt water intrusion in the unconfined coastal aquifer of Ravenna (Italy): a numerical model*. Journal of Hydrology 340: 94-104.
- Guo W. and Langevin C. D. (2002) - *User's Guide to SEAWAT: A computer program for simulation of three dimensional variable-density ground water flow*: Techniques of Water-resources investigations Book 6, Chapter A7, 77pp.
- Hamon W.R. (1961) *Estimating Potential Evapotranspiration*, Journal of the Hydraulics Division, ASCE. 87(HY3):107-120.
- Herzberg A. (1901) - *Die Wasserversorgung einiger Nordseebaeder* [The water supply of selected North Sea towns]. Z F Gasbeleucht Wasserversorg 44: 815-844.
- IPCC (2007) - *Climate Change 2007, the Fourth IPCC Assessment Report*. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/index.htm>
- Laghi M., Mollema P. and Antonellini A. (2010) - *The influence of river bottom topography on salt water encroachment along the Lamone River (Ravenna, Italy), and implications for the salinization of the adjacent coastal aquifer*. proceedings of 2010 World Environmental & Water Resources Congress in Providence, Rhode Island, May 16-20, 2010.
- Laghi M. (2010) - *L'interazione tra acque fluviali superficiali e acque sotterranee in zona costiera: il sistema dell'estuario del fiume Lamone*. Tesi di Dottorato, Università di Bologna.
- Lerner, D.N., Issar, A.S. and Simmers I., (1990) - *Groundwater recharge: a guide to understanding and estimating natural recharge*, vol. 8. International Contributions to Hydrogeology. Verlag Heinz Heise, Hannover
- Mao X., Enot P., Barry D.A., LI L., Binley A., Jeng D.-S. (2006) - *Tidal influence of a coastal aquifer adjacent to a low relief estuary*. Journal of Hydrogeology 327: 110-127.
- Marconi V., Antonellini M., Laghi M, Minchio A., Savelli D. (2008) - *A water table fluctuations model in sandy soil below a coastal pine forest* Geophysical Research Abstracts, Vol. 10, EGU2008-A-00000.
- Marconi V., Antonellini M., Balugani E., Dinelli E. (2010) - *Hydrogeochemical Characterization of Small Coastal Wetlands and Forests in the Southern Po Plain (Northern Italy)*. Submitted manuscript.
- Mollema P. N., Antonellini M., Minchio A., Giabbianelli G. (2008) - *Studio 3D dell'intrusione salina nelle dune a nord di Ravenna: monitoraggio e modellizzazione usando dati LIDAR e SEAWAT*. IN: Coste Prevenire, Programmare, Pianificare. Atti del Convegno Maratea 15-17 maggio 2008. No. 9 Collane dell'autorità del bacino basilicato. <http://www.adb.basilicata.it/adb/pubblicazioni/vol9/saggi/639.pdf>
- Mollema P. N., Antonellini A., Gabbianelli G., Galloni E. and Oude Essink G.H.P. (2010) - *Pine tree water use and artificial drainage in a Mediterranean catchment (Marina Romea, Ravenna, Italy)*. Submitted manuscript.
- Nielsen P. (1990) - *Tidal Dynamics of the Water Table in Beaches*. Water Resources Research 26, no. 9: 2127-34.
- Oude Essink G. H. P. (2001) - *Density Dependent Groundwater Flow: Salt Water Intrusion and Heat Transport* Lecture Notes Utrecht University Interfaculty Centre of Hydrology Utrecht Institute of Earth Sciences Department of Geophysics.
- Regione Emilia Romagna (2002) - *Carta Geologica d'Italia scala 1: 50.000* - Foglio 223, Ravenna.
- Regione Emilia Romagna (2008) - *BeachMed in Emilia. Romagna: i risultati*. Stampa Tipografia Moderna, Bologna. http://www.ermesambiente.it/wcm/difesauolo/news/2008/News02/BEACHMED-e_in_ER_def_LQ.pdf

- Regione Emilia-Romagna (2009) - *Foce Bevano, l'area naturale protetta e l'intervento di salvaguardia*. Pubblicazione a cura del Servizio Difesa del Suolo della Costa e Bonifica. 56 pp.
- Repubblica (2006) - *Il sale invade il delta del Po. Acqua dolce per fermarlo*. 29 giugno 2006 pagina 31 sezione: CRONACA
- Rossi V. (2007) - *Analisi ed evoluzione a breve medio termine del sistema costiero di Cervia e dintorni*. Tesi di laurea in geologia Marina Applicata, Università di Bologna.
- Scheidleger A., Grath J., Lindinger H. (2004) - *Saltwater intrusion due to groundwater over-exploitation-EEA inventory throughout Europe*. In: 18th Salt Water Intrusion Meeting, Cartagena, Spain, pp. 125
- Simeoni U., Del Grande C. e Gabbianelli G. (2003) - *Variazioni ed ipotesi evolutive dell'assetto altimetrico del litorale emiliano-romagnolo*. Studi costieri, 7: 81-93.
- Stuyfzand P.J. (1986) - *New hydrochemical classification of watertypes: principles and application to the coastal dunes aquifer system of the Netherlands*. In: Proceedings 9 Salt water Intrusion Meeting: Delft 12-16 May 1986: 641-655.
- Stuyfzand P.J. (1989) - *Quality changes of River Rhine and Meuse water upon basin recharge in the Netherlands' coastal dunes: 30 years of experience*. In: Johnson, A.I. and Finlayson, D.J. Editors, 1989. *Artificial Recharge of Groundwater* American Society of Civil Engineering, pp. 235-247.
- Stuyfzand P. J. (1998) - *Decalcification and acidification of coastal dune sands in the Netherlands*. Water-Rock Interaction, Proc. 9th Intern. Symp. on WRI, Taupo New Zealand, G.B. Archart & J.R. Hulston (eds), Balkema, pp. 79-82.
- Stuyfzand P.J. (1999) - *Patterns in groundwater chemistry reflecting groundwater flow*. Hydrogeol. J. 7, Theme issue 'Groundwater as a geologic agent', J. Tóth (ed), Hydrogeology J. (7): 15-27.
- Stuyfzand P.J. (2008) - *Base exchange indices as indicators of salinization or freshening of (coastal) aquifers*. In *Proceedings 20 Salt water Intrusion Meeting: Naples FL USA, 23-27 June 2008*
- Teatini, P., Tosi, L., Strozzi, T., Carboognin, L., Wegmüller, U., Rizzetto, F., (2005) - *Mapping regional land displacements in the Venice coastland by an integrated monitoring system*. Remote Sensing of Environment (98) 403-413.
- Teatini P., Ferronato M., Gambolati G., Gonella M. (2006) - *Groundwater pumping and land subsidence in the Emilia-Romagna coastland, Italy: modeling the past occurrence and the future trend*. Water Resources Research 42: 1-19.
- Teobaldelli M., Mencuccini M., and Piussi P. - (2004). *Water table salinity, rainfall and water use by umbrella pine trees (Pinus pinea L.)* Plant ecology 171: 23-33.
- Ulazzi E., Antonellini M., Gabbianelli G. (2007) - *Saltwater intrusion in a unconfined aquifer: the case study of Cervia (North Adriatic sea, Italy)*. In: P. Meire et. al. (eds), *Integrated Watermanagement: Practical Experiences and case Studies*, Springer, pp. 295-308.
- Vacher H.L. (1988) - *Dupuit-Ghyben-Herzberg analysis of strip-island lenses*. Geological Society of America Bulletin 100: 580-591.

Ricevuto il 31/03/2010 , accettato il 22/07/2010.